



IBPSA

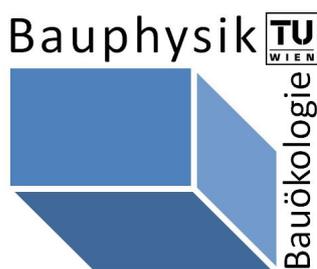
BauSIM

2010

A. Mahdavi • B. Martens (eds.)



Building Performance Simulation in a Changing Environment



Proceedings of the Third German-Austrian IBPSA
Conference • Vienna University of Technology
September 22-24, 2010

A. Mahdavi • B. Martens (eds.)

Building Performance Simulation in a Changing Environment

Impressum

Editors

Ardeshir Mahdavi
Bob Martens

Conference Host

Vienna University of Technology
Department of Building Physics and Building Ecology
Karlsplatz 13 (259.3)
A-1040 Vienna, Austria
www.bpi.tuwien.ac.at

ISBN 978-3-85437-317-9

Preface

BAUSIM conferences constitute the bi-annual symposia of the Germany-Austria chapter of IBPSA (International Building Performance Simulation Association). The BAUSIM 2010 (22. – 24. September) is hosted by the Department of Building Physics and Building Ecology, Vienna University of Technology, Vienna, Austria.

Conference theme

Reliable predictions of buildings' performance is an essential prerequisite of a productive and dependable building design process. In this context, the development and the timely application of computational building performance simulation tools is an established area of research in building-related disciplines and professions (such as architecture, civil engineering, mechanical engineering, and environmental physics). However, there are still sustained efforts needed to fully integrate building performance simulation in the practice of building design and operation. The critical importance of such efforts has become even more evident, given a number of recent developments and discussions that highlight the urgency of increased eco-efficiency in building construction and maintenance. The BAUSIM 2010 conference theme ("Building Performance Simulation in a Changing Environment") makes reference to some of these developments, including environmental challenges such as climate change and urban heat islands as well as occupancy-related issues pertaining to indoor climate, thermal and visual comfort, productivity, and the ability to control buildings' environmental systems. These challenges further highlight the significance of tools and processes for better building design and operation. Toward this end, improving the fidelity and accountability of the building delivery process via the development and application of increasingly versatile building performance simulation tools represents an essential opportunity and a major responsibility for the building performance simulation community.

Proceedings

The BAUSIM 2010 call for abstracts resulted in a large number of promising submissions, with the following topical distribution:

- . Advances in building physics 8,8%
- . Air flow simulation, room air quality 3,8%
- . Thermal comfort in rooms 14,1%
- . Thermal behavior 11,4%
- . Building codes and regulations 10,8%
- . Resource requirements of buildings, life-cycle assessment 3,8%
- . HVAC simulation, building control and optimization 11,9%
- . Solar energy systems, thermal storage 1,6%
- . Renewable energy resources, geothermics 2,2%
- . Lighting and acoustics 4,4%
- . Simulation tools and applications for sustainable building design 20,7%
- . Integration, interoperability Internet-based techniques 1,1%
- . Software development, open source initiatives 3,8%
- . Advances in teaching and education, eLearning 1,6%

Subsequent to the abstract review process, nearly 100 full papers were submitted, both in German (57 %) and in English (43 %). Participants from approximately 20 countries registered to attend the conference. Their contributions to the conference – as indicated by the present book of the abstracts and the conference proceedings – are witness to the high quality and creativity of research and development efforts in the building performance simulation community.

Ardeshir Mahdavi & Bob Martens

Scientific Committee

Co-chairs

Prof. Dr. Ardeshir Mahdavi
Prof. Dr. Bob Martens

Executive scientific committee

Prof. Dr.-Ing. M. Bauer (FH Augsburg)
Prof. Dr.-Ing. C. Felsmann (TU Dresden)
Prof. Dr.-Ing. J. Grunewald (TU Dresden)
Prof. Dr.-Ing. W. Haupt (HS Coburg)
Dipl.-Ing. S. Herkel (Fraunhofer ISE)
Dr.-Ing. A. Holm (Fraunhofer IBP)
Prof. Dr.-Ing. A. Maas (Univ. Kassel)
Prof. Dr.-Ing. D. Müller (RWTH Aachen)
Prof. Dr.-Ing. C. Nytsch-Geusen (Univ. d.K. Berlin)
Prof. Dr.-Ing. K. Sedlbauer (Univ. Stuttgart)
Tekn. Dr. D. Schmidt (Fraunhofer IBP)
Dr.-Ing. C. van Treeck (TU München)

Local organizing committee

Dipl.-Ing. Dr. Kristina Orehounig
Dipl.-Ing. Dr. Claus Pröglhöf
Dipl.-Ing. Matthias Schuß
Elisabeth Finz
Joseph Lechleitner
Ulrich Pont

Contents

Session-01: Thermal Performance Simulation	1
Considerations on the energy performance of a building 1 Moga, Ligia Mihaela; Moga, Ioan	
Coupling TRNSYS and MATLAB for genetic algorithm optimization in sustainable building design 9 Jones, Marcus	
Usability evaluation of a prototype design tool for uncertainty propagation and sensitivity analysis 15 Struck, Christian; Hensen, Jan	
Exploring the availability and usability of web-based building performance simulation tools 23 Cetin, Rukiye; Mahdavi, Ardeshir	
A generic model for energy assessment of a detached family house 29 Rabenseifer, Roman	
Session-02: Thermische Gebäudesimulation	33
Interaktive Simulation transienter Wärmetransportprozesse in und an Gebäuden 33 Bindick, Sebastian; Stiebler, Maik; Krafczyk, Manfred	
Vergleich von thermischen Gebäudesimulationsmodellen für die Anwendung an Doppelfassaden 39 Hinrichs, Jan Peter	
Modellierung eines Büroraumes mit multifunktionaler Fassade 42 Waser, Martin Alexander; Schranzhofer, Hermann; Heimrath, Richard; Mach, Thomas; Streicher, Wolfgang; Zauner, Christoph; Rennhofer, Marcus; Wascher, Heinz; Mueller, Mario J.	
Gesamtenergieeffizienz von Bürobauten mit tiefem U-Wert 50 Plüss, Iwan; Menti, Urs-Peter; Gadola, Reto; Menard, Martin	
Systematische Untersuchung von Sanierungsmaßnahmen für Wohngebäude der 50-er und 60-er Jahre 55 Osterhage, Tanja; Cali, Davide; Müller, Dirk	
Session-03: Gebäude und Klima	60
Das Klima als Entwurfsmittel: Simulationen im architektonischen Entwurf 60 Menti, Urs-Peter; Mattli, Serge; Plüss, Iwan; Hoenger, Christian; Struck, Christian	
Neue Monte-Rosa-Hütte: Simulationen für eine energieautarke Alpenhütte 66 Menti, Urs-Peter; Plüss, Iwan; Sulzer, Matthias	

Einfluss des Mikroklimas auf das energetische und thermische Verhalten von Gebäuden am Beispiel des Standortes Kassel	71
Schneider, Andrea	
Kombinierte Stadtklima- und Gebäudeenergiemodellierung zur Bestimmung des Energiebedarfes von urbanen Gebäude	79
Ali-Toudert, Fazia	
Session-04: Thermal Retrofit: International Case Studies	86
Empirical and computational study of the thermal performance of a traditional housing type in Kosovo	86
Rexhepi, Albana; Mahdavi, Ardeshir	
A study into the thermal performance of low-rise office buildings in Ghana	92
Koranteng, Christian; Mahdavi, Ardeshir	
Building energy performance simulations of the residential houses in a mediterranean climate: A case study for Bodrum, Turkey	100
Karasu, Arda; Steffan, Claus	
Simulation-based assessment of energy and environmental performance of office buildings in Lebanon	107
Alameddine, Zeinab; Mahdavi, Ardeshir	
A computational case study of the thermal improvement potential of residential buildings in Tehran	113
Dara, Mohammad Reza; Wossugh, Dariusch; Mahdavi, Ardeshir	
Session-05: Simulation Thermischer Systeme I	118
Gekoppelte Gebäude- und Anlagensimulation mit MODELICA	118
Müller, Dirk	
Untersuchungen zum Einsatz von Verdunstungskühlung innerhalb eines hybriden Lüftungskonzeptes	123
Kozak, Wojciech; Perschk, Alf; Rösler, Markus	
Kombination von Latentwärmespeichern mit Solarthermie	131
Leonhardt, Corinna; Müller, Dirk	
Numerische Simulationsberechnungen zur Erdwärme- und Grundwassernutzung	136
Adam, Dietmar; Markiewicz, Roman	
Ganzjährige Nutzung von Erdwärmesonden zum Heizen und Kühlen von Gebäuden mit Reversibler Wärmepumpe oder Kompressionkältemaschine	142
Pesch, Ruben; Cotrado, Mariela; Martin, Maximilian; Pietruschka, Dirk; Eicker, Ursula	
Session-06: Thermischer Komfort I	150
Entwicklung eines Gesamtkonzeptes für den Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes	150
Schlitzberger, Stephan; Maas, Anton	
Skalen-Adaptive Simulation thermischer Behaglichkeit in Innenräumen	152
van Treeck, Christoph; Frisch, Jérôme; Rank, Ernst; Paulke, Stefan; Schweinfurth, Iris; Schwab, Rudolf; Holm, Andreas	

Simulation lokaler Strahlungstemperatursymmetrien in Innenräumen	158
Frisch, Jérôme; van Treeck, Christoph; Grahovac, Milica; Liedl, Petra (4); Mundani, Ralf-Peter; Pfaffinger, Michael; Tzscheuschler, Peter; Rank, Ernst	
Auswirkungen der Bewertung des Thermischen Komforts im Sommer nach EN 15251 auf die bekannten Regeln zur Optimierung des Sommerlichen Wärmeschutzes	164
Ax, Lydia; Dietrich, Udo	
Simulation eines innovativen Sonnenschutzsystems vom Gebäude der HS Rosenheim im Rahmen des Solar Decathlon	171
Maderspacher, Johannes	
Session-07: Design, Monitoring, Validation	175
Integrating energy simulation in the early stage of building design	175
Madrazo, Leandro; Massetti, Marco; Font, Glòria; Alomar, Inés	
Thermal building simulation with MapleSim	183
Bauer, Martin; Susilo, Adhi	
Monitoring for simulation validation	190
Zach, Robert; Mahdavi, Ardeshir	
Monitoring and simulating a private house	196
Arsan, Zeynep; Sökmen, Nihal	
Session-08: Simulation Thermischer Systeme II	203
Simulation einer prädiktiven Raumtemperaturregelung unter Verwendung einer idealen Wettervorhersage	203
Görtler, Gregor; Beigelböck, Barbara	
Die Gebäudehülle als aktives Bauteil: Optimierung der Interaktion von Gebäudetechnik und Sonnenschutzsteuerung	209
Seerig, Axel; Sagerschnig, Carina; Dietrich, Christian	
Energiesparpotenzial eines Passivhauses unter Berücksichtigung von Wetterprognosen	216
Hettfleisch, Christian; Ledinger, Stephan; Zucker, Gerhard	
Simulationsvergleich von Pelletskesselmodellen	222
Huber-Fauland, Heike; Wertz, Dietrich; Ponweiser, Karl; Haider, Markus	
Queen – Ein Tool zur Evaluierung Innovativer Gebäude- und Anlagenkonzepte auf Basis Dynamischer Simulation	228
Dubisch, Florian; Markus, Brychta; Stift, Florian	
Session-09: Thermischer Komfort II	234
Simulation der thermischen Behaglichkeit	234
Völker, Conrad; Kornadt, Oliver	
Thermische Behaglichkeit und Energieaufwand bei Flächenheizungen in Bürogebäuden	241
Behrendt, Benjamin; Olesen, Bjarne; Mattarolo, Lorenzo	
Integration von low-e-oberflächen und kurzweilliger Solarstrahlung in die Komfortberechnung mit TRNSYS 17	247
Aschaber, Johannes; Hiller, Marion; Dillig, Marius	

Dynamisch-thermische Simulationen als ein Baustein in der Bewertung der wahren Energieeffizienz von Gebäuden 254
Ampenberger, Andreas

Session-10: Ventilation and Comfort 262

An application of building simulation techniques to the assessment of natural ventilation in office with double skin facade 262
Janak, Milan; Moravcikova, Katarina

Simulation-assisted space cooling in existing buildings: A case study 268
Pröglhöf, Claus; Schuss, Matthias; Orehounig, Kristina; Mahdavi, Ardeshir

Overheating problem in single family passive house 274
Mlakar, Jana; Štrancar, Janez

About uncertainties in simulation models for building systems control 281
Orehounig, Kristina; Schuß, Matthias; Pröglhöf, Claus; Mahdavi, Ardeshir

Architectural design optimization for energy efficiency using mixed-mode system: tracing challenges and opportunities in a warm-humid climatic context 287
Agrawala, Sanyogita Manu; Kumar, Satish

Session-11: CFD 294

Messtechnische und simulationsbasierte Analysen an einem thermischen Modellhaus 294
Nytsch-Geusen, Christoph; Ljubijankic, Manuel; Schmidt, Michael; Unterberg, Daniel

Strukturbildung in Realitätsnahen Innenräumen 300
Kandzia, Claudia; Müller, Dirk

Aeroelastische Untersuchungen einer Dachstruktur 304
Hagenah, Bernd; Helmut, Steiner

Untersuchung der Ursachen für Raumklimaprobleme in einer Schwimmbadhalle mittels CFD-Simulation 311
Šikula, Ondřej; Ponweiser, Karl

CFD-Strömungssimulation zur Sicherstellung eines behaglichen und energieeffizienten Schwimmbadbetriebs 316
Klein, Mirko; Garrecht, Harald

Session-12: Nutzungsaspekte - User Issues 324

Möglichkeiten und Grenzen bei der Modellierung von Einflussfaktoren auf die menschliche Leistungsfähigkeit 324
Urlaub, Susanne; Hellwig, Runa; van Treeck, Christoph; Sedlbauer, Klaus

The double blind evaluation of a comprehensive window opening model 331
Haldi, Frédéric; Robinson, Darren; Pröglhöf, Claus; Mahdavi, Ardeshir;

Monitoring des Wärmeverbrauchs in Wohngebäuden zur Analyse des Nutzerverhaltens in Wohngebäuden im Scharnhauser Park 337
Strzalka, Aneta; Huber, Martin; Pietruschka, Dirk; Eicker, Ursula

The impact of occupants' behaviour on urban energy demand	343
Haldi, Frédéric; Robinson, Darren	
Simulationsbasierte Evaluierung von Gebäudedesign im Bezug auf die geplante Nutzung	349
Emrich, Stefan; Bruckner, Martin; Zerlauth, Sanja; Tauböck, Shabnam; Funovits, Julia; Popper, Niki; Srećkovic, Marijana; Wiegand, Dietmar; Breitenecker, Felix	
Session-13: Systems Simulation	356
Visualisation of thermodynamics and energy performance for complex building and HVAC system simulation	356
Ledinger, Stephan; Jones, Marcus	
Thermal inertia for small scale residential building	361
Verbeke, Stijn	
Simulations on solar-assisted heat pump heating systems	369
Ruschenburg, Jörn; Herkel, Sebastian; Henning, Hans-Martin	
Predictive model-based control of ventilation, lighting, and shading systems in an office building	377
Schuß, Matthias; Pröglhöf, Claus; Orehounig, Kristina; Dervishi, Sokol; Müller, Mario; Wascher, Heinz; Mahdavi, Ardeshir	
HVAC system energy optimization in indoor swimming pools	385
Ribeiro, Eliseu; Jorge, Humberto; Quintela, Divo	
Session-14: CFD und Energie	391
Computational Fluid Dynamics mit Open-Source-Software Reif für die Hochschule? Reif für die Praxis?	391
Haupt, Wolfram; Herrmann, Philip	
TRNSYS 17: Neuerungen und Anwendung der IEA Bestest Multi-Zone non-airflow in-depth diagnostic cases MZ320 – MZ360	396
Frenzel, Christian; Hiller, Marion	
Erstellung eines isothermen, zonalen Modells mit Impulserhaltung	403
Norrefeldt, Victor; Nouidui, Thierry; van Treeck, Christoph; Grün, Gunnar	
Dynamische exergetische Analyse von Gebäuden anhand der Gesamtsystem-simulation in der objekt-orientierten Programmiersprache Modelica	409
Badakhshani, Azadeh; Müller, Dirk	
Entwicklung und Validierung eines Modells zur energetischen Modernisierung des Deutschen Museums	414
Schmidt, Simon; Göttig, Roland; Dieterich, Silke; Hoppe, Michaela	
Session-15: Users, Climate, Standards	420
Urban streetscapes responding to changing climate conditions - Effects of street layout on thermal exposure	420
Loibl, Wolfgang; Jäger, Andreas; Knoflacher, Markus; Koestl, Mario; Zueger, Johann	
PassivHaus and PHPP – Do continental design criteria work in a Welsh climatic context?	428
McLeod, Robert S.; Hopfe, Christina J.; Rezgui, Yacine	

The impact of user and system assumptions on energy simulation results	435
Kiesel, Kristina; Orehounig, Kristina; Mahdavi, Ardeshir	
Window area in office buildings from the viewpoint of energy efficiency	441
Nasrollahi, Farshad	
Performance based rating and energy performance benchmarking for commercial buildings in India	447
Kumar, Satish; Sarraf, Saket; Seth, Sanjay; Pandita, Sameer; Walia, Archana; Kamath, Madhav; Deshmukh, Aalok	
Session-16: Fallstudien	455
Technische Bestandsbewertung mit der Faktorenmethode nach ISO 15686 unter Verwendung von Simulation	455
Bauer, Martin; Brandmair, Matthias	
Anforderungen an den Ökobilanziellen Vergleich verschiedener Bauweisen am Beispiel eines 1-2 Familienhauses	459
Löwe, Katrin; Albrecht, Stefan; Wittstock, Bastian; Fischer, Matthias; Sedlbauer, Klaus	
Simulierte Tageslichtwirkung im Rahmen virtueller Synagogenrekonstruktionen	467
Martens, Bob; Peter, Herbert	
Eine Fallstudie zur Genauigkeit raumakustischer Simulationsergebnisse	474
Lechleitner, Josef; Andralis, Alexandros; Mahdavi, Ardeshir	
Session-17: Lighting Simulation	482
An investigation into the achievable energy savings provided by low energy lighting systems and the corresponding levels of visual comfort	482
Price, Alexander K.; Hopfe, Christina J.; McLeod, Robert S.	
Assessment of the energy savings potential of daylight utilization and its impact on a building energy performance	489
Bernardo, Hermano; Leitão, Sérgio; Neves, Luís; Rodrigues, Paulo	
A simple method for the derivation of illuminance values from radiance data	495
Dervishi, Sokol; Mahdavi, Ardeshir	
Exploring the potential of game engines for real-time light simulation	499
Fersch, Peter; Di Angelo, Monika; Suter, Georg	
Interactive virtual model of building management control: The lighting system	505
Sampaio, Alcínia Zita; Ferreira, Miguel M.; Rosário, Daniel P.	
Session-18: Normen und Kennzahlen	509
Energiekennzahlen und Energieausweis in Österreich	509
Rückblick – Überblick – Ausblick	
Pöhn, Christian; Pommer, Georg	
Ein Vergleich der Ergebnisse von stationärer und instationärer Berechnung thermischer Energiekennzahlen anhand bestehender Objekte in Wien	515
Pont, Ulrich; Sommer, Bernhard; Mahdavi, Ardeshir	
Einfaches Norm-Simulationstool zur Berechnung der operativen Temperatur in einem Raum	523
Bednar, Thomas; Pöhn, Christian	

Validierung energetischer Gebäudesimulationsmodelle mit der VDI 6020 529
Schöpfer, Teresa; Antretter, Florian; van Treeck, Christoph; Frisch, Jérôme; Holm, Andreas

Euro-Glaser unter Beachtung solarer Strahlungs-/ Absorptionsbedingungen sowie druckinduzierter Feuchteinträge im Vergleich zu dynamischen Simulationen 535
Nusser, Bernd; Bednar, Thomas; Teibinger, Martin

Kennzeichnung der Energiebilanz von Fassaden- und Dachflächenfenstern 542
Schlitzberger, Stephan; Philipson, Bruno

CONSIDERATIONS ON THE ENERGY PERFORMANCE OF A BUILDING

Ioan Moga, Ligia Moga

Department of Physics of Constructions, Faculty of Civil Constructions, Technical University of Cluj-Napoca, Room 215, 25 Baritiu Street, zip 400027, Cluj-Napoca, Romania

ioan.moga@cif.utcluj.ro, ligia.moga@cif.utcluj.ro

ABSTRACT

Similar to the mechanical behavior of the resistance structure of a building which is completely characterized by the stiffness matrix of the structure, the thermal performance of a building is fully characterized by the matrix of thermal coupling coefficients of the functions in a building and matrix of air exchanges between the functions in that building. Determination of thermal coupling matrix is made in accordance with EN ISO 10211:2007 standard, based on spatial temperature field in thermal stationary regime, inferred for a spatial network that includes the building and the ground on which the building is located. The vertical planes that are sectioning the land around the building are considered at a distance of $2.5 \times$ width of a building on all sides and in the soil to a depth of 7 m. The paper will present a method for the calculus of the energy performance of buildings that uses the above mentioned matrixes.

INTRODUCTION

The paper presents numerical results obtained for a block of flats situated in the town of Cluj Napoca (IIIrd climatic zone $\Theta_e = -18^\circ\text{C}$), having a prefabricated structure and a system of height GF+4F. The study was made on 3 variants of thicknesses for the thermal insulation layer placed on the exterior face of the exterior walls (10 cm, 12 cm and 15 cm expanded polystyrene). Only the results obtained for the maximum thickness will be presented.

The building has 2 staircases and a basement level below the entire building. Each level has 2 apartments, with 3 rooms at ground floor and at the last level, 3 and 4 rooms at levels 1, 2 and 3, kitchen, bathroom, toilet service and vestibule. Apartments at upper levels are provided with balconies. The building has interior walls of 14 cm thickness din beton armat and exterior walls made of big prefabricated panel of 27 cm thick. The prefabricated closing panel of the building has a constructive solution formed of three layers, with a thermal protective layer of 12.5 cm thick made of

ACC. The height level of the building of 2.70 m is constant, the terrace is thermally insulated with expanded slag with an average thickness of 30 cm. The building has an east-west orientation with the main facade south orientated.



Figure 1 The studied building

THE CALCULUS PROGRAM

General considerations

The thermal coupling coefficients matrix is established for each function of the building (apartment, staircase, basement), and in an apartment for each functional area of the apartment, whether or not there exist heating bodies. This matrix includes terms that capture the heat exchange with the exterior, the heat exchanges between the functional areas of the building, the heat exchanges between the functional areas of an apartment and the

heat exchanges between the functional areas of the apartment with functional spaces of the adjacent apartments.

The matrix of air exchanges is determined for exchanges between the functional areas of the apartment and the exterior, between the functional areas of the apartment, between the flat and the staircase, between the staircase and the exterior of the building, between the staircase and the basement, and between the spaces of the basement and the exterior of the building and between the basement and the staircase.

Based on energy balance equations written simultaneously on the entire building, the energy balance is written for each function of the building based on the matrix of thermal coupling coefficients and the matrix of heat exchanges of air, and the air temperatures of the spaces that have no heating bodies are determined.

Knowing the equilibrium temperatures of the air in each function of the building and of the apartment by using the coefficients values of the two matrices, the heat losses through heat transfer and heat losses by ventilation can be determine. Based on the heat necessary for heating and ventilating a building, depending on the efficiency of the heating system (generation, transmission and distribution, static bodies), the energy necessary for heating and ventilation of the building will be determined.

The calculus method allows in the cold period of the year to take into account the effect of the use of a ventilation system with heat recuperator. The method also enables the determination of the cold necessary for the cooling of apartments in the warm period of the year.

Program description

The thermal energetic analysis of the building or of the apartments is made based on a spatial temperature field in thermal stationary regime, obtained in the nodes of a spatial discretization network of the building and of the ground on which the building is located. The discretization, the writing of equations and the solving of the resulted spatial system of equations is given by the calculus program "CIMSPAT" 2010 version (first version dating from 1981).

The program is based on the mathematical modelling for the heat transfer in spatial thermal stationary regime such as:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(x, y, z) \cdot \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(x, y, z) \cdot \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(x, y, z) \cdot \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial z} \right] = 0 \quad (1)$$

To solve this equation the numerical calculus method of high accuracy calculating the heat balance equilibrium in each node of the spatial discretization network provided in the EN ISO 10211:2007 standard, Annex A. It met the criteria for validation of the Annex. The meshing the spatial geometrical model is performed automatically by the computer calculus program, resulting in a spatial meshing network with steps between 5 and 20 mm in all directions. Error estimator generates the need to extend the degree of subdivision of the calculus network. This is done automatically by the calculus program until the condition that between the flow of inner and outer surfaces of the wall exists a difference under 0.001W, is satisfied. In each node of the spatial calculus network differences under 0.000001 W must be obtained, superior condition to the one specified in EN ISO 10211:2007, point A.2.e.

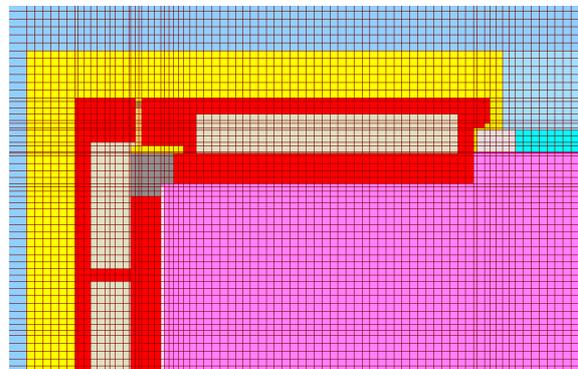


Figure 2 Discretization network

The programming language used for the calculus program has developed from Fortran to Pascal and up to Delphi 7, having inserted the calculus modules in C++ language. The number of the material types that can be used in the program for describing the geometrical model and the number for the contour conditions is unlimited. The program library contains catalogues with the necessary elements for defining the building envelope, arranged by constructive and dimensional types. Also the program contains a library with climatic data in accordance with the SR EN ISO 13790 standard and other specific standards, the exterior air temperature, direct and diffuse solar radiation by orientations, and for Cluj the speed and direction of the dominant winds, the humidity of the exterior air and the atmospheric pressure. Spatial geometry of the building and detailed geometry of the building elements is introduced as input data using a graphics processor, designed in this sense. Based on those, the geometric features of the building are determined (perimeter, useful area, usable volume, built area).

This calculation program is similar to any other calculation programs that uses spatial fields of temperature, the results being identical because the energetic balance equations systems that are written in the network nodes and whose mathematical solutions are unique regardless of the type of calculation program

The software was validated conform all 4 cases of ISO 10211:2007, Annex A, for three-dimensional calculation programs, similar to other known softwares: e.g. PHYSIBEL software, HEAT3 software, AnTherm software etc....

Other specific programs

During 30 years of work in the field of construction and the field of physics of constructions, were elaborated and developed several packages of expert type programs specific to the field.

All programs designed at the department of building physics are in accordance with the stipulations of the EU legislation (framework of the EPBD) on the various calculations required to determine the thermal performance of buildings

As an example are presented 2 of the programs available at our department:

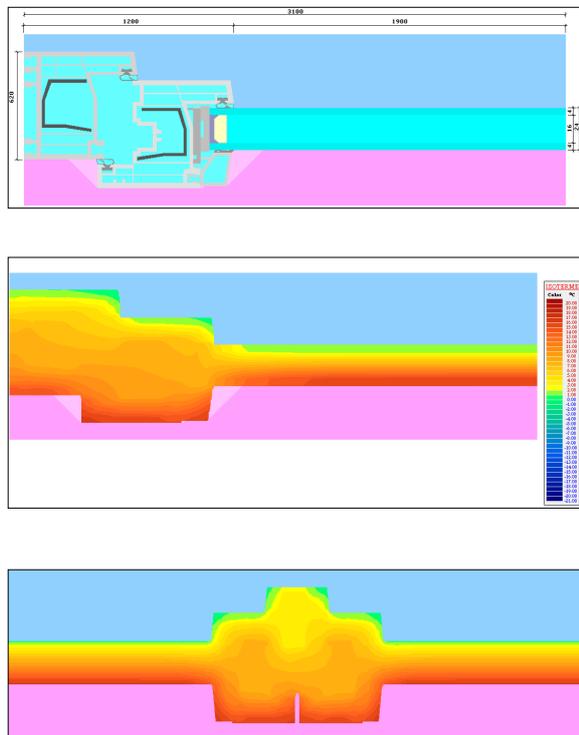


Figure 3 Program for the calculus of the thermal performance of a window- determination of ψ

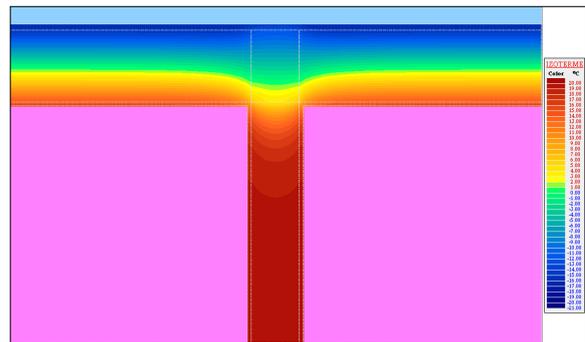
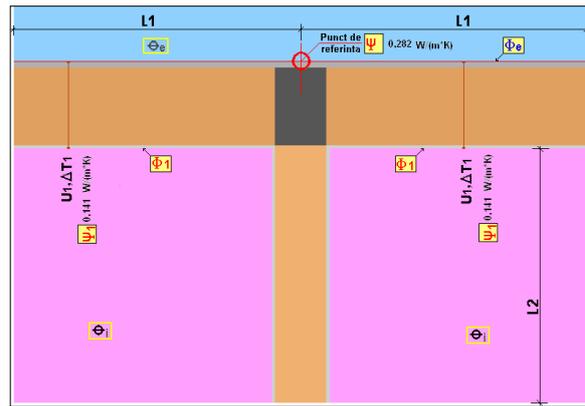
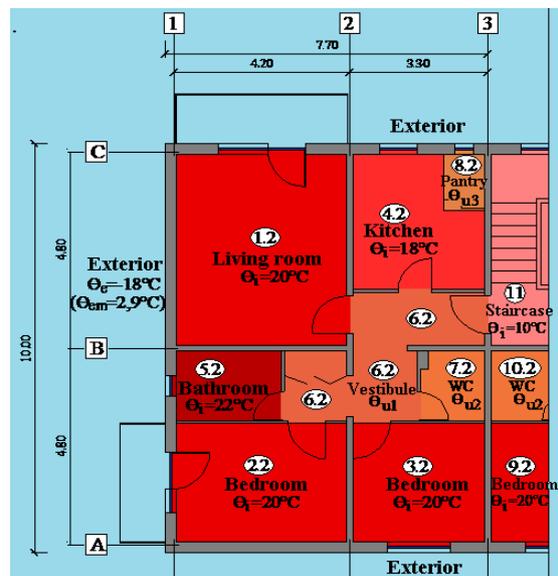


Figure 4 Program for the calculus of thermal bridges

CASE STUDY

Presentation

Due to limited space for the paper, from the three variants of thicknesses of the expanded polystyrene layer, the results obtained for the case of 15 cm of insulation and for the case of thermally uninsulated building will be presented.



a.) 2nd floor

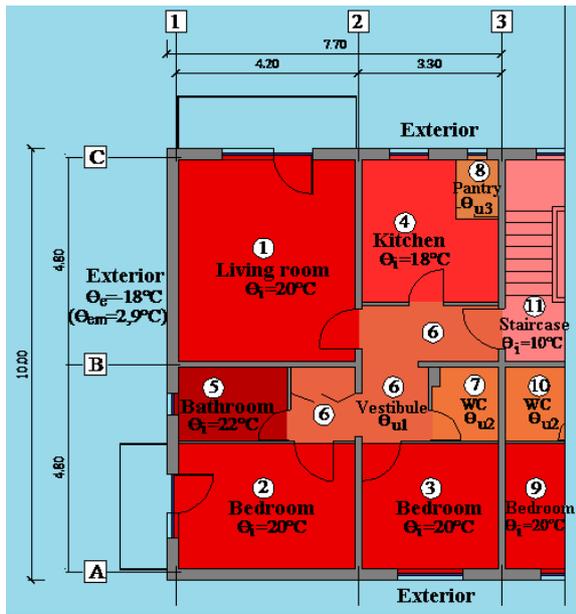
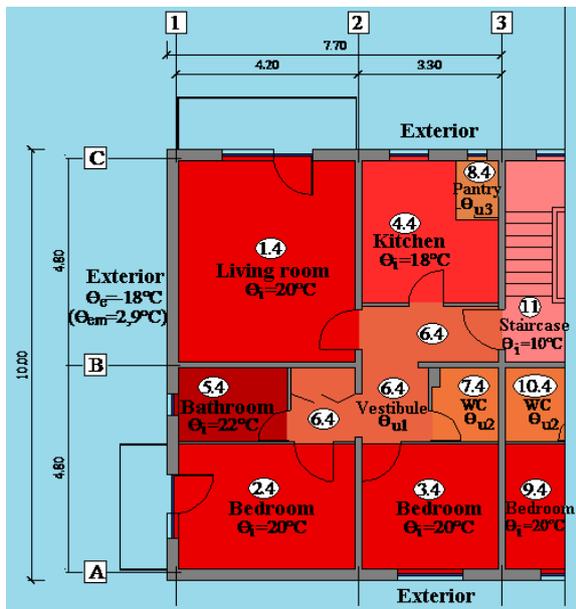

 b.) 3rd floor

 c.) 4th floor

Figure 5 The numbering and the temperatures of/in the rooms

Given the current concern in Romania on individual energy certification of apartments of a building, will be presented detailed results obtained for an apartment placed at the edge of the building, located on the 3rd floor.

Due to the large number of results obtained for the entire building, physically they can not be presented in the given space

Obtained results and analysis results

In table (1) and (2) are presented the thermal coupling coefficients obtained for the functions of the studied apartment, both with the exterior and with the functions of the upper and lower apartment, and with the staircase

The thermal coupling coefficients calculus and presentation was made in accordance with point c.2 of Annex C, of EN ISO 10211:2007 standard.

In table 1 are presented the thermal coupling coefficients obtained for the uninsulated building and in tabel 2 for the building thermally insulated with 15 cm of expanded polystyrene.

In tabel 4 are presented the specific annual energy consumption indexes [kWh/(m²an)] for each function of the apartment and total on the apartment, and the energy classification under the energy classification scale for heating buildings during the cold season, currently valid in Romania.

Results are presented for heating installations with a system efficiency of 75%, 80%, 85% and 90%, and for each efficiency case was considered a degree of heat recovery from the ventilated air of 0%, 25%, 50% and 75%.

Presentation of results for each function of an apartment allows proper sizing of the heating bodies individually for each function.

Table 1
Thermal coupling coefficients –the thermally uninsulated building

The functions of the building	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Exterior	32.45	25.85	12.10	8.11	6.23	-	-	3.83
(1)	-	-	-	26.26	19.99	21.54	-	-
(2)	-	-	22.47	-	23.78	12.26	-	-
(3)	-	22.47	-	-	-	12.78	14.89	-
(4)	26.26	-	-	-	-	27.29	-	18.12
(5)	19.99	23.78	-	-	-	13.90	-	-
(6)	21.54	12.29	12.78	27.29	13.90	-	26.35	-
(7)	-	-	14.89	-	-	26.35	-	-
(8)	-	-	-	18.12	-	-	-	-
(9)	-	-	22.48	-	-	-	0.78	-

(10)	-	-	0.78	-	-	0.81	12.96	-
(11)	-	-	-	16.72	-	9.64	0.88	11.51
(1.2)	52.51	-	-	1.03	0.79	0.84	-	-
(2.2)	-	32.31	0.88	-	0.74	0.46	-	-
(3.2)	-	0.88	25.04	-	-	0.47	0.46	-
(4.2)	1.04	-	-	24.31	-	0.89	-	0.63
(5.2)	0.79	0.74	-	-	11.34	0.46	-	-
(6.2)	0.94	0.46	0.47	0.89	0.46	26.25	0.95	-
(7.2)	-	-	0.46	-	-	0.95	6.87	-
(8.2)	-	-	-	0.63	-	-	-	3.39
(9.2)	-	-	0.88	-	-	-	0.04	-
(10.2)	-	-	0.04	-	-	0.04	0.49	-
(1.4)	52.46	-	-	1.03	0.79	0.94	-	-
(2.4)	-	32.26	0.87	-	0.73	0.46	-	-
(3.4)	-	0.87	25.05	-	-	0.47	0.46	-
(4.4)	1.03	-	-	24.27	-	0.89	-	0.63
(5.4)	0.79	0.73	-	-	11.32	0.46	-	-
(6.4)	0.83	0.45	0.47	0.89	0.45	26.18	0.94	-
(7.4)	-	-	0.45	-	-	0.94	6.86	-
(8.4)	-	-	-	0.62	-	-	-	3.38
(9.4)	-	-	0.87	-	-	-	0.04	-
(10.4)	-	-	0.040	-	-	0.04	0.49	-

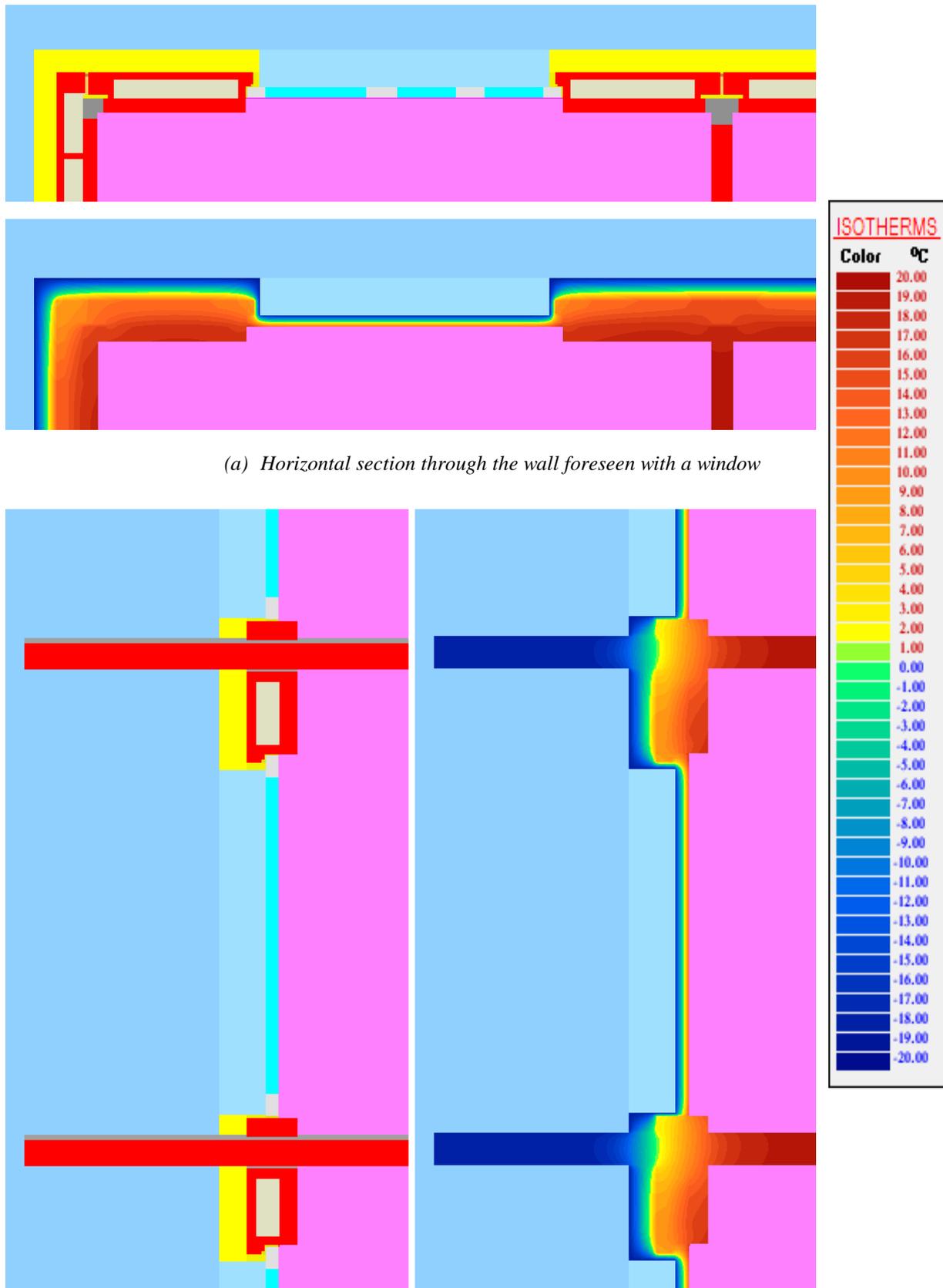
Table 2

Thermal coupling coefficients- the thermally insulated building with 15 cm of expanded polystyrene

The functions of the building	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Exterior	11.36	8.91	4.49	2.92	1.66	-	-	0.98
(1)	-	-	-	26.59	20.34	21.54	-	-
(2)	-	-	22.82	-	24.09	12.29	-	-
(3)	-	22.82	-	-	-	12.75	14.89	-
(4)	26.59	-	-	-	-	26.89	0.39	18.42
(5)	20.34	24.09	-	-	-	13.89	-	-
(6)	21.54	12.29	12.75	26.59	13.8	-	27.49	-
(7)	-	-	14.89	0.39	-	27.49	-	-
(8)	-	-	-	18.42	-	-	-	-
(9)	-	-	22.83	-	-	-	0.78	-
(10)	-	-	0.78	-	-	0.75	13.02	-
(11)	-	-	-	16.72	-	4.44	6.08	11.89
(1.2)	53.59	-	-	1.05	0.81	0.84	-	-
(2.2)	-	33.17	0.90	-	0.76	0.46	-	-
(3.2)	-	0.90	25.45	-	-	0.47	0.46	-
(4.2)	1.06	-	-	24.57	-	0.88	0.02	0.65
(5.2)	0.81	0.76	-	-	11.54	0.46	-	-
(6.2)	0.94	0.46	0.47	0.89	0.46	25.97	1.21	-
(7.2)	-	-	0.46	-	-	0.94	6.87	-
(8.2)	-	-	-	0.66	-	-	-	3.51
(9.2)	-	-	0.90	-	-	-	0.04	-
(10.2)	-	-	0.04	-	-	0.04	0.50	-
(1.4)	53.53	-	-	1.05	0.81	0.93	-	-
(2.4)	-	33.1	0.89	-	0.75	0.45	-	-
(3.4)	-	0.89	25.38	-	-	0.47	0.46	-
(4.4)	1.05	-	-	24.53	-	0.88	-	0.65
(5.4)	0.81	0.75	-	-	11.52	0.46	-	-
(6.4)	0.83	0.45	0.47	0.89	0.45	26.16	0.95	-
(7.4)	-	-	0.45	-	-	0.94	6.86	-
(8.4)	-	-	-	0.640	-	-	-	3.49
(9.4)	-	-	0.89	-	-	-	0.04	-
(10.4)	-	-	0.04	-	-	0.04	0.49	-

Table 3
The specific annual energy consumption indexes [kWh/(m²an)]- the thermally insulated building with 15 cm of expanded polystyrene

CASE STUDY		FUNCTIONS	LIVING ROOM	BEDROOM 1	BEDROOM 2	KITCHEN	BATHROOM	VESTIBULE	WC	PANTRY	TOTAL APARTMENT	
UNINSULATED		INDEX	345.26	375.16	234.55	385.91	561.08	73.22	84.94	716.95	313.04	
		LETTER	F	F	D	F	G	B	B	G	E	
THERMALLY INSULATED 15 cm	Efficiency of the heating system	75% Ventilation with heat recovery	0% INDEX	153.34	147.75	113.13	249.52	322.22	34.38	144.67	549.07	160.30
			LETTER	C	C	B	E	E	A	C	G	C
			25% INDEX	138.34	132.74	98.12	236.02	305.72	34.38	144.67	549.07	148.33
			LETTER	C	C	B	D	E	A	C	G	C
			50% INDEX	123.34	117.74	83.12	222.51	289.21	34.38	144.67	549.07	136.37
			LETTER	C	C	B	D	E	A	C	G	C
			75% INDEX	108.33	102.74	68.12	209.01	272.71	34.38	144.67	549.07	124.40
			LETTER	B	B	A	D	E	A	C	G	C
		80% Ventilation with heat recovery	0% INDEX	143.76	138.51	106.06	233.92	302.08	32.23	135.63	514.76	150.28
			LETTER	C	C	B	D	E	A	C	G	C
			25% INDEX	129.69	124.45	91.99	221.26	286.61	32.23	135.63	514.76	139.06
			LETTER	C	C	B	D	E	A	C	G	C
			50% INDEX	115.63	110.38	77.93	208.61	271.14	32.23	135.63	514.76	127.85
			LETTER	B	B	B	D	E	A	C	G	C
			75% INDEX	101.56	96.32	63.86	195.95	255.67	32.23	135.63	514.76	116.63
			LETTER	B	B	A	D	E	A	C	G	B
		85% Ventilation with heat recovery	0% INDEX	135.30	130.36	99.82	220.16	284.31	30.33	127.65	484.48	141.44
			LETTER	C	C	B	D	E	A	C	F	C
			25% INDEX	122.06	117.13	86.58	208.25	269.75	30.33	127.65	484.48	130.88
			LETTER	C	C	B	D	E	A	C	F	C
			50% INDEX	108.83	103.89	73.34	196.34	255.19	30.33	127.65	484.48	120.33
			LETTER	B	B	B	D	E	A	C	F	C
			75% INDEX	95.59	90.65	60.11	184.42	240.63	30.33	127.65	484.48	120.33
			LETTER	B	B	A	D	D	A	C	F	B
90% Ventilation with heat recovery	0% INDEX	127.78	123.12	94.27	207.93	268.52	28.65	120.56	457.56	133.58		
	LETTER	C	C	B	D	E	A	C	F	C		
	25% INDEX	115.28	110.62	81.77	196.68	254.76	28.65	120.56	457.56	123.61		
	LETTER	B	B	B	D	E	A	C	F	C		
	50% INDEX	102.78	98.12	69.27	185.43	241.01	28.65	120.56	457.56	113.64		
	LETTER	B	B	A	D	D	A	C	F	B		
	75% INDEX	90.28	85.62	56.77	174.18	227.26	28.65	120.56	457.56	103.67		
	LETTER	B	B	A	D	D	A	C	F	B		



(a) Horizontal section through the wall foreseen with a window

(b) Vertical section through the balcony door

Figure 6 Isothermal surface

The specific annual energy consumption indexes decrease with the increase of the heating system efficiency and with the increase of the heat recovery degree from the ventilated air. Thus, the uninsulated building having an E energetic class can be brought to a B energetic class.

If the heating system efficiency is just 75% and in lack of ventilation systems with heat recovery (where 0%), additional thermal insulation with 15 cm of expanded polystyrene reduces the annual specific consumption to 51%.

If a performant heating system (90%) coupled with a ventilation system with heat recovery rate of 75% is used, the initial building specific energy consumption can be reduced by 33%. The other obtained results for the intermediate cases can be seen in the table.

CONCLUSION

The calculus method can be applied for determination in a single step of the heat and ventilation necessary for the entire heating period of the year, or in more stages that are added up together for each month-week-day-hour of the heating period, according to the available climatic data. Compared to current practice of determination of the thermal performance of a building that sums up the thermal performances of the components of the building envelope, this method takes into account the thermal effects arising from the contact between the elements of the building envelope. The obtained results for the energy efficiency of the building with the two methods are significantly different. Failure in taking into account the thermal coupling effects between the building envelope elements will lead to results with significant differences if the building presents variable geometry volume.

To highlight the effect of not considering the thermal collaboration(contact) between the building envelope elements, is presented the case of a prefabricated panel with dimensions 3.30*2.70 m that closes on the outside bedroom 2. By comparison are shown the values of the thermal coupling coefficient of the room with the exterior $L^3_{D2,e}$ [W/K], obtained for the next calculation hypothesis:

- The panel is considered placed in the envelope of the building;
- the panel is considered cut (independent) from the envelope with adiabatic planes (in accordance with EN ISO 10211:2007).

Differences between the thermal coupling coefficient values obtained in the two assessment hypotheses of the prefabricated panel, are decreasing with the

increase of the thermal insulation layer. Although the results presented refer to a particular case of wall, the obtained conclusion have a high degree of generalization.

Table 4
The thermal coupling coefficients-panel case

Cazul de izolare termica	L^{3D}		Percentage
	In the building envelope	Aside from the building envelope	%
Uninsulated	12.104	14.690	21.4
5cm	6.112	6.851	12.1
10 cm	4.996	5.141	2.9
15 cm	4.996	5.141	2.9
20 cm	4.220	4.108	2.7

This method of assessing the energy performance of buildings has been applied in the thermal rehabilitation of buildings for more than 150 buildings from Romania.

REFERENCES

- MC 001/1,2,3-2006: The calculus methodology of the energy performance of buildings. First part- The envelope of the building. Second part- The building installations energy performance. Third part- The audit and energy performance certificate, Romania.
- MC 001/4-2009: The calculus methodology of the energy performance of buildings. Fourth part- Roundup for the calculation of the energy performance of apartments, , Romania.
- MC001/5-2009: The calculus methodology of the energy performance of buildings. Fifth part- Model for the energy performance certificate of apartments, Romania.
- SR EN ISO 13790:2005: Thermal performance of buildings. Calculus of the energy necessary for heating, Romania.
- Law 372/ 2005 Energy performance of buildings, Romania.
- EN ISO 10211:2007 Thermal bridges in building construction- Heat flows and surface temperatures- Detailed calculation.

COUPLING TRNSYS AND MATLAB FOR GENETIC ALGORITHM OPTIMIZATION IN SUSTAINABLE BUILDING DESIGN

Marcus Jones
 Vienna University of Technology, Vienna, Austria

ABSTRACT

Incorporating energy efficient features into sustainable buildings is cost effective during the design phase. In designing a sustainable building, the designer is faced with a staggering amount of parameters, conditions, and objectives. However, costs and limited time do not allow the designer to effectively evaluate all candidate building designs. Genetic algorithms are interesting for this problem given their ability to optimize complex multi-objective non-smooth optimization problems. The application of genetic algorithms to the problem of sustainable building design has been developed and will be presented. A method of interfacing TRNSYS and the Matlab genetic algorithm toolbox has been tested by application to two simple energy design problems. The approach of coupling the detailed modeling capabilities of TRNSYS and genetic algorithm routines in Matlab is powerful combination in the search for optimal sustainable building designs.

MOTIVATION

Sustainable building certification programs are becoming ever more popular, with their principles moving from voluntary rating levels into legislated requirements. The motivation is clear, sustainable building construction, operation, and decommissioning will play an important role in a sustainable future. However, sustainable building design is a highly complex process.

aries which the designer has little or no control over, and include the weather, surroundings, availability of energy resources, economic considerations, and building loads. The second aspect is the design of the building and system defined by the parameters which the designer does have control over. These include the parameters of the building envelope shape and materials, the energy system components and how the system is controlled and operated. Finally, the design objectives should be clear. Specific objectives include comfort levels, operating and investment costs, carbon reduction, and aesthetics.

In mathematical terms, this is a multi-objective optimization problem, and can be formalized as;

$$\min_{\vec{x}} [\mu_1(\vec{x}), \mu_2(\vec{x}), \dots, \mu_n(\vec{x})]$$

where \vec{x} is a vector in design space subject to the design constraints (a candidate solution), and μ_i is the i -th objective function, a component of the $\vec{\mu}$ solution vector. The solution to the problem is the set of Pareto optimum (Bui and Alam 2008). In optimization problems, the design variables define a solution space which is methodically searched in order to find the best candidate solutions. Building design problems are complex, often non-smooth in the solution space, and multi-objective. Because of the interacting nature of the design variables, unintuitive solutions exist which a designer may not consider. Because of the number of solutions, the solution space must be efficiently searched. Approaches to finding good solutions include past experience, trial and error, simple calculations, and building simulation. Because of the number of design variables and their interacting and dynamic nature, building simulation is becoming a more popular tool in the construction industry, becoming integrated within the architectural process.

For this type of optimization problem, genetic algorithms provide a robust and efficient optimization method (Wetter 2004). Genetic algorithms are parallelizable, so many function evaluations can be distributed across multiple processors (Eiben and Smith 2007). Because genetic algorithms have an element of random search, unintuitive but very effective solutions can be found (Keane and Brown 1996).

GENETIC ALGORITHMS

In nature, evolution serves as the mechanism in searching for the best candidate solutions to the complex prob-

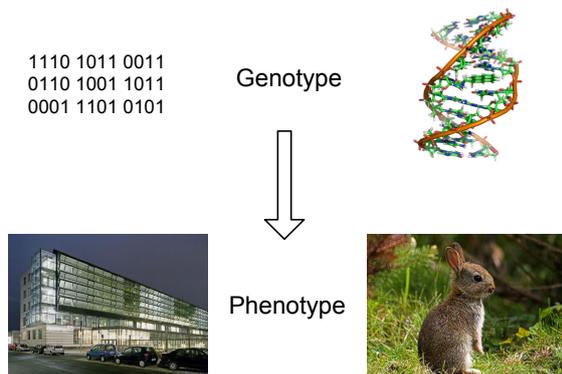


Figure 1: Building design and evolution

The conditions in which the building is designed and operated should be well understood. These are bound-

lem of survival. In abstract terms, an organism can be defined by DNA. Individuals which are best adapted to the environment propagate their DNA to further generations. Small random variations create new traits, to increase diversity in the population. This mechanism has produced the incredible variety of organisms in nature, excellent solutions to the highly complicated problem of survival. This same mechanism can be applied to sustainable building design.

Figure 2 shows a generic genetic algorithm. First, an initial population is defined, usually containing randomly generated individuals. Each individual in the population is then evaluated. In the case of building simulation, this is the execution of the simulation. The number of evaluations and the average time required for one evaluation typically defines the time required for the overall optimization run. The results of the evaluations are then assigned a fitness level, which represents the individual's proximity to the optimum. Individuals which best meet the objectives of the problem are then selected to propagate the next generation, to form the parent population. The parents then recombine to form the unmutated population. Random variation is applied to this population to produce the next generation. This cycle repeats until a stopping condition is reached a fixed number of generations or a number of generations in which successive iterations do not produce significant improvement.

Successful design of a genetic algorithm involves minimizing the time required to find the optimum solution. A successful algorithm could depart significantly from the generic algorithm described above depending on the application, with many parameters and strategies to be considered.

INTERFACE TO SIMULATION

The simulation tool under consideration is TRNSYS, v.17 (Solar Energy Laboratory, Univ. of Wisconsin-Madison 2009). The optimization will be performed within Matlab 2009, using the Genetic Algorithm Toolbox (The Mathworks 2009). TRNSYS is a dynamic simulation tool developed over 30 years, with flexibility in modeling systems and buildings. In TRNSYS, a model is developed within the Simulation Studio environment a graphical user modeling interface. The model is composed of 'Types', predefined components and algorithms which model the behavior of common systems. The model is saved in ASCII text format within a 'deck' file (.DCK), which stores the Types and connections between them. The model is executed by TRNEXE, an algebraic and differential equation solver which iteratively computes the system state at each time step. Because the model is stored in text format, the model can be parameterized by a scripting languages such as Matlab.

Figure 3 shows a method of scripting the parameteri-

zation of the TRNSYS input .DCK file. First, the modeler creates the overall system model within the TRNSYS Studio, being careful to parameterize the model using text variables and defining proper output files. A method of standardizing TRNSYS simulations has been described in a previous publication (Jones and Ledinger 2010). The modeler then saves the model to the .DCK file. Within Matlab, the .DCK is copied so as not to alter the original file. Parameters such as the weather file, the timestep, and convergence tolerances are then updated by searching and replacing the relevant sections of the current .DCK file. Next, Matlab searches and replaces the values for any design variables. The modeler should define the design variables in a standard and clear manner such as `GeneticVar1 = 10`, `GeneticVar2 = 0.75`. The updated .DCK file is then executed by TRNEXE using the `dos()` command in Matlab, which is a simple command-line access function. The result files are parsed and loaded into Matlab. Results are then post-processed to produce the final objective variables. With this method, a powerful way of executing a model becomes available within Matlab. For example, by simply executing the command;

```
Energy = evalTRNSYS([4 45 200], Vienna, 5)
```

the annual electrical energy demand of a solar domestic hot water system is returned. In this case, the system has a design vector defined by a collector area of 4 m² at 45° to the horizontal, with a primary hot water storage tank volume of 200L, and parameterized using the weather file for Vienna at a 5 minute time step. Wrapping the execution of TRNSYS into a Matlab function provides the capability to evaluate thousands of candidate solutions with no user quickly and easily.

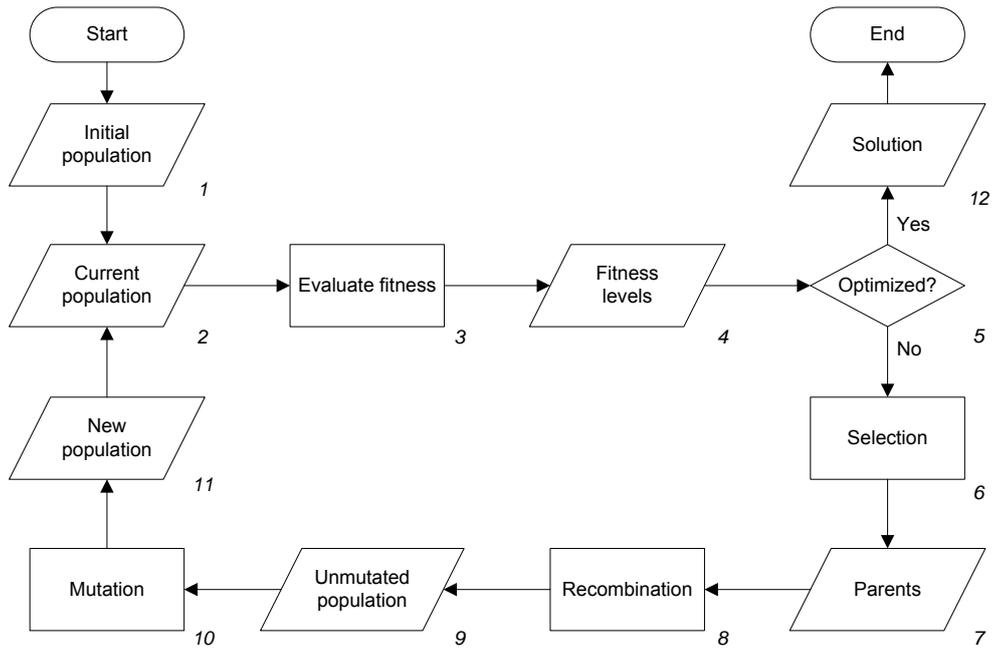


Figure 2: A generic genetic algorithm

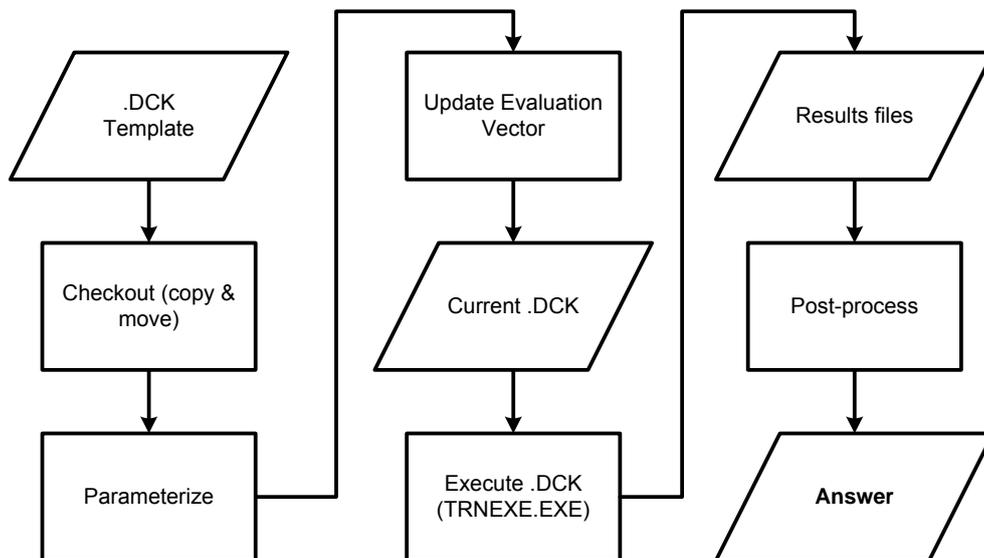


Figure 3: MATLAB - TRNSYS function wrapping

APPLICATIONS

Two problems were modeled, parameterized, and interfaced to the Matlab Genetic Algorithm Toolbox.

Simple building

The first model is based on the geometry of “Case 600” of ASHRAE standard 140-2007, a standard defining test cases for building energy simulation programs (ASHRAE 2007). The simple “shoebox” building seen in figure 4 is optimized with the objective of minimizing the annual heating energy demand for Vienna weather conditions. The design variables, summarized in table 1, are the building orientation, and the glazing area. A global search of the complete domain was performed, shown in figure 5. The first observation is that the design space is symmetric along the 180 °line, reducing the size of the search area by half. The glazing area influences the optimum orientation. If glazing is minimal (no windows), the orientation does not influence the optimum orientation. This is because no solar gains are possible to offset the heating demand. If glazing is maximized, the south orientation becomes the optimal, benefiting from solar heat gains through the windows, and the north orientation is the least optimal. Therefore, the optimum solution to this design problem is $x_1 = 0^\circ$ (south) and $x_2 = 6\text{m}^2$, with a value of 3549.0kWh/a heating energy (per annum).

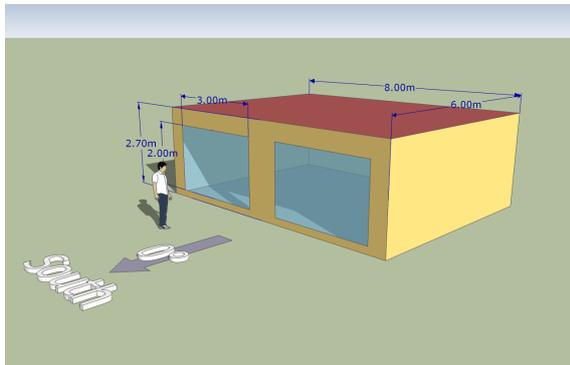


Figure 4: Simple building geometry

Table 1: Design variables for simple building

Variable	Range	Units	Description
x_1	$0 \leq x_1 \leq 180$	°	Orientation
x_2	$0 \leq x_2 \leq 6$	m ²	Glazing area

This problem was modeled in TRNSYS and coupled to the Matlab genetic algorithm toolbox using the method described above. The default genetic algorithm toolbox

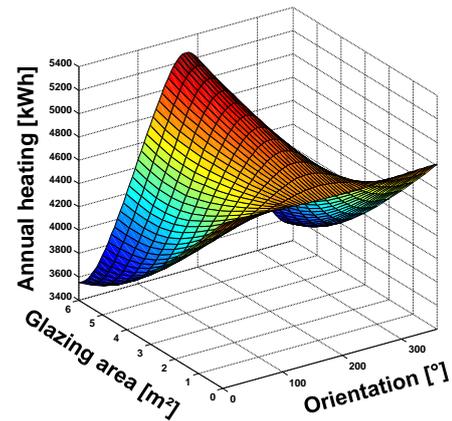


Figure 5: Global search of design space

parameters, listed in table 2, were used.

Table 2: Matlab GA default parameters

Initial population	-	20
Representation	-	Double
Fitness scaling	-	Rank
Selection	-	Stochastic
Elite count	-	2
Crossover	-	Scattered
Crossover fraction	-	0.8
Stopping	-	Tolerance / Generations
Tolerance value	-	0.5
Stall size	-	100
Mutation	-	Adaptive Feasible

A common way to display the progress of a genetic algorithm optimization is to show the number of generations on the x-axis, and show the value of the objective function on the y-axis. The best and worst solutions in the population at each generation are plotted, showing the range of solutions. The average population fitness is also plotted. Figure 6 shows the progress of the simple building design problem using the default algorithm. A common genetic algorithm profile is seen, with a fast increase in fitness in the first few generations, and smaller improvements throughout successive generations. These plots are useful for analyzing an important quality of genetic algorithms; diversity. The diversity of the population is represented by different metrics such as the spread of solutions or the average distance between candidate solutions in the design space. In figure 5, diversity quickly decreases as all individuals in the population converge to the optimum of 3549.0kWh/a. Managing diversity involves ensuring that diversity is high enough in order to properly search the design space, without being so high as to make the

number of function evaluations prohibitively high.

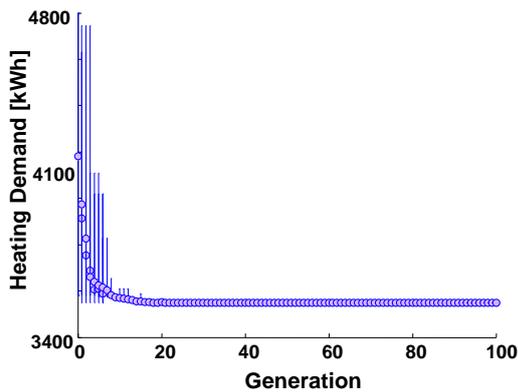


Figure 6: Genetic algorithm progress

Solar domestic hot water system

A second design problem is presented in figure 7, a simple solar domestic hot water system. The system consists of a collector field, a storage tank, and a differential controller with hysteresis. The design variables are presented in table 3. The objective is to minimize the amount of auxiliary electric resistive heating in the tank required to meet the hot water demands of a family dwelling in Vienna.

Table 3: Design variables for simple solar system

Variable	Range	Units	Description
x_1	$0 \leq x_1 \leq 30$	$^{\circ}\text{C}$	Lower differential
x_2	$0 \leq x_2 \leq 30$	$^{\circ}\text{C}$	Deadband
x_3	$0 \leq x_3 \leq 90$	$^{\circ}$	Slope
x_4	$0 \leq x_4 \leq 0.500$	m^3	Volume

Because the design vector is four dimensional, a complete global search is computationally expensive. Instead, a manual searches was performed, first over the $[x_1, x_2, 45, 0.300]$ plane, producing an optimum of 1661.0 kWh/a at $[0, 0, 45, 0.300]$. A second search over $[0, 0, x_3, x_4]$ further optimized the design to 1657 kWh/a at $[0, 0, 45, 0.365]$. Therefore, the expected optimum design is to have a lower differential and hysteresis of 0°C , a collector slope of 45° , and a tank volume of 0.365m^3 . From a practical viewpoint, the controller settings are not realistic since this causes pump cycling, but still provide a suitable test for the optimization routine.

A number of runs were executed, summarized in table 4. A simple investigation into the influence of population size on solution convergence was performed, with the first 5 runs having a population of 5 individuals, and the next

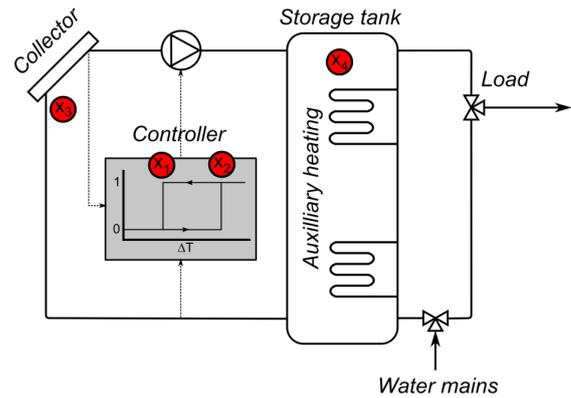


Figure 7: Simple solar domestic hot water system

5 runs having a population of 20 individuals. In all runs 100 generations were evaluated. In the case of the population size of 20, better solutions are achieved, the best being 1655.1 kWh/a at $[0, 0, 43.3, 0.369]$. With a population size of 5, the solutions are more varied, with an extreme case of 2489.7 kWh/a at $[12.3, 1.5, 39.6, 0.279]$. Clearly, the initial random population of 5 individuals does not provide enough initial diversity to ensure an optimum solution. One strategy with a low population size is therefore to increase the mutation rate to increase diversity over the generations. With 20 individuals, the chances are better that a random initial individual is close to the optimum and able to propagate a better design throughout the generations. The cost of the larger population size is the potential for increased number of evaluations. In this case, the run time was simply the average simulation time of each individual multiplied by the population size, and multiplied by the number of generations which was fixed at 100. A stopping criteria based on convergence would produce a varying number of generations and a better indication of evaluation time cost.

CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

Genetic algorithms are powerful tools in finding solutions to complex design problems. Their advantages include parallelization, non-intuitive optimum solutions, and a robust search regardless of the smoothness of the underlying function. Genetic algorithms are therefore interesting in the problem of sustainable building design. The simulation tool TRNSYS was coupled to the scripting platform Matlab with the Genetic Algorithm Toolbox. By wrapping the simulation execution in a function, the modeler can execute TRNSYS thousands of times in an automated fashion. Two simple case studies were used to show the feasibility of using genetic algorithms in optimizing the energy design of a simple building and a simple solar

Table 4: Run history for solar hot water system

Run	Generations	Population	Time [hr]	x1	x2	x3	x4	Best
1	100	5	3.3	2.1	0.6	44.1	0.419	1728.0
2	100	5	3.2	0.3	2.1	42.3	0.468	1665.5
3	100	5	3.0	0.0	9.3	44.1	0.351	1663.1
4	100	5	3.3	4.2	4.2	45.9	0.473	1864.2
5	100	5	3.6	12.3	1.5	39.6	0.279	2489.7
6	100	20	13.6	0.0	1.5	43.2	0.392	1657.1
7	100	20	13.7	0.0	0.0	43.3	0.369	1655.1
8	100	20	13.7	0.0	0.0	43.2	0.375	1656.2
9	100	20	14.0	0.0	0.7	43.4	0.360	1655.2
10	100	20	14.1	0.1	0.0	43.2	0.390	1655.2

domestic hot water system. In these case studies, the basic concept was proven to be successful. Managing diversity and number of evaluations were determined to be critical issues in designing a successful genetic algorithm for sustainable building design. In any optimization problem, the underlying design space should be physically well understood by the modeler in order to identify symmetries and to evaluate candidate solutions from a practical perspective.

This research will be continued to optimize the genetic algorithm for sustainable building design, with the objective of an optimization platform that is flexible enough to handle any type of design vector for a multi-objective sustainable building design problem. The parameters and method influencing population size and configuration, selection, mutation, and stopping criteria will be investigated to design a robust genetic algorithm. Such a platform will be beneficial in the design of the next generation of sustainable buildings.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work is developed within the doctoral program at the Technical University of Vienna, Institute of Computer Technology under the supervision of Dr. Dietmar Dietrich, and with support from the Austrian Institute of Technology.

REFERENCES

- ASHRAE. 2007. "Standard 140 - Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs." Technical Report, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Bui, Lam Thu, and Semeer Alam. 2008. *Multi-Objective Optimization in Computational Intelligence*. Information Science Reference, Hershey PA.

- Eiben, A.E., and J.E. Smith. 2007. *Introduction to Evolutionary Computing*. Springer.
- Jones, Marcus, and Stephan Ledinger. 2010. "Pushing the limits of simulation complexity - a building energy performance simulation of an exhibition centre in the U.A.E." *Proceedings of Simbuild 2010 - 4th national conference of IBPSA-USA (Pending final acceptance)*.
- Keane, A.J., and S.M. Brown. 1996. "The design of a satellite boom with enhanced vibration performance using genetic algorithm techniques." *Proceedings of the Conference on Adaptive Computing in Engineering Design and Control*.
- Solar Energy Laboratory, Univ. of Wisconsin-Madison. 2009. *TRNSYS 17 - a TRAnSient SYstem Simulation program*.
- The Mathworks. 2009. *Matlab R2009b*.
- Wetter, Michael. 2004. "Simulation-Based Building Energy Optimization." Ph.D. diss., University of California, Berkeley.

USABILITY EVALUATION OF A PROTOTYPE DESIGN TOOL FOR UNCERTAINTY PROPAGATION AND SENSITIVITY ANALYSIS

Christian Struck^{1,2}, Jan Hensen² and Wim Plokker³

¹ Lucerne University of Applied Sciences and Arts, Switzerland

² Department of Architecture Building and Planning, Technische
Universiteit Eindhoven, The Netherlands

³ Vabi Software, Delft, The Netherlands

ABSTRACT

Software developments in the domain of building performance simulation (BPS) targeting the early design stages of a building need to address two points successfully to be adopted in design practice: (1) facilitating communication between multiple engineering disciplines and (2) the limited amount of design information. The authors consider the limited amount of design information available not as a limit but as a design uncertainty. To focus the designer's attention the approach chosen here is to extend the capabilities of existing simulation tools with uncertainty and sensitivity analysis.

The development of software goes as any product development through stages as design, synthesis and analysis and involves numerous design iterations. The analysis of the prototypical tool extension includes verification and usability evaluation.

Whilst the verification of prototypical design tools is necessary to ensure the added analysis functionality is implemented correctly the usability evaluation is to ensure the proposed feature meets the demand of the potential user group.

A heuristic usability evaluation was conducted with six expert practitioners using a paper prototype. The quantitative feedback to heuristics as design guidance, process integration, and application confirmed the potential of the tool extension to support design practice. The usability evaluation indicated that expert practitioners would encourage the use of uncertainty propagation and sensitivity analysis if tool extensions to BPS-tools were available. The experts assess uncertainty propagation and sensitivity analysis to add value by reducing the risk of technical design decisions and limiting the extent of design iterations.

USABILITY ENGINEERING

The use of building performance simulation (BPS) tools during the early design stages is limited. The author's hypothesis that the use of uncertainty propagation and sensitivity analysis techniques allow to focus the designer's attention to the key-design

parameters with respect to their influence on important performance indicators. To test the hypothesis usability evaluation was conducted.

Usability engineering considers usability as important aspect in the process of designing software and interfaces. Usability is discussed since the 1970's and concerns improving the interaction of products and users. Efforts have been published in different fields such as the design of appliances (Sauer et al., 2010), medical interactive systems (Bastien, 2009), software-, website- and interface design, building simulation (Folmer and Bosch, 2004, Holzinger, 2005, Nielsen and Landauer, 1993, Hopfe and Hensen, 2009) among others. Definitions for usability are given by different sources as Shackel (2009), Nielsen (1993), ISO9241-11 (1998) and Holzinger (2005). Holzinger defines usability based on work of Bevan (1995) as...

...the ease of use and acceptability of a system for a particular class of users carrying out a specific task in a specific environment. Ease of use affects the user's performance and their satisfaction, while acceptability affects whether the product is used."

Different authors categorize usability engineering methods and tools differently. Quesenberry (2008) uses four categories: exploratory research, benchmark metrics, diagnostic evaluation and summative testing. Holzinger (2005) differentiates inspection methods - without end-users and test methods - with end-users. He subdivides test methods into thinking aloud, field observation and questionnaires, and inspection methods into heuristic evaluation, cognitive walkthroughs and action analysis. Folmer and Bosch (2004) identify usability testing, usability inspection and usability inquiry.

Usability testing requires representative users to work with the product on typical tasks. That can be done on either the final product or a not yet finished model of the product. Methods include thinking aloud and question asking protocols.

Usability inspection requires either experts, developers or other professionals to assess a prototype to follow established usability principles.

Typical methods are heuristic analysis and cognitive walkthroughs.

Usability inquiry is concerned with obtaining information about the likes, dislikes, needs and users understanding of a product in real operation. Information can be gathered by field observations and surveys.

Heuristic evaluation

Nielsen (1993) argues that heuristic evaluation is the most common informal method. It is based on usability specialists assessing if the presented product design follows established principles. Before conducting a usability test a number of points need to be considered:

- Type of participants, expert versus novice designer,
- Prototype fidelity, paper prototype versus fully functional product,
- Number of participants, only a few versus a large number.

Type of participants

Participants can be chosen based on a number of characteristics such as competence, attitude, state and personality. In the context of this work a competent person is a person highly skilled; knowledgeable and able in the domain of climate engineering. Literature provides statements about what type of participants is best suited under the given circumstances. In a recent study Sauer et al. (2010) conclude that when aiming at gaining an overview of usability problems experts provide a more comprehensive list. If the aim was to identify the most severe usability problems as quickly as possible novice users perform better. Severe usability problems are considered problems that would prevent the completion of a specific task. It was found that expert would point to problems relating to efficiency and functionality as they were able to adopt compensating strategies experienced problems. Further to being able to identify to actual problems experts were able to point to potential usability problems.

Prototype fidelity

The prototype fidelity depends on the stage of the development process. Whilst in the late stages fully functional prototypes might be available, which is not the case during the early design stages. The work by Sauer et al. (2010) suggests that subjective usability ratings were unaffected by prototype fidelity. The users seem to be able to compensate the lack of system and environmental feedback of low fidelity prototypes with their mental model of the product. That is as they use their understanding of the product to predict its performance. Low fidelity

prototypes are suitable for usability testing taking into account the following three points:

- Overestimation of available user controls
- Limitation of number of measured usability metrics
- “Deficiency compensation” might lead to more positively rating the low fidelity prototype than the final product

Number of participants

Literature gives no clear answer to the question how many participants to involve. Nielsen and Landauer (1993) propose a model to predict the eventual number of problems that will be found by a usability study. Holzinger (2005) states that inspection methods require 1-5 participants, whilst test methods require 4 till well over-30 participants. Usability can be considered from at least five perspectives as: learnability, efficiency, memorability, error rate, and satisfaction.

1. Learnability is important so that the user can rapidly begin working with the system product.
2. Memorability considers allowing the occasional user to return to the product without having to relearn its use.
3. Error rate focuses on eliminating the risk of making severe mistakes, and minimizing the general error rate while using the product.
4. Satisfaction aims at making the system pleasant to use.
5. Efficiency concerns enabling the user who has learned the product to attain a high level of productivity. The latter is considered here.

Only a few publications relate usability engineering to process stages of designing software. Folmer and Bosch (2004) conclude their comprehensive review that none of the usability engineering methods as testing, inspection or inquiry have the capacity to support software architecture. However, the authors consider software architecture as part of the software development process, whereas it would be advantageous, applying the systems theory perspective and decomposing the process into components. By doing so it is possible to apply common process stages to engineering software architecture, and considering the use of traditional usability engineering techniques.

Other practitioner’s guides as by Dumas and Redish (1999) suggest applying usability engineering techniques throughout the design process from conceptual design to detailed design. Dumas and Redish (1999) suggest:

- Focusing early and continuously on the user;

- Considering all aspects of usability;
- Testing versions of the product with users early and continuously;
- Iterating the design according to the feedback.

For the early design stages of software developments it suggests the following:

1. Make use of low fidelity prototypes as it allows the rapid turnaround of design iterations.
2. Focus on key usability aspects/ heuristics of the development, which is here providing means to enhance the efficiency of the building design process by providing design guidance.
3. Target domain experts as they have the ability to give feedback on the potential of the prototype to increase the process efficiency by adding value and new functionality.

Heuristic evaluation is a widely used informal usability engineering method (Holzinger, 2005). It requires the careful selection of usability heuristics. Different sets of usability heuristics have been applied in different studies. Nielsen (1994) compares seven sets used for high fidelity prototypes and identifies nine heuristics: (1) visibility of system status, (2) match between system and real world, (3) user control and freedom, (4) consistency and standards, (5) error prevention, (6) recognition rather than recall, (7) flexibility and efficiency of use, (8) aesthetic and minimalist design and (9) helping users recognise, diagnose and recover from errors.

METHODOLOGY

Prototype design tool and case study

To test the hypothesis a prototypical and case specific design tool was developed which integrates VA114 (Vabi Software BV, 2010), an integrated BPS-tool and Simlab3.2.5 (EU Joint Research Centre, 2009) a statistical analysis tool in the Matlab environment.

Uncertainty analysis is expected to support quantifying the performance variation of a design concept relative to a design requirement. Using statistical analysis techniques the sensitivity of performance requirements to input parameters can be established. The knowledge about sensitivities is expected to support communicating the building performance between project stakeholders. For the analysis of the case study Latin hypercube sampling and regression analysis was chosen.

The case study comprises of a representative office building. The office space considered for the comfort assessment is visualized in Figure 1.

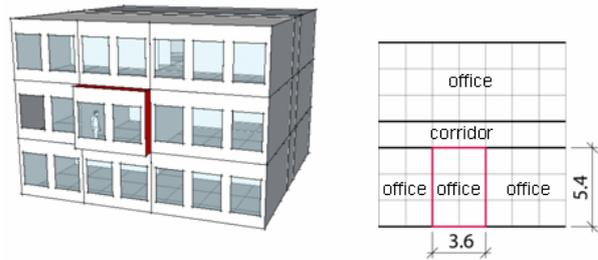


Figure 1 Case study - office room

Two design alternatives (DA1&2) were investigated for finding the most appropriate compromise for the conflicting design requirements: (1) good thermal comfort at workplace level and (2) low final energy demand for heating and cooling at building level.

DA 1 represents a space conditioning concept integrating floor heating and cooling, mechanical supply & extract of the minimum fresh air rate, radiator heating and a 1m deep overhang at the highly insulated façade.

DA 2 is a space conditioning concept based on hybrid ventilation scheme; natural air supply with mechanical extract, a 4-pipe fan coil unit for heating and cooling, internal blinds and moderate insulated façade.

The uncertainty of final energy use and comfort for both DA's to variations of parameters as internal gains, g-value, glass to wall ratio, u-value wall, ventilation air volume, infiltration rate, u-value window ratio, acoustic to thermally active ceiling area and orientation was assessed (see Figures 2&3).

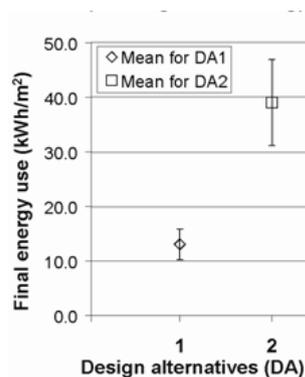


Figure 2 Final building energy use (heating & cooling) for two design alternatives

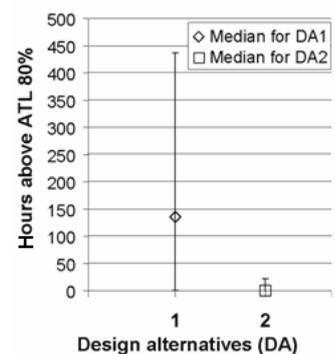


Figure 3 Number of hours above ATL 80% for two design alternatives

DA1 shows the lowest final energy use and the potential to also provide very low hours above the adaptive temperature limit above 80%. This is the starting point for the sensitivity analysis. The question is: "Which parameters have the biggest impact on the number of hours above the adaptive

temperature limit (ATL) of 80% for DA1?”. Using regression analysis it could be identified that the three most important parameters are: internal gains, g-value, glass to wall ratio. The three least important parameters are u-value window, ratio acoustic to thermally active ceiling area and orientation (see Figure 4).

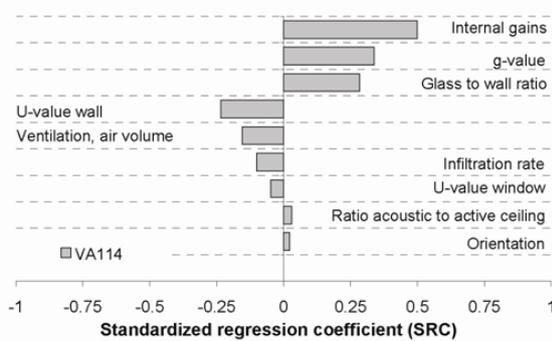


Figure 4 Parameter sensitivity to number of hours above the adaptive temperature limit of 80% by standardized regression coefficient.

Heuristic evaluation of a prototype design tool

The knowledge gained by developing the prototype design tool and conducting the analysis of the case study represented the input to produce the prototype for the usability evaluation. The effort resulted in a low-fidelity paper-prototype. The paper prototypes visualize the case based analysis workflow using a BPS-tool expanded with the capability for uncertainty propagation and sensitivity analysis. Attention was paid to the definition of design problems, data input and presentation of analysis data.

Three evaluation heuristics are particularly important: (1) provision of design support; (2) design process integration and (3) perceived applicability.

The paper prototype was exposed to six expert practitioners in the field of environmental engineering in form of a PowerPoint presentation.

The usability of the final prototype was evaluated in individual sessions with expert practitioners in August 2009. The experts, exposed to paper prototypes, were engaged in a discussion to learn about their perception. The individual usability problems were noted and categorized. The notes were fed back to the experts to confirm and were necessary to complement the list of recorded usability problems. To objectively assess the value of the final prototype for supporting the design process it was necessary to quantitatively evaluate the cumulative response of the expert practitioner's. This was achieved by scaling qualitative feedback. The Likert-scale (Hinkin, 1995) was applied, as it allows

scaling the expert response to items as closed questions and statements.

statements, closed- and open ended questions. Three questions were assigned to the identified heuristics. Mean scores and variances were computed for the response scores.

The audio track of the evaluation meetings was recorded to supplement the analysis. First the practitioners were exposed to the theoretical background of the prototype. Thereafter, the prototypes capability providing support was illustrated for solving a realistic design problem for a virtual building. Two design alternatives were evaluated. Subsequently the experts were asked to score the response to key-questions making use of the Likert-scale. The questions were answered un-anonymously.

RESULTS AND DISCUSSION

Qualitative Results

The feedback to the evaluation was exhaustive. The following points were identified motivating the use of building performance simulation to support conceptual design:

- The aim during building design is to match design concepts to user requirements expressed in form of performance indicators (limits). BPS allows quantifying conflicting performance indicators as, e.g. are energy use and comfort.
- Climate engineers have limited influence on the architectural design. Tools that provide useable interfaces, advanced analysis techniques as uncertainty propagation and sensitivity analysis and intelligent means to present results are expected to significantly improve the communication within the design team, especially between architects and climate engineers.
- During design BPS has great potential to shape the expectations of the design team with regards to building performance. Realistic expectations, based on quantitative performance information, help reducing costly design iterations.
- The use of performance simulation provides the opportunity to break away from peak performance design moving towards designing for typical performance, e.g. during midseason. When aiming at reducing energy consumption for heating and cooling the integrated system efficiency shows the biggest saving potential.

The following points relating to usability were identified:

1. Application of the prototype (Do what the user wants)

Building performance simulation is used when the effort justifies the results by supporting finding a better design solution and to communicate concept advantages and disadvantages.

The prototype is required to enable an early design robustness assessment to parameters as user behavior and climate variations. The robustness of the system has consequences on plant room- and riser sizes.

2. Variable analysis focus (Do what the user wants)

Support the shift in analysis focus away from peak load towards typical performance design.

Variable analysis zoom-in level are required to be able to quickly change focus between workspace, zone and/or building level depended on the considered performance indicator.

3. Knowledge accessibility (Interoperability)

Access to knowledge based limits and restrictions for performance indicators and design variables to support definition of parameter input ranges. Decision making and knowledge management systems are expected to be advantageous.

4. Representation of analysis input (Speak the language)

The input to analysis tools is ideally of the same type and format as used by practitioners to synthesize integrated design concepts, such as subsystems, components and variables. System theory is expected to provide the required theoretical framework. The dominant type is determined by the design stage, e.g. concept or detailed, and type of project, e.g. new build or refurbishment.

5. Extend of component models and parameters (Quality assurance/ error management)

The minimum requirement for the prototype is to allow synthesizing alternative integrated design concepts from components as: façade, lighting, energy generation and distribution, shading devices, structure and ventilation. The expert's opinions diverge on the required extend of the application. Whilst some statements request extension to, e.g. model transportation systems in buildings, others advise to withdraw from moving towards all integrated simulation models. The following components are assessed particularly important: suspended ceiling and raised floor constructions, displacement ventilation and day lighting systems Infiltration rate.

6. Modeling detail during design (Efficiency of use)

The level of modeling detail should be consistent for models targeting early und late design stages. Still the requirements of the different design stages should be maintained. During concept design the interest lies in evaluating multiple feasible system combinations. Therefore representative system settings need to be available. During detailed design the aim is to manipulate the system parameter to optimize its integrated performance.

7. Design parameter ranges (Quality assurance/ error handling)

To support the conceptual design, extensions to BPS-tools should be able to allow an impact assessment of design parameters within realistic ranges as: ratio net to gross floor area, impact of HVAC systems on aesthetic, HVAC control settings, occupancy pattern, properties of glass, lighting control, convection factor of blinds.

8. Performance indicators

It was pointed out that the weight of performance metrics in design decisions is not constant during design process. It changes during the design and construction process. Examples are: "Costs are not important as long the budget is not exceeded.", or "Variations in daylight levels are accepted as long it is not dark."

To communicate costs and performance the following metrics are considered: running- , investment- , life cycle- and maintenance costs.

Improving thermal comfort as it relates to productivity. Thermal comfort is particularly crucial in mid-season.

Three metrics are in use to communicate thermal comfort adaptive temperature limits, overheating hours and weighted overheating hours.

The value of CO₂ emissions to communicate building performance is controversial among the practitioners. Whilst CO₂ emissions might be a performance requirement for public clients, private clients tend to be less considerate.

Practitioner's asses cost saving potential the highest by improving space use and considerate investments. The saving potential is assessed small for reducing energy consumption. When targeting energy efficiency the potential lies in the midseason.

It was suggested including productivity to cost function – extra annual income due to enhanced indoor air quality equals annual depreciation of building and components.

9. Analysis process

It was explained that it would help decision making to screen many input (design) parameters early.

Building design doesn't typically follow prescriptive stages. Design decisions are taken on specific subjects. Those subjects might or might not fall into the timeline of traditional design process descriptions.

To take advantage of uncertainty propagation and sensitivity analysis during the early design stages practitioners require a two phased approach. The first phase, an initial qualitative concept comparison followed by quantitative parameter impact assessment as second phase.

10. Analysis methods specific result representation

Experts assess knowledge of parameter non-linearity of less valuable. More crucial is knowledge about parameter impact (sensitivity).

Result presentations should indicate relationships for easily deriving design information. "If an engineer cannot explain analysis results, it will be rejected by the design team."

Quantitative results

The feedback from practitioners to the quantitative heuristic prototype evaluation showed different characteristics.

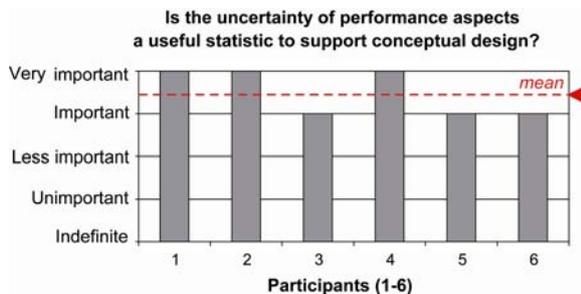


Figure 5 Design support - Usefulness of parameter uncertainty as statistic to support design

It varied over the full range of the scale in some instances, whilst being tightly scattered around the mean of the scale in others (see figures 5 & 6).

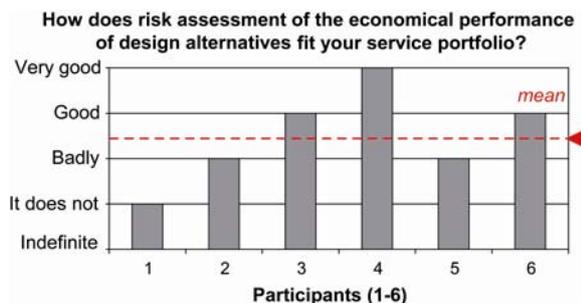


Figure 6 Application – Risk assessment of economical performance of design alternatives

The results from the heuristic specific questions are presented in tables 1-3. The mean score and variance across the expert's feedback is presented. The mean score gives the perception of design experts. The variance is used as metric to evaluate the agreement or disagreement between the experts. Whilst a low variance (<0.5) indicates good agreement between the experts on the mean score, a high variance (>1.0) indicates disagreement.

Table 1 Design support – Quantitative results

DESIGN SUPPORT	MEAN SCORE/ MAX. SCORE	VARIANCE OF SCORES
Is the uncertainty of performance aspects a useful statistic to support conceptual design?	3,5/4	0,3
Has uncertainty propagation and sensitivity analysis (UP/SA) prototype the potential to add value to the design process by generating extra design information?	4/4	0,0
Would you benefit from applying uncertainty propagation and sensitivity analysis to your current projects?	4/4	0,0

The expert's scores to questions targeting the design support are in all three instances very high. The variance is negligible small.

Table 2 Process integration – Quantitative results

PROCESS INTEGRATION	MEAN SCORE/ MAX. SCORE	VARIANCE OF SCORES
How do you assess the potential of the prototype for UP/SA to reduce time turning over simulation projects?	3,2/5	1,4
How do you assess the potential reducing design iterations using UP/SA?	4/5	0,4
Is the UP/SA analysis process transparent enough to be able to communicate its advantages and disadvantages to the design team?	2,7/4	0,2

The scores for process integration were medium to high. The highest variance is noticeable for the potential of UP/SA to reduce time turning over simulation projects indicating different opinions among the experts. The analysis process transparency received medium scores with low variance as the experts stated that there is no need to communicate details of the analysis process to the design team.

Table 3 Application – Quantitative results

APPLICATION	MEAN SCORE/ MAX. SCORE	VARIANCE OF SCORES
How does risk assessment of the economical performance of design alternatives fit your service portfolio?	2,5/4	1,1
How does the risk assessment of technical design decisions fit your service portfolio	3,75/4	0,175
Which project stakeholder will benefit most from employing BPS extended with UP/SA?	Design team *	/

* Discrete choice: Other possibilities were client, occupant, climate engineer or others.

The expert's scores to the risk assessment of economic performance of design alternatives are medium with a high variance indicating different opinions. However, there is a high score with low variance noticeable for the risk assessment of technical design decisions. The experts agree that the design team will benefit most from the capability of uncertainty propagation and sensitivity analysis.

Whilst the low-fidelity prototype limited the evaluation heuristics to the assessment of the potential for design support, design process integration and application later higher-fidelity might allow addressing a broader range of heuristics as indicated in section "Heuristic evaluation".

The use of the 5 point Likert-scale works to obtain quantitative results from the heuristic evaluation.

CONCLUSIONS

The application of heuristic usability evaluation is feasible and useful and it fits the character of the tools early design phase. The literature review revealed that there are only a few publications available on the subject of evaluating the usability of BPS-tools on the potential user group. The application of heuristic usability evaluation was found suitable for a low-fidelity prototype design tool. The Feedback to key-heuristics indicates

strength and weaknesses of the concept of the prototype design tool. Strengths are:

- Uncertainty is assessed a useful statistic to provide design support.
- Experts agree that UA/SA have potential to add value to the design process by generating extra design information.
- Experts would use tools for UA/SA on current projects if they were available.
- Strong focus on risk assessment of technical design decisions rather than on economical performance of design alternatives.
- Experts assess the entire design team will benefit from the analysis rather than individual stakeholders.

Potential weaknesses are:

- Perceived effort to turn over simulation projects.
- Transparency of analysis process.

This first usability evaluation of a low-fidelity prototype design tool was concluded successfully. As the evaluation was not conducted on a final product it does not conclude the process. Further rounds of user evaluations have to be conducted expanding on both the considered target group and number of evaluation heuristics as the development progresses. That is to ensure that the user demands on the final product are met.

REFERENCES

- BASTIEN, J. M. C. (2009) Usability testing: a review of some methodological and technical aspects of the method. *International Journal of Medical Informatics*, In Press, Corrected Proof.
- BEVAN, N. (1995) Measuring usability as quality of use. *Software Quality Journal*, 4, 115-130.
- DUMAS, J. S. & REDISH, J. C. (1999) *A Practical Guide To Usability Testing* Exeter, Intellect Books.
- EU JOINT RESEARCH CENTRE (2009) SimLab3.2.5.
- FOLMER, E. & BOSCH, J. (2004) Architecting for usability: a survey. *Journal of Systems and Software*, 70, 61-78.
- HINKIN, T. R. (1995) A Review of Scale Development Practices in the Study of Organisations. *Journal of Management*, 21, 967-988.
- HOLZINGER, A. (2005) Usability engineering methods for software developers. *Commun. ACM*, 48, 71-74.
- HOPFE, C. J. & HENSEN, J. (2009) Experiences testing enhanced building performance

- simulation prototypes on potential user group. *11th IBPSA Building Simulation Conference*. Glasgow, UK, International Building Performance Simulation Association.
- ISO9241-11 (1998) Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs) -- Part 11: Guidance on usability.
- NIELSEN, J. (1993) *Usability engineering*, Chestnut Hill, MA, Academic Press.
- NIELSEN, J. (1994) Enhancing the explanatory power of usability heuristics. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems: celebrating interdependence*. Boston, Massachusetts, United States, ACM.
- NIELSEN, J. & LANDAUER, T. (1993) A mathematical model of the finding of usability problems. IN ASHLUND, S., MULLET, K., HENDERSON, A., HOLLNAGEL, E. & WHITE, T. (Eds.) *INTERCHI 93: Conference on Human Factors in Computing Systems*. Amsterdam, The Netherlands, Association for Computing Machinery (ACM), New York (USA).
- QUESENBERRY, W. (2008) Choosing the Right Usability Technique: Getting the Answers You Need. *User Friendly 2008 - Innovation for Asia*. Shenzhen, China.
- SAUER, J., SEIBEL, K. & RÜTTINGER, B. (2010) The influence of user expertise and prototype fidelity in usability tests. *Applied Ergonomics*, 41, 130-140.
- SHACKEL, B. (2009) Usability - Context, framework, definition, design and evaluation. *Interacting with Computers*, 21, 339-346.
- VABI SOFTWARE BV (2010) VA114. Delft, Vabi Software BV.

EXPLORING THE AVAILABILITY AND USABILITY OF WEB-BASED BUILDING PERFORMANCE SIMULATION TOOLS

Rukiye Cetin, Ardeshir Mahdavi
 Department of Building Physics and Building Ecology
 Institute of Architectural Sciences
 Vienna University of Technology
 Vienna, Austria

ABSTRACT

In the last two decades web-based simulation (WBS) has become increasingly available. In the process, it has also become relevant for building performance simulation (BPS). After discussing the present state of web-based BPS tools, a framework is offered to categorize the currently available tools. In order to address usability issues, selected tools (in thermal and energy domain) are considered in more detail. A sub-set of these tools are subsequently tested by a small user group.

INTRODUCTION

During the last decade, web-supported tools for knowledge inquiry and problem solving have been increasingly become popular. The growing availability of web-based sources of advisory information and decision-making support tools "anywhere and anytime" holds a promising future for professionals and stakeholders in many different domains. The ease of use and instantly distributed updates to the applications are amongst the features that enhance the pervasive use of such resources and tools (Byrne et al. 2009). Particularly in engineering fields, expenses associated with acquiring and maintaining conventional software applications often represents a detriment and an obstacle to users with limited resources (for example potential users in the developing countries). Thus, in the area of building design and construction too, free (or low-cost), low-maintenance, and easy to use web-based tools could provide an effective alternative to users (students, architects, engineers, etc). The present contribution focuses on an assessment of web-based computational applications in the field of building (thermal) performance analysis. An overview is provided, and preliminary usability tests are undertaken. Specifically, the usability of web-based tools in the context of conceptual design stage (Zhu et al. 2007) is explored.

The contribution briefly enumerates, classifies, and compares some 24 available web-based simulation (WBS) tools. A small subset of these tools is subsequently presented to a small group of potential users within the framework of a usability assessment

session (Nielsen 1995). Moreover, suggestions are made toward further development and subsequent improvement of such tools.

Augenbroe (2003) has assessed the role of "e-simulation" in the future context and its potential benefits over the traditional BPS applications. There are several prior studies about WBS on Building Science field. Mills 2002 discussed (for USA and Canada) the current state of residential energy analysis for both web-based and conventional tools. The review consisted of 50 web-based tools, which was narrowed down to 21 tools and compared with 6 conventional tools. A large number of WBS tools were found to lack updates or inaccessible altogether.

SURVEY

We selected a number of tools from (Crawley 1998). The rest was identified based on internet and literature search. The tools were classified in two dimensions: 1) the simulation domain, 2) the tool type (see Table 1). Six simulation domains were distinguished: i) thermal/energy performance, ii) code compliance, iii) cost analysis, iv) active energy systems, v) lightning, and vi) others. The type dimension involves 3 categories: a) remote simulation and visualization (RSV), indicating tools that are entirely internet driven; b) hybrid simulation and visualization (HSV), in which the simulation runs remotely on a simulation server and visualization engine is downloaded to the client side via a web-browser; c) local Simulation and visualization (LSV), where both the simulation engine and visualization components are downloaded to the client server (Byrne et al. 2009). We included LSVs, since they can be employed without a charge. A total of 136 tools were mapped onto the framework, namely 51 RSVs, 6 HSVs, and 79 LSVs.

PRELIMINARY EVALUATION

We conducted a preliminary assessment of selected WBS tools in the thermal and energy domain. Thereby, usability problems were the starting point for the development of a questionnaire (see Figure 1) including of 11 items. We evaluated 24 tools (see Table 2) in view of the issues addressed in this questionnaire.

Table 1 Categorization of the 136 surveyed WBS tools (note that certain tool are categorized in more than one category)

DOMAIN	RSV	HSV	LSV
Thermal/energy	19	5	18
Cost analysis	5	-	4
Code Compliance	9	1	14
Lighting	3	-	19
Active systems	10	1	13
Others	13	-	25

Table 2 List of tools for preliminarily evaluation

CODE	TOOL NAME	SIMULATION DOMAIN
A	Acuity Energy Platform	Energy management tool
B	Appliance Calculator	Appliances' cost/energy estimation
C	Home Energy Saver	Cost/energy and saving estimation
D	Home/ Commercial Energy Suite	Cost/energy estimation
E	ArchiPHYSIKweb pro	Energy estimation and code compliance
F	Building/ Green Energy Performance Compass	Energy use and savings, CO2 emissions
G	Cal- Arch	Energy use
H	Clarity	Energy management
I	MIT Design Advisor	Energy use, daylight
J	EnergyCAP Energy Benchmark	Energy use
K	Energy Profile Tool	Energy use, cost estimation, CO2 emissions
L	foAudits	Energy use (PDA or Palms)
M	My e-Home	Energy use
N	Rehab Advisor	Energy saving
O	Smeasure	Energy use and green house gas emissions
P	Building Advice	Energy use and savings, code compliance
Q	Building Green House Rating	Energy use and savings, code compliance
R	Energy Work Site	Energy use, cost estimation, code compliance
S	Green Quest	Energy use, cost estimation, CO2 emissions, code compliance
T	H1 Compliance Calculator	Energy use, code compliance
U	COM Check Web	Code compliance
V	Energy Star Home Advisor	Energy saving
W	IC3	Code compliance
X	RES Check Web	Code compliance

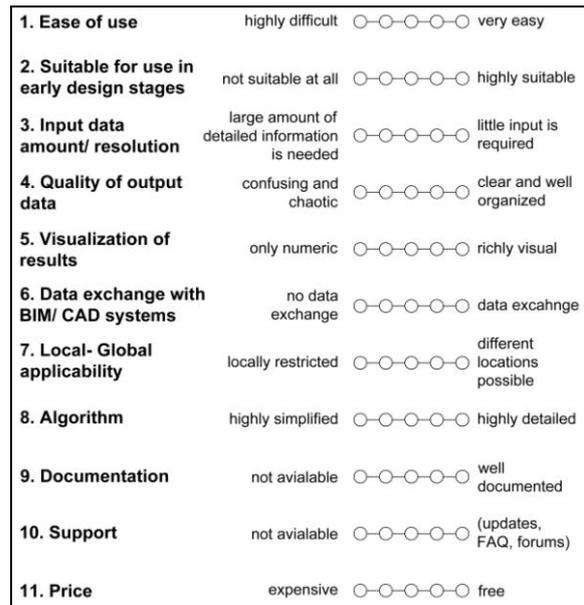


Figure 1 Questionnaire for tool assessment

To aggregate the 11 items of the questionnaire into a simple single-number indicator, a weighting scheme would be necessary. For the purpose of the present study, the weighting scheme of Table 3 was applied. In this scheme, weights associated to each question are expressed in percentage adding up to 100%.

Authors' preliminary evaluation of the 24 tools mentioned in Table 2 resulted in the total scores depicted in Figure 2. From this set, 3 tools were selected (*I*, *M*, and *T*) for further evaluation by a small group of users. *I* had the highest value (Figure 2) in the authors' evaluation. *M* supports the construction of 2D and 3D geometric building models. Lastly, *T* possesses data exchange capability.

Table 3: Evaluation of the Questionnaire

	QUESTIONNAIRE ITEM	WEIGHT (%)
1	Ease of use	10
2	Suitable for use in early design stages	12.5
3	Input data amount/ resolution	7.5
4	Quality of output data	10
5	Visualization of the results	7.5
6	Data exchange with BIM/ CAD systems	7.5
7	Local- Global applicability	12.5
8	Algorithm	12.5
9	Documentation	7.5
10	Support	5
11	Price	7.5
	TOTAL	100

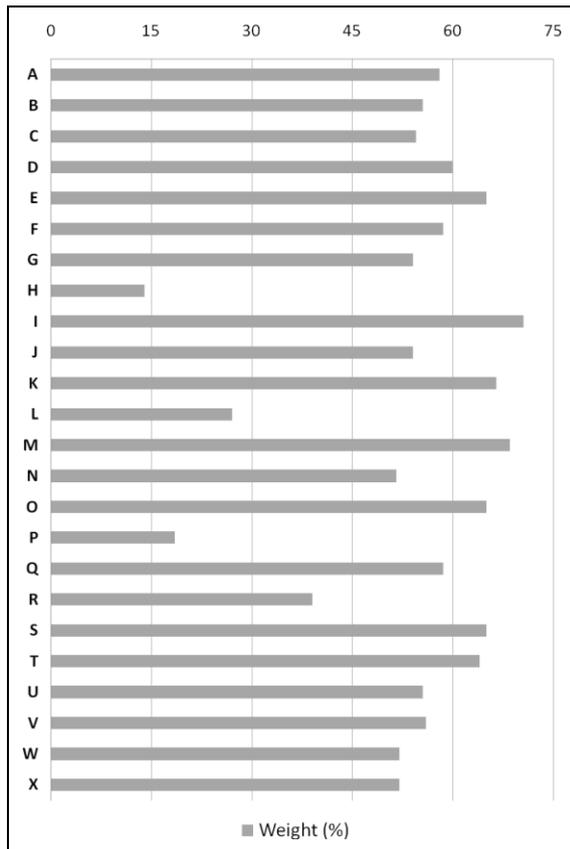


Figure 2: Preliminary Evaluation for Thermal Energy Calculators

TEST WITH A SMALL GROUP

The test was conducted with a small group of potential users (16 architecture and engineering students). A specific task (evaluation of the energy performance of a small building) was given to the participants, for which the 3 above mentioned tools were to be used. Before conducting the test with the participants, we formulated our expectations (conjectures as to how the participants would evaluate the tools) based on our own evaluation. These formulations are summarized in Table 4 in terms of 12 hypotheses.

The participants' evaluations of the 3 tools are summarized in Figure 3 in terms of mean values. The general trend in the evaluations of the authors and the participants are similar (see Figure 4). *I* ranks, in both cases, ahead of *M*, followed by *T*.

A more detailed analysis of the results is provided in Table 4, which includes remarks concerning the authors' conjectures (see Table 5) and the participants' views (see Figure 3) on a question by question basis.

Table 4 A summary of the authors' conjectures regarding tools *T*, *I*, and *M*, as formulated prior to the test with a small group of users

QUESTION	HYPOTHESIS
1. Ease of Use	Selected tools are generally easy to use. <i>T</i> 's GUI is deficient, making navigation difficult.
2. Early design stage suitability	<i>T</i> and <i>I</i> do not support schematic design stage effectively.
3. Input data amount/ resolution	<i>T</i> requires large amount of input data. <i>I</i> requires the least amount of input data.
4. Quality of output data	<i>M</i> and <i>I</i> provide clear and well-organized output. <i>T</i> appears rather confusing.
5. Visualization of results	Except <i>T</i> , tools provide effective visualization.
6. Data exchange with BIM or CAD	<i>I</i> does not support data exchange. <i>M</i> exports and imports only *.meh extensions. Tool <i>T</i> imports *.gbxml and *.xml extensions.
7. Local – Global applicability	<i>M</i> and <i>T</i> are locally restricted. <i>I</i> offers multiple locations.
8. Algorithm	<i>T</i> is most detailed, followed by <i>M</i> .
9. Documentation	All tools are well documented.
10. Support	<i>M</i> offers only an email contact. <i>I</i> provides FAQ and email support. <i>T</i> provides these features plus a forum.
11. Price	All tools are free, but <i>T</i> 's report must be purchased.
12. Satisfaction	<i>I</i> is easier to use and requires less input data. <i>M</i> provides better visualization, and does not require deep technical background, but is limited concerning building types. <i>T</i> 's GUI is deficient, but appears to be more detailed and reliable.

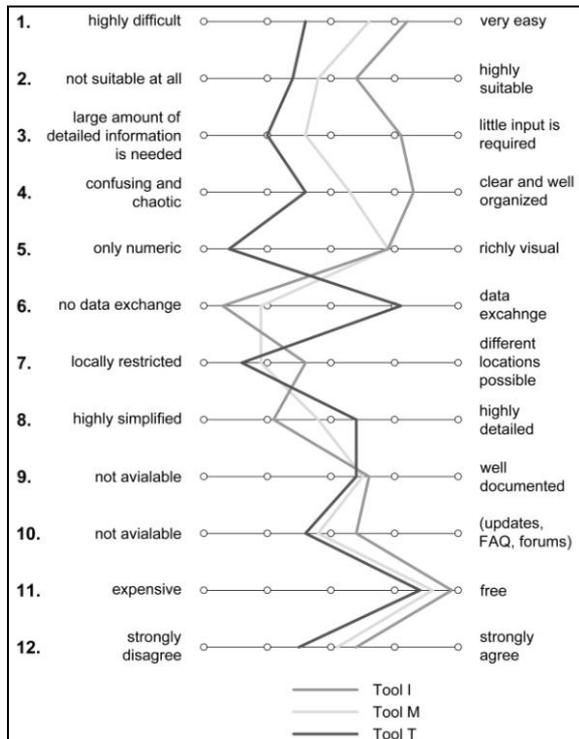


Figure 3 Mean values of the user group evaluation



Figure 4 Comparison between the participants' test results and the authors' preliminary evaluation

Table 5 Analysis of the test results

QUESTION	ANALYSIS
1. Ease of Use	<i>I</i> requires less input data and provides default settings, hence it was found easy to use. <i>M</i> has a friendlier user interface as compared to <i>T</i> .
2. Early design stage suitability	Contrary to the authors' conjectures, they found <i>I</i> more suitable than the other two. The reason seems to be that users focused on the fact that <i>I</i> requires less information, not that this information is not necessary available at the early stages of design.
3. Input data amount/ resolution	Similar to authors' conjecture, <i>I</i> was seen as requiring the least amount of data input and <i>T</i> has the highest.
4. Quality of output data	<i>I</i> offers users a combined view of the results of different design alternatives, explaining users' preference. Users agreed with the preliminary evaluation in finding <i>T</i> 's output confusing.
5. Visualization of the results	Since <i>T</i> does not provide charts or graphs for results, it received the lowest evaluation.
6. Data exchange with BIM or CAD	<i>T</i> was the only tool that enables the users to import files with BIM extensions.
7. Local – Global applicability	Even though <i>I</i> offers a variety of locations, it received a lesser evaluation than expected: users implied that the locations were not distributed well enough. <i>M</i> is available only in Denmark and <i>T</i> in New Zealand.
8. Algorithms	Users' views confirm the preliminary evaluation.
9. Documentation	Users' views confirm the preliminary evaluation.
10. Support	As opposed to our conjecture, <i>T</i> 's support function was not considered high, as the users could not access forum, due to the tool's GUI.
11. Price	All tools are free in principle. But the registration requirement of <i>M</i> and the report cost for <i>T</i> appear to have affected participants' judgment.
12. Satisfaction	All tools were found modestly satisfactory.

CONCLUSION

Web-based BPS tools have the potential to reach a large and diverse range of users from architects to facility owners. As participants in our small experiment suggest, the ease of use, instant accessibility, effective visualization, and low cost of the tools represent the main advantages of such tools. However, participants in our test commented that they expected more efficient data management and exchange capabilities so that building models (including geometry and material information) may be reused, thus saving time. Moreover, most tools are applicable only for limited locations, mostly due to the lack of pertinent weather information and local building materials and systems data.

Generally speaking, most WBS tools do not offer the possibility of collective developments and enhancements. If an open-source mentality would prevail in the BPS community, such tools could be developed by larger groups of collaborators, leading to richer and more widely applicable tools. Likewise, supporting functionalities such as data bases for weather information as well as materials and systems information could be more efficiently developed.

To maintain the advantages of WBS tools in terms of instant accessibility, simple user interaction features, low costs but provide, at the same time, sufficiently detailed and reliable results, tools with a hybrid structure may offer the best opportunity: they combine the best features of local and remote simulation (Byrne et al. 2009). The workload on the server is reduced (as compared to conventional WBS approaches) by exporting the animation/visualization functionality to the client side (Myers 2004). Thus, BPS tools with hybrid approach could offer the same features as the conventional tools in terms of data interoperability and provision of a database.

In conclusion, it must be stated, that while the increased application of web-based BPS tools is highly desirable, it may also contain a risk: the authors as well as the users with some technical background question the reliability of the underlying abstractions, data bases, and computational algorithms of currently available simplistic tools. Users lacking a sufficient technical background in building physics and technology may use tools in an inappropriate manner, arrive at mistaken results, or interpret results wrongly. It would be thus important (as one of the many possible and necessary measures); to augment WBS tools availability with effective online courses and curricula in the relevant areas of building physics.

REFERENCES

Augenbroe, G., :2003, Trends in building simulation, Advanced Building Simulation, ISBN 0-203-07367-3, p.4-24

- Byrne, J., Heavey C., Byrne P.J., : 2009, A review of Web-based simulation and supporting tools, Simulation Modeling Practice and Theory, Article in press
- Crawley, D.B. 1998. Building Energy Software Tools Directory: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/ Washington, DC: U.S. Department of Energy. (The on-line version has been updated extensively since first publication).
- Mills, E. 2002. Review and Comparison of Web- and Disk-based Tools for Residential Energy Analysis. Lawrence Berkeley National Laboratory, report no:50950. Berkeley, California, USA.
- Myers, D.S., 2004, An Extensible Component-Based Architecture for Web-Based Simulation Using Standards-Based Web Browsers, Department of Computer Science, Virginia Polytechnic Institute and State University
- Nielsen, J. : 1995, Technology transfer of heuristic evaluation and usability inspection, IFIP INTERACT'95 International Conference on Human-Computer Interaction, Lillehammer, Norway
- Peng, Z.R., and Tsou, M.H., 2003 Internet GIS: Distributed Geographic Information Services for the Internet and Wireless Networks. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Zhu, Y., Xia, C., Lin, B., 2007, Discussion on methodology of applying building thermal simulation in conceptual design, Proceedings: Building Simulation 2007

APPENDIX

URL information for the WBS tools considered in the preliminary evaluation

CODE	TOOL NAME	WEB SITE
A	Acuity Energy Platform	www.agentisenergy.com
B	Appliance Calculator	www.energynewengland.com/old%20energynewengland/softapps.htm
C	Home Energy Saver	homeenergysaver.lbl.gov/
D	Home/ Commercial Energy Suite	www.apogee.net/
E	ArchiPHYSIKweb pro	www.web-planquadrat.at/de/planquadrat.html
F	Building/ Green Energy Performance Compass	www.abgr.com.au
G	Cal- Arch	poet.lbl.gov/cal-arch/start.html
H	Clariti	www.energyclariti.com
I	MIT Design Advisor	designadvisor.mit.edu/design/
J	EnergyCAP Energy Benchmark	www.energycap.com/benchmark/
K	Energy Profile Tool	www.energyprofiletool.com/subscription
L	foAudits	www.foaudits.com
M	My e-Home	www.savingtrust.dk/consumer/tools-and-calculators/my-home/myhome-register-profile-cookies
N	Rehab Advisor	www.rehabadvisor.pathnet.org/index.asp
O	Smeasure	www.smeasure.org.uk
P	Building Advice	www.airadvice.com
Q	Building Green House Rating	www.abgr.com.au
R	Energy Work Site	www.energyworksite.com/corporate
S	Green Quest	www.mygreenquest.com
T	H1 Compliance Calculator	www.design-navigator.co.nz/DNProcessProject.php
U	COM Check Web	energycode.pnl.gov/COMcheckWeb/
V	Energy Star Home Advisor	www.energystar.gov/index.cfm?fuseaction=home_energy_advisor.showGetInput
W	IC3	ic3.tamu.edu/login
X	RES Check Web	energycode.pnl.gov/REScheckWeb/

A GENERIC MODEL FOR ENERGY ASSESSMENT OF A DETACHED FAMILY HOUSE

Roman Rabenseifer

Dpt. of Building Construction, Faculty of Civil Engineering, STU Bratislava, Slovakia

e-mail: roman.rabenseifer@stuba.sk

ABSTRACT

The paper describes a pre-made Capsol based generic model for assessment of the future energy efficiency and indoor comfort of detached low-energy houses including its Excel-based interface for input of selected free parameters and selection of the pre-defined ones. The generic model is “overloaded” with modelled wall types, climate data and heating and cooling systems including ventilation and movable shading. Not all of them must necessarily be used. The selection is made via the mentioned Excel-based interface. In addition to description of the generic model a simple case study on optimization of thermal insulation thickness in relation to the mean U-Value and the expected energy demand for heating will demonstrate the use of presented generic model.

INTRODUCTION

It is clear that the existing software for building performance simulations, be it esp-r or Capsol for assessing the energy efficiency and indoor comfort of buildings, is very complex and requires a high level of experience. Although they could profit from such software architects are rarely its users. The distance between architects and the software can be decreased by developing generic models that allow for selected free design parameters, where those parameters requiring in-depth-knowledge are pre-defined. Then, non-experienced users would be able to perform accurate building performance simulations, as the generic models are based on existing, scientifically proven software. Another important benefit of the generic models is that they help to improve the thermal knowledge and experience of the user.

This paper describes a Capsol-based generic model for assessing the future energy efficiency and indoor comfort of detached, low-energy houses. It treats the ground floor and the attic as two separate thermal zones, in order to take into account the difference in heat accumulation between the more (ground floor) and less (attic) heavy construction of their envelopes.

Another good reason for using generic models is based on the fact that in 2008, the European Committee for Standardization (CEN) issued the

standard EN ISO 13790 on energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling. The EN ISO 13790 was obviously developed with a view of the future use of building performance simulation in the design and evaluation of the thermal and energy performance of buildings. It presents a coherent set of calculation methods at different levels of detail, including, among others, the the dynamic simulation method. However, putting the described simulation method into action depends very much on the correct use of the building performance simulation software. The physical model of the building and its simulation model are two different things, where the former has to be converted into the latter using the simulation software. As the simulation software available on the market varies, and the standard EN ISO 13790 does not describe in detail how to overcome this gap between the physical model of the building and its simulation model, this is currently left up to the user. The generic models provide a promising option that could help in the conversion process and, perhaps, even standardize it sometime in the future.

GENERIC MODEL

The principle of the generic model is based on the fact that Capsol input and output files are stored as text files and can be manipulated by external programs, such as Visual Basic for Applications (VBA) available in Excel. Hence the Capsol model can be “overloaded” with modeled wall types, heating and cooling systems and climate data. Not all of them must necessarily be used. The selection can be made via a tailor-made building-type specific interface (Fig. 1), which is in this case programmed in Excel using VBA. The user can either define (green fields, e.g. areas, orientations or roof slopes) or choose (yellow fields) some design parameters (Figs. 2 and 3). The pre-defined parameters requiring an in-depth-knowledge are:

- Building type, which can be either brick-based or lightweight construction. The building type is already defined by selection of the initial Capsol file, but can be changed at this point. The possible change affects the thermal insulation thickness of the building walls as the brickwork wall

composition is of a different thickness compared with the lightweight one.

- Climate data (in principle calculations can be made for any climate data, provided they are organized in the form required). The version currently available contains climate data of three cities - Bratislava, Brussels and Stuttgart, which can be edited, should particular calculations be required.

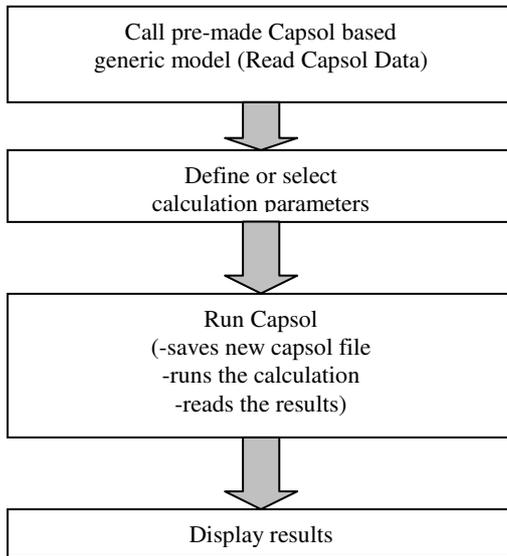


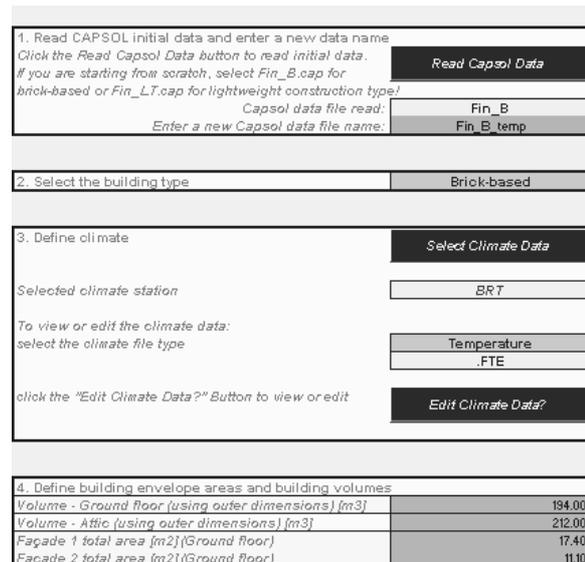
Fig. 1 Simplified scheme of the Excel VBA based interface

- Thermal insulation thickness, where the selection can be made from among 100, 150, 200, 250 and 300 mm in case of brick-based, and 140, 190, 240, 280 and 330 mm in case of lightweight, construction. The thermal insulation is part of the predefined wall compositions. The same applies to the roof construction, the thermal insulation of which is, in both cases, 220, 250, 275, 275 and 300 mm and automatically changes with the selection of the wall insulation thickness, so that if the wall insulation is 150 mm in the case of brickwork or 190 mm in the case of lightweight construction, the roof insulation is 250 mm (Table 1).

Table 1
Thermal insulation thickness [m] of the main parts of building envelope

BRICKWORK CONSTRUCTION					
Base plate	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
Walls	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300
Roof	0.220	0.250	0.275	0.275	0.300
LIGHTWEIGHT CONSTRUCTION					
Base plate	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
Walls	0.140	0.190	0.240	0.280	0.330
Roof	0.220	0.250	0.275	0.275	0.300

- Quality of windows (glazing having the U-Value of 1,09 or 0,8 W/(m²K)).
- Heating system operation defined as air heating with or without heat exchanger. If the heat exchanger is applicable, the system is considered to be intermediate, having different target comfort temperatures for daytime and night. The heating system without heat exchanger can be either intermediate or without difference between the day and night target temperatures. Either way the required target temperatures (either a single value, if there is no difference between day and night, or values for daytime and night in case of intermediate heating) and the available heating power must be inserted. The expected necessary heating power can be assessed based on the steady-state calculation of the transmission and ventilation heat losses. At this point it is important to note that the overall heating demand (apart from heat gains) does not depend on the differences between exterior and required interior comfort temperature and related heat loss only, but also on the available power and the time response of the heating system. The time response is the time necessary to reach the target indoor temperature plus upwards sensitivity after the indoor temperature's drop to the sensor's lower limit. The time response depends mainly on the accumulation properties of the surrounding building envelope. This fact is not considered in the course of the usual steady state or quasi-steady state calculations and hence very often not realized. In fact, it makes one of the major differences between them and the dynamic calculation methods.



1. Read CAPSOL initial data and enter a new data name
 Click the Read Capsol Data button to read initial data.
 If you are starting from scratch, select Fin_B.oap for brick-based or Fin_LT.oap for lightweight construction type!
 Capsol data file read:
 Enter a new Capsol data file name:

2. Select the building type

3. Define climate

 Selected climate station:
 To view or edit the climate data:
 select the climate file type:

 click the "Edit Climate Data?" Button to view or edit

4. Define building envelope areas and building volumes

Volume - Ground floor (using outer dimensions) [m ³]	194.00
Volume - Attic (using outer dimensions) [m ³]	212.00
Façade 1 total area [m ²](Ground Floor)	17.40
Façade 2 total area [m ²](Ground Floor)	11.10

Fig. 2 Excel VBA based interface of the generic model for the assessment of the heating and cooling energy demand of detached houses

- Cooling systems operation offering three options – an air conditioning, natural ventilation and an outer

movable shading of windows. Each option can be used separately or in any combination with another two. The principle behind the air conditioning is basically the same as the one behind intermediate heating. Natural ventilation, if applicable, means simply opening the windows, and is switched on and off at the inserted target comfort temperature (the natural ventilation should not be confused with the so called “hygienic” ventilation to outdoors, which is active the whole year round and set to 0,5 of total interior volume per hour whereas 30 per cent of the ground floor volume is ventilated via the attic (both floors are connected through the staircase)). The movable outer shading applies to all windows of the given facade, gable or roof and, if selected, is switched on and off at the solar radiation intensity of 200 W/m².

- Sun obstacles in the surroundings defined as plane area, hilly country and forest / city, which correspond to maximum altitudes of 5°, 20° and 40° respectively of the foreseen obstacles.

12. Define the sun obstacles in the surroundings:	Plane area
13. Run CAPSOL Capsol run mode: wait at the end to see graphics? If yes, you have to save the graphics manually! Click the RunCapsol button	no RunCapsol
14. Main simulation results for following mean U-value:	
Yearly heating demand [kWh] - Ground floor	
Yearly heating demand [kWh] - Attic	
Yearly cooling demand [kWh] - Ground floor	
Yearly cooling demand [kWh] - Attic	
Nos. of hours with indoor T > 25°C [h] - Ground floor	
Nos. of hours with indoor T > 25°C [h] - Attic	
Maximum indoor temperature [°C] - Ground floor	
Maximum indoor temperature [°C] - Attic	
15. Open the graphics in the pop-window:	
Show heating and cooling energy demand:	Energy demand
Show indoor comfort: (max. Ti, number of hours with Ti > 25°C):	Indoor comfort

Fig. 3 Excel VBA based interface of the generic model for the assessment of the heating and cooling energy demand of detached houses – final table with selected result types and two buttons displaying either energy demand or thermal comfort chart

After the definition and selection of the parameters has been completed, the Capsol software is started using the button “Run Capsol” (Fig. 3). This command initiates the creation of a new Capsol file based on a generic model with user-defined and selected data, the actual calculation in Capsol and the import of required results back to Excel. As the purpose of this generic model is to investigate the heating and cooling energy demand and indoor thermal comfort, a special final table and two buttons displaying either energy demand or thermal comfort chart have been arranged (Figs. 3, 4 and 5). In reality the interface Excel file for defining and selecting the user data for later calculation with Capsol contains

three basic worksheets – “Input”, “Data” and “Output1”. The worksheet “Input” is the one, through which the definition and selection of appropriate user data occurs, and is shown in the Figs. 2 and 3. The data from the basic generic model prepared in Capsol are read into the worksheet “Data” by clicking on the button “Read Capsol Data” (Fig. 2). Any alteration to the “Input” worksheet is automatically transferred into the worksheet “Data” when initiating the Capsol calculation (button “Run Capsol”). Then, the new data are transferred into Capsol and saved as a new Capsol file using a special VBA code (macro) developed by Physibel. The Capsol calculation is performed and the results are exported back to the interface Excel file, into the worksheet “Output1”. This happens thanks to a unique VBA code (macro) developed by Physibel as well. The results placed in the “Output1” worksheet are processed by some macros and displayed as charts and a table at the end of the “Input” worksheet (Figs. 3, 4 and 5).

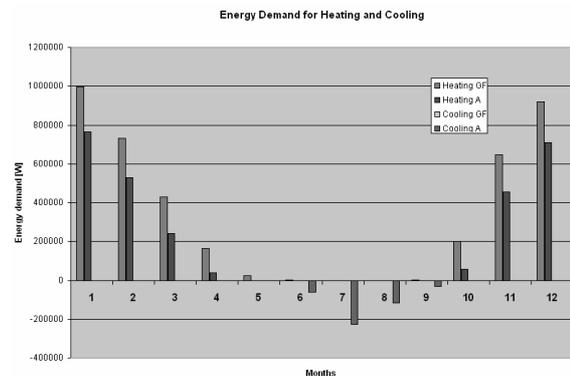


Fig. 4 Chart showing energy demand for heating and cooling

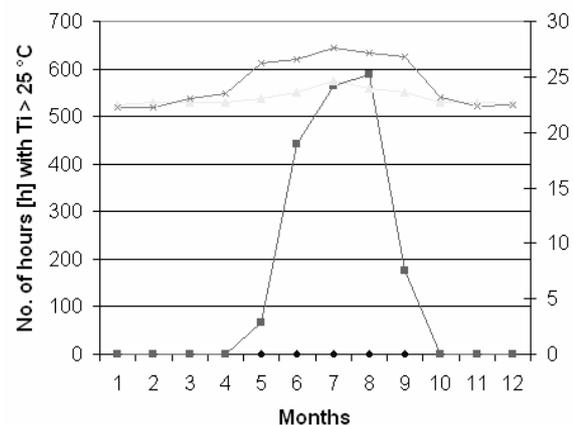


Fig. 5 Chart showing the indoor comfort in terms of number of hours with interior temperature higher than 25°C.

The basic generic model developed in Capsol can also be used separately from the Excel interface. Advanced Capsol users can use it as a base for creating their own modified models, as it contains

prepared schemes of the heating and cooling operation. For such cases, the Excel interface is useless. While its purpose is to facilitate working with Capsol, it must not necessarily be used. The techniques used for modeling the single operations of heating and cooling systems are described in detail in the Capsol Manual and the Physibel Pilot Book (simulation of sunscreens).

CASE STUDY

The change of some selected parameters can be automated under certain circumstances, e.g. the newly created Capsol file can be run consecutively with varying thermal insulation thickness. This can save work, particularly when several cases are being investigated. The Fig. 6 shows the relationship between the improvements of the mean U-values by increasing the heat insulation thickness on one side and the reduction of energy demand for heating on the other side. It is quite obvious that the “linear” reduction of the heat energy demand is achieved by the “geometrical” increase of the heat insulation thickness.

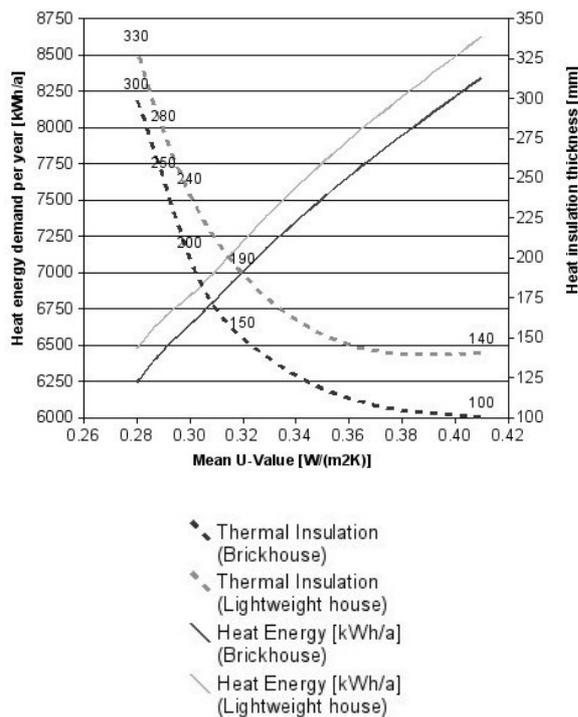


Fig. 6 The effect of the mean U-value [W/(m2.K)] improvement in dependence on heat insulation thickness [mm] upon the annual reduction of energy demand for heating [kWh/a]

Somewhere between the mean U-Values of 0.30 and 0.32 W/(m2K), which corresponds to approx. 17.5 cm of thermal insulation in the brick house and approximately 21 cm for the lightweight house, the rational increase of the thermal insulation thickness stops. Just to compare: to improve the mean U-Value

from 0.41 to 0.32 W/(m2K), and the reduction of heat energy demand in the range of 1500 kWh/a, 5 cm of additional thermal insulation is necessary. A subsequent 5 cm increase of thermal insulation brings about an improvement of the U-Value of only 0.02 W/(m2K) and the reduction of heat energy demand in the range of 300 – 400 kWh/a. This leads to the conclusion that the efficiency of the increase of thermal insulation thickness has both its economical as well as ecological limits.

CONCLUSION

The idea of the generic models originates from Prof. Dr. Piet Standaert from the company Physibel, and the one described here, was developed in cooperation with this company. Both the generic model and the related Excel-based interface can be downloaded from the website www.cab.sk.

The generic models can be developed for any building type and, depending on their purpose, in more or less detail. Their application can reach from the early design stage up to the issuance of building energy passports. Whenever large numbers of calculations with changing parameters are required, the use of generic models can be an advantage, for example, when assessing various refurbishment options for the same building type like such as Eastern European panel buildings. Moreover, generic models can give users a high certainty that the achieved results are building physically correct and they can also contribute to the improvement of the users' thermal knowledge and experience.

REFERENCES

- CAPSOL, v.4.0 Computer Program to Calculate Multi-zonal Transient Heat Transfer, © 2002 PHYSIBEL
- PHYSIBEL SOFTWARE PILOT BOOK - Practical problems solved using the Physibel Software © 2004 PHYSIBEL
- EN ISO 13790:2008 Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling
- Fantl K., Panzhauser E. and Wunderer E. (1996). Der österreichische Gebäude – Energieausweis. Energiepass, TU Wien (in German)
- Rabenseifer R. (2007). Environmental Assessment of a Low-Energy House, Proceedings of the CESB 07 Prague Conference – Central Europe towards Sustainable Building, Volume 1, September 24 - 26, 2007, Prague, Czech Republic, pp. 187-195.
- Walkenbach J. (2007). Excel 2007 Power Programming with VBA, Wiley Publishing, Inc., Hoboken, NJ, USA

INTERAKTIVE SIMULATION TRANSIENTER WÄRMETRANSPORTPROZESSE IN UND AN GEBÄUDEN

Sebastian Bindick, Maik Stiebler, Manfred Krafczyk
 Institut für rechnergestützte Modellierung im Bauingenieurwesen
 Technische Universität Braunschweig
 Pockelsstr. 3, 38106 Braunschweig, Deutschland

KURZFASSUNG

In diesem Artikel wird ein Software-Prototyp zur transienten Simulation thermischer Transportprozesse in und an Gebäuden vorgestellt. Hierbei wird besonders auf die Strahlungs-Struktur-Wechselwirkung eingegangen, die für viele Ingenieurprobleme von besonderer Bedeutung ist. Die numerische Berechnung des Strahlungsaustausches basiert auf der Radiosity-Methode und wurde um Beschleunigungsverfahren erweitert, die es erlauben das instationäre Strahlungsproblem effizient zu lösen. Die Strahlungssimulation ist direkt an die Berechnung der Wärmeleitung in der Struktur, basierend auf der Finite-Differenzen-Methode, angekoppelt. Das entwickelte Simulationsframework ist außerdem in einen virtuellen Entwurfsraum eingebettet, der neben der Verwendung komplexer Geometrien auch Ansätze des Computational Steering unterstützt.

ABSTRACT

In this article we present a software prototype for transient simulations of heat transport problems in civil engineering, combining efficient numerical methods with a computational steering framework which supports interactive modeling, simulation and visualization of heat transfer in complex buildings. For the full radiant energy exchange in three-dimensional domains an optimized hierarchical radiosity method is used. Here the radiation is directly coupled to the heat conduction calculation based on the Finite-Difference-Method.

EINLEITUNG

Ein umfangreiches Wissen über komplexe thermische Prozesse in und an Gebäuden kann nur mit Hilfe von transienten 3D Simulationen (oder mittels extrem aufwändiger Experimente) erlangt werden. Dieser Artikel stellt einen Software-Prototypen zur effizienten Simulation und Optimierung thermischer Systeme vor, wie sie für Ingenieur Anwendungen insbesondere im Bauingenieurwesen typisch sind (vgl. Abbildung 1). Der Fokus wurde hierbei auf die Strahlungs-Struktur-Wechselwirkung gelegt, die für viele bauphysikalische Fragestellungen von großer Bedeutung ist.

Zur Lösung des Wärmestrahlungsproblems wird ein numerischer Ansatz basierend auf der hierarchischen Radiosity-Methode verwendet. Durch die Verwendung von hochoptimierten Kd-Bäumen zur Speicherung der an der Strahlung beteiligten Objekte und der Verwendung eines adaptiven hierarchischen Ansatzes zur Berechnung des Strahlungsaustausches konnte die Laufzeitkomplexität drastisch reduziert werden. Der Strahlungskern ist direkt an ein Modul zur Simulation der Wärmeleitung gekoppelt. Hierbei wird der Energietransport in wärmeleitenden Materialien für instationäre Temperaturfelder mit einem Finite-Differenzen-Verfahren (FDM) berechnet. Dieses konnte aufgrund seiner besonderen Struktur effizient zur parallelen Berechnung auf Grafikkarten (GPGPU's) implementiert werden, um die typische Laufzeit um zwei Größenordnungen zu reduzieren.

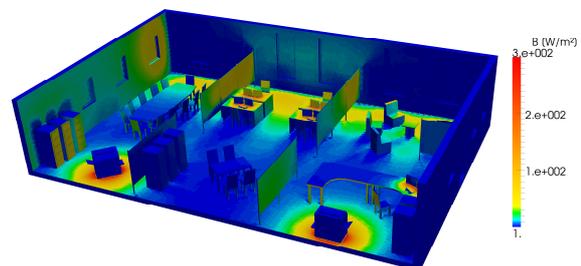


Abbildung 1 Energieverteilung in einem Büroraum zur Behaglichkeitsoptimierung

Neben den modernen numerischen Ansätzen zur Lösung des physikalischen Problems werden auch Methoden des Computational Steering eingesetzt, die eine direkte Modifikation des Simulationssystems zur Laufzeit (d.h. ohne die laufende Simulation zu unterbrechen) erlauben und damit ermöglichen ein schnelles und detaillierteres Wissen der Auswirkungen von Änderungen (beispielsweise an der Gebäudegeometrie) zu erlangen. Hierbei kann eine Gruppe von Fachplanern innerhalb eines virtuellen Entwurfsraumes kooperativ komplexe Gebäudestrukturen unter thermischen Gesichtspunkten optimieren.

In den folgenden Abschnitten wird ein Überblick über die entwickelten Komponenten, die numerischen Ansätze und Anwendungsbeispiele gegeben.

THERMISCHE SIMULATION

Wärme ist eine Energieform, die entweder diffusiv (bedingt durch Gradienten), konvektiv (durch Strömung) oder durch Strahlung übertragen wird. Ein Wärmestrom ist typischerweise mit einem Entropiestrom verbunden, so dass die Wärme nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik immer in Richtung fallender Temperatur fließt. Neben der Temperaturdifferenz haben jedoch auch noch andere Größen Einfluß auf den Wärmetransport, wie z.B. physikalische Stoffeigenschaften, der Strömungszustand des transportierenden Fluids oder die geometrischen Eigenschaften. Konvektive Wärmeübertragung, Wärmeleitung und Wärmestrahlung können allein oder in Kombination miteinander auftreten.

Simulation von Wärmestrahlung mit der Radiosity Methode

Körper mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes emittieren ein kontinuierliches Spektrum elektromagnetischer Wellen. Diese Art der Wärmeübertragung erfordert im Gegensatz zur Wärmeleitung oder Konvektion keinen stofflichen Träger und stellt einen wichtigen Mechanismus zum Wärmeaustausch dar (Siegel et al., 2002). Hierbei wird durch Emissions- und Absorptionsprozesse Wärmeenergie zwischen voneinander getrennten Körpern ausgetauscht. Neben der ungleichförmigen Verteilung der Wärmestrahlung über das Spektrum der elektromagnetischen Wellen ist die Strahlungsintensität auch von der Richtung im Halbraum abhängig (Modest, 2003). Diese doppelte Abhängigkeit macht die Betrachtung von Wärmestrahlung kompliziert. Im Rahmen dieses Beitrags wird die Wellenlängenabhängigkeit vernachlässigt, eine Vereinfachung, die bei bauphysikalischen Anwendungsfällen mit ihren typischerweise relativ geringen Temperaturen zu guten Ergebnissen führt.

Zur Simulation des Strahlungsaustausches wird die hierarchische Radiosity-Methode verwendet, ein numerisches Verfahren zur Berechnung von Wärmestrahlung zwischen diffusen Oberflächen in einer abgeschlossenen Umgebung (Goral et al., 1984). Die Oberflächen der zu untersuchenden Struktur werden hierbei in viele kleine Elemente, die sogenannten Patches, unterteilt. Basierend auf dem Energieerhaltungssatz kann für die Umgebung ein Gleichungssystem aufgestellt werden, wobei jeder Patch den Anteil der Wärmeenergie reflektiert, den er empfängt, aber nicht absorbiert (Cohen et al., 1988). Die diskrete Radiosity Gleichung hat die Form:

$$B_i = E_i + \rho_d \sum_{j=1}^n B_j F_{ij}$$

Hierbei beschreibt der Formfaktor F_{ij} die relative Position und Orientierung zwischen zwei sich beeinflussenden Patches. Der in den Formfaktor eingehende Sichtbarkeitstest zwischen zwei

Oberflächen stellt den weitaus rechenaufwendigsten Schritt beim Radiosity-Verfahren dar. Dieser konnte durch Verwendung einer hierarchischen Datenstruktur zur Speicherung der Patches auf eine Komplexität von $O(\log n)$ reduziert werden. Hierbei werden die geometrischen Primitiven (Oberflächendreiecke) in sogenannte Kd-Bäume einsortiert, vgl. Abbildung 2 (Havran, 2002). Ein k -dimensionaler Baum (Kd-Baum) ist eine besondere Form eines unbalancierten binären Suchbaums, der sich für die Sichtbarkeitstests (basierend auf dem Raytracing-Algorithmus) als sehr effiziente Variante zur Speicherung von Oberflächennetzen erwiesen hat (Havran et al., 2002, Szirmay-Kalos et al., 2002). Gegenüber anderen Raumpartitionierungsverfahren wie Octrees, Bounding-Volume-Hierarchien (BVH) oder regulären Gittern kann für das Raytracing ein Speedup von mehreren Größenordnungen erreicht werden.

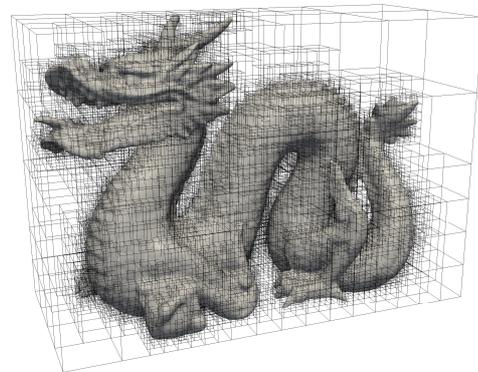


Abbildung 2 Oberflächennetz und Kd-Baum einer komplexen Geometrie

Zur Beschleunigung des klassischen Radiosity-Ansatzes wird die hierarchische Radiosity-Methode verwendet, ein Verfahren, das eine adaptive (Quadtree-ähnliche) Verfeinerung der Oberflächen in Abhängigkeit des Formfaktors zwischen zwei Energie austauschenden Flächen vornimmt (Hanrahan et al., 1991). Ziel dieses Ansatzes ist das Einrichten sogenannter Links zwischen Oberflächen (verschiedener Verfeinerungsstufen), die zum Energieaustausch verwendet werden. Hiermit läßt sich die Komplexität der Radiosity-Methode von $O(n^2)$ auf $O(k^2 + n)$ reduzieren, wobei k die Anzahl der Eingangsoberflächen und n die Anzahl der verfeinerten Flächen darstellt. Die Gesamtkomplexität unter Verwendung der Kd-Baum Datenstruktur und des Hierarchischen Radiosity-Verfahrens beträgt somit $O((k^2 + n) \log k)$. Eine detaillierte Beschreibung und Validierung des Strahlungskerns kann (Bindick et al., 2010a) entnommen werden.

Simulation von Wärmeleitung mit der Finite-Differenzen-Methode

Die Wärmeleitung in einem Feststoff oder in einem ruhenden Fluid wird durch Temperaturgradienten

induziert (Welty et al., 2001). Aufgrund des Energieerhaltungssatzes geht dabei keine Energie verloren (Baehr et al., 2006). Der Energietransport erfolgt zwischen benachbarten Molekülen. In Festkörpern erfolgt der Transport von thermischer Energie ausschließlich durch Wärmeleitung, in Fluiden wird die Wärmeleitung durch Strömung (Konvektion) und durch Wärmestrahlung überlagert. Ein wichtiges Maß für den Wärmestrom in einem Stoff ist die Temperaturleitfähigkeit α , welche sich aus Wärmekapazität, Dichte und Wärmeleitfähigkeit des Materials zusammensetzt. Der Energietransport in einem wärmeleitenden Material für instationäre Temperaturfelder mit Wärmequellen kann durch die Fouriersche Differentialgleichung für eine konstante Wärmeleitfähigkeit das Temperaturfeld beschrieben werden:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) + \frac{W(x, y, z, t, \vartheta)}{c \rho}$$

Zur numerischen Lösung dieses Anfangswertproblems wurde ein explizites Finite-Differenzen-Verfahren (FDM) implementiert, bei der die Ableitungen der Wärmeleitungsgleichung durch Differenzenquotienten ersetzt werden. Diese Diskretisierung approximiert die Lösung der Gleichung an diskreten Stellen, die ein Gitternetz in Raum und Zeit bilden. Die Finite-Differenzen-Methode wird hierbei parallel unter Verwendung des CUDA Frameworks von NVIDIA auf der Grafikkarte ausgeführt (Micikevicius, 2009). Dieser Ansatz führt zu einer Reduzierung der typischen Laufzeit um zwei Größenordnungen.

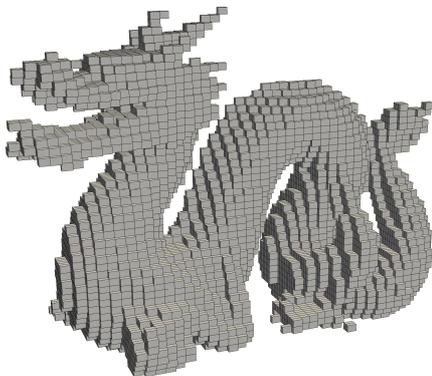


Abbildung 3 Voxelisierung einer komplexen Geometrie

Als Rechengitter für das FDM-Verfahren werden kartesische, strukturierte Gitter verwendet, die eine bauteilweise Diskretisierung mit unterschiedlichen Auflösungen in die einzelnen Raumrichtungen ermöglichen. Für die schnelle Gittergenerierung, die man für interaktive Simulationen benötigt, wird ein Ansatz zur Voxelisierung nach (Ogayar et al., 2007) verwendet. Dieser Algorithmus stellt eine Erweiterung des im zweidimensionalen bekannten Scanline-Verfahrens dar und lässt sich besonders effizient

hardware-beschleunigt ausführen. Abbildung 3 zeigt die Voxelisierung einer komplexen Geometrie.

Die Wärmeleitungsgleichung wird bauteilweise gelöst, d.h. die Berechnung wird für jedes Bauteil getrennt in einem separaten Prozeß gestartet und hat aufgrund unterschiedlicher Auflösung der Bauteile und das daraus resultierenden Stabilitätskriteriums eine eigene Zeitschrittweite. Für aneinandergrenzende Bauteile wird an den Rändern eine Synchronisation notwendig, die über ein Interface durchgeführt wird, das eine zeitliche und räumliche Interpolation der ausgetauschten Energien und Temperaturen durchführt. Durch diese entkoppelte Berechnungsweise lässt sich die Wärmeleitungsberechnung leicht parallel auf mehreren Rechnern durchführen.

Strahlungs-Struktur-Wechselwirkung

Die Strahlungs-Struktur-Wechselwirkung, also die Kopplung von Wärmestrahlung und Wärmeleitung, wird durch Vorgabe von Wärmeflüssen an der Körperoberfläche über eine Neumann-Randbedingung (Randbedingung der zweiten Art) realisiert. Dabei werden basierend auf dem Fourierschen Gesetz Werte auf dem Rand für die Normalableitung der Lösung vorgegeben. Die Wärmestromdichte \dot{q}_w am Rand lässt sich durch den folgenden Ausdruck beschreiben:

$$\dot{q}_w = -\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial n}$$

Unter Berücksichtigung der Zeitschrittweite beider Verfahren kann nun an der Oberfläche der Körper die Ein- und Ausstrahlung berechnet werden, die dann als Wärmestromdichte am Rand bei der Wärmeleitung berücksichtigt wird. Die Validierung, also der Vergleich der Simulation mit einer analytischen Lösung für das Problem, zeigt, dass das implementierte numerische Verfahren für die Ankopplung der Strahlung an die Temperaturdynamik der Struktur asymptotisch die korrekte analytische Lösung liefert.

INTERAKTIVE SIMULATION IN EINEM VIRTUELLEN ENTWURFSRAUM

Das entwickelte thermische Simulationsmodell ist in einen interaktiven virtuellen Entwurfsraum auf Basis von AutoCAD eingebettet. Die CAD-Anwendung wird hierbei direkt an den Simulationskern gekoppelt und wurde um eine Vielzahl notwendiger Funktionen erweitert. Diese umfassen u.a. eine Schnittstelle zum Transfer der Simulationsdaten an den Rechenkern (auf Basis von Netzwerk-Sockets) sowie Teile des Pre-Processings für die Simulationsdaten. Des Weiteren wurden Überwachungswerkzeuge zur Kontrolle der Eingabeparameter (Plausibilitätsprüfungen) für die Simulation und die Möglichkeit geometrischer Modifikationen während des Konstruktionsprozesses implementiert. Hierbei müssen Daten nicht aufwendig konvertiert, sondern können direkt an die laufende Simulation übertragen werden. Die zusätzlichen

bauteilspezifischen Parameter wie Randbedingungen und Materialkennwerte werden über das CAD-Werkzeug vorgegeben und können ebenfalls interaktiv verändert werden.

Ziel des interaktiven Ansatzes ist es, durch direkte Modifikation des Simulationssystems zur Laufzeit, d.h. ohne die laufende Simulation zu unterbrechen, ein schnelles und detaillierteres Wissen der Auswirkungen von Änderungen beispielsweise an der Gebäudegeometrie zu erlangen. Dieser Ansatz erlaubt einer Gruppe von Fachplanern innerhalb des virtuellen Entwurfsraumes eine kooperative Gebäudeoptimierung.

Der Computational-Steering-Ansatz stellt durch die Integration von komplexer Simulation, Datenanalyse, Visualisierung und Nachbearbeitung sehr hohe Anforderungen an die unterstützende Hardware und Algorithmik. Aus diesem Grund wird neben der parallelen Simulation auch die Visualisierung verteilt auf mehrere Grafikkarten durchgeführt. Der entwickelte Ansatz, basierend auf dem CGLX-Framework, ermöglicht eine effiziente Darstellung großer Datenmengen, die in der thermischen Simulation in jedem Zeitschritt anfallen (Doerr et al., 2010). Die Cross-Platform Cluster Graphic Library (CGLX) ist ein OpenGL Framework für skalierbare verteilte Visualisierungsumgebungen, die es ermöglicht, Daten auf Tiled-Display-Umgebungen mit sehr hohen Auflösungen (>300 Mega Pixel) zu rendern. Durch den verteilten Ansatz wird eine schnelle Ausgabe und Manipulation großer Datenmengen erst möglich. Für kooperative Planungsprozesse haben sich Tiled-Display-Umgebungen als besonders vorteilhaft erwiesen (Ahrens et al., 2000, Li et al., 2002).

Eine Gruppe von Planern kann hierbei mit dem Gebäudemodell virtuell interagieren, sich um das Modell bewegen, es von unterschiedlichen Standpunkten betrachten und das Modell berühren. Somit wird eine kooperative Gebäudeoptimierung möglich, die mit konventionellen Computerbildschirmen nicht zu erreichen wäre.

Abbildung 4 zeigt das generelle Systemlayout des virtuellen Entwurfsraums bestehend aus vier Komponenten: Dem Modellierer auf Basis von AutoCAD, einem Head-Node zur Steuerung und Synchronisation der Simulation und Visualisierung, dem verteilten thermischen Simulationskern sowie der verteilten Visualisierung mit Ausgabe auf dem Tiled-Display-System. Eine detaillierte Systembeschreibung kann (Bindick et al., 2010b) entnommen werden.

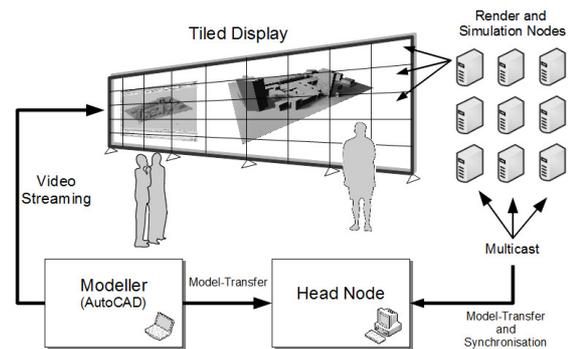


Abbildung 4 Systemlayout des virtuellen Entwurfsraums

ERGEBNISSE

Die folgenden Anwendungsbeispiele aus dem Bauingenieurwesen zeigen verschiedene Einsatzgebiete des entwickelten Software-Prototypen. Diese reichen von Behaglichkeitsoptimierungen in Innenräumen über thermischen Optimierungen von Gebäudestrukturen bis hin zur effizienten Planung von Solaranlagen. Hierzu wurde der Prototyp erfolgreich in diversen Industrieprojekten projektbegleitend als Planungswerkzeug eingesetzt.

Beispielrechnung für ein Einfamilienhaus

Dieses Anwendungsbeispiel zeigt die Temperaturentwicklung in und an einem Einfamilienhaus. Die Gebäudegeometrie und wärmetechnischen Eigenschaften der Bauteile sind dem Musterhaus der DIN 4108 (Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 6) entnommen. Vereinfachend wurden einschalige Bauteile verwendet. Als äußere Randbedingungen wurde eine konstante Umströmungsgeschwindigkeit der äußeren Bauteile von 1 m/s angenommen. Der konvektive Wärmeübergang wurde hier durch einen konstanten Wärmeübergangskoeffizienten berücksichtigt (das Strömungsproblem also nicht weiter betrachtet). Die äußere Lufttemperatur wurde mit 25°C und die innere mit 20°C angenommen. Die Simulation wurde über einen Tag (Echtzeit) durchgeführt mit einer sich ändernden solaren Einstrahlung (in Abhängigkeit des tatsächlichen Sonnenstandes). Abbildung 5 zeigt die Temperatur- und Energieverteilung am Gebäude am Nachmittag (ca. 15.00 Uhr). In Schnitten durch die Westfassade des Gebäudes sind die Temperaturverteilungen angetragen. Zur Diskretisierung der Oberflächen wurden ca. 2,5 Millionen Dreiecke verwendet, für die Strukturgitter wurden pro Bauteil 40000 Knoten verwendet.

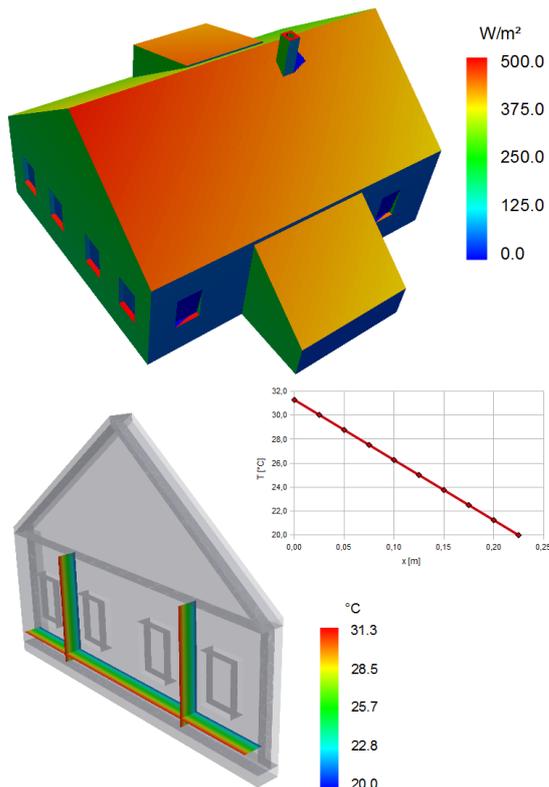


Abbildung 5 Temperaturverteilung an einem Einfamilienhaus

Sonneneinstrahlung auf ein Stadtmodell

Dieses Simulationsbeispiel zeigt die Energieverteilung durch direkte Sonneneinstrahlung auf ein Stadtmodell mit ca. 10 Millionen Oberflächendreiecken. In Abbildung 6 ist die Energieverteilung auf den Oberflächen am späten Nachmittag farblich dargestellt. Die Durchführung der Simulation auf einem herkömmlichen Desktop-PC betrug wenige Minuten. Bei diesem Szenario wurde der konvektive Wärmeübergang vernachlässigt. Außen- und Innentemperatur betragen 25°C. Abschließend lässt sich feststellen, dass die Simulation für komplexere Geometrien möglich ist und qualitativ sinnvolle Ergebnisse liefert.

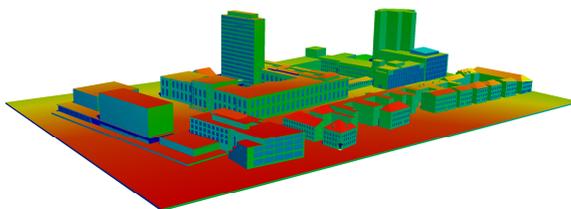


Abbildung 6 Sonneneinstrahlung auf ein Stadtmodell

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der hier vorgestellte Software-Prototyp eignet sich zur Simulation thermischer Phänomene in komplexen Gebäuden und kann die Fachplaner bei der virtuellen Optimierung von Gebäudestrukturen unterstützen. Durch Einsatz des CAD-basierten Entwurfsraumes können geometrisch sehr komplexe Problemstellungen nicht nur transient simuliert werden, sondern es ist auch möglich, das Systemverhalten in nahezu Echtzeit zu optimieren.

Weitere Ziele dieser Arbeit sind die Kopplung der Strahlungs-Struktur-Simulation an einen Löser des konvektiven Wärmetransports. Hierzu wurden bereits erste Versuche zur Kopplung an einen bestehenden CFD-Code auf Basis der Lattice-Boltzmann-Methode (LBM) unternommen (Krafczyk et al., 2009). Die LB-Methode hat sich zur Simulation von thermischen Strömungen in komplexen Geometrien etabliert und lässt sich aufgrund ihrer Struktur besonders effizient bei relativ geringem Speicherbedarf parallel (auf Computer-Clustern oder Grafikkarten) ausführen.

Erste Ergebnisse der Fluid-Strahlung-Struktur-Kopplung sind für die thermische Untersuchung einer Doppelfassade durchgeführt worden. Ziel dieser Simulation war die Optimierung der Gebäudestruktur eines Bürokomplexes in der Planungsphase für verschiedene bauliche Ausführungen. Abbildung 7 zeigt die Temperaturverteilung innerhalb und vor der Fassade aufgrund einer konstanten solaren Einstrahlung von ca. 750 W/m² bei einer Anfangstemperatur von 25°C.

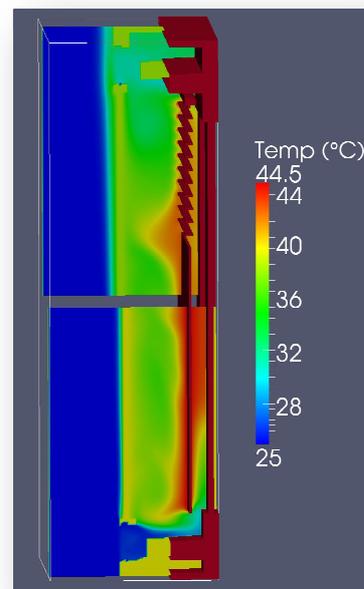


Abbildung 7 Temperaturverteilung in einer Doppelfassade

LITERATUR

- Ahrens, J. P., Li, K., Reed, D. A. 2000. Next-generation visualization displays: the research challenges of building tiled displays (panel session), in: VIS'00: Proceedings of the conference on Visualization '00, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, USA, 2000, S. 527-529.
- Baehr, H. D., Stephan K. 2006. Heat and Mass Transfer. Springer Verlag.
- Bindick, S., Stiebler, M., Krafczyk, M., 2010a. Fast kd-tree based hierarchical radiosity for radiative heat transport problems. International Journal for Numerical Methods in Engineering. eingereicht.
- Bindick, S., Doerr, K.-U. Krafczyk, M., Kuester, F. 2010b. A Computational Steering Framework for Heat Transport Problems in Civil Engineering, Computers and Structures (Elsevier). eingereicht.
- Cohen, M. F., Chen, S. E., Wallace, J. R., Greenberg, D. P. 1988. A progressive refinement approach to fast radiosity image generation. SIGGRAPH Comput. Graph.
- Doerr, K., Kuester, F. 2010. CGLX A scalable, high-performance visualization framework for networked display environments, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (in print) (2010).
- Goral, C. M., Torrance, K. E., Greenberg D. P., Battaile, B.. 1984. Modeling the interaction of light between diffuse surfaces. SIGGRAPH Comput. Graph., S.213-222.
- Hanrahan, P., Salzman, D., Aupperle, L. 1991. A rapid hierarchical radiosity algorithm, in SIGGRAPH '91: Proceedings of the 18th annual conference on Computer graphics and interactive Techniques. S 197-206, New York.
- Havran, V. 2000. Heuristic Ray Shooting Algorithms. Ph.D. Thesis, Department of Computer Science and Engineering, Faculty of Electrical Engineering, Czech Technical University in Prague.
- Havran, V., Bittner, J. 2002. On Improving KD-Trees for Ray Shooting. In Proc. of WSCG 2002 Conference, S. 209-217.
- Krafczyk, M., Tölke, J., Ahrenholz, B., Bindick, S., Freudiger, S., Geller, S., Janßen, C., Nachtwey, B. 2009. Kinetic Modeling and Simulation of Environmental and Civil Engineering Flow Problems, in 100 Volumes of 'Notes on Numerical Fluid Mechanics'. S. 341-350. Springer-Verlag, Berlin.
- Li, Z., Varshney, A. 2002. A Real-Time Seamless Tiled Display for 3D Graphics, in: Proceedings, Seventh Annual Symposium on Immersive Projection Technology (IPT 2002).
- Micikevicius, P. 2009. 3D finite difference computation on GPUs using CUDA. Proceedings of 2nd Workshop on General Purpose Processing on Graphics Processing Units, S.79-84, ACM.
- Modest, M. F. 2003. Radiative Heat Transfer. Academic Press, An imprint of Elsevier Science, second Edition.
- Ogayar, C. J., Rueda, A. J., Segura, R.J., Feito, F.R. 2007. Fast and simple hardware accelerated voxelizations using simplicial coverings. The Visual Computer. Springer Verlag, Berlin.
- Siegel, R., Howell, J.R. 2002. Thermal radiation heat transfer. Taylor & Francis, third Edition.
- Szirmay-Kalos, L., Havran, V., Balázs, B., Szécsi, L. 2002. On the Efficiency of Ray-shooting Acceleration Schemes. Proceedings of the 18th Spring Conference on Computer Graphics (SCCG 2002), S.89-98, Budmerice, Slovakia, ACM-Siggraph.
- Welty, J. R., Wicks, C. E., Wilson, R. E., Rorrer, G. 2001. Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons, Inc.

VERGLEICH VON THERMISCHEN GEBÄUDESIMULATIONSMODELLEN FÜR DIE ANWENDUNG AN DOPPELFASSADEN

Jan Peter Hinrichs, Christoph Mitterer

Fraunhofer Institut für Bauphysik
Fraunhoferstraße 10, 83071 Valley, Deutschland

KURZFASSUNG

In einer internationalen Forschungs Kooperation mit dem Korean Institute for Construction Technology (KICT) wird das Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP) die Entwicklung von Fassaden für energieeffiziente Hochhäuser unterstützen. Die Abbildung der von KICT zu entwickelnden kompakten Doppelfassade mittels numerischer Simulation ist im Wesentlichen der Forschungsbeitrag des IBP. Dabei soll eine gekoppelte numerische Betrachtung der Verhältnisse vor der Fassade, der Energie- und Massenströme in der mehrschichtigen und teils transparenten Fassadenkonstruktion, sowie der Auswirkung auf das Raumklima durch geeignete Simulationsprogramme und deren Kombination entwickelt werden.

Die laufende Vorstudie dient dazu, die Prinzipien dieses speziellen Doppelfassadentyps zu analysieren, um darauf aufbauend das Anforderungsprofil für die numerische Simulation abzuleiten und ein gleichungsbasiertes Modell zu erstellen. Zudem wird die Notwendigkeit einer Kopplung mit CFD und der thermischen Gebäudesimulation hinterfragt, sowie die Eigenschaften verschiedener Simulationsmodelle verglichen.

ABSTRACT

In an international research cooperation with the Korean Institute for Construction Technology (KICT), the Fraunhofer Institute for Building Physics (IBP) supports the development of energy efficient facades for multi story buildings. The contribution of IBP is to develop a numerical simulation model with supports KICT's development of compact double skin façades (DSF). In doing so, the aim is to develop an integrative numerical simulation of both the conditions in front of the façade, the energy and the mass flow in the multi layer and partly transparent façade construction as well as the development of the impact of indoor climate in combination with a suitable simulation program.

The preliminary study aims at analysing the principle of DSF by reviewing publications in order to design a requirement profile for the numerical simulation procedure. Furthermore, the coupling of CFD simulation and thermal building simulation will be integrated as well as the characteristics of various simulation models will be analysed.

DOPPELFASSADE IN DER PRAXIS UND IN DER SIMULATION

In unzähligen Untersuchungen und Abhandlungen wurden Glas-Doppelfassaden (GDF) diskutiert, z.B. (Hausladen, et al. 1998). Messtechnische Untersuchungen von einschlägigen Gebäuden mit GDF weisen einen unerwartet hohen Gesamtenergieverbrauch auf, womit die Frage berechtigt erscheint, ob diese Fassaden bauphysikalisch wirklich sinnvoll sind (vgl. Gertis et al. 1999). Vor- und Nachteile von Glas-Doppelfassaden wurden von Hauser in 2008 kritisch gegenübergestellt und damit einen Überblick über die bauphysikalischen Probleme geschaffen.

Die prinzipielle Charakteristik von GDF ist gekennzeichnet durch zwei überwiegend transparente Bauteilebenen, die eine Luftschicht einschließen. Im Winterfall wird damit das Prinzip einer „transparenten Wärmedämmung“ umgesetzt, während es im Sommerfall gilt, die Wirkung der äußeren Ebene durch intensives durchfluten des Zwischenraumes über Öffnungen der Fassade aufzuheben. In den Übergangszeiten ist man bestrebt durch sinnvolle Steuerung der Durchströmung Effekte zu erzielen, die zur effizienten Belüftung und thermischen Regulierung eines Gebäudes beitragen. Sinnvoll ist das jedoch nur, wenn die im Winter eingesparte Energie den Kühlenergieaufwand aufgrund sommerlicher Aufheizung überragt. Die Nutzung der Gebäude muss dabei unbedingt berücksichtigt werden. So entstehen z.B. in Bürogebäuden hohe interne Lasten, welche die Energieeinsparung im Winter schmälern (Hauser 2008). Weiterhin kann der Einsatz von GDF aus schallschutztechnischen Gründen erstrebenswert sein.

Vor diesem Hintergrund wurden in der Baupraxis eine Vielfalt von Doppelfassadenvariationen entworfen und realisiert. Bei der Planung und zur Demonstration der Funktionalität wurden numerische Simulationen eingesetzt, die dahingehend weiterentwickelt wurden, dass sie die vielfältigen physikalischen Elemente, die an der GDF wirken, möglichst gut abbilden. Abgesehen davon, dass die verschiedenen Simulationsmodelle aufgrund ihrer numerischen Eigenschaften die Realität mehr oder weniger gut abbilden können, hängt das Ergebnis maßgeblich von den Eingangsparametern - also den Randbedingungen ab. Bei Untersuchungen am IBP (Heusler et al. 2009) hat sich gezeigt, dass die Hauptschwierigkeit beim Vergleich von Messung und Simulation in der richtigen Wahl der Randparameter bei der Simulation liegt. Insbesondere das Mikroklima, das sich bedingt durch unterschiedliche Parameter (z.B. Gebäudegeometrie, Bebauung in der Umgebung, Orientierung und Position an der Fassade, usw.) einstellt ist, in der Regel nicht hinreichend bekannt. Erste Untersuchungen hierzu werden in (Katzschner 2009) beschrieben. Die verschiedenen Skalen der Simulation, die es für eine möglichst Aussagekräftige Vorhersage der Bedingungen zu integrieren gilt, werden in (van Treeck 2010) erörtert. Auf diesen Ansatz baut auch das aktuelle Forschungsprojekt auf, wozu zunächst die verschiedenen Simulationsmethoden und -werkzeuge analysiert werden.

SIMULATIONSMETHODEN

Sowohl numerische Strömungssimulation mit CFD als auch Knotennetzwerkmodelle werden zur Simulation von GDF eingesetzt, wenngleich diese Methoden sich stark im Detaillierungsgrad, dem rechnerischen Aufwand und der Genauigkeit der Ergebnisse unterscheiden. Daher versucht man die Methoden gekoppelt einzusetzen, um die jeweiligen Vorteile auszunutzen. Mit Netzwerkknotenmodellen kann die GDF in mehrere Zonen unterteilt werden. Dabei werden Leistungen von instationären Wärmeleitungsvorgängen in Bauteilen, von konvektiver und radiativer Wärmeübertragung an Bauteiloberflächen und interne Wärmequellen und Enthalpieströme bilanziert (van Treeck 2004). Bei der Strömungssimulation mit CFD wird ein numerisches Gitter erzeugt und anschließend die Geschwindigkeiten und Temperaturen in jedem Punkt berechnet. Im Vergleich zur thermischen Gebäudesimulation wird in der Regel die Strömung zu einem bestimmten Zeitpunkt oder über einen kurzen Zeitraum simuliert.

Gebäudesimulationsprogramme wie beispielsweise das von der University of Strathclyde entwickelte Programm ESP-r (Clarke 1977) haben unterschiedliche Modelle zur Simulation von Doppelfassaden integriert, die in der Arbeit von (Dickson 2004) beschrieben werden. Sie Software und die implementierten

Module für die Doppelfassaden sind in FORTRAN geschrieben. Mehr Flexibilität in Bezug auf die Integration von neuen Modellen bietet die generische objektorientierte Modellierungssprache MODELICA, die eine klare Trennung zwischen Modellbildung und Löser aufweist und für die vorgesehene Fragestellung favorisiert wird. Hierbei muss kein spezieller Löser für das physikalische Problem entwickelt werden, womit der Focus auf der Modellbildung liegt. Ein Nachteil ist die eingeschränkte Möglichkeit der Kopplung des Modells mit anderen Modellen (Dimensionsübergang 1D/3D, Zeitskalen). Eine weitere Stärke von Modelica liegt in der Wiederverwendbarkeit und Modularität der Modelle. Damit bietet das Programm die Möglichkeit, schnell auf neue Erkenntnisse zu reagieren und diese zu implementieren. Die an IBP entstandene Modellbibliothek BuildingPhysicsLibrary (Nouidui 2008) besitzt grundlegende Modelle, die im Laufe des Projektes um Modelle für Glas-Doppelfassade erweitert werden können.

LITERATUR

Hauser, G; (2008): Dynamisches thermisch-hygrisches Verhalten von Gebäuden Vorlesungsskript, Technische Universität München.

van Treeck, C; (2004): Gebäudemodell-basierte Simulation von Raumluftrömungen, Dissertation, Technische Universität München.

van Treeck, C; (2010): Introduction to Building Performance Simulation, Habilitationsschrift, Technische Universität München.

Katzschner, L; Maas, A; Schneider, A; (2009): Das städtische Mikroklima: Analyse für die Stadt- und Gebäudeplanung, Bauphysik 31 (1): 18-24.

Gertis, K.; (1999): Sind neuere Fassadenentwicklungen bauphysikalisch sinnvoll? Teil 1: Transparente Wärmedämmung, Bauphysik 21 (1): 1-9.

Gertis, K.; (1999): Sind neuere Fassadenentwicklungen bauphysikalisch sinnvoll? Teil 2: Glas-Doppelfassaden. (1999), Bauphysik 21 (2): 54-66.

Hausladen, G. et al.; (1998): Solare Doppelfassaden. Energetische und raumklimatische Auswirkungen, KI 34, H. 11, S. 524-529.

Dickson, A.; (2004): Modelling Double-Skin Facade Department of Mechanical Engineering University of Strathclyde, Glasgow UK.

Clarke, J.A.; (1977): Environmental Systems Performance, PhD Thesis, University of Strathclyde, Glasgow UK.

Heusler, I; Sinnesbichler, H; Erhorn, H; Nimtsch, A; (2009): Erarbeitung einer vereinfachten Berechnungsmethode für Doppelfassaden für die Integration in die deutsche EPPD- Energieeffizienzbewertungsmethode DIN V 18599 (Bewertungsmethode GDF).

Nouidui, T; (2008): Entwicklung einer objektorientierten Modellbibliothek zur Ermittlung und Optimierung des hygrothermischen und hygienischen Komforts in Räumen.

MODELLIERUNG EINES BÜORAUUMES MIT MULTIFUNKTIONELLER FASSADE

M. A. Waser¹, H. Schranzhofer¹, R. Heimrath¹, T. Mach¹, W. Streicher¹,
H. Wascher,² und M. J. Mueller,²

¹Institut für Wärmetechnik, Graz University of Technology, Österreich

Tel: +43-316-873-7301, Fax: +43-316-873-7305

E-Mail: office.iwt@tugraz.at Homepage: <http://www.iwt.tugraz.at>

²Hans Höllwart – Forschungszentrum für Integrales Bauwesen AG, Stallhofen

E-Mail: office@fibag.at Homepage: <http://fibag.at/>

KURZFASSUNG

In diesem Beitrag werden detaillierte Ansätze für eine thermische Simulation eines Büroraumes mit einer multifunktionalen Fassade vorgestellt. Der Büroraum, inklusive der Wechselwirkung zwischen Gebäude und der in die Fassade integrierten Anlagenkomponenten, wird in der Simulationsumgebung TRNSYS 17 (Transsolar, 2009) abgebildet.

Wesentliche Komponenten sind hier die thermischen Fassadenkollektoren, die unterschiedlichen photovoltaischen Systeme (opake PV und in die Verglasung integrierte semitransparente PV), elektrochrome Verglasungen und das dezentrale Fassadenlüftungsgerät.

Ein derartig multifunktionelles System wurde im Rahmen des laufenden österreichischen Comet K-Projektes „Multifunctional Plug & Play Façade“ (im weiteren kurz MPPF) in Stallhofen am Hans Höllwart - Forschungszentrum für integrales Bauwesen AG (FIBAG) inklusive des Büroraumes aufgebaut und mit Messtechnik versehen.

Die Modellierung wird den dort vorgegebenen Rahmenbedingungen unterworfen.

ABSTRACT

This paper shows a concept of a detailed thermal simulation of an office room equipped with a multifunctional façade. The thermal roomzone and its interaction with the multifunctional modules are built up in the software package TRNSYS 17.

The multifunctional modules which are placed in the façade are a thermal solar panel, an opaque photovoltaic panel, semitransparental photovoltaic cells built in a glazing, an electrochromic glazing and a hvac module.

Such a system was built up at the ‘Hans Höllwart - Forschungszentrum für integrales Bauwesen AG’ (FIBAG) researchlab. It is part of the five year project Multifunctional Plug & Play Façade (MPPF).

For the simulation model the parameters of the real prototype were used as boundary conditions.

MULTIFUNKTIONELLE PLUG & PLAY FASSADE - MPPF

Das Ziel des K-Projektes MPPF ist die Entwicklung einer Technologieplattform für eine multifunktionelle Fassade in Modulbauweise mit einem möglichst hohen Vorfertigungsgrad für den Neubau von größeren Gebäuden sowie die Renovierung von bestehenden Objekten. (Detailinformation siehe Streicher et al., 2009, Schranzhofer et al., 2009, Streicher et al., 2008).

Neben den klassischen Funktionen einer Gebäudehülle soll die MPPF zusätzliche Aufgaben folgender Themengebiete erfüllen:

- Raumklimatisierung (HLK)
- Künstliche Beleuchtung über die Fassade
- Energiebereitstellung durch Photovoltaik und Solarthermie und deren Verteilung
- Steuerung und Regelung der einzelnen Komponenten

Das Projekt befindet sich im 3. Projektjahr und es wurde bereits eine Prototypenfassade am Standort Stallhofen realisiert. Der Büroraum hinter dieser Fassade stellt die Grundlage für die im Folgenden beschriebene thermische Simulation dar.

BESCHREIBUNG DER MPPF PROTYPENFASSADE

Die multifunktionalen Komponenten wurden in eine bestehende Fassade des Bürogebäudes der FIBAG integriert. Zwei Räume in zwei Stockwerken stehen für das Projekt zur Verfügung, wobei nur im zweiten Geschoß MPPF Module eingebaut wurden. Der Büroraum im ersten Geschoß dient als Referenz. Abbildung 1 zeigt die Flächenaufteilung der installierten Elemente in der multifunktionalen Prototypenfassade. Die Fassade besteht aus einer Pfosten-Riegel-Konstruktion, welche in Ihrer Standardvariante abwechselnd opake Elemente, Fixverglasungen und Fensterelemente trägt.

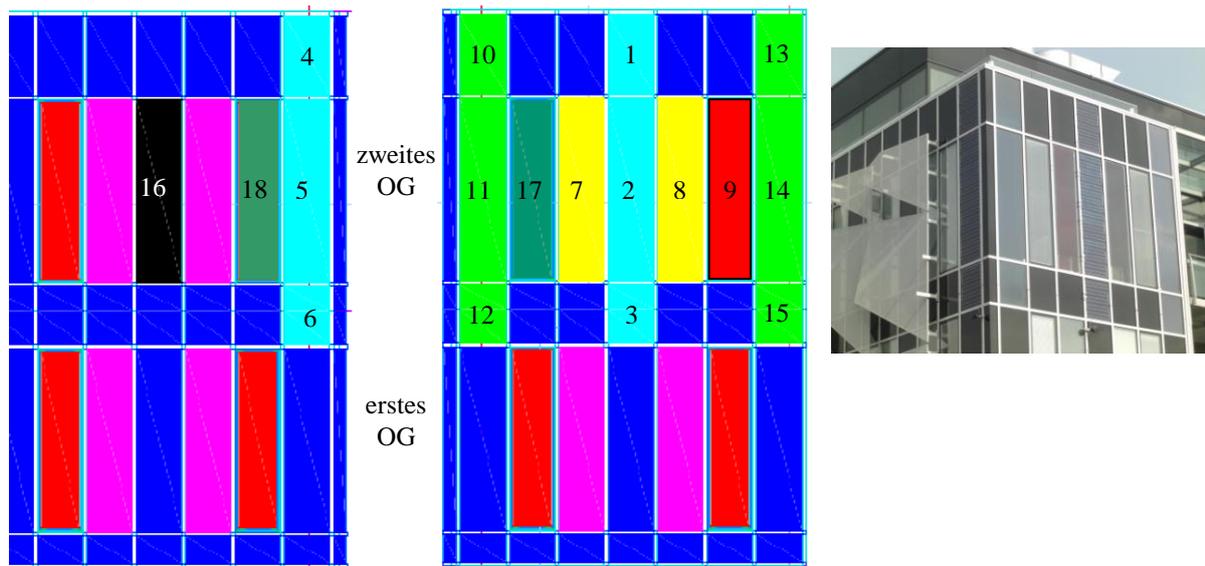


Abbildung 1: Flächenaufteilung der Prototypenfassade (links Westfassade, mitte Südfassade) und Außenaufnahme der Prototypenfassade (rechts). Blau: opake Paneele, gelb: Fixverglasung mit Photovoltaik (7-8), rot: Fenster, cyan: opak mit Photovoltaik (1-6), grün: solarthermisches Modul (10-15), schwarz: HLK-Modul (16), dunkelgrün: elektrochrome Verglasung (17 und 18), magenta: Fixverglasung mit Verschattung (9) (Quelle: MPPF).

Bei der MPPF-Variante wurden in der Südfassade anstatt der opaken Module zwei solarthermische Kollektoren (grün), sowie opake Photovoltaikmodule (cyan) verbaut. Um die vorhandene Fassadenfläche besser zu nutzen wurden diese Komponenten zusätzlich auch in den kleineren Zwischenmodulen auf Höhe der Geschoßdecken bzw. des Daches verbaut. Anstatt der normalen Fensterelemente und der Fixverglasung wurden zwei elektrochrome Gläser (dunkelgrün), sowie zwei Glaselemente mit integrierter PV (gelb) eingebaut. Das dezentrale Lüftungsgerät (schwarz) wurde ebenso wie ein weiteres opakes PV-Modul und eine elektrochrome Verglasung auf der Westfassade integriert. Der Grundriss des Büroraumes ist in Abbildung 2 zu sehen.

AUFBAU DES BÜRORAUMES MIT GOOGLE SKETCHUP

Für die Simulation wird das Programmpaket TRNSYS 17 verwendet. Diese seit November 2009 erhältliche Version ermöglicht es erstmals dreidimensionale Gebäudegeometrien einzulesen und zu verarbeiten. Über das PlugIn Trnsys3d können in Google SketchUp konstruierte Modellgeometrien in TRNSYS verwendet werden. Vorteil der 3D-Gebäudedaten ist die verbesserte Berücksichtigung der externen Verschattung, der Direkt- und Diffusstrahlungsverteilung sowie des langwelligen Strahlungsaustausches zwischen internen Flächen.

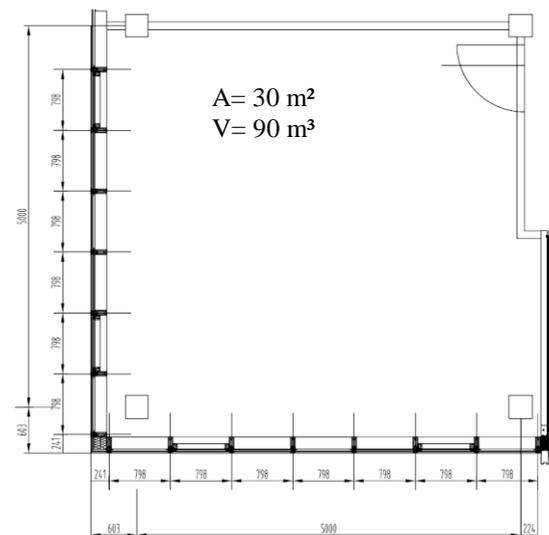


Abbildung 2: Grundriss des zu untersuchenden Büroraumes. Links Westfassade, unten Südfassade (Quelle: MPPF)

Die Nutzung dieser in TRNSYS 17 implementierten Verbesserungen ist jedoch mit Einschränkungen in der Modellierung der Gebäudegeometrie verknüpft. Die Simulation der internen Strahlungsverteilung ist nur für konvexe Geometrien möglich (siehe Abbildung 3) (Trnsys3d Tutorial 2009). Weiters können bisher keine Wärmebrücken im 3D-Modus berücksichtigt werden.

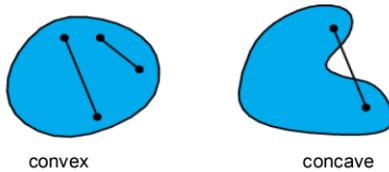


Abbildung 3: Vergleich zwischen konvexer und konkaver Geometrie (Quelle: Transsolar 2009).

Modellierung der Standardfassade

Der Büroraum wurde in Google SketchUp anhand seiner Innenmaße gezeichnet. Aufgrund der oben beschriebenen Einschränkungen wurde die Grundfläche des Büroraumes als Rechteck modelliert. Der Büroraum hat einen aufgeständerten Boden und eine abgehängte Decke, welche als eigene Zonen modelliert wurden. Abbildung 4 zeigt das erste einfache SketchUp Modell samt Schattenwurf an einem Nachmittag im September.

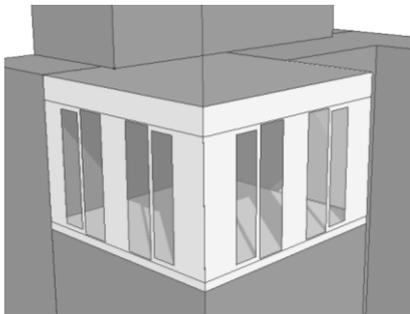


Abbildung 4: 3-Zonen SketchUp Modell ohne MPPF (links Westfassade, rechts Südfassade).

Modellierung der MPPF

Von der Standardvariante ausgehend wurden die einzelnen Module in das Modell integriert, um die MPPF abzubilden. Da die Module neben ihrer Funktion als Anlagenkomponenten im wesentlichen auch Wandaufbauten darstellen, sind die thermischen Vorgänge im Inneren dieser Module von Interesse. Ein solarthermischer Kollektor kann bei hoher solarer Einstrahlung in Stagnation gehen. Dies stellt an die Anlage selbst keine neuen Anforderungen. Für die Betrachtung als Wandaufbau sind Stagnationstemperaturen inmitten der Wandschicht jedoch von hohem Interesse. Gleiches gilt für das dezentrale Lüftungsgerät. Im Winterbetrieb saugt, das HLK-Gerät an der Fassade Außenluft an. D.h. man hat im Inneren dieser "Wand" Lufttemperaturen von z.B. -12 °C.

Um diese Auswirkungen auf das thermische Gebäudeverhalten und den Energiebedarf darstellen zu können wurden die solarthermischen Kollektoren als eigene Zonen modelliert. Da das dezentrale Lüftungsgerät unterschiedliche Temperaturzonen besitzt, wurden für die Modellierung sechs Zonen verwendet. In Abbildung 5 ist das HLK

Modul und das daraus abgeleitete Zonenmodell dargestellt.

Im Betrieb wird kalte Außenluft an der Unterseite des Moduls angesaugt und bis zur Wärme- und Feuchterückgewinnung (WFRG) transportiert. Die warme Raumluft wird raumseitig im oberen Bereich angesaugt und ebenfalls zur WFRG geleitet. Nach der Wärmerückgewinnung wird die vorgewärmte Außenluft (Zwischenluft) zur Nachheizung geleitet und dort auf die Zulufttemperatur erwärmt. Die abgekühlte Abluft wird an der Außenseite im oberen Bereich an die Umgebung abgeführt.

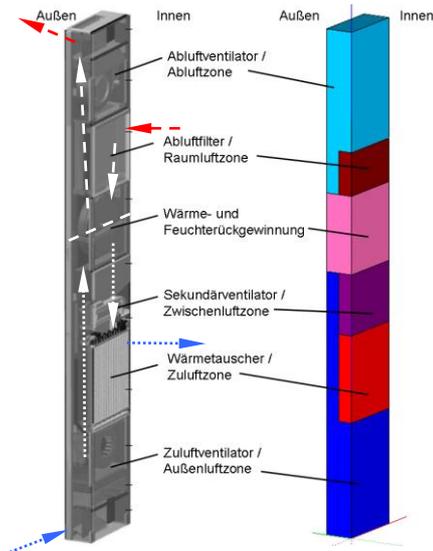


Abbildung 5: HLK-Gerät und daraus abgeleitetes Zonenmodell (Quelle: LTG 2009, eigene Nachbearbeitung).

Da die einzelnen Zonen außen an den Büroraum grenzen, haben diese somit einen Einfluss auf die externe Verschattung. Um diesen Einfluss zu minimieren, wurden die Zonen in SketchUp sehr dünn (1cm) gezeichnet. Die dadurch fälschlicherweise berechneten Volumina wurden jedoch nachträglich auf die korrekten Werte korrigiert.

Abbildung 6 zeigt das 11-Zonen Modell mit allen integrierten MPPF Komponenten.

SIMULATIONSRANDBEDINGUNGEN

Büro mit Standardfassade

Für die Standardfassade wurde die Berechnung des U-Wertes nach Norm (ÖNORM EN 13947, 2007) angewendet. Die Verschattung des Büroraumes erfolgt durch innenliegende Jalousien. Die Regelung erfolgt über eine Kombination aus Belegungszeiten des Büroraumes und der Strahlungssumme auf die Fassadenfläche. Gleiches gilt für die Steuerung des Kunstlichtes. Die inneren Wärmeeinträge sind auf ein 3-Personen Büro mit PC-Arbeitsplätzen ausgelegt. Der Büroraum hat

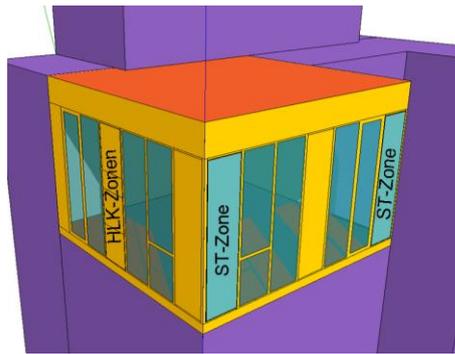


Abbildung 6: SketchUP Modell mit allen MPPF-Komponenten (HLK-Zonen und Solarthermie-Zonen, links Westfassade, rechts Südfassade).

eine Infiltration von $0,1 \text{ h}^{-1}$. Während den Belegungszeiten wird konditionierte Frischluft mit einem Luftwechsel von $1,3 \text{ h}^{-1}$ eingebracht. Dies entspricht der Luftwechselzahl die ein derartiges HLK-Gerät erreichen kann. Die hier angenommenen Werte und Regelparameter stammen aus der Haustechnikauslegung des Gebäudes oder wurden sinnvoll gewählt.

Büro mit MPPF

Ausgehend von der Modellierung des Büroraumes mit der Standardfassade wurde diese in die einzelnen Modulflächen unterteilt. Anschließend wird jeder Einzelfläche das entsprechende Modul (Solarthermie und HLK) samt Wandaufbau zugewiesen. Die opake PV wird nur als Wandaufbau betrachtet. Die in die Verglasung integrierten Photovoltaikzellen werden sich im Betrieb deutlich erwärmen. In der Gebäudesimulation wurden diese Elemente als Verglasung mit interner fixer Verschattung interpretiert. Die elektrochromen Gläser verfügen auf der Innenseite über eine Wärmeschutzverglasung. Die Erwärmung der Glasscheibe ist Außen zu erwarten. Daher wurde im Simulationsmodell für diesen Fall eine externe Verschattung angenommen. Zusätzlich benötigen diese Gläser ca. 15 Minuten um ihre volle Verschattungswirkung zu erlangen. Dies wurde mit Hilfe eines Tot-Zeit-Gliedes modelliert.

Wie bereits erwähnt werden die solarthermischen Kollektoren mit je einer eigenen Zone und das HLK-Gerät mit sechs Zonen abgebildet. Um den Temperaturverlauf in den Zonen zu berücksichtigen wird zusätzlich zur Gebäudesimulation eine Anlagensimulation des thermischen Kollektors sowie des HLK Gerätes durchgeführt. Für die Anlagensimulation wurde im ersten Schritt einfache Komponenten verwendet. Sie dienen in diesem Fall hauptsächlich der Ermittlung der Temperaturen für die Gebäudesimulation und nicht der Berechnung von Energiemengen.

Die thermische Kollektorzone besteht aus einer Außenfläche welche nur aus einer einfachen Glasfläche besteht. Wie bereits erwähnt muss der Kollektor in SketchUp sehr dünn gezeichnet werden, um den Einfluss der Eigenverschattung vernachlässigen zu können. Die Mantelfläche der Kollektorzone wurde für den Wärmeaustausch vernachlässigt. Das Zonenvolumen entspricht dem Kollektorzonenvolumen und musste nachträglich korrigiert werden. Mit diesem Aufbau kann der Stagnationsfall des Kollektors simuliert werden, da der Zone (sprich dem Kollektor) abgesehen von den Verlusten in die Umgebung und den Raum, keine weitere Energie entzogen wird. Vergleichsrechnungen mit dem Kollektorsimulationsprogramm Kolektor 2.2 (Matuska et al., 2010) haben gezeigt, dass gute Übereinstimmungen der Oberflächentemperaturen im Stagnationsfall erzielt werden. Um den Wärmeeintrag der thermischen Anlage in den Wandaufbau zu berücksichtigen wird aus der Anlagensimulation die mittlere Absorbertemperatur benötigt. Auf diesen Temperaturverlauf wurde die Kollektorzone konditioniert.

Ähnlich wurde beim HLK-Modul vorgegangen. Als Betriebsfall wird der Außenluftbetrieb mit $120 \text{ m}^3/\text{h}$ (entspricht einem Luftwechsel von $1,3 \text{ h}^{-1}$) aus dem Datenblatt ausgewählt. Für die Simulation der Temperaturen nach der Wärme- und Feuchterückgewinnung wird der TRNSYS Type Sensible Air to Air Heat Recovery verwendet. Die Wandaufbauten bestehen im wesentlichen aus gedämmten Aluminiumpaneelen. Die internen Wärmegewinne der Ventilatoren mit einer Leistung von je 27 Watt werden in der Zone Aussenluft und Abluft berücksichtigt. Für jede der sechs Zonen wird ein eigener Ventilationstyp in TRNBuild definiert. Dieser hat im Betriebsfall einen Luftvolumenstrom von $120 \text{ m}^3/\text{h}$ und die jeweilige Zonentemperatur als Randbedingung. In der Zone "Zuluft" wird die Nachheizung der HLK-Anlage simuliert. Unabhängig von der tatsächlichen Leistung des HLK-Moduls wird hier die Luft auf die geforderte Einblasetemperaturen konditioniert. Außerhalb der Betriebszeiten der HLK-Anlage entspricht diese einem konventionellen Wandaufbau.

SIMULATIONSERGEBNISSE

Für den Vergleich zwischen Standardfassade und der Prototypenfassade mit MPPF-Modulen wurde eine Jahressimulation durchgeführt. Der verwendete Wetterdatensatz wurde mit dem Programm Meteororm V4 (Meteotest 2002) für den Standort Stallhofen generiert. Die daraus resultierende Energiebilanz wurde in Gewinne (linke Säule) und Verluste (rechte Säule) unterteilt. Auf der Gewinnseite werden solare Erträge, interne Ge-

winne, Heizung, Infiltrationsgewinne, Lüftungsgewinne und Transmissionsgewinne bilanziert. Auf der Verlustseite werden Transmissionsverluste, Infiltrationsverluste, Lüftungsverluste und die Kühlung erfasst. Die beiden Balken müssen über das Jahr gesehen gleich groß sein. Abbildung 7 zeigt den Vergleich der Standardfassade als 3-Zonen-Modell (wie in Abbildung 4) und der Prototypenfassade als 11-Zonen Modell mit allen MPPF-Modulen (wie in Abbildung 6). Trotz der unterschiedlichen Aufbauten und verwendeten Komponenten ist in diesem Vergleich kaum ein Unterschied zu sehen. Auf der Ertragsseite unterscheiden sich die solaren Erträge nur um 1 %.

Dies liegt daran, dass einerseits die Empfangsfläche bei beiden Varianten gleich groß ist und größtenteils mit einer internen Verschattung simuliert wurde. Die elektrochrome Verglasung wurde zwar als externe Verschattung angenommen, jedoch ist der Abschattungsgrad geringer. Dies und die als fixe interne Verschattung angebrachte semitransparenten PV, vermindert den solaren Eintrag um ca. 3 kWh/(m²*a). Gründe für den generell sehr hohen spezifischen Solareintrag von ca. 265 kWh/(m²*a) sind die interne Verschattung und der hohe Glasanteil der Fassade.

Die Transmissionsverluste durch die Außenwände sind für beide Varianten ebenfalls annähernd gleich. Das bedeutet, dass die MPPF über ähnliche Wärmedämmeigenschaften wie die Standardfassade verfügt.

Die Ventilationsverluste sind bei der Variante mit HLK-Gerät etwas geringer. Dies liegt an der unterschiedlichen Eingabe der Luftwechselzahl. Das HLK-Modul saugt im Betrieb konstant 120 m³/h (entspricht einem Luftwechsel von 1,3 h⁻¹). Abhängig von der Außenluftdichte ergibt dies unterschiedliche Massenströme. Beim 11-Zonen Modell wird aufgrund der Anlagensimulation mit

Massenströmen gerechnet. Das 3-Zonen Modell rechnet hingegen der Einfachheit halber mit einer konstanten Luftwechselzahl von 1,3 h⁻¹.

Charakteristisch für eine Büroraum mit einer Fassade mit hohem Glasanteil ist, dass der Kühlbedarf meist höher als der Heizbedarf ist. Durch den Einbau von MPPF-Modulen erhöht sich der Kühlbedarf in diesem Szenario geringfügig.

Neben der Energiebilanz, die hier kaum nennenswerte Unterschiede liefert, ist die thermische Behaglichkeit von hohem Interesse. Oftmals befinden sich die Arbeitsplätze im Bereich der Außenwände. Große Temperaturschwankungen der Wandoberflächen werden als unbehaglich empfunden und müssen vermieden werden. Durch den Einbau der MPPF-Module sind vor allem die Wandflächen hinter den solarthermischen Kollektoren und der PV bezüglich Überhitzung, sowie die Oberflächentemperaturen des HLK-Gerätes im Winterbetrieb, von Interesse. Der generierte Wetterdatensatz hat eine Kälteperiode von 24. bis 26. Jänner. Die dabei auftretenden Oberflächentemperaturen an der Innenseite der außenluftansaugenden HLK-Zone sind in Abbildung 8 abgebildet. Im Vergleich dazu ist die Oberflächentemperatur an der Innenseite der Standardfassade zu sehen. Die grüne gepunktete Linie stellt den Verlauf der Außenluft dar. Sie erreicht ihr Jahresminimum in dieser Zeit mit ca. -17 °C. Die blaue Linie zeigt die Lufttemperatur in der außenluftansaugenden HLK Zone. Gut erkennbar sind die Betriebszeiten der HLK-Anlage. Zum Zeitpunkt der kältesten Außenlufttemperatur geht das HLK-Gerät in Betrieb. Dadurch hat die Luft in dieser Zone kurzzeitig eine Temperatur von ca. -15 °C. Dies ergibt an der Innenoberfläche der HLK-Zone eine Wandtemperatur von ca. 4 °C. (erkennbar an der violetten Linie).

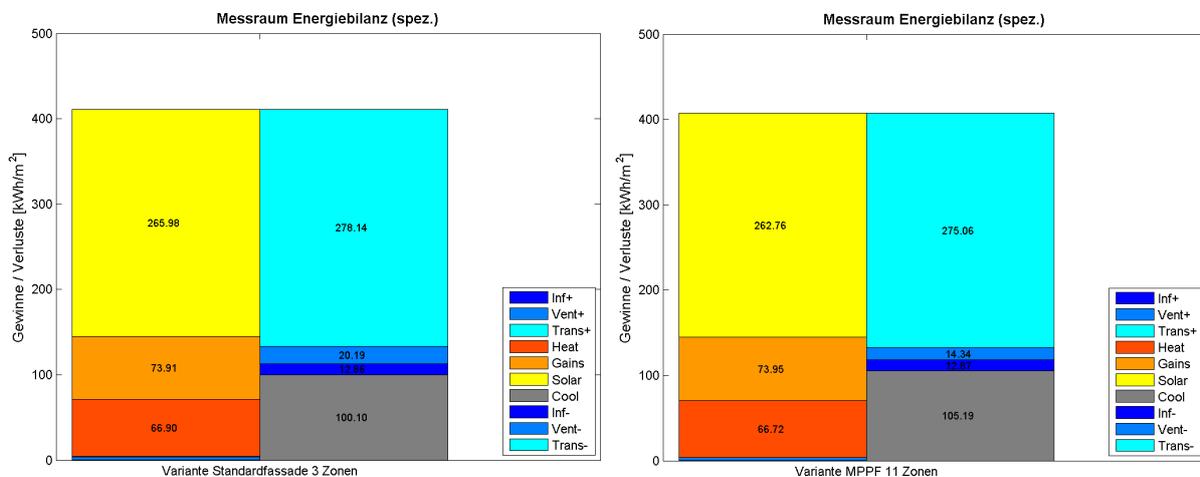


Abbildung 7: Vergleich der spezifischen Energiebilanz des Büroraumes mit Standardfassade (links) und MPPF-Fassade als 11-Zonen-Modell (rechts)

Temperaturvergleich - Winter HLK

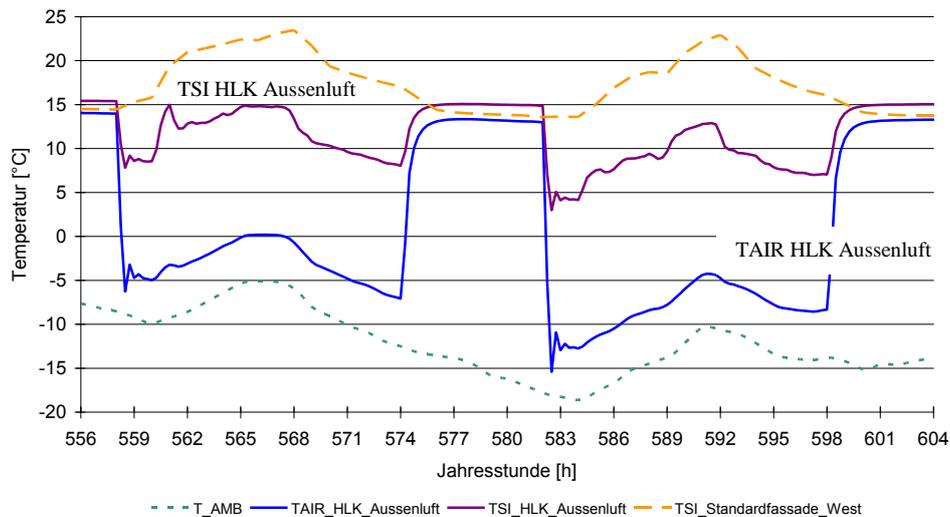


Abbildung 8: Vergleich der Oberflächentemperatur am HLK-Gerät mit der Oberflächentemperatur der Standardfassade von 24.01. 04:00 Uhr bis 26.01. 04:00 Uhr

Diese niedrigen Temperaturen an der Innenoberfläche der Fassade sind einerseits für den Benutzer sehr unangenehm und haben andererseits Kondensation an der Wandoberfläche zur Folge. Im Vergleich dazu ist die Oberflächentemperatur der Standardfassade mit West Ausrichtung als orange strichlierte Linie dargestellt. Sie beträgt zum Zeitpunkt der kältesten Außenlufttemperatur ca. 14 °C und liegt somit 10 K über der Temperatur am HLK-Gerät.

Im Sommerfall ist der Temperaturverlauf an der Innenoberfläche des solarthermischen Kollektor-Fassaden-Modules von wesentlichem Interesse (vor allem im Stagnationsfall). Abbildung 9 zeigt dazu den Temperaturvergleich zwischen Standard und MPPF Fassade. Dieser Tag (07.09. 0:00 Uhr bis 08.09. 0:00 Uhr) liegt in einer Schönwetterperiode in der ersten Septemberwoche. Kurz nach Sonnenaufgang beginnt die Temperatur an der Absorberoberfläche stark anzusteigen. (blaue Linie). Bereits am Vormittag geht die Anlage aufgrund des durchgeladenen Speichers kurzzeitig in Stagnation und erreicht beinahe 120 °C. Dies hat natürlich Auswirkungen auf die Oberflächentemperatur an der Innenseite des Kollektor-Fassaden-Modules. Wie an dem violetten Kurvenverlauf (TSI Kollektor) erkennbar, erreicht die Temperatur ihr Maximum kurz nach dem Stagnationszustand der Anlage mit ca 37 °C. Nachdem die direkte Solarstrahlung ab dem Nachmittag aufgrund der Gebäudeverschattung nicht mehr am Absorber auftritt, nimmt die Oberflächentemperatur kontinuierlich ab und fällt erst gegen 17:00 Uhr unter 30 °C. Zu diesem Zeitpunkt erreicht die

Außenlufttemperatur ihr Maximum bei ca. 27 °C. Die Standardfassade erreicht auf der selben Position ein maximales Temperaturniveau von ca. 28 °C und ist somit wiederum ca. 10 K kühler.

Einfluss des neuen Strahlungsmodells in TRNSYS 17

Von zusätzlichem Interesse ist der Einfluss des neuen dreidimensionalen Strahlungsmodells, welches erstmals in TRNSYS 17 verwendet werden kann. Dazu wurde der Büroraum mit seinen 11 Zonen mit dem bisherigen Strahlungsmodell simuliert. Abbildung 10 zeigt die Energiebilanz unter Verwendung des alten Strahlungsmodells. Die Aufteilung der Strahlung im inneren einer Zone wird hier entweder flächengewichtet oder über die Eingabe sogenannter Geosurf Faktoren bestimmt. In diesem Fall wurde die Strahlung flächengewichtet aufgeteilt.

Im Vergleich zum neuen Strahlungsmodell in TRNSYS 17 ergibt sich mit dem alten Strahlungsmodell TRNSYS 16 ein um 10 % höherer Eintrag an solaren Gewinnen. Bedingt durch den erhöhten Strahlungseintrag steigen der Kühlbedarf um 15 % und die Transmissionsverluste um 4 % an. Der verminderte solare Eintrag bei Verwendung des neuen Strahlungsmodells in TRNSYS 17 beruht auf der Berücksichtigung der Gebäudeeigenverschattung, welche, im Gegensatz zu TRNSYS 16, durch die Verwendung von Trnsys 3d für Google SketchUp sehr einfach realisiert werden kann.

Temperaturvergleich - Sommer Solarthermie

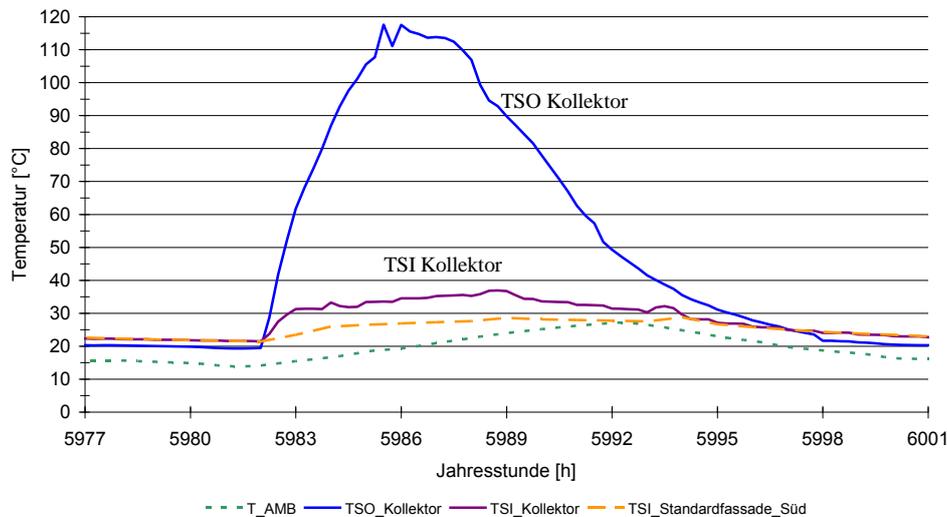


Abbildung 9: Vergleich der Oberflächentemperaturen an der Innenseite des Kollektor-Fassaden-Modules mit der Oberflächentemperatur an der gleichen Position der Standardfassade von 07.09. 0:00 Uhr bis 08.09. 0:00 Uhr

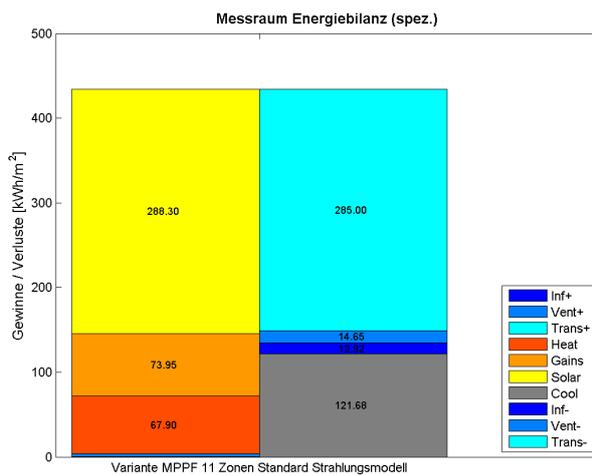


Abbildung 10: Energiebilanz der MPPF-Variante mit 11 Zonen unter Verwendung des einfachen Strahlungsmodells

Wichtige Regelparameter (Verschattungssteuerung, Kunstlichtsteuerung), die aufgrund fehlender Messung oder Informationen noch angenommen werden, müssen in das derzeitige Messkonzept aufgenommen, oder in Erfahrung gebracht werden.

Trotz des noch nicht mit der Messung validiertem Simulationsmodells (im Prototypen sind derzeit erst wenige Messstellen in Betrieb), können bereits jetzt Parameterstudien durchgeführt, und für die weitere Entwicklung von MPPF-Modulen herangezogen werden.

Das Ziel der Fassadenentwicklung muss unter Anderem darin liegen, in der MPPF Fassade gleichwertige oder sogar behaglichere Oberflächentemperaturen der Fassadeninnenseite im Vergleich zu einer konventionellen Fassade zu erreichen. Hierfür kann das aufgestellte Simulationsmodell nach seiner Validierung eingesetzt werden.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Diese Arbeit zeigt Ansätze und Ideen für die detaillierte thermische Modellierung einer multifunktionalen Fassade mit Büroraumes. Im weiteren Verlauf des Projektes müssen die einzelnen Modelle auf ihre Plausibilität überprüft und bei Bedarf verbessert werden.

Für den Vergleich zwischen Messung und Simulation ist es notwendig, die tatsächlichen Randbedingungen (Klimadaten, Nutzungsprofile) im Vergleichszeitraum zu erfassen.

DANKSAGUNG

Das Projekt MPPF (Projektnummer 815075) wurde im Rahmen des Comet-Programmes gefördert. Besonderer Dank gilt den Fördergebern, insbesondere der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG).

LITERATUR

LTG Aktiengesellschaft, 2009, Technischer Prospekt, abgerufen von <http://www.ltg-ag.de/>

Matuska, T., Zmrhal, V., 2010, Software tool KOLEKTOR 2.2, available from <http://www.fsid.cvut.cz/>

Meteotest 2002, Meteonorm, V 4, Bern, Schweiz, <http://www.meteonorm.com/>

ÖNORM EN 13947, 2007, Waermetechnisches Verhalten von Vorhangfassaden - Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten, Wien, Österreich

Schranzhofer, H., Streicher, W., Mach, T., Mueller, M. J., 2009 MULTIFUNCTIONAL PLUG & PLAY FACADE (MPPF) K-PROJEKT (COMET PROGRAMM), 19. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, Deutschland

Streicher, W., Mueller, M. J., 2009. Multifunktionelle Plug & Play Fassade (MPPF) / K-Projekt (Comet Programm), Erneuerbare Energie - Zeitschrift für eine nachhaltige Energiezukunft, Band 2 2009, AEE-Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energie, Gleisdorf, Österreich

Streicher, W., Mueller, M. J., 2008. Multifunktionelle Plug & Play Fassade (MPPF) / K-Projekt (Comet Programm), 10. Symposium Energieinnovation, Graz, Österreich

Transsolar 2009, TRNSYS 17.00.0008TS, Transsolar Energietechnik GmbH, Stuttgart Deutschland, <http://www.transsolar.com/>

Trnsys3d Tutorial 2009, TRNSYS 17 Dokumentation, Transsolar Energietechnik GmbH, Stuttgart, Deutschland, <http://www.transsolar.com/>

GESAMTENERGIEEFFIZIENZ VON BÜROBAUTEN MIT TIEFEM U-WERT

Reto Gadola¹, Iwan Plüss¹, Urs-Peter Menti¹, Martin Ménard²

¹Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Zentrum für Integrale Gebäudetechnik (ZIG)

²Lemon Consult GmbH

KURZFASSUNG

Mit der MuKE 2008 [1] wird der Trend der letzten Jahre zu sehr gut gedämmten Gebäudehüllen weitergeführt. Damit soll eine weitere Reduktion des Heizwärmebedarfs erzielt werden. Nun stellt sich aber die Frage, wie es in diesem Zusammenhang mit der Gesamtenergieoptimierung aussieht: Wird durch die mit den Vorgaben geforderte sehr gute Dämmung der Gebäudehülle und die sehr kompakte Bauweise allenfalls der Klimakälte- und Beleuchtungsenergiebedarf erhöht? Diese Frage wird anhand einiger typischer, grosser Bürobauteile in der vorliegenden Studie beantwortet.

Die Betrachtung auf Stufe Primärenergie zeigt, dass eine sehr gute Gebäudehülle nach Minergie-P gegenüber einer Gebäudehülle, welche „nur“ die gesetzlichen Anforderungen erfüllt, nicht zu einem Mehrbedarf führt – aber (abhängig vom Heizsystem/Energiequelle) auch nur einen minimalen Minderbedarf aufweist. Dieser Vorteil wird häufig, sobald in die Betrachtung die Investitionen und die Graue Energie miteinbezogen werden.

Eine hohe Kompaktheit reduziert zwar den Heizwärmebedarf, gleichzeitig wird aber der Elektrizitätsbedarf für die Beleuchtung erhöht (schlechte Tageslichtnutzung aufgrund hoher Raumtiefen). Spätestens bei einer Primärenergiebetrachtung wird der Mehrbedarf für die Beleuchtung massgebend, somit ist eine extreme Kompaktheit (Gebäudehüllziffer < 0.8) ineffizient.

AUSGANGSLAGE

Die gesetzlichen Vorgaben – oft an die entsprechenden SIA-Normen gebunden – definieren sehr spezifische Anforderungen an einzelne Verwendungszwecke der Energie: Die Norm SIA 380/1 [2] beinhaltet die Anforderung an den Heizwärmebedarf, die Norm SIA 380/4 [3] definiert Vorgaben für den Beleuchtungsenergiebedarf und die SIA 382/1 [4] definiert Anforderungen an den Elektrizitätsbedarf für Lüftung/Klima sowie an den sommerlichen Wärmeschutz.

Diese spezifischen Vorgaben für einzelne Teilbereiche der Energie führen tendenziell dazu, dass im Planungsprozess nicht eine Optimierung des

Gesamtsystems „Gebäude“ durchgeführt wird, sondern mehrere punktuelle Optimierungen durchgeführt werden. Die Summe vieler minimierter Teilverbräuche ist unter Umständen aber höher als ein integral minimierter Gesamtverbrauch – vor allem auch dann, wenn für die Berechnung der Teilbereiche unterschiedliche oder gar sich widersprechende Randbedingungen verwendet werden.

Konkret besteht nun bei Minergie-P-Gebäuden ein Verdacht: Die stark forcierte Maximierung der Dämmeigenschaften der Gebäudehülle und der solaren Gewinne könnte in einzelnen Fällen zu einer übermässigen Erhöhung des Klimakältebedarfs und somit zu einem nicht optimalen Gesamtenergiebedarf führen. Dies könnte vor allem dann der Fall sein, wenn aufgrund hoher interner Lasten schon bei einer nicht nach den Anforderungen von Minergie-P entsprechenden Gebäudehülle (fast) kein Heizwärmebedarf mehr resultiert. Dieser Verdacht betrifft primär Bürobauteile mit hohen internen Lasten sowie Verkaufs-, Schul-, Spital- oder Industriebauteile.

Ein weiterer Punkt der bei einer Gesamtoptimierung zu Zielkonflikten in der Planung führen kann, ist das Thema „Kompaktheit des Gebäudes“ sowie die Ausrichtung der Fensterflächen: Die Norm SIA 380/1 [2] privilegiert kompakte Bauteile zwecks Minimierung der Wärmeverluste. Diese Bauweise hat aber einen negativen Einfluss auf die Tageslichtnutzung, weil Kompaktheit in der Tendenz zu hohen Raumtiefen führt. Dominiert nun z.B. bei Bürobauteilen der Energiebedarf für die Beleuchtung und ist gleichzeitig der Heizwärmebedarf marginal, stellt sich berechtigterweise die Frage, ob eine kompakte Bauweise aus gesamtenergetischer Sicht wünschenswert ist. Die Suche nach einem optimalen Verhältnis zwischen Raumtiefen und Fensteranteilen zur Maximierung der Tageslichtnutzung ist dann besonders wichtig. Diese Erkenntnisse könnten dazu führen, dass ein auf den Gesamtenergiebedarf optimiertes Gebäude bei der Gebäudeform und thermischen Qualität der Gebäudehülle von einem auf die Minergie-P-Primäranforderung optimierten Gebäude abweicht.

Fragestellung

Aus der Ausgangslage können zwei Fragen abgeleitet werden:

- Ist ein auf die Minergie-P-Primäranforderung optimiertes Gebäude betreffend Fensteranteil, U-Werte (Fenster, opake Bauteile), g-Wert Verglasung sowie der Gebäudeform vergleichbar mit einem auf einen minimalen Primärenergiebedarf betreffend Heizwärme, Klimakälte und Beleuchtung optimierten Gebäude?
- Ist ein kompaktes Gebäude mit entsprechend minimalem Heizwärmebedarf aus Sicht des Primärenergiebedarfs für Heizwärme, Klimakälte und Beleuchtung besser als ein auf eine gute Tageslichtnutzung optimiertes Gebäude mit entsprechend geringerer Kompaktheit?

Parallel zu diesen Leitfragen entstanden im Laufe der Analysearbeiten weitere Fragen aus dem gleichen Kontext. So werden unter anderem auch die Einflüsse der Primärenergiefaktoren und Energieträger untersucht.

Die Erkenntnisse aus der Studie können in die Weiterentwicklung von Standards und Normen einfließen. Daher richtet sich die Arbeit vor allem an den Verein Minergie, die Normengremien des SIA sowie Vertreter von Bund und Kanton.

MINERGIE-P PRIMÄRANFORDERUNG VS. GESAMTENERGIEEFFIZIENZ

Vorgehen

Die Untersuchungen werden anhand von synthetischen Gebäuden durchgeführt. Dies ermöglicht gewisse Vereinfachungen in der Objektdefinition, ohne damit die Aussagekraft der Resultate entscheidend zu schmälern. Folgende Parameter werden variiert:

- U-Werte opake Aussenflächen (0.1 W/m²K → 0.2 W/m²K)
- U-Werte transparente Aussenfläche (0.5 W/m²K → 1.0 W/m²K)
- g-Wert der Verglasung (0.4 → 0.6)
- Anteil der Verglasung an Fassade (50% → 70% bezogen auf Nettofassade)

Die nachfolgenden Resultate gelten für das Gebäude T1 welches nachfolgend beschrieben ist. Resultate weiterer Gebäudetypen können im Schlussbericht nachgelesen werden.

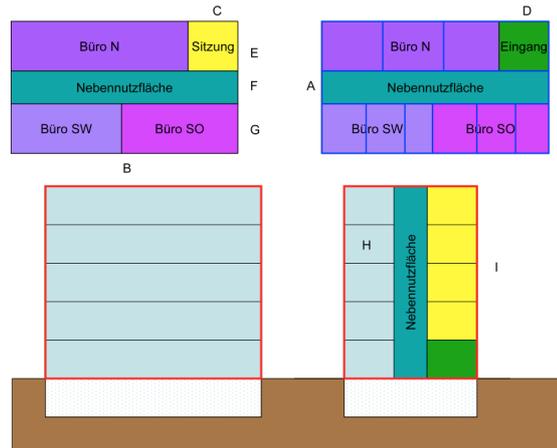


Abbildung 1: Modellgebäude T1

Die Längsfassade ist nach Nord/Süd ausgerichtet. Grundriss Erdgeschoss mit Eingang, Büros und Nebennutzflächen (Treppengeschoss, Lift, WC-Anlagen); Grundriss Obergeschosse mit Sitzungszimmer, Büros und Nebennutzflächen. Die Fenster sind als umlaufendes Fensterband angeordnet. Der Gebäudeformfaktor liegt bei 1.02. Das Untergeschoss befindet sich ausserhalb der thermischen Gebäudehülle und ist komplett im Erdreich. L=28m; B=15m; H=15m netto.

Aufteilung der Flächen: Büro 71%, Sitzung 7%, Nebenflächen 20% Empfang 2%.

Resultate / Fazit

Für jede Variante wurden mit dem Simulationsprogramm IDA ICE Berechnungen des Energiebedarfs durchgeführt. Der so ermittelte Nutzenergiebedarf wurde anschliessend in End- und dann in Primärenergie umgerechnet. Für die Umrechnungen werden die Faktoren (Nutzungsgrad η , Jahresarbeitszahl JAZ, Primärenergiefaktoren) gem. Tab. 1 eingesetzt. Die verwendeten Primärenergiefaktoren stammen aus der Studie Primärenergiefaktoren von Energiesystemen [5].

Tabelle 1

Übersicht zu den verwendeten Nutzungsgraden, Jahresarbeitszahlen und Primärenergiefaktoren

ENERGIE-QUELLE	η BZW. JAZ	PRIMÄR-ENERGIEFAKTOR
	-	kWh/kWh
Wärmepumpe (Erdsonde)	4.30	2.97
Fernwärme	0.95	0.85
Gas	0.90	1.15
Holz (Pellet)	0.85	1.22
Kältemaschine	5.50	2.97
Beleuchtung	1.00	2.97

Während Beleuchtung und Kälteanlage nicht verändert werden, werden die eingesetzten Heizsysteme / Energiequellen variiert (Erdsonden-Wärmepumpe, Fernwärme, Gasheizung, Holzheizung).

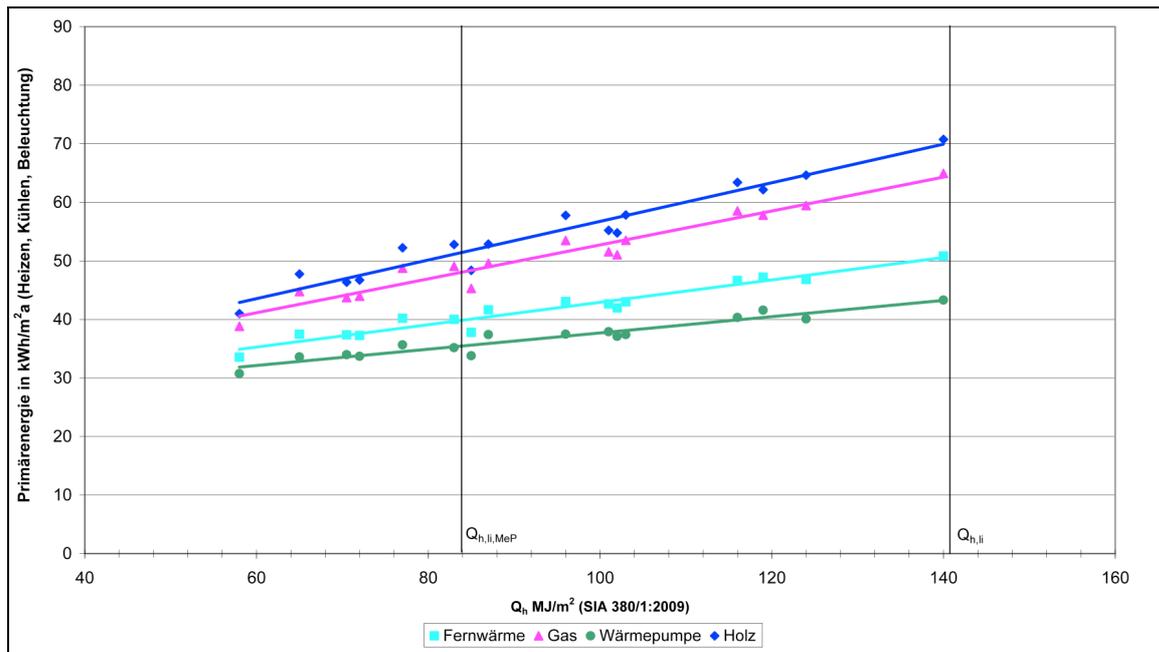


Abbildung 2: Darstellung des Primärenergiebedarfs für das Gebäude T1 mit den Primärenergiefaktoren aus der Tab. 2 bezogen auf den Heizwärmebedarf $Q_{h,li}$.

Unabhängig vom eingesetzten Energieträger nimmt der Primärenergiebedarf mit zunehmendem Heizwärmebedarf zu. Die Gebäude mit einer gut gedämmten Gebäudehülle weisen also einen tieferen Primärenergiebedarf für Heizwärme, Klimakälte und Beleuchtung auf als Gebäude mit einer schlecht gedämmten Gebäudehülle. Die Geraden verlaufen jedoch relativ flach, vor allem bei den Energiequellen mit einem tiefen Umrechnungsfaktor zwischen Nutz- und Primärenergie. Abb. 2 zeigt auch: Betreffend Primärenergiebedarf hat die Wahl des Energieträgers den grösseren Einfluss als die thermische Qualität der Gebäudehülle. Ein Gebäude, das knapp den Grenzwert $Q_{h,li}$ nach Norm SIA 380/1[2] erfüllt und mittels einer optimal ausgelegten Erdsonden-Wärmepumpe beheizt wird, ist betreffend Primärenergiebedarf in etwa gleich gut wie ein Gebäude mit sehr guter Gebäudehülle (entsprechend Minergie-P) und einer Holzheizung.

GEBÄUDEKOMPAKTHEIT VS. GESAMTENERGIEEFFIZIENZ

Vorgehen

Die Untersuchungen werden anhand von synthetischen Gebäuden durchgeführt. Die Qualität der Gebäudehülle ist bei allen Untersuchungen identisch, es wird nur die Gebäudegeometrie variiert. Nachfolgend sind die Gebäude dargestellt, T-B entspricht dabei dem Gebäude T1 aus dem vorhergehenden Kapitel.

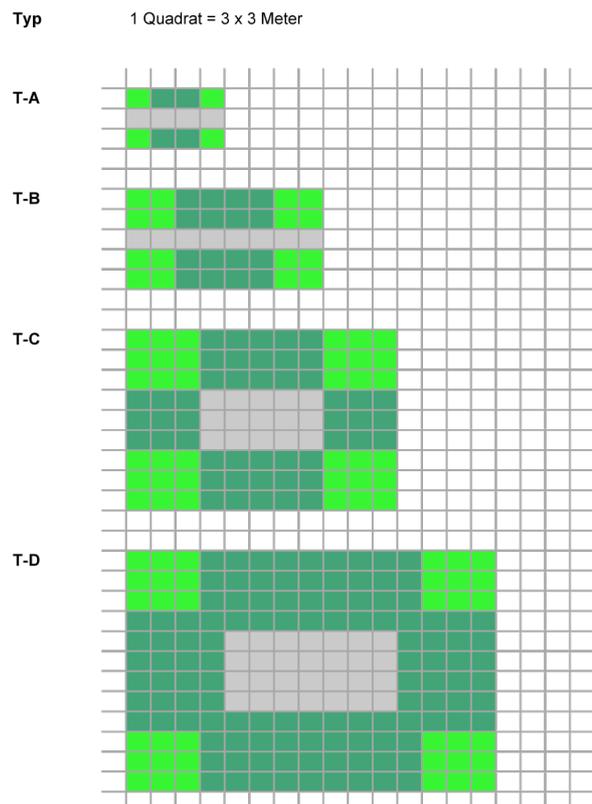


Abbildung 3: Modellgebäude T-A bis T-D

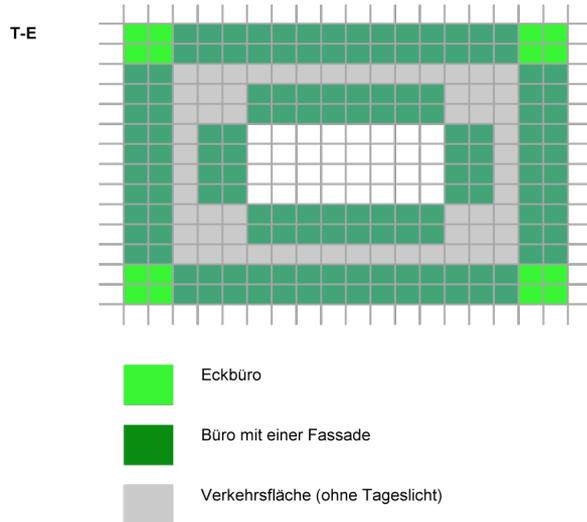


Abbildung 4: Modellgebäude T-E / Legende Nutzung

Resultate für Erdsonden-Wärmepumpe

In Abb. 5 ist der Primärenergiebedarf für Heizwärme, Klimakälte und Beleuchtung für die Gebäudetypen T-A bis T-D dargestellt (ohne T-E, welches ein Gebäude mit Atrium darstellt). Die Heizwärme wird mit einer Erdsonden-Wärmepumpe erzeugt. Der Primärenergiebedarf steigt bei tiefen Gebäudehüllzahlen an (massgebend ist hier der Bedarf für Beleuchtung). Bei hohen Gebäudehüllzahlen verläuft die Kurve flach.

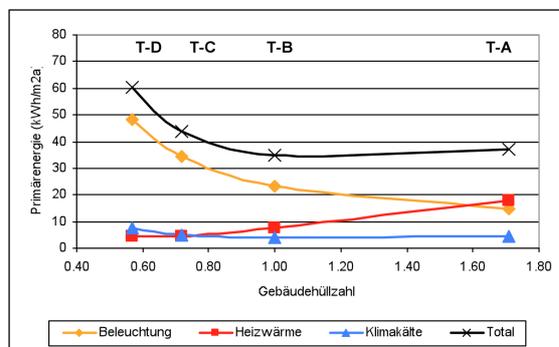


Abbildung 5: Primärenergiebedarf (mit Erdsonden-Wärmepumpe) in Abhängigkeit der Gebäudehüllzahl: Varianten T-A bis T-D, Betrachtung ohne Atrium-Bauten (T-E).

In Abb. 6 ist der Verlauf des Primärenergiebedarfs für die Gebäudetypen T-A, T-B und T-E (schmale Bauten, bzw. Bauten mit Atrien), ohne die grossvolumigen Gebäudetypen T-C und T-D dargestellt. Hier bleibt das Total des Primärenergiebedarfs über das ganze Spektrum der untersuchten Gebäudehüllzahlen nahezu konstant. Die Verläufe des Primärenergiebedarfs für Beleuchtung und für Heizwärme kompensieren sich gegenseitig.

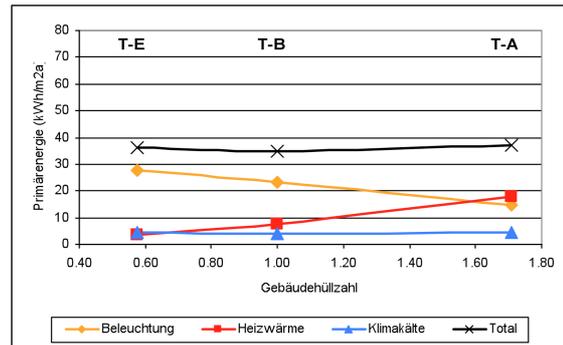


Abbildung 6: Primärenergiebedarf (mit Erdsonden-Wärmepumpe) in Abhängigkeit der Gebäudehüllzahl: Varianten T-A, T-B und T-E (Atrium-Bau), ohne die sehr kompakten Gebäudetypen T-C und T-D

Primärenergiebedarf (mit weiteren Wärmeerzeugern)

In Abb. 7 ist der Primärenergiebedarf in Abhängigkeit von der Gebäudehüllzahl für die Gebäudetypen T-A bis T-D dargestellt. Bei tiefen Gebäudehüllzahlen steigt das Total des Primärenergiebedarfs für Heizwärme, Klimakälte und Beleuchtung mit allen vier untersuchten Wärmeerzeugern deutlich an. Bei hohen Gebäudehüllzahlen steigt die Kurve ebenfalls leicht an. Am stärksten ist der Anstieg bei Holz- und Gasheizungen, dies als Folge der vergleichsweise hohen Primärenergiefaktoren. Die tiefsten Primärenergiebedarfswerte liegen bei einer Gebäudehüllzahl von 0.9 bis 1.0.

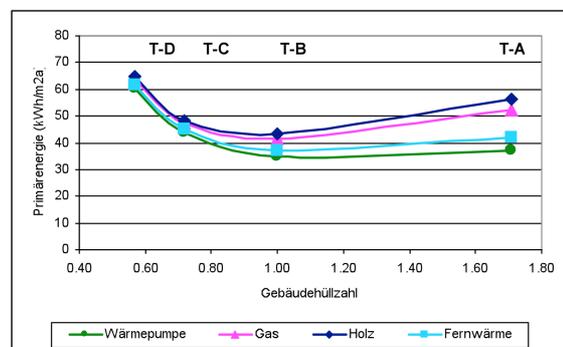


Abbildung 7: Primärenergiebedarf mit unterschiedlichen Wärmeerzeugern: Varianten T-A bis T-D, Betrachtung ohne Atrium-Bauten (T-E)

In Abb. 8 ist der Verlauf des Primärenergiebedarfs für die Gebäudetypen T-A, T-B und T-E dargestellt. Beim Atrium-Bau mit einer Gas- oder Holzheizung nimmt der Primärenergiebedarf über die ganze Bandbreite der gerechneten Gebäudehüllzahlen mit zunehmender Kompaktheit ab. Bei Wärmepumpen und Fernwärme ist der Primärenergiebedarf nahezu unabhängig von der Gebäudehüllzahl, die Kurve verläuft flach.

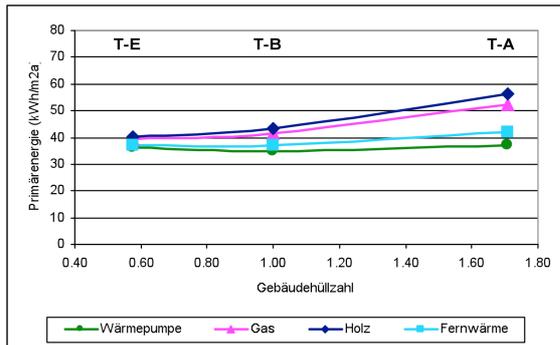


Abbildung 8: Primärenergiebedarf mit unterschiedlichen Wärmeerzeugern: Varianten T-A, T-B und T-E (Atrium-Bau)

Fazit

Kompakte Gebäude weisen in der Tendenz einen tiefen Heizwärmebedarf auf. Oft aber weisen diese Gebäude Raumentiefen auf, welche eine Tageslichtnutzung erschweren, was zu einem hohen Beleuchtungsenergiebedarf führt. In der Gesamtbetrachtung sind deshalb sowohl wenig kompakte als auch extrem kompakte Gebäude ungünstig. Optimal sind kompakte Gebäude mit gleichzeitig geringen Raumentiefen.

AUSBLICK

Die vorliegende Studie vermag nicht alle Fragen zu beantworten. Der Schritt von einer Beurteilung einzig über den Heizwärmebedarf zu einer Beurteilung über den Primärenergiebedarf (oder die Treibhausgasemissionen) für Heizwärme, Klimakälte und Beleuchtung wurde vollzogen, aber für eine umfassende Beurteilung sind auch die Graue Energie für das gesamte Gebäude, die Investitionen und die Energiepreise (inkl. deren Entwicklung) zu berücksichtigen. Vor allem die hier favorisierte Lösung mit Atrien und Lichthöfen bei Gebäuden mit hoher Kompaktheit könnte unter diesen Aspekten evtl. schlechter abschneiden: Die gute Tageslichtnutzung wird hier mit einem höheren Aufwand bei der Gebäudehülle (Graue Energie) und entsprechend bei den Kosten erkaufte.

Zudem zeigen die durchgeführten Sensitivitätsanalysen eine relativ schwache Resultats sensitivität auf einzelne der variierten Parameter (interne Lasten, Verschattung, Sonnenschutz, Beleuchtung etc.). Hier wäre zu prüfen, ob bei einer stärkeren Variation eine deutlich

höhere Sensitivität auftritt. Insbesondere interessiert, ab welchen internen Lasten der Primärenergiebedarf bei einer gut gedämmten Bauhülle steigt, weil dadurch der Energiebedarf für Klimakälte und/oder Beleuchtung überproportional erhöht wird. Andererseits wäre interessant zu wissen, wie weit die Aussagen auch noch bei stark reduzierten internen Lasten gelten (deutlich effizientere Geräte, Beleuchtung etc.).

Last but not least beschränken sich die hier durchgeführten Untersuchungen auf Bürobauten. Damit die Aussagen verallgemeinert werden können, müssten weitere Nutzungen (Wohnbauten, Schulbauten, Lagerbauten etc.) untersucht werden. Während z.B. gerade bei Schulbauten die Tageslichtnutzung noch bedeutender sein dürfte, fällt dieser Aspekt bei den Lagerbauten fast komplett weg. Zudem wird nur zwischen dem heute gesetzlich vorgeschriebenen Dämmstandard und einer von Minergie-P geforderten Dämmung unterschieden, auch hier wäre eine Ausweitung der untersuchten Gebäudekategorien vorstellbar.

LITERATUR / REFERENZEN

- [1] MuKE n Musterverordnung der Kantone im Energiebereich, 2008, www.endk.ch
- [2] Norm SIA 380/1, Thermische Energie im Hochbau, Ausgabe 2009.
- [3] SIA 380/4, Elektrische Energie im Hochbau, Ausgabe 2006, Teil Beleuchtung mit SIA Tool Beleuchtung www.energycodes.ch
- [4] SIA 382/1, Lüftungs- und Klimaanlage n – Allgemeine Grundlagen und Anforderung, Ausgabe 2005
- [5] Primärenergiefaktoren von Energiesystemen; Rolf Frischknecht, Matthias Tuchschild, Version 1.4 vom 18 Dezember 2008
- [6] Norm SIA 382/2:2010, Klimatisierte Gebäude – Leistungs- und Energiebedarf, Ausgabe 2010
- [7] Merkblatt 2044, Klimatisierte Gebäude – Standard-Berechnungsverfahren für den Leistungs- und Energiebedarf, Ausgabe 2010

SYSTEMATISCHE UNTERSUCHUNG VON SANIERUNGSMABNAHMEN FÜR WOHNGEBÄUDE DER 50-ER UND 60-ER JAHRE

Tanja Osterhage, Davide Calí, Dirk Müller

RWTH Aachen, E.ON Energy Research Center
 Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik
 Mathieustraße 6, 52074 Aachen
 tosterhage@eonerc.rwth-aachen.de

KURZFASSUNG

Mit dem Vorhaben „Integrales Quartiers-Energiekonzept Karlsruhe-Rintheim“ wird ein beispielhaftes nachhaltiges Quartierskonzept für das Wohnquartier entwickelt und umgesetzt. Neben bestmöglicher Kosteneffizienz soll eine Minimierung des Primärenergieeinsatzes und der CO₂-Emissionen erreicht werden. Parallel zum Aufbau eines Nahwärmenetzes - gespeist aus KWK und Abwärme - sollen die Gebäude wirtschaftlich optimal mit unterschiedlichen Sanierungsstandard und variierender Anlagentechnik modernisiert werden. Der anschließende Betrieb wird durch eingebaute Messtechnik überwacht und die Funktionsweisen der Komponenten stetig optimiert. Die Bewohner werden in die Energieeinsparbemühungen einbezogen. Es werden Befragungen durchgeführt und die Mieter können monatlich über ein online-Portal ihre Verbrauchsdaten abrufen.

ABSTRACT

Within the framework of the project „integral energy concept Karlsruhe Rintheim“ exemplary retrofit solution for residential buildings are developed. Apart from optimum cost-efficiency a minimization of primary energy employment and CO₂-emissions is to be achieved. A local heat supply net is installed - fed from CHP and waste heat. The buildings have a different retrofit scenario in terms of insulation, heat production and delivery, domestic hot water production and air-handling systems. The operation is monitored by measuring technique and will be constantly optimized. The inhabitants will be included into the energy saving efforts, and can have a monthly summary of their consumption provided by an on-line portal.

AUSGANGSSITUATION

Für das Betreiben von Gebäuden wird in den OECD-Ländern 40% der Primärenergie [1] benötigt. Raumheizung und Kühlung sind die bedeutendsten Bestandteile des Gebäudeenergiebedarfs [2], dementsprechend liegt hier das höchste Energiesparpotenzial. Die Gebäudesanierung ist eine Möglichkeit den

Primärenergiebedarf und CO₂-Ausstoß zu verringern. Die vorhandenen Statistiken zeigen, das Gebäude aus der Mitte des 20. Jahrhunderts erhebliche Energiemengen durch den niedrigen Dämmstandard und die häufig überholten Heizsysteme verbrauchen.

Die drei parallelen Wohnblöcke in Karlsruhe im Rintheimer Feld in der Heilbronner und Mannheimer Straße wurden in den 50er-Jahren erbaut. Jeder Wohnblock besteht aus drei Gebäudeteilen mit jeweils 10 Wohneinheiten und separaten Zugängen.

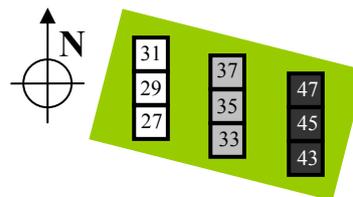


Abbildung 1 Gebäudeorientierung

Die Abmessung eines Wohnblocks beträgt 51,63 m Länge bei einer Breite von 10,34 m. Dies führt zu einer überbauten Fläche von 533,85 m². Das beheizte Gebäudevolumen umfasst pro Block 7.212 m³ mit einer wärmeübertragenden Umfassungsfläche von 2.747,35 m² und führt somit zu einem A/V_e-Verhältnis von 0,48.

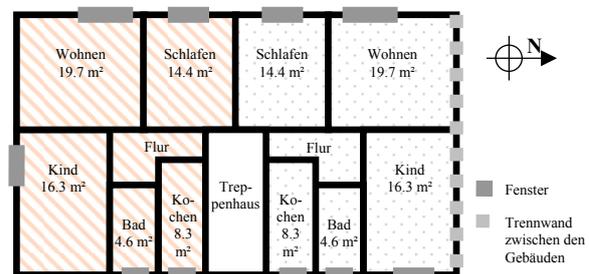


Abbildung 2 Qualitative Darstellung eines Eckgebäudegrundrisses

Die Sanierung des ersten Gebäudekomplexes wurde im Jahre 2008 fertig gestellt. Die anlagentechnische sowie baukonstruktive Sanierung wurde nach den Standardvorgaben der Wohnungsbaugesellschaft Volkswohnung durchgeführt. Die Heilbronner Str. 27-31 dient für alle weiteren Untersuchungen als

Vergleichsgebäude bzw. Basis. Die Standardsanierung der Volkswohnung sieht im Bereich der Anlagentechnik eine komplette Renovierung bzw. Erneuerung vor. Die Heizwärme wird durch das neu ausgebaute Nahwärmenetz bereitgestellt.



Abbildung 3 Westansicht Heilbronner Str. 27-31 (vor der Sanierung)

Im Zuge der Standardsanierung wurden in den Wohnungen Plattenheizkörper mit Thermostatventilen eingebaut. Nach einer Heizperiode werden die Thermostatventile im Jahre 2010 durch dezentrale WILO Heizungspumpen ersetzt. Die dezentrale Brauchwassererzeugung wird durch eine zentrale Warmwasserbereitung mit Zirkulationsleitung ersetzt. Zur Sicherstellung des notwendigen Luftwechsels wurde eine Zwangslüftung eingebaut. Die Belüftung der Räume erfolgt jeweils über ein bedarfsgeregeltes feuchtegeführtes Zuluftelement (ALD) im Fensterrahmen. Gleichzeitig wird in den Nebenräumen wie Küche und Bad die verbrauchte Luft abgesaugt. Im baukonstruktiven Bereich sieht die Standardsanierung eine Ertüchtigung der Außenwände mit einer 14 cm starken Dämmung der Wärmeleitfähigkeit 035, die Dämmung der obersten Geschossdecke mit 16 cm und eine unterseitige Dämmung der Kellerdecke mit 7 cm Dämmung vor. Für den Fensteraustausch werden Elemente mit einem durchschnittlichen U_w von 1,3 W/m²K vorgesehen.



Abbildung 4 Westansicht Heilbronner Str. 27-31 (nach der Sanierung)

Für die Sanierungsalternativen in den beiden weiteren Gebäuden der Heilbronner Str. 33 bis 37 und Mannheimer Str. 43 bis 47 sind in der Abbildung 5 die unterschiedlichen Varianten aufgetragen. Dabei wird ein Gebäuderiegel grundsätzlich mit dem gleichen Dämmstandard ausgestattet. Unterschiede sind lediglich in den Anforderungen an die Fenster festzustellen. Die Anlagentechnik hingegen variiert pro Hauseingang.

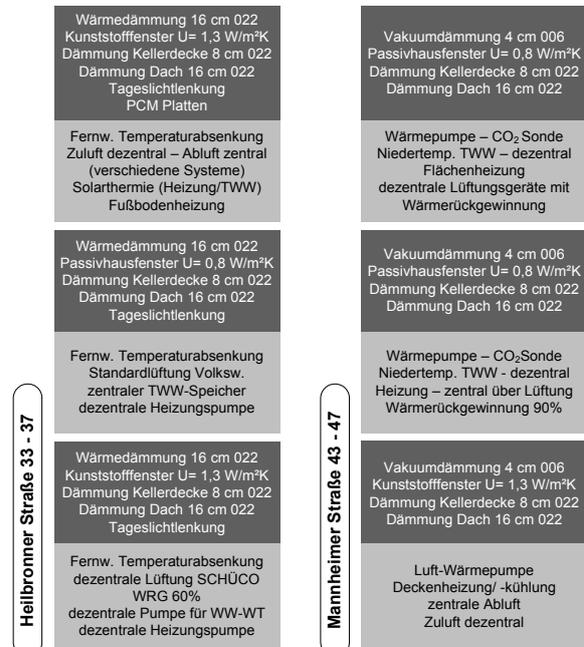


Abbildung 5 Vergleich der einzelnen Sanierungsalternativen (hellgrau = Anlagentechnik, dunkelgrau = Baukonstruktion)

BERECHNUNGEN

Zu Beginn des Projektes wurden statische Berechnungen zur Heizlast sowie EnEV durchgeführt. Die Ergebnisse des spezifischen Transmissionswärmeverlustes spiegeln die Güte der Dämmung der wärmeübertragenden Umfassungsfläche wider. Angefangen bei der Bestandssituation, über die Standardsanierung der Volkswohnung mit 14 cm Wärmedämmung der Wärmeleitfähigkeit 035, über die Sanierung mit 16 cm Resol-Hartschaumdämmung und einer Wärmeleitfähigkeit von 022 bis hin zur Vakuumdämmung mit einer Wärmeleitfähigkeit von 006, als Sandwichkonstruktion mit 3 cm Deckschicht aus Standarddämmstoff. Gegenüber dem Bestand reduziert sich durch die baukonstruktive Sanierung der spezifische Transmissionswärmeverlust um bis zu 75%, zwischen den unterschiedlichen Sanierungsalternativen sind dann weiterhin noch Einsparungen im Bereich von 10% erkennbar.

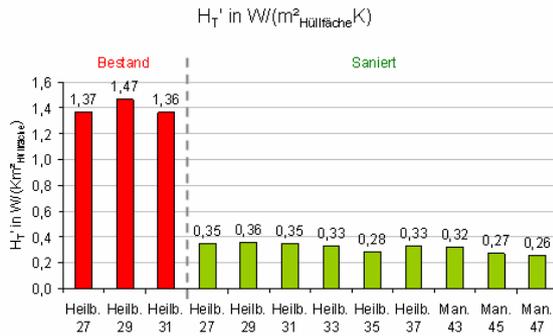


Abbildung 6 Auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogener spezifischer Transmissionswärmeverlust

Die Anlagenaufwandszahl beschreibt die energetische Effizienz des gesamten Anlagensystems und stellt somit das Verhältnis von Aufwand zu Nutzen (eingesetzter Brennstoff zu abgegebener Wärmeleistung) dar. Je kleiner die Zahl ist, umso effizienter ist die Anlage. In Abbildung 7 sind die Anlagenaufwandszahlen der jeweiligen Haustechnik pro Hauseingang gegenüber gestellt. Während die Anlagentechnik im Bestand für Heizung und Warmwasser zusätzlich 70% an Primärenergie mehr erforderte, kann nach der Sanierung festgestellt werden, dass die Anlagen effizient laufen, denn es muss keine zusätzliche Primärenergie aufgebracht werden. Aufgrund der anteiligen Nutzung von erneuerbaren Energien reduziert sich die Anlagenaufwandszahl bei einigen Gebäuden auf Werte unter 1,0.

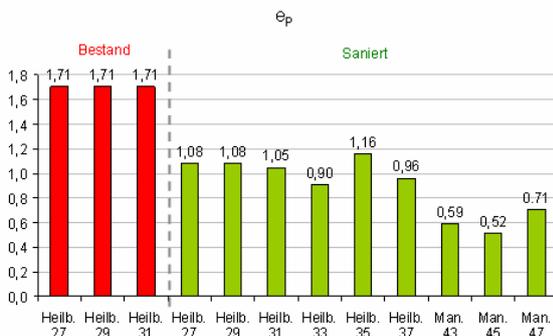


Abbildung 7 Anlagenaufwandszahl für jeden Hauseingang vor und nach der Sanierung

Nachdem für die einzelnen Sanierungen die detaillierten Berechnungen in Bezug auf die Transmissionswärmeverluste und Anlagentechnik durchgeführt wurden, wird im letzten Schritt der Primärenergiebedarf ermittelt. Hierzu wird die zusätzlich notwendige Energiemenge, die von der Gewinnung des Energieträgers an seiner Quelle über Aufbereitung und Transport bis zum Gebäude und der Verteilung, Speicherung im Gebäude anfällt, mit bilanziert. Während die Werte vor der Sanierung

noch weit über $300 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ lagen, ist nach der Standardsanierung eine Reduktion um 84% feststellbar. Der Primärenergiebedarf in der Mannheimer Str. fällt dann wiederum nochmals ab, hier sind deutlich die Auswirkungen der effizienten Anlagentechnik erkennbar.

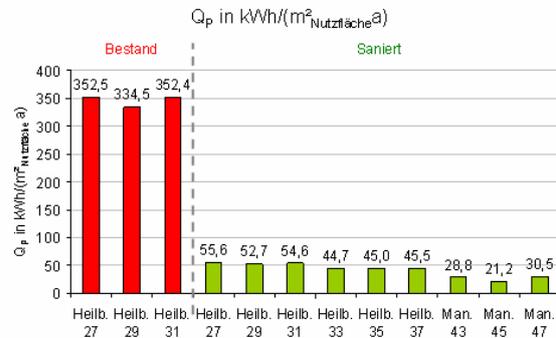


Abbildung 8 Gegenüberstellung des Primärenergiebedarfs vor und nach der Sanierung

Für die statischen Berechnungen sind unterschiedlich genaue Berechnungsmöglichkeiten erlaubt. So kann zum Beispiel der Wärmebrückenverlustkoeffizient mit einem Standardwert aus der Norm angenommen werden oder es wird jede einzelne Wärmebrücke des Gebäudes in seiner Länge mit dem entsprechenden Faktor durch dynamische Berechnungen ermittelt. Die Norm gibt feste Werte für den Temperaturkorrekturfaktor f_x vor, bei Kenntnis der vorherrschenden Temperaturen in dem Gebäude, speziell in den unbeheizten Bereichen, kann auch dieser Faktor für die vorhandene Situation berechnet werden. Abbildung 9 stellt die Berechnung mit normativen Werten der Berechnung mit detailliert ermittelten Werten gegenüber. Hier ist eine Einsparung ohne baukonstruktiven und anlagentechnischen Eingriff erkennbar.

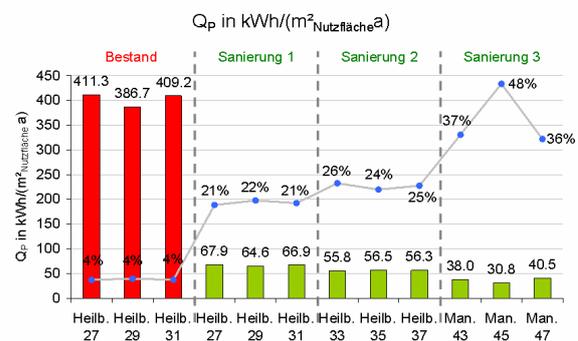


Abbildung 9 Gegenüberstellung des Primärenergiebedarfs mit unterschiedlicher Berechnungstiefe

DYNAMISCHE BERECHNUNGEN

Die dynamische Gebäude- und Anlagensimulation wird mit Hilfe von Modelica durchgeführt. Die Pro-

grammiersprache Modelica ist für die Beschreibung physikalischer Modelle entwickelt worden und bietet über die Entwicklungsumgebung der Dymola eine grafische Benutzeroberfläche. Aus Teilmodellen können in der Sprache Modelica die Gebäudestruktur und die vorhandene Anlagentechnik zusammengesetzt werden. Das den geplanten Simulationen zugrunde liegende Wohnungsmodell (Abbildung 10) besitzt einen Luftknoten mit homogener Temperaturverteilung. Wandmodelle mit eindimensionaler Diskretisierung sowie Fenster- und Türmodelle bilden die Umschließungsflächen der Räume. In den Wänden werden Wärmeleitung und -speicherung bei konstanten Stoffwerten berücksichtigt. Der Strahlungsaustausch der Raumbooberflächen erfolgt gewichtet entsprechend dem Flächenanteil (Zwei-Stern-Modell). Über die Außenflächen erfolgt eine Kopplung mit einem Wettermodell, welches seine Daten aus dem Testreferenzjahr bezieht. Es werden Informationen zu Lufttemperatur, Sonneneinstrahlung und Windgeschwindigkeit übertragen.

Modelica verfolgt eine strikte Objektorientierung. Die Objektorientierung ermöglicht es, Modelle verknüpfen, wieder verwenden und austauschen zu können. Es ergibt sich eine Strukturierung und Übersichtlichkeit des Berechnungsmodells sowie die Möglichkeit, Modellbausteine bei Bedarf zu erweitern oder zu vereinfachen. Das Raummodell kann so um die unterschiedlichen Varianten der Anlagentechnik erweitert werden.

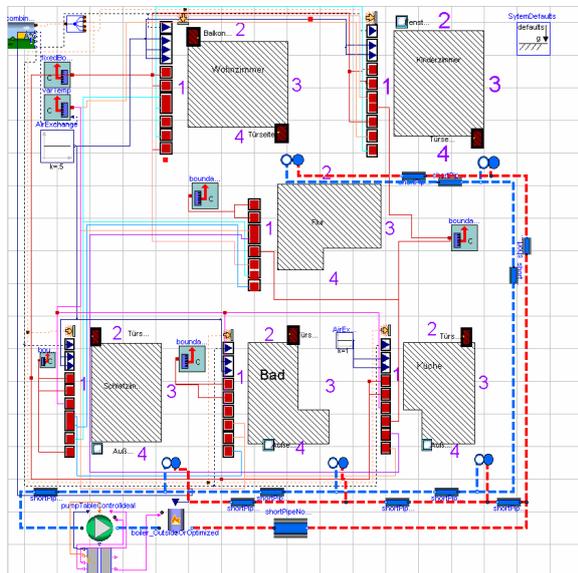


Abbildung 10 Modell der Wohnung in der Benutzeroberfläche Dymola

MESSTECHNISCHE UNTERSUCHUNG

Die Messgrößen wurden so ausgewählt, dass der Einfluss der baukonstruktiven und anlagentechnischen Komponenten auf den Energiebedarf und den Raumkomfort ermittelt werden kann. Zudem wird eine Gegenüberstellung mit den Ergebnissen der

dynamischen Berechnung erfolgen. Die Erfassung der Raumklimadaten in den Wohnräumen erfolgt über ein an der Hochschule Karlsruhe entwickeltes Bussystem (M2-Bus), mit dem die Daten der einzelnen Wohnungen erfasst werden. Von einem zentralen PC mit M2-Buskopplern verlaufen die Leitungen über aktive Busweichen sternförmig zu den einzelnen Wohnungen. Die Topologie des Bussystems ist in Abbildung 11 gezeigt.

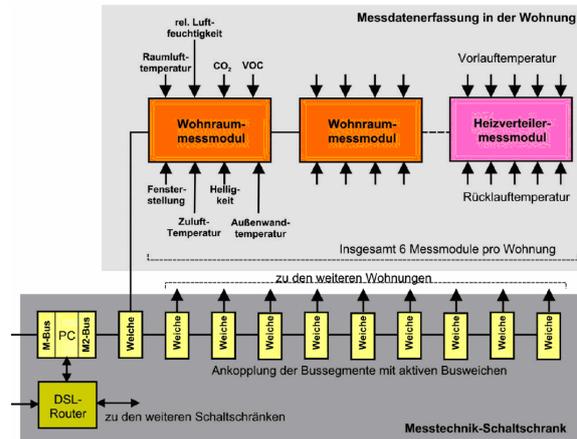


Abbildung 11 Überblick über die Topologie des Messsystems

Die Datenerfassung erfolgt durch jeweils einen Messrechner pro Hauseingang, wobei die Daten tageweise abgelegt werden. Zur Auswertung werden die Rohdaten in physikalische Daten umgerechnet, wobei die Kennlinien der eingesetzten Sensoren laut jeweiligen Herstellerangaben herangezogen werden. Jedes Messmodul ist durch die Angabe der Gebäudenummer und der Messmoduladresse eindeutig identifizierbar. Die in den Wohnräumen eingesetzten Messmodule ermöglichen die Messung einer Vielzahl von Messgrößen, die in Abbildung 12 aufgeführt sind. Allerdings sind nicht in jedem Raum Sensoren für alle aufgeführten Größen aufgeschaltet. Folgende Sensoren können am Kombimodul angeschlossen werden und geben entsprechende Daten aus:

- CO₂-Sensor: Senseair, Typ K30, Messbereich 0 - 5000 ppm, Absolutwert, Infrarot-Absorptionsmessung
- VOC-Sensor: Applied Sensor, Typ IAQ 2000, Messbereich 0 - 2000
- Helligkeitssensor: Hersteller TAOS, Typ TSL2560, Messbereich 0 - 1000 lux, zweikanalige Messung vis-IR, ermöglicht Abschätzung der Farbtemperatur
- Temperatursensor analog, NTC-Thermistor: Epcos, Typ B57863-S-103-F40, Messbereich -50°C ... 120°C

- Temperatur-/Feuchtesensor digital: Sensirion, Typ SHT75, Messbereich -40°C ... 120°C , 0% ... 100% rel. Feuchte
- Fensterkontaktschalter: Magnetkontakt, bei geschlossenem Fenster Wert 0, bei geöffnetem Fenster Wert 10

Messgröße	Einheit	Kürzel	Bemerkung
Kohlendioxidgehalt	ppm	CO2	
flüchtige organische Kohlenwasserstoffe	a. u.	VOC	
Raumlufttemperatur	$^{\circ}\text{C}$	RLT	
relative Luftfeuchtigkeit	%	RLF	
Beleuchtungsstärke	lux	LUX	
Verhältnis sichtbares Licht zu Infrarotanteil	a. u.	vis/IR	
Temperatur Zuluftsensor vor Sensorbeheizung	$^{\circ}\text{C}$	ZLT_VHZ	nicht in BAD, KUE
Fensterkontakt Fenster 1		FKT_FE1	
Fensterkontakt Fenster 2		FKT_FE2	nur in SLZ und KIZ
Wandtemperatursensor unter Dämmung	$^{\circ}\text{C}$	WTI	falls vorhanden
Wandtemperatursensor auf Dämmung	$^{\circ}\text{C}$	WTA	falls vorhanden
Temperatur Zuluft nach Sensorbeheizung	$^{\circ}\text{C}$	ZLT_NHZ	nicht in BAD, KUE
Aufheizzeit Zuluftsensor	a. u.	ZLT_HZZ	nicht in BAD, KUE

Abbildung 12 Mit Kombimesmodul (Pilzgehäuse) erfassbare Größen

Für die Erfassung der Heizungsvorlauf- und Rücklauftemperaturen werden in den Hauseingängen Heilbronner Str. 33 + 35 analoge Temperatursensoren eingesetzt, im Hauseingang Heilbronner Str. 37 werden hingegen digitale Präzisionsfühler verwendet. Der in der Zuluftöffnung der Fenster eingebaute NTC-Thermistor wird zyklisch beheizt. Gemessen werden jeweils die Temperatur vor dem Beheizen, die Temperatur unmittelbar nach Beendigung der Heizphase, sowie die benötigte Zeitspanne der Heizphase. Aus Sicherheitsgründen ist die Heizzeit begrenzt. Da die Umströmungsverhältnisse des Sensors je nach Einbausituation von Fenster zu Fenster variieren können, sind Streuungen der Messwerte zu erwarten.

Die zweikanalige Erfassung der Helligkeit mit Maxima der Empfindlichkeit bei 650 nm (sichtbares Licht – vis) und 800 nm (Infrarot – IR) ermöglicht einerseits die Berechnung der Beleuchtungsstärke in lux. Andererseits lässt sich durch Auswertung des Verhältnisses von sichtbarer zu infraroter Strahlung die Farbtemperatur und damit die Art der Lichtquelle ermitteln. Aus den bisherigen Messungen ergibt sich für Sonnenlicht ein Quotient vis/IR zwischen 1 und 2. Bei Beleuchtung mit Leuchtstoffröhren ist der Quotient deutlich größer als 2, bei konventionellen Glühlampen ergibt sich ein Quotient deutlich kleiner als 1. Beispielhaft ist in Abbildung 13 der Tagesgang der Sensoren im Hauseingang Heilbronner Str. 35, Wohnzimmer Erdgeschoss rechts dargestellt. Sehr gut ist die Variation der Beleuchtungsstärke zwischen Sonnenaufgang und Sonnenuntergang zu sehen. Der Quotient vis/IR bleibt während der Stunden mit Tageslicht im Bereich zwischen 1,0 und 1,5. Die Raumlufttemperatur RLT ist mit mehr als 30°C extrem hoch, die relative Luftfeuchtigkeit entsprechend niedrig im Bereich 10 % rel. Feuchte. Fenster wurden nicht geöffnet, die Signale der Fensterkontakte sind konstant.

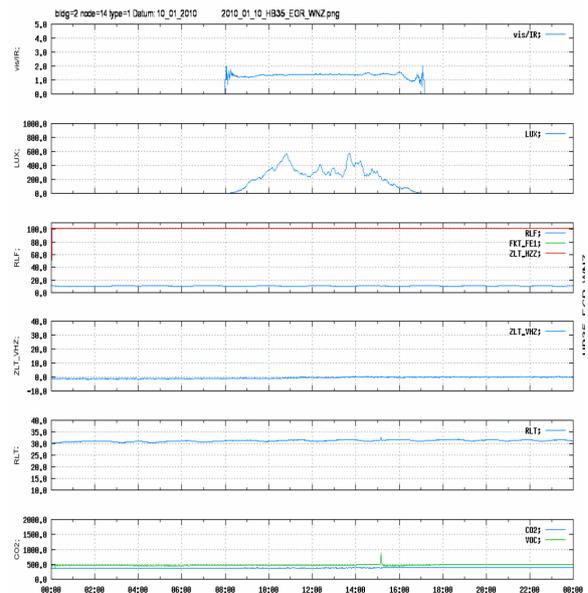


Abbildung 13 Tagesgang der Messwerte am Kombimodul im Wohnzimmer EG Heilbr. Str. 35

ZUSAMMENFASSUNG

Eine gut geplante und durchgeführte Sanierung von Wohngebäuden im Bestand kann bis zu 90% Primärenergieeinsparung erzielen. Bereits die Standardisierung mit 14 cm Dämmung und Anschluss an die Fernwärme, erzielt eine Primärenergieeinsparung von ungefähr 84%. Obgleich alle Resultate, die hier dargestellt werden, unter Verwendung der ausführlichen Berechnungsmöglichkeiten erzielt wurden, die von der EnEV zugelassen werden, konnten die Resultate mit einer ausführlichen Berechnung sämtlicher Wärmebrücken nach der Finite-Element-Methode weiter verbessert werden. Nach einem ersten Meßzyklus bleibt abzuwarten, ob die berechneten Einsparungen erzielt werden können und sämtliche Anlagenkomponenten zufriedenstellend arbeiten.

DANKSAGUNG

Wir danken dem BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie) für die finanzielle Unterstützung, Förderkennzeichen 0327400G.

LITERATUR

1. Energy efficiency policy recommendation, 2008, International Energy Agency, IEA.
2. Energy and Environment Report, EEA, 2008. Hensen J. 2003. Paper Preparation Guide and Submission Instruction for Building Simulation 2003 Conference, Eindhoven The Netherlands.

DAS KLIMA ALS ENTWURFSFAKTOR: SIMULATIONEN IM ARCHITEKTONISCHEN ENTWURF

Urs-Peter Menti, Iwan Plüss, Serge Mattli, Christian Hönger
Hochschule Luzern - Technik & Architektur
Technikumstrasse 21, CH-6048 Horw, Switzerland
Kontakt: urs-peter.menti@hslu.ch

KURZFASSUNG

Bereits im architektonischen Entwurf werden energiebedarfsrelevante Entscheide gefällt. Heute wird die energetische Qualität eines Entwurfs meist aufgrund des zu erwartenden Heizwärmebedarfs beurteilt. Entsprechend werden kompakte Gebäude mit sehr guter Dämmung der Gebäudehülle bevorzugt. Im Dienstleistungsbau, aber immer mehr auch im Wohnbau wird der Anteil des Heizwärmebedarfs am Gesamtenergiebedarf (für Heizen, Kühlen und Beleuchtung) immer geringer. Deshalb sollte der Entwurf aufgrund einer gesamtheitlicheren Energiebetrachtung beurteilt werden.

Anhand von typisierten Wohnbauten werden verschiedene Entwurfsstrategien mit Hilfe von Simulationen auf ihre Gesamtenergieeffizienz (Heizen, Kühlen, Beleuchtung) untersucht. Vor allem bei der Primärenergiebetrachtung wird der Beleuchtungsenergiebedarf dominant, was z.T. zu neuen Erkenntnissen betreffend Entwurfsstrategien führt. Kompaktes Bauen ist plötzlich nicht mehr der einzige Schlüssel zur Energieeffizienz.

ABSTRACT

Important decisions regarding energy conservation are already made during the early concept phase of an architectural design. Today, energy performance of a design is mainly based on energy demand for heating. Therefore, compact buildings with high thermal insulation are preferred. But the heating energy as portion of the total energy consumption (heating, cooling, lighting) in commercial buildings, and recently also in residential buildings, gets smaller. For this reason, the energy performance must be assessed for the entire system.

Typical case-study residential buildings with different design strategies are investigated by computer simulation regarding their overall energy efficiency (heating, cooling, lighting). It is found that the primary energy demand for lighting becomes dominant. This leads to important new insight for energy design strategies. It appears that compact design and insulation are no longer the sole key to energy efficiency.

EINLEITUNG

Immer mehr Gebäude werden den Anforderungen der 2000 Watt-Gesellschaft [1] entsprechend gebaut. Bei der 2000 Watt-Gesellschaft soll der Primärenergiebedarf pro Erdenbewohner auf einen Wert von 17'520 kWh/a reduziert werden, was einer durchschnittlichen Leistung von 2000 Watt entspricht. 500 Watt dürfen dabei aus nicht erneuerbaren Energiequellen stammen (dies entspricht einer Tonne CO₂-Emission pro Person und Jahr), die restlichen 1500 Watt müssen aus erneuerbaren Energiequellen stammen.

Bei der 2000 Watt-Gesellschaft geht es um eine Gesamtbetrachtung welche sämtliche Energieverbräuche auf Stufe Primärenergie umfasst. Neben dem Betriebsenergieverbrauch im Gebäudebereich werden auch die Graue Energie (Erstellungsenergie), die Mobilität und der ganze Industriebereich (Konsum) berücksichtigt.

Aufs Gebäude bezogen, bedingt die konsequente Umsetzung der 2000 Watt-Gesellschaft eine Gesamtenergiebetrachtung, wie sie z.B. im Effizienzpfad Energie des SIA [2] gemacht wird. Konzepte wie Minergie, Minergie-P [3] oder das Passivhaus greifen da zu wenig, auch wenn davon ausgegangen werden kann, dass nach Minergie-P oder Passivhaus gebaute Gebäude im Wesentlichen den Anforderungen der 2000 Watt-Gesellschaft entsprechen (was den Betriebsenergiebedarf der Gebäude betrifft).

FRAGESTELLUNG

In der hier vorgestellten Studie wird ausgehend von dieser Forderung nach einer gesamtheitlichen Betrachtung untersucht, welche Entwurfsstrategien sich bei Wohnbauten aufdrängen. Berücksichtigt wird dabei der Energiebedarf für die Raumwärme, die Klimakälte und die Beleuchtung. Vereinzelt wird auch die Graue Energie bilanziert (dies ist jedoch nicht Bestandteil dieses Papers). Ein Klimakältebedarf entsteht, weil die Wohnungen als gekühlt angenommen werden, um in den verschiedenen Varianten vergleichbare Zustände betreffend thermischer Behaglichkeit zu gewährleisten. Ein tiefer Kühlenergiebedarf ist somit primär ein Indikator für eine hohe Behaglichkeit ohne Kühlung.

Untersucht werden insgesamt 116 Varianten, thematisch gegliedert in Rubriken wie Höhenlage, Orientierung, Volumetrie, Typologie, Materialisierung etc.

GRUNDLAGEN

Die Untersuchungen werden anhand eines synthetischen Mehrfamilienhauses mit 8 Wohneinheiten, verteilt auf 4 Etagen (Zweispänner) und jeweils 100 m² Wohnfläche durchgeführt. Dieser Gebäudetyp ist in der Schweiz sehr häufig anzutreffen. Die Gebäudeabmessungen betragen 20m x 10m x 12m (L x B x H). Die Nutzung entspricht der im Merkblatt SIA 2024 [4] definierten Standardnutzung für Wohnbauten. Der gleichen Quelle entnommen werden auch die erforderlichen Beleuchtungsstärken und Raumlufttemperaturen. Die Räume werden so beheizt und gekühlt, dass die Raumlufttemperaturen immer innerhalb von 20.0°C und 26.5°C liegen.

Die Umrechnung vom mit Simulationen bestimmten Nutzenergiebedarf in Endenergie sowie von der Endenergie in Primärenergie erfolgt mit folgenden Nutzungsgraden, Jahresarbeitszahlen und Primärenergiefaktoren:

- Kälteerzeugung mit Jahresarbeitszahl 2.5 (konventionelle Kältemaschine mit Luftkondensator)
- Wärmeerzeugung mit Jahresarbeitszahl 2.8 (Wärmepumpe Luft/Wasser)
- Primärenergiefaktoren:
 Heizenergie: 1.71
 elektrische Energie: 2.97

Diese Faktoren stammen aus dem Merkblatt SIA SIA 2031 „Energieausweis für Gebäude“ [5]. Die Berechnungen der Grauen Energie basieren auf Angaben aus dem SIA Merkblatt 2032 „Graue Energie“ [6].

Die ausführlichen Grundlagen (und Ergebnisse) der Studie sind im Buch „Das Klima als Entwurfsmittel“ veröffentlicht [7].

SIMULATIONEN

Die Simulationen werden mit dem Programm IDA Klima und Energie von Equa SA durchgeführt [8]. Berechnet wird jeweils der Jahresenergiebedarf in Stundenschritten.

Für die Simulationen müssen Vereinfachungen getroffen werden, welche bei der Interpretation der Ergebnisse unbedingt berücksichtigt werden müssen. Weil zum Beispiel die ganze Wohneinheit als eine Zone modelliert wurde (und nicht die einzelnen Zimmer), hat die Veränderung der Orientierung (Süd- bzw. Nordausrichtung der Wohnung) kaum einen Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf, weil jede Wohneinheit immer Aussenfassaden in drei Himmelsrichtungen hat, ergo auch die tendenziell

nach Norden ausgerichtete Wohnung eine Ost- und eine Westfassade aufweist, was die solaren Gewinne und die Tageslichtnutzung auch in diesem Fall relativ hoch werden lässt.

Ausgehend von der oben beschriebenen Basisvariante werden nach ceteris paribus einzelne Parameter (Volumen, Gebäudeform, Öffnungsverhalten etc.) jeweils variiert und die Auswirkungen auf Stufe Nutzenergie sowie auf Stufe Primärenergie ermittelt.

Gesucht sind Strategien, die zu einem gesamtheitlich optimierten Energiebedarf führen. Nicht berücksichtigt wird der Energiebedarf für die Lüftung und für die (Haushalt-)Geräte, da davon ausgegangen werden kann, dass diese Verbraucher in allen untersuchten Varianten identisch sind. Die konsequenterweise nötige Betrachtung der Grauen Energie wird aus Komplexitätsgründen nur für einzelne, aber nicht alle Varianten durchgeführt.

Die Komplexität der Fragestellung sei anhand der Beurteilung des Nutzens eines Balkons dokumentiert: Ein Balkon verbessert die Beschattung der Fassade im Sommer und reduziert so den Kühlbedarf – gleichzeitig reduziert er aber die solaren Gewinne im Winter woraus ein höherer Heizbedarf resultiert. Weiter reduziert ein Balkon die Tageslichtnutzung, was einen höheren Kunstlichtbedarf zur Folge hat und er verursacht einen Mehraufwand bei der Grauen Energie. Ist nun ein Balkon gesamtenergetisch von Vorteil oder nicht? Das Gebäude wird für die Beantwortung dieser Frage zum komplexen System voller Wechselwirkungen, die nur noch mit Hilfe von Simulationen genügend genau erfasst und abgebildet werden können. Heutige Simulationsinstrumente sind in der Lage, alle Formen der Betriebsenergie zu erfassen und die entsprechenden Randbedingungen auf eine definierte Grösse – z.B. wie hier den Gesamtenergiebedarf – zu optimieren. Eine integrale Optimierung inklusive Grauer Energie ist heute aber noch nicht möglich.

ERGEBNISSE

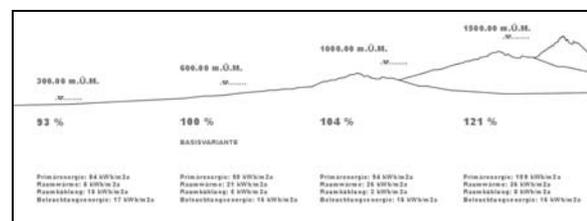


Abb. 1: Einfluss Höhenlage auf den Gesamtenergiebedarf

Mit der Höhenlage des Objektes in m.ü.M. verändern sich die klimatischen Aussenbedingungen. Gerechnete Standorte sind: Basel (300 m.ü.M.), Zürich SMA

(600 m.ü.M.), Davos (1000 m.ü.M.), Engelberg (1500 m.ü.M.).

Der Energiebedarf Beleuchtung verändert sich den Erwartungen entsprechend nur unwesentlich. Der Bedarf für die Raumkühlung nimmt mit höherer Lage massiv ab, der Heizenergiebedarf nimmt entsprechend zu und dominiert. Aufgrund der Dominanz der Zunahme beim Heizwärmebedarf mit zunehmender Höhe über Meer, sind Objekte in tiefer Höhenlage energieeffizienter als Objekte in der Höhe – auch bei einer Primärenergiebetrachtung. Dieser Parameter ist jedoch – im Gegensatz zu den nachfolgend untersuchten Parametern – nie beeinflussbar.

Ein meist beeinflussbarer Parameter ist die Gebäudekompaktheit. Untersucht werden ein Einfamilienhaus, ein 8-Familienhaus (Basisvariante), sowie ein 24-, ein 40- und ein 80-Familienhaus. Diese Gebäude weisen alle eine zunehmende Kompaktheit auf, was sich durch einen tieferen Wert beim Verhältnis zwischen Gebäudehüllfläche und Gebäudevolumen ausdrückt.

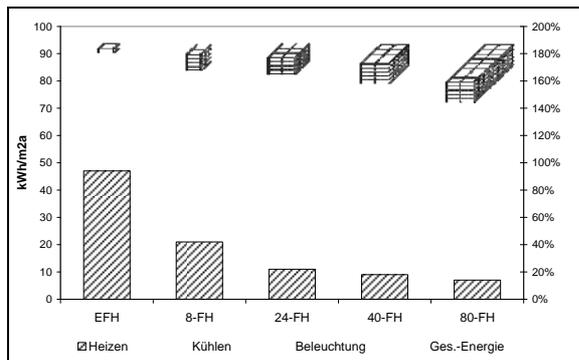


Abb. 2: Heizwärmebedarf (Stufe Nutzenergie) für verschieden kompakte Gebäude

Abbildung 2 zeigt den Heizwärmebedarf auf Stufe Nutzenergie für die verschiedenen Gebäude. Erwartungsgemäss reduziert sich dieser mit zunehmender Kompaktheit. Das Einfamilienhaus weist einen vergleichsweise hohen spezifischen Heizwärmebedarf auf.

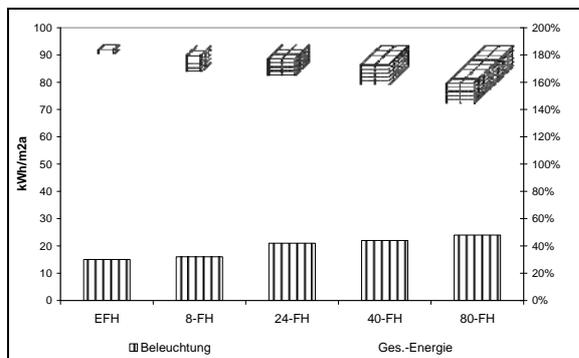


Abb. 3: Beleuchtungsenergiebedarf (Stufe Nutzenergie) für verschieden kompakte Gebäude

Der Beleuchtungsenergiebedarf (Abbildung 3) nimmt mit zunehmender Kompaktheit leicht zu. Die Kompaktheit reduziert die durchschnittliche Anzahl Aussenflächen pro Wohneinheit und vermindert somit die Tageslichtnutzung. Oft führt eine höhere Kompaktheit auch zu höheren Raumtiefen, was die Tageslichtnutzung ebenfalls reduziert. Dies wurde hier aber nicht explizit untersucht.

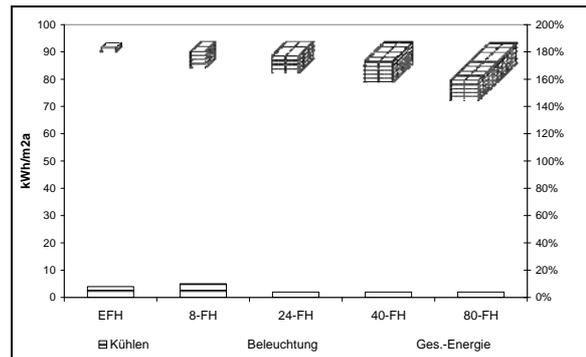


Abb. 4: Klimakältebedarf (Stufe Nutzenergie) für verschieden kompakte Gebäude

Der Kühlenergiebedarf ist für alle Varianten vergleichsweise gering. Vor allem die sehr kompakten Gebäude weisen hier (aufgrund der geringeren Aussenfläche pro Raumvolumeneinheit) etwas tiefere Werte auf.

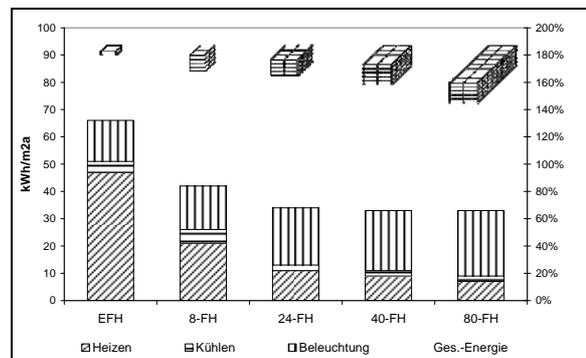


Abb. 5: Gesamtenergiebedarf für Raumwärme, Klimakälte und Beleuchtung (Stufe Nutzenergie) für verschieden kompakte Gebäude

Addiert man den Nutzenergiebedarf für Raumwärme, Klimakälte und Beleuchtung sieht man, dass nicht kompakte Gebäude (Einfamilienhaus, 8-Familienhaus) einen relativ hohen Energiebedarf aufweisen, während kompakte Gebäude einen konstant tiefen Energiebedarf haben (Abbildung 5). Zwischen dem Energiebedarf des Einfamilienhauses und dem Energiebedarf es 24- bis 80-Familienhauses liegt der Faktor 2.

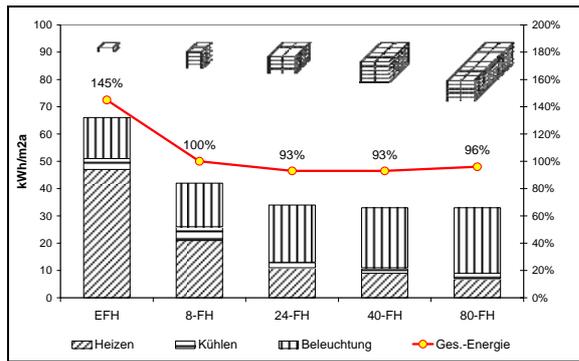


Abb. 6: Gesamtenergiebedarf für Raumwärme, Klimakälte und Beleuchtung (Stufe Nutzenergie, Darstellung in Balken; Stufe Primärenergie, Darstellung in % als Kurve) für verschieden kompakte Gebäude

Rechnet man den Nutzenergiebedarf in den Primärenergiebedarf um, verschieben sich die Anteile. Das Einfamilienhaus ist nach wie vor das am wenigsten energieeffiziente Gebäude. Neu schneidet das sehr kompakte 80-Familienhaus gegenüber dem 24- oder 40-Familienhaus aber leicht schlechter ab, weil beim 80-Familienhaus ein vergleichsweise hoher Beleuchtungsenergiebedarf resultiert, der durch den leicht geringeren Heizwärmebedarf nicht kompensiert werden kann. Ab einer gewissen Grösse ist also die Zunahme des Beleuchtungsenergiebedarfs gegenüber der Abnahme des Heizenergiebedarfs mindestens auf Stufe Primärenergie überproportional.

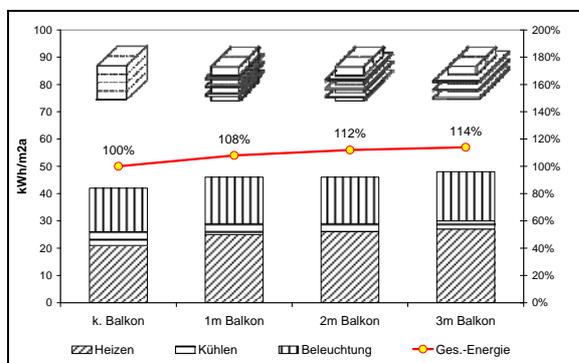


Abb. 7: Gesamtenergiebedarf für Raumwärme, Klimakälte und Beleuchtung (Stufe Nutzenergie, Darstellung in Balken; Stufe Primärenergie, Darstellung in % als Kurve) für Gebäude mit verschieden tiefen Balkonen

Untersucht wurde auch der Einfluss eines umlaufenden Balkons von 1m, 2m bzw. 3m Tiefe (siehe Abbildung 7).

Die Beschattung durch den Balkon reduziert den Kühlenergiebedarf und erhöht den Heizenergie- sowie den Beleuchtungsenergiebedarf. Der Gesamtenergiebedarf auf Stufe Primärenergie nimmt mit zunehmender Balkontiefe zu. Die Reduktion beim

Kühlenergiebedarf dank der Beschattung wird durch den zunehmenden Heizenergiebedarf und den zunehmenden Beleuchtungsenergiebedarf mehr als kompensiert, die Energieeffizienz nimmt mit zunehmendem Balkon ab. Dies bestätigt die bekannte Erkenntnis, dass für eine hohe Energieeffizienz Beschattungssysteme variabel sein sollen bzw. Balkone allenfalls versetzt zu den transparenten Wandbereichen angeordnet werden sollen.

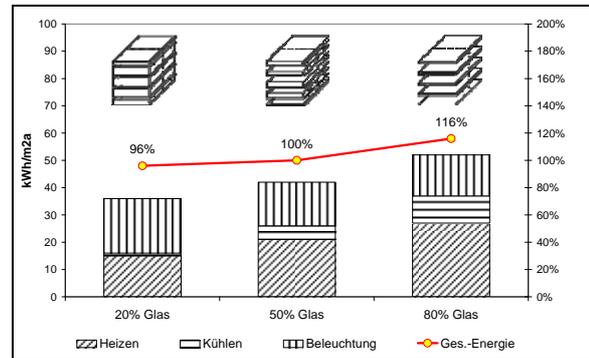


Abb. 8: Gesamtenergiebedarf für Raumwärme, Klimakälte und Beleuchtung (Stufe Nutzenergie, Darstellung in Balken; Stufe Primärenergie, Darstellung in % als Kurve) für Gebäude mit verschieden hohen Glasanteilen in der Fassade

Der Glasanteil in der Fassade wird zwischen 20% und 80% variiert. Die Basisvariante ist mit umlaufendem Öffnungsanteil von 50% simuliert.

Die Vergrößerung des Glasanteils von 20% auf 50% und auf 80% erhöht sowohl den Heiz- als auch den Kühlenergiebedarf kontinuierlich. Gleichzeitig nimmt der Beleuchtungsenergiebedarf ab, von 20% auf 50% Öffnungsanteil deutlich stärker als von 50% auf 80%. Gesamthaft ist die Veränderung beim Heiz- und vor allem beim Kühlenergiebedarf dominierend. Der hohe Primärenergiefaktor für Elektrizität verstärkt in der Gesamtbetrachtung vor allem den Anteil der Beleuchtungsenergie. Schlussendlich dominiert der erhöhte Heiz- und Kühlenergiebedarf bei hohem Glasanteil. Für eine gute Tageslichtnutzung ist ein Glasanteil von 50% wichtig, durch eine zusätzliche Erhöhung des Glasanteils kann die Tageslichtnutzung kaum mehr verbessert werden. Die Zunahme der Grauen Energie mit wachsendem Glasanteil verstärkt die energetische Ineffizienz solcher Fassaden zusätzlich.

Während die Basisvariante gleich grosse Fassadenflächen nach Nord und Süd hat, wird in der nächsten Variation der Gebäudegrundriss so verändert, dass einmal die Fassadenfläche nach Norden und einmal die Fassadenfläche nach Süden überproportional gross wird. Damit wird versucht, eine Gebäudeform mit verbesserter passiv-solarer Energienutzung sowie

mit besserer Tageslichtnutzung zu generieren. Die Ergebnisse sind in Abbildung 9 dargestellt.

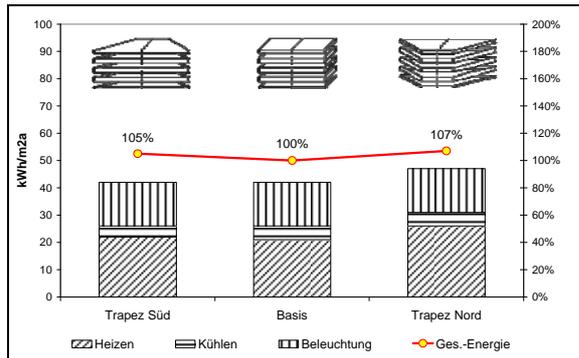


Abb. 9: Gesamtenergiebedarf für Raumwärme, Klimakälte und Beleuchtung (Stufe Nutzenergie, Darstellung in Balken; Stufe Primärenergie, Darstellung in % als Kurve) für Gebäude mit unterschiedlichen Grundrissen

Der Energieverbrauch für die Beleuchtung bleibt unverändert, beim Kühlenergieverbrauch sind nur marginale Veränderungen zu erkennen. Mit der Verformung nimmt der Heizenergiebedarf merklich zu, vor allem bei schrumpfender Süd- und wachsender Nordfassade – entsprechend verhält sich der Primärenergiebedarf. Die Verformung verbessert bei dieser Typologie die Situation betreffend passiv-solarer Gewinne nicht merklich. Mehr Südfassade hat zur Folge, dass die Ost- und Westfassaden zu Nordost- und Nordwestfassaden werden. Eine Vergrößerung der gewinnarmen Nordfassade wird kompensiert, indem die Ost- und Westfassaden zu gewinnträchtigeren Südost- und Südwestfassaden werden. Die grössere Abwicklung erhöht jedoch den Heizenergiebedarf. Die Stabilität beim Beleuchtungsenergiebedarf bestätigt, dass im Wohnbau die Tageslichtnutzung unabhängig von der Hauptausrichtung meist genügend gross ist.

DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Bei der Beurteilung und Umsetzung der Ergebnisse ist zu beachten, dass diese kaum Allgemeingültigkeit haben können. Vielmehr zeigt diese Studie aber, dass eine gesamtheitliche Betrachtung unumgänglich ist und teilweise zu neuen Lösungsansätzen führen kann. Gesamtheitliche Betrachtungen und die Betrachtung des Gebäudes als System sind jedoch komplex, was den Einsatz von Simulationen als Hilfsmittel sehr empfiehlt.

Während die Studie einige Erfahrungen bestätigen konnte, zeigen sich aber auch überraschende Ergebnisse, so z.B. dass eine hohe Kompaktheit nicht immer Ziel führend ist oder dass Verformungen mit einem nach Süden ausgerichteten Grundriss aus gesamtenergetischer Sicht nicht unbedingt optimal sein müssen. Grundsätzlich zeigt sich, dass für unse-

re Breitengrade tendenziell Strategien zur Verlustminimierung eher zum Ziel führen als Strategien zur Gewinnmaximierung, auch wenn hier eine Ausgewogenheit zwischen beiden Ansätzen wohl immer am erfolgsversprechendsten ist.

Offensichtlich wird aber auch, dass für eine wirklich gesamtheitliche Beurteilung zwingend auch die Graue Energie als wesentliche Komponente des Gesamtenergiebedarfs mitberücksichtigt werden muss.

Offen bleibt auch die Frage, welche Aussagen beim gleichen Untersuchungsdesign aber für Dienstleistungs- oder Schulbauten resultieren würden. Aufgrund der deutlich höheren internen Lasten ist davon auszugehen, dass der Heizwärmebedarf noch mehr an Bedeutung verliert, gleichzeitig aber der Kühlenergie- und Beleuchtungsenergiebedarf weiter an Bedeutung gewinnt. In diesem Fall wirkt sich eine hohe Kompaktheit noch negativer aus als im Wohnbau. Entsprechende Untersuchungen werden zurzeit von der Hochschule Luzern durchgeführt.

Interessant ist auch eine grundsätzliche Diskussion über den Einsatz von Simulationen im architektonischen Entwurf. Die Autoren der Studie sind überzeugt, dass mit Hilfe der Simulation archaische Lösungen mit architektonischem Anspruch und kultureller Relevanz schon in einer frühen Phase in ihrer Energieeffizienz beurteilt werden können. Der entwerferische Weg dazu entspricht damit weniger dem Mythos einer rein empirisch-genialen Formsuche des Architekten, sondern einer interdisziplinären, wissenschaftlich unterstützten Methodik. Verschiedene alternative Entwurfsstudien können in der frühesten Entwicklungsstufe beurteilt, verglichen und im Sinne einer beschleunigten evolutionären Selektion nach dem Ausscheidprinzip optimiert werden. Technologie wird damit nicht nachträglich eingebaut, um die Architektur funktionsfähig zu machen, sondern wird früh ins Erbgut des Entwurfes und der Architektur integriert.

BETEILIGTE

Zentrum für Integrale Gebäudetechnik; Kompetenzzentrum Material, Struktur, Energie (beide Hochschule Luzern – Technik & Architektur)

LITERATUR

- [1] Novatlantis: www.novatlantis.ch
- [2] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein; SIA Effizienzpfad Energie; 2006 (zurzeit in Überarbeitung)
- [3] Minergie: www.minergie.ch
- [4] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein; SIA Merkblatt 2024: Standard-Nutzungs-

bedingungen für die Energie- und Gebäudetechnik; 2006

- [5] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein; SIA Merkblatt 2031: Energieausweis für Gebäude; 2009
- [6] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein; SIA Merkblatt 2032: Graue Energie – Merkblatt für Planer; 2010
- [7] Christian Hönger, Christoph Wieser, Roman Brunner, Urs-Peter Menti; Das Klima als Entwurfsmittel; Quart-Verlag, Luzern; 2009

NEUE MONTE-ROSA-HÜTTE: SIMULATIONEN FÜR EINE ENERGIEAUTARKE ALPENHÜTTE

Urs-Peter Menti¹, Iwan Plüss¹, Matthias Sulzer²
¹Hochschule Luzern – Technik & Architektur
 Technikumstrasse 21, CH-6048 Horw, Switzerland
 Kontakt: urs-peter.menti@hslu.ch
²Lauber IWISA, Naters, Switzerland

KURZFASSUNG

Die Neue Monte-Rosa-Hütte soll in der Jahresbilanz zu 90% energieautark sein. In der Konzeption wird weniger auf Experimente und Highend-Technologie gesetzt sondern auf bewährte Komponenten, welche aber intelligent kombiniert werden. Für die Dimensionierung der Komponenten, aber auch für die Modellierung des Systemverhaltens wurden Simulationen eingesetzt. Die Simulationen dienen einer hohen Planungssicherheit zur Erreichung der ambitionierten Ziele.

Nach Inbetriebnahme der Hütte (Frühjahr 2010) hat eine zweite Forschungsphase begonnen: Mit einer vorausschauenden Regelung (model predictive control) soll die Energieeffizienz weiter erhöht werden. Die entwickelten Regelstrategien werden vorerst mittels Simulationen getestet, bevor sie ins Energiemanagement der Hütte implementiert werden.

ABSTRACT

The new Monte Rosa Hut fulfills not only aesthetic demands, it is expected to reach a 90 percent self-sufficiency in energy. The way to reach this aim consists not of experiments or high-end components: it's the intelligent combination of all the subsystems into a fully integrated system. Simulations are not only used to dimension the components, they are also used to optimize the interaction of all elements of the system. The simulations provide accurate predictions of performance and hence permit to achieve the ambitious goals.

Energy management plays an important part in achieving a high degree of self-sufficiency. Optimized energy management employs technology that is conventional and tried and tested, such as the smart integration of all components into a complex overall system, resulting in a high energy efficiency. For instance, data such as weather forecast and expected visitor numbers will be fed into the energy management system for model predictive control. In other words, dynamic boundary conditions will be taken into account. Before implemented in the energy management system, newly developed strategies are tested by simulation.

EINLEITUNG

Die Neue Monte-Rosa-Hütte steht quasi auf einer Insel: Sie ist nur zu Fuss, auf Skiern oder per Helikopter erreichbar. Eine Anbindung an eine Energieversorgung ist ebenso wenig vorhanden wie der Anschluss an ein Wasser- oder Abwassernetz. Um die Anzahl der Versorgungsflüge per Helikopter möglichst gering zu halten, wird betreffend Wasser- und Energiehaushalt eine hohe Autarkie von 90% (ohne Kochen; mit Kochen: 60-70%) angestrebt. Dies bedeutet, dass nur 10% des Energiebedarfs mit dem Helikopter eingeflogen werden sollen.

Diese „Insel-situation“ hat aber noch eine weitere Konsequenz: Es ist nicht opportun, an diesem Standort neue Komponenten und Geräte zu erforschen oder noch nicht ausgereifte Spitzentechnologie einzusetzen, was beides mit einem hohen Betreuungsaufwand verbunden wäre. Gesucht sind zwar effiziente, aber gleichermassen robuste sowie zuverlässige Komponenten. Massgebend ist deshalb vielmehr die optimale Einbindung dieser Komponenten ins System.

FRAGESTELLUNG

Die Gebäudetechnik der Neuen Monte Rosa-Hütte ist zentrales Element bei der Erfüllung der hohen Anforderungen. Energieeffiziente Anlagen und Geräte sorgen für einen tiefen Energiebedarf. Aber es stehen weniger die einzelnen Komponenten im Vordergrund, sondern die Optimierung des Gesamtsystems Gebäude. Dabei wird auf bewährte Komponenten gesetzt, Ventile und Pumpen werden möglichst eliminiert, auf ein konventionelles Heizsystem wird verzichtet und Luftverteilkänaäle werden weggelassen. So können die Zielsetzungen primär mit Intelligenz statt mit Technik zuverlässig erreicht werden.

Simulationen sollen bei diesem fein austarierten System eine hohe Planungssicherheit gewährleisten. Die Komponenten (vor allem die Speicher) werden so optimal dimensioniert, um nicht unnötigen Platzbedarf bzw. unnötige Kosten zu generieren. Mit Hilfe von Grenzkostenüberlegungen auf Basis von Simulationsergebnissen sind die richtigen (d.h. wirtschaftlichsten) Massnahmen zu suchen.

KONZEPT

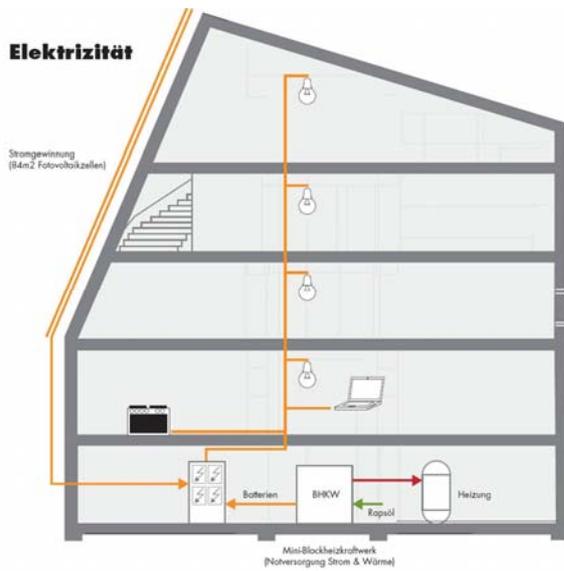


Abb. 2: Konzept Elektrizität (Bild Lauber IWISA)

Mittels der in die Südfassade integrierten Photovoltaikanlage (84 m² aktive Fläche) wird Strom erzeugt und in Batterien gespeichert. Aufgrund der Höhenlage und der Reflexion des umliegenden Schnees ist der Ertrag dieser Anlage bis doppelt so hoch wie im Flachland. Die Elektrizität wird für die Beleuchtung, fürs Kochen und für den Betrieb der verschiedenen Geräte und Anlagen verwendet. Neben dem Kochen ist vor allem die Abwasserreinigungsanlage ein grosser Stromverbraucher. Gekocht wird so oft wie möglich mit Strom – eine Anzeige informiert den Hüttenwart, wann er aufgrund eines zu tiefen Ladezustandes der Batterien auf Gasbetrieb umstellen soll.

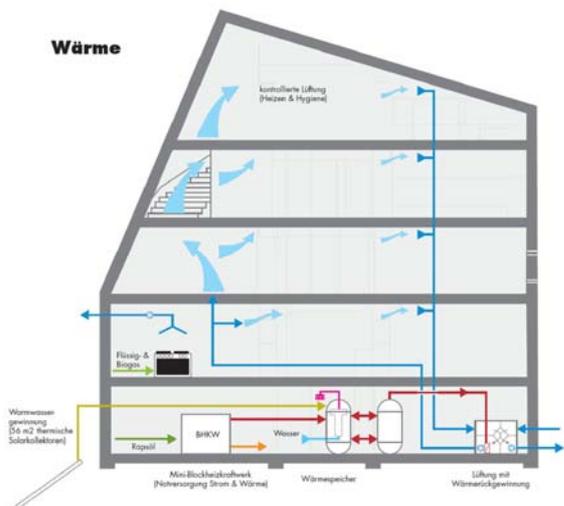


Abb. 3: Konzept Wärmeversorgung (Bild Lauber IWISA)

Unterhalb der Hütte an eine Felswand montierte Solarkollektoren (56 m² aktive Fläche) gewinnen solare Wärme und führen diese den Wärmespeichern zu. Damit wird Warmwasser erzeugt und die Zuluft der Lüftungsanlage erwärmt, um die Räume zu temperieren. Die Lüftung dient gleichzeitig der Wärmeverteilung im Gebäude. Die Zuluft strömt via Treppenhaus in die einzelnen Räume, wird dort abgesogen und zentral über eine WRG (mit Bypass) geführt. Das Warmwasser wird zum Kochen und – falls überschüssige Energie vorhanden ist – für die vier Warmwasserduschen im Gästebereich verwendet.

Aus Sicherheitsgründen und für Perioden mit ungenügendem Energieertrag steht ein mit Rapsöl betriebenes Blockheizkraftwerk zu Verfügung, welches im Bedarfsfall sowohl Wärme als auch Strom produziert.

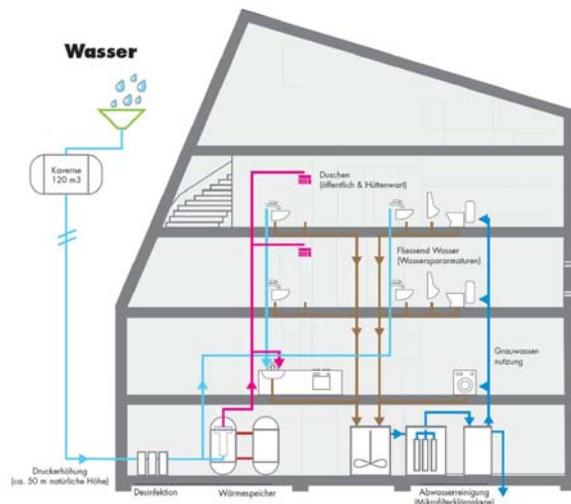


Abb. 4: Konzept Wasser / Abwasser (Bild Lauber IWISA)

Das während wenigen Monaten im Jahr anfallende Schmelzwasser wird gesammelt und in einer Kaverne (200 m³ Bruttovolumen) oberhalb der Hütte gespeichert. Die natürliche Höhendifferenz von 40m zwischen Kaverne und Hütte sorgt für genügenden Wasserdruck so dass keine Druckerhöhungsanlage notwendig ist (Reduktion Energieverbrauch, weniger Technik). Das dank der Kaverne ganzjährig verfügbare Frischwasser wird zum Kochen, Waschen, Putzen und für die Körperhygiene verwendet. Das Abwasser wird in einer Mikrofilteranlage auf bakterieller Basis gereinigt, als Grauwasser für die WC-Spülung und zum Waschen wiederverwendet oder gereinigt an die Umgebung zurück gegeben. Fließendes Wasser und wassergespülte Toiletten sind Annehmlichkeiten, welche sowohl die Gäste wie der Hüttenwart zu schätzen wissen werden.

SIMULATIONEN

Simulationen werden hauptsächlich für folgende fünf Fragestellungen eingesetzt:

- Ermittlung der thermischen Behaglichkeit in einzelnen Räumen
- Dimensionierung der einzelnen Anlagen (insbesondere der Speicher)
- Variantenentscheide unter Berücksichtigung der Grenzkosten (maximale Energieeinsparung bei minimalen Investitionen)
- Ermittlung der Luftqualität im Schlafraum bei unkonventioneller Luftführung
- Testen und optimieren des Energiemanagement-Systems

Die Fragestellungen a) und b) werden mittels konventionellen thermischen Raumsimulationen mit dem Programm „IDA Klima und Energie“ (Version 4.0) beantwortet. Aufgrund der Situation, dass fast jeder Raum unterschiedliche Randbedingungen (Geometrie, Nutzung, etc.) aufweist, ist ein aufwändiges, mehrzoniges Simulationsmodell nötig (siehe Abbildung 5).

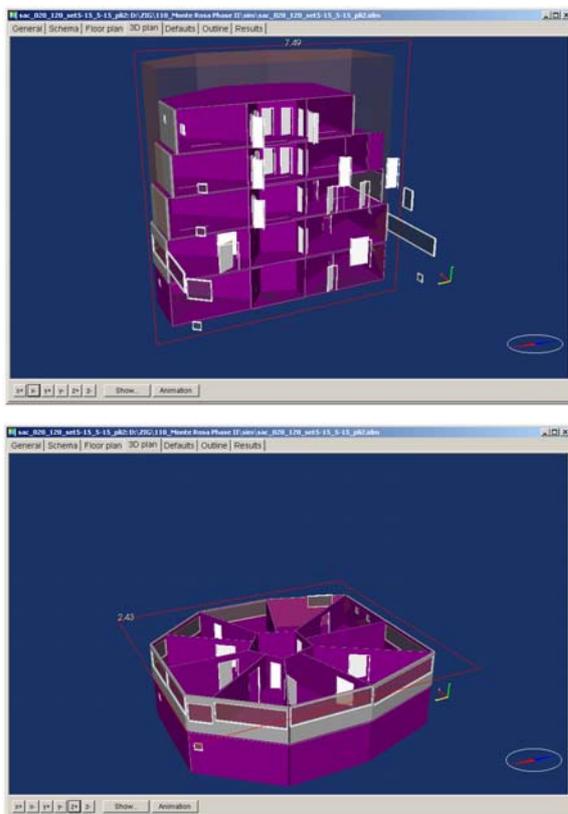


Abb. 5: Darstellung des Simulationsmodells der Neuen Monte-Rosa-Hütte (Simulationen mit IDA Klima und Energie 4.0)

Eine Frage aus dem Bereich c) (Variantenentscheide) war, ob besser in eine sehr gute Gebäudehülle investiert wird oder ob mit der gleichen Investitionssumme besser mehr Solarfläche (thermisch und/oder Photovoltaik) installiert wird. Da die Hütte nur von März bis Oktober in Betrieb ist, zeigt die Grenzkostenbetrachtung, dass besser in mehr solare Gewinnflächen investiert wird als in eine auf Stand Minergie-P (bzw. Passivhaus) gedämmte Gebäudehülle. Abbildung 6 zeigt stellvertretend für die Untersuchungen die Abhängigkeit zwischen Dämmstandard, Flächenbedarf für die Solaranlagen (thermisch und Photovoltaik), den Investitionen auf Seite Gebäudetechnik und dem damit erzielbaren Autarkiegrad.

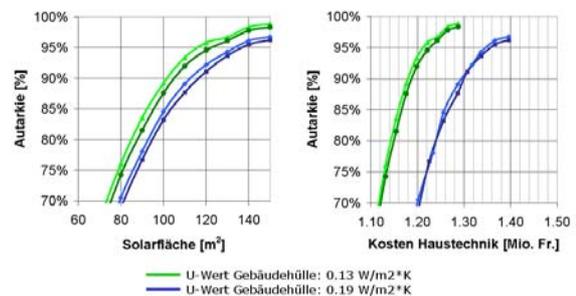


Abb. 6: Abhängigkeiten zw. Autarkiegrad, Solarfläche (thermisch / Photovoltaik), Dämmstandard der Gebäudehülle und Investition Gebäudetechnik

Eine weitere Fragestellung war die Luftführung in den Schlafräumen (d): Um auf Kanäle in den Zwischendecken verzichten zu können, war es wünschenswert, die Abluft direkt oberhalb der Zimmertüren abzusaugen und die (nachts relativ zur Raumlufttemperatur eher kühle) Zuluft über Türschlitze unten nachströmen zu lassen. Diese Luftführung birgt jedoch das Risiko, dass es zu einem Strömungskurzschluss kommt und somit der Raum nur ungenügend durchströmt wird.

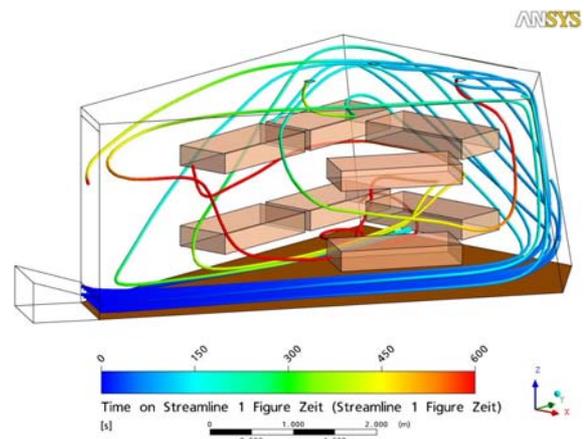


Abb. 7: Luftströmungssimulationen für einen Schlafraum (Simulationen mit ANSYS)

CFD-Simulationen mit ANSYS zeigten jedoch, dass der Kurzschlussanteil bei belegtem Raum relativ gering sein wird und mit dieser Luftführung eine genügende Lüftungseffizienz gewährleistet ist. Somit konnte auf eine Abluftabsaugung im Fensterbereich verzichtet werden und es brauchte keine Lüftungskanäle in der Zwischendecke, was den (Holz-)Bau kompliziert und verteuert hätte.

Die ersten thermischen Simulationen zeigten schnell, dass für die Erreichung der Autarkieziele dem Energiemanagement, also der Verknüpfung der einzelnen Komponenten, eine grosse Bedeutung zukommen wird. Neben der Verknüpfung der Komponenten soll das Energiemanagement zusätzlich die Wetterprognosen und die erwarteten Gästezahlen berücksichtigen (siehe Abbildung 8). Mit dieser vorausschauenden Regelung (model predictive control) können vor allem die Speicher (Wärmespeicher, Batterien, Tanks der Abwasseranlage) optimal bewirtschaftet werden. Damit lässt sich der von aussen zuzuführende Energiebedarf nochmals reduzieren.

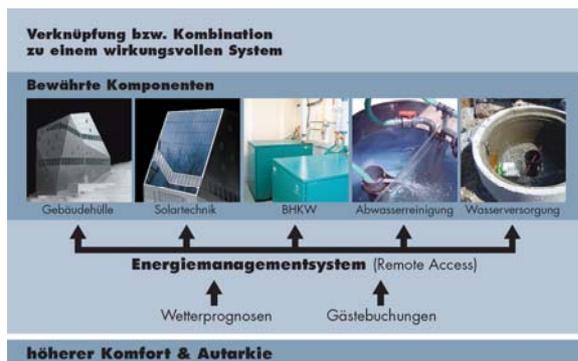


Abb. 8: Energiemanagement als zentrales Element einer hohen Energieeffizienz, inkl. Berücksichtigung der Besucher- und Wetterprognosen

Das Prinzip und der Vorteil der vorausschauenden Regelung gegenüber einer „konventionellen“ Regelung wird in Abbildung 9 erläutert.

Die konventionelle Regelung kennt nur den aktuellen Zustand des Gebäudes und der Speicher. Nach einem Wochenende mit hoher Belegung, vollem Abwassertank und halbleeren Batterien folgt eine Schlechtwetterperiode. Der Betrieb der Abwasserreinigungsanlage lässt den Batteriestand gegen Null sinken, worauf das Blockheizkraftwerk (BHKW) in Betrieb genommen wird. Am darauffolgenden Wochenende sind die Batterien voll und der Abwassertank leer.

Die vorausschauende Regelung kennt die Wetter- und die Besucherprognosen: Im Wissen, dass unter der Woche wenig Gäste die Hütte besuchen werden

und in der zweiten Wochenhälfte wieder schönes Wetter vorherrschen wird, wartet das Energiemanagement mit der Reinigung des Abwassers zu und leert die Batterien fast komplett. Am Wochenende sind aber auch so die Batterien wieder voll und der Abwassertank leer – jedoch ohne dass das BHKW in Betrieb genommen werden musste.

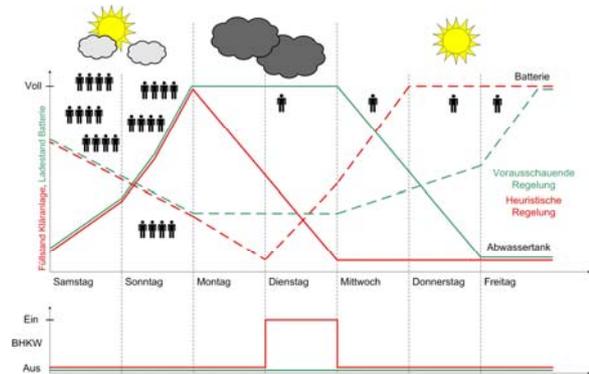


Abb. 9: Funktionsweise der vorausschauenden Regelung im Vergleich zu einer „konventionellen“ Regelung (vereinfacht) (Bild: ETH Zürich, Prof. L. Guzzella, D-MAVT)

Die Implementierung der vorausschauenden Regelung erfolgt erst in den ersten Betriebsjahren der Hütte und ist Bestandteil eines aktuell laufenden Forschungsprojektes (ETH Zürich, Siemens, Hochschule Luzern; Co-Finanzierung durch Bundesamt für Energie). Die im Rahmen des Forschungsprojektes entwickelten Regelalgorithmen und Parametereinstellungen werden vorerst am Simulationsmodell getestet und dann im realen Betrieb der Hütte verwendet. Ausführliche Messungen begleiten diese Projektphase und ermöglichen es, die Simulationsmodelle auch entsprechend zu validieren.

DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Die Betrachtung und Optimierung des Gebäudes als System überfordert das menschliche Hirn. Nur dank Simulationen können die komplexen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Systemkomponenten erfasst, modelliert und analysiert werden. Dank dieser gesamtheitlichen Betrachtung kann eine präzisere Planung erfolgen und ansonsten unberücksichtigte Phänomene können im Planungsprozess entsprechend berücksichtigt werden.

Die Einzigartigkeit der Situation erfordert diese präzise Planung. Simulationen leisten einen wichtigen Beitrag zu einer hohen Planungssicherheit und bieten hohe Gewähr, dass das System optimal ausgelegt ist. Aber auch für den Betrieb lassen sich dank Simulationen frühzeitig die bestmöglichen Einstellungen ermitteln, so dass die zwangsläufig notwendige Pha-

se der Betriebsoptimierung nach Inbetriebnahme reduziert werden kann.

Oft wird auch die Frage gestellt, ob es legitim ist, an einem so extremen, speziellen Standort Forschung zu betreiben oder neue Lösungen bzw. neue Lösungsansätze auszuprobieren. Forschung bedeutet aber immer, an die Grenzen des Möglichen zu gehen, um neue Ansätze zu entwickeln. Ohne diese Herausforderung bleibt die Forschung ohne Ergebnis. Gleichzeitig darf dadurch aber das Projekt und der eigentliche Zweck einer SAC-Hütte nicht gefährdet oder tangiert werden. Diese Gratwanderung zwischen Forschung (Fortschritt) und Standard (Robustheit) galt es in diesem Projekt zu meistern. Die Erkenntnisse aus dem ganzen Projekt und der Ansatz, das Gebäude als Gesamtsystem zu betrachten und zu optimieren haben grosse Chancen, auch bei Objekten im Flachland nutzbringend umgesetzt werden zu können. Die Neue Monte-Rosa-Hütte ist zwar eine Insellösung, aber durchaus mit Festlandpotenzial.

BETEILIGTE

An Planung und Bau der Neuen Monte-Rosa-Hütte waren unter anderem die folgenden Institutionen beteiligt:

Forschungsphase I

Studio Monte Rosa, CH-8093 Zürich

Assistenzprofessur für Architektur und Digitale Fabrikation, Departement Architektur (D-ARCH), ETH Zürich, CH-8090 Zürich

Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK), Departement Bau, Umwelt und Geomatik (BAUG), ETH Zürich, CH-8090 Zürich

Institut für Mess- und Regeltechnik, Departement Maschinenbau und Verfahrenstechnik (D-MAVT), ETH Zürich, CH-8090 Zürich

Institut für Umweltingenieurwissenschaften (IfU), Departement Bau, Umwelt und Geomatik (BAUG), ETH Zürich, CH-8090 Zürich

Empa Materials Sciences & Technology, CH-8600 Dübendorf

Zentrum für Integrale Gebäudetechnik (ZIG), Hochschule Luzern – Technik & Architektur, CH-6048 Horw

Generalplaner Monte Rosa

Bearth & Deplazes Architekten AG, CH-7000 Chur
architektur + bauprozess!, CH-8093 Zürich

Architektur + Design GmbH, CH-3920 Zermatt

Lauber IWISA AG, CH-3904 Naters

Forschungsphase II

Institut für Mess- und Regeltechnik, Departement Maschinenbau und Verfahrenstechnik (D-MAVT), ETH Zürich, CH-8090 Zürich

Zentrum für Integrale Gebäudetechnik (ZIG), Hochschule Luzern – Technik & Architektur, CH-6048 Horw

Siemens (Suisse) SA, Building Technologies Group, CH-6300 Zug

SOFTWARE

EQUA Simulation AB, 2010, IDA Indoor Climate and Energy 4.0.

ANSYS Inc., 2010, ANSYS 12

EINFLUSS DES MIKROKLIMAS AUF DAS ENERGETISCHE UND THERMISCHE VERHALTEN VON GEBÄUDEN AM BEISPIEL DES STANDORTES KASSEL

Andrea Schneider, Anton Maas, Fachbereich Architektur, Stadtplanung, Landschaftsplanung
 Fachgebiet Bauphysik, Universität Kassel, Deutschland

KURZFASSUNG

Unter Verwendung von an drei verschiedenen Standorten in Kassel gemessenen Klimadaten für die Jahre 2001, 2002 und 2003 und des Testreferenzjahres des Deutschen Wetterdienstes wird der Einfluss des Standortfaktors Klima auf den Heizwärmebedarf mit Hilfe thermischer Gebäudesimulationen ermittelt und dargestellt.

Hierzu werden für typische Wohnnutzungen Randbedingungen gewählt, mit denen das thermische Gebäudeverhalten basierend auf unterschiedlichen wärmetechnischen Standards verschiedener Baualtersklassen untersucht wird.

Zur Beurteilung des thermischen Raumklimas wird die Anzahl der Übertemperaturgradstunden ermittelt und eine Beurteilung mittels des PMV-Indexes vorgenommen.

Abstract

The urban climate is influenced by built-up areas and their implications, including waste heat and pollutant emissions [WMO, 1981].

Due to the different surfaces and building structures various microclimates are formed within the urban heat island. Its influence on the energetic and thermal behaviors on the buildings is analysed.

In this work, typical boundary conditions of use for residential buildings are selected in order to investigate the thermal behaviour of existing and new buildings constructions regarding heat technology standards. Using different climate data measured at three locations in Kassel for the years 2001, 2002 and 2003 and the test reference year [Christoffer et al., 2004] the influence of a specific site factor on the thermal building simulation is investigated. The thermal building simulation is performed with IDA Indoor Climate and Energy 4.0 for a single family house and an apartment building with typical constructions and defined residential use. In addition, the window areas varied. Both will be evaluated for the heating demand. To assess the thermal indoor climate, the number of degress hours for overheating is determined and the rating is carried out using PMV-Indices.

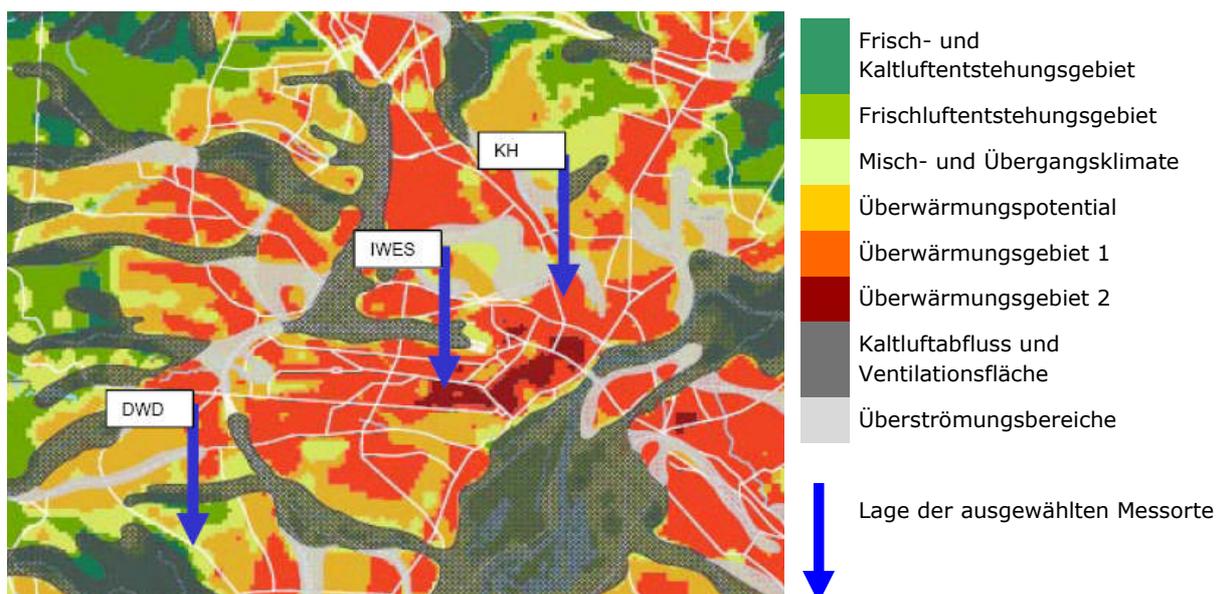


Abbildung 1: Lage der Messstationen im Stadtgebiet von Kassel [Quelle: Klimafunktionskarte, FG Umweltmeteorologie, Universität Kassel]

EINLEITUNG

Mit Stadtklima wird das Klima bezeichnet, welches durch die Bebauung und ihre Auswirkungen, einschließlich Abwärme und Emission von luftverunreinigenden Stoffen modifiziert wird [WMO, 1981]. Infolge der unterschiedlichen Oberflächen und Baukörperstrukturen bilden sich innerhalb der urbanen Wärmeinsel verschiedene Mikroklimata aus. Deren Einfluss auf das energetische und thermische Verhalten von Gebäuden wird im Folgenden unter Verwendung des thermischen Gebäudesimulationsprogrammes IDA Indoor Climate and Energy 4.0 untersucht.

KLIMADATEN

Für die Aufgabe standen Messdaten des Fraunhofer-Instituts für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) und des Klimahauses (KH) für die Jahre 2001, 2002 und 2003 zur Verfügung. Die Klimastation des Deutschen Wetterdienstes ist sowohl die Repräsentanzstation für das verwendete Testreferenzjahr TRY 07 [Christoffer et al., 2004] für Kassel (TRY) als auch Messstation für die gemessenen Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD)

In Abbildung 1 sind die verschiedenen Messorte in der Klimafunktionskarte (KFK) des Fachgebietes Umweltmeteorologie der Universität Kassel dargestellt. Aus der KFK lassen sich Funktionen, Austausch und Wechselwirkungsprozesse des Klimas ablesen, die vor allem an strahlungsreichen und windschwachen Wetterlagen auftreten. Die Messstation des DWD befindet sich in einem Misch- und Übergangsklimat. Dieses zeichnet sich durch Flächen mit einem hohen Vegetationsanteil aus; angrenzend befinden sich Frischluftentstehungs- und Kaltluftabflussgebiete. Im Überwärmungsgebiet 2 liegt eine hohe Wärmespeicherfähigkeit aufgrund der dichten Bebauungsstruktur vor. Hier befindet sich die Station des IWES. Es mangelt an Ausgleichspotentialen durch angrenzende Klimate oder Luftaustauschbahnen. Der Standort der Messstation KH bietet bereits Überwärmungspotential durch die bauliche Situation, während Überwärmungsgebiete mit dichterem Bebauung und weniger Vegetation sich anschließen. Misch- und Übergangsklimate grenzen das Gebiet ebenfalls ab.

Wind

Die regionalen Winde werden aufgrund der unterschiedlichen Höhen im Kasseler Becken erheblich verändert. Die Windrichtungen und -stärken sind für den Sommer und Winter des Jahres 2003 für die unterschiedlichen Standorte in Abbildung 2 bis 5 dokumentiert:

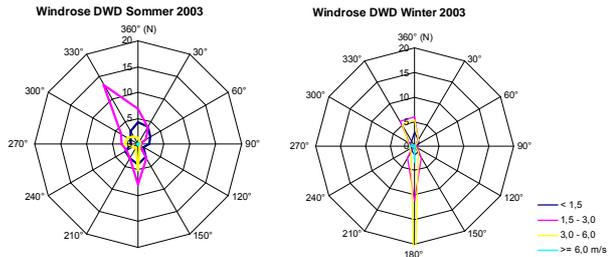


Abbildung 2: Windrose DWD Sommer / Winter 2003

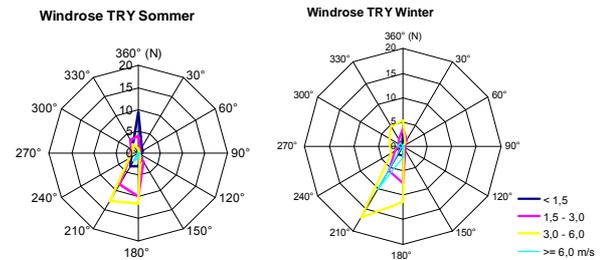


Abbildung 3: Windrose TRY Sommer / Winter 2003

Im Jahr 2003 kommt an der Station des DWD der Wind aus Richtung Nord, während im Winter starker Wind aus Süden herrscht. Für das TRY stellt sich im Sommer und im Winter eine Windrichtung aus Südwest bis Süd mit höheren Windgeschwindigkeiten ein.

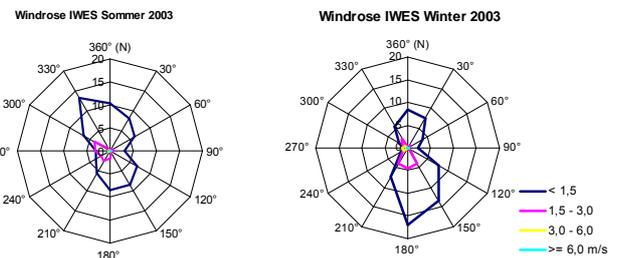


Abbildung 4: Windrose IWES Sommer / Winter 2003

An der Station IWES sind sehr wechselnde Windrichtungen und Verwirbelungen aufgrund der hohen Rauigkeit der Gebäude erkennbar. Im Winter stellen sich hier schwache und stärkere Wind aus Süden ein.

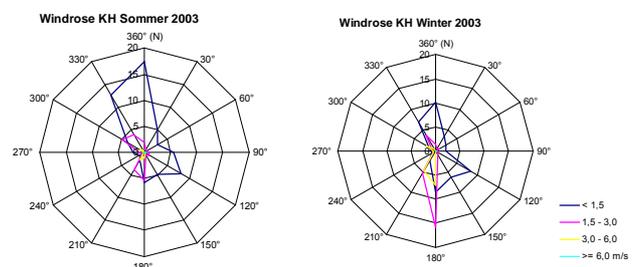


Abbildung 5: Windrose KH Sommer / Winter 2003

Für den Standort KH zeigt sich ein schwacher Wind im Sommer aus Richtung Nord, während sich im Winter die Ausprägung der Windrichtung stärker Richtung Süden ändert.

Ereignistage

Die „meteorologischen Ereignistage“ sind Tage an denen bestimmte Schwellenwerte der Lufttemperatur erreicht werden. Mit Hilfe ihrer Häufigkeit kann eine Aussage über das Klima getroffen werden. Ereignistage sind Hitzetag ($t_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$), Sommertag ($t_{\max} > 25^{\circ}\text{C}$), Frosttag ($t_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$) und Eistag (Maximalwert der Temperatur 0°C).

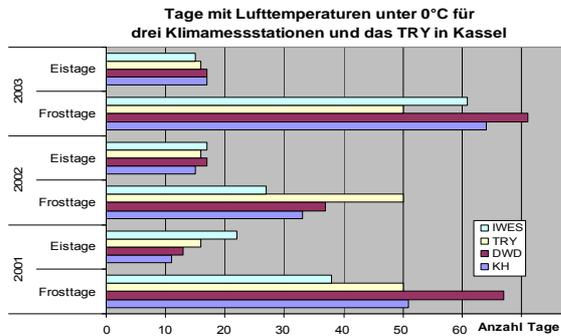


Abbildung 6: Ereignistage unter 0°C für Kassel

Die Anzahl der Frosttage sind an der Station des DWD für das Testreferenzjahr und für die Messwerte des DWD für die Jahre 2001 und 2003 am Größten (siehe Abbildung 6).

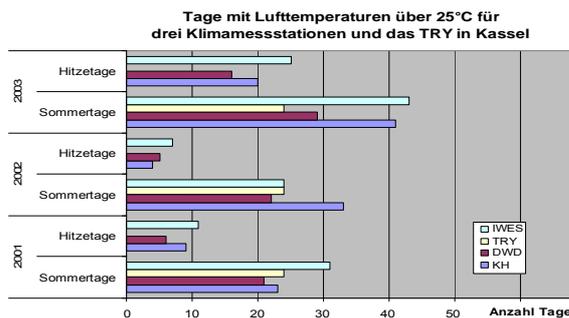


Abbildung 7: Ereignistage über 25°C für Kassel

Im Jahr 2003 nimmt die Anzahl der Ereignistage gegenüber den Vorjahren zu, sowohl die Hitzetage und Sommertage als auch die Zahl der Frosttage steigt an (Abbildung 7).

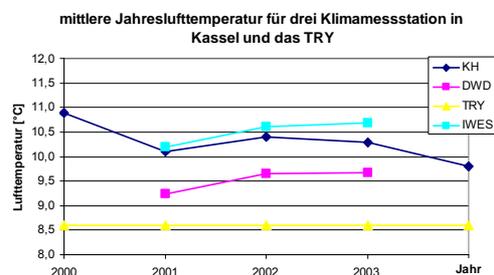


Abbildung 8: Mittlere Jahreslufttemperaturen Kassel

In Abbildung 8 sind die Mittelwerte der Lufttemperatur für die Mess-Stationen dargestellt. In der städtischen Wärmeinsel Kassel beträgt der Temperaturunterschied zwischen der Station des DWD und der des IWES im Jahresmittel 1 K. Das

Jahr 2003 ist als „heißes“ Jahr im Gedächtnis geblieben, die mittlere Temperatur ist gegenüber den Vorjahren jedoch nicht gestiegen. Aus den Ereignistagen sind allerdings Perioden extremer Hitze und extremer Kälte abzulesen.

Gradtagzahlen

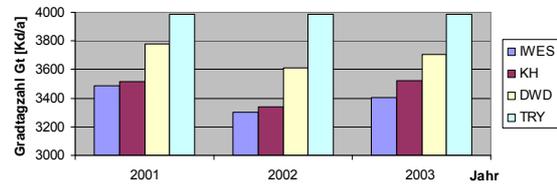


Abbildung 9: Gradtagzahlen Kassel

In der Heizungstechnik wurde die Verwendung der Gradtagzahl (Gt) eingeführt. Für eine definierte Heizgrenztemperatur – hier exemplarisch 15°C – wird die Gradtagzahl aus der Differenz der Rauminnentemperatur von 20°C und einer Temperatur, an denen das Tagesmittel der Außentemperatur unter 15°C liegt bestimmt. In Abbildung 9 ist zu erkennen, dass die so ermittelte Gradtagzahl für das TRY 3900 Kd/a beträgt. Die Abweichung zu den gemessenen Daten für die Werte des DWD liegen im Durchschnitt bei 7%, während es für den Standort des KH 12% und für das IWES fast 15% sind.

Globalstrahlung

Die Globalstrahlungswerte (siehe Abbildung 10 und Abbildung 11) liegen im Jahr 2003 um 18 % höher als die Werte der vorangegangenen zwei Jahre. Deutliche Unterschiede sind zwischen den Stadt- und Umlandstationen nicht zu erkennen.

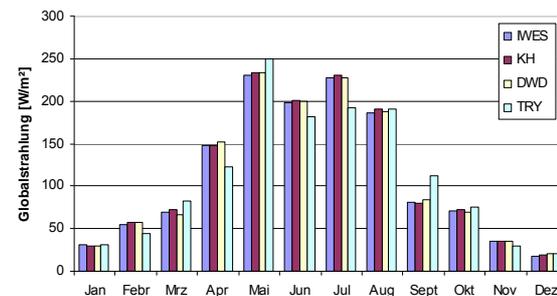


Abbildung 10: Globalstrahlung für das Jahr 2001

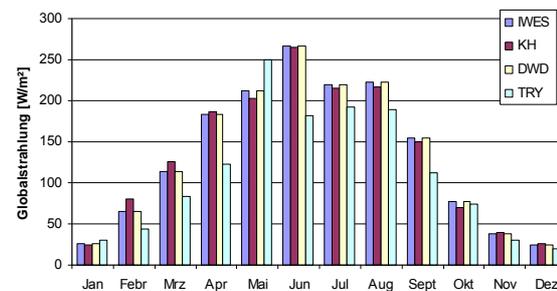


Abbildung 11: Globalstrahlung für das Jahr 2003

SIMULATION

Simulationsobjekt

Die verwendeten Gebäudetypen im Wohngebäudebestand sind die der Baualtersklassen 1919-1948, 1958-1968, 1979-1983 und EnEV-Standard (Neubau).

Tabelle 1: U- Werte der Bauteile in Anlehnung an die hessische Gebäudetypologie [Born et al, 2005]

U- WERTE BAUTEILE [W/(m ² K)]	1919- 1948	1958- 1968	1979- 1983	ENEV
Außenwand	1,7	1,23	0,82	0,27
Fußboden	1,47	0,95	0,77	0,3
Decken / obere Geschossdecken	0,8	1,85	0,44	0,2
Innenwände	2,16	1,60	1,6	1,6
Fenster U _w	5,0	2,8	2,8	1,1
Wärmebrücken	0,1	0,1	0,1	0,05

Das Simulationsobjekt ist ein Mehrfamilienhaus (MFH) mit insgesamt vier beheizten Vollgeschossen. Das Gebäude ist Nord- Süd ausgerichtet.

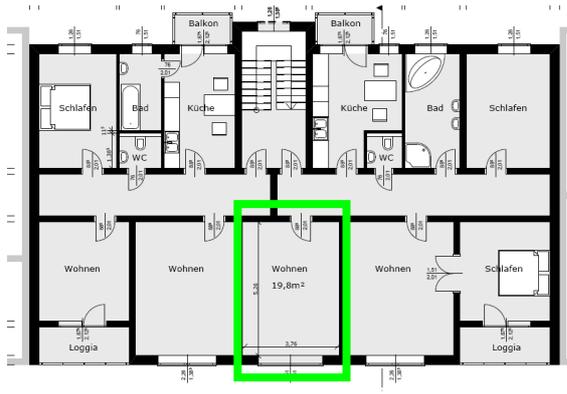


Abbildung 12: Grundriss des MFH mit farbiger hervorgehobenem Simulationsraum



Abbildung 13: Südansicht der Häuserzeile

Die Geometrie der Innenmaße des ausgewählten Raumes beträgt 3,76 m x 5,25 m x 2,80 (Raumhöhe). Der Raum liegt im 2. OG. Die Fensteröffnung hat eine Größe von 3,8 m² mit einer Brüstungshöhe von 0,80 m. Bezogen auf die Grundfläche entspricht dies 20 % (V1). In der Variante (V2) des erhöhten Fensterflächenanteils ist die Brüstung auf Fußbodenhöhe abgesenkt, die Fläche des Fensters entspricht dann 30 % bezogen auf die Grundfläche. Das Gebäude befindet sich in innerstädtischer Lage.

In der Simulation wurde eine Verbauung, wie in Abbildung 14 dokumentiert, abgebildet.

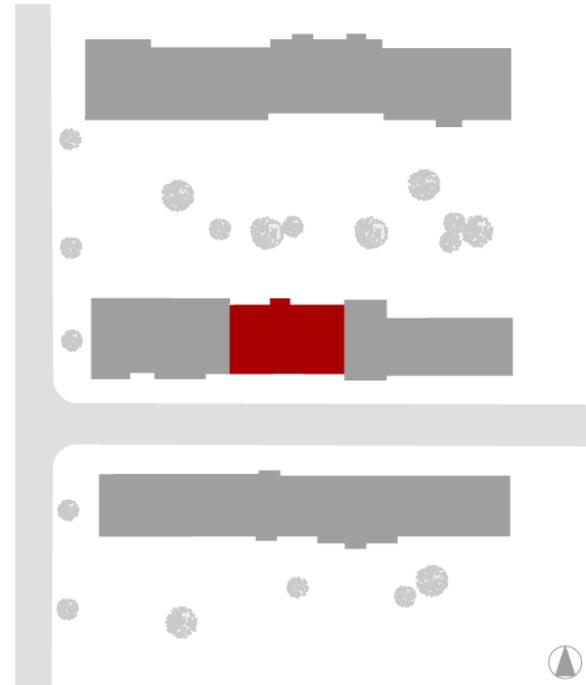


Abbildung 14: Typische städtebauliche Situation eines Mehrfamilienwohnhauses

Randbedingungen und Konditionierung MFH

Die Randbedingungen für die Nutzung wurden aus DIN V 18599-10:2007-2, Tabelle 3 übernommen. Danach beträgt die Raum- Solltemperatur 20°C, die internen Wärmequellen q_i betragen 100 Wh/(m²d) über den Nutzungszeitraum von 24 h/d. Diese internen Wärmequellen im Modulraum stellen sich in der Simulation wie folgt dar: eine Person mit dem Energieumsatz 1 met (108 W) hält sich von 11:00 bis 21:00 h in diesem Raum auf, zusätzlich sind nicht näher spezifizierte Wärmeeinträge von 28 W während der Nutzungszeit von 24h/d vorhanden. Übersteigt die Raumtemperatur 24°C schließt die außenliegende Verschattung.

In den Gebäuden ist keine Lüftungs- bzw. Klimaanlage vorhanden, die Räume werden über freie Fensterlüftung belüftet. Gemäß DIN V 18599-2:2007-2 wird der anzusetzende Luftwechsel und der Infiltrationsluftwechsel bestimmt. Als Maß für die Gebäudedichtheit gilt dabei der n_{50} -Wert.“ [DIN V 18599-2:2007-2] Für die Gebäudestandards werden Werte gemäß Tabelle 2 für die Undichtheiten festgelegt.

Tabelle 2: Bemessungswerte n_{50} für ungeprüfte Gebäude [DIN V 18599-2:2007-2]

GEBÄUDESTANDARD	n_{50} - WERT
1919 – 1948	6
1958 – 1968	6
1979 – 1983	4
EnEV 2009	2

Der mittlere tägliche Infiltrationsluftwechsel berechnet sich mit $e_{wind} = 0,07$:

$$n_{inf} = n_{50} \cdot e_{wind} \quad (1)$$

Der mittlere tägliche Fensterluftwechsel berechnet sich:

$$n_{win} = 0,1 \text{ h}^{-1} + \Delta n_{win} \cdot t_{nutz} / 24 \text{ h} \quad (2)$$

Die Grundlüftung beträgt $0,1 \text{ h}^{-1}$, zuzüglich eines Luftwechsels Δn_{win} während der Nutzungszeit:

$$\Delta n_{win} = n_{nutz} - (n_{nutz} - 0,2 \text{ h}^{-1}) / \text{h}^{-1} \cdot n_{inf} - 0,1 \text{ h}^{-1} \quad (3)$$

Dabei beträgt n_{nutz} gemäß DIN V 18599-10:2007-2 $0,5 \text{ h}^{-1}$.

Tabelle 3: Infiltration und Fensterluftwechsel für die verwendeten Gebäudestandards

GEBÄUDE-STANDARD	INFILTRATION [h ⁻¹]	FENSTERLUFT-WECHSEL [h ⁻¹]
1919- 1948	0,42	0,374
1958- 1968	0,42	0,374
1979- 1984	0,28	0,416
EnEV	0,14	0,458

Für die thermische Gebäudesimulation wurden die Werte aus Tabelle 3 verwendet. Zur Berechnung des Heizwärmebedarfs (Raumtemperatur 20°C) wird ein Radiator gewählt – Verluste aus Speicherung und Verteilung werden nicht betrachtet, die Nachtabsenkung ist von 22:00 bis 6:00 h auf 17°C vorgesehen. Übersteigt die Raumtemperatur 26°C wird der Kühlkältebedarf über Berücksichtigung eines idealen Kühlers (ohne Verluste) bestimmt.

ERGEBNISSE

Heizwärmebedarf

In Abbildung 15 ist der Einfluss des Messortes, des Gebäudestandards und der Fenstergröße auf den Heizwärmebedarf dargestellt. Für das MFH des Standards 1919- 1948 ist der Bedarf für den Standort IWES und KH ähnlich hoch, für den Datensatz DWD beträgt der Unterschied 13 kWh/(m²a) zu den städtischen Messorten. Dieser standortabhängige Anteil wird, wie erwartet, mit Verbesserung des Gebäudedämmstandards geringer, so weist der Unterschied in dem Bedarf für Heizwärme für den EnEV Standard IWES zur DWD- Station 4 kWh/(m²a) auf.

Der Einfluss der Fenstergröße ist in den Ergebnissen der Berechnungen für die Standorte (V1 und V2) höher, als der Standortunterschied. Dieses Ergebnis begründet sich aus der Tatsache, dass der Fensterflächenanteil bezogen auf die Fassadenfläche circa 80 % beträgt (V2). Beträgt der Unterschied zwischen den Varianten der Fenstergrößen des Gebäudestandards 1919- 1948 noch 16 kWh/(m²a)

für die Station des IWES so ist es nur noch eine kWh/(m²a) im EnEV Standard.

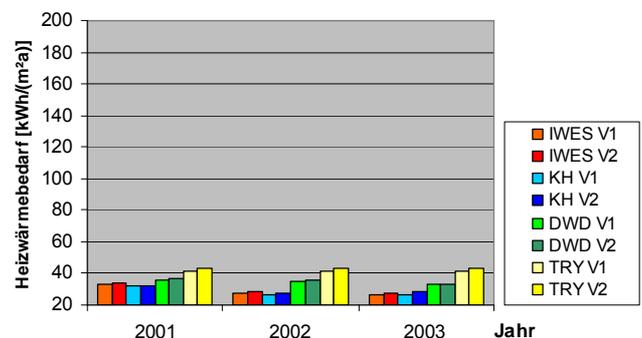
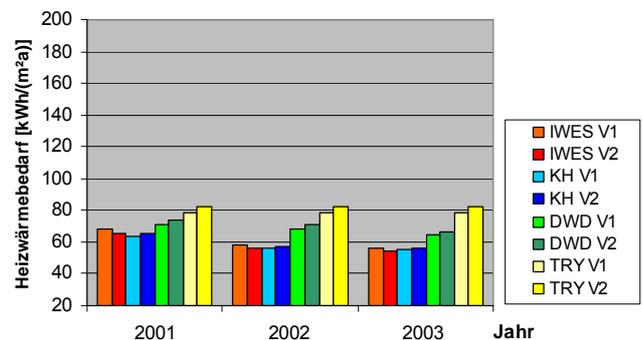
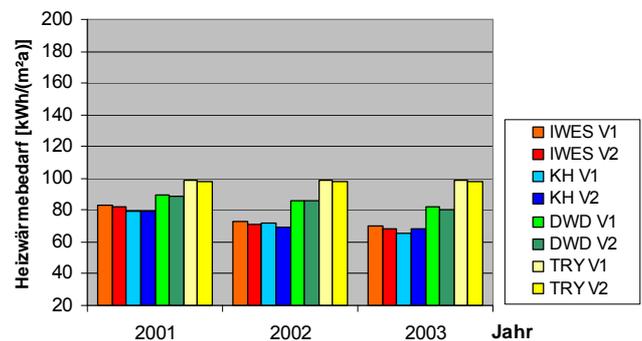
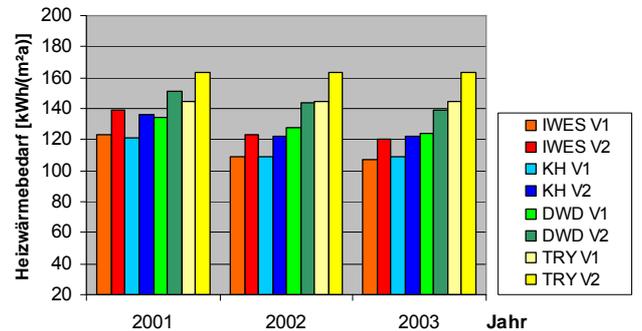


Abbildung 15: Heizwärmebedarf für drei Auswertungsjahre an drei Messorten und TRY. Gebäudestandards von oben nach unten 1919-1948, 1958- 1968, 1979- 1983, EnEV. V1 entspricht einem grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil von 20%, V2 einem Anteil von 30%.

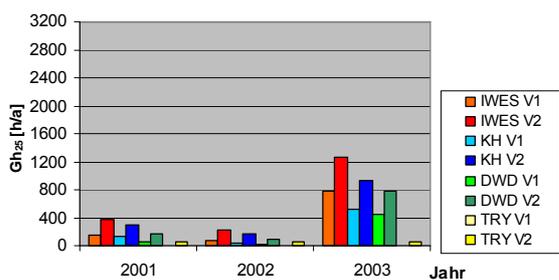
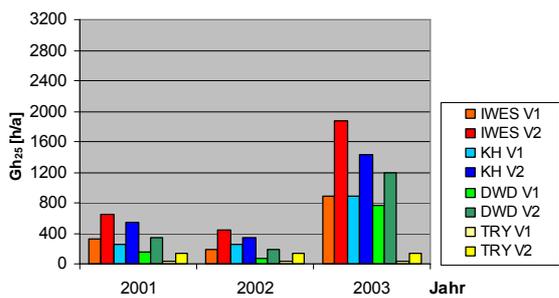
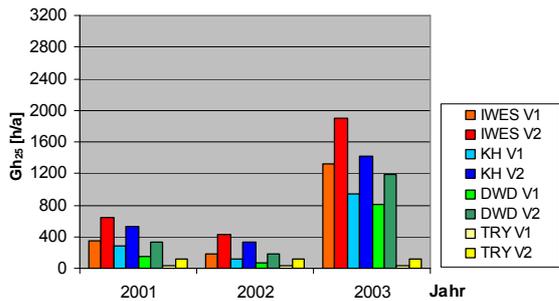
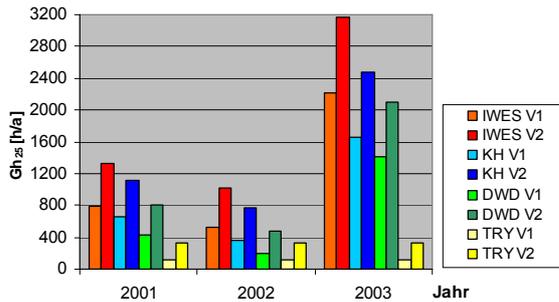


Abbildung 16: Übertemperaturgradstunden für drei Auswertungsjahre an drei Messorten und TRY. Gebäudestandards von oben nach unten 1919-1948, 1958-1968, 1979-1983, EnEV. V1 entspricht einem grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil von 20%, V2 einem Anteil von 30%.

Übertemperaturgradstunden

Zur Darstellung der Situation im Raum im Sommer wurde die Variante „erhöhte Lüftung“ geschaffen, die Randbedingungen wurden aus DIN 4108-2:2003-07

gewählt. Hiernach wird Deutschland in drei Sommer-Klimaregionen eingeteilt. Kassel liegt in der Sommer-Klimaregion A – sommerkühl, welches einen Grenzwert für die Innentemperatur (bei einem ingenieurmäßigen Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes) von 25°C bedeutet.

Weiterhin gilt als Randbedingung für das Berechnungsverfahren eine Luftwechselrate für den Sommer: Überschreitet die Raumtemperatur 23°C, wird die Luftwechselrate auf $n = 3 \text{ h}^{-1}$ erhöht, außerhalb dieser Zeit wird bei dieser Berechnung eine Luftwechselrate von $0,3 \text{ h}^{-1}$ angesetzt. Die Infiltrationsluftvolumenströme sind identisch mit denen der vorhergehenden Berechnungen (siehe Tabelle 3).

Als Maß zur Berechnung dienen die Übertemperaturgradstunden [Hauser, G.; Otto, F.: 1997]. Dabei wird aus einem vorgegebenen Grenzwert und der empfundenen Raumtemperatur (operative Temperatur) die positive Temperaturdifferenz sowie die Wirkungsdauer errechnet. Als Grenzwert wird eine empfundene Raumtemperatur von 25°C festgelegt.

In Abbildung 16 sind die deutlich häufigeren Temperaturüberschreitungen für die gemessenen Datensätze des Standortes IWES für alle Gebäudestandards zu erkennen. Auffällig ist hier die sehr niedrige Zahl für das TRY, auch der verbesserte bauliche Wärmeschutz ist erkennbar.

Die Vergrößerung des Fensters ergibt eine durch alle Simulationsergebnisse erkennbare sehr konstante Differenz zur Variante des kleineren Fensters.

PMV (Predicted mean Vote)

Mit Hilfe des PMV-Indexes lässt sich die Behaglichkeit in einem Raum anhand einer 7-stufigen Beurteilungsskala vorhersagen (Tabelle 4). Die in der Mitte des Raumes befindliche Person ist mit einer Kleidungseinheit bekleidet und ihr Energieumsatz beträgt 1 met während der Aufenthaltszeit (von 11:00 h bis 21:00 h).

Tabelle 4: Sieben Punkte der Klimabewertungsskala [EN ISO 7730]

+3	+2	+1	0	-1	-2	-3
heiß	warm	etwas warm	neutral	etwas kühl	kühl	kalt

Dargestellt sind in den Abbildungen 17 und 18 Auswertungen des Sommerfalls 2003 für die Standorte DWD und IWES. Demnach ist der Verlauf der Beurteilung des Klimas im Innenraum ähnlich. Allerdings sind die Stunden in denen das Klima als „zu warm“ ($> +1$) beurteilt wird am Standort IWES um 14 % höher als am Standort DWD bezogen auf die Aufenthaltszeit. Die Anzahl der Stunden in denen mit „heiß“ beurteilt wird ist 5 % höher.

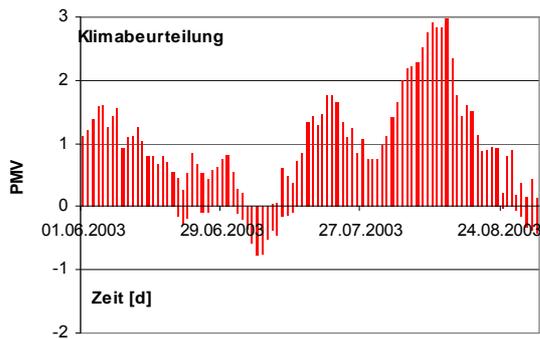


Abbildung 17: PMV MFH 1919- 1948 DWD Sommer 2003 Variante ohne erhöhte Lüftung

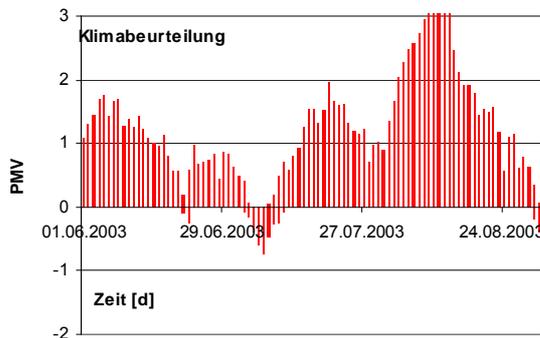


Abbildung 18: PMV MFH 1919- 1948 IWES Sommer 2003 Variante ohne erhöhte Lüftung

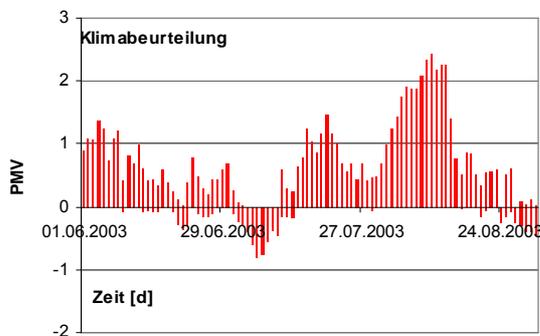


Abbildung 19: PMV MFH 1919- 1948 DWD Sommer 2003 Variante mit erhöhter Lüftung

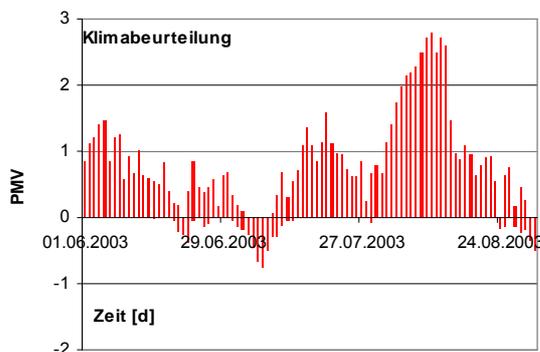


Abbildung 20: PMV MFH 1919- 1948 IWES Sommer 2003 Variante mit erhöhter Lüftung

Wird die beschriebene erhöhte Lüftung für den Raum durchgeführt, verändert sich die Bewertung: Die Stunden während der Aufenthaltszeit, welche über der Bewertung +1 liegen, reduzieren sich um die Hälfte an beiden Standorten.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der Gebäudestandort kann einen großen Einfluss auf die Innenraumverhältnisse haben. Dies ist abhängig vom Gebäudestandard und damit Dämmstandard, der Fenstergröße und dem nutzerabhängigen Lüftungsverhalten. Bedeutsam sind daneben die Außenklimabedingungen, das standortspezifische Klima, welches durch die Klimafunktionskarte dargestellt werden kann.

Mittels dynamischer Gebäudesimulationsberechnungen wurde die thermische Auswirkung gemessener klimatischer Verhältnisse über einen Zeitraum von drei Jahren und des Testreferenzjahres für einen Einzelraum eines Mehrfamilienwohnhauses für drei Standorte in Kassel untersucht.

Die Ergebnisse wurden für die den Heizwärmebedarf, die Übertemperaturgradstunden und die Behaglichkeit mittels PMV- Index ausgewertet und dargestellt.

Weitere Untersuchungen beinhalten Berechnungen zum Kühlkältebedarf, weitere Varianten von Klimarandbedingungen und Sonnenschutz, andere Gebäudegeometrien und -nutzungen.

DANKSAGUNG

Unser Dank gilt den Mitarbeitern des Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES in Kassel für die Bereitstellung der Messdaten.

LITERATUR

Born R. et al. 2005 : Hessische Gebäudetypologie im Auftrag des Impulsprogramms Hessen. IWU, 2005, Darmstadt.

Christoffer et al. 2004 : Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse. Deutscher Wetterdienst, Abteilung Klima und Umweltberatung, Offenbach a. Main, 2004.

DIN V 18599: 2007-02 Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung. Berlin: Beuth- Verlag, 2007.

DIN 4108-2: 2003-07 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. Berlin: Beuth- Verlag, 2003.

DIN EN ISO 7730:2006-05 Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD- Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit. Berlin: Beuth-Verlag, 2006.

WMO, World Meteorological Organization, 1981.

Hauser, G. und Otto, F.: Auswirkungen eines erhöhten Wärmeschutzes auf die Behaglichkeit im Sommer. Bauphysik 19 (1997), H. 6 , S. 169 - 176; 21.

KOMBINIERTE STADTKLIMA- UND GEBÄUDEENERGIEMODELLIERUNG ZUR BESTIMMUNG DES ENERGIEBEDARFES VON URBANEN GEBÄUDEN

Fazia Ali-Toudert

Lehrstuhl Klimagerechte Architektur, Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen
Technische Universität Dortmund, Deutschland

Email: fazia.alitoudert@tu-dortmund.de

KURZFASSUNG

Dieser Beitrag berichtet über eine Untersuchung zur notwendigen Verknüpfung von Stadtklima- und Gebäudeenergiemodellen im Hinblick auf die Berechnung des Energiebedarfes urbaner Gebäude, da dieser beeinflusst wird von i) dem urbanen Mikroklima, das von den Standard-Klimadaten (z.B. Testreferenzjahre TRY) abweicht, und ii) der Minderung der solaren Gewinne zwischen den benachbarten Gebäuden aufgrund von gegenseitiger Verschattung und Auch das Standortklima und die Gebäudekonstruktion wirken sich stark auf die Außen- und Innenraumklima und deren Wechselwirkungen durch die angrenzende Gebäudehülle.

Die hier verwendete numerische Methodik beruht auf der Kombination des urban canyon Modells TEB und des Gebäudeenergiemodells TRNSYS 16.1, für die Erfassung des Außenklimas bzw. Innenklimas und ihrer Wechselwirkungen. Zielgröße ist der Nutzwärmebedarf (Heizwärmebedarf) und Nutzkältebedarf (Kühlbedarf), der statistisch, basierend auf der Methode der DOE Versuchsplanung, ausgewertet wird. Ausgewählte Ergebnisse für Standorte in mittlerer europäischer Breite und in den Subtropen werden diskutiert.

ABSTRACT

The present paper addresses the necessity of coupling urban climate and building energy models when investigating the energy demand of urban buildings. Indeed, the energy demand of buildings is still often assessed with the assumption of an unobstructed free horizon although this approach, valid in rural sites, is not applicable in dense urban structures for two main reasons: i) the surrounding urban microclimate differs from the standard weather data (e.g. TRY) and ii) the mutual obstructions between buildings decrease the sunlight and daylight potentials and hence the passive solar gains which are decisive in the building energy balance. As well, the climate and the building construction themselves affect the interactions between outdoor and indoor microclimates through the built envelope being a shared interface.

This paper addresses the following issues:

- How the urban structure modifies the microclimate outdoors, and how would this “new” microclimate affect the heating and cooling energy demands of the building?
- What are the effects of urban geometry and plan density in combination with solar orientation on the energy demand of an urban building?
- To which extent are building descriptors like façade thermal insulation, thermal inertia, window ratio, etc. also decisive?

The numerical method used combines the urban canyon model TEB, and the building energy model TRNSYS 16.1. By means of an extensive parametric study several urban structures are investigated where the effects of the following factors are explored: i) urban context (aspect ratio and solar orientation), ii) building construction (window ratio, thermal insulation and thermal inertia) and iii) climate type: the European mid-latitude location of Mannheim, 49.21 °N and 2 north-african subtropical locations: the hot-humid Algiers 36.34° N and the hot-dry Gharadia 32.24° N. Target quantities addressed in this paper are heating and cooling loads which are analyzed statistically on the basis of the design of experiments DOE method.

The results basically confirm the significance of all the variables investigated, with dominance of some combinations of aspect ratio, thermal insulation, thermal inertia and window ratio. The importance of adjusting air temperatures according to urban context including the vertical profile geometry, urban density and building materials has been demonstrated. The cooling net energy demand is found to be higher when urban air temperatures are used instead of standard climate data as direct consequence of dominating urban heat island effects, especially for the subtropics. Heating net energy demand is in contrary reduced for the same reason in particular for Mannheim. Hence, the total net energy demand as sum strongly depends on the site climate, namely whether the dominating needs are for heating or for cooling.

EINLEITUNG

Der Energiebedarf eines Gebäudes wird immer noch häufig bemessen mit der Annahme eines freien, ungehinderten Horizonts. Dieser Ansatz, ist für dichte Stadtstrukturen nicht zutreffend und zwar aus zwei (Haupt)Gründen:

- i. ein spezifisches städtisches Klima bzw. Mikroklima entwickelt sich innerhalb eines Stadtgebietes und unterscheidet sich vom Umlandklima, das in einer Standard-Wetterstation aufgezeichnet wird
- ii. die gegenseitigen Behinderungen zwischen den Gebäuden, gegeben durch deren Lage, mindern die Sonnen- und Tageslichtpotenziale und demzufolge auch die passiven solaren Gewinne, welche maßgebend sind für die Energiebilanz des Gebäudes.

Diese Studie spricht folgende Fragen an:

1. Inwiefern verändert die städtische Struktur das äußere Mikroklima und inwieweit beeinträchtigt dieses „neue“ Mikroklima den Heiz- und Kühlbedarf eines Gebäudes?
2. Was sind die Auswirkungen der urbanen Geometrie und Bebauungsdichte, in Kombination mit der Sonnenausrichtung, auf den Energiebedarf eines Gebäudes?
3. In welchem Ausmaß ist auch die Baukonstruktion, beschrieben durch die Qualität der Gebäudehüllendämmung, der Wärmeträgheit des Bauwerks und dem Wand- bzw. Fensterflächenanteil, ausschlaggebend?

Zielgrößen dieser Untersuchung sind i) die urbanen Lufttemperaturen und ii) die Heiz-, Kühl- und Gesamtenergielasten. Vorläufige Ergebnisse wurden in (Ali-Toudert 2009) für den mitteleuropäischen Ort Mannheim und in (Ali-Toudert 2010a) für die subtropischen Orte Algier und Ghardaia veröffentlicht.

METHODIK

Die Untersuchungsmethode beruht auf einer numerischen Modellierung. Das Stadtklimamodell Town Energy Balance TEB (Masson 2000) wird mit dem Gebäudeenergiemodell TRNSYS kombiniert (Transsolar 2010), um die thermischen und energetischen Wechselwirkungen zwischen Außen- und Innenräumen zu beurteilen. Das TEB-Modell (Abb. 1) prognostiziert die turbulenten Wärmeflüsse in urbanen Strukturen. Durch eine detaillierte Beschreibung der Straßenschluchtenoberflächen wird die Lösung der Energiebilanzgleichungen an Wänden, Straßen und Dächern ermöglicht. Das TEB Modell wird im „offline“ Modus verwendet, d.h. die atmosphärischen Daten oberhalb des betrachteten Gebietes werden aus einer Klimadatei als

Randbedingungen festgelegt. Beide Modelle werden stundenweise für ein ganzes Jahr ausgeführt.

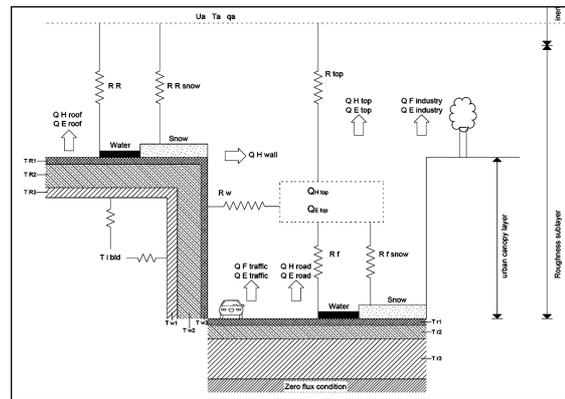


Abbildung 1 Schema des Zweidimensionalen TEB Modells

Simulationen wurden für ein Bürogebäude durchgeführt, das zentral in einer langgestreckten Zeilenbebauung gelegen ist. Der untersuchte Gebäudeabschnitt verfügt über 2 Außenfassaden, die über 5 Etagen verlaufen (s. Abb. 2). Die untersuchten Baukonstruktionen (s. Abb. 3), berücksichtigen sowohl verschiedene Wärmedämmstärken, Massiv- und Leichtbauweisen sowie Lochfassaden bis hin zu vollverglasten Fassaden, entsprechend Tabelle 1.

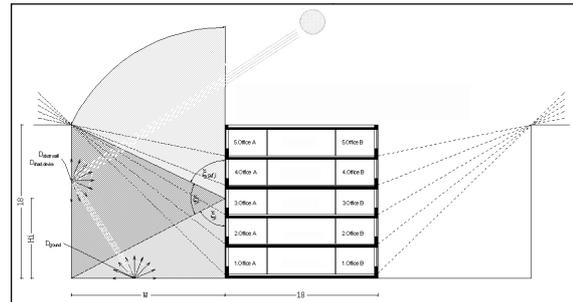


Abbildung 2 Die simulierte urbane Typologie und Bürogebäude

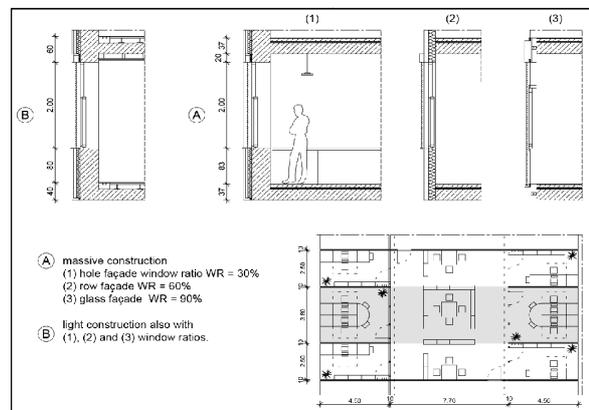


Abbildung 3. Konstruktionsvarianten des untersuchten Bürogebäude

Die Gesamtanzahl an Simulationen mit allen möglichen Kombinationen von Variablen beläuft sich auf 162 für jeden der 3 Standorte (insgesamt 486).

Die Schritt-Werte sind jeweils gleich (weit entfernt), um für die statistische DOE (design of experiments) Analyse vergleichbar zu bleiben, mit dem Ziel, die individuellen Einwirkungen jeder Variablen sowie die 2-Fach- Wechselwirkungen und ihre Hierarchie zu verdeutlichen.

Für die Standorte Algier und Ghardaia wurden die Referenzklimadaten, bereitgestellt durch die Software METEONORM 5.0[®], genutzt. Für Mannheim wurde die Reihe N°12 der Testreferenzjahre herangezogen.

Tabelle 1 Simulationseinstellungen für den urbanen Raum und die Gebäudekonstruktion.

Variablen	kodierte Form		
	-1	0	1
Städtischer Kontext			
A = Vertikales Profil	H/W = 0.2	H/W = 1	H/W = 1.8
B = Sonnenorientierung	NS	NOSW	OW
Gebäudekonstruktion			
C = Fensteranteil	30%: Lochfassade	60%: Bandfassade	90%: Glasfassade
D = Wärmedämmung	U _{Wand} : 0.15 U _{Dach} : 0.10 U _{Fenster} : 0.7	U _{Wand} : 0.40 U _{Dach} : 0.35 U _{Fenster} : 1.5	U _{Wand} : 0.65 U _{Dach} : 0.60 U _{Fenster} : 2.3
E = Thermische Trägheit	Leichte Konstruktion	-	Schwere Konstruktion
Klimatische Randbedingungen			
F = Klima	Mannheim: 49.31°N	Algiers: 36.24°N	Ghardaia: 32.34°N

ERGEBNISANALYSE

Urbane Lufttemperaturen

Abbildung 4 zeigt die minimale Abweichung der urbanen Lufttemperaturen, berechnet mit TEB, für alle Fallbeispiele mit je 1 Kelvin Temperaturspanne.

Es zeigt sich, dass die urbanen Lufttemperaturen hauptsächlich um 1 oder 2 Kelvin höher oder niedriger sind, als die Standard-Klimawerte für alle Standorte, allerdings mit einem klaren Trend zur Erwärmung. Grundsätzlich erfährt der heiß-trockene Wüstenort Ghardaia einen größeren Lufttemperaturanstieg (~ 3K). In Algier dagegen ist die Abkühlung größer. Grund dafür ist wahrscheinlich die dominierende feuchte Luft zusammen mit einer effizienten Verschattung bei häufig klarem Himmel.

Darüber hinaus zeigen die Fehlerbalken den Abweichungsbereich der urbanen Lufttemperatur in Abhängigkeit der unterschiedlichen Kombinationen der Parameter C, D und E. Der Einfluss der Fassadenkonstruktion steigt in Straßen mit hohem Vertikalprofil (H/W = 1.8), bei denen die direkten und diffusen Strahlungsflüsse stärker verändert bzw. reflektiert werden.

Ergänzend zeigt Abb. 5 exemplarisch in einem Fallbeispiel (A = 0, C = -1, D = -1, E = 1) die stündliche und tägliche Entwicklung der urbanen Lufttemperatur für das gesamte Jahr, berechnet mit TEB für Mannheim, Algier und Ghardaia.

Mannheim (49.31 °N, 8.33 °E); Algiers (36.34 °N, 2. 56 °E); Ghardaia (32.24 °N, 3.48 °E)

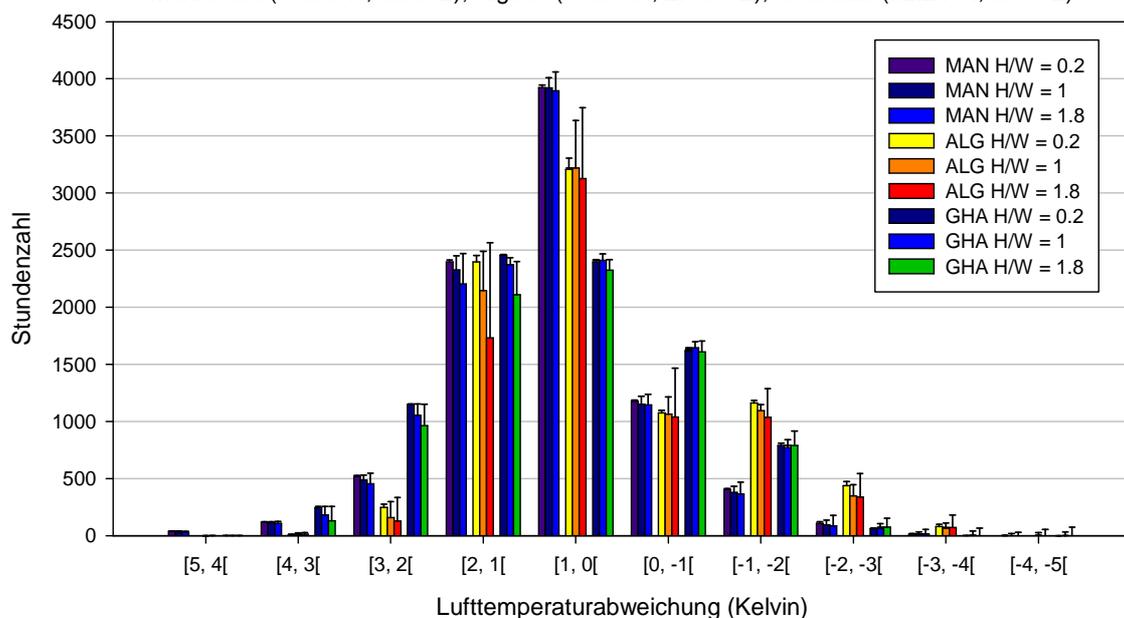


Abbildung 4. Abweichung der Straßenschlucht-Lufttemperatur der Standard-Klimadaten, berechnet mit dem TEB-Modell für Mannheim, Algier und Ghardaia. Die Fehlerbalken stehen für die mögliche Abweichung je nach Gebäudehüllenbau (Wärmedämmung und Wärmespeicherkapazität)

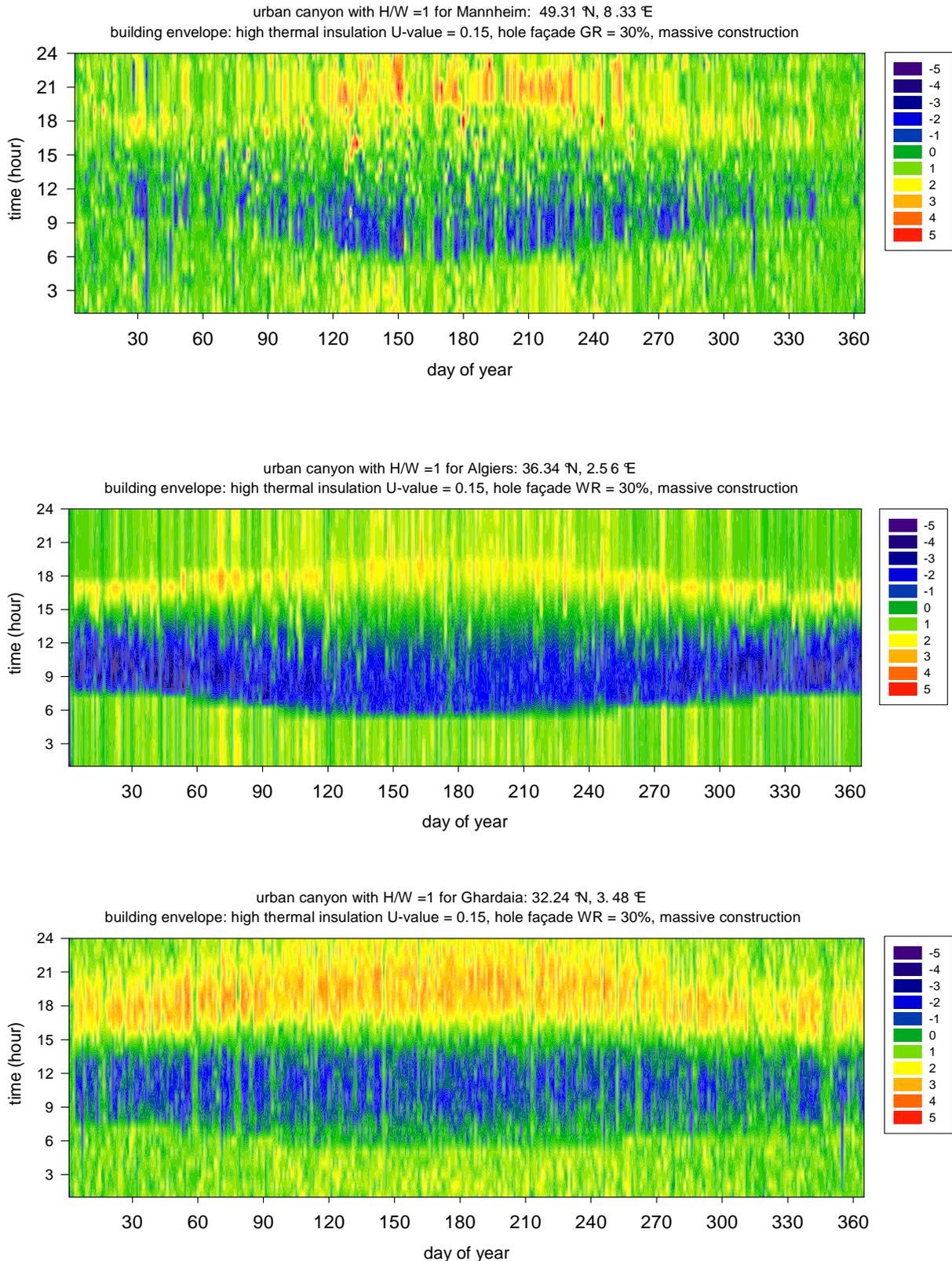


Abbildung 5. Stündliche, tägliche und jährliche Entwicklung der vom TEB prognostizierten urbanen Lufttemperatur für Mannheim, Algier und Ghardaia. Positive Werte entsprechen einer Wärmeinsel im Vergleich zu den als Eingaben verwendeten Standardklimadaten. Negative Werte bedeuten eine Kühleinsel.

Die Abb. 5 bestätigt die Literaturerkenntnisse, dass die Wärmeinsel meistens nachmittags und abends auftritt und in der Sommerzeit von hoher Intensität ist. Spitzen-Wärmewerte werden um 18 Uhr lokaler Zeit erreicht (LST), wenn die am Tag in der Bausubstanz gespeicherte Wärme wieder freigegeben wird. Hingegen tritt die Abkühlung häufiger in den kühlen Morgenstunden auf, wenn die tiefstehende Sonne zur Verschattung im Straßenraum führt.

Die seltene extreme Abkühlung (bis -5 K) ist auf plötzliches Sinken der Lufttemperatur im Referenzwetterdatensatz zurückzuführen, wobei die urbane Lufttemperatur aufgrund ihrer hohen Wärmespeicherkapazität nur langsam darauf reagiert.

Die unterschiedliche Bildardarstellung in Abb. 5 im Fall Mannheim auf der einen Seite und im Fall der Subtropen auf der anderen Seite ist auf die Quelle der Eingabe-Klimadaten zurückzuführen. Für Mannheim wurde ein Testreferenzjahr-Datensatz verwendet, der hauptsächlich aus langfristigen Messdaten (mit statistischer Anpassung) stammt, während die Quelldaten für die Subtropen mit einer Software ermittelt wurden, die in diesen zwei Fällen nur eingeschränkt Messdaten zur Verfügung hatte.

Nutzwärme- und Nutzkältebedarf

Nachdem die urbanen Lufttemperaturen anhand TEB angepasst wurden, wurde TRNSYS 16.1 zur Simulation des thermischen Verhaltens des Gebäudes

eingesetzt. Dabei wurden alle Außenbedingungen, inklusive der verminderten Himmelsicht und Tageslicht- und Solareintrag, verursacht durch die Nachbarbebauung, berücksichtigt.

Abbildung 6 sowie die weiteren Abbildungen zeigen exemplarisch den Fall Mannheim. Im Allgemeinen ist in Abb. 6 klar zu erkennen, dass aufgrund der höheren Lufttemperatur der Stadtklimadaten zur Berechnung eines geringeren Nutzwärmedarfs führt Eine Ausnahme dazu bildet allerdings der enge Canyon in Kombination mit Leichtbauweise bei dem die fehlende Solargewinne, durch Verschattung der Fassaden, einen höheren Heizwärmebedarf verursacht, insbesondere weil die leichte Bauweise keine Wärmespeicherung ermöglicht. Der Bedarf an Kühlung hingegen ist, wenn das Stadtklima betrachtet wird, in allen Fällen größer, denn die höchsten Wärmeinseleffekte treten im Sommer auf, verbunden mit einem erhöhten Risiko der Überhitzung.

Darüber hinaus listet die Tabelle 2 für Mannheim die Parameterkombinationen auf, die zu minimalen und maximalen Nutzwärmebedarf, Kühlbedarf und ihre Addition führen. Dabei wird unterschieden ob (a) Standard-Klimadaten oder (b) Stadtklimadaten verwendet werden, bzw. deren (c) Abweichung Diese Darstellung ermöglicht es, einen zusammenfassenden Überblick über die zahlreichen Fallstudien zu bekommen.

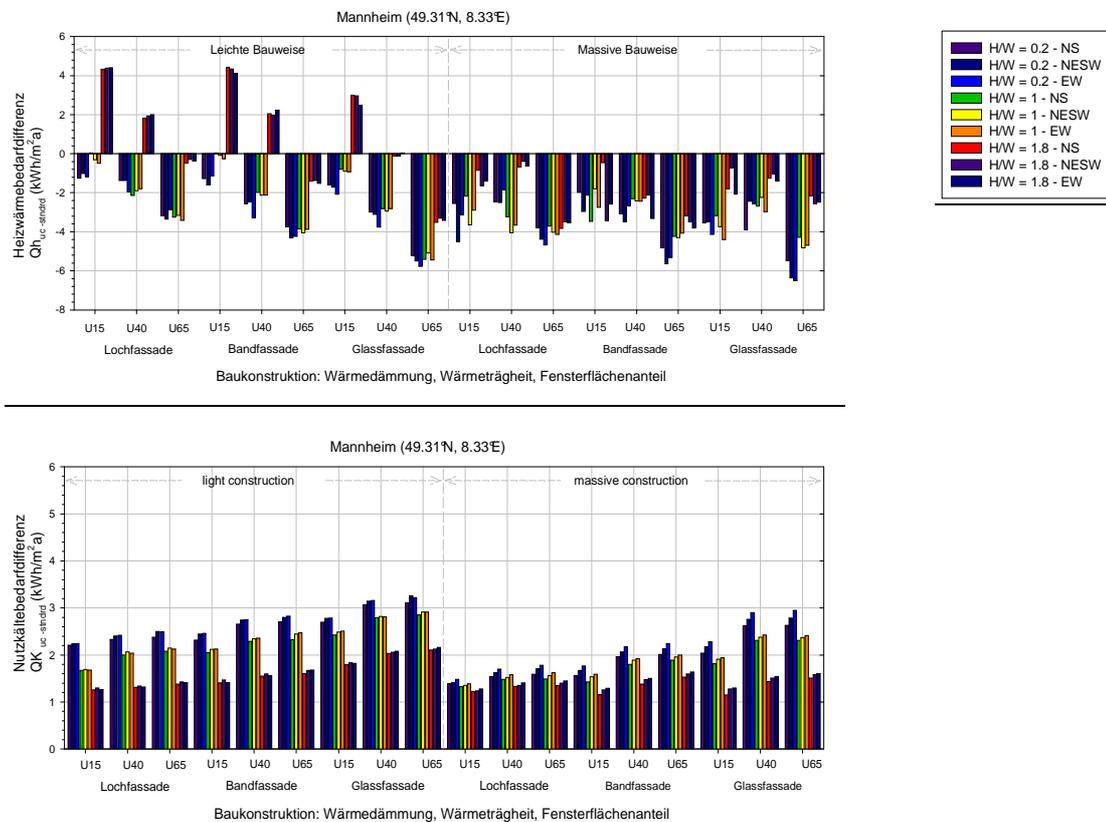


Abbildung 6. Energiebedarfsdifferenz ($Q_{\text{urban climate}} - Q_{\text{standard}}$) zwischen den 2 Datenreihen: 1) mit Stadtklimadaten und 2) mit Standardklimadaten für Heizung und Kühlung

Unter Verwendung von Standardklimadaten ist der Energiebedarf des gesamten Gebäudes für:

- Heizung bei der Kombination von Ganzglass-Leichtbaufassade mit geringer Wärmedämmung, überwiegend für NO-SW bzw. O-W (Solar)Ausrichtung am größten und unabhängig von dem Höhen-Breiten-Verhältnis des canyons. Diese Kombination führt ebenso zu einem maximalem Kühlbedarf, allerdings auch bei mäßiger Wärmedämmung, aber nicht in Verbindung mit engen Straßenschluchten. Die Ausrichtung zur Sonne ist hierbei irrelevant. In der Summe von Heizwärme- und Nutzkältebedarf ist die Kombination Hochverglasung, geringe Wärmedämmung und Leichtbau der energiebedürftigste Fall, denn der Nutzwärmebedarf stellt einem Anteil von über 80 %, gegenüber knapp 20% Nutzkältebedarf, dar. Das vertikale Profil und die Solarausrichtung sind ebenfalls nicht relevant. Gründe dafür sind i) der meist bedeckte Himmel mit einem überwiegende Anteil an Diffusstrahlung und ii) die Betrachtung des gesamten Gebäudes d.h. 2 Ausrichtungen gleichzeitig.
- Demzufolge wird ein minimaler Nutzwärmebedarf durch opake Fassaden mit kleinem Fensterflächenanteil, hoher Wärmedämmung, und massiver Bauweise erreicht und das unabhängig von der Straßengeometrie oder der Solarausrichtung. Das gilt ebenfalls für den minimalen Kältewärmebedarf, wobei die Wärmedämmung hier von geringer Bedeutung ist. Beim Gesamten Nutzenergiebedarf für Heizung und Kühlung führt eine hohe Wärmedämmung und eine große Wärmeträgheit zusammen mit geringen bzw. mittleren Fensterflächenanteilen und relativ hoher Wärmedämmung, wie beim Heizen zu den niedrigsten Werten.

Bei der Verwendung von Stadtklimadaten, können, im Vergleich zum ersten Datensatz, folgende Unterschiede beobachtet werden:

- Das vertikale Profil wird relevanter für die maximalen Werte des Heizwärme- und Kühlbedarfs.. Nur breite Straßen führen zu mehr Kühlbedarf, während enge Straßen den Bedarf an Heizenergie erhöhen. Grund dafür sind die i.R. die, im Vergleich zum Standard-Klimadatenatz, höheren Lufttemperaturen im Sommer und die tieferen Lufttemperaturen im Winter. Die minimalen Werte bleiben hingegen relativ unberührt.
- Im Vergleich sind die absoluten Werte für die Heizung niedriger und für die Kühlung höher und das sowohl für die Minima als auch für die Maxima. In der Summe weist die Verwendung von Stadtklimadaten leicht niedrigere Werte des Energiebedarfs auf. Das ist nicht überraschend, da aufgrund vorhandener Wärmeinseln mit ihren

entsprechenden Temperatursmilderungseffekten auf die Winterbedingungen der Energiebedarf während der in Mannheim dominierenden Heizperiode gemindert wird.

Tabelle 2. Parameterkombinationen für minimale und maximale Nutzwärme- und Nutzkältebedarfswerte in Mannheim

MANNHEIM (49.31 °N, 8.33 °E)						
mit Standardklimadaten	Heizung H		Kühlung K		H & K	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.
A vertikales Profil	-	-	-	-1,0	-	-
B Solarausrichtung	(-1), 0, 1		-	-	-	-
C Fensterflächenanteil	-1,0	1	-1, (0, 1)		1	-1,0
D Wärmedämmung	-1,0	1	-	0,1	-1,0	1
E Wärmeträgheit	1	-1	1	-1	1	-1
min.	26,5		1,75		28,7	
max.	70,28		20,73		87,5	
x < min. +10%	30,88		3,65		34,58	
x > max. -10%	65,90		18,83		81,62	
Q Bereich	43,78		18,98		58,8	
mit Stadtklimadaten	heating H		cooling C		H & C	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.
A vertikales Profil	-	0,1	-	-1	-	-
B Solarausrichtung	-	-	-	-	-	-
C Fensterflächenanteil	-1,0, (1)	1	-1,0, (1)		1	-1,0
D Wärmedämmung	-1,0	1	-	0,1	-1,0	1
E Wärmeträgheit	1	-	1	-1	1	-1
min.	24,73		2,95		28,61	
max.	66,97		23,94		85,06	
x < min. +10%	28,95		5,05		34,26	
x > max. -10%	62,75		21,84		79,42	
Q Bereich	42,24		20,99		56,45	
Werte in kWh/m ² .a. Die kodierte Form, wie in Tabelle 1, wird hier verwendet. Das minus Symbol "-" bedeutet dass alle 3 Varianten -1,0 und 1 gleich auftreten						

Wie aus der Tabelle 3 zu entnehmen ist, gilt diese Feststellung allerdings nicht für die untersuchten subtropischen Orte Algier und Ghardaia, wo der Bedarf an Kühlenergie das Hauptproblem darstellt. Hier wirkt sich das Stadtklima negativ auf das thermische Verhalten des Gebäudes mit einem steigendem Bedarf an Energie aus, um die Überhitzung der Räume zu vermeiden.

Tabelle 3. Vergleich der minimalen und maximalen Nutzenergiebedarfe für Standard- und Stadtklimadaten für Mannheim, Algier und Ghardaia

Nutzenergiebedarf (kWh/m ² .a) for:		Heizung H	Kühlung K	H & K	
MANNHEIM	standard Klimadaten	min.	26,5	1,75	28,7
		max.	70,28	20,73	87,5
	Stadtklimadaten	min.	24,73	2,95	28,61
		max.	66,97	23,94	85,06
ALGIER	standard Klimadaten	min.	21,14	25,68	56,89
		max.	41,43	74,39	99,02
	Stadtklimadaten	min.	20,76	27,85	60,11
		max.	62,56	78,09	100,28
GHARDAIA	standard Klimadaten	min.	13,66	111,16	130,36
		max.	26,95	200,18	217,82
	Stadtklimadaten	min.	13,61	123,2	140,47
		max.	26,98	221,21	235,83

Abbildung 7 stellt für die Stadtklimadatenreihe die wichtigsten Haupteffekte und 2-fach-Wechselwirkungen der untersuchten Parameter dar. Die große Rolle der Wärmedämmung D und des Fensterflächenanteils C u. A. im Zusammenhang mit der Bauart E und der urbanen Geometrie A ist hier eindeutig. Das vertikale Profil A hingegen ist wie erwartet für diese geographische Lage und dieser Klimazone weniger entscheidend. Die Solarausrichtung B ist nicht relevant, denn die hier angezeigten Ergebnisse sind Mittelwerte für alle 10 Zonen des untersuchten Gebäudes.

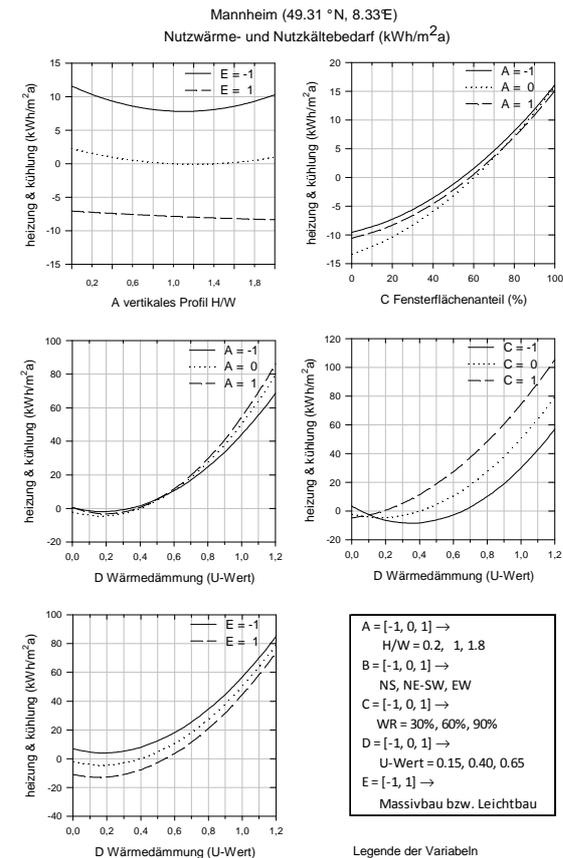


Abbildung 7. Haupteffekte und 2-fach-Wechselwirkungen aller untersuchten Parameter auf den Gesamten Nutzenergiebedarf

SCHLUSSFOLGERUNG

Diese Untersuchung zeigte den Zusammenhang zwischen der städtebaulichen Ebene und der Gebäudeebene in Bezug auf Klima und Energiebedarf. Die Ergebnisse weisen nach, dass die Wärmeinsel bzw. Kühleinsel zeitlich und räumlich sehr variabel ist und nur anhand von numerischer Modellierung (wenn nicht messtechnisch) mit ausreichender Genauigkeit abgebildet werden kann (auch Ali-Toudert 2010b). Es ist nicht fachgemäß die urbane Lufttemperatur „pauschal“ auf 1 oder mehrere Kelvin höher als die Landklimadaten zu setzen, um die Stadtklimaefekte in Gebäudeanalysen

mit zu berücksichtigen. Des Weiteren zeigte diese Studie, dass die urbane Geometrie sowie die Baukonstruktion eine entscheidende Rolle im thermischen Verhalten des städtischen Gebäudes spielen. Eine Hierarchisierung dieser Parameter ist möglich. Ein wesentlicher Nachteil dieser Methodik ist ihr Zeitaufwand, so dass sie bei der alltäglichen Thermischen Gebäudesimulation durch Architekten bzw. Bauingenieure nicht denkbar. Deshalb ist es notwendig ein Rechenwerkzeug zu entwickeln, das gleichzeitig Außen- und Innenraumklima und deren Auswirkungen modelliert. Diese Aufgabe ist eine weitere Komponente des Projektes.

DANKSAGUNG

An die Deutsche Forschungsgemeinschaft: www.dfg.de für die finanzielle Förderung.

LITERATUR

- Ali-Toudert, F. 2010a. Heating and cooling Energy Demand of urban office buildings in the subtropics: Relevance of the urban microclimate, urban geometry and building construction. 9th RHEVA Conference CLIMA. Antalya. May 9-12.2010
- Ali-Toudert, F. 2010b. Sensitivity analysis on the effects of urban structure properties on the urban microclimate and energy demand of urban buildings. WREC Congress. 25-30 Sept. 2010. Abu Dhabi. United Arab Emirates.
- Ali-Toudert, F. 2009. Energy Efficiency of urban buildings: Significance of urban geometry, building construction and climate. International Conference CISBAT, Lausanne, Switzerland. Sep. 2-3 2009
- Masson, V. 2000. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models, Boundary-Layer Meteorology, 94, 357-397.
- TRANSSOLAR 2010. <http://www.transsolar.com/>

EMPRICAL AND COMPUTATIONAL STUDY OF THE THERMAL PERFORMANCE OF A TRADITIONAL HOUSING TYPE IN KOSOVO

Albana Rexhepi, Ardeshir Mahdavi
 Building Physics and Building Ecology
 Vienna University of Technology, Austria

ABSTRACT

The present paper includes a study focused on the thermal performance of an instance of traditional (housing) buildings in Kosovo, known as Kulla. The study included both measurement of indoor-environmental (thermal) building performance and parametric simulation to study possible improvement scenarios. Five buildings were selected. Measurements showed that these buildings require no cooling. Annual required heating energy is around $90 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$, which, with proper thermal treatment, could be reduced up to 70%.

INTRODUCTION

Kullas represent a special type of traditional housing in Kosovo. Apart from their cultural significance, Kullas have been regarded as having sustainable features in terms of climatic adaptation, energy efficiency, and the use of local materials. As a type of housing, Kulla appears in the beginning of the 18th century and it continued to be built until the later period of 19th century. Its development was influenced by social and cultural constraints as well as parameters related to availability of building materials and construction skills. At the present time Kullas are considered part of national cultural heritage and face, unfortunately, the danger of extinction.

Most available studies on Kullas are limited to historical and typological observations, neglecting the necessity of detailed physical study of their performance from the environmental point of view. In this context, the present study aims to investigate the thermal performance of this type of traditional housing both in their current conditions and under the assumption of possible improvements. The study involved the following:

- a) Long-term monitoring of thermally relevant indoor environmental conditions in selected buildings in the region of Dukagjini, Kosovo;
- b) Evaluation of the existing indoor climate conditions based on the monitoring results;
- c) Generation of calibrated simulation models of these buildings;
- d) Simulation-based comparison and evaluation of alternative thermal improvement scenarios for the selected buildings.

APPROACH

Case studies

Five buildings were selected as subject of this study (see Figures 1 to 10). They were categorized depending on being fully occupied, partially occupied, or not occupied.

Table 1 Overview of selected buildings

Code	K1	K2	K3	K4	K5
Approximate date of Construction	1800	1810	1800	1825	1850
Total floor area [m ²]	228	263	303	183	220
Occupancy	Partial	Non	Full	Non	Partial

A long-term data monitoring campaign was carried out in these buildings. In four buildings measurements were conducted from August 2008 to July 2009, in one building measurements could be conducted for 3 months only (August 2008 to December 2008). Ten data-loggers collected periodically (every 15 minutes) information regarding indoor air temperature [°C], relative humidity [%], and illuminance [lx]. The loggers were placed in different spaces inside buildings (living room, fire room, ground floor hall). External weather data was provided from local meteorological station in Prishtina, (IHMK 2008-2009). Since this data was not detailed enough, it was combined with synthetic weather files (generated via Meteotest 2008).



Figure 1 Exterior view of building K1

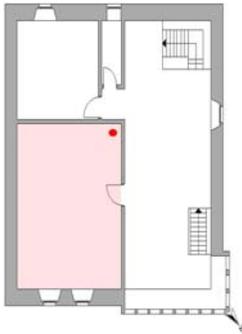


Figure 2 Building K1, view of typical floor plan with sensor position; fire room 3rd floor

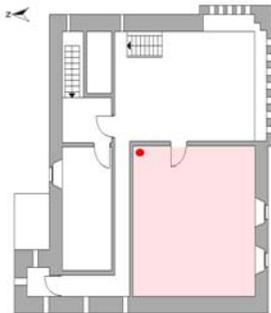


Figure 3 Building K2, view of typical floor plan with sensor position; fire room 3rd floor



Figure 4 Exterior view of building K2

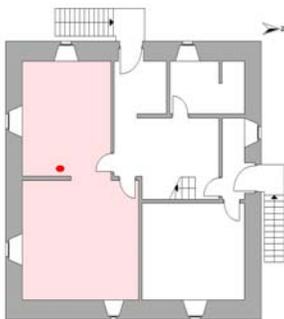


Figure 5 Building K3, view of typical floor plan with sensor position; living room 3rd floor



Figure 6 Exterior view of building K3

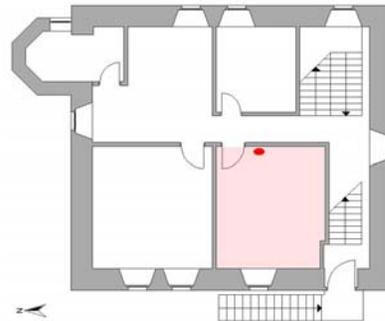


Figure 7 Building K4, view of typical floor plan with sensor position; living room 4th floor



Figure 8 Exterior view of building K4

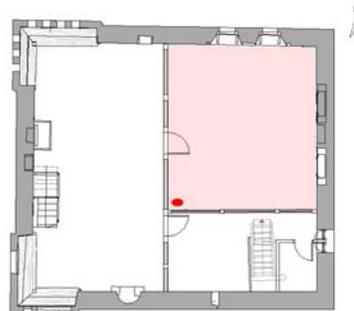


Figure 9 Building K5, view of typical floor plan with sensor position; fire room 3rd floor



Figure 10 Exterior view of building K5

Measurements data analysis

Collected data was analyzed and interpreted in view of the building's thermal performance and comfort conditions. Monitored indoor conditions were depicted in terms of psychrometric charts, which include comfort zones as per the adaptive thermal comfort theory (Szokolay 2007). Additionally, PMV and PPD values (Fanger 1970) were derived based on measurements and auxiliary assumptions regarding occupants' activity and clothing.

Calibration of Simulation Models

Measurements of indoor thermal parameters in the buildings not only inform about Kullas' current thermal performances, but also facilitate simulation model calibration (Mahdavi et al. 2004). However, simulation calibration requires also detailed weather information. Weather files from local weather station in Prishtina (IHMK 2009) did not contain sufficient data. Thus, available local weather information was compared with a detailed synthetic weather file for the region (generated using Meteotest 2008). As a result, periods in detailed weather file could be identified, which sufficiently resembled measured data. Such periods were then used for the simulation calibration process. To illustrate this point, Figure 11 shows for a sample day (out of the period selected for simulation calibration), the outdoor air temperature as measured by the local Weather Station in Prishtina versus the Meteotest data.

To illustrate the performance of the calibrated simulation model, Figures 12 to 15 show measured and simulated indoor air temperatures in buildings K1 to K4 for a day out of the calibration period.

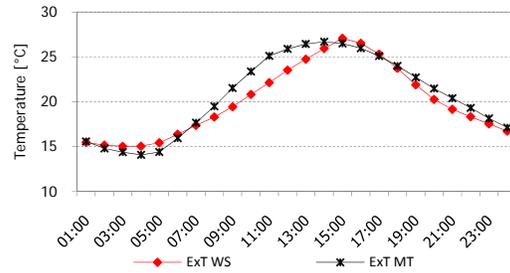


Figure 11 Comparison of external temperature from weather stations file (WS) and meteotest (MT), in a segment from the time period selected for model calibration

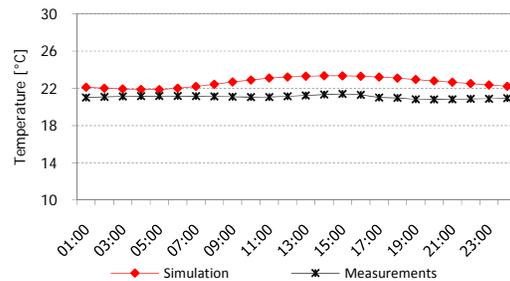


Figure 12 Comparison between simulated and measurements results for K1

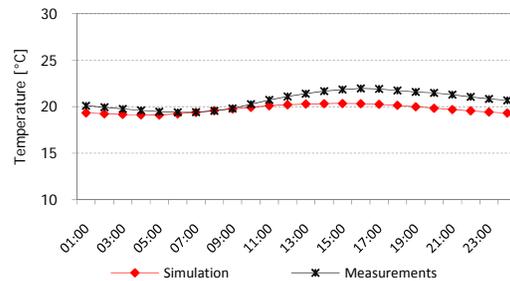


Figure 13 Comparison between simulated and measurements results for K2

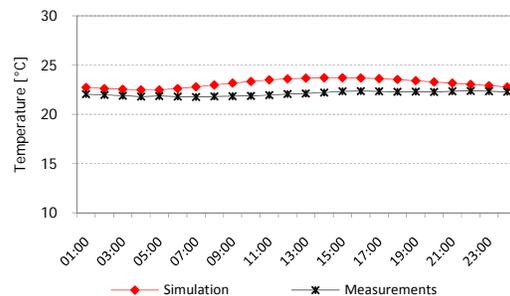


Figure 14 Comparison between simulated and measurements results for K3

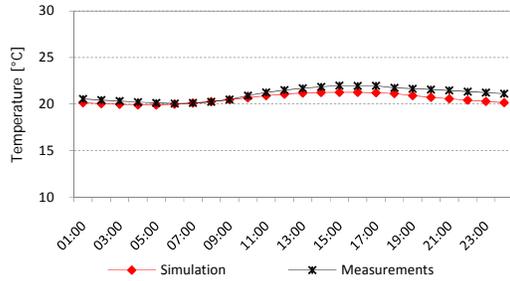


Figure 15 Comparison between simulated and measurements results for K4

Parametric Simulation

A base case (BC) and two improvement scenarios (S1, S2) were considered for parametric simulations. Table 2 includes construction information for the base case scenario representing the assumed existing state of the buildings. Table 3 shows the first thermal improvement scenario. Thereby, the windows' glazing was virtually replaced with low-e triple glazing. Moreover, the thermal insulation of the roof was improved in this scenario. Table 4 shows the second thermal improvement scenario, which adds the thermal insulation improvement of the external walls to the first scenario. Given the historical status of these buildings, thermal insulation improvement cannot be performed on the façade. Insulation panels must thus be installed on the inside of the external walls. As this solution might cause condensation inside the walls, a preliminary computational examination of the condensation risk was conducted. The results suggest that such risk is not critical. Table 5 summarizes (for BC, S1, and S2) the internal loads (people, lighting, and equipment), assumed air change rates, and the applicable room set point temperatures.

Table 2 Overview of the base case (BC) Simulation Scenario

BUILDING	DESCRIPTION
K1, K3, K4, K5	$U_{\text{Wall}} = 2 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$; $U_{\text{Window}} = 2.9$; $U_{\text{Roof}} = 0.5$; $g = 0.75$
K2	$U_{\text{Roof}} = 2 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$; $U_{\text{Window}} = 5.8$; $g_{\text{Window}} = 0.85$

Table 3 Overview of the first improvement scenario (S1)

BUILDING	DESCRIPTION
K1 to K5	$U_{\text{Window}} = 0.96 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$; $U_{\text{Roof}} = 0.18$; $g = 0.55$

Table 4 Overview of the second improvement scenario (S2)

BUILDING	DESCRIPTION
K1 to K5	$U_{\text{Window}} = 0.96 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$; $U_{\text{Roof}} = 0.18$; $g = 0.55$; $U_{\text{Wall}} = 0.3$

Table 5 Summarized internal gains, air change rate, and temperature set points, (BC)

	Buildings				
	K1	K2	K3	K4	K5
Internal Gains [W.m^2]					
Occupants	0.3	-	-	-	-
Lighting gain	7.5	-	5.6	6	7.4
Air change rate [h^{-1}]	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Temp. set points [$^{\circ}\text{C}$]					
Rooms	20	20	20	20	20
Bathroom	22	22	22	22	22
Staircase-hall	16	16	16	16	16

RESULTS

Evaluation of the existing indoor conditions

Figures 16 to 19 depict measured indoor conditions (in K1, K3, and K4) in terms of psychrometric charts (for July 2009).

Table 6 shows derived mean monthly PPD values in K1, K3, and K4.

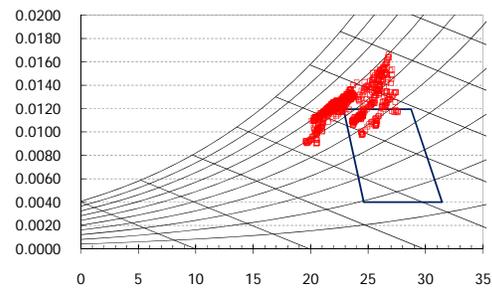


Figure 16 Psychrometric chart, fire room, K1 (partially occupied), July

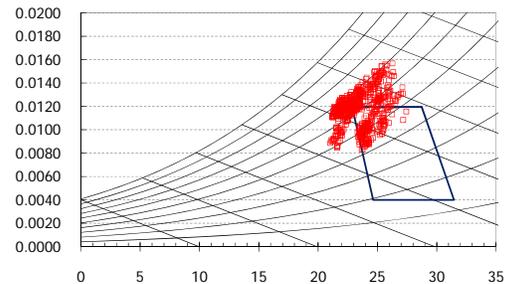


Figure 17 Psychrometric chart, living room, K3 (fully occupied), July

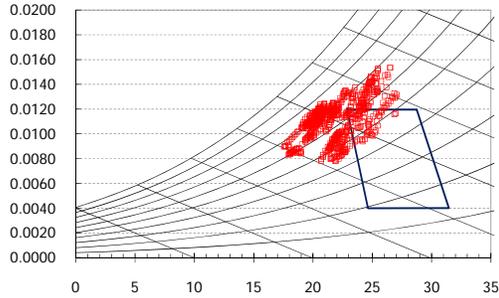


Figure 18 Psychrometric chart, living room, K4 (non occupied), July

Table 6 Mean monthly PPD [%], buildings K1, K3, and K4; non, full and partially occupied

Month	Buildings/Rooms					
	K1		K3		K4	
	LR	FR	LR	FR	LR	FR
August	6.3	10.6	8	11.2	9.7	-
September	46.7	48.8	20	57.5	57.1	-
October	58.5	55.5	33	74.9	68.7	-
November	36.2	26.3	11.6	39.4	38.1	-
December	99.1	95.2	25.7	97.7	99.8	-
January	99.9	99.9	26.2	99.4	99.9	-
February	99.9	99.9	14.3	99.8	99.9	-
March	99.7	99.7	34.2	93.2	99.9	-
April	87.4	84.9	35.8	92.5	93.9	-
May	56.6	45.1	19.4	47.9	57.6	-
June	44.8	39.6	26.2	44.4	55.2	-
July	-	13.6	10	16.6	22.9	-

Simulation results

Figure 19 shows simulated indoor temperature in K3 (living room) for the year's warmest day (21st of July, 2009).

Figures 21 to 25 illustrate the simulated heating loads for all buildings and scenarios (BC, S1, and S2).

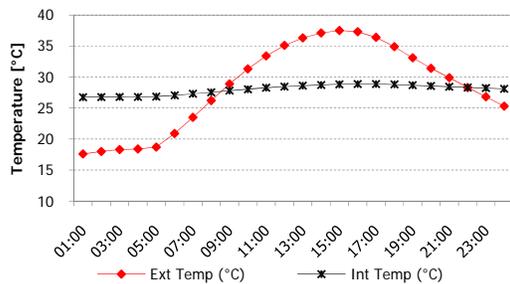


Figure 19 Simulated indoor temperature (21st of July, 2009), K3, living room, together with the external temperature data from the weather file

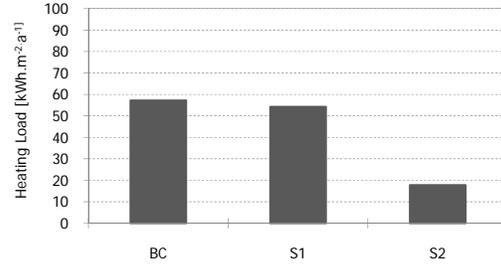


Figure 20 Simulated heating loads for building K1

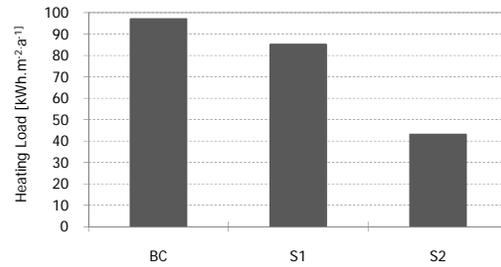


Figure 21 Simulated heating loads for building K2

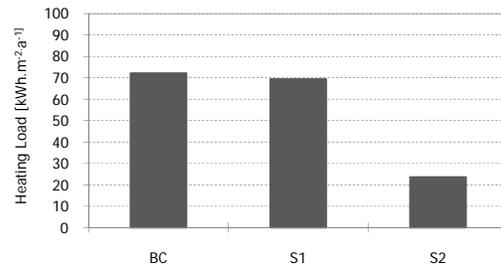


Figure 22 Simulated heating loads for building K3

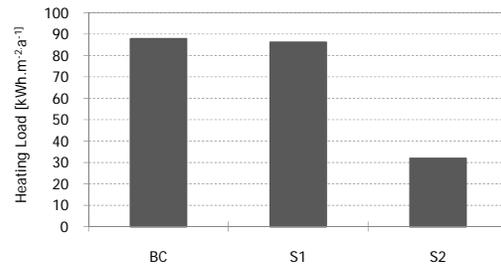


Figure 23 Simulated heating loads for building K4

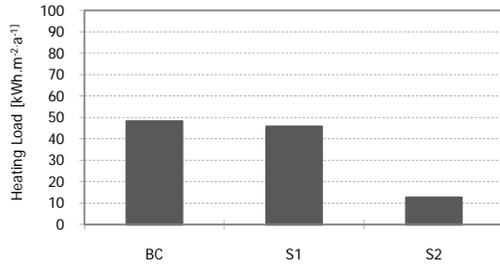


Figure 24 Simulated heating loads for building K5

DISCUSSION

The results of the thermal comfort analysis with psychrometric charts suggest that during the warmest month of the year (July) indoor air temperatures in Kullas stay well below the upper bound of the recommended comfort temperature. In fact, PMV estimations suggest that even in summer the buildings' indoor conditions are perceived as slightly cool, or cold.

Simulated indoor conditions during the year's warmest day (21st of July, 2009) illustrate the effect of the building's high thermal inertia (Figure 19). While external temperature reach a peak value of 37.5 °C, indoor air temperature in the living room (K3) fluctuated very little and stayed under 29 °C.

As to the parametric simulations of heating loads, improvement potential due to better window and roof insulation brought about, compared to the base case, only a modest reduction of the calculated heating loads (2 to 12 %). The main reason for this circumstance is the relatively small fraction of window and roof areas compared to the total area of the building envelope.

Once the external walls are included in the improvement scenario (S2), a much higher heating load reduction potential is revealed (60 to 75%).

Future studies will explore a richer set of thermal improvement options for parametric simulation runs. Moreover, the potential for active solar energy gain through solar collectors and PV cells will be examined toward coverage of the buildings electrical power and heating energy requirements.

REFERENCES

- EDSL 2010 Tas version 9.1 Environmental Design Solutions Limited <http://edsl.net>.
- Fanger, PO,1970. Thermal Comfort. Danish Technical Press, Denmark.
- IHMK 2009, Instituti i Hidro Meterologjisë së Kosovës.
- Meteotest 2008. Meteonorm version 6.0. www.meteonorm.ch.
- Szokolay, S. 2004. Introduction to Architectural Science. ISBN-13: 978-0-7506-5849-2. Pp 16-22.
- Mahdavi, A., Orehounig, K., Mikats, N. Lambeva L. and El-Habashi A. 2007. Analyzing Traditional Buildings via Empirically Calibrated Building Performance Models. Proceeding of IBPSA 2007 (10th International Building Performance Simulation Association Conference and Exhibition. Beijing, China, 3-6 September 2007). ISBN 0-9771706-2-4. pp. 71-78

A STUDY INTO THE THERMAL PERFORMANCE OF LOW-RISE OFFICE BUILDINGS IN GHANA

Christian Koranteng¹ and Ardeshir Mahdavi²

¹Department of Architecture

Kwame Nkrumah University of Science and Technology, Kumasi, Ghana

²Department of Building Physics and Building Ecology

Vienna University of Technology, Austria

ABSTRACT

This paper illustrates the results of the thermal conditions in a selected number of office buildings in Kumasi, Ghana. The monitored data was used to evaluate indoor environmental conditions and to calibrate a number of thermal simulation models of the buildings toward reduction of cooling requirements. Moreover, the impact of thermal retrofit measures in reducing carbon dioxide emissions was assessed and the amortization times for investments in such retrofit measures were estimated. Improvements in building fabric and controls (with payback times of 3 to 12 years) could reduce buildings' cooling loads (20% to 35%) and CO₂ emissions around 27%.

INTRODUCTION

In Ghana, the growing demand for energy is caused by, amongst other factors, the increasing use of air-conditioners in buildings. This is mainly the consequence of Ghana's regional (warm and humid) climatic characteristics (Figure 1).

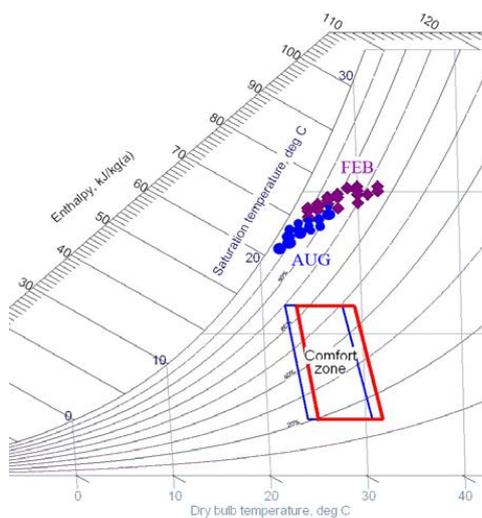


Figure 1 Mean hourly outdoor temperature and relative humidity values in Kumasi for representative days in the months of February and August (based on data generated via Meteotest 2008)

Moreover, the energy supply falls short of demand. The Energy Commission Ghana (ECG, 2007) reports that the energy use of households increased from 26% (of total national energy use) in 2000 to 37% in 2005. Within the same period, energy use of the commercial sector doubled (7% to 14%). In 1990, Ghana had a surplus of electricity of 3545 GWh, whereas in 2004, a deficit of 203 GWh was recorded.

Currently, the local practices in building design and construction are typically not supported by systematic analysis and evaluation of thermally relevant building features (orientation, envelope, glazing ratio, shading devices, and thermal mass). Thus, design decision making is not sufficiently informed by relevant expertise regarding energy-efficient building design methods and technologies.

In this context, the present paper pursues the following objectives:

- a) Long-term monitoring and evaluation of the thermal conditions (including interviews on occupants thermal perception) in a selected number of office buildings in Kumasi, Ghana.
- b) Generation of calibrated simulation models of these buildings.
- c) Simulation-based exploration of thermal retrofit options toward reduction of cooling demand.
- d) Assessment of carbon dioxide (CO₂) emissions and retrofitting evaluation.

METHOD

Selection of buildings

Five office buildings in Kumasi were selected for the studies (see Table 1 and Figure 2 to 6). These buildings are representative of the majority of existing low-rise office buildings in Kumasi. The applied cooling systems typically involve split air-conditioning units.

Table 1
 Overview of the selected office buildings with
 function, net floor area (in m²) and thermal controls

OBJECT	FUNCTION	FLOOR AREA	THERMAL CONTROL
CAP	University	795	Mixed mode
KCR	NGO	1100	Air-conditioned
ANG	Private	365	Air-conditioned
ROY	Construction company	1740	Air-conditioned
DCD	Community	280	Naturally ventilated

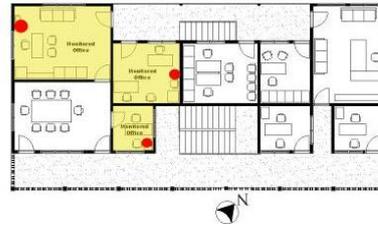


Figure 6 Schematic plan of offices in DCD

Air temperature and relative humidity values were measured both inside (in a number of office rooms in each building) and outside the buildings over a period of 12 months (September 2007 to August 2008). The location of the installed data loggers inside each building are marked in the respective schematic floor plans (Figure 2 to 6).

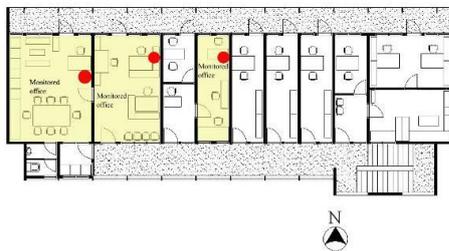


Figure 2 Schematic plan of offices in CAP



Figure 3 Schematic plan of offices in KCR



Figure 4 Schematic plan of offices in ANG

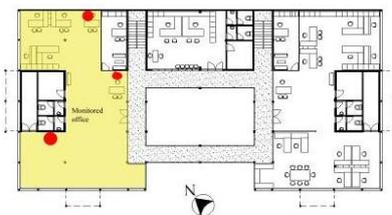


Figure 5 Schematic plan of offices in ROY

Monitored environmental data

Detailed meteorological data for Kumasi could not be obtained. Only daily maximum and minimum values of air temperature and relative humidity were available. Due to budgetary constraints, dedicated weather stations could not be used at each building's location. Therefore, low-cost data loggers were also applied to monitor outdoor air temperature and outdoor relative humidity.

Indoor thermal conditions

To evaluate the existing indoor climate conditions, measured air temperature and relative humidity values were plotted in psychrometric charts. Further, the occupants were interviewed on their views on indoor climate. In all, 64 occupants answered a set of questions.

Calibration of the simulation tool

A thermal simulation application (EDSL, 2008) was used to explore measures that could improve the thermal performance of office buildings in Ghana. To enhance the reliability of this parametric exploration and effectively evaluate the designs, the simulation models were calibrated based on measured data (this is against the background that system performance declines with time, precise prediction of internal loads, etc). We followed a strategy documented in previous publications (see, for example, Mahdavi et al., 2007). As detailed and comprehensive outdoor weather information was not available, we identified segments of a synthetic weather file for Kumasi (generated via Meteotest, 2008) that matched our own measurements of outdoor conditions. Indoor air temperatures were then simulated using the above mentioned weather file segments and compared with the measured indoor air temperatures. Thereby the assumed infiltration values (day/night ACH = 2-20/0,5-3 h⁻¹) was

based on the different fenestration of the buildings (louvre blade, sliding glass and curtain wall).

Parametric study of thermal improvement scenarios (Active case)

Using the calibrated thermal performance simulation models, we explored various improvement options (concerning glazing and shading, ventilation, thermal mass, efficient lighting) that could reduce cooling loads as well as the need for extensive active devices for air-conditioning. Information regarding the various scenarios considered for the simulations is summarized in Tables 2 and 3. Cooling energy loads (sensible and latent) were used as the performance indicator (active operation assumption).

Table 2
Overview of base case simulation scenarios

CODE	SCENARIO	DESCRIPTION
BC1	Base case CAP	$U_{\text{walls}} = 3.4 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$; $U_{\text{window}} = 5.8 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$; $g_{\text{window}} = 0.82$; day/night ACH = 1/0.5 h^{-1} ; lighting load = 6 W.m^{-2} ; occupants' load = 10 to 14 W.m^{-2} ; equipment load = 1 to 7 W.m^{-2} ; floors carpeted, no attic space
BC2	Base case KCR, ANG, DCD	Similar to BC1, but attic space with: $U_{\text{attic floor}} = 3.4 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$; $U_{\text{window}} = 2.7 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$; $g_{\text{window}} = 0.49$; floors carpeted, attic space
BC3	Base case ROY	Similar to BC1, but: $U_{\text{window}} = 5.5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$; $g_{\text{window}} = 0.66$; floors carpeted, no attic space

Table 3
Overview of simulated improvement scenarios

CODE	SCENARIO	DESCRIPTION
IWA	Improved wall insulation	$U_{\text{walls}} = 0.4 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$;
IWI	Improved windows	$U_{\text{window}} = 1.8 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$; $g_{\text{window}} = 0.29$;
IAT	Improved attic fl. insulation	$U_{\text{attic floor}} = 0.4 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
TMA	Thermal mass	Floor carpets removed
NVE	Night ventilation	Day/night ACH = 1/10 h^{-1}
NVT	TMA+NVE	See TMA and NVE
ELI	Efficient elec. lighting	Lighting load = 2 W.m^{-2}
CII	Combined improvements CAP, ROY	$U_{\text{window}} = 1.8 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$; $g_{\text{window}} = 0.29$; day/night ACH = 1/10 h^{-1} ; Lighting load = 2 W.m^{-2}
CI2	Combined improvements KCR, ANG, DCD	$U_{\text{attic floor}} = 0.4 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$; $U_{\text{window}} = 1.8$; day/night ACH = 1/10 h^{-1} ; Lighting load = 2 W.m^{-2}

Parametric study of thermal improvement scenarios (Passive case)

In the passive operation assumption (PC, Table 3), combined improvement scenarios (high mass, efficient lighting, improved windows and natural ventilation) were deployed to explore the possibility of operating the building without air-conditioning. To evaluate the resulting thermal comfort conditions, three options were considered:

First, the mean overheating (OH_m) was used (see Eq. 1).

$$OH_m = \sum_{j=1}^n \frac{\theta_{i,j} - \theta_r}{n} \quad (1)$$

Here $\theta_{i,j}$ denotes the mean indoor air temperature ($^{\circ}\text{C}$) at hour j (averaged over all simulated office zones in the floor), θ_r the reference indoor air temperature (neutrality temperature for 90% acceptability (Szokolay, 2004)) for overheating ($^{\circ}\text{C}$), and n the total number of occupied office hours. The term $\theta_{i,j} - \theta_r$ was considered for those hours when $\theta_{i,j} > \theta_r$. The reference indoor temperature (neutrality temperature) for Kumasi was calculated to be - depending on the time of the year - between 25.4 $^{\circ}\text{C}$ (August) and 26.5 $^{\circ}\text{C}$ (February).

Second, the temperature and relative humidity values, together with assumption regarding clothing value ($CLO = 0.7$), metabolic rate ($MET = 1$), and air speed (0.07 to 0.21 m.s^{-1}) were used to determine the predicted mean vote (PMV) and the predicted percentage of dissatisfied (PPD) (Fanger, 1973). Thereby, based on the results of previous research on natural ventilation (Proeglhof, 2004), the following relationship (Eq. 2) was applied to convert air change rate assumptions into air speed assumptions:

$$v = (ACH + 3.43)/63.1 \quad (2)$$

Here, v denotes air speed (in m.s^{-1}) and ACH air change rate (in h^{-1}).

Third, the indoor air temperatures and relative humidity values were plotted on psychrometric charts together with respective comfort zones derived based on the adaptive thermal comfort theory (Szokolay, 2004). Given the high relative humidity values, an extension of the comfort zone was considered via higher fan-induced air velocities (0.5 - 1.5 m.s^{-1}) to harness the effect of physiological cooling (Szokolay, 2004).

Energy use, CO2 emissions and retrofitting evaluation

Moreover, the energy use and associated CO_2 emissions as well as energy expenses were estimated

for the base case (BC) and combined improvement scenarios (CI). Toward this end, simulated cooling loads, assumed efficiency of the split air-conditioning systems, unit price of electricity, and assumptions pertaining to applicable energy mix in Kumasi, Ghana (IEA, 2006) were deployed. The retrofitting options were assessed economically, taking the energy use saving potential into account and using a simple payback analysis approach.

RESULTS

Measured external air temperature values

Figure 7 shows the comparison of our outdoor temperature measurements "DL" (averaged over the office locations) with an average temperature "MET" obtained as the mean of maximum and minimum temperatures recorded by the Kumasi's official weather station. These results suggest a good agreement.

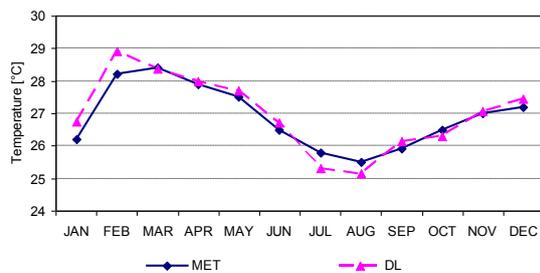


Figure 7 Comparison of mean outdoor temperature measurements at office locations (DL) with Kumasi weather station data (MET)

Indoor thermal conditions

Selected psychrometric charts (for buildings CAP and KCR) with measured indoor temperature and relative humidity values are given in Figure 8 and 9.

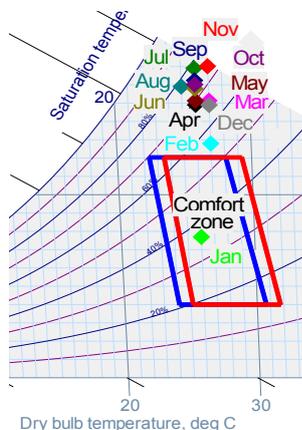


Figure 8 Mean daily temperature and relative humidity values (averaged over all days in a month) in CAP building.

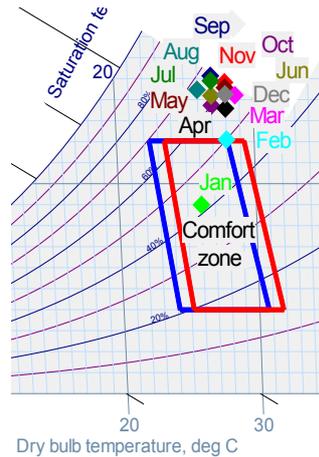


Figure 9 Mean daily temperature and relative humidity values (averaged over all days in a month) in KCR building (based on measured data from 8 am to 5 pm)

Figure 10 demonstrates the occupants subjective view of thermal conditions prevailing at the workspaces. The results on their aggregate opinion suggests satisfactory conditions contrary to the psychrometric chart plots (Figure 8 and 9). The representations of the plots outside the comfort zone are due to the higher relative humidity values and not the temperature.

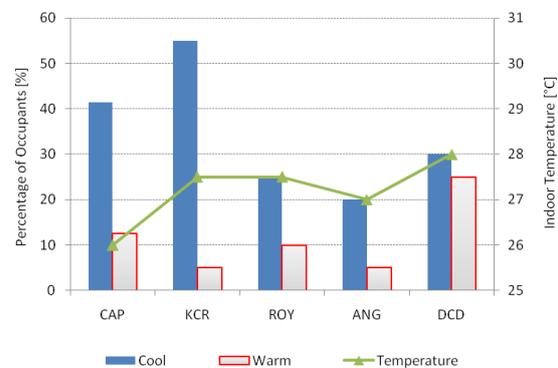


Figure 10 Occupants perception of thermal comfort during the year

Weather file versus measured data

As mentioned earlier, simulation model calibration was performed using segments of a standard weather file with a good fit to our local measurements. Figure 11 and 12 show samples of time intervals where the weather file data (WF) and our measurements at building sites (DL) showed a relatively good agreement. These weather file segments were subsequently used to predict indoor temperature values and compare those with the respective measured temperatures.

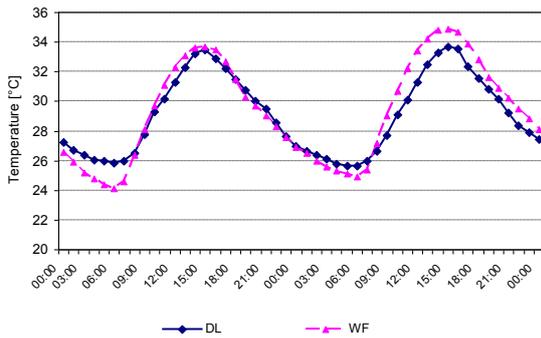


Figure 11 Outdoor air temperature segments (WF) as against measurements (DL) at building location (KCR)

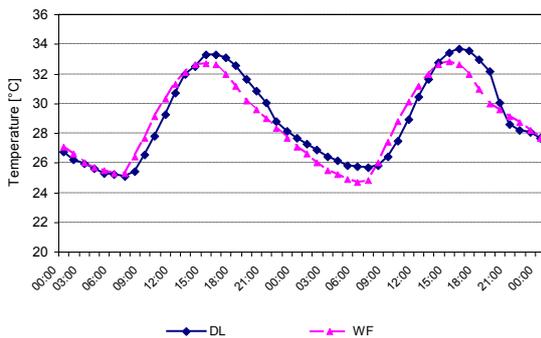


Figure 12 Outdoor air temperature segments (WF) as against measurements (DL) at building location (ANG)

Comparison of measurements and simulations

Predictions of the calibrated simulation models compared well with the measured values. Figure 13 and 14 provide examples of measured versus simulated indoor air temperatures in CAP and KCR. Moreover, Figure 15 provides an overview of the relationship between measured and simulated indoor air temperatures in terms of regression lines) in four buildings.

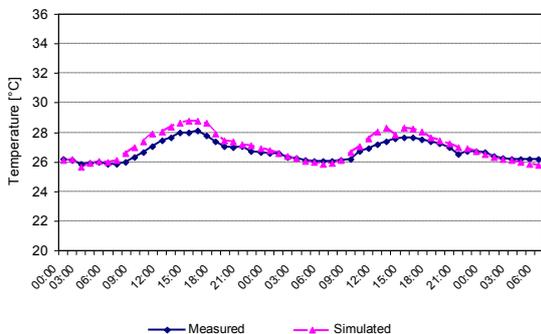


Figure 13 Measured versus simulation indoor air temperatures in CAP

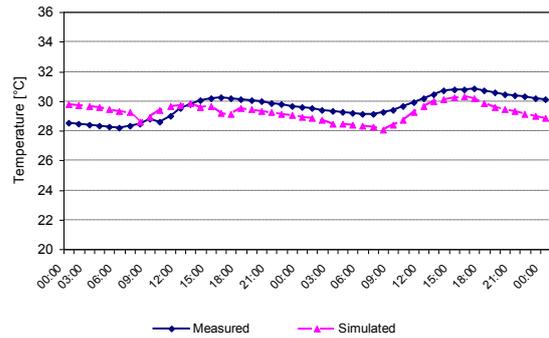


Figure 14 Measured versus simulation indoor air temperatures in KCR

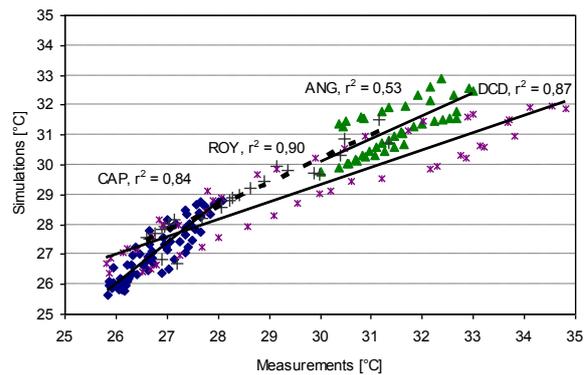


Figure 15 Overview of the relationship between measured and simulated indoor air temperatures in four reference buildings

Parametric simulations

Figure 16 to 20 shows, the simulated cooling loads (sensible and latent) for a number of scenarios (see Tables 2 and 3).

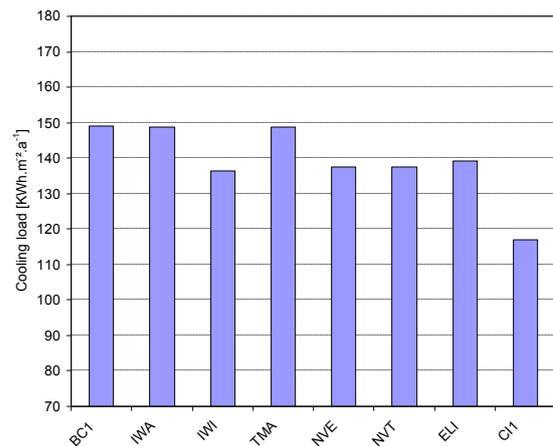


Figure 16 Simulated cooling loads (CAP) for different scenarios (see Tables 2 and 3)

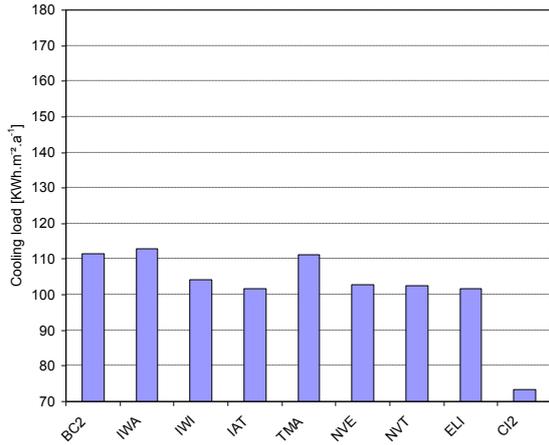


Figure 17 Simulated cooling loads (KCR) for different scenarios (see Tables 2 and 3)

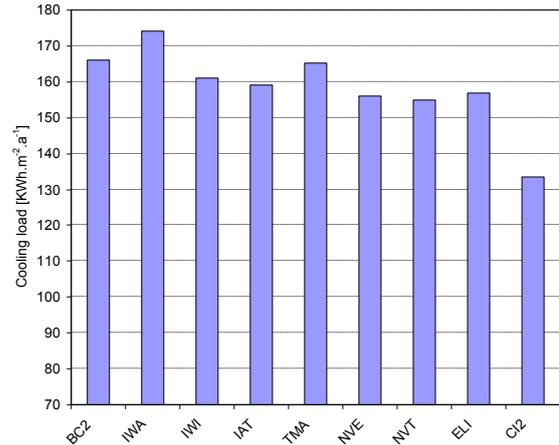


Figure 20 Simulated cooling loads (DCD) for different scenarios (see Tables 2 and 3)

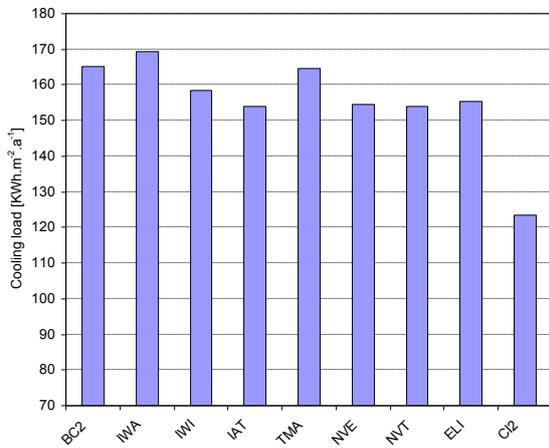


Figure 18 Simulated cooling loads (ANG) for different scenarios (see Tables 2 and 3)

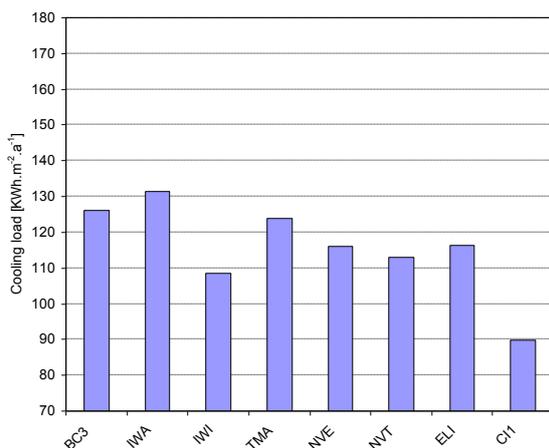


Figure 19 Simulated cooling loads (ROY) for different scenarios (see Tables 2 and 3)

In the passive building operation scenario (PC: no air-conditioning), the "base case" with ACH (1/0.5) and the combined improvement (high mass, improved windows, efficient lighting and ACH (10/10)) scenarios (PC) resulted in lower mean overheating values (OH_m) and higher fraction of working hours (FOT in %) in which the indoor air temperatures were inside the assumed comfort zones (Table 4).

Table 4

Mean overheating (OH_m in K) and fraction of time (FOT in %) with indoor conditions within the comfort zone (from 8 am to 5 pm, assumed indoor air speed 1.0 m.s^{-1})

BUILDING	BC		PC	
	FOT [%]	OH_m [K]	FOT [%]	OH_m [K]
CAP	25	4.4	77	1.8
KCR	30	4.2	73	2.0
ANG	20	5.1	65	2.4
ROY	12	6.0	72	2.0
DCD	43	3.8	68	2.1

Figure 21 shows the calculated mean daily indoor air temperature and relative humidity values for CAP together with extended comfort zones (Szokolay, 2004) corresponding to higher fan-induced air speeds ($0.5, 1.0, \text{ and } 1.5 \text{ m.s}^{-1}$).

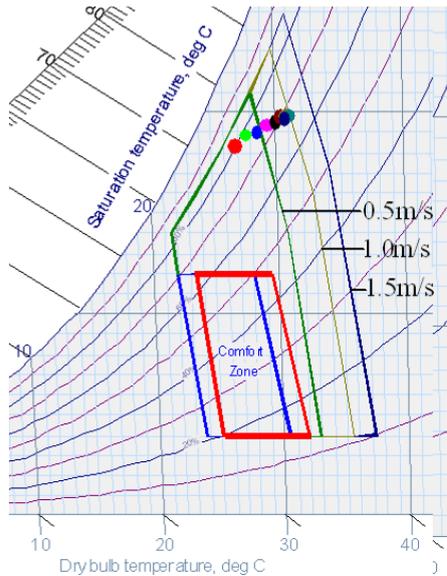


Figure 21 Mean daily temperature and relative humidity values in January at building CAP (based on simulated data from 8am to 5pm) together with thermal comfort zones corresponding to different indoor air speed assumptions

Table 5 summarizes computed mean PMV and PPD results (over the working hours) for BC and PC scenarios. Additionally, annual energy use, energy cost, and CO₂ emission reduction potential were estimated (see Table 6) based on the comparison of the BC and CI scenarios. Thereby, the following assumptions were made: unit cost of electricity in Ghana = 0.12 € per kWh, system efficiency for the split air-conditioning units = 2.6, CO₂ emission = 0.238 kg·kWh⁻¹. Table 7 shows the estimated payback time for the thermal retrofit measures given the projected energy saving potential.

Table 5
PMV and PPD (in %) for all buildings

BUILDING	BC		PC	
	PMV	PPD	PMV	PPD
CAP	2.8	93.5	1.6	55.5
KCR	2.8	91.6	1.6	54.5
ANG	3.1	95.0	1.8	64.3
ROY	3.3	97.1	1.6	56.3
DCD	2.6	87.5	1.7	58.2

Estimated annual energy use, costs, CO₂ emission and retrofitting (payback time)

The energy use and associated CO₂ emissions as well as energy expenses estimated for the base case (BC) and combined improvement scenarios (CI) are illustrated in Table 6 and 7.

Table 6
Total annual energy use, costs, and CO₂ emission reduction potential (by upgrading the buildings from the base case (BC) to CI cases

BUILDING	ENERGY COST SAVING [€]	ENERGY SAVING [kWh]	CO ₂ CUT-BACK [kg]
CAP	7,937	66,144	15,742
KCR	13,076	108,966	25,934
ANG	4,760	39,668	9,441
ROY	19,815	165,126	39,300
DCD	2,865	23,878	5,683

Table 7
Estimated payback time for the expenses of the thermal retrofit measures (upgrade from BC to CI)

BUILDING	RETROFIT EXPENSES [€]	PAYBACK TIME (YEARS)
CAP	43,239	5.4
KCR	41,465	3.2
ANG	14,554	3.1
ROY	233,706	11.8
DCD	20,876	7.3

DISCUSSION

The review of the results lead to a number of observations:

- The measured temperature and relative humidity values in the offices point to deficient thermal comfort conditions (see, for example, Figures 8 and 9). However, in interviews (see Figure 10) occupants do not express a pronounced sense of discomfort. This could imply that the occupants' adaptation capability may be underestimated by the current thermal comfort scale recommendations. Furthermore, the position of the workspaces in relation to the air-conditioners, the number of occupants interviewed (subjective opinion), etc are all factors which could have affected the outcome (further studies recommended).
- The improvement of the thermal insulation of the attic space floors (in cases where such spaces exist) clearly improves the thermal performance, due to the reduction of conductive heat flows from these typically overheated spaces.

- Increased night-time natural ventilation did improve the thermal performance of the buildings, albeit in a modest fashion. This is due to the rather small diurnal temperature range in Kumasi: the night temperature does not sink sufficiently enough to effectively cool the building mass. The combination of higher thermal mass and increased night-time ventilation was only insignificantly better than natural ventilation alone.
- Certain combinations of selected modifications (such as better windows, natural ventilation, and efficient electrical lighting) appear to have a synergistic effect leading to a significant reduction of buildings' cooling loads. As simulation results for combined measures C11 and C12 (Table 2 and 3) suggest, cooling loads could be reduced (depending on the building) somewhere between 20 and 35%.
- Compared to the base case (BC), passive cooling option (PC) could reduce mean overheating down to about 2.0 K through the use of efficient building systems and natural ventilation (Table 3). Likewise, estimated PMV and PPD values show improvements by adapting the PC scenario (Table 4).
- The extension of the comfort zone with natural ventilation ($1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) could further increase the fraction of time in which thermal indoor conditions are in the comfort zone (65 – 77%). Simulations suggest that further improvements (particularly in the warmer afternoon periods) would require mechanical cooling.
- Energy use of the buildings could be reduced (20 – 35%) through the thermal retrofit and energy efficient technical components of buildings.
- The potential toward reducing CO₂ emissions through improved energy performance (Table 6) appears to be rather modest. This is due to the composition of energy mix in Ghana: 66% of electricity generation is from hydro power plants.
- The payback times calculated for the amortization of building retrofit costs (Table 7) may be considered reasonable (3 – 12 years).

CONCLUSION

Given the climatic conditions in Ghana, cooling energy requirements represent an ecological and economical challenge. Yet only few studies have been conducted to explore methods and means of improving the energy performance and thermal conditions of buildings in Ghana. We thus applied

local measurements in (and calibrated simulation models of) five existing office buildings to parametrically explore and evaluate building features and operational options that could be beneficial energetically, environmentally, and economically. The results demonstrate that improvements to the building fabric and controls can lead to a better performance. Specifically, combinations of improvement measures (such as better windows, natural ventilation, and efficient electrical lighting) have the potential to significantly improve the buildings' performance in the climatic context of Kumasi, Ghana.

REFERENCES

- ECG. 2007. Energy Commission Ghana, National Energy Statistics-2005, p. 25-50.
- EDSL. 2008. A-TAS Version 8.5, Environmental Design Solutions Limited, www.edsl.net.
- Fanger, P.O. 1973. Thermal Comfort, McGraw Hill Book Company, New York.
- IEA. 2006. www.iea.org/stats/countryresults.asp?COUNTR Y-CODE=GH.
- Mahdavi, A. Orehounig, K. Mikats, N. 2007. "Analyzing traditional buildings via empirically calibrated building performance models", Proceedings of IBPSA 2007 (10th International Building Performance Simulation Association Conference and Exhibitio, Beijing: China, 3-6 September 2007, ISBN 0-9771706-2-4, p. 71-78.
- Meteotest. 2008. Meteonorm version 6.0, www.meteotest.ch.
- Pröglhof, C. 2004. Aspekte der natürlichen Fensterlüftung – eine Fallstudie, Institute für Bauphysik und Bauökologie, TU Wien. Österreich.
- Szokolay, S. 2004. Introduction to Architectural Science: The Basis of Sustainable Design, Oxford. Architectural Press.

BUILDING ENERGY PERFORMANCE SIMULATIONS OF THE RESIDENTIAL HOUSES IN MEDITERRANEAN CLIMATE: CASE STUDY FOR BODRUM, TURKEY

Arda Karasu, Claus Steffan

Technische Universität Berlin, Fakultät VI Planen Bauen Umwelt, Institut für Architektur,
 Fachgebiet Gebäudetechnik und Entwerfen

ABSTRACT

This work results from the doctoral thesis, where residential houses in Bodrum have been analyzed energetically using the simulation software DesignBuilder. Bodrum is a characteristic city in the Mediterranean zone, and obtains optimum conditions for energy efficient design. It is under the influence of the Mediterranean climate, has hot and arid summers and mild and rainy winters.

The results have been evaluated in order to optimise the thermal behaviour of the houses for future settlements. Prototypes according these evaluations have been developed. Finally, significantly reduced energy demand values like 13.11 kWh/m²a for cooling, and 11.32 kWh/m²a for heating have been achieved.

Keywords: Residential house, Mediterranean climate, energy simulation, passive measures

KURZFASSUNG

Dieser Artikel stellt die Ergebnisse einer Dissertation dar, wobei Wohnhäuser in Bodrum anhand der Simulationssoftware DesignBuilder energetisch analysiert wurden. Bodrum ist eine charakteristische Stadt im Mittelmeerraum und ermöglicht optimale Bedingungen zur energie-effizienten Bauweise. In der Region herrscht Mittelmeerklima mit warm-trockenen Sommern, und mild-feuchten Wintern.

Die Simulationsergebnisse wurden zur Optimierung thermischen Verhaltens der Häuser in zukünftigen Siedlungen bewertet. Prototypen wurden anhand dieser Bewertungen entwickelt. Zum Schluss hat man stark reduzierte Werte wie 13.11 kWh/m²a für Kühlenergiebedarf und 11.32 kWh/m²a für Heizenergiebedarf erreicht.

INTRODUCTION

Energy simulation software are useful tools for designing buildings in this century. They provide significant contribution dealing with climate mitigation and adaptation in regard to energy responsible planning. Architects should use energy simulation tools for dealing with better support by

decision-making and energetically optimization in building design.

There were several researches about overall energy saving methods for residential buildings in countries around the Mediterranean region like in Jordan (Tahat et al., 2002) and in Tunisia (Znouda et al., 2007). Furthermore, there are various researches about energy simulations focusing on various particular passive energy saving measures for the same climatic region: for instance, a research about reversible windows from Italy (Gugliermetti et al., 2007), thermal mass from Cyprus (Kalogirou et al., 2002), plant coverage (Kontoleon et al., 2010) and air tightness (Sfakianaki, et al., 2008) from Greece, etc. Various simulation methods and tools have been used by these researches in order to optimize building energy performance. According to the lack of researches in Turkey about these topics, the necessity to show design and energy standards in the housing sector lead to prepare this research.

The major factors, which affect energy consumption, heat gain and heat loss, are primarily at building level. They can be classified in seven main categories, which have been simulated: openings, external wall, roof, shading element for the roof, openings, and as vegetation, form-mass, orientation, and an additional basement floor. Non-typical components in the settlements of Bodrum have also been simulated to estimate their potential contribution.

The effects on energy consumption of each mentioned criteria have been analyzed in terms of their thermal behaviour. According to the simulation results of the actual condition, the heating energy demand of the typical residential houses in the city exceeds 23 MWh annually, whereas it is over 8 MWh/a for cooling.

As conclusion, the aim was to reduce energy consumption with passive measures. The cooling energy demand of the existing houses varies between 42.79-60.75 kWh/m²a, and the heating energy demand between 118.18-125.31 kWh/m²a.

Table 1
Climate characteristics of Bodrum

TEMP. °C	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
Average Max.	15	15.1	17.4	20.9	25.9	31.1	34	33.7	30.2	25.6	20.1	16.3
Average Min.	8.2	7.8	9.4	12.5	16.4	20.6	23.2	23.1	20.2	16.6	12.6	9.6
Max in summer						42.3	44.2	45.0				
Min in winter	-1.6	-4.5										0.2

ABOUT LOCATION

Weather characteristics in Bodrum

The energy consumption of a building is strongly related to the climate surrounding it (Lemke, 2008). Turkey's geographic location is disadvantageous, because both summer and winter conditions vary strongly, which complicates the design solutions in regard to better comfort conditions and energy efficiency.

Bodrum is a small town in the west-southern part of Aegean Region in Turkey and its geographical coordinates are 37°2'18" North, and 27°25'45" East. According to the Meteorology Department of Republic of Turkey, the Aegean coasts of Turkey display a typical Mediterranean climate of hot summers and mild winters. Characteristics of local climate in Bodrum do not show significant differences from the common characteristics of Aegean-Mediterranean climate. Some important points are:

- Hot summers and moderately cold winters,
- Intense heat in the day-time in summer,
- Often intense cold at night in winter,
- Very high summer aridity.

These climatic values lead to enhanced importance of solar shading. Besides, site planning, orientation and formation of buildings, vegetation, interior ventilation, and building material become importance in regard to these characteristics.



Figure 1 Geographical location of Bodrum

Architecture in Bodrum

Beside typical Aegean architecture, Bodrum has its own characteristics of local architecture, and they are as follows:

- Dwellings are arranged in compact patterns to avoid intense solar radiation in summer period.
- Older settlements have high density, unlike the ones after tourism boom. Furthermore, the construction permit in Bodrum is restricted to 10% of the total area.
- Although they have generally clear geometrical forms, there is an enhanced diversity in building form in the recent years.
- Local building directives define 6.5-7 m as the maximum height of a house in Bodrum.
- The openings of the houses with such great thermal inertia are kept relatively small. In regard to view, the WWR of the related facade might be high.
- Flat roof is an obligation. They are mainly not insulated, and not accessible. The roofs are used as the place of DHW equipment.
- The external painting is also regulated by the building directives and must be white or in light colours to reject the solar radiation.
- The use of basement floor is because of economic issues neglected.
- They generally have no or insufficient thermal insulation.
- There is no heating system in the houses. Auxiliary devices are used for heating. Cooling is obtained by rational air conditioners.

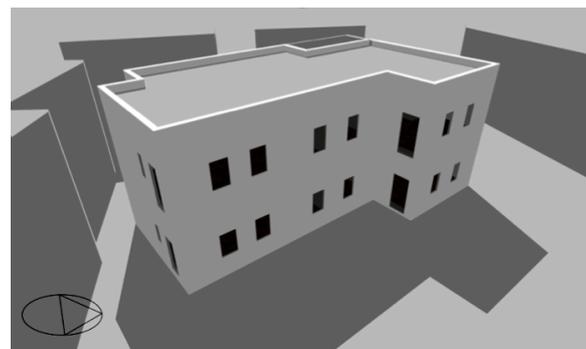


Figure 2 Analyzed object - a typical Bodrum house

SIMULATIONS

Simulation procedure

The simulations of the selected objects have been run by “DesignBuilder V1.8”, which provides a range of environmental performance data. It is based on EnergyPlus. They have been run in three ways:

- Cooling calculations to determine the size of the mechanical cooling equipment for the hottest day.
- Heating calculations to size the heating equipment required to meet the coldest winter design weather conditions.
- Building energy performance simulations based on EnergyPlus.

Furthermore, as mentioned in the European Passive Solar Handbook, the detailed approach of simulations requires reliable hourly and monthly weather data for the whole year (Goulding et al., 1992). The weather data that is used by the simulation software is supplied by DOE from the “U.S. Department of Energy: Energy Efficiency and renewable Energy”. This data has been optimized with the information from Turkish State Meteorological Service.

Simulation criteria

The major factors, which affect energy consumption, are mentioned in the introduction. The considered values of these factors during the simulations are summarized in the following sections.

Furthermore, in regard to the afore mentioned aspects, the materials are selected according to the following principles in order to run representative simulations: The materials, which are used frequently in Bodrum, were chosen and simulations run respectively. These materials have been varied in respect of different other criteria, e.g. dimensions, combination, etc.

Openings

Simulations of energy-based parameters of windows have been run by DesignBuilder using ASHRAE calculations. Since the energy efficiency of the window depends on many criteria, parameters have been utilized as inputs in the simulations of the whole building.

Windows performance values like performance parameters (U, SHGC, Vt), glazing components (layers, infill gas, coating, etc.), various frame types, and window design values like window to wall ration and orientation has been simulated. Simulations have been run on a combination of criteria, which are available and widely used in Turkey.

Following combination of the performance value has reached the optimum efficiency for both summer and winter conditions in Bodrum: 7-chamber window PVC profile with warm edge, 6-13-6 cm layers, Argon as infill gas, LowE at position 1. This

combination for the windows has an U-value of 0.78 W/m²K and g-value of 0.47. The window to wall ratio (WWR) is 30%, 10%, 5%, and 10% for the south, west, north and east facades respectively.

Thermal insulation

Thermal insulation of a building envelope offers a major contribution toward enhanced energy efficiency. *Placement, type, and thickness* of the insulation material are three major factors with respect to insulating the building envelope. Simulations are run with many variations of thickness, the type and placement of the insulation material.

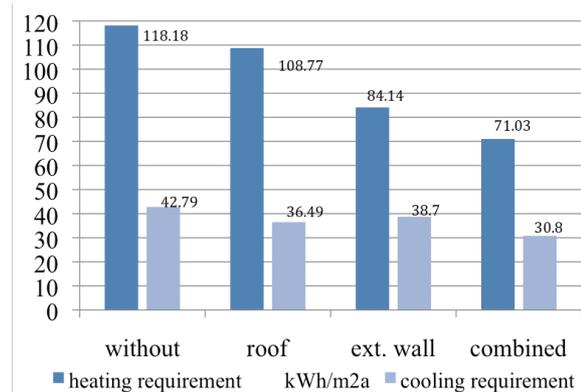


Figure 3 Thermal insulation effect to existing buildings without any other measure

External wall: There are thermal and practical considerations for insulation: For instance, insulation placement on the outside of the external walls (Al Homoud, 2005). Furthermore, polystyrene rigid boards have been chosen as material according their wide usage in Bodrum.

The cost-performance ratio of XPS is better than EPS (Dombayci et al., 2006). According to the simulation results, XPS rigid boards with 0.3 W/mK has also better energetic performance in the region as well. Different combinations of the placement and thickness (between 2-12 cm) have been simulated. 6-8 cm XPS rigid boards placed below the outermost layer of the external walls has achieved the most efficient performance.

Roof insulation: Roof insulation is one of the most important criteria in regard to energy consumption of a building, because this surface is exposed through greatest direct solar radiation in Bodrum.

XPS rigid board as insulating material, installed in different layers of the roof has been simulated with two to ten cm thickness. According to the simulation results, six cm XPS rigid board installed under the accessible surface of the roof has the best performance on cooling load. Thicker insulation material performs slightly better on the cooling load, whereas it may increase the heating load. The highest reduction of the cooling requirement can be achieved

in the floor directly under the roof. The effect in the ground floor is not significant.

Shading elements

As in the case of Bodrum, or in other regions with hot summer periods, shading strategy plays an important role by the means of energy saving and reducing cooling energy demand. Simulations have been run for three architectural elements separately: window shading, local shading, and roof shading elements.

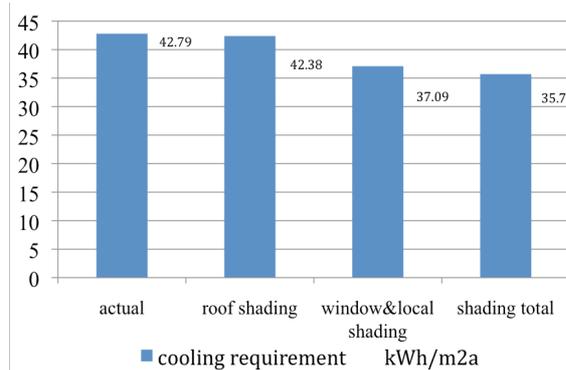


Figure 4 Shading effect to existing buildings without any other measure

Local shading components: Opaque exterior shades, which block beam radiation from entering windows, are simulated in terms of form, position, and thickness. The width of the simulated components varies between eight and 15 cm as well as the length between 15 and 45 cm. Other dimensions are neither architectural nor in terms of energy efficiency relevant. The shading component is divided into four segments and each of these segments are simulated separately and combined. Furthermore, eaves are frequently used in regions like Bodrum. Deep eaves

for the south façade let the winter sun and avoid summer sun. The same principle is used by the prototype as balcony. Larger windows on the south façade, or on facades with sea-view can be seen often in the region. Therefore, elongated balconies above the first floor and an eave with the same principle above the second floor are used by the prototype.

Window shading components: Simulations have been run to determine the impact on the cooling load of dwellings in Bodrum. Window shading elements like blinds and rolls have been simulated for both the inside and outside placement of window. This as a singular measure has not a significant effect on reducing the cooling requirement. Combined with other shading measures, an enhanced efficiency could be obtained.

Roof shading: The important factor, which has not been considered in Bodrum yet, is roof shading. Simulations have been run on roof shading elements in order to prove their contribution to reducing the cooling load. Several designs have been tested distinguished by their shape and coverage area. Furthermore, operative roof shading elements, which may be beneficial, have been tested as well. Simulations showed that, shading elements can also permit solar penetration in winter, when correctly designed and used on south facades. Moreover, opaque shading elements perform two per cent better than operational systems. Furthermore, simulation results show that area-wide shading elements have the greatest energy efficiency.

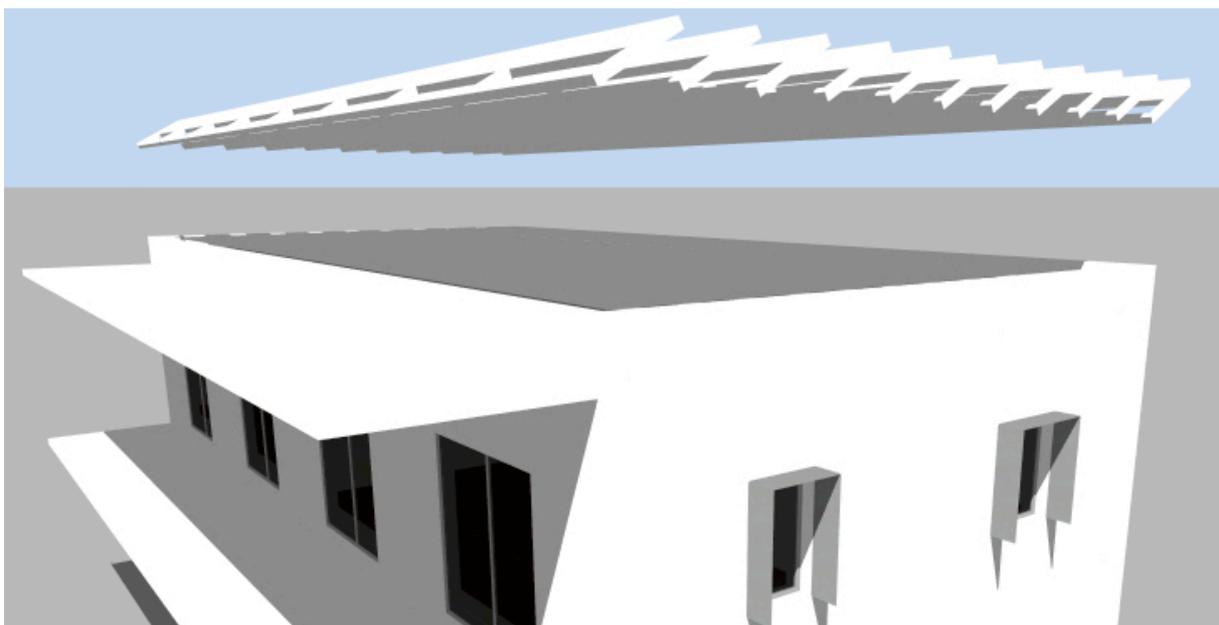


Figure 5 Shading illustration

Form-mass

One of the most important factors, which influence the energy efficiency of a building, is the form of the building. Several simulations have been run in regard to the building form. From square to oblong shapes, various alternatives are simulated to identify an optimum form for housing settlements in Bodrum. According to the results, in hot-dry climates like in Bodrum, the perimeter to area ratio should be as low as possible. Another criterion in heat gaining is the height of a building. High apartment blocks are already not permitted in Bodrum.

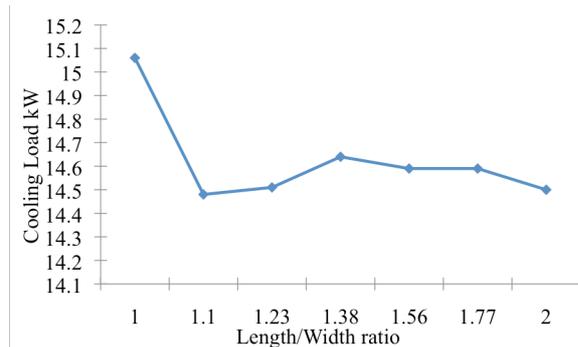


Figure 6 Effect of the form on the cooling load

Simulations have been run for different length/width combinations starting with a square shaped form (10 m / 10 m). The width of the house, South-North axis, is reduced in 0.5 m steps until reaching seven meters. The surface to volume ratio 0.5 is kept constant, while the width to length ratio varies between one and two. The results show that the best result on cooling loads can be achieved with a width to length ratio between 1.1 to 1.2. If we consider design issues as well, elongated forms with a ratio of two can also be chosen as alternatives.

Orientation

Givoni points out that, the amount of radiation received by the building is determined by orientation (Givoni, 1969). The orientation can provide profitable solutions for energy consumption and comfort standards (Karasu, 2010). Most of the buildings in Bodrum are, if possible, oriented to the sea. This situation leads sometimes deviation from the optimum orientation.

The object has been simulated by changing its orientation in 45° segments. Simulations have been run for both actual and energetically optimized buildings.

Outputs show that there is no significant difference of heat loss of building elements like the roof, ceiling, partitions, and ground floor depending on orientation. The most important difference can be seen in the glazing and external wall. Southern directions give the best result for solar heat gain through glazing in the winter period, but also the

worst performance in the summer period. These results show that orientation has a significant influence on the cooling load. But the benefits should be improved with the combination of other criteria.

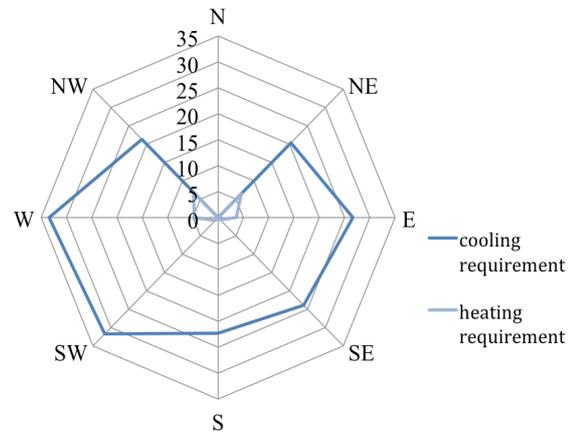


Figure 7 Orientation effect (base N) of the form on the cooling load (in %) by not optimized house

Only to change the orientation without any other measure affects the energy requirements of the houses in Bodrum not significantly. The maximum change is about five per cent. Northern orientations decrease the cooling requirement and hereby lead to increased heating requirement. Considering the seasonal usage of the houses, northern orientation is the optimum one for houses occupied only in summer, whereas southern oriented houses has an enhanced energy efficiency for the whole year.

Basement floor

A basement floor in a house in Bodrum is a critical factor in terms of energy efficiency. It may increase the heating load, whereas the cooling requirement decreases significantly. These effects depend on the energy performance of the house, with other words, to other passive measures. According to the simulation results, the more a house has enhanced energetic values, the less is the reduction of the cooling requirement through a basement floor, and vice versa by the heating requirement. Therefore, the seasonal occupancy plays an important role by taking the decision about the construction of a basement floor. The economic efficiency should be considered as well.

Especially by energetically optimized houses, the thermal effect of a basement floor on the upper floors can be neglected. The direct effect on the ground floor is more significant by not energetically optimized houses. In this case, the operative temperature in winter is up to 0.4 °C higher, whereas it is up to 0.6 °C lower. Compared with other measures, the effect of a basement floor is not significant.

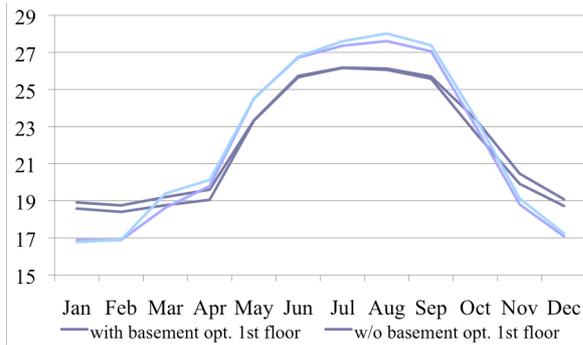


Figure 8 Effect of a basement on operative temperature (in °C)

RESULT ANALYSIS

The energy requirement of a house in Bodrum is significantly related to the construction methods that have been employed. Energy optimizations are strongly needed. Each of the passive architectural measures can reduce the energy requirement in a definite amount. The combination of the measures always showed a better performance when compared with separate installations. Thermal insulation of the building envelope has the largest impact on the energy requirement. Furthermore, the roof and windows should be protected from intense solar radiation during the summer period.

Finally, optimized architectural plan and quality might lead to enhanced efficiency of all other measures.

Prototype

Analyses proved the necessity of a prototype house which accords with basic design principles for dwellings in Bodrum. The explorative design developed by Karasu bases on the requirement analysis. It is called the Basic Bodrum House (BBH) and represents an optimum of a house in Bodrum in regard to energy consumption and may also be applicable to housing settlements in the same climatic zone within the Mediterranean Region. A

Best-Case (BC) house with improved thermal quality has also been developed as an alternative.

Table 2 below shows the differences of the thermal characteristics of the existing house and developed houses. Beside enhanced thermal characteristics of the prototypes, the BBH and BC are architecturally optimized compared with the actual conditions. It means that criteria like orientation, form, WWR, thermal glazing, thermal insulation, etc., are optimized based on previous simulation results. Beside higher air tightness, the BC has lower U values in each building component, where the material choice has been kept the same.

Table 2

Prototype characteristics in comparison to the actual condition of the analyzed object

	ACTUAL	BBH	BC
DIMENSIONS M²			
total floor area	143.9x2	114.7x2	114.7x3
conditioned area	143.9x2	99.7x2	99.7x2
roof area	125.2	99.7	99.7
Window area	17.3/4.8/6.8/-	1.5/16.8/1.5/3.6	1.5/16.8/1.5/3.6
ENVELOPE U: W/M²K			
Window Ug	6.1	1.31	0.78
Solar heat gain coefficient SHGC	0.81	0.45	0.47
External wall Uw	1.84	0.39	0.20
Roof Ur	3.32	0.43	0.33
Air leakage in ac/h	2	0.8	0.6
ENERGY REQUIREMENT			
Cooling kWh/m ² a	42.79	22.35	11.32
Heating kWh/m ² a	118.18	39.51	13.11

According to the simulation results, the cooling and heating energy demand of existing houses in Bodrum can be reduced by up to 44 and 54 per cent in comparison to actual conditions. These have been achieved by up to 73 and 89 per cent in architecturally optimised houses for planned settlements in comparison with actual conditions of

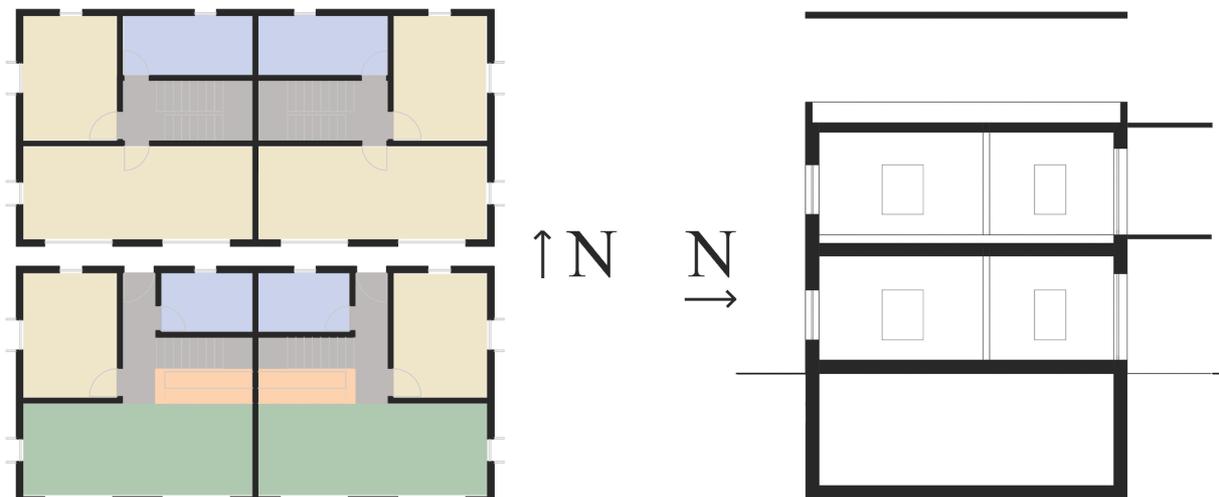


Figure 9 Prototype house for Bodrum (w/o scale)

existing houses. Finally, simulation results show that, energy demand values like 13.11 kWh/m²a for cooling, and 11.32 kWh/m²a for heating are achievable.

CONCLUSION

The purpose of this research has been to assess how and to what extent energy intensity in new and existing housing settlements in Bodrum can be reduced. Numerous factors, which influence the thermal behaviour of the buildings, have been analyzed. Following results are recommended:

- Architectural design and energy efficiency should be considered as a whole during the design phase, and building energy simulation tools are highly necessary.
- Complete insulation of the envelope has a better efficiency compared with separate implementations. Thermal glazing should be considered as an additional measure to thermal insulation.
- Increasing construction quality, which means better air tightness, is not a cost additive measure. However, its influence on the thermal behaviour of passive measures is significant. Therefore, its implementations should be standardised.
- Shading elements should be emphasized by the settlements. Roof-shading elements besides window shading provide a significant reduction of the cooling energy demand. Hence, they can be a part of Bodrum's vernacular architecture.

LITERATURE

- Al-Homoud M., 2005, Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials, *Journal Building and Environment* 40, p. 353–366
- Givoni B., 1969, *Man, climate and architecture*. 2nd ed, Van Nostrand Reinhold, New York
- Goulding J. R., Lewis J. O., Steemers T. C., 1992, *Energy in Architecture, The European Passive Solar Handbook*, Chrysalis Books, Dublin
- Gugliermetti F., Bisegna F., 2007, Saving energy in residential buildings: The use of fully reversible windows, *Energy*, Vol. 32, Issue 7, p.1235-1247
- Kalogirou S.A., Florides G., Tassou S., 2002, Energy analysis of buildings employing thermal mass in Cyprus, *Renewable Energy*, Vol. 27, p.353–368
- Karasu A., 2010, *Concepts for Energy Savings in the Housing Sector of Bodrum, Turkey: Computer based analysis and development of future settlements using renewable energy*, Ph.D., Technische Universität Berlin, Berlin

Kontoleon K.J., Eumorfopoulou E.A., 2010, The effect of the orientation and proportion of a plant covered wall layer on the thermal performance of a building zone, *Building and Environment*, Vol. 45, Issue 5, p. 1287-1303

Lemke C.R., Stein B., 2008, *Population-Climatic Energy: Scenarios to 2050*, Conference proceedings of Climate Conference, Hamburg

Sfakianaki A., Pavlou K., Santamouris M., Livada I., Assimakopoulos M.N., Mantas P., Christakopoulos A., 2008, Air tightness measurements of residential houses in Athens, Greece, *Building and Environment*, Vol. 43, Issue 4

Tahat M.A., Al-Hinai A.H., Probert S.D., 2002, Performance of a low energy consumption house experiencing a Mediterranean climate, *Applied Energy*, Vol. 71, Issue 1, p.1-13

Znouda E., Ghrab-Morcus N., Hadj-Alouann A., 2007, Optimization of Mediterranean building design using genetic algorithms, *Energy and Buildings*, Vol. 39, Issue 2, p.148-153

SIMULATION-BASED ASSESSMENT OF ENERGY AND ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF OFFICE BUILDINGS IN LEBANON

Zeinab Alameddine, Kristina Orehounig, Ardeshir Mahdavi
 Department of Building Physics and Building Ecology, Vienna University of Technology,
 Vienna, Austria

ABSTRACT

This paper explores the implications of alternative design options for the thermal performance of office buildings in Beirut and Tripoli, Lebanon. Five typical office buildings were selected for the investigation. Multiple design alternatives were considered involving various lighting, glazing and shading types, shading schedules, thermal insulation options, and ventilation scenarios. A numeric thermal simulation application was used to model the performance of these alternatives parametrically. Simulation results were expressed in terms of annual sensible and latent cooling loads, annual heating loads, and overheating (passive building operation scenario). The results show the significant degree to which design measures could reduce the energy demand of (and overheating tendencies in) office buildings in Lebanon.

INTRODUCTION

Given the Mediterranean climatic characteristics of Lebanon (see Figure 1), energy requirements for Heating and cooling of office buildings represent a growing burden for both the environment and the economy. The efforts to reduce the energy requirements of buildings are highly important, as Lebanon has little fossil fuel resources. Thus, the bulk of needed energy must be imported. However, current practices in building design and construction are not particularly geared towards higher energy efficiency. Traditional regionally-adapted building methods have been mostly abandoned in favor of contextually problematic building construction styles and the increased use of energy-intensive air-conditioning technologies. Moreover, the building design process is not sufficiently informed via the use of advanced performance-based design methods and tools.

In this context, the present contribution explores the implications of various alternative design options in view of the thermal performance (cooling requirements, overheating tendencies) of office buildings in Beirut and Tripoli. Five typical offices that are representative of the majority of existing office buildings in Lebanon were selected for the investigation (B1 to B5). Multiple design alternatives were considered involving various lighting, glazing, and shading types, shading schedules, insulation

options, as well as different thermal mass and ventilation scenarios.

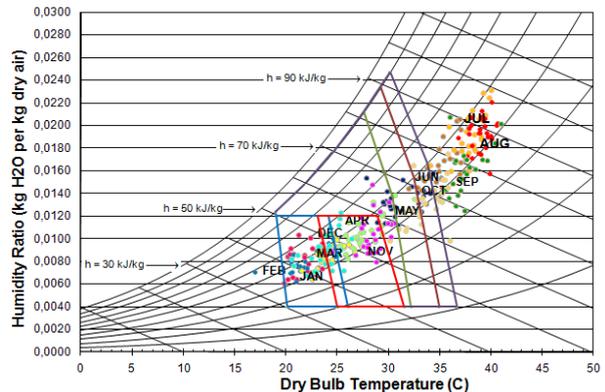


Figure 1 mean hourly outdoor temperature and relative humidity values in Beirut for a representative day in each month of the year (based on data generated via Meteotest 2008)

APPROACH

Parametric simulation was selected as a means of comparing the thermal performance of a number of building design options. Based on a preliminary study of typical (contemporary) office floors in Beirut and Tripoli, five floor plans were selected, as illustrated in Figure 2.

The U-value assumptions for the external walls (base case) are summarized in Table 1. The glazing properties (base case) are summarized in Table 2. The total internal gains for people, lights, and equipment were assumed to be $5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ during the unoccupied hours. Total people and equipment load was considered to be $32 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ during the occupied hours (see Table 3). The thermostat settings for heating and cooling load computations are shown in Table 4.

*Table 1
 External Wall U-values (base case scenario)*

Building	U-value ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)
B1	1.6
B2	3.2
B3	1.9
B4	2.1
B5	2.1

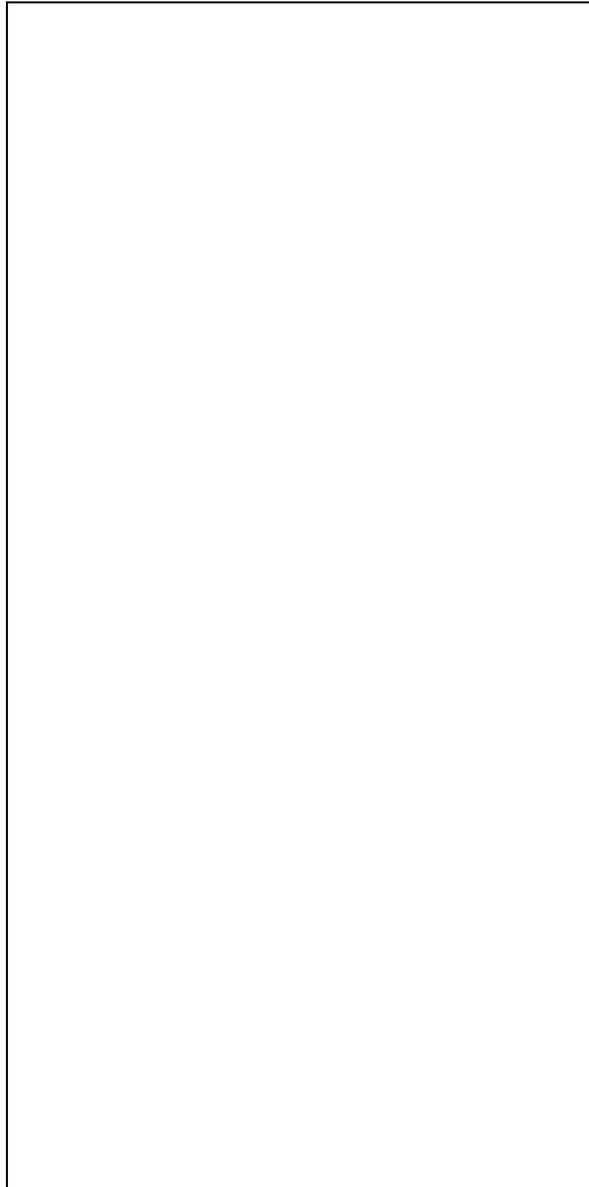


Figure 2 Buildings' external and 3D floor models in the simulation application

Table 2
Glazing U and g values (base case scenario)

Buildings	Glazing	U-value [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	g-value
B1	Gb1,1	2,8	0,59
	Gb1,2	5,3	0,71
	Gb1,3	2,7	0,57
B2	Gb2	5,7	0,42
B3	Gb3	5,7	0,36
B4	Gb4,1	3,3	0,15
	Gb4,2	5,4	0,28
	Gb4,3	5,7	0,28
B5	Gb5	2,8	0,36

Table 3

Simulation assumptions (ventilation, internal gains) for the base case scenario

Parameter	Occupied	Non-occupied
Infiltration (h ⁻¹)	0.2	0.2
Ventilation (h ⁻¹)	1	0
Lighting Gain (W·m ⁻²)	10	2
Occupancy (sensible) (W·m ⁻²)	7	0
Occupancy (latent) (W·m ⁻²)	5	0
Equipment (sensible) (W·m ⁻²)	10	3
Equipment (latent) (W·m ⁻²)	0	0

Table 4

Assumed control settings for indoor air temperature and relative humidity (base case scenario)

Parameter	Occupied	Non-occupied
Temperature [°C]	21 – 25	16 – 30
Humidity [%]	30 – 70	0 – 100

The objective was to identify those building design and operation alternatives that would reduce the cooling requirements and overheating tendencies of office buildings in the climatic context of Beirut and Tripoli. The selected options are described below. In all scenarios, the office working hours were assumed to be from 8:00 to 17:00 (Monday through Thursday and Saturday) and 8:00 to 11:00 (Friday).

Three lighting gains scenarios were considered for parametric simulations (see Table 5): L1 represent the base case, L2 denotes energy efficient lighting, and L3 is similar to energy efficient lighting scenario (L2) but involves daylight usage when shades are not deployed.

As far as the external insulation level of the opaque part of the buildings' envelope is concerned, two options were considered, namely the existing conditions (Ib: no insulation) and the option involving the addition of 7 cm polystyrene (I7).

As to thermal mass considerations, two conditions were considered. The existing condition (base case: Mb) involves the use of carpet as floor finish. To consider an option with increased thermal mass, simulations were performed also under the assumption that carpets are removed (Mnc).

Table 5

 Overview of the lighting gains options [$W \cdot m^{-2}$]

Option	Occupied	Non-occupied
L1	10	2
L2	5	2
L3	2	2

Four ventilation (air exchange) schemes were considered (see Table 6). Note that ventilation schemes V2 to V4 considered increased night-time ventilation via operable windows.

Table 6

Overview of the ventilation schemes

Option	Period	Air change rate (h^{-1})	
		Occupied	Non-occupied
V1	Summer	1	0
	Winter	1	0
V2	Summer	1	3
	Winter	1	0
V3	Summer	2	5
	Winter	1	0
V4	Summer	1	10
	Winter	1	0

Four shading options were considered (see Table 7). The fix shades involved overhangs and fins designed according to sun path diagram. The moveable blinds (Si, Se) were operated according to the schedule depicted in Table 8.

Table 7

Overview of the shading options

Option	Description
S ₀	No shading
S _i	Internal blinds
S _e	External blinds
S _f	Fix shades (overhangs, fins)

Table 8

Blinds operation schedule

Orientation	Blinds deployment hours
North-East	5:00- 10:00
East	5:00- 11:00
South-East	7:00- 13:00
South	9:00- 15:00
South-West	11:00- 17:00
West	13:00- 19:00
North-West	15:00- 19:00

Two glazing options (G0.22 and G0.14) were considered for parametric studies (see Table 9).

Table 9

Overview of the glazing options

	U-value [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]	g-value
G _{0.22}	1.7	0.22
G _{0.14}	2.35	0.14

An overview of all simulated scenarios is provided in Table 10.

Table 10

Overview of the simulation scenarios

Scenarios	Shadings	Ventilations	Lightings	Insulations	Reduced Mass	Glazing
1	S0	V1	L1	Ib	Mb	Gb
2	S0	V1	L2	Ib	Mb	Gb
3	S0	V2	L1	Ib	Mb	Gb
4	S0	V3	L1	Ib	Mb	Gb
5	Si,a	V1	L1	Ib	Mb	Gb
6	Se,a	V1	L1	Ib	Mb	Gb
7	Sf	V1	L1	Ib	Mb	Gb
8	S0	V1	L1	I7	Mb	Gb
9	S0	V1	L1	Ib	Mc	Gb
10	S0	V1	L1	Ib	Mb	G _{0.22}
11	S0	V1	L1	Ib	Mb	G _{0.14}
12	S0	V3	L1	I7	Mb	Gb
13	S0	V3	L1	Ib	Mc	Gb
14	Si,a	V1	L1	Ib	Mb	Gb
15	Se,a	V1	L3	Ib	Mb	Gb
16	Se,a	V2	L3	Ib	Mb	Gb
17	Se,a	V3	L3	Ib	Mb	Gb
18	Se,a	V4	L3	Ib	Mb	Gb

Simulations were performed using the numeric thermal simulation application EDSL [1]. The input information concerning Beirut's and Tripoli's climate was generated using METEOTEST [2]. Two kinds of simulations were performed: i) Simulation of cooling loads (active building operation assumption), ii) Mean overheating (free-running building operation assumption). The thermostat settings (for the calculation of sensible cooling loads) were assumed to be 21 to 25 °C (occupied hours) and 16 to 30 °C (unoccupied hours), the humidity control settings (for the calculation of latent cooling loads) were assumed to be 30 to 70% (occupied hours) and 0 to 100% (unoccupied hours) (see Table 11).

For the computation of the mean overheating (OH_m), the following definition was used:

$$OH_m = \sum_{j=1}^n \frac{\theta_{i,j} - \theta_r}{n} \quad (1)$$

Here $\theta_{i,j}$ denotes the mean indoor air temperature ($^{\circ}\text{C}$) at hour j (averaged over all simulated office zones in the floor), θ_r the reference indoor air temperature for overheating ($^{\circ}\text{C}$), and n the total number of occupied office hours over the course of the simulation period. Note that the term $\theta_{i,j} - \theta_r$ was considered only for those hours when $\theta_{i,j} > \theta_r$.

Mean overheating (OH_m) was computed for two different sets of assumptions pertaining to the applicable values for the reference overheating temperature θ_r . The first set is based on a constant reference overheating temperature of 26°C . The second set uses the concept of Neutrality Temperature (Auliciems 1981), which is derived as a function of the mean monthly outdoor air temperature (see Table 11).

Table 11

Assumptions (Set 2) regarding reference overheating temperature θ_r (in $^{\circ}\text{C}$).

	Beirut	Tripoli
April	25.7	25.4
May	26.7	26.5
June	27.5	27.5
July	28.5	28.5
August	28.7	28.7
September	28.4	28.2
October	27.7	27.3
November	26.4	25.8

RESULTS

Figure 3 shows the simulated annual heating load (in $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) for all 5 buildings and 18 scenarios as specified in Table 10.

Figure 4 shows the simulated annual latent cooling load (in $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$).

Figure 5 shows the simulated annual sensible cooling load (in $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$). The associated simulated annual sensible cooling load ($\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) (in percentage of the respective base cases) are shown in Figure 6.

Figure 7 shows the same results in terms of sensible cooling load reduction (as percentage of base case) are shown in Figure 7.

Figure 8 shows Simulated Mean overheating (K) with $\theta_r = 26^{\circ}\text{C}$. The associated Mean overheating reduction (in %) is shown in Figure 9.

Figure 10 shows Simulated Mean overheating (K) for with reference overheating temperature (θ_r) assumptions as per Table 11. The associated Simulated Mean overheating reduction (in %) is shown in Figure 11.

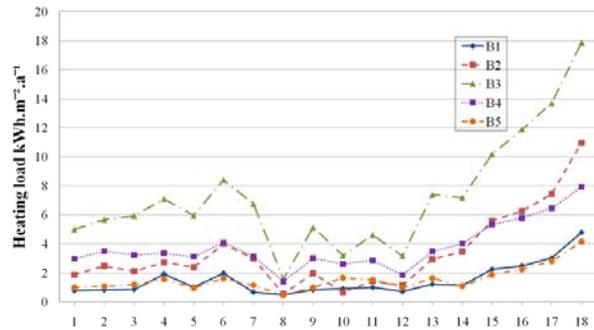


Figure 3 Simulated annual heating load ($\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)

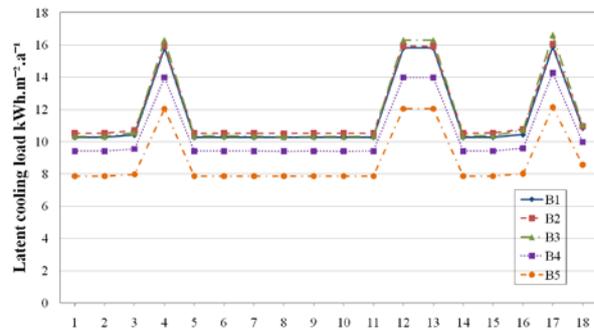


Figure 4 Simulated annual latent cooling loads ($\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)

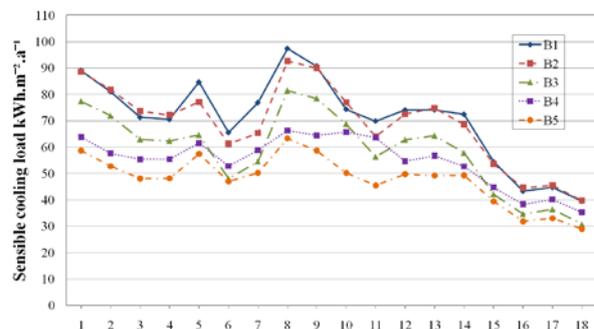


Figure 5 Simulated annual sensible cooling load ($\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)

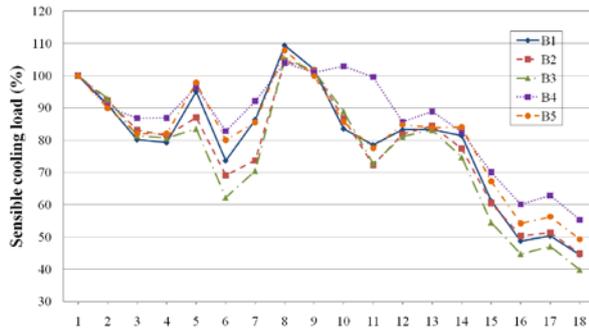


Figure 6 Simulated annual cooling sensible load (in percentage of the respective base cases)

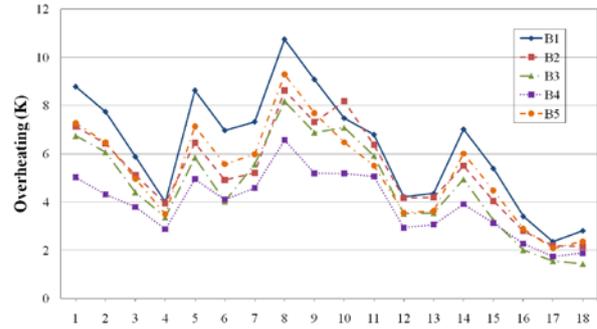


Figure 10 Simulated Mean overheating (K) (see Table 11 for assumptions regarding θ_r)

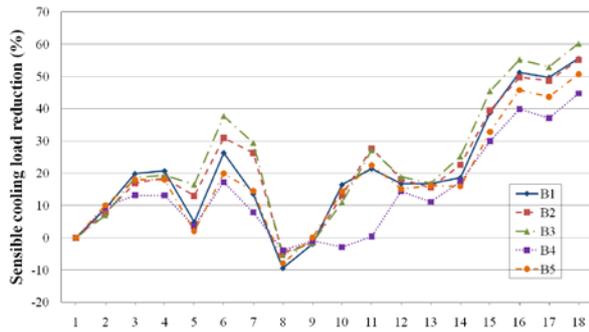


Figure 7 Sensible cooling load reduction (in percentage of the respective base cases)

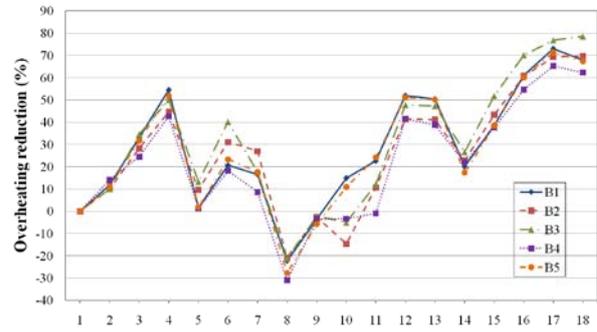


Figure 11 Simulated Mean overheating reduction (in %)(see Table 11 for assumptions regarding θ_r)

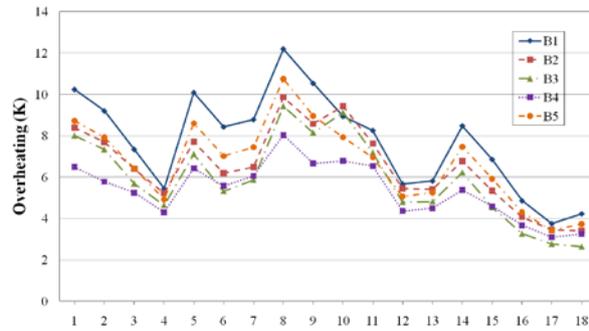


Figure 8 Simulated mean overheating (K) ($\theta_r=26^\circ\text{C}$)

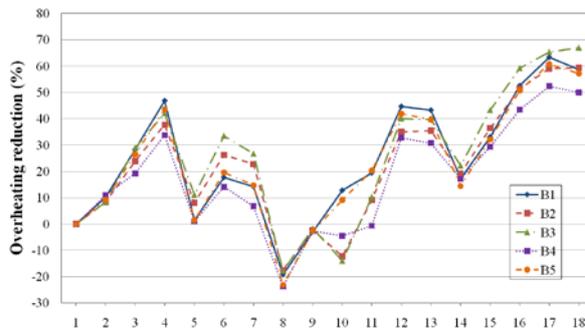


Figure 9 Simulated Mean overheating reduction (in %) for $\theta_r=26^\circ\text{C}$

DISCUSSION

The results of the above described parametric simulation study imply the following:

- Through a combination of building's features, the sensible cooling load reduction potential of many of the scenarios considered is significant (Figures 6 and 7). As compared to the base case, cooling load reduction can reach 45% (B4) or even 60% (B3). The comparatively better performance of B4 is mainly due to the better glazing system with low g -value. Overheating reduction is also substantial (67% in case of B3 and 52% in case of B4).
- Installation of a more efficient electrical lighting system (L2) has a positive impact in reducing the buildings' sensible cooling loads and overheating (scenario 2).
- The deployment of external shades with proper operating schedules (designed under consideration of the applicable sun path diagram) is a key ingredient of the better performing scenarios: the top performing scenarios amongst all scenarios considered include external blinds.

- An increase in the buildings' external insulation via the addition of 7cm polystyrene (scenario 8) did eliminate the buildings' heating loads, but led to a 10% increase in sensible cooling load. This can be explained via the heat retaining effect of better-insulated walls. Increased nighttime natural ventilation (V3) combined with external Insulation (I7), did improve the thermal performance of the buildings (scenario 12). Cooling load was reduced up to 19% and overheating up to 39%. Moreover, heating load reached a minimal value of $1 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{a}^{-1}$.
- An increase in the buildings' thermal mass (Mnc) as simulated via the virtual removal of the floor carpeting (scenario 9), did not affect the buildings' cooling loads. Addition of nighttime natural ventilation (V3) and thermal mass (Mnc) improved the thermal performance of the buildings (scenario 13): sensible cooling load was reduced up to 17% and overheating up to 43%.
- A clear improvement results (in terms of cooling load reduction) from the installation of better window products. This is mainly due to their better shading effectiveness. The glazing's U-value does not appear to play a decisive role: glazing type G0.14, which has a low g-value but a higher U-value, results in 28% cooling load reduction up and 20% overheating reduction (scenario 11).
- Alternative improvement scenarios – in the passive operation mode – substantially reduce the mean overheating in the offices up to about 2 K, depending on the scenario and the reference overheating temperature assumption. Though not exactly identical, there is a clear congruence (see Figures 5 and 8) between the ranking of the scenarios in view of lower cooling demand (active operation regime) and lower overheating tendency (passive operation regime)
- Increasing nighttime natural ventilation during the summer from 3 ACH (V2) to 10 ACH (V4) moderately improved the thermal performance of the buildings. The sensible cooling load was reduced 5% and the overheating 8%. The combination of higher thermal mass or external insulation with increased nighttime ventilation was insignificantly better than natural ventilation alone.
- Combinations of selected modifications (such as external shades, natural ventilation, and efficient electrical lighting) lead to a significant reduction of buildings' cooling loads. As simulation results for combined measures (scenarios 16, 17 and 18) demonstrate, sensible cooling loads could be reduced (depending on the building) somewhere

between 37 and 60% and overheating between 43 and 67%.

CONCLUSION

This paper presented the results of an extensive simulation-based study of the thermal performance improvement options in 5 typical office buildings in Beirut and Tripoli. It could be demonstrated that, through a combination of design features (particularly better glazing, shading solutions and natural ventilation and efficient electrical lightings strategies), a significant reduction of the cooling loads can be achieved. As far as the potential of a passive operation mode is concerned, given the current building typology and practices, provision of thermally comfortable indoor environment in the summer period requires coordinated measures including sufficient thermal mass, day-time shading, night-time ventilation, cross-ventilation possibility, sufficient room height to allow for stratification, and judicious use of air movement inducing fans. Moreover, flexible thermal comfort requirements (consistent with the implications of the adaptive thermal comfort theory) and a fitting dress code (involving climatically adapted clothing with low clo-values) would have to be considered.

Future studies will extend the scope of the study to include other building types (e.g. residential buildings). Moreover, onsite monitoring of indoor and outdoor environmental conditions are expected to provide data toward calibration of the simulation models applied, thus adding to the credibility of the simulation-based results and conclusions.

ACKNOWLEDGEMENT

The Austrian Association for the Middle East ÖOG (Österreichische Orient-Gesellschaft) has provided financial support to Zeinab Alameddine towards pursuing her doctoral studies at the Department of Building Physics and Building Ecology, Vienna University of Technology, Vienna, Austria.

REFERENCES

- EDSL 2008. A-TAS Version 8.5. Environmental Design Solutions Limited. www.edsl.net.
- Meteotest 2008. Meteororm version 6.0. www.meteotest.ch.

A COMPUTATIONAL CASE STUDY ON THE THERMAL IMPROVEMENT POTENTIAL OF RESIDENTIAL BUILDINGS IN TEHRAN

Mohammad Reza Dara, Dariush Wossugh, Ardeshir Mahdavi

Department of Building Physics and Building Ecology,
Vienna University of Technology, Austria

ABSTRACT

This paper investigates the implication of alternative design and retrofit options for thermal performance (heating and cooling demand reduction potential) of existing residential buildings in Tehran, Iran. For the investigation three typical existing residential buildings were selected. Subsequently, parametric simulation were conducted to explore the impact of various thermal retrofit measures on the heating and cooling demand as well as the overheating tendencies in the selected buildings.

INTRODUCTION

Energy use in Iran is rather high (approximately 85 GJ per capita per annum). Roughly 40% of total energy consumption of the country is due to buildings (IFCO 2009). As a significant increase in the – currently subsidized – energy prices is to be expected, thermal retrofit of existing buildings will become highly important. Thermally relevant building construction guidelines have been adopted since 2001, but most of the existing buildings do not comply with the new standards.

In this context, the present paper investigates the implication of alternative design and retrofit options for thermal performance (heating and cooling demand reduction potential) of existing residential buildings in Tehran. For the investigation three typical existing residential buildings with different layout plans were selected. Information was collected regarding local micro-climatic conditions, site circumstances, building material properties, construction details, technical data regarding devices for cooling, heating, lighting, appliances and user-related data (patterns of presence, operation of appliances and building control systems).

This information was fed into digital simulation models of the above mentioned buildings. Subsequently, parametric simulation were conducted to explore the impact of various thermal retrofit measures (e.g., better insulating envelope components, better glazing in terms of U- and g-values, deployment of external shading elements, use of natural ventilation and passive night-time cooling method) on the heating and cooling demand as well as the overheating tendencies in the selected buildings.

The simulation results demonstrate the theoretical improvement potential due to the explored thermal retrofit scenarios and measures.

METHOD

To compare the implications of various thermal retrofit measures, parametric simulation was applied. The objective was to identify those alternatives, which reduce heating and cooling loads of (and overheating tendencies in) existing apartments in Tehran. Three typical, recently constructed apartment buildings were selected. Figure 1 shows schematic floor plans of these apartments, referred to here as M, S, and Y.

The external walls of these buildings typically consist of (from outside to inside): granite stone (2 cm), mortar (2 cm), brick (20 cm), mortar (2 cm), and plaster (2 cm). This and other default constructions assumption (see table 1) was used to simulate the base line case. Options involved different levels of insulation (EW2, R2, P2), various glazing types (G1 to G4), external blinds (BL1 with assumed 90% solar gain reduction and an operation schedule based on sun position, deployed during the summer months), and ventilation regimes V1 (base case), V2 (active operation mode), and V3 (passive operation mode).

To obtain reliable information regarding internal gains, in ten different apartments detailed interviews were carried out to document the extent of occupancy as well as the operation of luminaires and domestic appliances. This led to the definition of two different internal gain assumptions (see Table 2). The first relates to a family of four (IG1), whereas the second represents a family of two (IG2). For each of these 2 internal gain types associated hourly load profiles were developed. IG1 was applied to two-third of apartment units in buildings M and S. The remaining units as well as units in building Y were assumed to be of type IG2.

Note that the existing buildings are characterized by marble or granite slabs on the facade. Retrofit via addition of insulation on these stone facades is not feasible. Thus, for the purposes of the present study, the envelope improvement options assume insulation is added on the inside surface of the elements.

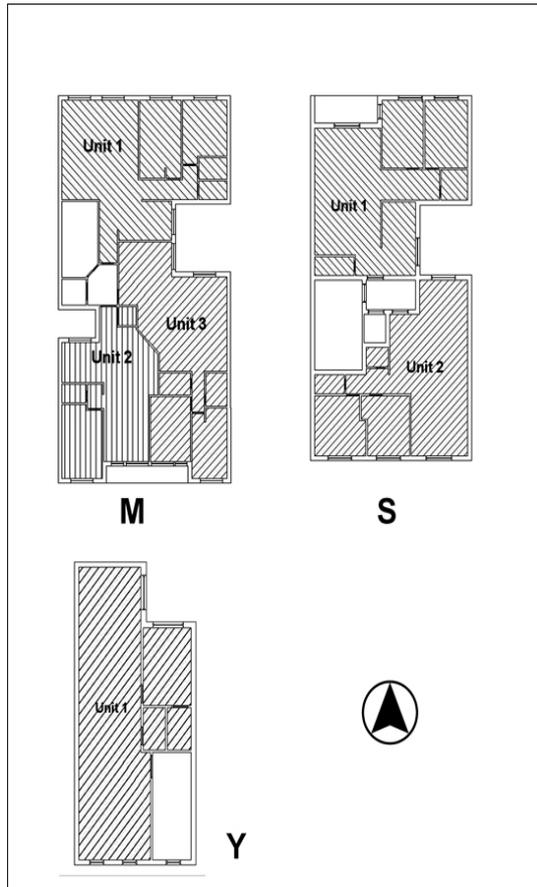


Figure 1. Schematic floor plans of the selected apartments (M, S and Y).

For the purposes of the parametric simulation runs, over 25 different combinations of the options summarized in Table 1 were generated. In the present paper, 11 scenarios out of this set are considered (see Table 3). A numeric thermal performance simulation tool (EDSL TAS 2009) was used to perform the simulations. Tehran climate was defined in terms of a weather file for the reference year 2008. Two types of simulations were performed:

- Active building operation assumption (leading to simulated heating and cooling loads)
- Passive (free running) building operation assumption (leading to estimated overheating tendency).

Overheating tendency was operationalized in terms of the indicator Mean Overheating (OH_m) as per equation 1.:

$$OH_m = \sum_{j=1}^n \frac{\theta_{i,j} - \theta_{ref}}{n} \quad [1]$$

Here $\theta_{i,j}$ refer to the mean indoor air temperature ($^{\circ}\text{C}$) at hour j (averaged over all simulated zones in each floor), θ_{ref} the reference indoor air temperature for overheating (26°C) and n the total number of hours during the simulation period (from April 1st to October 31st). Note that the term $\theta_{i,j} - \theta_{ref}$

is considered only for hours when $\theta_{i,j}$ is greater than θ_{ref} .

To compute the mean overheating, three different ventilation options were considered. The first set represents base case (see V1 in Table 1). The second set involves a night-time ventilation rate (see V2 in Table 1). The third set assumes, as compared to V2, higher ventilation rates (see V3 in Table 1).

To calculate heating and cooling demand, the thermostat setting was assumed to be between 19 and 26°C . Cooling loads were computed for ventilation schemes V1 and V2.

Table 1. Overview of the simulation assumptions and improvement options (*denotes existing construction features)

ITEM	CODE	DESCRIPTION
General information	M	15 Apt. in 5 Floors, North-South
	S	10 Apt. in 5 Floors, North-South
	Y	4 Apt. in 4 Floors, North-South
Roof	R1*	No insulation; $U = 3.27 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
	R2	20 cm insulation; $U = 0.22 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
External wall	EW1*	No insulation; $U = 1.70 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
	EW2	7cm insulation; $U = 0.57 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
Floor over parking area	P1*	No insulation; $U = 0.51 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
	P2	20 cm insulation; $U = 0.17 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
Glazing	G1*	Single glazing; $g = 0.78$; $\tau_v = 0.79$; $U = 5.46 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
	G2	Double glazing; $g = 0.78$; $\tau_v = 0.79$; $U = 2.80 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
	G3	Double glazing; $g = 0.41$; $\tau_v = 0.62$; $U = 2.80 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
	G4	Double glazing; $g = 0.48$; $\tau_v = 0.71$; $U = 0.92 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
Blinds	B0*	No blinds
	B1	External blinds
Ventilation	V1	$ACH = 0.6 \text{ h}^{-1}$
	V2	Winter: $ACH = 0.6 \text{ h}^{-1}$; Summer (08:00 to 23:00): $ACH = 0.6 \text{ h}^{-1}$; Summer (23:00 to 08:00): $ACH = 2 \text{ h}^{-1}$
	V3	Winter: $ACH = 0.6 \text{ h}^{-1}$; Summer (08:00 to 23:00): $ACH = 1 \text{ h}^{-1}$; Summer (19:00 to 08:00): $ACH = 10 \text{ h}^{-1}$

Table 2. Internal gain assumptions

CODE	DESCRIPTION
IG1	Family of 4 (2 adults, 2 children); occupancy: 5.1 W.m ⁻² ; equipment and lighting: 8.6 W.m ⁻²
IG2	Family of 2; occupancy: 3.2 W.m ⁻² ; equipment and lighting: 7.7 W.m ⁻²

Table 3. Overview of the 11 simulation scenarios

SCENARIO	GLAZING	BLIND	WALL	ROOF	FLOOR OVER PARKING
1	G1	B0	EW1	R1	P1
2	G1	B1	EW1	R1	P1
3	G2	B0	EW1	R1	P1
4	G2	B1	EW1	R1	P1
5	G3	B0	EW1	R1	P1
6	G4	B0	EW1	R1	P1
7	G4	B1	EW1	R2	P1
8	G1	B0	EW2	R1	P1
9	G1	B0	EW1	R2	P2
10	G2	B1	EW2	R2	P2
11	G4	B1	EW2	R2	P2

RESULTS

Figure 2 shows the simulated annual heating load of all buildings 11 scenarios as specified in table 2. The associated heating load reductions (in percentage) are shown in Figure 3.

Figure 4 shows the annual cooling load for all buildings and scenarios (ventilation scheme V1). Associated cooling load reductions are shown in Figure 5. Figure 6 shows annual cooling with ventilation set V2 (see table 1). The associated cooling load reductions are shown in Figure 7.

Figure 8 to 10 show simulated mean overheating values for ventilation sets V1 to V3 respectively.

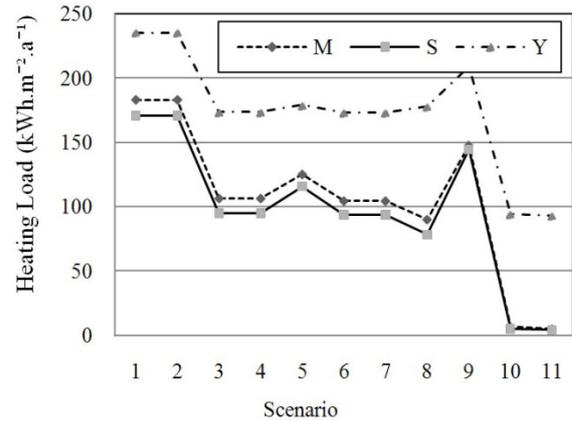
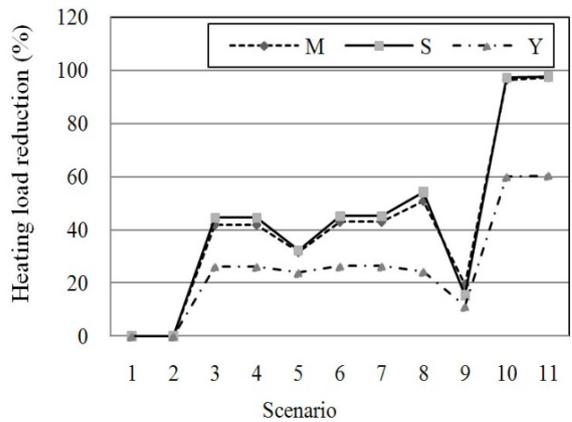
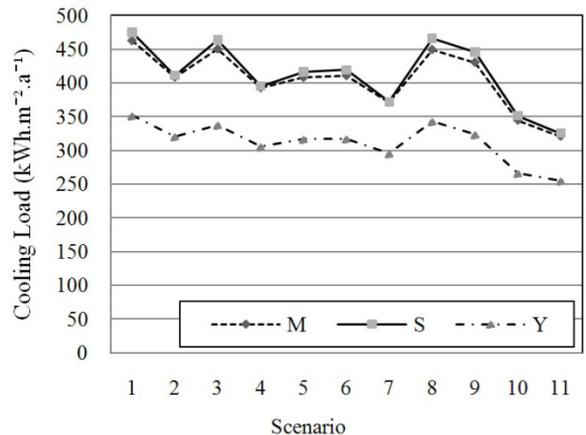

 Figure 2. Simulated annual heating load (in kWh m⁻²a⁻¹) for 11 scenarios (see table 2)


Figure 3. Simulated heating load reduction


 Figure 4. Simulated annual cooling load (in kWh m⁻²a⁻¹) (ventilation scheme V1)

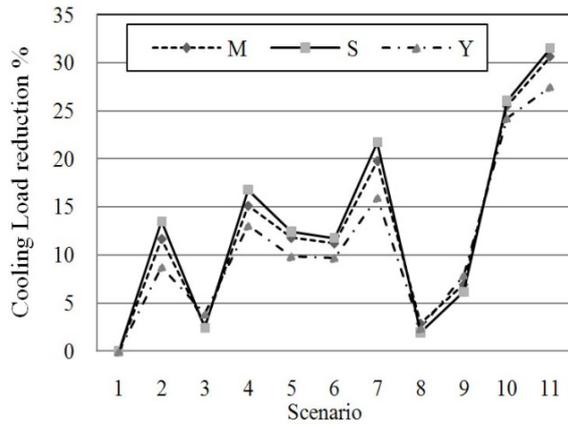


Figure 5. Simulated cooling load reduction (ventilation scheme V1)

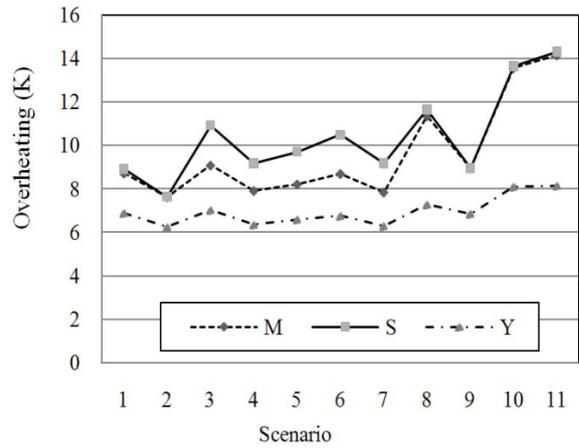


Figure 8. Mean overheating (ventilation set V1)

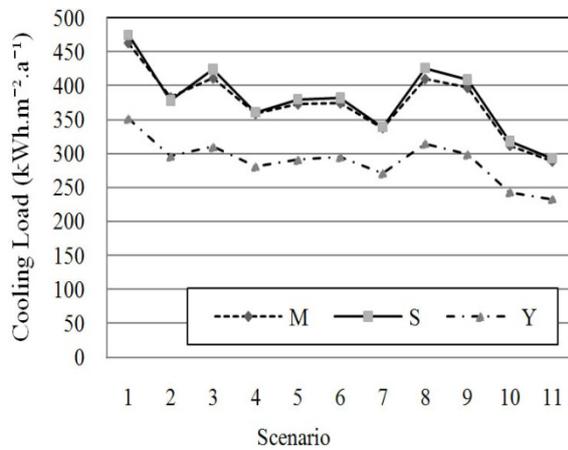


Figure 6. Simulated annual cooling load (ventilation scheme V2)

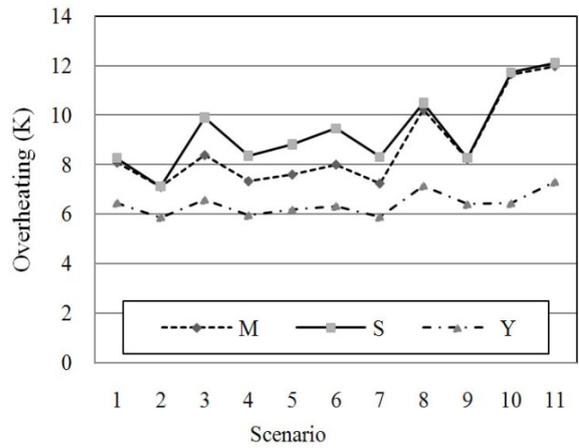


Figure 9. Mean overheating (ventilation set V2)

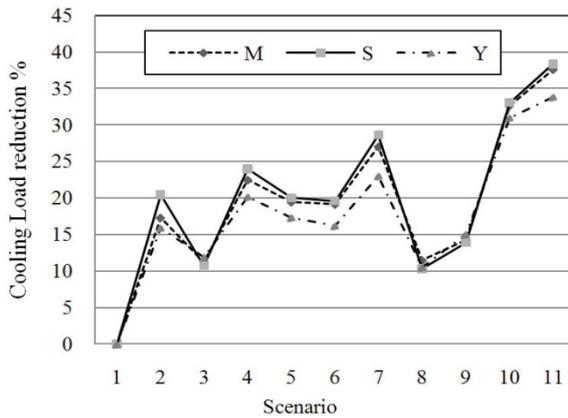


Figure 7. Simulated cooling load reduction (ventilation scheme V2)

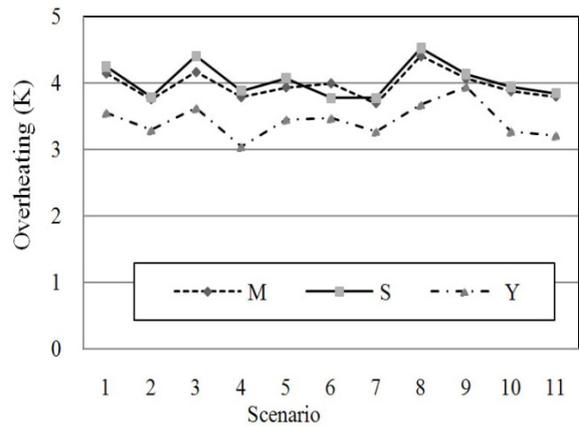


Figure 10. Mean overheating (ventilation set V3)

DISCUSSION

The heating load reduction potential due to thermal retrofit options is significant (see Figures 2 and 3). A combination of various measures allow to reduce heating load down to about 95% for buildings M and S and about 60% for building Y (as compared to the base case: scenario 1, Table 3). The difference between buildings M and S to building Y is mainly due to internal gains and corresponding reduction in required heating. These results imply that a drastic reduction (or even elimination) of mechanical equipment for heating in Tehran might be feasible.

The cooling load reduction is likewise remarkable (see Figures 4 and 5). It amounts to about 32% for buildings M and S and about 28% for building Y. Even better results can be achieved via the alternative ventilation set V2, namely 37% (buildings M and S) and 34% (building Y).

Results highlight the importance of solar protection toward cooling load reduction. As it can be seen from Figures 5 and 7, the scenarios with higher cooling load reduction (2, 4, 7, 10, and 11) involve the deployment of blinds. Amongst the scenarios, which do not involve blind deployment, only those with solar protection glazing (low g-values), namely scenario 5 (glazing G3) and scenario 6 (glazing G4) offer noteworthy levels of cooling load reduction.

A comparison of the cooling loads for ventilation schemes V1 (see Figures 4 and 5) and V2 (see Figures 6 and 7) implies that higher air exchange rates during summer nights might further reduce cooling loads (across all scenarios).

Thermal insulation of opaque building envelope components, without effective glazing and shading provides only modest improvement in terms of cooling load reduction (see scenarios 8 and 9, Figures 4 to 7). But given the absence of a negative effect on cooling load (no increase, modest reduction) and the positive effect on heating load (significant decrease), the application of thermal insulation is to be recommended.

A purely passive mode of building operation in the summer time results in rather high overheating levels (see mean overheating results in Figures 8 to 10). Nonetheless, high night-time ventilation rates (ventilation scheme V3) can lead to a significant reduction of overheating, down to values around 3 to 4 K.

CONCLUSION

The results of a parametric simulation study of the thermal performance of typical residential buildings in Tehran were presented. The results suggest that, through a combination of design and operation features (better envelope components, deployment of shading elements, use of natural ventilation and passive night-time cooling) a significant reduction of heating and cooling load can be achieved.

Specifically, heating systems could be significantly downsized or possibly even eliminated.

However, provision of thermally comfortable indoor environments in summer period via purely passive means represents a difficult challenge given the prevailing climatic conditions, the urban context, and the existing construction practices.

Ongoing research addresses a number of related questions. Measurements in building before and after thermal retrofit measures should help empirically verify the simulation-based conjectures stated in the present paper.

Moreover, an ongoing effort examines the implications of adding thermal insulation on the inside surface of external building envelope elements (walls, roofs, etc.). It has been argued, that inside insulation may cause problems due to heightened heat transfer via thermal bridges and well as potential water vapor condensation risk inside the external building components, particularly in the colder months of the year. The initial results of our investigation in this matter indicate that the later risk is rather low: calculated quantities of condensed water vapor inside walls in the winter period (for Teheran conditions) are low, such that – given proper detailing – any condensation should be dried out during the warmer months of the year. Moreover, calculated minimum surface temperatures of linear thermal bridges under standard indoor and outdoor conditions did not reveal any surface condensation risk.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to acknowledge the support of "europerl" (Perlit Production LTD) toward conducting research (development of perlite-based insulation panels for external walls and roofs) related to the themes discussed in the present contribution.

REFERENCES

- EDSL 2009. Thermal simulation application TAS. Environment Design Solution Limited. URL: www.edsl.com. (site visited November 2009)
- IFCO 2009. Iranian fuel conservation company (IFCO). URL: www.ifco.ir. (site visited November 2009)

GEKOPPELTE GEBÄUDE- UND ANLAGENSIMULATION MIT MODELICA

Dirk Müller, Azadeh Hosseini Badakhshani
 RWTH Aachen, E.ON Energy Research Center
 Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimattechnik
 Email: dmueller@eonerc.rwth-aachen.de

KURZFASSUNG

Zunehmende Anforderungen an die Energieeffizienz von Versorgungssystemen können zu komplexen gebäudetechnischen Anlagen führen, die nicht mehr mit einfachen Berechnungswerkzeugen bewertet werden können. Die steigenden Anforderungen an den Komfort erfordern zudem eine detaillierte Abbildung der empfundenen Temperatur, die bei leistungsbeschränkten Anlagen nur durch eine instationäre Berechnung aller Umschließungsflächen ermittelt werden kann.

Die Auslegung und die Optimierung dieser Systeme sind daher nur noch mit Hilfe von computergestützten Verfahren möglich. Am Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimattechnik wird hierfür seit vielen Jahren die Programmiersprache Modelica verwendet. Es wurden umfangreiche Bibliotheken sowohl für die Gebäude- als auch für die Anlagensimulation erstellt, aus deren Elementen die Gebäudestruktur und die Anlagentechnik zusammengesetzt werden können. Die strikte Objektorientierung ermöglicht es, Modelle zu verknüpfen, wieder zu verwenden und auszutauschen. Es ergibt sich eine Strukturierung und Übersichtlichkeit des Berechnungsmodells, sowie die Möglichkeit, Modellbausteine bei Bedarf zu erweitern oder zu vereinfachen.

Die Bibliothek für die thermische Gebäudesimulation enthält Elemente für alle Umschließungsflächen, Nutzerprofile und Wetterdaten. Das Wettermodell kann mit Daten der Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes sowie mit eigenen Messwerten arbeiten. Die zweite Bibliothek für die Anlagentechnik beinhaltet die üblichen Komponenten eines hydraulischen Systems sowie lüftungstechnische Anlagenteile. Die Zustandsänderungen von Medien werden anhand von empirischen Zusammenhängen oder tabellenbasiert berechnet. Dabei werden die Medienmodelle der Modelica_Fluid-Bibliothek verwendet; es können allerdings auch externe Medienbibliotheken integriert werden.

Abbildung 1 zeigt die Kombination der einzelnen Komponenten für eine gekoppelte thermisch-hydraulische Simulation. Das eingebaute Raummodell besitzt einen Luftknoten mit homogener Tem-

peraturverteilung. Wandmodelle mit eindimensionaler Diskretisierung sowie Fenster- und Türmodelle bilden die Umschließungsflächen des Raumes. Der Raum wird über einen Brennwertkessel mit einem Verteilsystem beheizt. Die implementierte Regelung übernimmt die Steuerung des Kessels, der Zirkulationspumpe und des Dreiwegeventils. Der Heizkreis wird anhand einer Heizkurve geregelt, die die Heizungsvorlauftemperatur in Abhängigkeit von der Außentemperatur vorgibt.

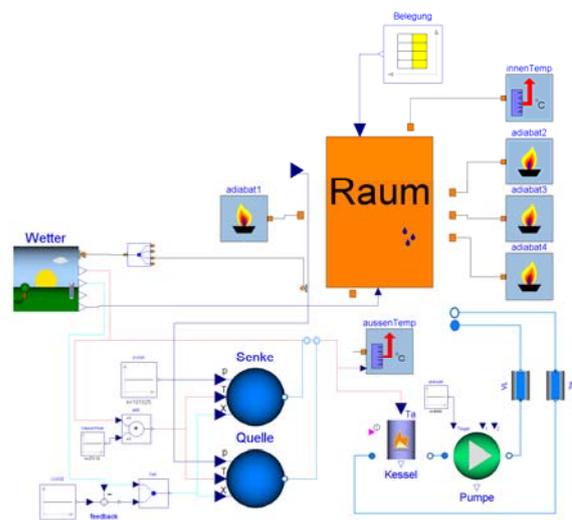


Abbildung 1: Modell für gekoppelte thermisch-hydraulische Simulation

ABSTRACT

Energy efficiency of buildings gains importance considering its great portion to the overall energy consumption and its huge potential for energy savings. As every existing and new building is a unique set-up, adaptable simulation tools are required to calculate and predict its energy demand.

The Modelica libraries developed at the Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate allow a detailed modelling of the whole thermo-hydraulic system. They are subdivided into a part considering the thermal building simulation taking structural effects, user behaviour and weather data into account. The components library allows the implementation of complex systems consisting of e.g. storage systems, heat pumps and geothermal probes.

EINLEITUNG

Die Simulationssprache Modelica ist eine frei verfügbare, objektorientierte Sprache, die durch die „Modelica association“¹ betreut und weiterentwickelt wird. Modelica eignet sich besonders zur Modellierung multiphysikalischer Systeme. Die Multi-Domäne Simulation hat bei der Gebäudesimulation eine große Bedeutung, da sowohl das thermische Verhalten des Gebäudes als auch das hydraulische Verhalten der Anlagentechnik abgebildet werden kann.

Der offene Charakter des Sprachstandards und der Standardbibliotheken gewährleistet eine gut nutzbare Entwicklungsumgebung für die Erstellung eigener Modelle. Der objektorientierte Ansatz ermöglicht die Erstellung komplexer Modelle, die auf Basis bereits aggregierter Teilmodelle erzeugt werden können.

Am Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimattechnik der RWTH Aachen wurde in den letzten Jahren, begleitend zu laufenden Forschungsprojekten, am Aufbau einer neuen Gebäude- und Anlagensimulation in der Programmiersprache Modelica gearbeitet. Für die Erstellung der eigenen Bibliotheken werden zwei von der Modelica Association entwickelte Komponenten-Bibliotheken verwendet: die Modelica Standard Bibliothek und Modelica-Fluid.

Die Modelica Standard Bibliothek enthält diverse Pakete mit den grundlegenden Komponenten einer physikalischen Systemmodellierung. Diese Bibliothek kann zur Simulation von verschiedenen digitalen und analogen elektrischen Bauteilen, mechanischen Komponenten mit Reibung und nützlichen thermischen Komponenten für die eindimensionale Wärmeleitung benutzt werden. Wichtige physikalisch-mathematische Konstanten wie π oder die Gravitationskonstante g sind in dieser Bibliothek definiert. Verschiedene Ein-/Ausgangsböcke sind im Paket „Blocks“ enthalten. Typ-Definitionen der physikalischen Größen basieren auf SI-Einheiten. Konversionen zwischen Einheiten sind in dieser Bibliothek ebenfalls möglich. Das Paket „Media“ enthält die Medienmodelle für ein- und mehrphasige Fluide mit mehreren Substanzen (Elmqvist et al, 2003).

Die Bibliothek „Modelica-Fluid“ ist insbesondere für die Hydrauliksimulation bedeutsam. Die Komponenten für die eindimensionale Beschreibung der Hydraulik und Rohrströmungen können dieser Bibliothek entnommen werden (Casella et al, 2006). Die Implementierung der Medienmodelle für die Modellierung des thermo-hydraulischen Verhaltens von Fluiden ist die wichtigste Anwendung von Modelica-Fluid in den neuen Bibliotheken. Die grundlegenden Komponenten der

Bibliotheken wurden bereits seit 2003 am Hermann-Rietchel-Institut der TU Berlin entwickelt (Hoh et al, 2005).

Die Struktur der neuen Bibliotheken ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Hauptbibliothek „BaseLib“, wird ergänzt durch eine Bibliothek zur Simulation der Anlagentechnik, die „HVAC“ Bibliothek und eine „Building“ Bibliothek mit den verschiedenen Gebäudekomponenten.



Abbildung 2: Struktur der Bibliotheken

BASELIB BIBLIOTHEK

Die BaseLib (Basic Library) Bibliothek bildet die Basis aller neuen Bibliotheken. So enthält BaseLib Komponenten, die in den anderen Bibliotheken mehrfach verwendet werden. Ohne diese Bibliothek sind die aufbauenden Bibliotheken (HVAC und Building) nicht funktionsfähig. Die Struktur dieser Bibliothek ist in Abbildung 2 dargestellt.



Abbildung 3: Struktur der BaseLib-Bibliothek

Zu den wichtigen Komponenten dieser Bibliothek gehören die verschiedenen thermischen „Interfaces“ für die Phänomene Leitung, Konvektion und Strahlung. Die Erstellung komplexerer Modelle basiert immer auf der Nutzung dieser Verbindungselemente.

Die Modelle zur Abbildung der unterschiedlichen Wärmetransportprozesse sind im Paket „HeatTransfer“ hinterlegt. Zusätzlich sind in dieser Bibliothek verschiedene Komponenten zur Simulation diverser Wärmequellen („Sources“) hinterlegt. Durch diese Elemente können unterschiedliche Verläufe für thermische Lasten oder Wärmestromdichten definiert und in die Berechnungsmodelle eingefügt werden.

¹ www.modelica.org

Hinter der Bezeichnung „Multiplier“ liegen Modelle zur Multiplikation der Wärme- oder Massenflüsse. Das Paket „Utilities“ beinhaltet Modelle und Funktionen, die für die Regelung oder Erstellung der anderen Komponenten benutzt werden können.

BUILDING BIBLIOTHEK

Die Modelle zur Simulation des thermischen Verhaltens des Gebäudes befinden sich in der Building-Bibliothek. Diese Bibliothek hat zwei Hauptverzeichnisse: Komponenten und Beispiele, siehe Abbildung 4. Basiselemente wie Wände, Türen und Fenster befinden sich in einem Komponentenverzeichnis. Die Wandmodelle simulieren mit einer vorwählbaren Diskretisierung den Wärmetransport durch die Wand. Es ist möglich, Wände mit mehreren Schichten aufzubauen und dadurch die bauphysikalischen Eigenschaften der Wände detailliert abzubilden. Die Fenster- und Türenmodelle sind in der Lage, die Luftwechsel und mögliche Infiltration durch diese Elemente zu berücksichtigen. Modelle des Luftvolumens, die sich ebenfalls in dieser Bibliothek befinden, können sowohl trockene als auch feuchte Luft berücksichtigen.



Abbildung 4: Aufbau der Building-Bibliothek

Eine Besonderheit dieser Bibliothek ist, dass externe Wetterdaten direkt in die Modelle eingefügt werden können. Die entsprechenden Wettermodelle lesen diese externen Wetterdaten und konvertieren alle Angaben in ein Format, das innerhalb der Bibliotheken verwendet werden kann. Die Position der Sonne, die Luftfeuchtigkeit, der Luftdruck, die Lufttemperatur, die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung können in den Wetterdatensätzen berücksichtigt werden. Durch die Einbindung von Messdaten, können Feldexperimente direkt nachgerechnet werden.

Im Verzeichnis „Examples“ gibt es Beispiele von Modellräumen und Modellräumen mit Wettermodellen. Mit Hilfe dieser Beispiele können die Anwender einfach auf komplexe Modelle zugreifen und diese für die eigenen Aufgabenstellungen erweitern.

Übersicht der Wandmodelle

In der Building-Bibliothek gibt es bereits verschiedene Wandmodelle, die für unterschiedliche Aufgaben verwendet werden können. Als ein Beispiel ist in Abbildung 5 der graphische Aufbau des Modells *ConvNLayerClearanceStar* gezeigt. Die Parameter dieses Modells sind: Länge und Höhe der Wand, Anzahl der Schichten, die Dichte, die thermische Leitfähigkeit, die Wärmekapazität jeder Schicht, die Anfangstemperatur und der Emissionskoeffizient für den Strahlungstransport. Die Ausrichtung (horizontal/vertikal, innen/außen) dieser Wand kann ebenfalls als ein Parameter festgelegt werden. Die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten wird an die Ausrichtung der Wand angepasst. Im Fall einer Außenwand wird der Windgeschwindigkeitseinfluss nach Norm DIN EN ISO 6946:2008 berücksichtigt. Die Windgeschwindigkeit kann durch einen „RealInput“ Port eingegeben werden. Für Innenwände erfolgt eine Berechnung nach Glück (Glück 1990).

In diesem Wandmodell gibt es die Option, eine bestimmte Fläche als Lücke (clearance) zu definieren. In diese Lücke kann später im Gesamtmodell des Raums ein Fenstermodell oder Türmodell implementiert werden.

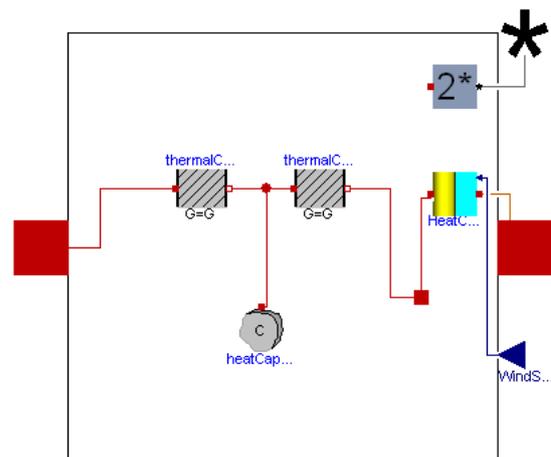


Abbildung 5: Graphischer Aufbau des Wandmodells: *ConvNLayerClear*

HVAC BIBLIOTHEK

In der „Heating, Ventilation and Air Conditioning“ Bibliothek („HVAC“) sind alle Modelle für die Abbildung von anlagentechnischen Komponenten hinterlegt.

Im Hauptverzeichnis „Komponenten“, siehe Abbildung 6, wird eine breite Auswahl an Anlagenkomponenten für den Aufbau einer Simulation gegeben. In den Rohrmodellen werden das thermische und das hydraulische Verhalten der Fluide abgebildet. Die physikalischen Eigenschaften der Rohre und die Dämmung der Leitungssysteme können als Parameter angegeben werden.

Komplexere Modelle, wie zum Beispiel die Pumpenmodelle, können mit Regelstrategien (konstanter Volumenstrom, konstanter Differenzdruck etc.) versehen werden. Die Heizflächenmodelle im Paket „HeatExchanger“ können die konvektive Wärmeabgabe und den Strahlungstransport an den Raumwände simulieren. Unter „Sources“ sind Wärmequellen- und Wärmesenkenmodelle enthalten. Diese Modelle können eine Kältemaschine oder einen Kessel darstellen. Auch komplexere Wärmepumpenmodelle sind unter „Sources“ abgelegt.

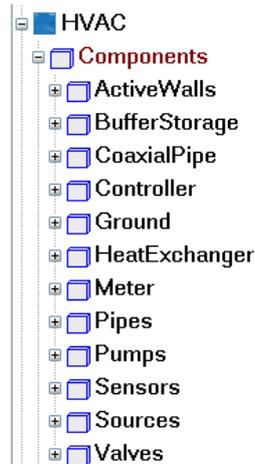


Abbildung 6: Komponenten der HVAC-Bibliothek

Zwei weitere Komponenten in der HVAC-Bibliothek sind die Ventile und Sensoren. Je nach Regelstrategie können die Ventile den Massenstrom oder Temperaturen regulieren. Es stellt sich ein auf der Ventilkennlinie basierender Druckverlust ein. Mit den Temperatursensoren kann die Temperatur in Kelvin oder Celsius an jedem Ort eines Leitungssystems bestimmt werden

Im Paket „Ground“ gibt es Modelle zur Berechnung einer Erdreichanbindung. Diese Modelle können zum Beispiel an „CoaxialPipe“ Modelle angeschlossen werden, um eine Erdsonde abzubilden.

Auch in dieser Bibliothek wurde für jede Komponente ein Beispiel hinterlegt. Die Beispiele zeigen, wie Interfaces miteinander verbunden sind und welche externen Informationen in die Modelle mit eingebunden werden können.

Beispiel einer freien Heizfläche

Abbildung 7 zeigt ein Modell einer freien Heizfläche, in dem die Wärme des Fluids durch Konvektion und Strahlung an den Raum abgegeben wird. Das Verhältnis der konvektiven Wärmeabgabe zum Strahlungstransport wird über den definierten Typ der freien Heizfläche festgelegt (DIN EN 442-2). Entsprechend der DIN hängt die Wärmeleistung einer freien Heizfläche von der Temperaturdifferenz zwischen der Heizfläche und dem Raum ab:

$$\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{nom}} = \left(\frac{\Delta T_{log}}{\Delta T_{log,nom}} \right)^n \quad (1)$$

$$\Delta T_{log} = \frac{T_V - T_R}{\ln \left(\frac{T_V - T_{Raum}}{T_R - T_{Raum}} \right)} \quad (2)$$

Hier sind \dot{Q} die Wärmeleistung und \dot{Q}_{nom} die Nennleistung der freien Heizfläche. T_V und T_R sind die Vor- und Rücklauftemperatur. T_{Raum} bezeichnet die Raumtemperatur.

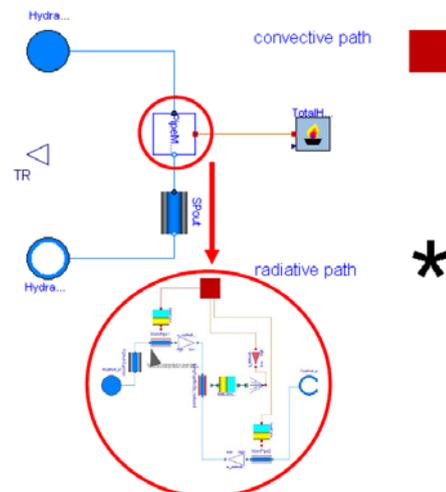


Abbildung 7: Graphische Darstellung des Modells einer freien Heizfläche

Das Modell verwendet für die Berechnung des Wärmeübergangs die logarithmische Übertemperatur ΔT_{log} , um die Simulation zu vereinfachen. Alternativ kann ein feiner diskretisiertes Modell der freien Heizfläche verwendet werden.

DATABASE-BIBLIOTHEK

DataBase ist die Datenbank für die Parametrierung aller Modelle. Insbesondere die Herstellerdaten der Anlagenkomponenten wie Kessel, Ventile, Pumpen, Rohre und freier Heizflächen sowie thermische und bauphysikalische Eigenschaften diverser Wandaufbauten und Fenstertypen befinden sich in dieser Bibliothek.

ZUSAMMENFASSUNG

Die neuen Bibliotheken ermöglichen eine geschlossene Simulation der thermischen Eigenschaften eines Gebäudes sowie eine hydraulische Zustände des Versorgungssystems. Abbildung 8 zeigt eine graphische Darstellung eines Gesamtmodells auf Basis der vorgestellten Anlagen- und Gebäudebibliotheken.

Räume, Nutzer, Wetter und Anlagentechnik können einschließlich der Regelungstechnik dynamisch berechnet werden, so dass das thermo-hydraulische Verhalten des Gebäudes bewertet werden kann.

Die Bibliotheken werden kontinuierlich weiterentwickelt, um neue Komponenten ergänzt und an geeigneten Beispielen validiert. Die Bibliotheken werden über ein zunächst geschütztes Internetportal bereitgestellt an Kooperationspartner weitergeben. Die externen Nutzer können über dieses Internetportal die Modelle herunterladen und für eigene Projekte. Neue Modelle sollten nach der Fertigstellung über das Internetportal anderen Nutzer zur Verfügung gestellt werden.

Ein Kommunikationsportal gibt den Anwendern die Möglichkeit, aktiv in die Verbesserung der Modelle eingebunden zu werden.

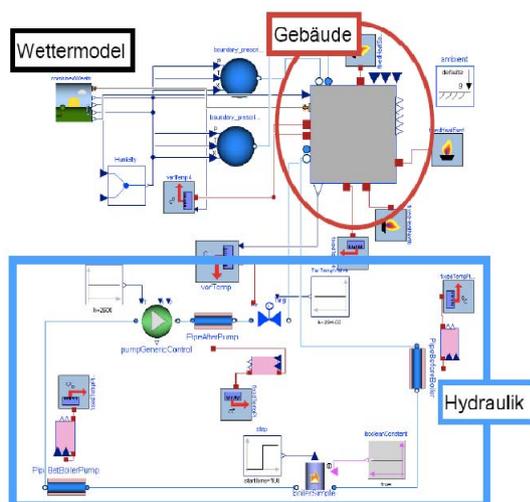


Abbildung 8: Gesamtmodell einer thermo-hydraulischen Simulation

DANKSAGUNG

Dieses Projekt wurde durch den Projektträger PTJ im Forschungszentrum Jülich unter dem Förderkennzeichen 0327466A betreut und durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie finanziert, wofür wir uns herzlich bedanken.

LITERATUR

- Casella, F., Otter, M., Proelss, k., Richter., und Ch., Tummescheit, H., 2006. The Modelica Fluid and Modelica library for modeling of incompressible and compressible thermo-fluid pipe networks, 5rd International Modelica Conference, Wien, Österreich . (Modelica Fluid)
- Elmquist, H., Tummescheit, H., und Otter, M., 2003. Object-Oriented Modeling of Thermo-Fluid Systems, 3rd International Modelica Conference, Linköping, Schweden. (Modelica Fluid)
- Glück, B., 1990. Wärmeübertragung, Wärmeabgabe von Raumheizflächen und Rohren, 2.Auflage, Verlag für Bauwesen GmbH
- DIN EN ISO 6946. 2008. Bauteile-Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient, Deutsche Normen Anhang A

UNTERSUCHUNGEN ZUM EINSATZ VON VERDUNSTUNGSKÜHLUNG INNERHALB EINES HYBRIDEN LÜFTUNGSKONZEPTES

Wojciech Kozak, Alf Perschk, Markus Rösler
 Institut für Energietechnik, TU Dresden, Dresden, Germany
Wojciech.Kozak@tu-dresden.de, Alf.Perschk@tu-dresden.de,
Markus.Roesler@tu-dresden.de

KURZFASSUNG

Das Aufrechterhalten der thermischen Behaglichkeit bei hochsommerlichen Verhältnissen stellt auch in neuen Gebäuden mit hohem Niveau der Wärmedämmung ohne Nutzung energieintensiver RLT-Anlagen eine Herausforderung dar. Trotz moderater innerer Gewinne und intensivem Schutz vor solaren Gewinnen bleibt oft eine die thermische Behaglichkeit beeinträchtigende Kühllast bestehen. Dieser Artikel beschreibt rechnerische Untersuchungen zu einem hybriden Lüftungskonzept für einen Raum, in dem die Kühlung von einem direkten Verdunstungskühler bereitgestellt wird. Die Forschungsarbeiten werden im Rahmen eines DST-DFG-Kooperations-Programmes mit dem Indian Institute of Technology Roorkee durchgeführt, wo ein Prototyp eines solchen Kühlers vermessen und optimiert wird.

Dieser Artikel analysiert die Anwendungsmöglichkeiten von direkter Verdunstungskühlung im Niedrigenergiehaus und im traditionellen, schlecht gedämmten Gebäude unter mitteleuropäischen sommerlichen Wetterverhältnissen. Außerdem wird der Einfluss der Verschattung, der Lüftungsstrategie und der Wärmedämmung auf die thermische Behaglichkeit im Raum und den Energieverbrauch der Lüftungsanlage diskutiert. Alle Berechnungen wurden mit dem Programm TRNSYS (Klein et al. 1976) in einer weiterentwickelten Version der TU Dresden ausgeführt (Perschk, 2000) und (Perschk et al., 2007).

Als Ergebnis lässt sich ausweisen, dass in Kombination mit einer passenden Lüftungsstrategie und ausreichender Verschattung der direkte Verdunstungskühler in der Lage ist, die thermische Behaglichkeit auf einem mit einer RLT-Anlage vergleichbaren Niveau zu halten. Der Energieverbrauch ist wesentlich niedriger als bei Klima-Anlagen. Weiterhin kann gezeigt werden, dass die Feuchtespeicherung in den Wänden auf einem akzeptablen Niveau bleibt.

ABSTRACT

It is a challenge to attain a high level of thermal comfort during the summer without using energy intensive air conditioning systems even with high insulation standards of the walls in new buildings. Despite moderate inner loads and intensive protections

against solar gains a cooling load often remains that affects the thermal comfort. This paper investigates by means of computer simulation a hybrid ventilation concept where cooling is provided by a direct evaporative cooler. The research work has been carried out within a DST-DFG cooperation program with the Indian Institute of Technology Roorkee, where a prototype of such a cooler is investigated and optimised.

This paper analyses the potential for use of evaporative coolers in low energy buildings and traditional buildings with lower insulation standard under Central European summer conditions. In addition, the influence of shading appliances, ventilation strategy and thermal insulation of the building on the thermal comfort attained in the simulated room along with the energy consumption of the used system is investigated. For the simulations the program TRNSYS (Klein et al. 1976) is applied, but in a special version developed by TU Dresden (Perschk, 2000) and (Perschk et al., 2007).

It has been found that evaporative coolers, together with a suitable ventilation strategy and sufficient shading are able to provide levels of thermal comfort comparable with those gained by mechanical air conditioning systems. The energy consumption is substantially lower and effects on the humidity content of the walls are in the safe region.

EINLEITUNG

In vielen Teilen der Welt ermöglichen die klimatischen Bedingungen die Nutzung von Verdunstungskühlung. Mit den Mitteln der thermischen Gebäudesimulation kann untersucht werden, welche raumklimatischen Parameter beim Einsatz von Verdunstungskühlung in Kombination mit anderen Maßnahmen, die vorrangig die Gebäudehülle betreffen, erreichbar sind. Dazu wurde ein Modellraum ausgewählt, der als repräsentativ für ein Büro oder auch ein Wohnzimmer angesehen werden kann und bereits zu Untersuchungen zum sommerlichen Kühlfall herangezogen wurde (Richter, 2007), siehe auch Abbildung 1. Bevor die Zusammenstellung der Randbedingungen erfolgt, sei kurz auf das benutzte Programmsystem eingegangen.

ÜBERBLICK PROGRAMMSYSTEM

Das den vorgestellten Untersuchungen zugrunde liegende Programmsystem TRNSYS-TUD ist eine Dresdner universitäts- bzw. institutsinterne Weiterentwicklung des kommerziellen Gebäudesimulationsprogrammes TRNSYS (Klein et al., 1976). Für Details bezüglich der vorgenommenen umfangreichen Modifikationen sei auf (Perschk, 2000) verwiesen.

Für die Modellierung der Verdunstungskühlung im Rahmen eines hybriden Lüftungskonzeptes ist das Programmsystem um entsprechende Unterprogramme (TYPES) ergänzt worden, ansonsten konnte auf die Programmstruktur zurückgegriffen werden, die innerhalb des IEA-ECBCS-Projektes Annex 41 „Whole Building heat, air and moisture response“ entwickelt und validiert wurde, siehe (Perschk et al., 2007). Die Parameter zur Charakterisierung des Verdunstungskühlers sind unter anderem aus den Messungen am IIT Roorkee (Pradhan, 2008) abgeleitet worden.

RANDBEDINGUNGEN, PARAMETER UND BERECHNUNGSVARIANTEN

Gebäude bzw. Raum und Wetterbedingungen

Der in Abbildung 1 dargestellte Raum ist als Teil eines Gebäudes zu verstehen, das aus gleichartigen Räumen besteht. Der Raum ist 5m breit, 6m lang und 3m hoch. Das Fenster ist nach Süden ausgerichtet und hat eine Fläche von 4.5m², was einem Drittel der Fläche der Außenfassade entspricht. Der Raum ist einerseits im Niedrigenergiehausstandard (U-Wert Fenster 2,31W/m²K, G-Wert 0,62) und andererseits als massive Betonkonstruktion mit Einscheibenverglasung ausgeführt.

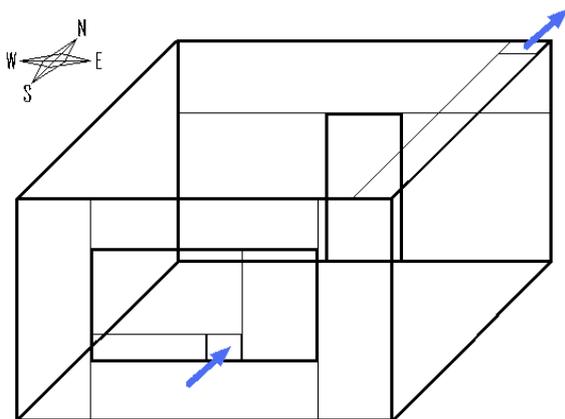


Abbildung 1 Modellraum mit einem nach Süden ausgerichteten Fenster

Für die vorliegenden Untersuchungen wurden die Wetterdaten für einen extremen Sommer im östlichen Teil Deutschlands (TRY04_SOM) verwendet, Referenzstation ist Potsdam. Die Simulation umfasst die Monate Juni, Juli, August.

Innere Gewinne

Im Zeitraum zwischen 08:00 Uhr und 12:00 Uhr und zwischen 13:00 Uhr und 17:00 Uhr befinden sich im Raum zwei Menschen, deren Wärmeabgabe mit 100W und deren Wasserdampfemission mit 35g/h je Person angenommen wurde. Da der Raum zunächst ein Büro darstellen soll, wurden in der Zeit zwischen 08:00 Uhr und 17:00 Uhr zusätzlich zwei Computer mit einer Wärmeabgabe von je 100W modelliert.

Lüftung und Verdunstungskühler

Durch eine einfache Lüftungsanlage wird der Raum mit Außenluft versorgt. Die Lufteintrittsöffnung befindet sich innerhalb der Fensterkonstruktion und ist, wie auch die Austrittsöffnung, in Abbildung 1 gekennzeichnet.

Der Luftwechsel in dem untersuchten Raum beträgt maximal 1,0h⁻¹ und ist von der Lüftungsart abhängig. Es wurden drei Lüftungsarten definiert: *Lüftungsart 1* - es wird mit dem Luftwechsel von 1,0h⁻¹ nur in der Nutzungszeit gelüftet, d.h., wenn die Personen im Raum anwesend sind (08:00-12:00 und 13:00-17:00). Die Lüftung kann direkt mit Außenluft, mit der Luft aus dem Verdunstungskühler oder einer Mischung davon erfolgen. Zur Lüftung in dieser Zeit wird die in Abbildung 2 dargestellte Anlage genutzt.

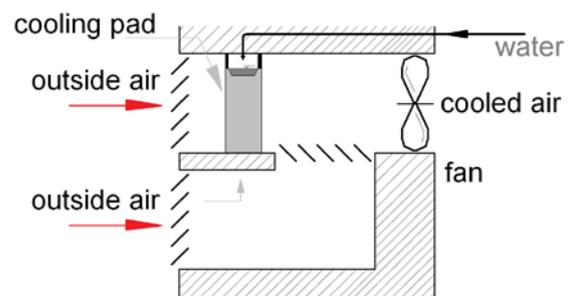


Abbildung 2 Einbau des Verdunstungskühlers in der Zuluftanlage.

Lüftungsart 2 - Zusätzlich zur Lüftung in der Nutzungszeit wird in der Nacht zwischen 22:00 Uhr und 06:00 Uhr mit Außenluft und konstantem Luftwechsel von 1,0 h⁻¹ gelüftet. Die Nachtlüftung wird abgeschaltet, wenn die Empfindungstemperatur im Raum unter 20°C fällt.

Lüftungsart 3 - In der Zeit zwischen 06:00 Uhr und 22:00 Uhr wird der Raum mit Außenluft, Luft aus dem Verdunstungskühler oder einer Mischung davon belüftet. In der Nacht (22:00-06:00) wird mit Außenluft gelüftet, solange die minimale Temperatur von 20°C nicht unterschritten wird.

Verschattung

Es wurden drei Arten der Verschattung modelliert:

1. keine Verschattung
2. normale Verschattung - Die außenliegenden Jalousien schirmen 67% der gesamten Solarstrahlung ab. Sie werden aktiviert, wenn die solare Einstrahlung auf die Fensteroberfläche einen Wert von 180 W/m^2 überschreitet und werden deaktiviert wenn dieser Wert unter 110 W/m^2 fällt.
3. starke Verschattung - Die außenliegenden Jalousien schirmen 84% der gesamten Solarstrahlung ab und werden genau wie in Fall 2 betrieben.

BEWERTUNGSWERKSZEUGE

Thermische Behaglichkeit

Aus Messungen oder rechnerischen Simulationen eines Gebäudes lässt sich eine große Anzahl zeitlicher Verläufe der Temperatur und anderer Größen gewinnen, wie in der Abbildung 3 beispielhaft dargestellt.

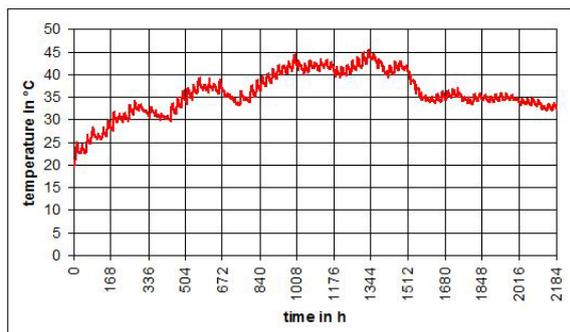


Abbildung 3 Beispiel eines Temperaturverlaufes

Um die Ergebnisse verschiedener Konfigurationen gut vergleichen zu können, werden die zeitlichen Verläufe in eine Häufigkeitsverteilung umgeformt. Aus einer Funktion der Temperatur in Abhängigkeit von der Zeit entsteht eine Funktion der Häufigkeit des Auftretens einer Temperatur von diesem Wert, wie in der Abbildung 4 dargestellt (blaue Balken). Die Verteilung ist aus den in Abbildung 3 ersichtlichen Daten generiert.

Aus der Verteilung kann man wiederum eine summativ Häufigkeit bilden, die über den untersuchten Temperaturbereich immer die Werte zwischen 0 und 100% annimmt (rote Linie in der Abbildung 4). Die summativ Häufigkeit kann für alle interessanten Größen gebildet werden und macht einen Vergleich zwischen mehreren Anlagen einfach.

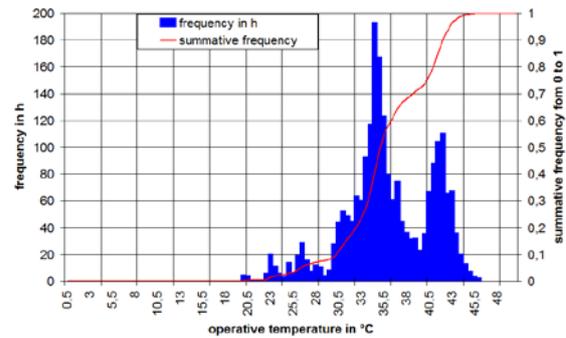


Abbildung 4 Häufigkeitsverteilung der Temperatur (blau) und ihre summativ Häufigkeit (rot)

In diesem Beitrag werden operative Temperatur (Empfindungstemperatur) und Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) nach (DIN EN ISO 7730, 2006) ausgewertet, um die thermische Behaglichkeit im Raum zu beurteilen.

Energieverbrauch

Neben der thermischen Behaglichkeit ist vor allem der Energiebedarf der Anlage von Interesse. Dieser hat direkten Einfluss auf die Höhe der Betriebskosten und der CO_2 - Emission, die von der Anlage verursacht wird.

Zur Abschätzung des Energiebedarfs wird hier die Betriebszeit der Lüftungsanlage und des Verdunstungskühlers aufgenommen. Der Betrieb der Lüftungsanlage wirkt sich im Stromverbrauch für den Ventilator aus. Der Betrieb des Verdunstungskühlers wirkt sich im Stromverbrauch der Wasserpumpe und im Wasserverbrauch aus.

AUSGEWÄHLTE ERGEBNISSE

Die Ergebnisse der Untersuchung sind sehr umfangreich und wurden deswegen in Abhängigkeit der untersuchten Einflussgröße dargestellt.

Einfluss der Lüftungsart

Aus Abbildung 5 ist ersichtlich, dass die zusätzliche Lüftung in der Nacht einen positiven Einfluss auf die thermische Behaglichkeit im Raum hat.

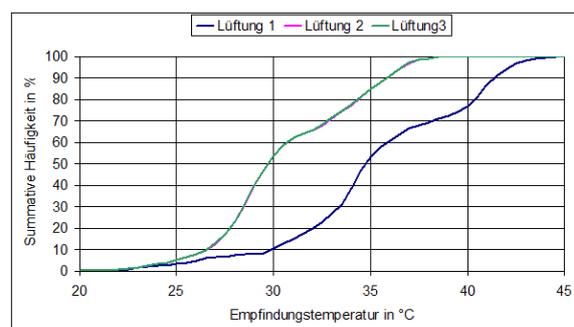


Abbildung 5 Einfluss der Lüftungsart auf die Empfindungstemperatur im Raum ohne Verschattung

Es trat praktisch kein Unterschied zwischen den Lüftungsarten 2 und 3 auf, da die zusätzliche Lüftung größtenteils bei mittleren Außentemperaturen stattfindet und kaum thermischen Einfluss auf den Raum hat. Deswegen decken sich in den folgenden Abbildungen die Ergebnisse für Lüftungsarten 2 und 3. Der Einfluss der Lüftungsart ist am stärksten für den Raum ohne jegliche Verschattung. Das Niveau der thermischen Behaglichkeit ist in diesem Fall eigentlich nicht diskussionswürdig. Die operative Temperatur im Raum ist deutlich über der Behaglichkeitsgrenze. Auch bei intensiver Lüftung (Lüftung 3) wird für mehr als die Hälfte (ca. 55%) der Zeit die Temperatur von 30°C überschritten. Die behaglichen Temperaturen um 24,5°C können in weniger als 5% des ausgewerteten Zeitraumes erreicht werden (siehe Abbildung 6).

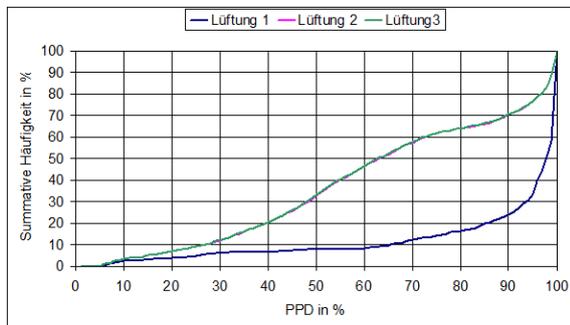


Abbildung 6 Einfluss der Lüftungsart auf die thermische Behaglichkeit im Raum ohne Verschattung

Die Situation verbessert sich deutlich, sobald eine Außenverschattung eingebaut wird. Der weniger belüftete Raum hält die Temperatur unter der 25°C-Grenze für 40% der Zeit und der intensiv belüftete für 80% der Zeit (Abbildung 7).

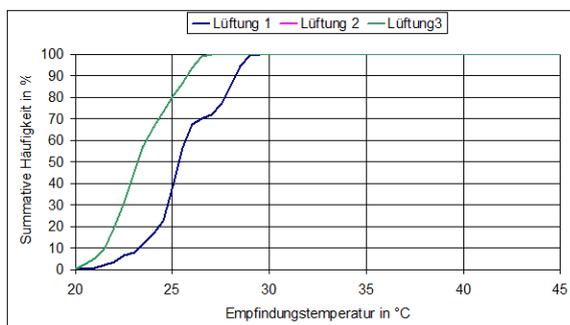


Abbildung 7 Einfluss der Lüftungsart auf die Empfindungstemperatur im Raum mit normaler Verschattung

Es bleibt jedoch ein Behaglichkeitsdefizit bestehen, wenn der Raum ohne Nachtlüftung betrieben wird. Erst die Auskühlung des Raumes während der Nacht sichert eine akzeptable thermische Behaglichkeit, siehe Abbildung 8.

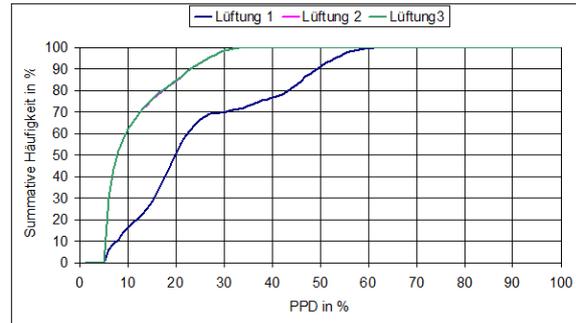


Abbildung 8 Einfluss der Lüftungsart auf die thermische Behaglichkeit im Raum mit normaler Verschattung

Ähnliche Ergebnisse wie in Abbildung 8 können mit Hilfe einer starken Verschattung gewonnen werden (Abbildung 9).

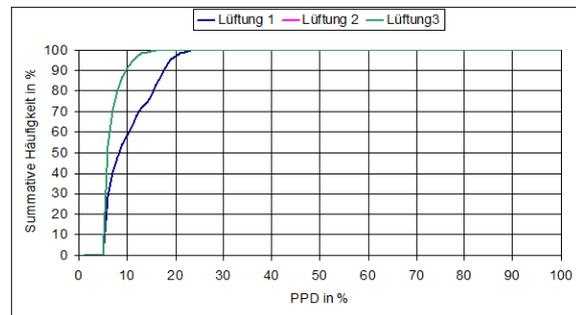


Abbildung 9 Einfluss der Lüftungsart auf die thermische Behaglichkeit im Raum mit starker Verschattung

Das Zusammenführen der Nachtlüftung und starken Verschattung ergibt ein Behaglichkeitsniveau, das mit denen in klimatisierten Räumen vergleichbar ist. Für 90% der Zeit liegt der PPD-Index unter 10%-Grenze und überschreitet nie die 20%-Grenze.

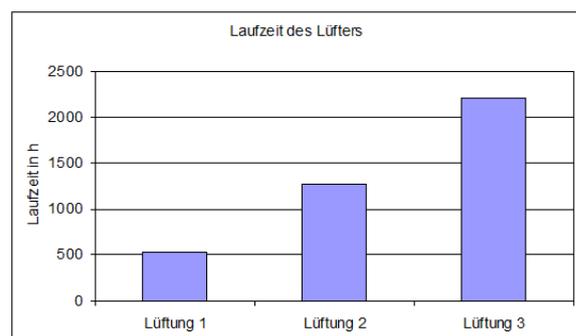


Abbildung 10 Einfluss der Lüftungsart auf Laufzeit des Lüfters im Raum

Die Laufzeit des Ventilators bleibt praktisch unabhängig von der Verschattung, nur die Lüftungsart hat Einfluss auf die Laufzeit des Ventilators und dadurch auf dessen Stromverbrauch (Abbildung 10).

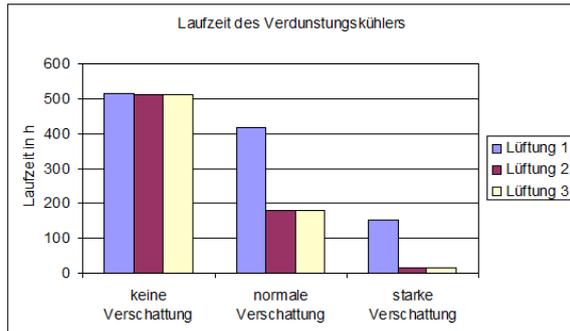


Abbildung 11 Einfluss der Lüftungsart und Verschattung auf Laufzeit der Wasserpumpe.

Die Situation gestaltet sich anders bei der Laufzeit der Wasserpumpe des Verdunstungskühlers. Sie wird sowohl von der Lüftungsart als auch von der Verschattung des Raumes deutlich beeinflusst (Abbildung 11).

Einfluss der Verschattung

Um den Einfluss der Verschattung deutlich zu machen werden die Ergebnisse für eine Lüftungsart verglichen. Verständlicherweise hat die Verschattung den entscheidenden Einfluss auf die erreichbare thermische Behaglichkeit. Die Ursache dafür ist der Aufbau des Raumes mit einem großen, nach Süden ausgerichteten Fenster. Ohne Abschirmung der direkten solaren Gewinne kann keine akzeptable thermische Behaglichkeit in diesem Raum erreicht werden, siehe Abbildung 12.

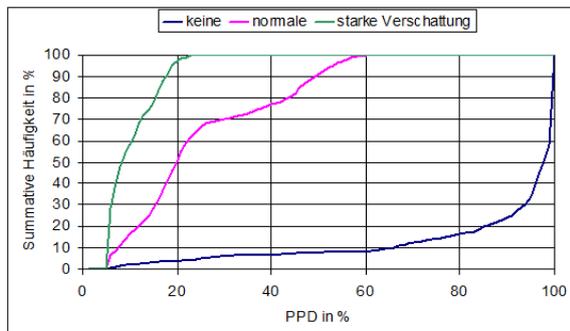


Abbildung 12 Einfluss der Lüftungsart auf die therm. Behaglichkeit im Raum mit Lüftungsart 1

Die Lage ist zwar nicht ganz so kritisch, wenn der Raum ordentlich gelüftet wird, trotzdem bleibt die Verschattung unverzichtbar (Abbildung 13).

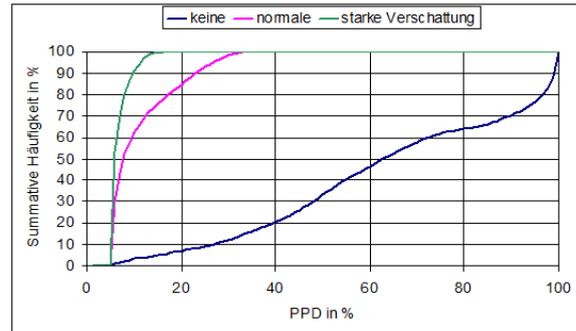


Abbildung 13 Einfluss der Lüftungsart auf die thermische Behaglichkeit im Raum mit Lüftungsart 3

Noch günstigere Verhältnisse im Raum könnten mit höherem Luftwechsel (und vorausgesetzter hoher Lüftungseffektivität) gewonnen werden.

Potenzial des Verdunstungskühlers

Aus der bisherigen Analyse ist schwer zu erkennen wie groß der Beitrag des Verdunstungskühlers zur Einhaltung der thermisch behaglichen Bedingungen im untersuchten Raum ist. Um dieses zu verdeutlichen, wurden die Simulationsergebnisse für die Lüftung mit Außenluft zu denen mit Lüftung über den Verdunstungskühler verglichen.

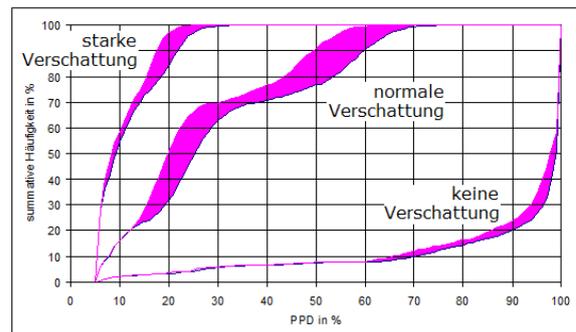


Abbildung 14 Kühlungspotenzial des Verdunstungskühlers für Lüftungsart 1.

Der Unterschied in der thermischen Behaglichkeit zwischen den Lüftungssystemen mit Verdunstungskühler und denen, die die Außenluft direkt zu Lüftungszwecken verwenden, wurde in den Abbildungen 14 und 15 als schraffierte Fläche zwischen den Kurven dargestellt. Das Kühlpotential wird kleiner mit fallender Wärmebelastung des Raumes. Die Intensität der Lüftung spielt auch eine sichtbare Rolle. Wenn der Raum gut verschattet und intensiv belüftet wird, kann der Verdunstungskühler nur wenig zur Verbesserung der thermischen Behaglichkeit beitragen (siehe Abbildung 15).

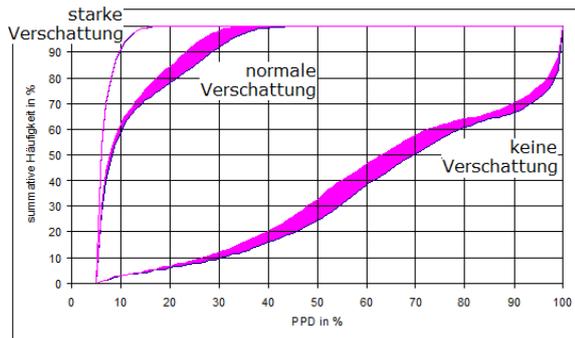


Abbildung 15 Kühlpotential des Verdunstungskühlers für Lüftungsart 3.

Tabelle 1 zeigt das Kühlpotential des Verdunstungskühlers in Grad-Stunden. Wegen der Abweichungen zwischen der operativen Raumtemperatur und dem PPD-Index unterscheiden sich die Verhältnisse der Abbildungen 12 und 13 von den aus der operativen Temperatur ausgerechneten Werten in Tabelle 1.

Tabelle 1
Kühlpotential des Verdunstungskühlers
in einem modernen Gebäude in Grad-Stunden

VER-SCHAT-TUNG	LÜFTUNGSART		
	1	2	3
Keine	2087	1601	1614
Normal	1687	670	673
Stark	679	30	30

Abhängig von der angewendeten Lüftung und den baulichen Maßnahmen kann der Verdunstungskühler als eine wertvolle Vervollständigung des Lüftungskonzeptes wirken oder ist kaum notwendig.

Einfluss des Reglungsalgorithmus

Der Einfluss des Reglungsalgorithmus auf die thermische Behaglichkeit wurde für zwei Typen des Reglers untersucht:

1. einen PI-Regler, dessen Sollwerttemperatur 24,5°C betrug und
2. einen Zwei-Punkt-Regler (2P), dessen Einschalttemperatur auf 24,75°C und dessen Ausschalttemperatur auf 24,25°C gesetzt wurde.

Der Einfluss der Reglerart ist bei hohen Lasten sehr gering, weil der Kühler einfach die ganze Zeit in Betrieb bleibt. Deswegen überlappen sich die PPD-Kurven, siehe Abbildung 16.

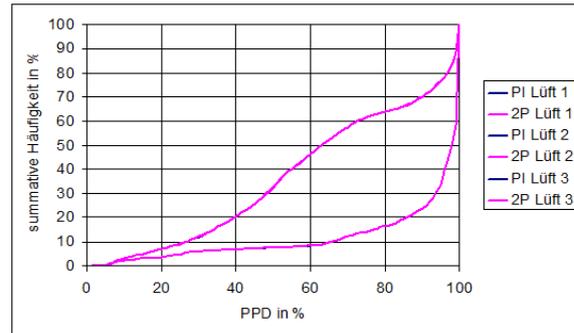


Abbildung 16 Einfluss des Reglers auf die thermische Behaglichkeit im Raum ohne Verschattung

Die Situation bleibt unverändert wenn die Verschattung berücksichtigt wird (Abbildung 17). Dies ist durch die geringe Leistung des Verdunstungskühlers und die kleine Schalthysterese zu erklären.

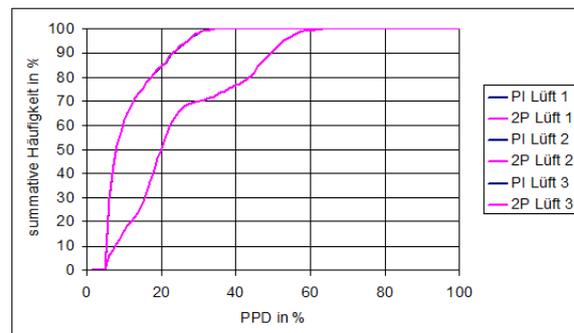


Abbildung 17 Einfluss des Reglers auf die thermische Behaglichkeit im Raum mit normaler Verschattung

Daher ist hier der Zwei-Punkt-Regler als eine kostengünstigere Lösung zu empfehlen.

Einfluss des Dämmstandards

Die oben angegebenen Simulationen wurden auch für einen traditionellen, schlecht gedämmten Raum durchgeführt. Es besitzt die gleiche Geometrie damit auch das gleiche Volumen. Der Unterschied liegt in der Wandkonstruktion, die hier aus geputztem Stahlbeton besteht und dem Fenster, das hier nur eine einfache Verglasung besitzt. Das Kühlpotential des Verdunstungskühlers in so einem Raum wurde mit Hilfe von Grad-Stunden in der Tabelle 2 erfasst.

Tabelle 2
Kühlpotential des Verdunstungskühlers
in einem traditionellen Gebäude in Grad-Stunden

VER-SCHAT-TUNG	LÜFTUNGSART		
	1	2	3
Keine	1969	1593	1606
Normal	1727	731	734
Stark	792	154	154

Es ist ersichtlich, dass die Anwendung des Verdunstungskühlers im traditionellen Gebäude auch bei sehr starker Verschattung sinnvoll ist, um die thermische Behaglichkeit im Raum zu erhalten. Die Unterschiede im Kühlpotential des Verdunstungskühlers sind auf die größere Masse des traditionellen Gebäudes und die geringe Isolierung der Fenster zurückzuführen. In den Abbildungen 18 und 19 wurden die Unterschiede im Behaglichkeitsniveau zwischen modernen und traditionellen Räumen dargestellt.

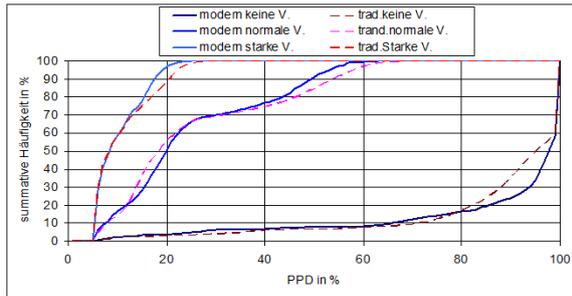


Abbildung 18 Thermische Behaglichkeit in modernen und traditionellen Gebäuden bei Lüftungsart 1

Moderne, hochwärmegedämmte Gebäude (durchgezogene Linien) verhalten sich günstiger als traditionelle Bauwerke (gestrichelte Linien) so lange sie sehr starke Verschattung der Fenster besitzen. Wenn die Verschattung nicht vorhanden ist, ist der Diskomfort in traditionellen Gebäuden erkennbar geringer.

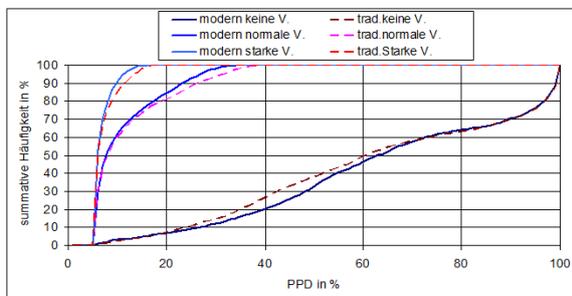


Abbildung 19 Thermische Behaglichkeit in modernen und traditionellen Gebäuden bei Lüftungsart 2

Bei normaler Verschattung und üblicher Lüftung verhalten sich die beiden Bauweisen vergleichbar, mit leichtem Gewinn für besser gedämmte Gebäude, da die maximalen Raumtemperaturen geringer sind.

Einfluss der Effizienz eines Verdunstungskühlers

Alle bisherigen Untersuchungen haben eine konstante Effizienz (μ) des Verdunstungskühlers angenommen. Die Effizienz wurde mit 60% gewählt, was aber nach Bauweise des Kühlers variieren kann. Um diesen Einfluss zu quantifizieren wurden auch Simulationen mit höherer Effizienz des Verdunstungskühlers durchgeführt (Abbildung 20).

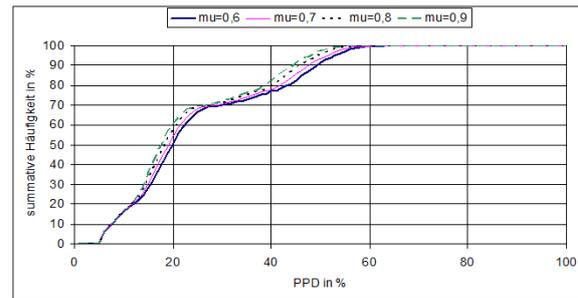


Abbildung 20 Einfluss der Kühleffizienz auf die thermische Behaglichkeit im Raum ohne Verschattung mit Lüftungsart 1

Das Kühlpotential des Verdunstungskühlers ändert sich natürlich positiv bei Erhöhung seiner Effizienz. Bei hohen solaren Gewinnen und geringer Lüftung ist dieses Potential am größten, wie in Tabelle 3 angegeben.

Tabelle 3

Ausgewählte Werte des Kühlpotentials des Verdunstungskühlers in einem modernen Gebäude in Abhängigkeit von den Randbedingungen in Grad-Stunden

VERSCHATTUNG	LÜFTUNGSART	UNTERSCHIED IM KÜHLPOTENTIAL ZWISCHEN MU=0,6 UND 0,9
Keine	1	1045
Normal	1	756
Normal	2	256
Stark	3	2

Bei modernen Gebäuden mit starker Verschattung und intensiver Lüftung ist die Effizienz des Verdunstungskühlers ohne großen Einfluss. In Gebäuden mit wenig Verschattung bzw. geringer Lüftung kann dagegen eine Steigerung der Kühleffizienz eine Verdopplung der Wirkung mit sich bringen.

Feuchtehaushalt der Außenwände

Ein direkter Verdunstungskühler kann potenziell Probleme mit dem Feuchtehaushalt der Wände verursachen, da er im Sommer, wenn das Gebäude nach dem Winter austrocknet, noch eine zusätzliche Wasserdampfquelle im Inneren darstellt. Die ungünstigste Variante in dieser Hinsicht sollte also Lüftungsart 1 mit ihrer relativ kurzen Lüftungszeit darstellen. Die Ergebnisse für diesen Fall und verschiedene Stärken der Verschattung sind in Abbildung 21 dargestellt.

Wegen des relativ kurzen Einschwing- und Auswertungszeitraumes ist es nicht möglich, endgültige Aussagen zum Feuchtegehalt der Wände zu treffen. Jedoch kann auch in so einem kurzen Zeitraum festgestellt werden, ob die Tendenz steigend oder fallend ist. Dadurch können Stellen aufgedeckt werden an denen genauere und aufwändigere Untersuchungen nötig sind.

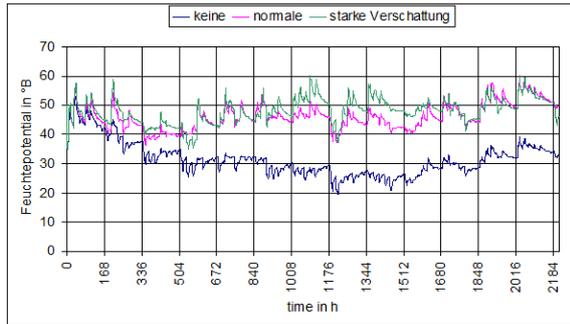


Abbildung 21 Feuchtepotential in der Außenwand im Raum mit Lüftungsart 1

Für den Raum ohne Verschattung ist der Feuchtegehalt der Wände eindeutig abnehmend. Dies gilt jedoch nicht für die Situation mit normaler oder starker Verschattung. In diesen Fällen ist eine weitere, genauere Untersuchung des Feuchtegehalts der Wände notwendig, um eventuelle Probleme festzustellen bzw. auszuschließen. Intensivere Lüftung mildert dieses Risikopotenzial, aber endgültige Aussagen werden erst nach den geplanten, detaillierten Untersuchungen möglich.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Ergebnisse der vorgenommenen Untersuchungen belegen, dass direkte Verdunstungskühlung einen wirksamen Beitrag zur Verbesserung der raumklimatischen Verhältnisse im Hochsommer erbringen kann. In Kombination mit effizienter Verschattung und Nachtlüftung werden im Niedrigenergiehaus sogar thermisch behagliche Verhältnisse der höchsten Kategorie erreicht. Der Energiebedarf dafür ist vergleichsweise gering. Die Ergebnisse für einen Raum mit niedrigem Wärmedämmstandard aber in schwerer Bauweise sind nicht wesentlich schlechter, können jedoch kaum als repräsentativ für indische Verhältnisse angesehen werden, da aus Gründen der Vergleichbarkeit zunächst die gleichen Wetterdaten und eine eher untypische Gebäudedichtheit angenommen wurde. Weitere Untersuchungen dazu sowie detaillierte Analysen der raumklimatischen Verhältnisse für kurze Zeitspannen werden demnächst veröffentlicht.

Der Verdunstungskühler hat die größte Auswirkung auf die thermische Behaglichkeit im Raum wenn eine übliche Verschattung angewendet wird. In diesem Fall ist auch die Steigerung seiner Effizienz vorteilhaft für die Verhältnisse im Raum. Der Einsatz des Kühlers ist preisgünstig und erfordert, wie oben gezeigt, keine aufwendige Regelung. Wegen seiner relativ geringen Leistung muss der Verdunstungskühler als eine zusätzliche Maßnahme zur Erhöhung der Nutzerbehaglichkeit gesehen werden. Ohne andere bauliche und anlagentechnische Maßnahmen schafft er nicht, behagliche Verhältnisse im Raum zu gewährleisten. Die bisherigen Untersuchungen weisen keine kritischen Zustände des Feuchtehaushaltes der Wände

aus. Die erforderliche Lüftungsstrategie, die einen über den ganzen Raum und die ganze Kühlperiode ausgewogenen Feuchtehaushalt der Wände garantiert, muss noch endgültig bestimmt werden.

DANKSAGUNG

Die Arbeiten werden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des „Indo-German Programme of Co-operation“ unterstützt.

LITERATUR

- DIN EN ISO 7730. Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD - Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit. Berlin: Beuth Verlag 2006.
- Klein, S. A., Duffie, J. A., Beckman, W. A. 1976. TRNSYS - A Transient Simulation Program. ASHRAE Trans 82 (1976), S. 623.
- Perschke, A. 2000. Gebäude-Anlagen-Simulation unter Berücksichtigung der hygrischen Prozesse in den Gebäudewänden. Dissertation. TU Dresden.
- Perschke, A., Meinhold, U. 2007. Ein Modell zur hygrisch-thermischen Gebäudesimulation mit Hilfe der Kopplung von Zonen- und Feldmodell. Bauphysik 29 (2007). Heft 1.
- Pradhan, S. 2008. Enhancement of cooling efficiency of an evaporative cooling system. Masterthesis, IIT Roorkee. 2008
- Richter, W. 2007. Handbuch der thermischen Behaglichkeit - Sommerlicher Kühlbetrieb. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Forschung F2071. Dortmund, Berlin, Dresden 2007

KOMBINATION VON LATENTWÄRMESPEICHERN MIT SOLARTHERMIE

Corinna Leonhardt und Dirk Müller
 RWTH Aachen, E.ON Energy Research Center
 Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimattechnik
 Email: cleonhardt@eonerc.rwth-aachen.de

KURZFASSUNG

Im Bereich der Raumkühlung sind Latentwärmespeicher (LWS) bereits in aktiver und passiver Anwendung fest vertreten. Gerade der Einsatz von Paraffin oder Salzhydrat als Phasenwechselmaterial bietet die Möglichkeit den Einsatz der Latentwärmespeicher zu erweitern und diese auch als Wärmespeicher in modernen Heizsystemen zu integrieren.

Die Vorlauftemperatur eines modernen Gebäudeheizungssystems beträgt ca. 35 °C. Damit diese geringe Temperatur effizient genutzt werden kann, muss das herkömmliche Heizspeichersystem überarbeitet werden. Eine Möglichkeit der effizienten Nutzung der zur Verfügung gestellten Energie ist durch das Einbinden eines Latentwärmespeichers in das Heizungssystem gegeben. Das Arbeitsprinzip eines LWS ist der Phasenwechsel. Es können während der Phasenänderung des Latentwärmespeichermaterials bei kleinen Temperaturänderungen große Energiemengen gespeichert werden. D.h. durch das Einbinden eines Latentwärmespeichers in das Heizungssystem kann eine effiziente Nutzung der zur Verfügung gestellten Energie erreicht werden, indem z.B. die Speicherverluste aufgrund der niedrigen Speichertemperaturen gesenkt werden können.

Gerade beim Einsatz von Solarthermie kann durch die Verwendung eines LWS die vorhandene Energie effizienter genutzt werden und in der Übergangszeit Frühjahr und Herbst kann durch die niedrigen benötigten Vorlauftemperaturen des Heizungssystems ein Beitrag zur Heizungsunterstützung geleistet werden.

Mit Hilfe von Gesamtsystemsimulationen wird die Kombination von LWS und Solarthermie betrachtet und ausgewertet.

ABSTRACT

Modern heating systems for buildings need a supply temperature of approximately 35°C. In order to use such supply temperatures efficiently, the standard heat storage systems must be redesigned. The integration of a latent heat storage system in a modern heating system ought to enhance the overall system performance.

The combination of a latent heat storage model with a solar heating system and dynamic building simulation models provides a closed simulation

model to study major influences on the overall system performance.

EINLEITUNG

In dieser Arbeit wird mit Hilfe von ersten Simulationen ermittelt, wie sich für ein Standardsystem (Kessel und Solarthermie) die Integration eines Latentwärmespeichers im Vergleich zum Warmwasserspeicher auswirkt. Hierfür wird ein Gesamtsystem, welches aus einem Gebäude und Solarthermieanlage besteht, thermohydraulisch untersucht.

Die verwendete Modellierungssprache ist Modelica. Für die thermo- hydraulische Simulation des Gebäudes kann auf die im Institut für Gebäude- und Raumklimattechnik der RWTH Aachen entwickelten Bibliotheken zurückgegriffen werden. Die *Building Bibliothek* enthält zum Beispiel verschiedene Wände, Fenster und Türen. In der *HVAC Bibliothek* sind Rohrleitungen, Pumpen, Radiatoren und viele weitere Komponenten, die für die Gebäudesimulation benötigt werden, hinterlegt.

Der im Fokus des Projektes stehende modellierte Latentwärmespeicher besteht aus mehreren einzelnen Platten, die umströmt werden. Die einzelnen Speichermatten können bei Bedarf in zwei Richtungen diskretisiert werden. Weiterhin ist es möglich unterschiedliche Phasenwechselmaterialien einzusetzen, um für die jeweilige Anwendung das optimale Paraffin oder Salzhydrat zu finden.

Das Solarthermiemodell soll zunächst wirkungsgradbasiert abgebildet werden und später durch ein detailliertes Modell ersetzt werden.

SOLARTHERMIE

Über das Jahr verteilt schwankt das Solarangebot.

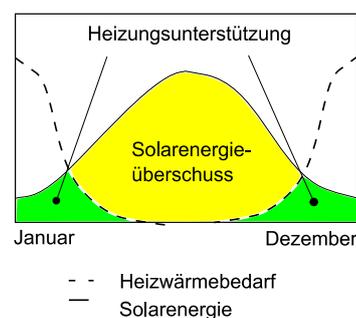


Abbildung 1 Schematische Darstellung der Solarenergie und des Heizwärmebedarfes für ein Jahr

Abbildung 1 zeigt schematisch den Zusammenhang zwischen dem Solarangebot und dem, für das Heizen, benötigten Wärmebedarf. Die in den Übergangsmonaten (März bis Mai und August bis November) und darüber hinaus vorhandene Solarenergie kann zur Heizungsunterstützung verwendet werden. Hier stellt gerade die Kombination mit einem Latentwärmespeicher und den niedrigen Vorlauftemperaturen (35 °C) einer modernen Heizungsanlage eine aussichtsreiche Anwendung dar.

Solarthermiemodell

Der simulierte Solarkollektor ist zunächst optimal für die Heizungsunterstützung ausgerichtet, d.h. er ist südlich orientiert und besitzt eine Neigung von 60 ° - für eine überwiegende Sommernutzung und Trinkwarmwasserbereitung müsste entsprechend eine Neigung von 30 ° gewählt werden, um die Solarenergie optimal zu nutzen. Das Kollektormodell wird mit Hilfe der Wirkungsgradgleichung abgebildet. Der Kollektorstufigen wird beschrieben durch Gleichung (1) und ist abhängig von der Eintritt- und Austrittstemperatur des Kollektors, der Außentemperatur, der Sonneneinstrahlung und der Sonnenposition.

$$\eta = \eta_0 \cdot K_\theta - \frac{a_1 \cdot (t_m - t_a)}{G} - a_2 \cdot G \cdot \left[\frac{(t_m - t_a)}{G} \right]^2 \quad (1)$$

mit:

η	Kollektorstufigen
η_0	optische Verluste
K_θ	Winkelkorrekturfaktor oder IAM: Incident Angle Modifier
a_1	Verlustbeiwert 1
a_2	Verlustbeiwert 2
$(t_m - t_a)$	Temperaturdifferenz zwischen der mittleren Kollektorstufigen und der Außentemperatur
G	Globalstrahlung (Orientierung und Einstrahlung berücksichtigt)

Die Parameter η_0 , a_1 , a_2 und K_θ können aus Datenblättern getesteter Kollektoren entnommen werden (z.B. [SPF]). Die Beschreibung des Kollektors über diesen Wirkungsgrad bietet die Möglichkeit auch die Abhängigkeiten vom Einfallswinkel (K_θ) zu berücksichtigen.

Weiterhin bietet das Kollektormodell die Möglichkeit verschiedene Kollektortypen (z.B. Röhrenkollektoren und Flachkollektoren – insgesamt

10 verschiedene Typen sind bisher implementiert) für die jeweilige Simulation auszuwählen.

Die untenstehende Abbildung zeigt das Kollektormodell in der grafischen Ansicht in Dymola. Insgesamt besteht das Modell aus Wetterdaten (links im Bild), dem Kollektor selbst (rechts im Bild) und dem hydraulischen System, das an die weitere Anlagentechnik des Gebäudes angeschlossen werden kann. Weiter unten im Bild befindet sich ein Ausschnitt des Kollektors, hier werden unter anderem die Winkelkorrekturfaktoren und weiteren Parameter eingelesen.

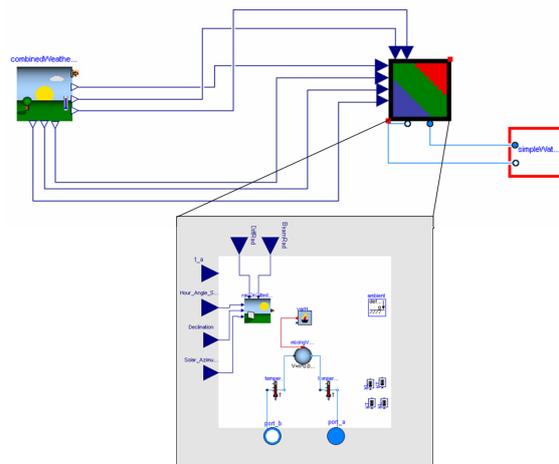


Abbildung 2 Solarthermiemodell in Modelica

Die ersten Berechnungen wurden mit einem Röhrenkollektor durchgeführt.

LATENTWÄRMESPEICHER

Allgemein dient ein Speicher dazu die zeitliche Diskrepanz zwischen dem Energieangebot und des Energiebedarfs zu entzerren. Besonders attraktiv ist er dann, wenn er in Zeiten des „kostenlosen“ Wärmeangebots aus der Umwelt (Solarenergie) geladen werden kann und dann in der Nacht diese Energie für die Gebäudeheizung genutzt werden kann. Optimal ist der Fall dann, wenn gespeicherte Energie und Bedarf übereinstimmen, so dass der Bedarf vollständig gedeckt werden kann. Wie bereits im Abschnitt Solarthermie angesprochen wurde, sind die Übergangsmonate ein viel versprechender Anwendungsbereich und durch die Verwendung des Latentwärmespeichers kann diese eingespeicherte Energiemenge noch effizienter genutzt werden (siehe Abbildung 3). Dies ist möglich, da der LWS den Phasenwechsel nutzt, um bei kleinen Temperaturdifferenzen eine größere Energiemenge als im Falle der sensibeln Speicherung zu speichern.

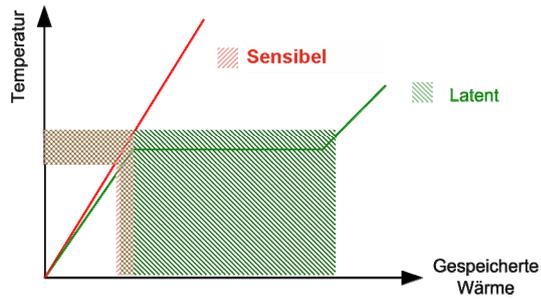


Abbildung 3 Gegenüberstellung der sensiblen und der latenten Wärmespeicherung

Als mögliche Latentwärmespeichermaterialien bietet sich Paraffin oder Salzhydrat (siehe Abbildung 4) an, da diese Materialien bei 35 °C einen Phasenwechsel aufweisen können.

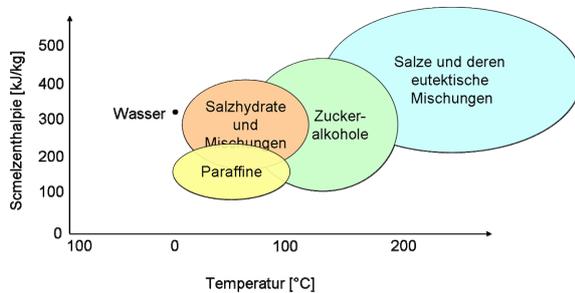


Abbildung 4 Verschiedene LWS-Materialien

Latentwärmespeichermodell

Es wurde ein thermo- hydraulisches Modell des LWS entwickelt, welches auf einer einfachen Energiebilanz in der Form:

$$\sum \dot{Q}_i = m_{LWS} \cdot c_{LWS} \cdot \frac{dT_{LWS}}{dt} \quad (2)$$

basiert. Die Summe aller Wärmeströme ist demnach gleich dem Produkt aus der Masse m_{LWS} , der spezifischen Wärmekapazität c_{LWS} und der Ableitung der Temperatur T_{LWS} nach der Zeit. Die spezifische Wärmekapazität des Latentwärmespeichermaterials wird in Abhängigkeit der Temperatur beschrieben. Den Hintergrund hierfür bietet eine Näherung der Enthalpie über die Beschreibung mittels einer Arcustangens Funktion. Ein typischer Verlauf ist in dem untenstehenden Diagramm zu sehen.

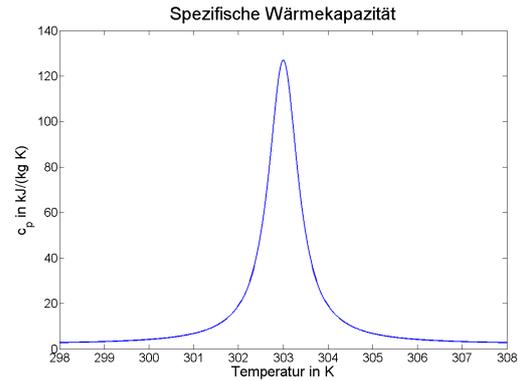


Abbildung 5 spezifische Wärmekapazität in Abhängigkeit von Temperatur

Gezeigt ist hier der Verlauf für ein typisches Latentwärmespeichermaterials mit einer Schmelztemperatur von 30 °C und einer Schmelzenthalpie von 120 kJ/kg.

Das gesamte LWS- Modell besteht aus zwei Hauptkomponenten: Latentwärmespeichermaterial als Kapazität und einer Fluidkomponente – hier Wasser.

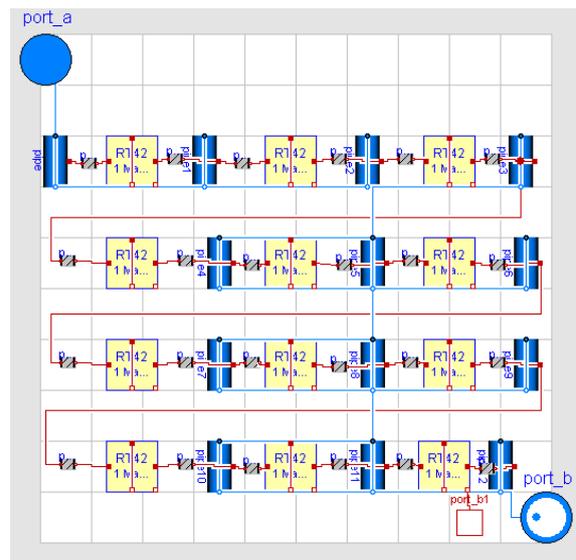


Abbildung 6 Latentwärmespeichermodell

In Abbildung 6 ist ein Modell eines Latentwärmespeichers gezeigt, welcher aus 12 einzelnen Platten (gelbe Komponenten), die mit Wasser (blaue Komponenten) umströmt werden, besteht. Die Platten sind mit Latentwärmespeichermaterial gefüllt und können, ausgehend von Herstellerdaten, verschiedene Materialien abzubilden.

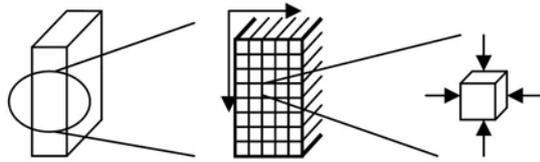


Abbildung 7 Latentwärmespeichermodell

Dabei kann jede Platte bei Bedarf weiter diskretisiert werden, so dass ein Temperaturverlauf über eine Platte ermittelt werden kann (siehe Abbildung 7). Für die hier vorgestellten Ergebnisse ist aufgrund des durch die höhere Diskretisierung entstehenden Rechenaufwands auf eine höhere Diskretisierung verzichtet worden.

Zurzeit handelt es sich um ein ideales LWS- Modell, ohne hydraulischen und thermischen Verluste. Das Latentwärmespeichermodell lässt sich einfach um die Verlustterme erweitern, jedoch fehlen hier noch Informationen, wie und in welcher Höhe diese Verluste überhaupt auftreten.

Damit das Modell möglichst alle Effekte abbilden kann, wird am Lehrstuhl für Gebäude und Raumklimotechnik ein Latentwärmespeicher gebaut, so dass die Verluste bald an einem Leistungsprüfstand (siehe Abbildung 8) am Institut ermittelt werden können.

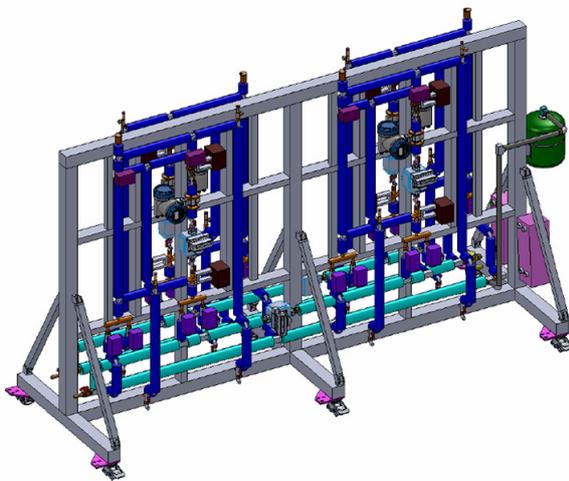


Abbildung 8 Latentwärmespeicherprüfstand

GESAMTSYSTEM

Abbildungen 9a und 9b zeigen das betrachtete Gesamtsystem, welches aus einem Boiler, Solarkollektor, Gebäude, Speicher und einem Wettermodell besteht.

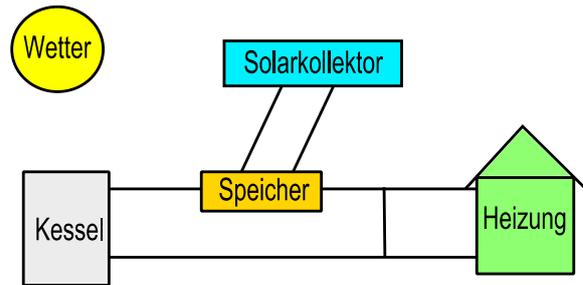


Abbildung 9a Schema des Gesamtsystems

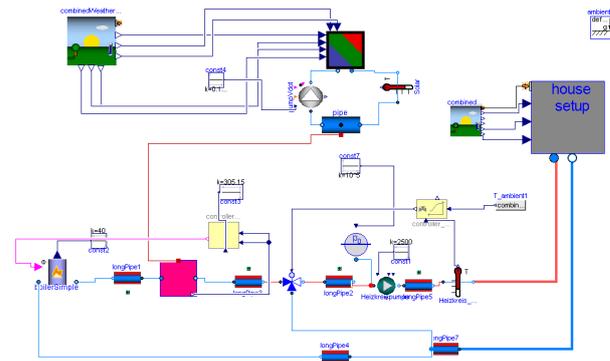


Abbildung 9b Modelica-Ansicht des Gesamtsystems

Das Gesamtsystem besteht aus einem Vier-Raum-Gebäude mit jeweils 24 m² Grundfläche. Es ist an das Wettermodell angeschlossen. Dieses Gebäude wird bei Bedarf über einen Kessel mit Wärme versorgt, sobald die Speichertemperatur eine festgelegte Temperatur von z.B. 35 °C unterschreitet. Daran schließt sich der Speicher an. In dem einen Fall handelt es sich hier um einen einfachen Warmwasserspeicher und in dem anderen Fall um den Latentwärmespeicher. Der Speicher ist über einen idealen Wärmeübertrager mit der Solarthermieanlage verbunden. Dieses System ist mit einem Wettermodell verbunden, in welchem die Wetterdaten der deutschen Testreferenzjahre (TRY) hinterlegt sind, so dass unterschiedliche Standort in Deutschland simuliert werden können.

ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Um eine erste Aussage treffen zu können, wie eine effiziente Kombination von Solarthermieanlage und Latentwärmespeicher aussehen kann, werden verschiedene Systemvarianten miteinander verglichen. Dabei wird als Zeitraum die letzte Aprilwoche des Testreferenzjahres 04 gewählt. Die Außentemperatur erreicht in diesem Zeitraum Werte zwischen minimal 3 °C und maximal 17 °C.

Ausgangspunkt der Berechnungen ist jeweils das System ohne Latentwärmespeicher. Für den Vergleichsfall wird in diesem System nur der Speicher geändert, d.h. alle anderen Parameter (einschließlich der Regelung und des Solarkollektors) bleiben unverändert. Die untenstehende Tabelle gibt eine Übersicht der

Ergebnisse. Dabei sind die Kollektoranzahl, das Wasservolumen des Speichers, die im Falle des Latentwärmespeichers verwendete Masse und die Einsparung gezeigt. Die Einsparung beschreibt, wie viel Prozent an thermischer Energie des Kessels, durch den Einsatz eines Latentwärmespeichers eingespart werden kann.

Tabelle 1 Erste Ergebnisse

Kollektoranzahl	Wasservolumen	LWS- Masse	Einsparung
2	154.5 l	180 kg	5,5%
2	309 l	360 kg	6,2%
4	154.5 l	180 kg	10,4%

In dem ersten Fall wurden zwei Kollektoren gewählt, das sind ca. 4 m² Kollektorfläche. Das Wasservolumen im Speicher beträgt 154.5 Liter und im Falle des Latentwärmespeichers wurden 180 kg Material verwendet, diese Menge an Material entspricht einer Masse von 1,88 kg pro m² Raumfläche. Es ergibt sich eine Einsparung von 5,5 %.

Anschließend wurde die Masse des Latentwärmespeichers auf 360 kg verdoppelt und somit hat sich auch das Wasservolumen auf 309 Liter geändert. Die erreichbare Einsparung beträgt 6,2 %.

Im letzten Fall wurde im Vergleich zum ersten Fall die Kollektoranzahl von zwei auf vier erhöht und dies hatte eine deutliche Einsparung von 10,4 % zur Folge.

Es ist zu erkennen, dass sich für den betrachteten Zeitraum der Einsatz eines Latentwärmespeichers für alle drei Fälle lohnt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die äußeren Bedingungen optimal für den Einsatz des Latentwärmespeicher in der betrachteten Aprilwoche waren, d.h. der LWS konnte zum einen durch Solarthermie geladen werden und zum anderen lagen die Temperaturschwankungen beim Be- und Entladen des LWS im Bereich der Phasenwechseltemperatur des gewählten Materials.

Abschließende Simulationen werden klären, wie sich das System über das gesamte Jahr verhält.

AUSBLICK

Aktuelle Studien beschäftigen sich mit den Jahressimulationen und parallel mit der Optimierung einzelnen Komponenten. Insgesamt werden in einem nächsten Schritt die einzelnen Komponenten überarbeitet. Hier soll der Warmwasserspeicher durch einen Schichtenspeicher ersetzt werden und auch das Latentwärmespeichermodell mit den Verlusttermen aus den Messungen erweitert werden. Auf Seiten der Solarthermie wird die Frage beantwortet werden, wie die Ergebnisse für einen Flachkollektor aussehen werden. Ein weiterer Teil

der aktuellen Untersuchungen ist, die Frage zu klären, ob ein physikalisches Modell andere Ergebnisse als das Wirkungsgrad basierte liefert.

Weiter daran anschließende Studien werden sich sowohl mit der Auswertung der Kombination mit einer Wärmepumpe beschäftigen, als auch der Betrachtung, wie sich in dicht besiedelten Gebieten eine Verschattung durch Bäume oder Gebäude auf das System auswirken würde.

FAZIT

Die ersten Simulationen zeigen das Potential der Kombination von Solarthermieanlagen und Latentwärmespeichern, so dass in weiteren Analysen dieses System noch genauer untersucht werden wird.

DANKSAGUNG

Wir danken der E.ON gGmbH für ihre finanzielle Unterstützung.

LITERATUR

- Buschle J., Analysis of steam systems using Modelica: Modelica 2006, September 4-5
- Duffi, J. A., Beckman, W. A. , Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons, 2nd ed, New York 1991
- Kleemann, M., Meliss, M., Regenerative Energiequellen. Springer Verlag, 2.Aufl., Berlin et al., 1993
- Mehling, Cabeza, Heat and Cold Storage with PCM: Heat and Mass Transfer, Springer, Berlin 2008
- Quaschnig, V., Regenerative Energiesysteme. Hanser Verlag, 2006
- Späte, F., Ladener, H., Solaranlagen, ökobuch, Staufen bei Freiburg 2007
- SPF, Solartechnik Prüfung Forschung, 13.05.2010 <http://www.solarenergy.ch/index.php?id=111>

NUMERISCHE SIMULATIONSBERECHNUNGEN ZUR ERDWÄRME- UND GRUNDWASSERNUTZUNG

Dietmar Adam^{1,2}, Roman Markiewicz²

¹Institut für Geotechnik, Technische Universität Wien, Wien, Österreich

²Geotechnik Adam ZT GmbH, Brunn am Gebirge, Österreich

e-mail: dietmar.adam@tuwien.ac.at , Tel. +43-1-58801-22100

e-mail: markiewicz@geotechnik-adam.at , Tel. +43-2236-312244-22

KURZFASSUNG

Wärmepumpen ermöglichen eine aktive Beheizung von Gebäuden mittels Erdwärme. Seit Anfang der 90er Jahre wurden Technologien für die Nutzung von Fundamenten und Infrastrukturbauwerken zum Heizen und Kühlen entwickelt. Verstärkt kommen offene Systeme zur direkten Grundwassernutzung zur Anwendung. Technisch ausgereifte Lösungen sowie hydraulische und thermische Simulationen bilden die Grundlage für die effiziente Planung von Anlagen zur thermischen Nutzung des Untergrundes.

ABSTRACT

The development of heat pumps enables the utilization of ground energy for heating. Since the nineties absorber technologies were developed in to activate earth coupled structures like foundations and infrastructure buildings. Open source systems for the direct use of the groundwater heat are more and more common. Sophisticated technical solutions and both hydraulic and thermal simulations provide an efficient design of geothermal energy plants.

EINLEITUNG UND PRINZIP DER GEOTHERMIENUTZUNG

In den meisten Klimazonen Europas ist die Temperatur des Untergrundes ab einer Tiefe von ca. 10 – 15 m aufgrund dessen thermodynamischer Trägheit nahezu konstant. Bis zu einer Tiefe von ca. 50 m beträgt sie in der Regel 10 – 15°C. Eine Umwälzung der Wärme reicht für eine Heizung im Allgemeinen nicht aus, sodass Wärmepumpen zur Anhebung der Temperaturniveaus verwendet werden. Die Bodenwärme wird der Wärmepumpe durch den sog. Primärkreislauf zugeführt, der Sekundärkreislauf befindet sich im Bauwerk. Leistungsfähige Wärmepumpen weisen einen Wirkungsgrad von ca. 4 bis 5 auf, d.h. in diesem Fall ist nur ein Viertel bis ein Fünftel Fremdenergie erforderlich. Der Hauptanteil von rund 75% bis 80% der nutzbaren Gesamtenergie stammt aus der im Untergrund gespeicherten Wärme.

Im Falle der Kühlung wird eine Kältemaschine eingesetzt. Bei günstigen Randbedingungen besteht die Möglichkeit, ohne Kältemaschine das Auslangen

zu finden. Die Kühlung erfolgt in diesem Fall lediglich durch Umwälzung der im Boden gespeicherten Kälte. Bei diesem sog. „Free Cooling“ wird der Fremdenergiebedarf auf den Betrieb einer Umwälzpumpe reduziert. Umschaltbare Wärmepumpen ermöglichen Heizung und eine Kühlung.

Für den Transport von Wärme- bzw. Kälteenergie ist ein Temperaturunterschied zwischen dem zur Nutzung herangezogenen Untergrund und dem Transportmedium erforderlich. Grundsätzlich wird zwischen zwei Systemen unterschieden:

- Geschlossene Systeme (Absorberkreislauf)
- Offene Systeme (direkte Grundwassernutzung)

Bei geschlossenen Systemen zirkuliert ein Wärmeträgermedium durch die Absorberleitungen, welches beim Durchströmen entweder erwärmt oder abgekühlt wird. Bei offenen Systemen wird das Grundwasser aus dem Aquifer entnommen und direkt genutzt, anschließend wird das erwärmte oder abgekühlte Wasser wiederum dem Grundwasserträger zugeführt.

Prinzipiell kann zwischen zwei grundsätzlich verschiedenen Möglichkeiten der geothermischen Energiebewirtschaftung unterschieden werden:

- Einfache geothermische Energieentnahme bzw. -zufuhr
- Saisonaler Betrieb mit Wärme- und Kältespeicherung

Während beim einfachen geothermischen Betrieb, d.h. entweder wird nur Energie aus dem Boden entnommen oder nur Energie in den Boden eingetragen, der Energiefluss lediglich in eine Richtung erfolgt, wird beim saisonalen Betrieb die thermodynamische Trägheit des Bodens herangezogen, um Energie im Boden zu speichern, sodass diese zum benötigten Zeitpunkt wiederum entnommen werden kann. Bei einem saisonalen Speicher ist es daher möglich, eine ausgeglichene Energiebilanz im Zeitraum eines Jahres zu gewährleisten. Böden mit hoher Durchlässigkeit eignen sich besonders gut für den einfachen Betrieb zur Wärme- oder Kältenutzung, Böden mit geringer Durchlässigkeit eignen sich hingegen besonders gut für die saisonale Speicherung.

ERDWÄRMEABSORBER

Neben den klassischen „Erdwärmesonden“ und „Erdwärmekollektoren“ ermöglichen auch erdberührte Bauwerksteile („Erdwärmeabsorber“) eine sehr wirtschaftliche Nutzung der Geothermie. Dies betrifft vor allem Bauwerksteile aus Beton („Massivabsorber“). Hiefür kommen primär Tiefgründungen („Energiepfähle“, „Energieschlitzwände“), aber auch Flachgründungen („Energiebodenplatten“) infrage. Die Absorberleitungen werden unmittelbar in die Fundamentelemente verlegt, zusätzliche Einbauten im Erdreich sind nicht erforderlich. Neue Entwicklungen stellen ganze Infrastrukturbauwerke, wie „Energietunnel“, dar bzw. Bauteile, die insbesondere für den Bau von unterirdischen Bauwerken, wie „Energieanker“, „Energievlies“, „Energietübbing“ und „Energiebrunnen“ eingesetzt werden. Energie kann mittlerweile auch aus Abwasser durch die Verwendung von speziellen Absorberelementen genutzt werden.



Abbildung 1: A: Absorberleitungen für eine Energiebodenplatte.

B: Verlegung von Absorberleitungen im Bewehrungskorb eines Energiepfahls.



Abbildung 2: Einbau des Energievlieses in einem Testabschnitt des bergmännisch aufgefahrenen Lainzer Tunnels

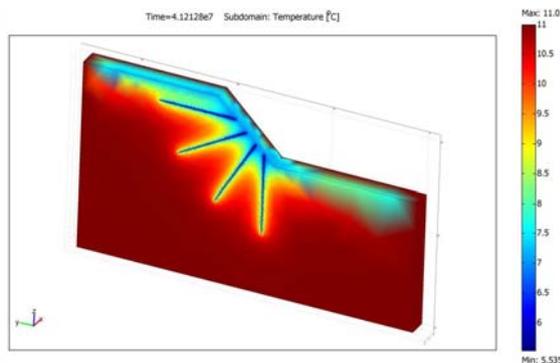


Abbildung 3: Thermische Nutzung von Ankern zur Böschungsstabilisierung.

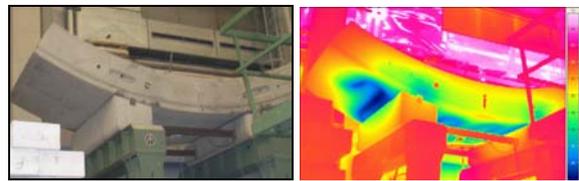
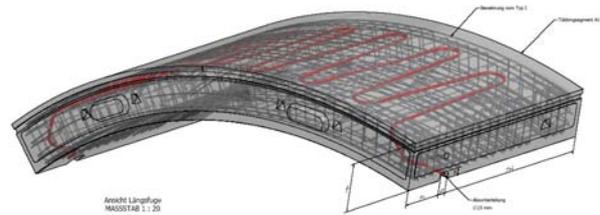


Abbildung 4: Energietübbing: Anordnung der Absorberelemente innerhalb des Betonfertigteils (oben) und testen eines Prototyps im Labor (unten). [Pralle et al, 2009]

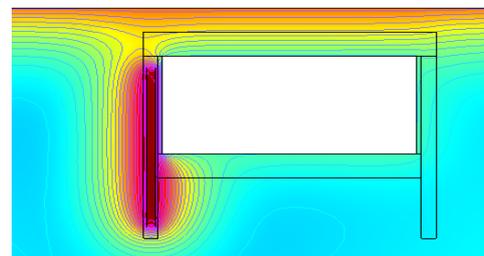
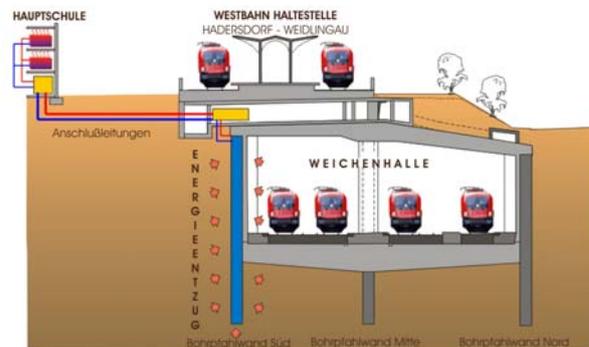


Abbildung 5: Pilotprojekt für die Erdwärmenutzung eines in offener Bauweise (Deckelbauweise) errichteten Tunnelbauwerks (oben). Simulationsberechnung zur Ermittlung des thermischen Einflussbereiches (unten).

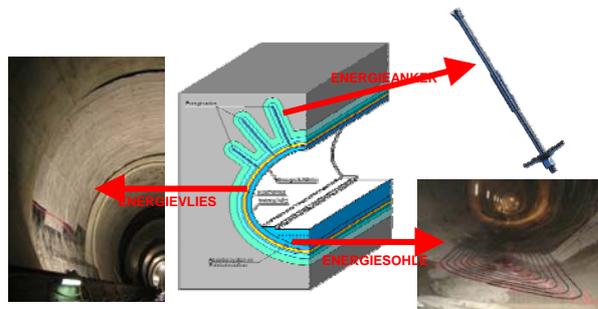


Abbildung 6: Möglichkeiten der Erdwärmenutzung in bergmännisch aufgefahrenen Tunnelbauwerken.

GRUNDWASSERBRUNNEN

Bei der direkten Nutzung der Grundwasserwärme (Offenes System) müssen mindestens zwei Brunnen gebohrt werden: ein Förderbrunnen (Quelle) und ein Schluckbrunnen (Senke). Im Heizbetrieb wird über einen oder mehrere Förderbrunnen das Grundwasser entnommen und dem Grundwasser die Wärme

entzogen. Das abgekühlte Wasser wird anschließend einem oder mehreren Schluckbrunnen bzw. Versickerungsanlagen zugeführt und auf diese Weise wieder dem Aquifer zugeführt (Abbildung 7). Im Kühlbetrieb wird dem entnommenen Grundwasser Wärme zugeführt und anschließend das erwärmte Wasser versickert.

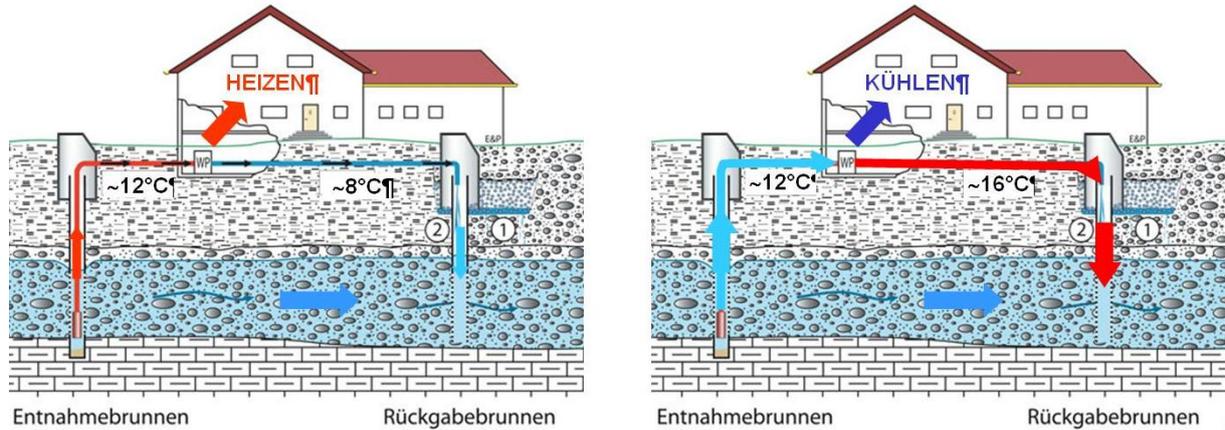


Abbildung 7: Prinzipschema der direkten thermischen Grundwassernutzung für Heiz- (links) und Kühlzwecke (rechts). [http://www.geothermie.walthelm.com/varianten_der_erdwaermenutzung.htm; Eberhard & Partner AG – Aarau]

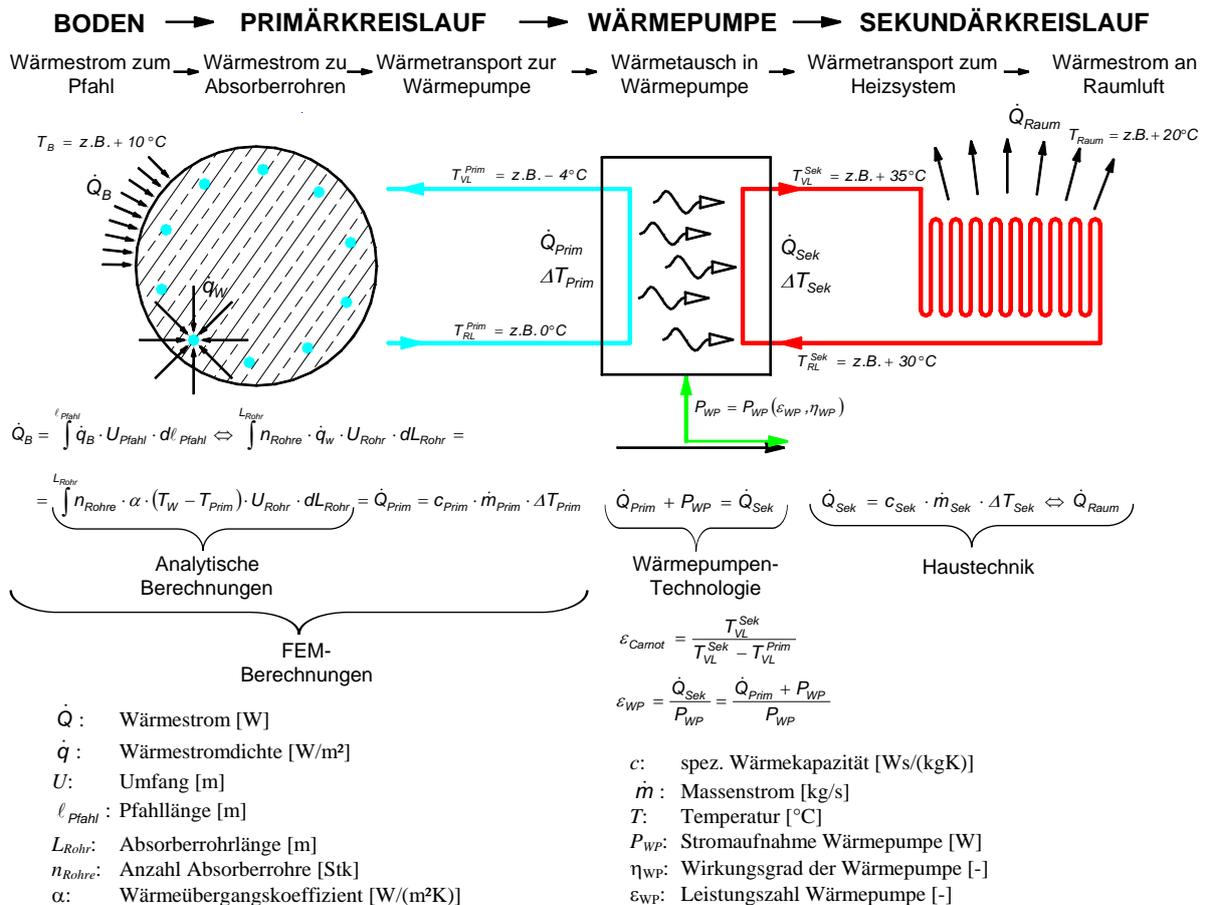


Abbildung 8: Schematische Übersicht des Wärmetransportes einer Energiepfahlanlage im Heizfall (Leistungsbilanz)

HYDRAULISCHE UND THERMISCHE SIMULATION

Geschlossene Systeme

Der Wärmetransport vom Erdreich bis zum Nutzraum ist in Abbildung 8 schematisch für den Heizfall einer Massivabsorberanlage (Beispiel Energiepfahl) dargestellt. Die Vorgänge innerhalb der Wärmepumpe (Wärmepumpenkreislauf) und des Sekundärkreislaufes können grundsätzlich als bekannt angesehen werden. Die Simulation und Dimensionierung erfolgt üblicherweise durch den HKLS-Experten, wofür geeignete Softwareprodukte am Markt erhältlich sind. Die Wärmepumpe stellt dabei die Schnittstelle zum Primärkreislauf bzw. zu den Massivabsorbern dar, für deren Simulation und Dimensionierung die Wärmetransportvorgänge innerhalb des Erdreiches, vom Erdreich zur Absorberflüssigkeit und innerhalb bzw. durch die Absorberflüssigkeit zu berücksichtigen sind.

Sobald die Vorlauftemperatur (geregelt durch die Wärmepumpe) der Absorberflüssigkeit im Primärkreislauf T_{VL}^{Prim} kleiner ist als die Boden- bzw. Erdreichtemperatur T_B , kommt es zunächst zu einer Abkühlung des Pfahles und dadurch innerhalb des Erdreiches zu einem Wärmestrom in Richtung Pfahl. Innerhalb des Pfahles wird die Wärme von der Absorberflüssigkeit aufgenommen, die sich dadurch erwärmt. Die Rücklauftemperatur T_{RL}^{Prim} kann dabei als „Ergebnis“ des Primärkreislaufes gesehen werden und ist eine der wichtigsten Beurteilungskriterien für die Effizienz einer Massivabsorberanlage. Es bildet sich schließlich ein Gleichgewicht zwischen dem Wärmestrom vom Boden zum Pfahl \dot{Q}_B und dem von der Absorberflüssigkeit transportierten Wärmestrom \dot{Q}_{Sole} . Dieser Wärmetransport hängt von zahlreichen Faktoren ab, wie schematisch in Abbildung 9 dargestellt ist. Die einzelnen Faktoren haben auf die Effizienz einer Massivabsorberanlage einen mehr oder weniger großen Einfluss. Einige, wie z.B. die Wärmeleitfähigkeit des Erdreiches oder die Erdreichtemperatur, sind durch die Natur vorgegeben und können nicht beeinflusst werden. Faktoren, wie z.B. die Anzahl der Absorberrohre oder die Strömungsgeschwindigkeit der Absorberflüssigkeit (Massenstrom) können aber im Zuge der Dimensionierung gewählt werden. Hier gilt es ein technisch-wirtschaftliches Optimum zu finden, um den Energieaustausch zwischen Erdreich und Absorberflüssigkeit zu maximieren und die Herstell- und Betriebskosten zu minimieren.

Die Strömungsverhältnisse innerhalb der Absorberrohre und die daraus resultierende Wärmeübertragung vom Absorberrohr zur

Absorberflüssigkeit können analytisch berechnet werden.

Für die Berechnung des gesamten Wärmetransportes vom Erdreich zur Absorberflüssigkeit sind allerdings aufgrund der zahlreichen Einflussparameter und der Komplexität oftmals aufwendige numerische Verfahren (z.B. FEM) erforderlich.

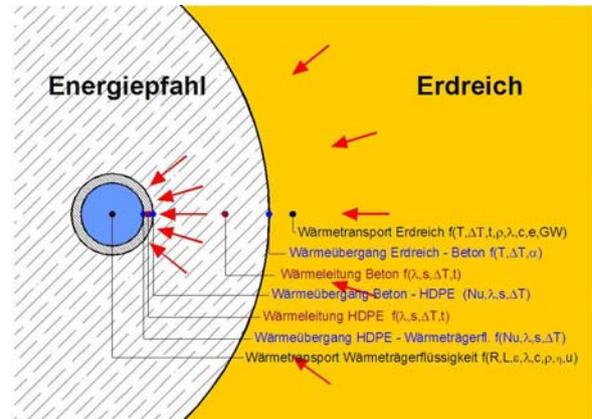


Abbildung 9: Mechanismen beim Wärmestrom vom Erdreich zur Absorberflüssigkeit (schematisch).

Bei komplexeren geometrischen Verhältnissen können die einzelnen Absorberrohre aus genannten Gründen nicht mehr im Einzelnen berücksichtigt werden. In diesen Fällen ist man gezwungen, einen Mittelwert der erwarteten Eintritts- und Austrittstemperatur anzunehmen. Die Wärmeleistung ergibt sich in diesem Fall über den Wärmefluss vom Boden zum Massivabsorber. Durch Integration des Wärmeflusses über alle mit Absorberleitungen belegten Flächen resultiert schließlich die Gesamtleistung der Anlage.

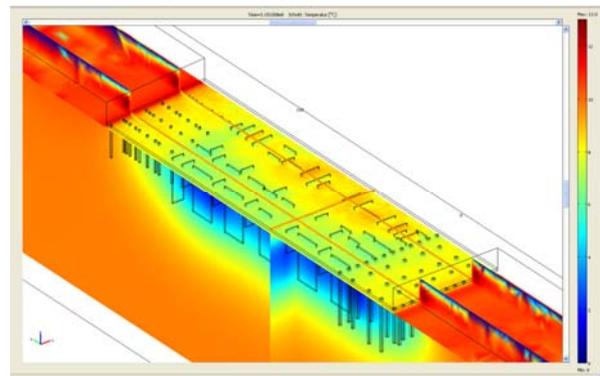


Abbildung 10: Ergebnis (Schnittdarstellung) einer dreidimensionalen thermischen Simulationsberechnung für ein Infrastrukturbauwerk, das auf Energiepfählen und Energieschlitzwänden fundiert ist.

Die Gründung des neuen Hauptbahnhofes in Wien wird zur Nutzung der Erdwärme herangezogen, die Ermittlung der nutzbaren Wärme- und Kälteenergie erforderte eine dreidimensionale Simulation der komplexen Anlagenverhältnisse. Abbildung 10 und Abbildung 11 zeigen exemplarisch Ergebnisse einer dreidimensionalen Simulationsberechnung zur

Ermittlung der Gesamtleistung der Massivabsorberanlage, bestehend aus Energiebodenplatte, Energiepfählen und Energieschlitzwänden.

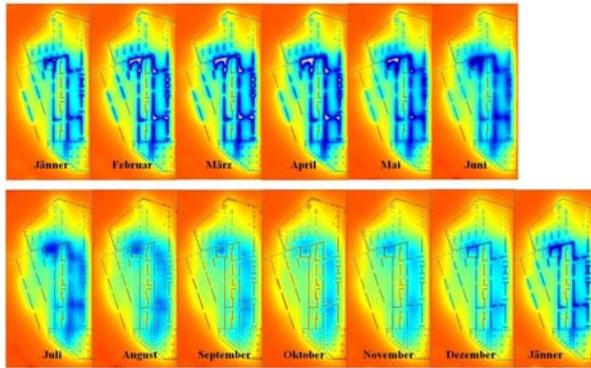


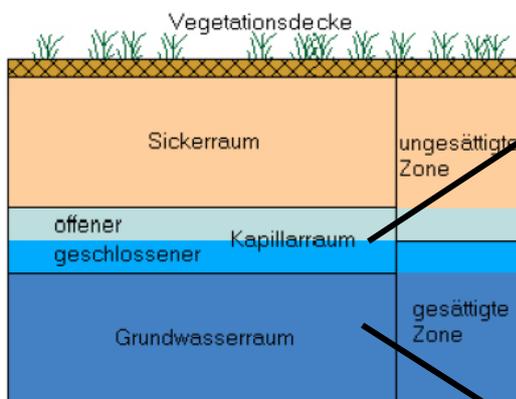
Abbildung 11: Temperaturverhältnisse (Grundrissdarstellung) im Erdreich und der Energiefundierung in einer Tiefe von 15 m unterhalb der Bodenplatte im Verlauf eines Jahres.

Offene Systeme

Hydraulische Berechnung

Bei der Simulation hydraulischer Vorgänge im Untergrund ist unter anderem zu beachten, dass der meist vorliegende maßgebende Parameter – die Filtergeschwindigkeit v_f nach Darcy – nur im mit Wasser vollständig gesättigten Boden gültig ist. Wie Abbildung 12 zeigt, sind im Boden jedoch Zonen vorhanden, in denen der Sättigungsgrad im Jahresverlauf schwankt – bei hohen Grundwasserständen ist die gesättigte Zone höher als bei niedrigen Grundwasserständen. Darüber hinaus ist zu beachten, dass im Bereich von Wasserentnahmen aufgrund des Absenktrichters die ungesättigte Zone vergrößert und im Bereich der Versickerung die ungesättigte Zone verkleinert wird.

Um einen derartigen Wechsels zwischen gesättigten und ungesättigten Bedingungen in



$$\begin{aligned}
 & \text{3D Richard's Gleichung} \\
 & \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} k_{rw} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} k_{rw} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} k_{rw} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - q = \Phi \frac{\partial S_w}{\partial t} + S_w S_s \frac{\partial h}{\partial t} \\
 & \frac{\Theta - \Theta_r}{\Phi - \Theta_r} = \left(\frac{\Psi_b}{\Psi} \right)^\lambda \quad \text{Retention} \quad \text{Retention's Gleichungen (z.B. Brooks and Corey, Mualem and Van Genuchten)} \\
 & k_{rw} = \frac{K(\Theta)}{K_s} = \frac{\Theta - \Theta_r}{\Phi - \Theta_r} \quad \text{Relative Konduktivität} \\
 & \text{Kontinuitätsgleichung} \quad \text{Impulserhaltung} \rightarrow \text{Darcy-Gleichung} \\
 & 0 = - \left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] \quad q = -k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \\
 & 0 = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad \text{LaPlace Gleichung}
 \end{aligned}$$

Abbildung 12: Berechnungsgleichungen für gesättigte und ungesättigte Zonen im Untergrund.

Simulationsberechnungen zu berücksichtigen, können die Gleichungen nach Richard's mit Stoffparametern von z.B. Van Genuchten herangezogen werden. Für gesättigte Zonen kann die in Abbildung 12 angegebene einfachere LaPlace Gleichung verwendet werden, die sich aus der Kontinuitätsgleichung und der Darcy-Gleichung ableiten lässt.

Thermische Berechnung

Die aus dem Entnahmebrunnen nutzbare thermische Leistung lässt sich wiederum mit Gleichung (1) berechnen. Beispielsweise ergibt sich für den Heizfall entsprechend Abbildung 7 mit einer Temperaturdifferenz von $\Delta T = 4 \text{ K}$, einer angenommenen Förderleistung des Entnahmebrunnens von 10 l/s eine thermische Leistung von ca. $\dot{Q} = 170 \text{ kW}$. Dieses einfache Beispiel zeigt grundsätzlich das große Energiepotenzial einer thermischen Grundwassernutzung.

Um die thermische Reichweite (Thermalfront) im Bereich der Versickerung zu berechnen, ist im Regelfall eine dreidimensionale gekoppelte hydraulische-thermische Simulation durchzuführen, damit die im Untergrund auftretenden Wärmetransportmechanismen und Randbedingungen berücksichtigt werden können.



Abbildung 13: Wärmespeicherung und Wärmetransportvorgänge im Untergrund.

Da der Schwerpunkt von derartigen dreidimensionalen hydraulisch-thermischen Modellen in der Berechnung der thermischen Reichweite (Abbildung 13) des über die Schluckbrunnen bzw. Versickerungsanlage eingeleiteten Wassers liegt, kann je nach Anwendungsfall zur Modellvereinfachung eine konstante Grundwassermächtigkeit des Aquifers angesetzt werden. Im Berechnungsmodell ist somit die Schicht des Aquifers zu jedem Zeitpunkt vollständig wassergesättigt, sodass die numerisch einfacher zu bewältigende *LaPlace*-Gleichung (mit dem Gesetz von *Darcy*) zugrunde gelegt werden kann.

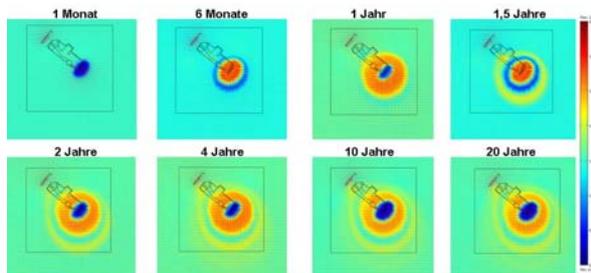


Abbildung 13: Beispiel für die Ermittlung der Reichweite der Temperaturfront bei einer direkten Grundwassernutzung (Grundrissdarstellung) durch eine gekoppelte hydraulisch-thermische Simulationsberechnung.

Der neue Campus der Wirtschaftsuniversität erhält eine Anlage zur direkten Nutzung der Grundwassertemperatur zum Heizen und Kühlen sämtlicher Bauwerke. Umfangreiche hydraulische und thermische Berechnungen zeigen nicht nur die Reichweite des hydraulischen und thermischen Einflusses der Grundwassernutzungsanlage (Abbildung 13), sondern es lässt sich damit auch das nutzbare Potenzial zum Heizen und Kühlen rechnerisch ermitteln.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die geothermische Nutzung von Fundierungen, Keller- oder Stützwänden ermöglicht ein umweltfreundliches, Ressourcen schonendes sowie wirtschaftliches Heizen und/oder Kühlen von Bauwerken. Die Nutzung der geothermischen Energie mittels erdberührter Bauteile ist nicht nur auf Fundierungen und massive Wände bzw. Pfahlwände beschränkt. "Energietunnels", die Heizung und/oder Kühlung von Verkehrsflächen auf Straßen sowie Brücken und die direkte thermische Nutzung von Grundwasser stellen weitere Anwendungsgebiete mit einer Vielzahl von Vorteilen dar.

Für die Simulation, Dimensionierung und Planung von Erdwärmeabsorbern und Grundwasserbrunnen waren anfänglich noch sehr aufwendige Berechnungen erforderlich. Mittlerweile existieren

bereits Softwarelösungen, mit denen bestimmte (vom Softwarehersteller vorgegebene) Fälle rasch simuliert werden können.

LITERATUR

- ADAM D., MARKIEWICZ R. (2003). Geothermische Energienutzung im Bauwesen. Heft 54/Oktober 2003. Wien: Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik.
- ADAM D., MARKIEWICZ R. (2009). Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers. *Geotechnique* 59, No. 3, 229-236.
- BRANDL H., MARKIEWICZ R. (2001). Geothermische Nutzung von Bauwerksfundierungen ("Energiefundierungen"). In: *ÖIAZ*, 146. Jg., Heft 5-6/2001, Wien.
- FRANZIUS J. N., PRALLE N. (2009). Mit Tunneln heizen. Nutzung des geothermischen Potenzials im Eisenbahntunnel Jenbach. Präsentation. Berlin.
- MARKIEWICZ R., ADAM D. (2003). Utilization of Geothermal Energy using earth coupled Structures – Theoretical and Experimental Investigations, Case Histories. *Geotechnical Problems With Man-Made And Man Influenced Grounds*. XIIIth European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Volume 2. 25-28th August 2003, Prag.
- MARKIEWICZ R. (2004). Numerische und experimentelle Untersuchungen zur Nutzung von geothermischer Energie mittels erdberührter Bauteile und Neuentwicklungen für den Tunnelbau. Dissertation am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Wien, Wien.
- OBERHAUSER A. (2006). Verfahrens- und Komponentenentwicklung zur Planung von Tunnelthermie®-Anlagen. Doktorarbeit, Technische Universität Wien, Wien.
- OSTERMANN N.; ADAM D., UNTERBERGER, W. (2003). Erdwärmennutzung im Verkehrstunnelbau. Schriftenreihe der Österreichischen Vereinigung für Beton- und Bautechnik 53, p. 59 - 63.
- PRALLE N, GOTTSCHALK D., HOLUB W. (2009): Umweltfreundliche Wärmeenergieversorgung des Bauhofs Jenbach. Geothermisches Tunnelkraftwerk Jenbach.
- UNTERBERGER W., ADAM D., HOFINGER J. (2002). Erdwärmennutzung im Verkehrstunnelbau. *Zement+Beton* 4/02. Zement+Beton Handels- und Werbeges.mbH, Wien.

GANZJÄHRIGE NUTZUNG VON ERDWÄRMESONDEN ZUM HEIZEN UND KÜHLEN VON GEBÄUDEN MIT REVERSIBLER WÄRMEPUMPE ODER KOMPRESSIONSKÄLTEMASCHINE

Ruben Pesch, Mariela Cotrado, Maximilian Martin,
Dirk Pietruschka, Ursula Eicker
zafh.net-Zentrum für angewandte Forschung-nachhaltige Energietechnik,
Hochschule für Technik Stuttgart,
Schellingstr. 24, 70174 Stuttgart
ruben.pesch@hft-stuttgart.de

ABSTRACT

Thermal utilization of subsurface soil by heat exchangers combined with a reversible heat pump is an innovative technique of saving energy in buildings. An effective usage of this technique can be achieved whenever there is an additional cooling or refrigeration load besides the conventional heating demand, e.g. in office buildings or supermarkets. In order to avoid a degradation of the soil temperature, a balanced relation in the thermal utilization of the soil as heat sink (cooling) and heat source (heating) is aspired. The influence of different operation modes (only heating, only cooling, heating and cooling in the seasonal change) to the temperature stability of the soil is investigated in a three-dimensional numerical simulation program.

KURZFASSUNG

Eine innovative Technik für die Einsparung von Energie in Gebäuden ist die thermische Nutzung des Untergrundes durch Erdreichwärmeübertrager in Kombination mit einer reversiblen Wärmepumpe. Eine effektive Anwendung findet diese Technik überall dort, wo neben der Wärmebereitstellung Kälte für die Klimatisierung von Räumen notwendig wird, also z.B. in Bürogebäuden oder Supermärkten. Um Temperaturdegradation des Erdreichs zu vermeiden, wird ein ausgewogenes Verhältnis in der thermischen Nutzung des Untergrundes als Wärmesenke (Kühlen) oder Wärmequelle (Heizen) angestrebt. Mit Hilfe eines dreidimensionalen, numerischen Simulationsprogramms wird der Einfluss unterschiedlicher Betriebsarten (nur Heizen, nur Kühlen, Heizen und Kühlen im jahreszeitlichen Wechsel) für die Temperaturstabilität des thermisch genutzten Untergrundes untersucht. Für den Anwendungsfall Kühlen wurden zusätzlich vergleichende Simulationen verschiedener

Rückkühlarten (trockener Kühlturm, nasser Kühlturm und Geothermiefeld) von Kompressionskältemaschinen durchgeführt.

EINLEITUNG

Der Primärenergiebedarf für die Gebäudebeheizung und -klimatisierung, hat einen Anteil von ca. 35,4% am Gesamtenergieverbrauch bundesweit [6]. Einsparmöglichkeiten im Gebäudebestand ergeben sich durch die Erhöhung des Dämmstandards der Außenhülle und der Nutzung energieeffizienter moderner Gebäudetechnik.

Durch höhere Dämmstandards wird sich der Heizwärmebedarf von Gebäuden in den nächsten Jahren stetig reduzieren. Die Klimatisierung, Beleuchtung und der für die Herstellung der Baumaterialien benötigte Energiebedarf fallen dann in der Gesamtenergiebilanz eines Gebäudes stärker ins Gewicht.

Bereits heute erreicht der für die Klimatisierung von gewerblich genutzten Gebäuden benötigte Primärenergiebedarf einen Anteil von ca. 11% am Gesamtprimärenergiebedarf [9]. Die Klimatisierung dieser Gebäude erfolgt vorwiegend durch Kompressionskältemaschinen und seltener durch reversible Wärmepumpen, die über konventionell erzeugten Strom betrieben werden.

Der Anteil von Wärmepumpenanlagen an der Gebäudebeheizung beträgt in Deutschland zum heutigen Stand ca. 0,2% an der Wärmebereitstellung insgesamt, was einem Anteil von 2,3% der Wärme aus erneuerbaren Energieträgern entspricht [3].

Zum Einsatz kommen Luft-Luft-, Luft-Wasser-, Wasser-Luft-, Sole-Luft-, Wasser-Wasser- und Sole-Wasser-Systeme, von denen für die thermische Nutzung des Untergrundes nur die drei letzten Arten relevant sind.

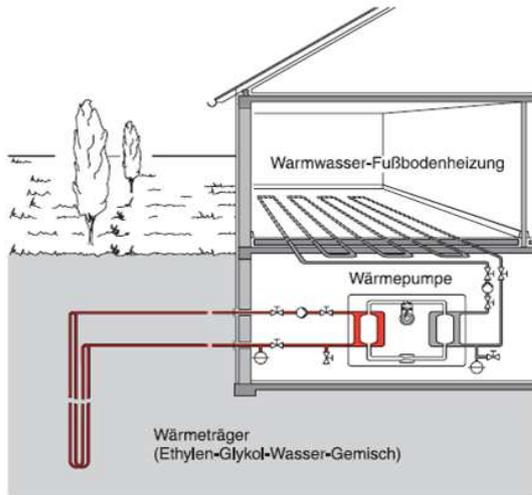
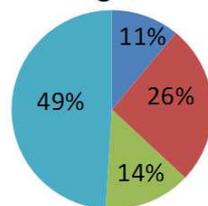


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Sondenanlage mit Wärmepumpe [8]

Neben dem Einsatz in Wärmepumpensystemen zu Heizzwecken (siehe Abbildung 1) findet oberflächennahe Geothermie in der Kühlung und Klimatisierung von Gebäuden Verwendung. Hierbei ist das hohe Temperaturniveau des Sondenfluids von 15 bis 20°C der limitierende Faktor für die Nutzung der Geothermieanlagen im Sommer. Direkte Kühlung auf diesem Temperaturniveau beschränkt den Einsatz auf Flächenkühlsysteme (Wasser-Wasser/Sole-Wasser) oder Luftvorkühlung (Wasser/Sole-Luft). Eine interessante Anwendung für Erdsonden als sommerliche Wärmesenke ist der Ersatz hygienisch problematischer Rückkühlsysteme von konventionellen Kompressionskälteanlagen oder thermisch angetriebenen Absorptionskälteanlagen.

Energiebedarf Bürogebäude



Energiebedarf Supermarkt

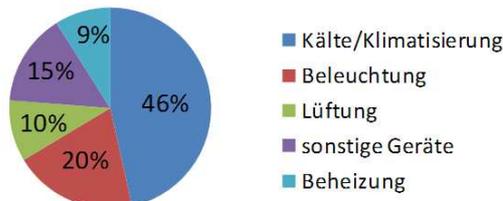


Abbildung 2: Energiebedarf Bürogebäude und Supermarkt [2], [7]&[9]

Zur Anwendung kommt diese Technik vor allem in Bürogebäuden und Supermärkten. Der Betrieb dieser beiden Gebäudetypen ist einerseits sehr energieintensiv, birgt dabei andererseits hohe Energieeinsparpotenziale.

Wie in Abbildung 2 dargestellt, beträgt der Kühlbedarf eines durchschnittlichen Bürogebäudes 11% [9], bei einem typischen Supermarkt sind es sogar 46% [2], [7].

Da der Kühlbedarf in Deutschland in diesen und anderen Gebäudetypen weiter zunimmt, wird sich die klimatisierte Fläche pro Einwohner von 3 m² im Jahr 2000 auf 6 m² im Jahr 2020 verdoppeln [1].

Diese Tendenz zeichnete sich in Supermärkten bereits in den letzten Jahren ab. Aufgrund der steigenden Nachfrage nach gekühlten Fertigprodukten und Tiefkühlkost, für deren Lagerung und Auslage im Markt Tieftemperaturkälte bereitgestellt werden muss, wird sich dieser Trend weiter fortsetzen.

In Bürogebäuden ist es vor allem der gestiegene Komfortanspruch der Nutzer, der zu verstärktem Einsatz von Kälte- bzw. Klimatisierungstechnik führt.

Da die Kühlleistungsprofile der unterschiedlichen Gebäudetypen stark differieren, werden im Folgenden exemplarisch beide Gebäudevarianten (Bürogebäude/Supermarkt) untersucht.

Hierbei werden die Varianten reines Kühlen, reines Heizen und der kombinierte Betrieb der Sondenanlage betrachtet. Den Untersuchungen vorangestellt ist die Beschreibung des an der HfT-Stuttgart entwickelten numerischen Simulationsprogramms „erdson.de“, mit welchem die Simulationen erstellt wurden.

Simulationsmodelle und -grenzen

Simulation stellt in der Regel eine mathematische Näherung realer physikalischer Vorgänge dar. Um der Realität ein mathematisches Modell gegenüberstellen zu können, welches die wesentlichen Effekte wie Stoff- und/oder Energieströme sowie Temperaturverteilungen realistisch abbildet, müssen die wesentlichen von den untergeordneten Einflüssen getrennt werden. Mathematische Modellbildung beinhaltet daher naturgemäß Vereinfachungen und Schematisierung. Der Grad der Vereinfachung wiederum bestimmt den Rahmen innerhalb dessen simuliertes und reales System zur Deckung gebracht werden können. Ein Beispiel gibt an dieser Stelle das 1987 von Eskilson entwickelte Modell für Erdwärmesondenfelder, das die Temperaturverteilung innerhalb des Erdreichs mit Hilfe der g-Funktionen beschreibt [5]. Eskilson entwickelt sein Modell der Sonde aus der analytischen Lösung der Kelvin'schen Linienquellentheorie heraus, wobei mit einer mittleren Temperatur über die gesamte Sondenlänge gerechnet wird. Diese Vereinfachung ermöglichte es Eskilson, die sich im eingeschwungenen Zustand ergebende Tempera-

turverteilung im Erdreich zu simulieren und somit ein wichtiges Werkzeug für die Auslegung von Sondenfeldern zu schaffen. Wird die Geothermieanlage als Teil der Gebäudetechnik simuliert, um bei wechselnden Lasten das Verhalten der Anlagenkomponenten prognostizieren zu können, müssen dynamische Wärmeleitprozesse mit abgebildet werden. Simulationsmodelle, die auf den Arbeiten Eskilson aufbauen, wie der Earth Energy Designer (EED) oder das teilnumerische Simulationsprogramm EWS (Erdwärmesondenprogramm) bedienen sich der dimensionslosen g-Functions zur Berechnung des Fernfeldes (EWS) oder des gesamten Simulationsgebietes (EED). Der Nahbereich der Sonde, der im EWS-Programm durch ein eindimensionales Crank-Nicholson-Verfahren numerisch genähert wird, bildet die zweidimensionale Sondengeometrie innerhalb eines Berechnungshorizontes nicht ab. Um betriebsbegleitende Simulationen von Sondenfeldern in porösen Grundwasserleitern durchführen zu können, müssen Energiebilanzen für das Feld als Ganzes (dreidimensional) oder zumindest zweidimensional innerhalb eines Berechnungshorizontes gelöst werden. Hierzu ist es zweckmäßig die zwei- bzw. dreidimensionale Temperaturverteilung um die Sonde abzubilden, um in einem zweiten Schritt den Temperaturein- bzw. austrag durch Grundwasserströmung darstellen zu können. Der konvektive Anteil an der Gesamtenergiebilanz ist nicht unerheblich [8], so dass an der Hochschule für Technik ein Simulationsmodell entwickelt wurde, das die Wärmeleitungsgleichung, entwickelt aus dem Fourie'schen Erfahrungssatz, in alle drei Raumrichtungen löst. Es steht somit ein numerisches Simulationswerkzeug zur Verfügung, das auf Basis finiter Differenzen die Temperaturverteilung im Erdreich auch bei wechselnden Lasten bzw. dynamischen Wärmeströmen innerhalb der Modellgrenzen ausreichend genau beschreibt. Nachfolgend werden die Grundlagen der Modellbildung sowie das Modell als solches kurz beschrieben.

Grundlagen der numerischen Modellbildung

Die numerische Simulation realer Systeme erfordert die ein-, zwei-, oder dreidimensionale Zuordnung physikalischer Größen zu einem mathematischen Knotengitter. Die Knoten des Gitters repräsentieren in diesem Fall finite Volumenelemente des Erdreichs, der Betonverfüllung des Bohrlochs oder des Wärmefluidrohrs selbst (Abbildung 3). Die physikalischen Eigenschaften der Volumenelemente, wie spezifische Rhodichte, spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und die Temperatur werden auf die Knoten übertragen. Die stoffliche Beschaffenheit der Volumenelemente findet so ihr mathematisches Spiegelbild im Knotengitter. Die geometrische Teilung des Simulationsbereichs kann hierbei physikalischen Effekten Rechnung tragen.

Abbildung 3 zeigt die horizontale Teilung des Simulationsbereichs in Sektoren und Zonen. Die Größe der Volumenelemente, die durch einen Knoten im mathematischen Modell repräsentiert werden, wächst nach außen hin an. Die feinere Diskretisierung in Sondenähe ermöglicht die genauere Abbildung der in diesem Bereich höherliegenden Wärmestrom-dichte.

Unter Annahme eines gänzlich homogenen Erdreichs und einer ungestörten Einzelsonde handelt es sich bei der Temperaturverteilung im Erdreich um die Sonde um ein radialsymmetrisches Problem. Diesem Umstand trägt die Einteilung des Simulationsbereichs in Sektoren Rechnung. Die Einteilung in Zonen wurde zur einfacheren mathematischen Darstellung eines Sondenfeldes statt ringförmig eckig gewählt. Die so geteilten Erdreichvolumina haben einen trapezförmigen Grundriss und bilden mit der eigentlichen Sonde, in der Mitte der Abbildung 3 dargestellt, Schicht für Schicht den dreidimensionalen Korpus des Berechnungsraums.

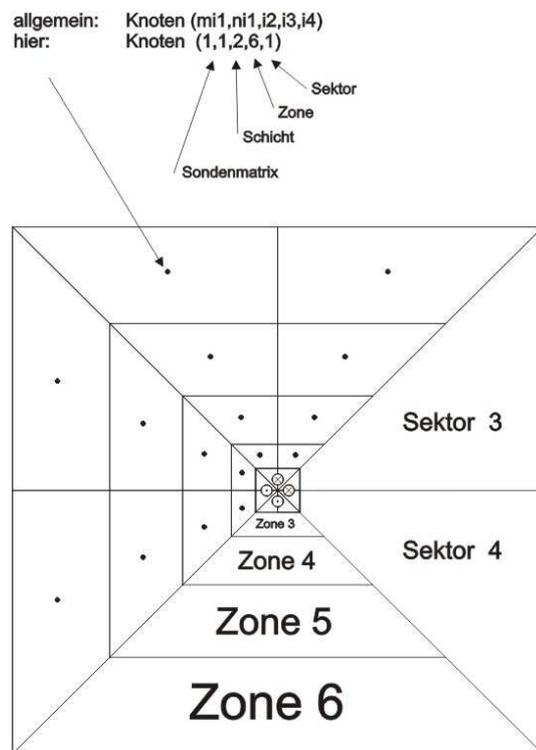


Abbildung 3: Schema der horizontalen Sonden-
 teilung im Simulationsprogramm

Die Berechnungsknoten liegen räumlich im Schwerpunkt der Volumenelemente und sind über Laufindizes wie Schicht, Zone und Sektor eindeutig adressiert.

Zum Wärmeübertrag durch Leitung, wie er im Modell der ersten Ausbaustufe realisiert ist, wird in der folgenden Ausbaustufe des Programms der Wärmeübergang durch Konvektion (Grundwasserströmung) parallel geschaltet.

Letzteres macht die Simulation ganzer Sondenfelder nötig, da sich gerade bei Sondenfeldern in porösen Grundwasserleitern Temperaturfahnen ausbilden, die auf die Temperaturverteilung und damit auf die resultierende Energiebilanz der einzelnen Sonden erheblichen Einfluss haben.

Um diese Randbedingungen des Simulationsmodells sicher abbilden zu können, wird am Rand der einzelnen Sonden ein Wärmeübergang von Sonde zu Sonde berücksichtigt und das Feld als ganzes simuliert.

Mit dem bis dato realisierten Simulationswerkzeug kann ein Sondenfeld von zwei auf fünf Sonden simuliert werden. Innerhalb der 2x5-Matrix können einzelne Sonden an- bzw. abgeschaltet werden, was die Abbildung kleiner bis mittlerer Sondenfelder mit unterschiedlichstem Grundriss ermöglicht. In Abbildung 4 sind Beispiele der möglichen Anordnung der Sonden dargestellt. Hierbei stellen die mit Kreuzen versehenen Orte Sonden im Betrieb dar, während die mit Ringen markierten Stellen Dummy-Sonden kennzeichnen. Dummy-Sonden erfüllen den Zweck das mathematische Modell variabel an die in der Realität vorgefundene Anordnung von Sonden anpassen zu können. Um den Programmieraufwand gering zu halten, werden Dummy-Sonden genau wie die in Betrieb stehenden Sonden geometrisch geteilt (Abbildung 3). Im zweiten Schritt werden die Stoffeigenschaften des Erdreichs allen Knoten, d.h. auch den Knoten der Betonitverfüllung des Bohrlochs und denen des Wärmeträgerfluids zugewiesen. Es ergibt sich so ein homogener Berechnungskörper mit der Teilung einer Sonde und den Stoffeigenschaften des Erdreichs.

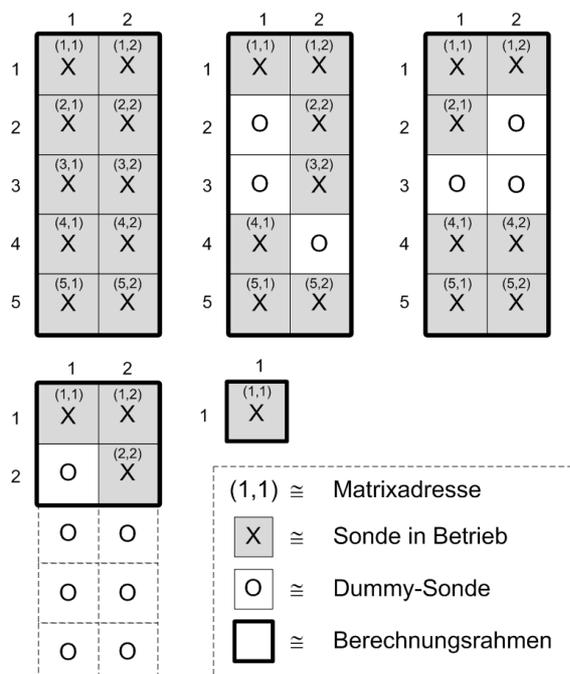


Abbildung 4: Darstellung möglicher Geometrien abbildbarer Sondenfelder

Dieser wird, da er innerhalb des Berechnungsrahmens liegt, mit überrechnet. Der Wärmeeintrag erfolgt jedoch im Gegensatz zu in Betrieb stehenden Sonden ausschließlich über die Randzone der angrenzenden Sonden und nicht über die Temperaturanomalie durch das Wärmeträgerrohr in Sondenmitte.

Ausgehend von grundlegenden Parametern, wie dem Abstand der Sonden innerhalb des Feldes in x/y-Richtung sowie der Sondentiefe ab Geländeoberkante (z-Richtung) generiert das Programm ein Knotengitter.

Jeder Knoten ist innerhalb der Matrix eindeutig adressiert und durch kartesische Koordinaten innerhalb des Simulationsgebietes räumlich fixiert. Neben den Matrizen für die kartesischen Koordinaten werden die physikalischen Stoffeigenschaften (Dichte, Wärmekapazität und -leitfähigkeit) der Knoten in jeweils eigenen Matrizen gespeichert. Dadurch ist eine theoretische Auflösung von differierenden Stoffeigenschaften des Erdreichs bis auf eine einzelne Volumeneinheit (Knoten) möglich.

Bei der Fertigung von Erdwärmesonden werden die anstehenden Gesteine unter Angabe der jeweils erreichten Bohrtiefe dokumentiert, was die Zuweisung der jeweiligen Stoffeigenschaften des anstehenden Gesteins pro Simulationshorizont ermöglicht. Um die Abbildung der realen Verhältnisse im Feld auf das mathematische Modell effektiv umsetzen zu können, sollte die Zuordnung der Stoffeigenschaften zu den jeweiligen Simulationshorizonten automatisiert erfolgen. Hierfür besteht noch Entwicklungsbedarf, so dass bei den im zweiten Teil beschriebenen Modellen jeweils von homogenem Erdreich mit gemittelten Stoffwerten ausgegangen wurde.

Nach der räumlichen und stoffspezifischen Definition des Knotengitters wird unter Berücksichtigung der Jahreszeit die Temperaturverteilung im Feld zum Zeitpunkt t_0 berechnet. Die Eindringtiefe der jahreszeitlich oszillierenden Temperaturwelle in das/halbunendliche/en Erdreich/Raum (siehe Abbildung 5) beträgt in etwa 15 m unter Geländeoberkante (GOK). Sind Datum des Simulationszeitraumes und Klimadaten bekannt, können die Erdreichstarttemperaturen für die Berechnungshorizonte ermittelt werden. Bereits beim aktuellen Programmstand mitberücksichtigt sind die an DIN V 4108 Teil 6 angelehnten 15 Klimaregionen Deutschlands, deren Jahresmitteltemperatur und Amplitude in die Berechnung eingeht [4]. In der Abbildung 5 ist die jahreszeitlich wechselnde Temperaturverteilung des Erdreichs bezogen auf die Klimaregion 15, Garmisch-Partenkirchen, dargestellt.

Die Simulation kurzer Sonden (z.B. bis 20m), deren oberer Bereich gegenüber dem oberflächennahen Erdreich ungedämmt ausgeführt ist, wird so durch die beschriebene Programmroutine möglich.

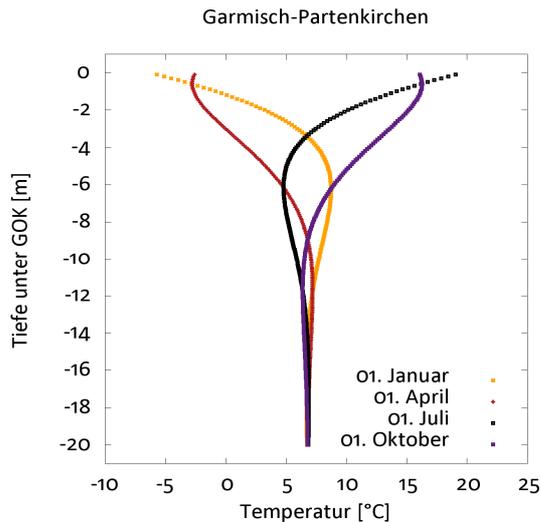


Abbildung 5: Eindringtiefe der jahreszeitlich wechselnden Temperaturwelle unter Geländeoberkante (GOK) [4]

Rechenroutine, Berechnungsablauf

Der Rechenablauf gliedert sich insgesamt in drei Teile. Hierbei wird der erste Abschnitt, in dem aus grundlegenden Parametern des Sondenfeldes die Geometrie des Knotengitters bestimmt wird, nur beim ersten Aufruf der Rechenroutine durchlaufen. Die darauf folgenden Rechenabschnitte zwei und drei werden hingegen pro Zeitschritt berechnet.

Im Rechenschritt zwei wird zunächst der Temperaturgradient im U-Rohr der Sonde bestimmt. Hierzu wird die Energiebilanz der einzelnen Sondenabschnitte aufgestellt (Abbildung 6 & 7).

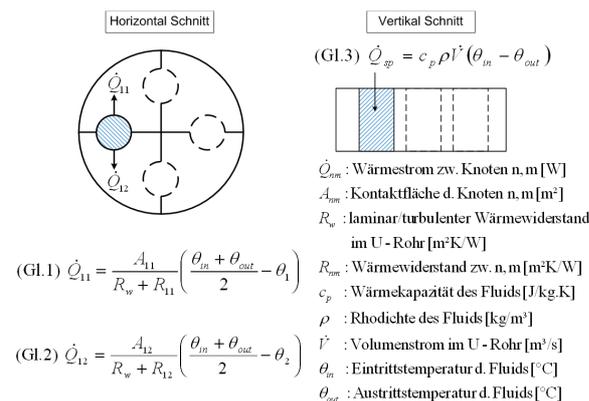


Abbildung 6: Energiebilanzen in der Sonde (Berechnung des Temperaturgradienten im Wärmeträgerrohr)

Den Verlustwärmeströmen \dot{Q}_{11} und \dot{Q}_{12} (Gl. 1 & 2) wird die Wärmespeicherleistung im Wärmeträgerfluid \dot{Q}_{st} (Gl.3) gleichgesetzt. Die für die Wärmeleitung ins Erdreich relevante Mitteltemperatur eines U-Rohrabschnitts ergibt sich

als arithmetisches Mittel aus der Eintrittstemperatur Θ_{in} und der Austrittstemperatur Θ_{out} des simulierten Volumenelements (Gl.4). Abbildung 6 und 7 zeigen die für die Temperaturbestimmung des U-Rohrelementes getroffenen Annahmen und Bilanzen.

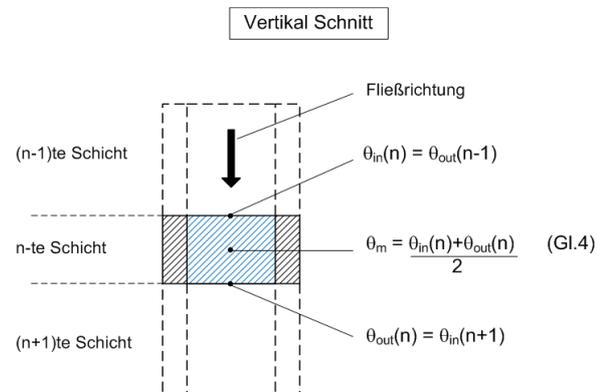


Abbildung 7: Mittlere Temperatur des Wärmeträgers im n-ten Berechnungshorizont

Im dritten Rechenschritt wird der Wärmeübergang zwischen den Knoten des Bohrlochs und angrenzenden Erdreichs echt dreidimensional kalkuliert. Um den Programmieraufwand, der angesichts der Simulation ganzer Sondenfelder entsprechend hoch ist, nicht zusätzlich zu vergrößern, wurde die Anwendung mit Hilfe finiter Vorwärtsdifferenzen programmiert.

Bei der gewählten Diskretisierung des Sondenfeldes wird für eine stabile Berechnung eine maximale Zeitschrittweite von ca. 10 Minuten erforderlich, die bei der Simulation von Tagen oder Monaten kein Problem darstellt, jedoch bei Simulationszeiträumen von mehreren Jahren mit langen Rechenzeiten verbunden ist.

Validierung des Programms

Die Validierung des Programms wurde an der hochschuleigenen Geothermieanlage vorgenommen. Bei dieser Anlage handelt es sich um zwei 80 m tiefe Erdwärmesonden, an denen zu Lehrzwecken regelmäßig Thermal-Response-Tests durchgeführt werden. Hierfür werden die Sonden abwechselnd mit 3 kW Heizleistung beaufschlagt, wobei die erreichte Rücklauftemperatur der Sonde und der Volumenstrom der Umwälzpumpe vermessen wird. Die aus den Tests gewonnenen Werte für die mittlere Leitfähigkeit des Untergrundes wurden zur Erstellung des Modells verwendet. Diagramm 8 zeigt gemessene wie simulierte Werte für den Sondenrücklauf. Aufgetragen in diesem Diagramm sind die gemessene Vorlauftemperatur (in Orange-Gelb), die gemessene Rücklauftemperatur (in Violett) und die simulierte Rücklauftemperatur (in Rot) über der Zeit. Der zur Messung eingestellte Volumenstrom ist im Diagramm in Schwarz dargestellt.

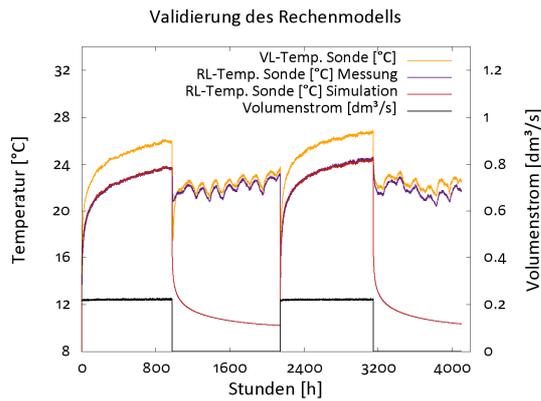


Abbildung 8: Vergleich gemessener und simulierter Rücklauf­temperatur eines Thermal-Response-Tests

Die Messstellen für die Bestimmung der Vor- bzw. Rücklauf­temperatur der Sonde liegen innerhalb des unbeheizten Technikraumes des Laborgebäudes. Deshalb liegt die gemessene Rücklauf­temperatur bei Abschalten der Heizung höher als die simulierte, da nicht die ungestörte Erdreich­temperatur, die sich im Fall der Simulation einstellt, gemessen wird, sondern die Umgebungstemperatur im Technikraum. Ist die Anlage in Betrieb, liegt die berechnete rote Temperaturkurve nur wenige Zehntel Kelvin unter der gemessenen Rücklauf­temperatur, so dass von einer guten Abbildung der realen Verhältnisse durch das mathematische Modell ausgegangen werden kann.

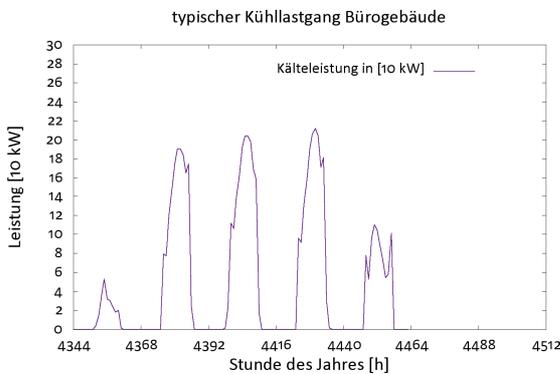


Abbildung 9: typischer Kühllastgang Bürogebäude

Weiter verläuft die simulierte Kurve in den Zeiten ohne Heizleistung der Theorie entsprechend gemäß einer kapazitiven Entladekurve, bis die ungestörte Erdreich­temperatur bei ca. 10 °C erreicht ist.

Simulation der Anwendungsfälle

Mit dem entwickelten Simulationsmodell werden nun die Lastgänge von einem durchschnittlichen Bürogebäude sowie einem Supermarkt untersucht. In der Abbildung 9 sind die Kühllasten eines am Chiemsee in Bayern liegenden Bürogebäudes dargestellt.

Der Lastgang zeigt über den Zeitraum einer Woche (Montag - Sonntag) eine regelmäßige Wiederkehr des

täglichen Kühllastverlaufs. Während außerhalb der üblichen Büroarbeitszeiten keine Kühlung notwendig ist, steigt die Kühllast während des Morgens sprunghaft an, erreicht um die Mittagszeit ihr Maximum und nimmt zum Feierabend erneut stark ab. Diesem für Bürogebäude typischen Verlauf, ohne ausgeprägte Grundlast außerhalb der Büroarbeitszeiten, steht im Anwendungsfall Supermarkt ein Lastgang gegenüber, der sehr markante Grundlastbereiche aufweist (Abbildung 10).

Zu beachten ist hier, dass in Abbildung 10 die Woche mit einem Sonntag beginnt, an dem die Kühllast deutlich tiefer liegt. Die Kühllast eines Supermarktes setzt sich im Wesentlichen aus dem Grundlastanteil für die Lebensmittelkühlung sowie dem Spitzenlastanteil für die Verkaufsflächenklimatisierung zusammen.

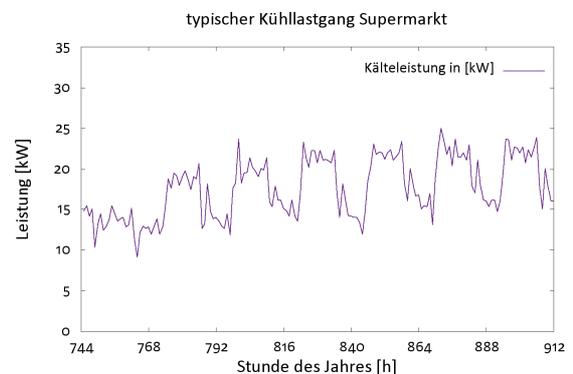


Abbildung 10: typischer Kühllastgang Supermarkt

Letzterer Anteil ist am Sonntag wegen des fehlenden Publikumsverkehrs nicht gegeben, so dass an diesem Tag im Vergleich zu den verkaufsoffenen Tagen, gut das Verhältnis zwischen Grund und Spitzenlast abgeschätzt werden kann.

Diskussion der Ergebnisse

Die Simulation des Bürogebäudes erfolgte vorrangig, da für dieses Gebäude ein vollständiger Datensatz für die Kühl- und Heizlasten (in stündlicher Auflösung für ein Kalenderjahr) vorhanden war.

Gegenstand der Untersuchung ist der Vergleich unterschiedlicher Rückkühlarten einer reversiblen Wärmepumpe, deren Leistung zur Deckung der nötigen Heiz- bzw. Kühllast ausreicht (monovalente Wärme- bzw. Kälte­gestehung). Untersucht wird die Rückkühlung über einen trockenen Kühlturm (Variante 1), durch einen nassen Kühlturm (Variante 2) sowie mit Hilfe einer Geothermieanlage (Variante 3). Weiter wurden für den Zeitraum eines Jahres für die Variante 3 drei Fälle unterschiedlicher Art des Betriebs der Anlage simuliert (Varianten 3.1-3.3). Zur Untersuchung kamen hierbei der reine Heizbetrieb im Winter, der reine Kühlbetrieb im Sommer sowie der ganzjährige kombinierte Betrieb der Anlage.

Eine Besonderheit des modellierten Gebäudes ist die asymmetrische Verteilung der Lasten zwischen Sommer und Winter. Die benötigte Heizleistung übersteigt die geforderte Kühlleistung um das Dreifache, was für die Auslegung des Sondenfeldes ein Problem darstellt. Wird das Feld auf die größere Leistung (hier die Heizleistung) ausgelegt, ist die Anlage für den kleineren Leistungsbereich stark überdimensioniert, was die Effekte der Temperaturdegradation des Erdreichs bei ganzjährigem kombiniertem Betrieb minimiert. Wird die Anlage dagegen auf die kleinere Leistung ausgelegt, treten diese Effekte deutlicher in Erscheinung als bei symmetrisch verteilter Last. Um das Simulationsmodell einfach zu strukturieren, kam eine Deckung der Spitzenlast durch eine andere Quelle nicht in Betracht, was dazu führt, dass in diesem Fall die Entscheidung zu Gunsten des größeren Effekts ausfiel, was in den untersuchten Fällen zu nicht praxistauglichen spezifischen Entzugsleistungen und Vorlauftemperaturen des Sondenfeldes im Winter führt (Abbildung 11 – 13) [8].

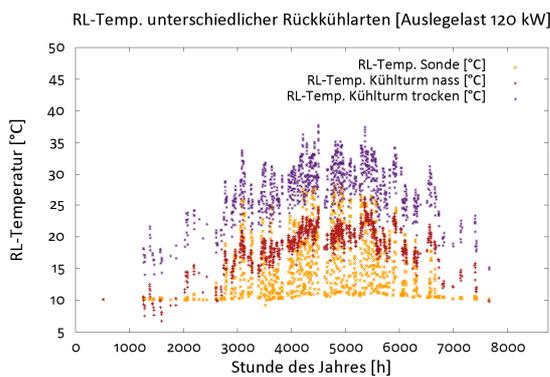


Abbildung 11: erreichte Rückkühltemperaturen [°C] (nur Kühlen) der Varianten 1-3

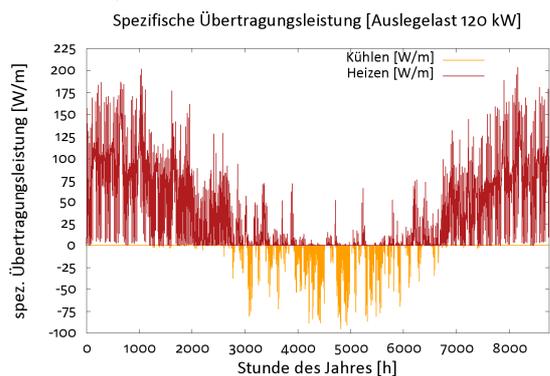


Abbildung 12: spezifische Entzugsleistung der Sonden [W/m] (kombinierter Betrieb) Variante 3.3

Abbildung 14 zeigt die aufsummierten Season-Performance-Factors sowie die Jahresarbeitszahl (Spalte 14) für die Varianten 1-3 (reines Kühlen). Für die Monaten Januar und Dezember ergeben sich keine Werte, da in diesen Monaten der Datensatz des

Bürogebäudes keine Kühllasten aufweist. Auffällig ist der geringe Unterschied zwischen den Varianten nasser Kühlturm und Geothermieanlage, der noch genauer untersucht werden muss.

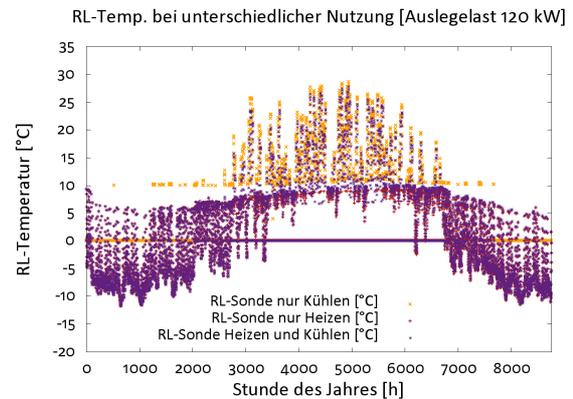


Abbildung 13: Vergleich der Rücklauftemperaturen der Sonden [°C] für reinen Heiz-/ Kühlfall oder kombinierten Betrieb (Varianten 3.1-3.3)

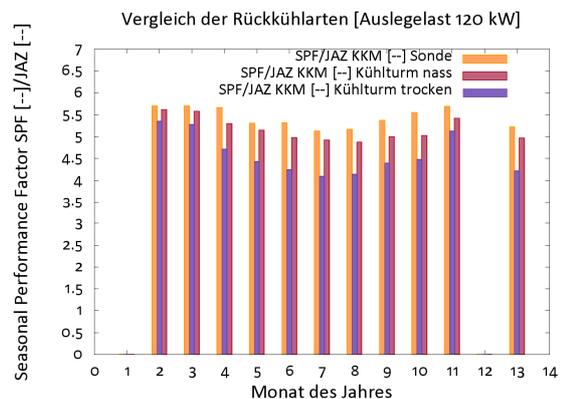


Abbildung 14: erreichte COP's der Varianten 3.1-3.3

Die Simulation des Supermarktes, dessen Geothermiefeld mit 10 Sonden zu 99 m Länge eine Nennleistung von 40-50 kW aufweist, wurde bei der Durchsicht der Messdaten, die von Oktober 2008 bis Mai 2010 aufgezeichnet wurden vorbereitet.

Abbildung 15 und 16 zeigen exemplarisch für die Betriebsart Heizen bzw. Kühlen die Vor- und Rücklauftemperaturen, mit denen die Sonden beaufschlagt wurden. Die Anlage wird im High-Flow gefahren, was die Spreizung, die üblicherweise im Bereich von 4-5 Kelvin liegen müsste auf 1-2 Kelvin verringert. Die Anlage entzieht, wie in Abbildung 15 dargestellt auf einem Temperaturniveau von ca. 10°C dem Erdreich Wärme.

Im sommerlichen Betrieb wird auf einem Temperaturniveau von ca. 15°C knapp die Hälfte der vom Normalkältekreislauf anfallenden ca. 100 kW thermischer Kälteleistung an das Erdreich abgegeben. Die restliche Wärmelast aus dem Normalkältekreis geht auf einen Speicher, sowie zur Trinkwassererwärmung. Dies macht das Simulationsmodell der Anlage komplexer als im Fall

des Bürogebäudes, weswegen die Berechnungen bei Abschluss dieses Artikels noch nicht abgeschlossen waren. Nach Aussage der Anlagenbetreiber, soll die Umwälzpumpe, die derzeit nur den Betrieb im High-Flow gestattet, auf eine regelbare Pumpe umgerüstet werden, die im mittleren und Grundlastbereich höhere Spreizungen des Wärmeträgerfluids zulässt, wodurch sich ein günstigerer Temperaturgradient zwischen Bohrlochverfüllung und angrenzendem Erdreich ausbildet, der höhere Entzugsleistungen in diesen Betriebspunkten erwarten lässt. Nähere Simulationen zu spezifischen Entzugsleistungen und Rücklauftemperaturen werden zeitnah angestrengt.

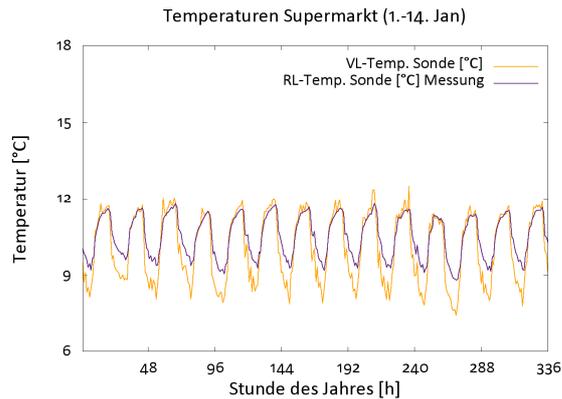


Abbildung 15: Temperaturverlauf des Supermarktes im Januar 2009

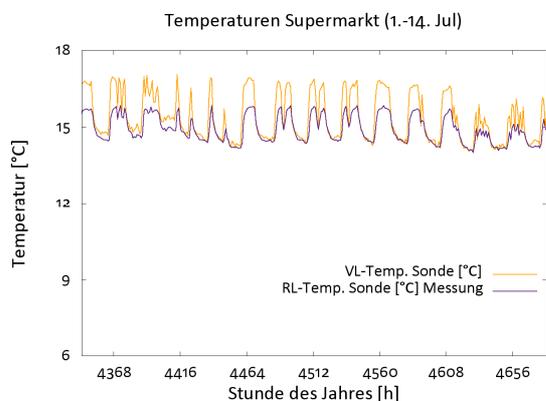


Abbildung 16: Temperaturverlauf des Supermarktes im Juli 2009

ZUSAMMENFASSUNG

Anhand der Simulation für das Bürogebäude, für die Betriebsarten reines Kühlen, reines Heizen und kombinierter Betrieb, ist bereits im ersten Jahr ein Unterschied in den Rücklauftemperaturen feststellbar. Die Temperaturdifferenz beträgt ca. 0,2-0,5 Kelvin. Inwieweit die asymmetrische Verteilung der Last zwischen sommerlichem Kühlbetrieb und dem Heizfall im Winter für diesen Effekt verantwortlich ist, sollte genauer untersucht werden. Die Temperaturlangzeitstabilität des Sondenfeldes muss mit weiteren mehrjährigen Simulationen

geprüft werden, wobei davon ausgegangen werden kann, dass sich der bereits im ersten Jahr ersichtliche Temperaturunterschied zwischen den Varianten 3.1-3.3 noch vergrößert. Sind die Daten des Supermarktes ausgewertet und weisen diese eine größere Symmetrie zwischen Wärmeab- bzw. -aufnahme auf, ist es zweckdienlich mit diesen Daten ebenfalls Langzeituntersuchungen anzustellen.

DANKSAGUNG

Bedanken möchte wir uns für die gute Zusammenarbeit mit Dr. Jürgen Schuhmacher, der an der Entwicklung des Simulationsmodells maßgeblich beteiligt war und dessen Unterstützung und Hinweise uns stets eine große Hilfe war(en). Weiterer Dank geht an Christoph Vorschulze, dessen Modell für Einzelsonden „VEBOHEX“ für die „erdson.de“ Pate stand.

LITERATUR

- [1] Adnot, J. 2003. Energy Efficiency and Certification of Central Air Conditioners (EECCAC), DGTREN, Armines, Frankreich
- [2] Arias, J. 2005. Energy Usage in Supermarkets - Modelling and Field Measurements, Division of Applied Thermodynamics and Refrigeration, Royal Institute of Technology, Stockholm, Schweden
- [3] Böhme, D. 2009, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2008, Berlin, Deutschland
- [4] DIN V 4108 Teil 6 2003-06. Vornorm Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs
- [5] Eskilson P. 1987, Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes, Department of Mathematical Physics and Building Technology University of Lund, Sweden
- [6] Schmidt, D. 2009. Projektverbund LowEx: Nutzung von regenerativen Energiequellen in Gebäuden durch den Einsatz von Exergiesystemen, Abschlußbericht, Fraunhofer IBP, Kassel, Deutschland
- [7] Schraps, S. 2005. Energiekostenreduzierung in Supermärkten, Kälte Klima Aktuell 2/2005, perpendo Energie- und Verfahrenstechnik GmbH, Aachen, Deutschland
- [8] VDI 4640 Blatt 2 2001-09. Technische Regel Thermische Nutzung des Untergrundes – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen
- [9] Weber, L. 2002. Energie in Bürogebäuden, Verbrauch und energierelevante Entscheidungen vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich

ENTWICKLUNG EINES GESAMTKONZEPTS FÜR DEN NACHWEIS DES SOMMERLICHEN WÄRMESCHUTZES

Stephan Schlitzberger, Anton Maas
 Fachgebiet Bauphysik, Universität Kassel, Deutschland

KURZFASSUNG

Dem Wärmeschutz im Sommer kommt insbesondere bei Nichtwohngebäuden, zunehmend aber auch bei Wohngebäuden, eine wachsende Bedeutung zu. Die aktuellen Regelwerke für den Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes sind allerdings unzureichend und weisen zudem Inkongruenzen auf.

In Planung und Betrieb finden in Deutschland derzeit vor allen Dingen die Kriterien der DIN 4108-2 für den sommerlichen Wärmeschutz, die Komfortgrenzen nach ISO 7730 und die nicht mehr gültige DIN 1946-2 sowie weitere technische Richtlinien, z.B. VDI 2078, Anwendung. Auf europäischer Ebene wurden die beiden Normen EN 13779 und EN 15251 eingeführt. Da die Grundlagen der einzelnen technischen Regelwerke nicht aufeinander abgestimmt sind, kommt es sowohl auf der Seite der Planer aber auch bei Bauherren und Betreibern zu Unklarheiten bezüglich der Auslegung der vorhandenen Regelwerke.

Ebenso schwierig ist die Situation bei den Planungsgrundlagen für die thermische Gebäudesimulation, die sich teilweise aus den o.g. Richtlinien ableiten lassen oder in separaten Normen festgelegt sind, wie beispielsweise EN ISO 13791 oder EN ISO 13792.

Als rechtsverbindlich anzuwendende Vorschrift für die Planung von Neubauten sind die Anforderungen der DIN 4108-2, ausdrücklich als Mindestanforderungen formuliert, einzuhalten. Bei Einhaltung ist jedoch nicht gesichert, dass sich in allen Teilen eines Gebäudes ein unkritisches sommerliches Temperaturverhalten einstellt bzw. erwartet werden kann.

Um einerseits eine bessere Berücksichtigung unterschiedlicher Nutzungsbedingungen zu schaffen und andererseits bislang nicht bzw. unzureichend berücksichtigte Einflüsse auf das sommerliche Wärmeverhalten, wie beispielsweise sich verändernde klimatische Randbedingungen, unterschiedliche Nachtlüftungskonzepte und Wärmeinseleffekte in das normative Nachweisverfahren aufzunehmen, soll auf der Grundlage von thermisch-energetischen Simulationsrechnungen eine neues einheitliches Bewertungsverfahren entwickelt werden. Hierbei sollen einerseits bisher nicht berücksichtigte Faktoren wie z.B. der Einfluss städtischer Bebauung in das

vereinfachte Verfahren über Sonneneintragskennwerte integriert und andererseits Vorschläge für einheitlich anzuwendende Simulationsrandbedingungen formuliert werden.

ABSTRACT

Development of an overall plan for the verification of summer heat protection

Improving summertime heat protection, especially in non-residential buildings, but also in residential buildings has been seen as increasingly relevant as of late, however existing rules for the heat protection verification are insufficient and incongruent.

In planning and operation in Germany in particular, the criteria of DIN 4108-2 for summer heat protection, the comfort limits of ISO 7730, the no longer current DIN 1946-2 as well as other technical guidelines, e.g. VDI 2078 are used. On the European level the normative guidelines EN 13779 and EN 15251 have been introduced. But because these regulations do not have a common basis, their usage leads to difficulties for planners as well as building owners and operators regarding the interpretation of the existing rules.

In the field of basis regulations for thermal building simulation, the situation is equally difficult because these regulations are partly deduced from the aforementioned guidelines, or mapped in other normative guidelines, e.g. EN ISO 13791 or EN ISO 13792.

The legally binding rules for the planning of new buildings are expressed in DIN 4108-2, and are described as minimum-requirements. To be in accordance with these requirements does not mean that there can be comfortable temperature behaviour expected in every room of the building.

To pay better attention to different user profiles on the one hand, and to pick up influences on the summer behaviour that are not respected at present (e.g. different night ventilation concepts or heat-island effects) into the normative guidelines on the other hand, a new uniform rule shall be established on the base of thermal and energetic simulations.

Currently, circumstances that are not respected at present, like the heat-island-effect, are supposed to be integrated into the simplified method of DIN 4108-2 and suggestions for common rules for simulations and boundary conditions should be carried out.

ANSATZ UND METHODE

Die Struktur der Anforderungsformulierung soll in der bisherigen Form beibehalten, aber ergänzt werden. Das eingeführte und weitgehend akzeptierte vereinfachte Verfahren über Sonneneintragskennwerte soll einerseits zukünftig die Möglichkeit bieten, den Effekt einer städtischen Bebauung auf das thermische Verhalten eines Gebäudes bzw. Raumes über einen zusätzlichen anteiligen Sonneneintragskennwert zu berücksichtigen, andererseits wird im Rahmen der Projektbearbeitung geprüft, inwieweit eine im Vergleich zur aktuellen Formulierung differenziertere Berücksichtigung unterschiedlicher Nachlüftungskonzepte erfolgen kann.

Zur Anpassung der aktuellen Sonneneintragskennwerte und insbesondere wegen der Erweiterung des Verfahrens um einen zusätzlichen anteiligen Sonneneintragskennwert wird es erforderlich, die bisherigen Werte anhand einer zu definierenden Normierungsgröße, z.B. anhand von Übertemperaturgradstunden, neu festzulegen. Hierdurch soll auch gewährleistet werden, dass die Anwendung des vereinfachten Verfahrens gegenüber dem Nachweis durch ingenieurmäßige genauere Verfahren „auf der sicheren Seite liegt“. Insbesondere für hohe Fensterflächenanteile bei Nichtwohngebäuden ist dies derzeit nicht der Fall und es wird geprüft, ob für hohe Fensterflächenanteile ein weiterer anteiliger Sonneneintragskennwert eingeführt werden kann.

Eine Erweiterung der bisherigen Anforderungsstruktur soll auch in der Hinsicht erfolgen, dass künftig für Wohn- und Nichtwohngebäude getrennte Anforderungen unter Zugrundelegung verschiedener Randbedingungen formuliert werden. Darüber hinaus soll unterschieden werden zwischen Anforderungen an Neubauten und veränderte Bestandsgebäude.

Die korrespondierenden Simulationsrechnungen zur Auswertung der Normierungsgröße und Festlegung neuer anteiliger Sonneneintragskennwerte werden unter Zugrundelegung der derzeit in der Entwicklung befindlichen neuen Testreferenzjahre (TRYs) durchgeführt. Diese werden zukünftig über die elektronische Bereitstellung durch den Deutschen Wetterdienst die Möglichkeit bieten, eine Berücksichtigung der städtischen Bebauung rechnerisch in die Datensätze einzuarbeiten, sodass hierdurch eine Integration auch in das vereinfachte Verfahren möglich sein wird.

LITERATUR

DIN 4108:2003-07 *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden.*

DIN EN ISO 7730:2006-05 *Ergonomie der thermischen Umgebung*

DIN 1946:1994-01 *Raumlufttechnik.* Nicht mehr gültig

VDI 2078:1994-10 *Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume.*

DIN EN 13779:2005-05 *Lüftung von Nichtwohngebäuden.*

DIN EN 15251:2007-08 *Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings*

prEN ISO 13791:2003-07 *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik – Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren*

prEN ISO 13792:1997-10 *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik – Allgemeine Kriterien für vereinfachte Berechnungsverfahren*

SKALEN-ADAPTIVE SIMULATION THERMISCHER BEHAGLICHKEIT IN INNENRÄUMEN

C. van Treeck¹, J. Frisch², S. R. Bolineni¹, S. Stratbücker¹, S. Paulke³,
 I. Schweinfurth¹, R. Schwab¹, E. Rank² and A. Holm¹

¹Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Institutsteil Holzkirchen, Valley

²Lehrstuhl für Computation in Engineering, Techn. Universität München, München

³P+Z Engineering GmbH, München

KURZFASSUNG

Der Beitrag stellt eine Methodik vor, Simulationsmodelle zur Vorhersage thermischer Behaglichkeit in Innenräumen mit unterschiedlichem raum-zeitlichen Detaillierungsgrad miteinander zu verbinden.

Ausgehend von den Ergebnissen einer vorab durchgeführten Ganzjahressimulation werden beispielsweise verschiedene Zeitperioden identifiziert, in denen operative Raumtemperaturen einen kritischen Wert überschreiten. Das Modell wird anschließend verfeinert, indem ein Menschmodell in die Szene eingefügt wird. Mit Hilfe eines Raytracing Verfahrens wird die auf der Hautoberfläche des Manikins absorbierte kurzwellige Solarstrahlung sowie mittels eines Radiosity Modells der kurz- und langwellige diffuse Strahlungsaustausch zwischen Hautoberfläche und Umgebungsflächen berechnet. Der konvektive Wärmeübergang an der Hautoberfläche wird über Wärmeübergangskoeffizienten beschrieben, die zuvor mittels CFD Berechnungen ermittelt wurden.

Zur Simulation des menschlichen Körpers hinsichtlich Stoffwechsel und Blutkreislauf dient ein Thermoregulationsmodell, mit dem die dynamische Entwicklung von Oberflächen- und Körperkerntemperaturen als Antwort auf zeitlich veränderliche Randbedingungen nachgebildet werden kann. In diesem Zusammenhang wird das Fiala Modell in THESEUS-FE eingesetzt.

Die mittels einer gekoppelten Simulation bestimmten Hautoberflächentemperaturen werden anschließend über eine Umrechnung in Äquivalenttemperaturen lokalen Behaglichkeitswerten zugeordnet. Als Basis dienen Regressionsfunktionen, die in Versuchsreihen mittels Befragungen von Probanden am Fraunhofer Institut für Bauphysik ermittelt worden sind.

ABSTRACT

The paper addresses the scale-adaptive coupling of simulation methods for indoor thermal quality performance prediction.

Starting from results obtained by a whole-year building performance simulation, we identify periods, where operative room temperatures exceed a threshold. The model resolution is refined in space and time by inserting a multi segment thermal manikin model into the scene. A raytracing model computes

the solar radiation absorbed at the manikin skin, whereas a radiosity solver calculates the diffuse short and long wave radiative heat transfer between manikin and its surroundings. Predefined heat transfer coefficients describe the convective heat transfer, which are previously computed by CFD.

We adapt a thermoregulation model to simulate metabolism and blood circulation within the human body. The model predicts the dynamic responses of the body in terms of skin and core temperatures to changing environmental conditions. We make use of the THESEUS-FE implementation of Fiala's model.

Skin temperatures resulting from a coupled simulation are transformed into equivalent temperatures and are correlated with local thermal sensation votes. The empirical correlations are obtained from experiments with test subjects involving questionnaires which have been conducted at the Fraunhofer Institute for Building Physics.

HINTERGRUND

Mit der in der Grundlagenforschung experimentell fundierten Kenntnis der physikalischen, chemisch-physiologischen und psychologischen Zusammenhänge bei der Bewertung des Innenraumklimas und seiner Auswirkungen auf den Menschen gewinnt der Bereich der numerischen Simulation zunehmend an Bedeutung.

Seitens der Industrie besteht in zahlreichen Feldern eine Nachfrage an der Integration geeigneter Modelle und Rechenverfahren sowie an einer entsprechenden Verbindung mit der Messtechnik. Trotz zunehmender Verfügbarkeit leistungsfähiger Arbeitsplatzrechner stellt die Simulation jedoch stets einen Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenzeit dar.

Aus diesem Grund wird in diesem Beitrag eine skalen-adaptive Vorgehensweise bei der Auswahl der entsprechenden Ingenieurmodelle vorgeschlagen. Wir beschränken uns in diesem Beitrag auf den Bereich Gebäudesimulation.

BEHAGLICHKEITSBEWERTUNG

Zur Bewertung des menschlichen Behaglichkeitsempfindens kommt üblicherweise ein Modell zum Einsatz, das den Prozentsatz Unzufriedener als statistisches Maß auf einer 7-Punkte Skala beschreibt (Fanger 1982). Das Modell ist in zahlreichen norma-

tiven Vorschriften definiert (ISO 7730, ASHRAE 55) und bildet den Wärmehaushalt des menschlichen Körper als Ganzes ab. Es gilt jedoch nur unter uniformen und stationären Bedingungen, d.h. Aussagen zum lokalen Empfinden können nur begrenzt; transiente Einflüsse können nicht wiedergegeben werden. Für den Sonderfall natürlich belüfteter Gebäude finden adaptive Komfortrichtlinien Anwendung (z.B. EN 15251), die das Nutzerverhalten zur Beeinflussung des Raumklimas (etwa: Öffnen eines Fensters) berücksichtigen (de Dear & Brager 2002). Zur Auswertung ist eine Ganzjahressimulation erforderlich.

Das menschliche Temperatur- und Behaglichkeitsempfinden hängt vom thermischen Zustand des Körpers ab, der von Thermorezeptoren an der Hautoberfläche und im Körperinneren erfasst wird (Gagge 1973). Von Bedeutung sind ferner die Arbeit des Körpers, die zur Herstellung eines thermischen Gleichgewichtszustandes erforderlich ist (Berglund 1986), sowie das Feuchteempfinden (Gagge 1973).

Über Experimente mit Klimamessrichtungen und durch Befragungen von Versuchspersonen zum lokalen Behaglichkeitsempfinden kann Körpersegmenten über Regressionsfunktionen ein entsprechender Behaglichkeitsindex zugeordnet werden (Bohm et al. 1990, Wyon et al. 1989, Mayer 2000, ISO 14505-2:2004).

Eine besondere Herausforderung stellt dabei die Vorhersage des menschlichen Empfindens unter nicht-uniformen und instationären Bedingungen dar (Strøm-Tejsen et al. 2007, Zhu et al. 2008). Als Anwendung sind in diesem Zusammenhang z.B. Methoden der Flächenkühlung (Olesen 2008) oder die "Personalized Ventilation" (Yang et al. 2008) zu nennen. Von Zhang et al. (2010) wurde beispielsweise solch ein empirisches Modell zur Bewertung der lokalen und globalen Behaglichkeit entwickelt.

Für eine detaillierte simulationsgestützte Komfortanalyse, die auch die dynamische Anpassung des Körpers auf zeitlich veränderliche Umgebungsbedingungen berücksichtigt, wären neben einem Bewertungsverfahren ein menschliches Thermoregulationsmodell, ein Verfahren zur Strömungs- und Wärmestrahlungssimulation bzw. ein zonales Verfahren zur Modellierung des Wärmeaustausches zwischen Körper und Umgebung einzusetzen.

Ein Thermoregulationsmodell simuliert dabei den menschlichen Blutkreislauf, Stoffwechsel und die Körperkern- und Hauttemperaturen. Die Regelungsmechanismen Kältezittern, Schwitzen, Gefäßverengung und -erweiterung werden empirisch modelliert. Arbeiten hierzu wurden z.B. von Fiala et al. (2001), Huizenga et al. (2001), Kato et al. (2007), Niu&Gao (2008), Sano et al. (2008), Stolwijk (1971), Streblov et al. (2008), Tanabe et al. (2002) und Zhang et al. (2008) vorgestellt.

Abbildung 1 zeigt die Zuordnung von lokalen Behaglichkeitswerten zu simulierten Oberflächentemperaturen eines Manikins. Das verwendete Behaglich-

keitsmodell wurde von Versuchen abgeleitet, die am Fraunhofer Institut für Bauphysik durchgeführt worden sind. Die Methodik ist in (van Treeck et al. 2009) ausführlich dargestellt.

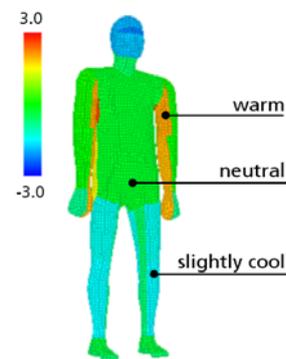


Abb. 1: Farbliche Darstellung von lokalen Behaglichkeitswerten auf der Hautoberfläche

TEILMODELLE

Zonenmodell

Zur Vorhersage von Heiz- und Kühlenergiebedarf eines Gebäudes, Heiz- und Kühlleistung der haustechnischen Anlage, sowie von Luft- und Oberflächentemperaturen wird ein dynamisches Zonenmodell verwendet.

Das Modell ist als Finite-Volumen Ansatz nach Clarke (2001) formuliert, d.h. ein Gebäudemodell wird in einzelne Kontrollvolumen zerlegt und die Forderung nach Energie- und Masseerhaltung liefert Gleichungssysteme, die unter gegebenen klimatischen Randbedingungen und dem Einfluss eines (idealisierten) regelungstechnischen Systems für einzelne Zeitschritte einer Ganzjahressimulation sukzessive gelöst werden müssen. In den Kontrollvolumen wird dabei eine homogene Temperaturverteilung angenommen. Das Modell ist in (van Treeck 2010) detailliert beschrieben.

Als Datenstruktur dient ein Hexaedermmodell, wobei zwischen Luftvolumen (fluid) und Festkörpern (solid) unterschieden wird, und das Oberflächenmodell der Raumluftkörper getrennt vorliegt. Damit ist es möglich, diese Hüllflächen unabhängig von der Diskretisierung des Luftvolumens zur Berechnung der Wärmestrahlungsverteilung im Innenraum zu verwenden.

Zur Berechnung der kurzwelligen Strahlungsverteilung dient ein vereinfachtes Raytracing Schema in Verbindung mit einem detaillierten Fenstermodell. Der langwellige Strahlungsaustausch zwischen Oberflächen wird mittels eines Radiosity Verfahrens ermittelt. Die Kopplung der Lösungsverfahren geschieht explizit.

Das Zonenmodell liefert Daten, die für eine Abschätzung der thermischen Qualität eines Gebäudes, etwa zur Vorhersage von Zeiträumen, in denen Überhitzungserscheinungen zu beobachten wären, verwendet

werden kann (vorausgesetzt, es werden entsprechende Wetterdaten eingesetzt).

Thermoregulationsmodell

Um die zeitliche Änderung von Hautoberflächen- und Körperkerntemperaturen im Sinne einer dynamischen physiologischen Anpassung des menschlichen Körpers auf veränderliche thermische Umgebungsbedingungen zu simulieren, wird ein detailliertes Thermoregulationsmodell eingesetzt. Der menschliche Körper ist in der Lage, seine Körperkerntemperatur durch die vier Regelungsmechanismen Kältezittern, Schwitzen, Gefäßverengung und -erweiterung konstant zu halten (Stolwijk 1971). Wie in Abbildung 2 dargestellt, muss in diesem Fall die Wärmeübertragung zwischen Körperoberfläche und Umgebung durch Konvektion, Strahlung und ggf. Wärmeleitung berechnet werden.

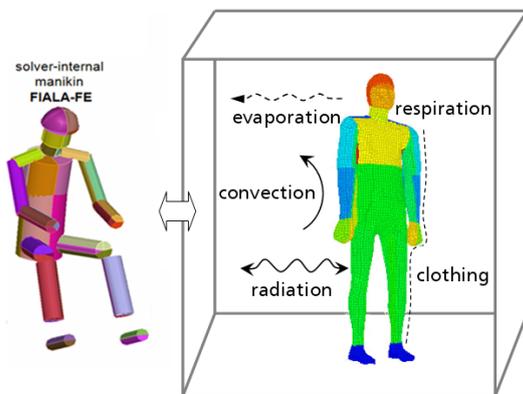


Abb. 2: Wärmeübertragung zwischen Körper und Umgebung

Ein Thermoregulationsmodell besteht aus einem aktiven regelungstechnischen System, das die Reaktion des zentralen Nervensystems als Interpretation von Signalen, die von verschiedenen Thermorezeptoren von der Haut und vom Körper empfangen werden, beschreibt, sowie einem passiven System, das die Wärmeleitung im Gewebe einschließlich Blutkreislauf und den Wärmeaustausch mit der Umgebung modelliert (Stolwijk 1971). Der Körper wird dabei in Segmente unterteilt, die ihrerseits eine konzentrische Struktur aus einzelnen Schichten und Segmenten aufweisen, womit die äußeren und inneren Hautschichten, Muskel-, Fett- und Knochenschichten dargestellt werden können (Fiala et al. 2001).

Im Rahmen dieser Arbeit findet das Modell von Fiala Anwendung, wobei das Simulationstool THESEUS-FE (2010) eingesetzt wird (Paulke 2007). THESEUS wird dabei im "ungekoppelten" Modus verwendet, und über eine schwache Kopplung mit weiteren Simulationsverfahren verbunden. Für Details sei auf die Publikation (van Treeck et al. 2009) verwiesen.

Konvektiver Wärmeübergang

Zur Beschreibung des konvektiven Wärmeübergangs zwischen Körperoberfläche und Umgebung dienen Wärmeübergangskoeffizienten, die zuvor mittels

CFD für alle Oberflächensegmente des Fiala-Modells berechnet wurden – in diesem Fall 48 Patches für ein stehendes Manikinmodell, wie es in Abbildung 3 dargestellt ist. Entsprechende konvektive Wärmeübergangskoeffizienten werden u.a. auch in den Arbeiten von De Dear et al. (1997) und Fiala et al. (2001) vorgeschlagen.

Dieses Vorgehen ermöglicht es, die Zeitskalen O(Minuten bis Stunden), die im Rahmen dieser Arbeit für eine interaktive Simulationsrechnung von Interesse sind, auflösen zu können. An dieser Stelle sei auch auf die Arbeiten der Autoren im Bereich Computational Steering von CFD Simulationen unter Verwendung eines Hochleistungsrechners hingewiesen (van Treeck et al. 2007).

Gegenstand aktueller Arbeiten ist die Entwicklung eines parametrischen Modells zur situationsabhängigen Auswahl konvektiver Wärmeübergangskoeffizienten für zuvor definierte strömungsmechanische Konfigurationen in Innenräumen (z.B. Raum, Fahrzeuginnenraum, Flugzeugkabine). Die in Abbildung 3 dargestellten Simulationsergebnisse wurden mittels der Software ANSYS Fluent mit SST- $k\omega$ Turbulenzmodell erhalten, wobei fünf prismatische Elemente zur Auflösung der oberflächennahen Grenzschicht verwendet wurden.

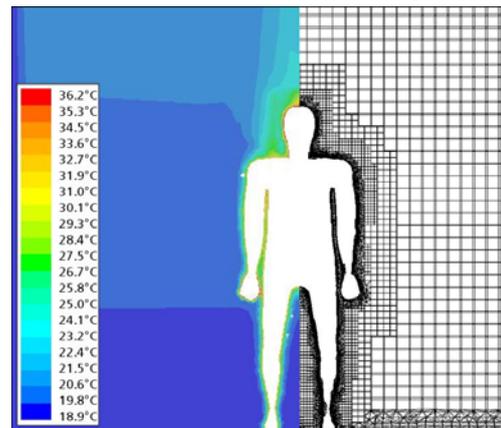


Abb. 3: CFD Modell in ANSYS Fluent

Berechnung der Wärmestrahlung

Die kurzweilige Wärmestrahlungsverteilung in Innenräumen wird mit einem vereinfachten Raytracing Verfahren berechnet. Hierfür wird zunächst der Sonnenstandsvektor bestimmt und die aus Wetterdaten ermittelte Direktstrahlung entsprechend der geometrischen Orientierung der transparenten Flächen umgerechnet. Die Strahlungstransmission durch Fenster wird mit Hilfe eines detaillierten Fenstermodells berechnet, wobei transparente Flächen in mehrere kleine Teilfacetten (z.B. hundert) zerlegt werden. Wie in Abbildung 4 gezeigt, wird für jede Teilfläche ein einfallender Strahl verfolgt, bis dieser auf eine Oberfläche auftrifft und dort absorbiert wird, etwa auf der Körperoberfläche des Manikinmodells, falls dieses verwendet wird.

Der diffuse kurzwellige sowie der diffuse langwellige Strahlungsaustausch zwischen Oberflächen wird mit einem Radiosity Verfahren bestimmt (Modest 2003), wobei das von Walton (2002) vorgeschlagene Integrationsverfahren zur Bestimmung der Sichtfaktoren Anwendung findet. Für Details und eine Konvergenzstudie wird auf (van Treeck 2010) verwiesen.

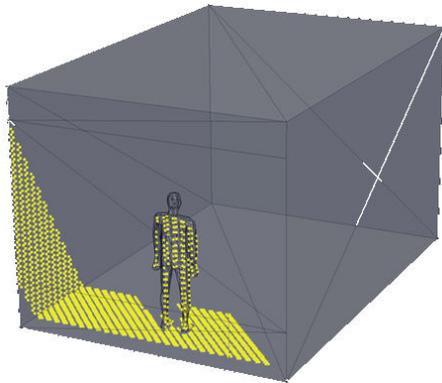


Abb. 4: Strahlverfolgung mittels Raytracing

MODELLINTEGRATION

Für die Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten (Zonenmodell, FIALA-FE, Behaglichkeitsbewertung) dient eine Softwareschnittstelle (van Treeck & Frisch 2009). THESEUS wird dabei über eine Datei-basierte Schnittstelle angesteuert und im "ungekoppelten" Modus ausgeführt. Die Skript-basierte Kontrolle ermöglicht das Starten, Stoppen und Fortführen einer Simulation, wobei THESEUS eine adaptive Zeitschrittweitensteuerung zulässt und das Postprozessing-Intervall der Softwareschnittstelle variabel und somit unabhängig von der Schrittweite des Löser einstellbar ist.

Das Softwareinterface kann gegenwärtig auf zwei Arten betrieben werden. Im gekoppelten Modus fungiert die in Abbildung 5 dargestellte grafische Benutzeroberfläche (GUI) als Monitor zur Darstellung des thermischen Zustands des Manikins. Randbedingungen werden bidirektional zwischen den im Batch-Betrieb ausgeführten Solvern ausgetauscht.

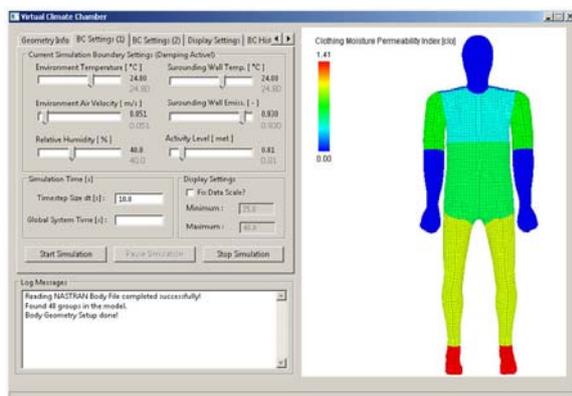


Abb. 5: Grafische Benutzeroberfläche (Frisch 2008, van Treeck et al. 2009)

Im ungekoppelten Modus dient die GUI als interaktives Simulationswerkzeug (Computational Steering), das eine sehr schnelle Antwortzeit aufweist (Simulation in Echtzeit). Der Wärmeübergang zwischen Körper und Umgebung wird in diesem Fall ausschließlich über vordefinierte Wärmeübergangskoeffizienten beschrieben. Das interaktive Simulationsmodell gestattet zur Laufzeit die Änderung der Parameter Position (sitzend, stehend), Bekleidungsart, Aktivitätsgrad, sowie die Anpassung der thermischen Umgebungsrandbedingungen.

Für das Zonenmodell wurde ebenfalls eine einfache grafische Oberfläche entwickelt.

BEISPIEL

Folgendes Beispiel demonstriert die Anwendung am Beispiel Gebäudesimulation. Eine zunächst durchgeführte Ganzjahressimulation mit dem Zonenmodell gibt, die Verwendung geeigneter Wetterdaten vorausgesetzt, Aufschluss über Perioden, in denen Behaglichkeitskriterien, etwa die Überschreitungshäufigkeit von Raumtemperaturen, verletzt werden.

Für das in Abbildung 6 exemplarisch dargestellte Simulationsergebnis wurde das Benchmark Beispiel 13 (schwere Bauart) aus der Norm VDI 6020 (2001) verwendet. Hierbei wird ein Testraum betrachtet, der adiabatisch mit weiteren Räumen verbunden ist und eine große Fensteröffnung aufweist.

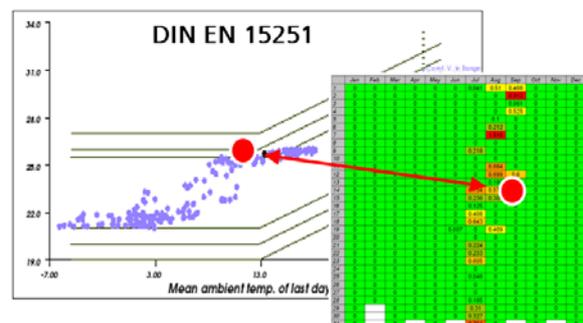


Abb. 6: Operative Raumtemperaturen im adaptiven Komfortdiagramm der EN 15251 und farbliche Darstellung der Überschreitung der Grenzen einer Komfortkategorie in einer kalenderbasierten Ansicht

Die zonale Simulation liefert Werte für Raum- und Oberflächentemperaturen in einer stündlichen (oder feineren) Auflösung als Eingabedaten für eine erste Behaglichkeitsanalyse. Für den Fall eines natürlich belüfteten Gebäudes (vgl. de Dear et al. 2002) kann beispielsweise ein adaptives Komfortdiagramm, z.B. nach EN 15251 (2007), zur Bewertung der thermischen Qualität angewendet werden. In Abbildung 6 sind die operativen Raumtemperaturen gegen die exponentiell gewichtete laufende Außentemperatur aufgetragen. Eine kalenderbasierte Ansicht ermöglicht es dabei, das zeitliche Auftreten von Werten, die eine definierte Komfortkategorie verletzen, entsprechend zu lokalisieren (grün = keine Abweichung; rot = Überschreitung).

Das Modell gibt dabei jedoch definitionsgemäß keinen Aufschluss über lokale oder zeitabhängige, dynamische Effekte. Um diese zu erfassen, muss das Modell verfeinert werden. Es wird an dieser Stelle angemerkt, dass normative Vorschriften wie beispielsweise ISO 7730 (2005) auch Hinweise zur Abschätzung lokaler thermischer Behaglichkeit geben, die im Gebäudesimulationsbereich üblicherweise für die Bewertung ausreichend sind. Für andere Konfigurationen, etwa Fahrzeug- oder Flugzeuginnenräume, die durch eine Vielzahl lokaler Effekte gekennzeichnet sind, sind diese Vorschriften jedoch nur sehr begrenzt anwendbar.

Mit der Auswahl eines Zeitschrittes aus vorgenannter Simulation wird die Auflösung verfeinert, indem das Manikinmodell in die Szene eingefügt und eine Kopplung der oben beschriebenen Modelle vorgenommen wird.

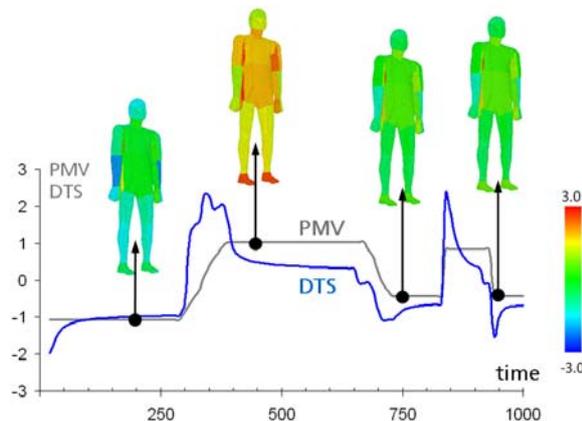


Abb. 7: Visualisierung des lokalen thermischen Behaglichkeitsempfindens auf der Oberfläche des Manikinmodells und Darstellung der globalen Parameter PMV und DTS

Abbildung 7 zeigt die zeitliche Entwicklung des lokalen thermischen Behaglichkeitsempfindens. Die ermittelten Hautoberflächentemperaturen wurden dabei in Äquivalenttemperaturen umgerechnet und über am Fraunhofer IBP experimentell gefundene Zusammenhänge dem lokalen Behaglichkeitsempfinden zugeordnet. Zur Darstellung dient die 7-Punkt ASHRAE Skala (2004). Das Diagramm stellt weiterhin die Werte PMV (nach ISO 7730) und DTS, d.h. den Dynamic Thermal Sensation Index nach Fiala (2001), dar, die für den Körper als Ganzes formuliert sind. Der PMV Index drückt die Zufriedenheit einer Personengruppe mit dem Umgebungsklima aus, die nach Fanger (1982) statistisch mit dem Ungleichgewicht in der Energiebilanz des menschlichen Körpers als Ganzes korreliert werden kann.

AUSBLICK

Der Einsatz von Simulationsverfahren zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit in Innenräumen stellt stets einen Kompromiss zwischen Modellauflösung, Genauigkeit und Rechenzeit dar. Es empfiehlt sich somit ein skalen-adaptives Vorgehen bei der Aus-

wahl der entsprechenden Modelle und Simulationsverfahren, um eine Balance zwischen physikalisch erforderlicher und vom Rechenaufwand praktikabler raum-zeitlicher Auflösung zu erreichen.

Aus diesem Grund wird gegenwärtig ein Middlewarekonzept zur Kopplung der beschriebenen Ingenieurmodelle und Simulationsverfahren entwickelt. Einen Schwerpunkt bilden dabei die Anbindung von CFD, sowie die Integration von weiteren Behaglichkeitsbewertungsalgorithmen.

DANKSAGUNG

Gefördert im Rahmen der internen Programme der Fraunhofer Gesellschaft (FhG), Fördernummer Attract 692 239. Teile der Vorarbeiten wurden durch die Bayerische Forschungsförderung (BFS) im Rahmen des Förderprojektes COMFSIM gefördert, AZ 630/04. Die Autoren danken FhG und BFS; ferner P+Z Engineering für die Überlassung einer Softwarelizenz für ihr Produkt THESEUS-FE.

REFERENZEN

- ASHRAE (2004). Standard 55: Thermal Environmental Cond. for Human Occupancy. Atlanta.
- Berglund L.G. and Cunningham D.J. (1986). Parameters of human discomfort in warm environments. ASHRAE Transactions, 92(2B):732–746, 1986.
- Bohm M., Browen M., Holmer I., Nilsson P.V. and Noren O. (1990). Evaluation of vehicle climate with a thermal manikin. Technical report, Swedish Institute of Agricultural Engineering.
- Clarke J. (2001). Energy simulation in building design (2nd). Butterworth-Heinemann.
- de Dear R.J., Arens E., Hui Z., & Oguro M. (1997). Convective and radiative heat transfer coefficients for individual human body segments. Int J Biometeorology, 40, 141–156.
- de Dear R.J. and Brager G.S. (2002). Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. Energy and Buildings 34: 549-561.
- EN ISO 14505-2 (2004). Ergonomics of the thermal environment - Evaluation of thermal environments in vehicles. Beuth Verlag.
- EN 15251 (2007). Indoor env. input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting, and acoustics. Beuth.
- EN ISO 7730 (2005). Ergonomics of the thermal environment. Beuth Verlag.
- Fanger, P. (1982). Thermal comfort. R.E. Krieger.
- Fiala, D., Lomas, K., & Stohrer, M. (2001). Computer prediction of human thermoregulatory and temperature response to a wide range of env. conditions. Int J Biometeorol, 45, 143–159.
- Frisch, J. (2008). Diploma thesis, TU München.

- Gagge, A. (1973). Rational temp. indices of man's thermal env. and their use with a 2-node model of his temp. reg.. Fed. Proc., 32, 1572–1582.
- Gordon R. (1974). The response of human thermoregulatory system in the cold. PhD thesis, Univ. of California, St. Barbara, CA.
- Huizenga, C., Hui, Z., & Arens, E. (2001). A model of human physiol. and comfort for assessing complex thermal env. Bldg and Env, 36, 691–699.
- Kato, S., Nagano, H., & Yang, L. (2007). A CFD manikin with a thermo physiology model. Roomvent 2007, Helsinki.
- Mayer E. (2000). Manfitted measurement of thermal climate by a dummy representing suit for simulation of human heatloss (DRESSMAN). In Healthy Buildings, volume 2, pages 551–556, Washington DC.
- Modest, M.F. (2003). Radiative Heat Transfer. Academic Press, USA, 2nd ed.
- Niu, J., & Gao, N. (2008). Personalized vent. for commercial aircraft cabins, IndoorAir 2008, Denmark.
- Olesen B.W. (2008). Radiant floor cooling systems. ASHRAE Journal, 9:16–22.
- Paulke, S. (2007). FE-based implementation of Fiala's thermal manikin in THESEUS-FE. EUROSIM 2007.
- Sano, J., et al. (2008). Evaluation of thermal env. in vehicles by CFD coupled with num. thermoreg. model JOS. IndoorAir2008, Copenhagen.
- Stolwijk, J., A mathematical model of phys. temp. regulation in man. (1971), CR-1855, NASA.
- Streblow, R., Müller, D., & Gores, I. (2008). A coupled simulation of the therm. environment and thermal comfort with an adapted Tanabe model. IndoorAir 2008, Denmark.
- Strøm-Tejsten, P., et al. (2007). Ass. of the thermal env. in a simulated aircraft cabin using thermal manikin exposure. Roomvent2007, Helsinki.
- Tanabe, S.-I., K.K., Nakano, J., & Ozeki, Y. (2002). Eval. of thermal comfort using comb. multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and CFD. Energy and Buildings, 34, 637–646.
- THESEUS-FE (2010). Theory manual, release 3.0, <http://www.theseus-fe.de>.
- van Treeck, C., Frisch, J., Pfaffinger, M., Rank, E., Paulke, S., Schweinfurth, I., Schwab, R., Hellwig R. and Holm, A. (2009). Integrated thermal comfort analysis using a parametric manikin model for interactive simulation, J Building Performance Simulation, 2(4): 233-250.
- van Treeck, C., Wenisch, P., Borrmann, A., Pfaffinger, M., Wenisch, O., Rank, E. (2007). ComfSim. Bauphysik, 29(1), 2–7.
- van Treeck, C. (2010). Habilitation thesis, Technische Universität München.
- VDI 6020 (2001). Requirements on meth. for calc. of thermal and energy sim. of bldg and plants.
- Walton, G. N. 2002. Calculation of obstructed view factors by adaptive integration. Tech. Rep. NIST, USA.
- Wyon D.P., Larsson S., Forsgren B. and Lundgren I. (1989). Standard procedures for assessing vehicle climate with a thermal manikin. SAE technical paper 890049, pp. 1-11.
- Yang, B., Melikov, A., and Sekhar, C. (2008). Cooling effect of ceiling mounted personalized vent. systems. IndoorAir2008, Copenhagen.
- Zhang H., Arens E., Huizenga C. & Han T. (2010). Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, Parts I-III. J Bldg and Environment, 45, 380–410.
- Zhang, Y., & Yang, T. (2008). Sim. of Human Thermal Resp. in Confined Space. IndoorAir 2008, Denmark.
- Zhu, S., et al. (2008). Development of a computational thermal manikin applicable in a non-uniform thermal environment (Part 2). ASHRAE HVAC&R Research, 14 (4), 545–564.

SIMULATION LOKALER STRALUNGSTEMPERATURASYMMETRIEN IN INNENRÄUMEN

J. Frisch¹, C. van Treeck², M. Grahovac³, P. Liedl⁴, R.-P. Mundani¹, M. Pfaffinger¹,
 P. Tzscheuschler³ und E. Rank¹

¹ Lehrstuhl für Computation in Engineering, TU München, D-80290 München

² Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Institutsteil Holzkirchen, D-83626 Valley

³ Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, TU München, D-80290 München

⁴ Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik, TU München, D-80290 München

KURZFASSUNG

In der Planungsphase eines Gebäudes wird dem thermischen Komfort mittlerweile ein sehr großer Stellenwert beigemessen. Dabei ist die Bestimmung von Komfortwerten und -indizes nicht immer eindeutig. Ein Aspekt bei der lokalen thermischen Komfortbewertung ist beispielsweise die in EN ISO 7730 beschriebene Bestimmung einer asymmetrischen Temperaturstrahlungsdifferenz. Die simulationstechnische Bestimmung dieses Wertes ist jedoch weder hinreichend beschrieben, noch dokumentiert. Dieser Beitrag beschreibt das generelle Vorgehen, um die Strahlungstemperaturasymmetrie anhand von Simulationsergebnissen zu bestimmen und auszuwerten. Anschließend wird ein Beispiel mit dieser Methode berechnet und die Ergebnisse dargestellt.

ABSTRACT

Nowadays, evaluation of thermal comfort in early design stages of building projects gains more and more significance. Unfortunately, the computation of thermal comfort indices regarding local effects such as thermal asymmetric radiation differences as mentioned in EN ISO 7730 are not well documented. This article describes a general simulation procedure to evaluate asymmetric thermal radiation differences from input data of simulation programs. An example is shown in this paper and the obtained results are discussed.

EINLEITUNG

Thermischem Komfort wird heutzutage bereits in frühen Planungsphasen eine sehr große Rolle beigemessen. Dabei ist es von großer Bedeutung, frühzeitig alle physikalisch auftretenden Effekte zu berücksichtigen, wobei lokalen Gegebenheiten, wie beispielsweise in Abschnitt 6 der EN ISO 7730 (2005) beschrieben, besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden sollte.

Die Indizes PMV (predicted mean vote) sowie PPD (predicted percentage of dissatisfied) können nur ein globales Votum für den Körper als Ganzes ausdrücken (EN ISO 7730). Lokale thermische Unzufriedenheit kann allerdings auch aus Effekten auf einzelne Körperteile auftreten. Als Beispiele solch lokaler

Effekte können Strahlungsasymmetrie, Zugluft, ein vertikaler Lufttemperaturunterschied oder warme und kalte Fußböden genannt werden.

Dieser Beitrag befasst sich mit der Simulation von lokalen Strahlungstemperaturasymmetrien als Aspekt der lokalen thermischen Behaglichkeitsbewertung in Innenräumen. EN ISO 7730 erläutert, dass vor allem asymmetrische Wärmestrahlung durch warme Decken und kalte Wände oder Fenster als unangenehm empfunden wird. Die Norm liefert Auswertungsschemata, um den Prozentsatz unzufriedener Personen anhand der asymmetrischen Strahlungstemperaturdifferenz zu bestimmen. Allerdings ist die korrekte Bestimmung dieser Differenz nicht trivial, da viele Faktoren eine Rolle spielen.

Im Beitrag wird eine Methodik vorgestellt, diese Temperaturdifferenzen effizient anhand eines Geometrie-basierten Simulationsmodells zu bestimmen und die Auswertung geometrisch im Bezug auf den Ausgangsraum darzustellen. Als Simulationsgrundlage wird eine ganzjährige zonale Gebäudesimulation genutzt, wie sie in Clarke (2001) oder van Treeck (2010) vorgestellt wurde. Damit ist es möglich, die Strahlungstemperaturasymmetrie zu jedem Zeitpunkt an jedem Ort im Raum zu berechnen und anhand der Auswertungsmethoden der EN ISO 7730 quantitativ zu bewerten.

SIMULATION

Zonale Gebäudesimulation

Grundlage der Berechnung bietet eine thermische Gebäudesimulation, wie in Clarke (2001) und van Treeck (2010) vorgeschlagen. Hierzu wird ein Gebäudemodell geometrisch modelliert. Die numerische Diskretisierung basiert auf einem Finiten-Volumen-Ansatz und ermöglicht den Zugriff auf sämtliche Raum- und Wandtemperaturen. Detaillierte Wetterdaten liefern Angaben bezüglich Außentemperatur, Windgeschwindigkeit, Bedeckungsgrad und direkter sowie diffuser Strahlungsintensität über ein ganzes Jahr. Ein Raytracing-Verfahren zur Strahlverfolgung sorgt für eine korrekte Verteilung der direkten kurzwelligen Solarstrahlung im Raum. Mithilfe eines Radiosity-Verfahrens wird die langwellige thermische Strahlung, die von den Wänden emittiert wird, auf

alle anderen „sichtbaren“ Objekte im Raum verteilt. Die kurzwellige diffuse Solarstrahlung wird ebenfalls nach diesem Prinzip innerhalb des Raumes verteilt. Da die langwellige Strahlungsberechnung direkt von den Oberflächentemperaturen abhängt, müssen interne Iterationsschritte durchgeführt werden, um eine Konvergenz des gesamten Verfahrens sicherzustellen. Dementsprechend sind nach einer Konvergenz der Lösung zu jedem Zeitschritt die Oberflächentemperaturen bekannt, womit die Bestimmung der Strahlungstemperaturasymmetrie in einer Nachlaufrechnung erfolgen kann.

Ausgangsdaten

Ausgangsdaten für eine Simulation bildet der in der VDI 6020 (2001) beschriebene Testraum (Variante „schwer“), mit dem ebenfalls das benutzte zonale Gebäudesimulationsmodell in van Treeck et al. (2009a) validiert wurde.

METHODE

Beschreibung

Die Strahlungstemperaturasymmetrie Δt_{pr} wird in Abschnitt 6.5 der EN ISO 7730 benutzt, um einen Prozentsatz an Unzufriedenen bei bestimmten Konstellationen abzuschätzen. In EN ISO 13731 wird die Asymmetrie der Strahlungstemperatur in Abschnitt 2.87 als „Differenz zwischen den Flächenstrahlungstemperaturen von zwei diametralen Seiten eines kleinen Flächenelementes“ definiert. Die Flächenstrahlungstemperatur ist in Absatz 2.77 definiert als die „gleichmäßige Temperatur eines Raumes, in dem der einfallende Strahlungsfluss auf der einen Seite eines kleinen Flächenelementes mit dem der vorhandenen Umgebung identisch ist“.

Diese Definitionen helfen noch nicht besonders bei der eigentlichen Berechnung der Strahlungstemperaturasymmetrie. Glück (1982) schlägt vor, eine Berechnung des Strahlungsaustausches mit einem kleinen Quader an einem Auswertepunkt zu berechnen und anschließend den Quader um 45° zu drehen sowie eine erneute Berechnung auszuführen. Die Höhe auf der diese Untersuchung durchgeführt werden soll, beträgt 1,3 m für sitzende und 1,7 m für stehende Personen. Recknagel (2009) schlägt vor, diese Höhe auf 0,6 m für sitzende und 1,1 m für stehende Personen festzulegen.

Um die Berechnung der Strahlungsasymmetrie nicht zu jedem Zeitpunkt zweimal ausführen zu müssen, wird ein spezielles geometrisches Objekt benutzt, das in Abb. 1 zu sehen ist, und sämtliche Daten bei einem einzigen Simulationsdurchlauf liefern kann. Die Grundform besteht aus einem Achteck, das aus der Vereinigung eines Quaders mit einem um 45° gedrehten Quader erzeugt wird. Zusätzlich befindet sich noch jeweils ein Dreieck nach oben und nach

unten ausgerichtet an der Geometrie, um die Asymmetrien zwischen Decke und Fußboden ebenfalls zu bestimmen.

Wie in Abb. 1 zu sehen ist, muss das Objekt weder geschlossen, noch vollständig sein. Wichtig beim geometrischen Aufbau ist lediglich, dass sämtliche Normalenvektoren der Seitenflächen nach außen, des oberen Dreiecks nach oben, sowie des unteren Dreiecks nach unten zeigen. Diese Ausrichtung wird bei der Berechnung der geometrischen Strahlungsformfaktoren (view factor) benötigt. Eine effiziente Methode zur Berechnung der Strahlungsformfaktoren inklusive Algorithmen ist in Walton (2002) gegeben und wurde für diese Arbeit benutzt.

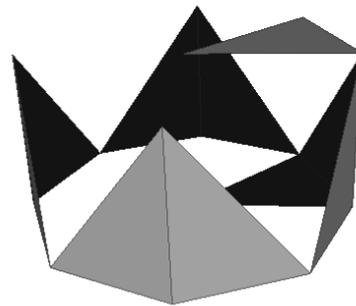


Abbildung 1: Geometrisches Objekt zur Strahlungstemperaturasymmetriestimmung

Für jeden auszuwertenden Punkt müssen dementsprechend unterschiedliche Strahlungsformfaktoren zwischen sämtlichen Raumboflächen und den Oberflächen des geometrischen Testobjektes berechnet werden. Je nach Anzahl der Auswertungspunkte kann dies sehr zeitaufwändig werden und die Rechenleistung reduzieren.

Für den Fall, dass sich die Geometrie während der Simulation nicht ändert, kann die Leistung jedoch deutlich erhöht werden, indem die Berechnung in zwei Teile aufgespalten wird. In einem ersten Teil werden sämtliche Strahlungsformfaktoren im Gesamttraum, inklusive geometrischem Testobjekt, berechnet. Allerdings werden für eine Auswertung nur diejenigen Formfaktoren benötigt, die das geometrische Testobjekt beinhalten. Die Sichtbarkeitsfaktoren zwischen Wänden und Decken etc. werden für die Strahlungsasymmetrie nicht benötigt und werden aus Effizienzgründen auch nicht abgespeichert (vergleiche ebenfalls Abb. 2). Dieser eben beschriebene, zeitaufwändige Teil läuft nur einmal in einer Preprocessing-Phase und wirkt sich in der anschließenden Berechnungsphase nicht auf die Leistung aus. In der eigentlichen Berechnungsphase werden dann lediglich die ermittelten Wärmeströme und Wandtemperaturen eingesetzt. Somit erhält man die zehn unbekanntenen Oberflächentemperaturen des geometrischen Testobjektes.

Oberflächentemperatur des Testobjektes

Die detaillierte Berechnung mittels der Radiosity-Methode ist in Modest (2003) ausführlich beschrieben. Hier werden lediglich die Grundgleichungen erläutert, um die Vorgehensweise zu verdeutlichen. Im Folgenden wird das geometrische Testobjekt an einen Punkt im Raum gesetzt, in dem die Temperatursymmetrie bestimmt werden soll.

Wird das Grundgleichungssystem der Radiosity-Methode umgeformt, so gilt

$$\frac{q_i}{\varepsilon_i} - \sum_{j=1}^n \left[\left(\frac{1}{\varepsilon_j} - 1 \right) q_j F_{ij} \right] = \sum_{j=1}^n [(E_{b,i} - E_{b,j}) F_{ij}] \quad (1)$$

wobei q_i und q_j , $i, j \in [1; n]$ die vorzeichenbehaftete Wärmestrahlung der Flächen i und j darstellen, ε_i und ε_j die Emissionskoeffizienten der Flächen beziffern, F_{ij} den Strahlungsformfaktor zwischen Fläche i und Fläche j darstellt und $E_{b,i}$ und $E_{b,j}$ die Schwarzkörper-eigenstrahlung der entsprechenden Fläche ausdrückt, für die gilt

$$E_{b,i} = \sigma \cdot T_i^4 \quad (2)$$

mit $\sigma = 5,670 \cdot 10^8 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$ als Stefan-Boltzmann Konstante und T_i als der Oberflächentemperatur der Fläche i .

		j	
		1	n_{obj}
1	1	geom. Objekt	Sichtbarkeit geom. Objekt -- Raum
n_{obj}	n_{obj}		
i	i		Sichtbarkeit Raum -- Raum
n	n		

Abbildung 2: Blöcke der Formfaktormatrix. Im oberen linken Block stehen ausschließlich Nullen, da sich die Flächen des geometrischen Testobjektes nicht gegenseitig sehen. Der benötigte (und gespeicherte Block) befindet sich oben rechts, und beinhaltet die Sichtbarkeitsinformationen zwischen geometrischem Objekt und dem Raum an sich.

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, soll das geometrische Testobjekt über zehn Flächen verfügen ($n_{obj} = 10$), die in der Berechnungsmatrix die Indizes 1 bis n_{obj} einnehmen sollen. Die restlichen Flächen des Berechnungsraumes folgen auf den Plätzen $n_{obj} + 1$ bis $n = n_{Raum} + n_{obj}$. Diese Anordnung ist für den folgenden Ablauf von Bedeutung. Die vollstän-

dig gespeicherte Matrix der Formfaktoren besitzt dann die Form, die in Abb. 2 dargestellt ist.

Per Definition ist das Testobjekt im Raum als Beobachter angeordnet und nimmt somit nicht am Strahlungsaustausch teil. Weiterhin sollen die Emissionskoeffizienten der Testflächen auf 1 gesetzt werden.

$$q_i \equiv 0 \quad \varepsilon_i \equiv 1 \quad \forall i \in [1; n_{obj}] \quad (3)$$

Formt man die Grundgleichung (1) nach diesen Maßgaben um und setzt die Formel für die Schwarzkörperstrahlung (2) ein, so ergibt sich folgende Form des Gleichungssystems

$$T_i = \left(\frac{1}{\sigma} \sum_{j=n_{obj}+1}^n \left\{ F_{ij} \left[\sigma T_j^4 - \left(\frac{1}{\varepsilon_j} - 1 \right) q_j \right] \right\} \right)^{1/4} \quad (4)$$

wobei lediglich für i die ersten n_{obj} Werte berechnet werden müssen und für j die ersten n_{obj} Werte nicht berücksichtigt zu werden brauchen, da F_{ij} dort Null ist (vergleiche Abb. 2).

Wurden die Formfaktoren, für die die Eigenschaft

$$\sum_{j=1}^n F_{ij} = 1 \quad (5)$$

gilt, berechnet und sind die Wärmeströme q_j sowie die Oberflächentemperaturen T_j des Raumes ($j = n_{obj} + 1$ bis n) aus der zonalen Simulation bekannt, so existieren keine Unbekannten mehr in dieser Gleichung und die Temperaturen können berechnet werden.

Auswertung

Sind die Oberflächentemperaturen des Testobjektes bekannt, so kann durch einfache Differenz der entsprechenden gegenüberliegenden Flächentemperaturen – wie in der Norm beschrieben – eine Strahlungstemperatursymmetrie berechnet werden.

Es gibt nun mehrere Möglichkeiten. Entweder wird zwischen der Strahlungsasymmetrie von Decke zu Boden eine Differenz gebildet und gesondert angegeben und ein Maximalwert aus den restlichen Asymmetrien ermittelt, oder es wird ein Maximalwert aller Strahlungsasymmetrien gebildet und ausgewertet.

Bemerkungen

Wie aus dem Berechnungsteil ersichtlich ist, ist die Bestimmung der Strahlungsasymmetrien nicht an ein spezielles Modell zur Simulation gekoppelt. Diese Tatsache ist unter anderem von den Autoren dazu benutzt worden, um anhand bestehender Simulationsergebnisse eines kommerziellen Programms Strahlungstemperatursymmetrien zu bestimmen.

Werden von den bestehenden Simulationsprogrammen die Oberflächenwärmeströme q_i , die zu den gegebenen Oberflächentemperaturen T_i führen, nicht

mit angegeben, so müssen in einem vorherigen Schritt die Grundgleichungen der Radiosity-Methode für den Raum an sich (d. h. ohne geometrisches Testobjekt) gelöst werden, um die unbekanntes Wärmeströme zu bestimmen, die als Eingangsgröße für die Berechnung der Temperaturasymmetrien benötigt werden.

ERGEBNISSE

Simulationsgrundlagen

Folgende Berechnungen wurden mit einem zonalen Simulationsmodell durchgeführt, das am Lehrstuhl für Computation in Engineering der Technischen Universität München entwickelt und bereits in van Treeck et al. (2009a) anhand des VDI 6020 (2001) Testraumes validiert wurde. Wie bereits oben bemerkt, können auch andere Simulationsprogramme als Grundlage für eine thermische Komfortbewertung dienen.

Sämtliche Wände des VDI Testraumes in der Variante „schwer“ sind adiabatisch angeschlossen; es findet demnach kein Wärmeaustausch mit der Umgebung statt. Ausnahme bildet hier die vordere Wand, die gut gegen die Außenwelt isoliert ist sowie das fast raumgroße Fenster in dieser Wand.

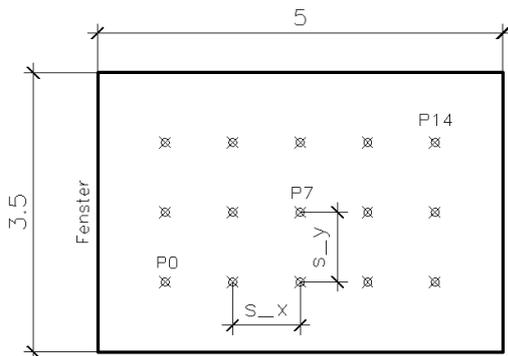


Abbildung 3: Definition der Rasterabstände s_x und s_y anhand der Rasterdiskretisierungen zur Berechnung der Asymmetrie im VDI 6020 Testraum.

Grundlage der Bestimmung der Strahlungstemperaturasymmetrie ist das Beispiel 13 mit Ausnahme der Simulationszeit. Hier wird der 11. August gewählt, für den die TRY5-Wetterdaten¹ einen besonders strahlungsintensiven Tag bereitstellen. Dort werden Untersuchungen zu mehreren Tageszeiten (8h, 12h, 20h, etc) mit unterschiedlichen Rasterdiskretisierung a_x und a_y zur Positionierung des geometrischen Testobjektes (siehe Abb. 3) sowie unterschiedlicher Größe r des Testobjektes an sich, durchgeführt. Dabei befindet sich die z -Ebene der berechneten Strahlungstemperaturasymmetrien auf 1,1 m über dem Boden,

¹ TRY5 : Wetterdaten als Testreferenzjahr für die Zone Würzburg; diese Wetterdaten bilden die Grundlage für die Validierungen in der VDI 6020 (2001)

als Kompromiss zwischen Glück (1982) und Recknagel (2009) für dieses Beispiel.

Berechnungen

Die Berechnungen mit unterschiedlichen Rasterabständen ergeben nur Werte zu Temperaturasymmetrien an diskreten Stellen. Zur besseren Darstellung wurden die Werte zwischen den Punkten für die Visualisierung mit Hilfe der VTK-Bibliotheken² interpoliert und auf einem triangulierten Gitter farblich dargestellt.

Aus Übersichtsgründen werden hier nur Ergebnisse der Strahlungsasymmetriedifferenz zwischen Boden und Decke für 12 Uhr mittags am 11. August dargestellt. Bei den in Abb. 4a–c gezeigten Ergebnissen handelt es sich um jeweils unterschiedliche Diskretisierungen.

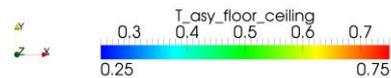
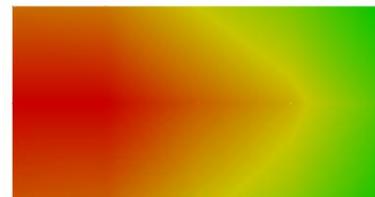


Abbildung 4a: Strahlungsasymmetrie zwischen Decke und Boden um 12 Uhr mittags am 11. August mit der Diskretisierung 5×3 .

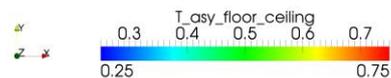
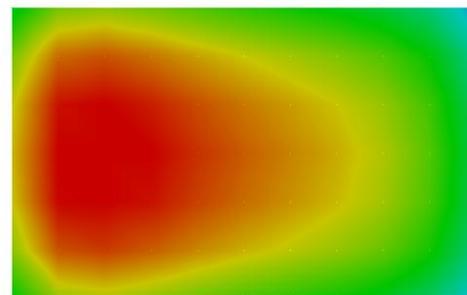


Abbildung 4b: Strahlungsasymmetrie zwischen Decke und Boden um 12 Uhr mittags am 11. August mit der Diskretisierung 11×7 .

² VTK - The Visualization Toolkit - www.vtk.org

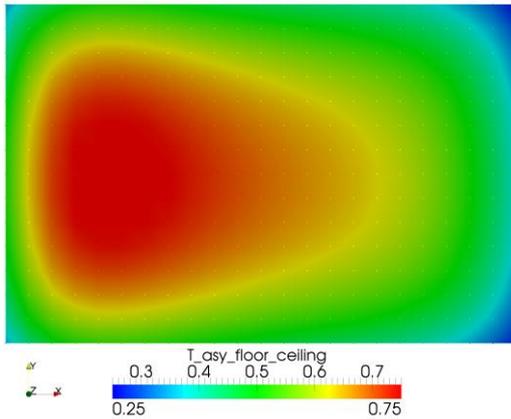


Abbildung 4c: Strahlungsasymmetrie zwischen Decke und Boden um 12 Uhr mittags am 11. August mit der Diskretisierung 23 x 15.

Für drei unterschiedliche Diskretisierungen in Abb. 4a–c wurde jeweils mit einem fiktiven Radius (siehe Abschnitt zu den Konvergenzstudien) des geometrischen Testobjektes vom 10 cm die Strahlungstemperaturasymmetrie zwischen Decke und Boden berechnet. Für alle drei Bilder sind die Farbskalen (von 0,25 bis 0,75 °C) und die geometrische Skalierung identisch. Die unterschiedliche Größe des dargestellten Gebietes liegt an der gewählten Art der Visualisierung an sich. Der Raum wird prinzipiell in a_x+1 und a_y+1 Bereiche unterteilt. Da allerdings an den Rändern die Berechnung der Sichtbarkeitsfaktoren erhebliche Schwierigkeiten bereitet, wurden nur innere Werte berechnet. Bei der gewählten Diskretisierung sind die Punkte allerdings deckungsgleich; es werden lediglich zusätzliche innere Punkte ausgewertet. Aus Abb. 4 ist zu erkennen, dass, um ein gutes Gesamtbild der Verteilung der Strahlungsasymmetrie zu bekommen, einige Auswertungspunkte nötig sind. Die Berechnungs- und Simulationszeit hängt allerdings ebenfalls stark von der Anzahl der gewählten Auswertungspunkte ab.

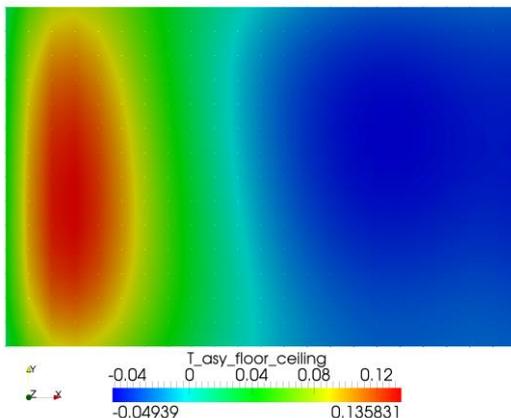


Abbildung 5a: Strahlungsasymmetrie zwischen Decke und Boden um 8 Uhr vormittags am 11. August mit der Diskretisierung 23 x 15.

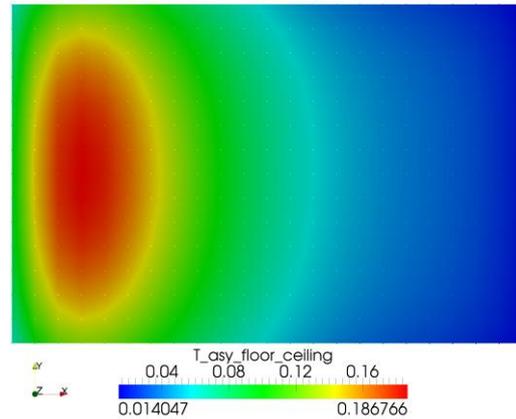


Abbildung 5b: Strahlungsasymmetrie zwischen Decke und Boden um 20 Uhr abends am 11. August mit der Diskretisierung 23 x 15.

Prinzipiell werden für einen guten Raumüberblick viele Auswertepunkte benötigt; für einen bestimmten Punkt reicht es aber aus, nur diesen zu berechnen.

Abb. 5a–b zeigt für die gleiche Diskretisierung die Strahlungstemperaturasymmetrie zwischen Boden und Decke um 8 Uhr vormittags (a) und um 20 Uhr abends (b). Hierbei ist auf unterschiedliche Farbskalen für die Temperaturverteilung zu achten, die aus Übersichtlichkeitsgründen in beiden Bildern unterschiedlich zu Abb. 4c gewählt worden sind.

Konvergenzstudien

Betrachtet man nun einen Punkt im VDI Testraum, und berechnet die Strahlungsasymmetrie zwischen Boden und Decke mit unterschiedlichen Größen des geometrischen Testobjektes, so ist zu beobachten, dass unterschiedliche Größen des geometrischen Testobjektes zu unterschiedlichen Temperaturdifferenzen führen. Dies ist vor allem durch die Berechnung der Sichtbarkeitsfaktoren zu erklären. Um den Einfluss sowie die Sensitivität dieses Faktors abzuschätzen wurden Konvergenzstudien des Parameters r der Testobjektgröße zu der Temperatur an drei definierten Stellen im Raum durchgeführt. Der in Abb. 6 benannte Punkt 0 befindet sich nahe am Fenster, Punkt 7 befindet sich in Raummitte und Punkt 14 befindet sich diagonal zu Punkt 0 sehr weit hinten im Raum (siehe ebenfalls Abb. 3). Als Testzeitpunkt wurde 8 Uhr morgens des 11. Augusts im Testreferenzjahr gewählt. Alle anderen Parameter entsprechen den gleichen Einstellungen wie im vorherigen Punkt genannt.

Aus den Auswertungen der Berechnung, die in Abb. 6 dargestellt sind, ist zu erkennen, dass der fiktive Radius des geometrischen Testobjektes eine große Rolle spielen kann, vor allem in Bereichen, in denen direkte Strahlung vorhanden ist, also nahe dem Fenster. Der fiktive Radius wird in diesem Falle ausgehend vom Mittelpunkt des Achtecks zu allen Ecken hin bemessen.

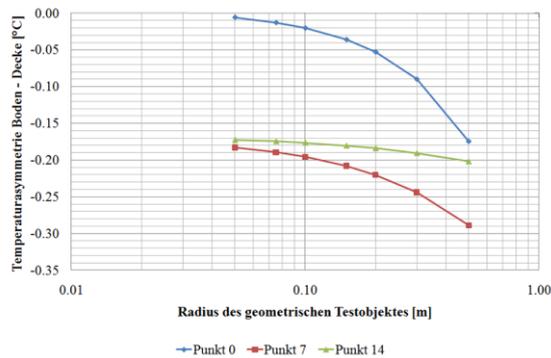


Abbildung 6: Konvergenzverhalten bei unterschiedlichem Radius des geometrischen Testobjektes zur Berechnung der Strahlungstemperatursymmetrie zwischen Boden und Decke an drei ausgewählten Punkten.

Es ist zu erkennen, dass vor allem im Fensterbereich ein Radius vom 10 cm nicht überschritten werden sollte. Andererseits sollte der Radius auch nicht zu klein gewählt werden, da es ansonsten zu Problemen mit der Berechnung der Sichtbarkeitsfaktoren kommen kann, falls der Unterschied in der Größe der Wandflächen zu den Flächen des Testobjektes zu groß gewählt wird.

Da der Raum mit 3,5 m auf 5,0 m dimensioniert ist, suggeriert dieses Konvergenzbeispiel den fiktiven Radius des geometrischen Testobjektes nicht über 3% der kleinsten Raumausdehnung zu wählen. Hier wären allerdings noch detailliertere Studien bezüglich Konvergenzverhalten mit unterschiedlichen Raumgeometrien erforderlich. Es wird daher an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass, falls dieses Verfahren eingesetzt wird, ein spezielles Augenmerk auf die Wahl der Größe des geometrischen Testobjektes gelegt werden sollte.

ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Beitrag wurde eine Methode vorgestellt, um die Strahlungstemperatursymmetrien simulationstechnisch zu erfassen und zu berechnen. Die Ergebnisse können anschließend anhand der EN ISO 7730 bewertet werden und liefern ein objektives Maß, um den thermischen Komfort bezüglich des Faktors der lokalen thermischen Strahlungsymmetrie zu bewerten. Die Berechnung kann unabhängig vom Simulationsprogramm durchgeführt werden, so lange alle benötigten Oberflächentemperaturen zur Verfügung gestellt werden können. Weiterhin sollten weitergehende Untersuchungen bezüglich Wahl der Größe des Testobjektes angestellt werden, um unterschiedlichen Raumgeometrien zu testen und zu bewerten.

REFERENZEN

- Clarke, J. (2001). Energy simulation in building design, Butterworth-Heinemann.
- EN ISO 7730 (2005). Ergonomie des Umgebungs-klimas – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit. Beuth Verlag.
- EN ISO 13731 (2001). Ergonomie des Umgebungs-klimas – Begriffe und Symbole. Beuth Verlag.
- Glück, B. (1982). Strahlungsheizung – Theorie und Praxis, Müller Verlag Karlsruhe.
- Modest, M.F. (2003). Radiative Heat Transfer. Academic Press, USA, 2nd edition.
- Recknagel, H. (2009). Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, Oldenburg Industrieverlag München.
- van Treeck, C., Frisch, J., Egger, M., and Rank, E. (2009a) Model-adaptive analysis of indoor thermal comfort. In Building Simulation 2009, Glasgow, Scotland.
- van Treeck, C., Frisch J., Pfaffinger, M., Rank, E., Paulke, S., Schweinfurth, I., Schwab, R., Hellwig, R., Holm A. (2009b). Integrated thermal comfort analysis using a parametric manikin model for interactive real-time simulation, Journal for Building Performance Simulation, Volume 2, Issue 4, Pages 233 – 250, Taylor and Francis.
- van Treeck, C. (2010). Introduction to Building Performance Simulation, Habilitation Thesis, Technische Universität München.
- VDI 6020 (2001). Anforderungen an Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation – Teil 1 – Gebäudesimulation, Beuth Verlag.
- Walton, G.N. (2002). Calculation of obstructed view factors by adaptive integration. NISTIR 6925, National Institute of Standards and Technology (NIST)

AUSWIRKUNGEN DER BEWERTUNG DES THERMISCHEN KOMFORTS IM SOMMER NACH EN 15251 AUF DIE BEKANNTEN REGELN ZUR OPTIMIERUNG DES SOMMERLICHEN WÄRMESCHUTZES

Lydia Ax Dipl.-Ing.¹, Udo Dietrich Prof. Dr. rer. nat.², ¹HafenCity Universität Hamburg,
 Hamburg, Deutschland, Research Group REAP, lydia.ax@hcu-hamburg.de,

Themen: Thermischer Komfort in Räumen¹, Thermisches Verhalten im Sommer, natürliche Lüftungskonzepte²

KURZFASSUNG

Ein Gebäude muss heute vielen Ansprüchen genügen. Der Nutzer möchte sich wohlfühlen, Architekten und Immobilienmarkt fordern ein marketingwirksames äußeres Erscheinungsbild. Zunehmend wichtiger werden also nachhaltig anerkannte Gebäudelabel wie DGNB oder die Komfortbewertung nach neuen Standards wie EN 15251. Die Richtlinie B12-8132.1/0 (2008) des deutschen Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung verlangt für alle künftigen bundeseigenen Gebäude, dass sie natürlich belüftet sind („Typ Alpha“, vgl. Abb.1), der thermische Komfort im Sommer ist nach EN 15251 (Komfortklassen I bis III) zu bewerten. Ziel ist ein Erreichen der Komfortklasse II bei maximal 5% Überschreitungsstunden. Es ist zu erwarten, dass dieser Standard in naher Zukunft Bestandteil der Energieeinsparverordnung (EnEV) und damit verbindlich für alle Neubauten in Deutschland sein wird.

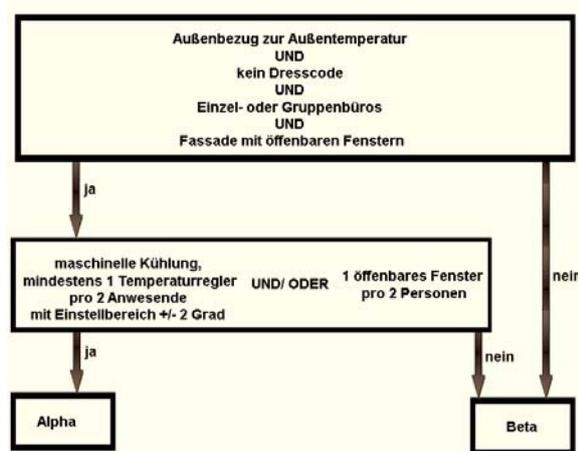


Abb.1 Entscheidungsbaum für Typ Alpha abgeleitet aus der Richtlinie B12-8132.1/0 (2008) des deutschen Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung

Mit Hilfe dynamischer Simulationen von Standardbüros ist untersucht worden, welche

Eigenschaften diese haben müssten, um der Richtlinie des Bundes gerecht zu werden.

Parallel wurde in einem begleitenden Kurs mit Studierenden im Master-Architektur untersucht, welche Chancen bestehen, solche Gebäude vom Typ Alpha zeitgemäß und marktgerecht zu gestalten. Die Ergebnisse geben Anlass zu berechtigter Hoffnung.

ABSTRACT

Today a building must meet many claims. The user would like to feel comfortable, architects and property market demand a marketing-effective external appearance. Increasingly more importantly become approved building labels like DGNB or the comfort assessment to new standards like EN 15251. A guide line B12-8132.1 / 0 (2008) of the German Federal Ministry of traffic, construction and urban development requires for all future buildings belonging to German federation that they are ventilated naturally („type Alpha“,fig.1), the thermal comfort in summer is to be valued to EN 15251 (comfort classes from I to III). Aim is an achievement of the comfort class II with maximum 5% of excess hours. It is to be expected that this standard will be a component of the energy saving order (EnEV) and with it obligingly for all new buildings in Germany in the near future.

With the help of dynamic simulations of standard offices has been examined which qualities they should have to meet the guide line of the German federation.

At the same time it was examined in an accompanying course with master-students of architecture which chances exist to form such buildings of the “type Alpha” contemporary and in line with market requirements. The results give occasion for entitled hope.

SIMULATIONEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER KOMFORTKRITERIEN NACH EN 15251

Zentrales Element der sommerlichen Komfortbewertung für Typ Alpha-Gebäude nach EN 15251 ist die aus Nutzerbefragungen abgeleitete Erkenntnis, dass die im Raum gewünschte

Komforttemperatur (geringfügig) mit der Außentemperatur variiert. An heißen Tagen ist in einem natürlich belüfteten Gebäude die vom Nutzer als am komfortabelsten empfundene Innentemperatur demnach auch etwas höher. Im Input der bekannten Simulationsprogramme ist dieser Zusammenhang bisher noch nicht integriert, vielmehr wird meist mit festen Komforttemperaturen (Heiz- und Kühlgrenze) gerechnet.

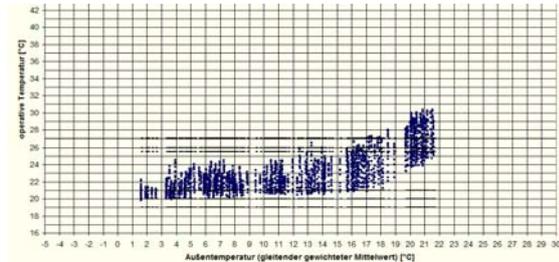


Abb. 2 Beispiel „veraltete“ Auswertung Simulationsprogramm – feste Komforttemperatur

Zur Bewertung nach EN 15251 wurde deshalb eine abgewandelte Auswertung der Daten in Excel entwickelt, die die fehlenden Informationen aus dem verfügbaren Output der thermischen Simulation erzeugt.

Das Erwartungsmodell der EN 15251(2007) geht davon aus, dass sich Wohlbefinden dann einstellt, wenn das Klima der Umgebung den Erwartungen der Nutzer entspricht. Unter der Voraussetzung, den thermischen Komfort selbst einstellen zu können, werden also im Sommer höhere und im Winter niedrigere Raumtemperaturen als angenehm empfunden (Adaption). Das Selbsteinstellen des thermischen Komforts wird z.B. über öffnbare Fenster, manuell einstellbaren Sonnenschutz und einer manuell geregelten Kühlung erreicht.

Abbildung 3, 4 und 5 zeigen die Auswertung mit dem „neuen“ Werkzeug adaptiver Komforttemperaturen nach EN 15251 eines natürlich belüfteten Standard Büroraumes. Die Orange-Roten Linien zeigen Komfortgrenzen (innere für die Klasse I, mittlere für die Klasse II und äußere für die Klasse III). Die Punkte sind stündliche Werte (Nutzungszeiten während eines Jahres), sie zeigen die simulierten Innentemperaturen in Bezug auf die Außentemperaturen. Mit weniger als 5% Überschreitungsstunden der Jährlichen Nutzungsdauer wird hier die Komfortklasse I erreicht.

Die Simulationen wurden mit dem Gebäudesimulationsprogramm TRNSYS durchgeführt.

Die Eingabeparameter bzw. Annahmen für die Raumgeometrie des Standardbüros sind:

- Abmessungen: B 3.95m x L 5,93m/ H 2,70m
- Fenster: Orientierung nach Süden, Sonnenschutzverglasung $g=0.60$, Fensterbrüstung $H= 0.80m$, horizontale Fensterteilung: Öffnungsflügel ab Brüstung 1,30m, Oberlicht 0.60cm
- Massive Bauweise, Innenwände Gipskarton Leichtbauwände
- Verschattungssystem: für Öffnungsflügel und Oberlicht getrennt, Öffnungsflügel $F_c=0,25$ Jalousie mit variablen Lamellen für einen hohen Nutzerkomfort, Oberlicht $F_c=0.40$ mit horizontalen Lamellen für eine optimale Tageslichtversorgung. Die Jalousien sind bei direkter Sonneneinstrahlung heruntergefahren.
- Personenbelegung: 2 Personen



Abb. 3 Standardbüro zur Simulation

SIMULATIONSERGEBNISSE

Ein überraschendes (aber letztendlich triviales) Ergebnis ist, dass sich die bekannten Regeln zur Optimierung von Gebäuden für den sommerlichen Wärmeschutz in ihrer Gewichtung verändern, je nach dem eingesetzten Komfortkriterium. Setzt man in der Bewertung nach EN 15251 die Außentemperatur (Sommerklimaerregion B, Testreferenzjahr Hamburg) als Innentemperatur an, resultiert Komfortklasse I.

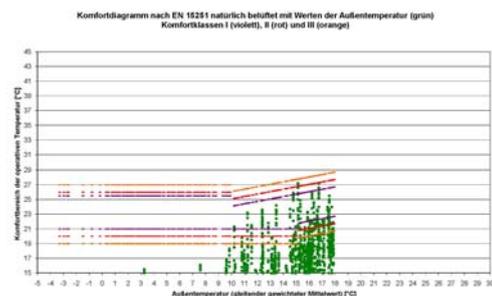


Abb. 4 Auswertung mit „neuem“ Werkzeug – adaptive Komforttemperatur nach EN 15251

Sommerklimaregion B, Testreferenzjahr Hamburg

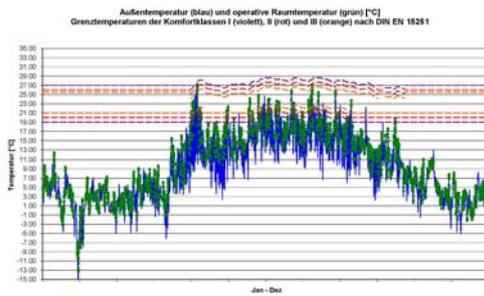


Abb. 5 dasselbe Simulationsbeispiel wie in Abb.4+6, hier kann abgelesen werden in welchem Zeitraum des Jahres sich die Überschreitungsstunden befinden

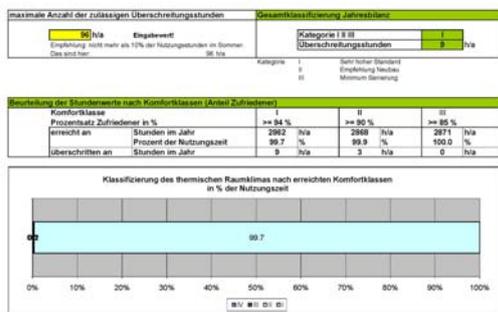


Abb. 6 dasselbe Simulationsbeispiel wie in Abb.4+5, Ergebnis Komfortklasse I mit neun Überschreitungsstunden

Daran ändert sich selbst bei der in der Bundesrichtlinie angegebenen Erhöhung der Temperatur um 2K zur Erfassung heißer Sommer (Klimawandel) nichts - eine Wirkung der Verknüpfung Außen- und Innentemperatur.

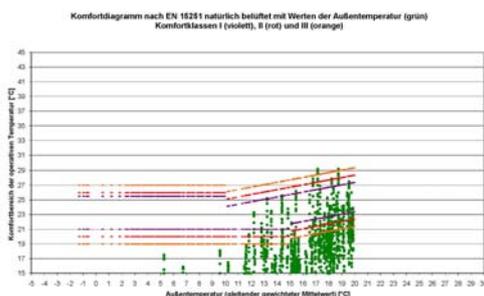


Abb. 7 dasselbe Simulationsbeispiel wie in Abb. 4,5 und 6, allerdings mit 2K Erhöhung der Temperatur laut Bundesrichtlinie, Komfortklasse I mit 31 Überschreitungsstunden

Erreicht werden kann dieser Zustand sehr einfach durch eine hohe Lüftung tagsüber, während der Nutzungszeit, die damit zum zentralen Kriterium wird. In ihrer Bedeutung verringert dagegen sehen sich die Kriterien erhöhte Nachtlüftung,

Speichermasse, Abminderungswirkung der Verschattung.

Auch wenn erfahrungsgemäß die heißen Sommer relativ windstill sind und Tischventilatoren im Sommer oft als angenehm empfunden werden, darf man die Auswirkung einer Querlüftung im Planungsprozess nicht ungeachtet lassen. Wird mit einer hohen natürlichen Lüftung tagsüber geplant, so müssen die Lüftungsöffnungen so platziert werden, das keine Zugerscheinungen entstehen. Planungsbeispiele hierfür finden sich in Abb. 16 + 17 der studentischen Arbeiten.

STUDENTISCHE ARBEITEN - KOMFORTORIENTIERTER ENTWURFSPROZESS

In einem von 4 angebotenen Wahlfächern für Masterstudenten im 1. Semester, im Fachbereich „Konstruktion + Technik“ an der HafenCity Universität in Hamburg, wurde eine Entwurfsmethodik eingesetzt und erprobt, die in einer sinnvollen Reihenfolge die Detaillierungsstufen des Entwurfes mit den damit im Zusammenhang stehenden Komfortkriterien verbindet. Ungefähr 1/5 der Masterstudenten fanden Interesse an diesem Kurs. Die studentischen Ergebnisse sind hier zusammengetragen.

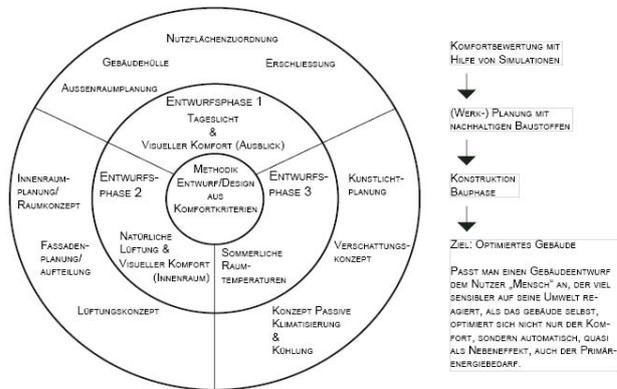


Abb. 8 Systemskizze möglicher Entwurfsprozess nach Komfortkriterien

Für den Entwurf eines Verwaltungsgebäudes aus Komfortkriterien wird die bekannte Entwurfsmethodik auf den Kopf gestellt. Der Entwurfsprozess findet komfortorientiert statt. Tageslicht, natürliche Lüftung, Visueller Komfort und sommerlicher Wärmeschutz bestimmen das Ergebnis entscheidend. Baukonstruktion und Statik wurden nicht betrachtet, der Entwurf sollte natürlich dahingehend trotzdem sinnvoll sein. Die einzelnen Komfortkriterien wurden in zwei Kurzpräsentationen

erarbeitet. In einer Abschlusspräsentation wurde das daraus entstandene Gebäude abschließend betrachtet. Für die erste Präsentation sollten zwei bis drei möglichst verschiedene Gebäudevarianten entworfen werden. Die Varianten sollten auf Ihre Tauglichkeit im Hinblick auf die Tageslichtversorgung und den Ausblick für die Arbeitsplätze analysiert werden. Es sollten Ateliers mit einem höheren Anspruch an Ausblick und Innenraumwirkung sowie Standardbüros geplant werden. Für die Analyse müssen die Nutzflächen grob zugeordnet sein und die Lage der Geschosse im Schnitt, sowie die Erschließungswege eingeplant sein. Es wurde mit drei Abstufungen der Tageslichtquotienten 5%; 2%; Kunstlicht geplant.

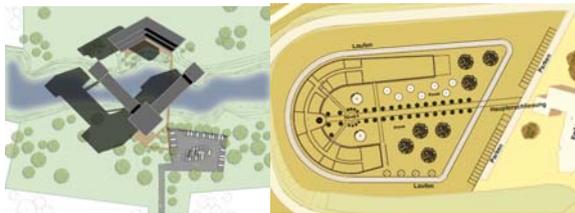


Abb.9 Gebäudeform und Erschließung lassen einen möglichen Ausblick schon erahnen, Ritter und Brandt(2010), Ratzmann (2010)

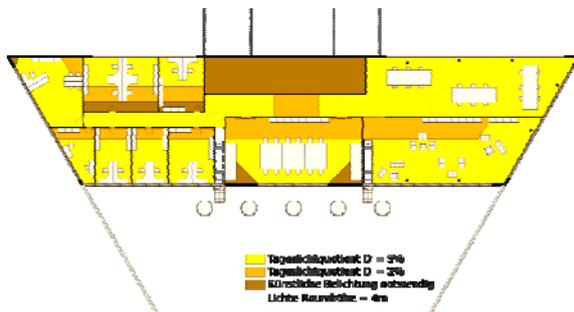


Abb.10 Analyse der Tageslichtversorgung, Odenwald und Sperling (2010)

Die Abbildungen. 9+10 sind Beispiele aus der ersten Entwurfsphase für Gebäudeform und Orientierung/ Tageslicht und möglichem Ausblick.

Für ein positives Komfortempfinden ist es wichtig, das der Mensch, der in diesem Gebäude wohl mehr als 40 Stunden pro Woche arbeitet, und überwiegend am selben Platz sitzt, einen interessanten Außenraumbezug hat. Ecken und Kanten, Materialwechsel aber auch die Aussicht auf minimalste Naturräume, z.B. den Wechsel der Jahreszeiten an einem Baum mit verfolgen zu können, wird als komfortabel empfunden und kann die Motivation und Arbeitsleistung beflügeln. Die Außenraumplanung war deshalb detailliert darzustellen, um den Ausblick des Gebäudenutzers erkennbar zu machen.

Nach der ersten Präsentation mussten sich die Studenten für eine der Varianten entscheiden. Diese wurde dann weiterbearbeitet.

Danach wurde mit der Planung der Innenräume und der Fassaden begonnen. Es sollten z.B. Ateliers, verschiedene Standardbürotypen (offene und geschlossene Bürostruktur), Konferenzräume, Erschließungsflächen und Versorgungsflächen zugeordnet werden. Die Lage der verschiedenen Räumlichkeiten in einem Verwaltungsgebäude sollte unter Berücksichtigung von Ausblick, Innenraumwirkung, Ausrichtung und Funktionalität entschieden werden.

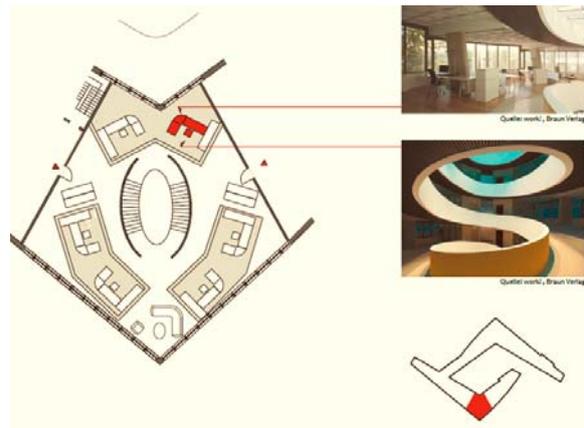


Abb. 11 Teilgrundriss Inneraumwirkung mit Beispielfotos, Danninger, Soltau und Hertel (2010)

Um die Idee zur Nutzung der Räumlichkeiten zu visualisieren wurden die Arbeitsplätze in einer typischen Lage im Gebäude unter dem Aspekt einer höheren und einer durchschnittlichen Ausstattung exemplarisch möbliert.

Die Standardbüros mit durchschnittlicher Ausstattung, die Großraumbüros mit leicht gehobener Ausstattung und die Ateliers mit Sondereinbauten und Ebenen übergreifender Nutzung, mit besonderen Blickbeziehungen zwischen den Arbeitsplätzen.



Abb. 12 Ateliers – Nutzung mit besonderen Blickbeziehungen und Sondereinbauten, Ritter und Brandt (2010)

Für den Ausblick sollte der Sonnenschutz flexibel geplant werden, z.B. mit im Winkel verstellbaren Lamellen oder mit verschiebbaren oder drehbaren Elementen.

Auch das Lüftungskonzept wird in der zweiten Entwurfsphase erarbeitet. Natürliche und

mechanische Lüftung werden im Grundriss den Räumlichkeiten zugeordnet. Im Schnitt müssen zusätzlich die Luftströme abgebildet werden.



Abb. 13 Ausblick bei geöffnetem und bei geschlossenem Sonnenschutz, Ritter und Brandt (2010)

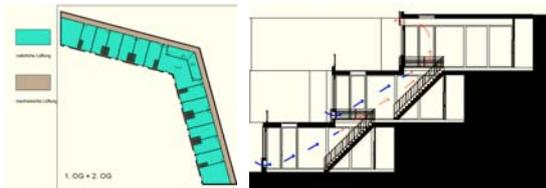


Abb. 14 Natürliches Belüftungskonzept, Ritter und Brandt (2010)

Für den Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes ist das Ziel bei der Endpräsentation des Entwurfs für den Neubau eines Verwaltungsgebäudes in Hamburg Gebäudeklasse II nach EN 15251 mit weniger als 5% Überschreitungsstunden der Jahresnutzungsstunden zu erreichen. Die Entwurf zur Detaillierung der Fassade steht in unmittelbarem Bezug zum Verschattungskonzept.

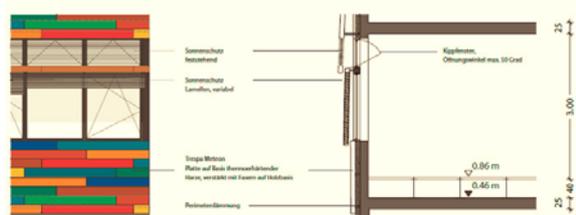


Abb. 15 Entwurfsphase 3 Sommerlicher Wärmeschutz und Fassadenplanung, Danninger, Soltau und Hertel (2010)

Bei der Planung einer Querlüftung tagsüber wurde in den Entwürfen der Studenten darauf geachtet, die Planung so auszurichten, dass Zugserscheinungen vermieden werden. Die Fensteraufteilung der Fassade wurde beispielsweise so geplant, dass die Öffnungsflügel nicht im Bereich der Arbeitsplätze liegen oder es wurden Lüftungsöffnungen fern der Arbeitsplätze geplant, die nicht der Tageslichtversorgung und dem Ausblick galten, sondern lediglich dem Zweck der Querlüftung dienen.

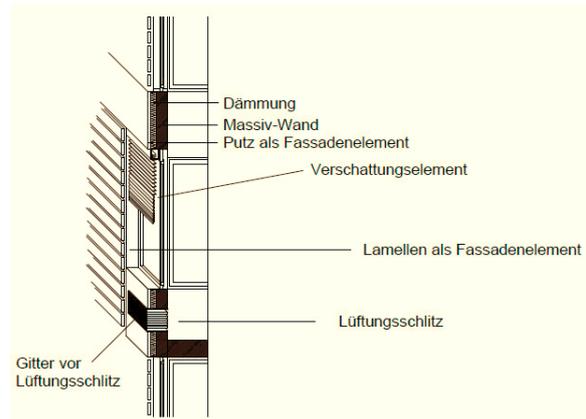


Abb. 16 Lüftungsschlitz horizontal in der Fassade - für die natürliche Lüftung mit Schalldämmung und Witterungs- und Einbruchschutz, Ritter und Brandt (2010)



Abb. 17 Lüftungsschlitz vertikal in der Fassade - für die natürliche Lüftung mit Schalldämmung und Witterungs- und Einbruchschutz, Heun und Grot (2010)

Bei natürlicher Lüftung außerhalb der Nutzungszeit und am Wochenende ist ein Nachweis erforderlich für Einbruchschutz und Wetterschutz.

Wurde ein Erdreichwärmetauscher eingeplant, mußte der Platzbedarf im Erdreich, sowie innerhalb des Gebäudes nachgewiesen werden.

In der Phase der Detaillierung der Fassaden wurden exemplarische Büros simuliert, um den Entwurf abschließend zu optimieren. Zur Erleichterung der Standardeingabe für die Studenten wurden ein Werkzeug, mit Excel als Eingabeoberfläche, erstellt, das die maßgeblichen Parameter für die Eingabe in TRNSYS errechnet.

Im ersten Schritt wurden die Eingabeparameter für Nutzung und Licht, sowie Lüftung und Kühlung (mit

Hilfe von Excel) erstellt. Diese konnten dann in das Simulationsprogramm TRNSYS eingefügt werden.

Die Eingabeparameter bzw. Annahmen für Licht sind Mittelwerte nach DIN 18599:

- Nutzfläche in m²
- Personenbelegung mittel (14 m²/Person) und 5W/m² Wärmeeintrag bei voller Anwesenheit
- Elektrische Geräte mittel (7 W/m²)
- Kunstlicht mittel (14 W/m²)

Da TRNSYS die Parameter für den Tageslichtdurchlass der Verschattung nicht berechnet, und bei geschlossener Verschattung das Kunstlicht eingeschaltet wird, auch wenn dies evtl. nicht nötig wäre (beispielsweise bei horizontaler Stellung der Lamellen im oberen Drittel des Fensters), wurden eigene Annahmen getroffen:

- Verschattung mit regelbarem Tageslichtdurchlass (drehbare Lamellen oder oberes Drittel separat regelbar oder Nordseite) [ja, nein]
- Anteil der Nutzfläche (Gesamt = 100%) mit Tageslichtquotient $\geq 5\%$ in X % mit Kunstlichtregel: nie eingeschaltet während der Nutzungszeit bei Verschattung mit regelbarem Tageslichtdurchlass, $\geq 2\%$ in Y % mit Kunstlichtregel: eingeschaltet von 7 bis 10 und 16 bis 18 Uhr bei Verschattung mit regelbarem Tageslichtdurchlass, $< 2\%$ in Z % mit Kunstlichtregel: immer eingeschaltet: $X+Y+Z=100\%$ Nutzfläche. Bei der Eingabe „nein“ bei Verschattung mit regelbarem Tageslichtdurchlass ist das Kunstlicht während der Nutzungszeit immer eingeschaltet

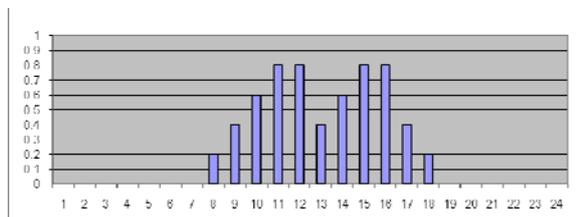


Abb. 18 Zeitprofil der Nutzung (Mo-Fr)

Über oben genannte Parameter werden die gesamten Wärmelasten berechnet, diese können dann in das entsprechende Zeitprofil des Simulationsprogramms eingegeben werden. Weiter wird der konvektive Anteil analysiert und auch im Simulationsprogramm angegeben. An den Wochenenden werden keine Wärmelasten zugrundegelegt.

Die Eingabeparameter bzw. Annahmen für Lüftung und Kühlung sind eigene Annahmen, da TRNSYS keinen Luftwechsel errechnet:

- Raumvolumen (Innenmaße) in m³
- Natürliche Lüftung [ja, nein]
 Zeitliche Unterteilung:
 Innerhalb der Nutzungszeit / Außerhalb der Nutzungszeit / Wochenende

Auswahlmöglichkeiten:
 über Fenster in einer Fassade/ über Querlüftung/ über Höhendifferenz $\geq 4,00\text{m}$.

Luftwechsel:

6 – 22 Uhr reine Lüftung über „Fenster in einer Fassade“: 1 1/h, Querlüftung : 2 1/h und Lüftung über eine Höhendifferenz $\geq 4,00\text{m}$: 3 1/h.

22 – 6 Uhr um das 1,5fache erhöht

- Mechanische Lüftung [ja, nein]
 luftdurchströmter Erdreichwärmetauscher vorhanden? [ja, nein]
 mechanische Lüftung mit Erdreichwärmetauscher vorhanden: resultierender Luftwechsel innerhalb der Nutzungszeit 2 1/h.
- Passive Kühlung (mit begrenzter Leistung) über thermoaktive Bauteile[ja, nein] oder Kühldecke[ja, nein] unter Angabe der Kältequelle.

Die oben genannten Parameter dienen zur Berechnung des Luftwechsels. Die resultierenden Eingabewerte werden im Simulationsprogramm im Zeitprofil der natürlichen Lüftung eingetragen (mechanische Lüftung ist in die natürliche Lüftung integriert). Weiter wird die Betriebsdauer der Kühlung berechnet.

Sind alle Parameter der Raumgeometrie, sowie die resultierenden Parameter für Nutzung, Licht, Lüftung und Kühlung in TRNSYS eingegeben, die Auswahl Jahressimulation, Zeitschritt 1h und die Wetterdatenregion (Region B, Testreferenzjahr Hamburg) ausgewählt, kann die Simulation durchgeführt werden. Nach der Berechnung wird die Auswertung mit Hilfe der simulierten Daten über das „entwickelte“ Werkzeug (unter Simulationsergebnisse beschrieben) auf verbessertem Kenntnisstand nach Komfortkriterien aus DIN 15251 durchgeführt.

Über die Simulationen mit unterschiedlichen Eingabeparametern und Baukonstruktionen konnten

die Studenten Ihren Entwurf abschließend optimieren und ein Gefühl für die Auswirkungen unterschiedlicher Vorgehensweisen im Nutzungskonzept oder der Materialien testen.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Ergebnisse aus den Simulationen zur positiven Auswirkung einer erhöhten Tag- und Nachtlüftung in der Bewertung nach EN 15251 wurden im studentischen Kurs in einem realistischen Planungsprozess, wie er sich auch für die Planung eines realen Verwaltungsgebäudes abspielen könnte erprobt.

„Trotz“ der veränderten Entwurfsmethode wurden gestalterisch hoch ansprechende, zeitgemäße und nachhaltige Lösungen entwickelt. Gerade die Einbeziehung der Komfortkriterien hat oft zur entscheidenden Ausformung etwa einer Systemfassade geführt.

Tabelle 1

Wichtige Verknüpfungen für den komfortorientierten Entwurf

Entwurf	Komfort
Gebäudeform und Orientierung	Tageslicht und Ausblick
Gliederung der Fassaden (Öffnungen für Licht und Luft)	Lüftungskonzept
Detailierung der Fassaden	sommerlicher Wärmeschutz



Abb. 19 Systemfassade, Danninger, Soltau und Hertel (2010)

LITERATUR

- Brandt N., Ritter T. (2010), HCU Hamburg, MA 1. Semester
 Danninger H., Soltau J., Hertel M. (2010), HCU Hamburg, MA 1. Semester
 Grot D., Heun P. (2010), HCU Hamburg, MA 1. Semester
 Ratzmann, M. (2010). HCU Hamburg, MA 1. Semester

- Sperling C., Odenwald D. (2010), HCU Hamburg, MA 1. Semester
 Deutsche Fassung EN 15251 (2007), Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik
 Richtlinie zu baulichen und planerischen Vorgaben für Baumaßnahmen des Bundes zur Gewährleistung der Behaglichkeit im Sommer-B12-8132.1/0 (2008), Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung

SIMULATION EINES INNOVATIVEN SONNENSCHUTZSYSTEMS VOM GEBÄUDE DER HS ROSENHEIM IM RAHMEN DES SOLAR DECATHLON

Johannes Maderspacher
 Hochschule Rosenheim
 Hochschulstraße 1, 83024 Rosenheim

KURZFASSUNG

Die Hochschule Rosenheim nimmt am Internationalen Wettbewerb Solar Decathlon 2010 in Madrid teil. Ziel dieses Wettbewerbes ist es ein Einfamilienhaus mit ansprechender Architektur auf dem Niveau eines Plusenergiehauses zu planen und zu realisieren. Der Standort Madrid fordert nicht nur im Veranstaltungszeitraum (mitte Juni) besondere Planung um die Überhitzung von Gebäuden zu vermeiden. Bauliche Maßnahmen wie Konstruktive Verschattung oder Sonnenschutzsysteme sind einfache passive Möglichkeiten die Temperaturen im Innenraum zu kontrollieren und vor übermäßiger Erwärmung zu schützen.

So wurde im Beitrag der Hochschule Rosenheim zum Solar Decathlon ein besonderes Augenmerk auf die Entwicklung eines eigenen Sonnenschutzsystems gelegt. Das System sollte den hohen architektonischen Ansprüchen genügen und diese mit einer effizienten Reduzierung der solaren Lasten verbinden. Die Abbildung der Fassade in einer Simulationsumgebung stellte sich als schwierig heraus, da der Sonnenschutz eine hohe Winkelselektivität besitzt. Wegen des dynamischen Verhaltens des Verschattungsfaktors und g-Total wurde ein sehr genaues Fenster- und Verschattungsmodell zur Simulation vorausgesetzt. Da so ein detailliertes Modell noch nicht vorhanden war, wurde mit Hilfe verschiedener Branchen-Programmen die thermischen und strahlungsphysikalischen Werte der Verschattung bestimmt und in ESP-r implementiert. ist das Dokument in ein PDF zu konvertieren.

EINLEITUNG

The University Of Applied Sciences Rosenheim is taking part at the international competition Solar Decathlon 2010 in Madrid. The intention of this competition is to design a residential with an attractive architecture on a plus energy level. Madrid as the competition location requires special development to avoid overheating in the house. Especially during the competition which was held in mid of June. Constructional techniques, like shading and sun protection systems, are basic passive

alternatives to control the indoor temperature. For this reason the University Of Applied Sciences Rosenheim paid special attention to the development of an own sun protection system which has to achieve the high architectural standard and reduce the solar gains. The implementation of the façade into a simulation program turned out to be quite difficult because of its high angle selectivity.. The dynamic shading coefficient and g-Total required a detailed window-and shading-model. By the aid of several branch programs the thermal and radiation values were assigned and subsequently implemented into ESP-r.

PROJEKTBESCHREIBUNG

Der „Solar Decathlon Europe 2010“ ist ein internationaler Hochschulwettbewerb, mit dem Ziel der Bewusstseinssteigerung für energieeffiziente und nachhaltige Technologien im Wohnungsbau. Die Veranstalter dieses Wettbewerbes sind das amerikanische Energieministerium und das spanische Wohnungsbau Ministerium. Insgesamt stellten sich 20 Hochschulteams aus aller Welt der Herausforderung innerhalb von zwei Jahren ein Plusenergiehaus zu entwerfen, zu planen, zu konstruieren und zu bauen. Im Juni 2010 wurden alle Prototypen in Madrid der Öffentlichkeit ausgestellt und traten dort zum solaren Zehnkampf an.

ENTWURFSBESCHREIBUNG

Das Gebäude der HS Rosenheim basiert auf einer modularen Bauweise sowie einem flexiblen und offenen Grundriss welcher sich an die Bedürfnisse der Bewohner anpassen lässt.

Das Gebäude soll als Wohnhaus für zwei Personen funktionieren und gleichermaßen die Möglichkeit bieten zwei Schlafgäste zu beherbergen, sowie bis zu acht Personen im Essbereich zu bewirten. Ein zentraler Küchenblock dient als Treffpunkt in der Mitte des großzügigen Wohnraums. Hier finden alle notwendigen Küchengeräte und Arbeitsutensilien ihren Platz. Ein in der Länge erweiterbarer Esstisch befindet sich im Anschluss an den Küchenblock und kann bei Bedarf vollständig verstaut werden.



Abbildung 1 Grundriss

Ein weiterer Schwerpunkt des Entwurfs stellt die Außenhülle dar. Idee war es die Grundform des Gebäudes zurückzunehmen und die Fassade in den Vordergrund zu Stellen. Durch die optimale Ausrichtung und Konstruktion werden die solaren Lasten minimiert ohne dabei die Tageslichtnutzung negativ zu beeinflussen. Sie ist gleichzeitig Sonnen- und Sichtschutz.

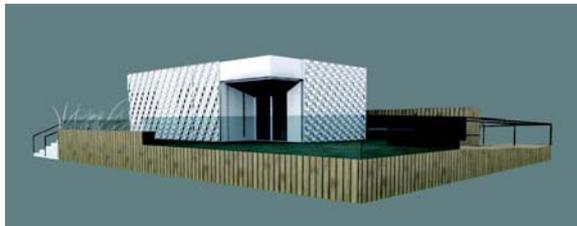


Abbildung 2 Perspektive

Ein weiteres Ziel ist die Veränderung der Fassade von morgens bis abends und im Jahresverlauf. Die Veränderung werden zum einen sichtbar durch das Öffnen und Schließen der Hülle, also die Bewegung der Verschattungselemente mit ihren Faltungen von unten nach oben und zum anderen über die Lage der Schatten.

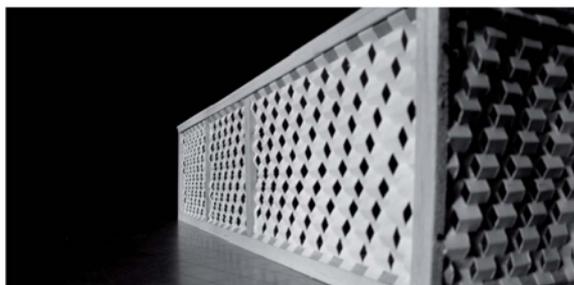


Abbildung 3 Zackenfassade

Aufgabenstellung

Da einer der Hauptaufgaben des Projekts der Aufbau von Wissen und Erfahrungen von Studenten ist, wurde nun ein besonderes Augenmerk auf die Entwicklung und Untersuchung des eigenen Sonnenschutzsystems gelegt.

Daraus zeigte sich, dass eine detaillierte Abbildung der Fassade in einer Simulationsumgebung durch ihre hohe Winkelselektivität einige Probleme

aufweist. Somit zeigt der Verschattungsfaktor und der g-Wert eine starke Abhängigkeit vom Sonnenstand. Es wurde mit Hilfe von verschiedenen Branchen-Programmen versucht die Eigenschaften der Fassade in das Simulationsprogramm ESP-r zu implementieren.

Verwendet wurden:

AutoCAD – ein vektororientiertes Zeichenprogramm, das auf Linien, Polylinien, Kreisen und Bögen aufgebaut ist.

Eclipse – Radiance Simulations Software – mit dieser Oberfläche können Radiance-Berechnungen gesteuert werden. Es kann in Versionen des CAD-Systems AutoCAD eingefügt werden und dessen 3D-Modelle als Grundlage verwenden.

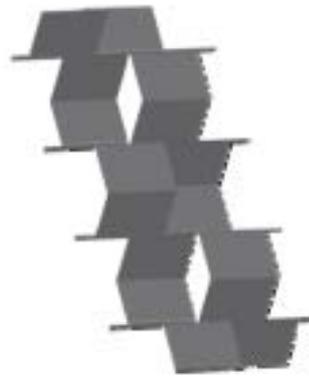


Abbildung 4 Ausschnitt Fassade

Meteonorm – eine globale Klimadatenbank kombiniert mit einem Wetter generator.

WIS – Window Information System ist ein integrales Planungsinstrument, um thermische und strahlungsphysikalische Eigenschaften von Fenstersystemen (Verglasung, Rahmen, Sonnenschutz- bzw. Verschattungssysteme etc.) zu bestimmen.

Als Ergebnis sollen die optischen Eigenschaften des neu entwickelten Sonnenschutzes abhängig vom projizierten Sonnenhöhenwinkel ermittelt werden. Genau genommen soll das optics.file aus ESP-r mit den zu berechnenden Transmissioswerten bei 0°, 40°, 55°, 0° und 80° projizierter Sonnenhöhe ergänzt werden. Die editierte Datei ermöglicht damit die thermische Simulation des Solar Decathlon Hauses inklusive der neuartigen Verschattung. Die winkelselektiv funktioniert.

Modellierung des Sonnenschutzes

Der erste Schritt besteht darin die Geometrie des Sonnenschutzes in AutoCAD einzugeben. Dabei ist es wichtig, dass man nicht mit 3D-Volumenobjekten arbeitet, denn diese können mit Eclipse nicht für die Radiance-Berechnung umgewandelt werden. Daher

sollte man mit 2D-Objekten arbeiten und diesen eine Objekthöhe zuweisen. Das Modell der Verschattung sollte einen repräsentativen Ausschnitt abbilden. Direkt hinter dieser wird eine Messfläche platziert mit einer möglichst kleinen Rasterung der Messpunkte um viele Werte zu erhalten. Anschließend muss für die Auswertung ein zweites Messfeld ohne Verschattung erstellt werden. Die Oberflächenbeschaffenheit des Sonnenschutzes muss mit dem Materialeitor aus Eclipse genau bestimmt werden. Im vorliegenden Fall bekommt der Sonnenschutz eine helle Farbe, genaue Bezeichnung ist RAL 9010 mit diffus reflektierender Oberfläche.

Mit Hilfe der Meteororm-Datenbank lassen sich alle Sonnenstände in Madrid über das gesamte Jahr hinweg abbilden. Der Stand der Sonne zu einem bestimmten Zeitpunkt lässt sich genau durch den Sonnenazimut- und den Sonnenhöhenwinkel ermitteln. ESP-r und WIS können nur den proj. Sonnenhöhenwinkel nach VDI 2078 erfassen. Deshalb ist es notwendig die beiden Winkel mit den folgenden Formeln umzuwandeln:

$$\beta = a_0 - a_W$$

$$\tan h_1 = \frac{\tan h}{\cos \beta}$$

$$\Rightarrow h_1 = \arctan\left(\frac{\tan h}{\cos \beta}\right)$$

Mit
 a_0 = Azimut der Sonne
 a_W = Azimut der Fassadennormale
 h = wahrer Sonnenhöhenwinkel

Umrechnung nur sinnvoll, wenn die Fassade besonnt wird, d.h. es gilt $-90^\circ < \beta < +90^\circ$ (!)

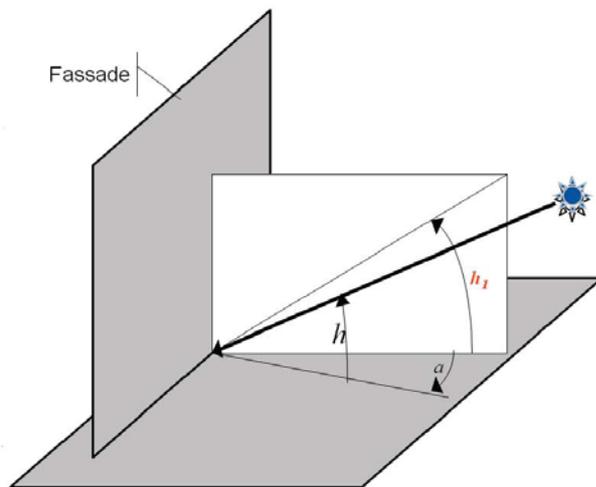


Abbildung 5 Berechnung des Sonnenhöhenwinkels

A: Sonnenazimutwinkel

h: wahrer Sonnenhöhenwinkel

h1: proj. Sonnenhöhenwinkel

Diese Umrechnung stellt allerdings eine Vereinfachung des Modells dar, denn aus einem genau definierten Sonnenstand (Azimut- und Höhenwinkel) wird durch den proj. Sonnenhöhenwinkel eine schräge Ebene beschrieben, die viele Sonnenstände repräsentiert. Nach der

Umrechnung der Winkel müssen als nächstes echte Sonnenstände ausgewählt werden, die den proj. Sonnenhöhenwinkeln 0° , 40° , 55° , 70° und 80° entsprechen und dabei keine zu großen Fehler aufweisen.

Im nächsten Schritt werden für jeden der fünf proj. Sonnenhöhenwinkel drei echte Sonnenstände bestimmt, deren Lichttransmission mit Hilfe von Eclipse berechnet wird. Als Ergebnis einer Simulation erhält man eine Datei die in Excel eingelesen werden kann. Hier werden von den beiden Messflächen – eine verschattet, die andere besonnt – zuerst der Mittelwert aller Messpunkte der jeweiligen Fläche ermittelt, und dann die Quotienten daraus gebildet. So erhält man die mittlere Transmission durch die Verschattung bezogen auf den sichtbaren Anteil (VIS) des gesamten Spektrums der solaren Strahlung.

Mit den zuvor erhaltenen Zwischenergebnissen kann man nun die WIS-Berechnungen beginnen. Dazu muss ein dem Solar Decathlon Sonnenschutz in Farbe und Material ähnlicher horizontaler Lamellenbehang ausgewählt werden. Anschließend wird der Neigungswinkel der Lamellen so verändert, dass er mit der ermittelten Lichttransmissionswerten übereinstimmt. Hat man die Winkel bestimmt muss zusätzlich das Fensterglas in das Modell eingebaut werden, um deren Einfluss mit zu berücksichtigen. Anschließend werden für jeden von ESP-r benötigten Winkel einzeln die Gesamttransmission und die Absorptionen des kompletten Sonnenschutzes in Kombination mit den Glasscheiben berechnet.

Im letzten Schritt müssen die ermittelten Werte in das optics.file aus ESP-r eingetragen werden. Hierfür muss zunächst in ESP-r selbst in der Construction-database ein transparentes Bauteil erstellt werden, dessen Schichtenanzahl mit der Anzahl der Layer bei geschlossenem Sonnenschutz übereinstimmt. In unserem Fall handelt es sich um einen sieben-schichtigen Aufbau: ein Dreischeibenisoliertes Glas, ein luftgefüllter Zwischenraum und die Fassade.

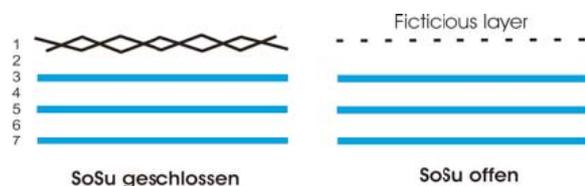


Abbildung 6 Modellhafter Aufbau der Schichten

Wenn alle mit WIS generierten Transmissionswerte in die entsprechenden Spalten eingetragen sind, kann die modifizierte Datei gespeichert werden. Somit ist das Ziel erreicht den winkelabhängigen g-Wert des Sonnenschutzes für die thermische Gebäudesimulation in ESP-r zu erstellen.

ERGEBNISSE

Nach dem Vergleich der solaren Einträge des Sonnenschutzsystems des Solar Decathlon Beitrages mit einem Standard Lamellenbehang wurde deutlich das der Unterschied sich in vertretbaren Grenzen hält.

Bei den Diagrammen ist die Winkelselektivität, also höhere Einträge in den Morgen-und Abendstunden bzw. ein gedämpfter Peak zur Mittagszeit, zwar klar erkennbar jedoch sind die Schwankungen so gering das sie vernachlässigt werden können. Gründe dafür ist zum einen die Sonnenschutzverglasung die bereits einen großen Teil der Strahlung zurück hält, zum anderen die geringe Größe des Gebäudes.

Jedoch würde beim Einsatz des Verschattungssystems an Beispielsweise Nichtwohngebäuden mit hohem Verglasungsanteil eine genauere Untersuchung zwingend nötig. Dann stellt sich die Frage ob das überhaupt realistisch umsetzbar ist. Denn wie an den oben erklärten Schritten ist es sehr kompliziert, zeitaufwendig und fehlerreich Daten einer speziellen Verschattung, für die Verwendung in einem Simulationsprogramm zu erstellen. Darum wäre eine Implementierung von flexibleren Verschattungsmodellen in die Basisprogramme sinnvoll. Da ja gerade Sonderfälle wie das Sonnenschutzsystems des Solar Decathlon im Auge von thermischen Simulationen liegen.

LITERATUR

Pültz, Gunter; (2010): Thermisch-energetische-Gebäudesimulation, Vorlesungsskript, Hochschule Rosenheim

INTEGRATING ENERGY SIMULATION IN THE EARLY STAGE OF BUILDING DESIGN

Leandro Madrazo, Marco Massetti, Glòria Font, Inés Alomar
 ARC Ingeniería i Arquitectura La Salle, Universitat Ramon Llull, Barcelona, Spain

ABSTRACT

This paper describes a project currently being conducted within the European project IntUBE (www.intube.eu). The aim of this project is to develop innovative ICT solutions which can contribute to reducing energy use in the building sector in Europe. The main focus of IntUBE is to model, store and process the energy information obtained throughout the whole building lifecycle in an Energy Information Integration Platform (EIIP). Our assumption is that such a platform would make an intelligent use of the energy information possible at the different stages of the building lifecycle, which in turn would result in a significant reduction in energy use. The project reported on in this paper focuses on modelling energy information at the early design stage.

INTRODUCTION

IntUBE (Intelligent Use of Buildings' Energy Information) is an EU research project funded by the FP7-ICT-2-2.3ICT (2008-2011) programme for environmental management and energy efficiency whose goal is to improve the energy efficiency of buildings through an intelligent and coordinated use of energy information. At the core of the IntUBE approach lies an Energy Information Integration Platform (EIIP), which stores energy information generated along the different stages of the building's lifecycle: conceptual design, design development, operation and retrofitting (RIBA, 2007). The information is organised into three repositories, each dedicated to storing/retrieving different kinds of energy information: a BIM repository for building descriptions, a SIM repository for the simulation results and a PIM repository for the monitoring data. In addition, a Reference Data server contains the metadata which facilitates access to the different

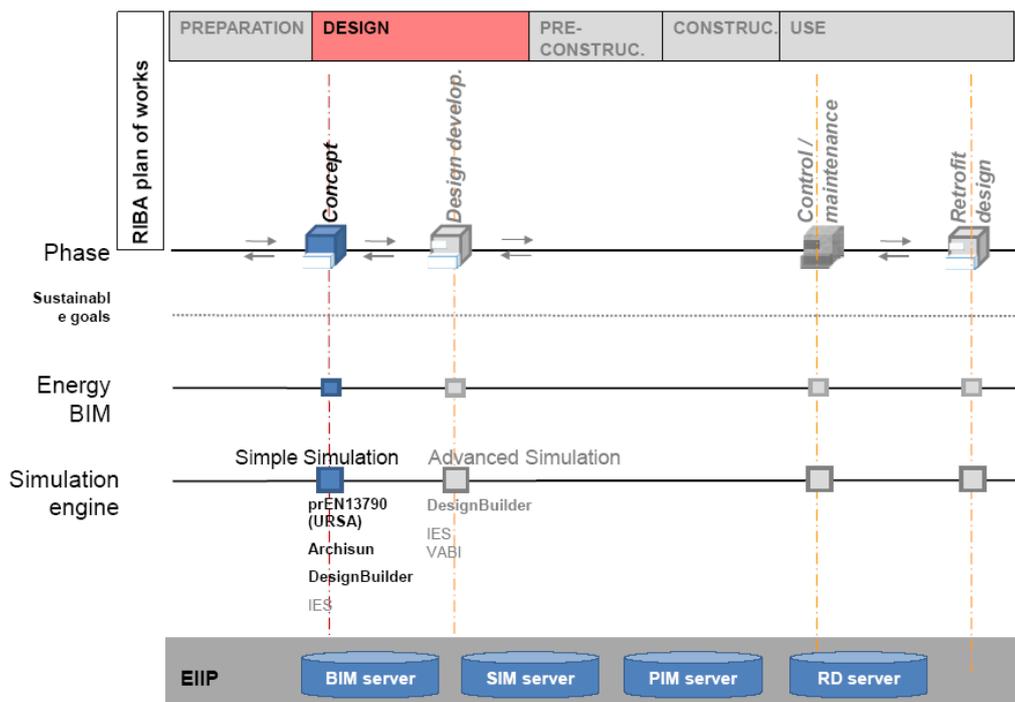


Figure 1. Structure of the IntUBE Energy Information Integration Platform

repositories (Figure 1). The platform supports different services facilitated and/or provided by different stakeholders, such as building modelling, energy performance simulation, monitoring and building control (BMS/NMS), data mining and energy audits (Figure 2).

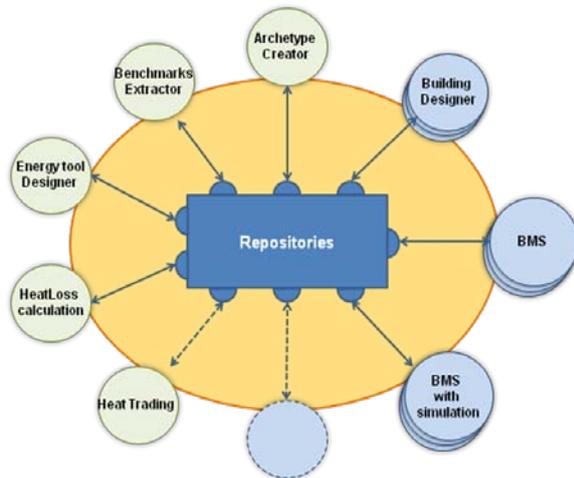


Figure 2. Stakeholders and services interacting with the IntUBE Energy Information Integration Platform

This paper presents the current status of the project in the area of building simulation, in particular the application of simulation tools at the early design stage. During the initial phases of building design, energy simulation may be used to take decisions that might help to substantially improve a building's energy performance. The information which might be obtained from the envisioned E IIP at the concept stage might include benchmarks or simulation input data generated from previous projects. On the other hand, the building design models and their simulated performances may be stored in the platform so that they can be accessed by other users as well (e.g., designers, software developers, researchers, policy makers, etc.). These processes of storing and retrieving information are performed through dedicated services accessing the platform's energy information repositories. These services can be performed asynchronously by different stakeholders, using a variety of tools which are external to the platform. Therefore, ensuring the homogeneity and compatibility of the data acquired from heterogeneous sources becomes a core issue in this project.

A specific methodology has been developed to store simulation models and the results in the platform. To facilitate the comparison between simulations performed with different tools, a form based on EU standards is used to store and retrieve data in the platform. Our ultimate goal is to demonstrate that such a methodology would help to transform information into a knowledge, which would

contribute in turn to reducing the energy consumption of buildings.

A residential apartment building in Spain is being used as a case study to develop and verify the applicability of the methodology. Other buildings are being used to populate the SIM repository with simulation data. Different building alternatives at the conceptual design stage have been created and simulated in order to compare their energy performance. These simulations have been carried out with Archisun and the URSA application of prEN13790.

BACKGROUND

There are some relevant precedents in the use of repositories to collect information on the energy performance of buildings such as EnerGuide, a comprehensive computer-based system developed by Natural Resources Canada to manage its energy efficiency-oriented programs. It is "a management information tool and central repository for tracking residential energy evaluations and measuring benefits from the energy evaluations delivered across Canada" (Blais, 2005). Energuide contains information about the existing building stock, whereas the purpose of the energy platform we are developing in IntUBE is to encompass the building's entire lifecycle, from design to construction and operation.

The need to share and compare information from different sources and at different stages of the building lifecycle calls for the use of standards (c.f. Clarke, 2001, pp. 308-309), particularly those being developed at the European level such as the group of norms developed to respond to the EPBD (Energy Performance of Buildings Directive, 2002/91/EC). These standard procedures encompass the definition of parameters and units to describe the building characteristics, the boundary conditions and the building energy performances.

The approach we have adopted for the IntUBE platform conforms to the EU policies on the energy performance of buildings, and by doing so it strengthens the development and application of standardized processes and methods in the field of energy performance and evaluation.

ENERGY INFORMATION AT THE CONCEPTUAL DESIGN STAGE

At each stage of the building lifecycle, it is possible to store and retrieve relevant information in and from IntUBE's E IIP using standard procedures. As the information stored in the E IIP grows, more useful data might be retrieved by future users (building managers, users, architects and engineers) which in turn may help to improve the energy performance of buildings at the different stages (design, operation,

maintenance, retrofitting). In the study reported in the following sections, we address the use of energy information at the concept stage.

Work in progress

The decisions taken at the concept stage are crucial for energy efficient design (Clark 2001, pp. 4-5). However, detailed simulations are seldom feasible due to the lack of time and/or information available. Providing the designer with a computer-supported environment which facilitates access to data describing possible solutions and evaluating the energy performance of design variations would help to integrate energy issues into the early design phase.

At the conceptual design stage, the main stakeholder to be considered is the design team. In the design process of a building, the architect or engineer may use ICT to assess the information related to building energy. The tools used in this context are basically modelling and simulation programmes. These are the sources of the data that may exchange information with the EIIP at this stage.

The design team using the EIIP at the concept design stage will share information on different buildings that has been stored at different stages of the building lifecycle (concept design, design development, operation and retrofit design). As a result, these two questions arise:

1. What useful information do stakeholders provide the EIIP at this phase? A design team may store in the EIIP the information contained into the model as well as the simulations performed with different tools. The information thus provided represents the energy model of a building at the conceptual design stage.
2. What useful information does the EIIP facilitate to stakeholders at this phase? Conversely, the design team may obtain information from previous projects stored in the EIIP which inform the design process. In this regard, the most basic service that the platform provides the designer is the ability to browse similar building types in a comparable climate and with related characteristics (regarding form and shape, type construction, passive strategies, type of mechanical systems, etc.). In this way, the EIIP can assist the designer in taking design decisions which might have an impact on energy performance. In current design practice, this kind of information, which may be very useful to develop proposals of building design, is also difficult to obtain (Hand, 2008).

In these processes of storing and retrieving data, there is a heterogeneous variety of sources involved, namely:

- different technologies used at different stages of building lifecycle such as modelling tools, simulation tools, BMS and data acquisition systems (Dawood, 2008)
- different products for the same technology, such as modelling and simulation tools (Crawley, 2008; Dawood, 2008)
- different kinds of information related to the building's energy, such as simple simulation results, detailed simulation results and monitoring data.

Therefore, it is necessary to ensure the compatibility of the information obtained from these different sources using standard units and parameters collected through standard forms which are used in the processes of storing and retrieving data from the platform.

Furthermore, these forms are necessary in order to transform the information stored in the platform into applicable knowledge. Each of the three servers that make up the platform –BIM, SIM and PIM– has a specific form which represents a subset of the ontology which characterizes their corresponding domain knowledge: building, simulation and performance. To begin with, we have created a form to store simulation data to be used at the conceptual design stage (Table 1).

Table . Form developed for the conceptual design stage

FORM	
General data of the building	
Building name	-
Design alternative	-
Location	-
Year of construction	-
Useful floor area	m ²
Building use	-
People	-
Cost	€/m ²
Climate and location	
Mean annual temperature	
Mean annual humidity	
Mean solar radiation	
Opaque & Transparent surface	
Area of building envelope	m ²
Thermal transmittance average of building envelope	W/(m ² ?K)
Area of external building envelope	m ²
Area of transparent external building envelope	m ²
Area of transparent external building envelope by Orientation j (S,N,SE+E+O+SO+Horizontal)	m ²
Presence of special elements (Yes / No)	-
Class of construction (for thermal inertia)	-
Systems	
overall system efficiency for heating per carrier i	-
overall system efficiency for cooling per carrier i	-
Calculation OUTPUTS	
Tool / Method of calculation used	-
Annual energy needs for heating	MJ
Annual energy needs for cooling	MJ
Energy use by carrier i (Oil, Gas, Electricity, etc.)	MJ
Renewable energy generated in situ - thermal	MJ
Renewable energy generated in situ - electric	MJ
Energy evaluation - Primary energy delivered	MJ

The parameters included in this form are based on EPBD EN ISO standards, in particular:

- ISO 13790: 2008 Energy performance of buildings, which deals with calculating the energy use for space heating and cooling
- EN 15603: 2008 Energy performance of buildings, which covers energy use and energy ratings

The information regarding the building models and simulations created by the design team can be collected on this form and stored in the E.I.P. In this way, it will be possible to compare this information with other simulations of the same building at different stages of the building's lifecycle, even if the simulations have been performed with different tools.

The form includes different kinds of information that are relevant for a building's energy performance:

- Building description, including its most general characteristics such as use, location, year of construction, etc.
- *Climate and location* data, to enable comparisons based on climatic characteristics
- Opaque and transparent surfaces, which describe the building construction and geometry

- Systems, to report on the performance of mechanical systems that influence buildings' energy use
- Calculation results, to record the predicted performances as associated with the previous data

The information contained in a form can not be dissociated from the services which can be brought about by processing the retrieved data. It is not enough to identify the relevant data; rather it is also essential to define the processes by which the data is to be transformed into quality energy information which can help different stakeholders throughout the building's lifecycle (concept design, design development, operation and retrofitting) to take decisions aimed at optimizing the energy performance.

Case of study

To verify and further develop this methodology at the conceptual design stage, we have replicated a possible design process which a design team could have followed had they used standardized forms to store and retrieve simulation data in the E.I.P. As a case study, we have used a recently completed 24-flat publicly subsidised apartment building in Cerdanyola del Vallès - close to Barcelona- which was built by a public housing institute (Incasol).

The rectangular building is aligned with the street. It measures 64 meters long and 12 meters wide. It occupies the maximum surface permitted by the building codes and has four stories plus an underground car park. The ground floor is used for offices and also as lobby. The first, second and third floors are for residential use.

The typical floor plan of the block consists of four dwellings around each of the two stairwells (Figure 3).

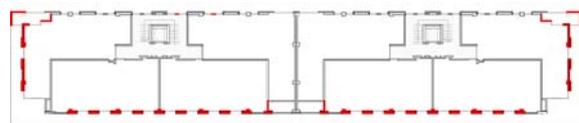


Figure 3. Cerdanyola residential building, typical floor plan. In red, solar wall façades.

The north-south orientation of the plot allows the façades to be treated in a way that contributes to improving their energy efficiency. In the south, east and west façades there are large openings to get light and energy from the sun. On these façades, opaque panels were built with a solar wall solution (marked in red in Figure 3). There are no large windows on the north façade. The openings on all the façades have solar protection.

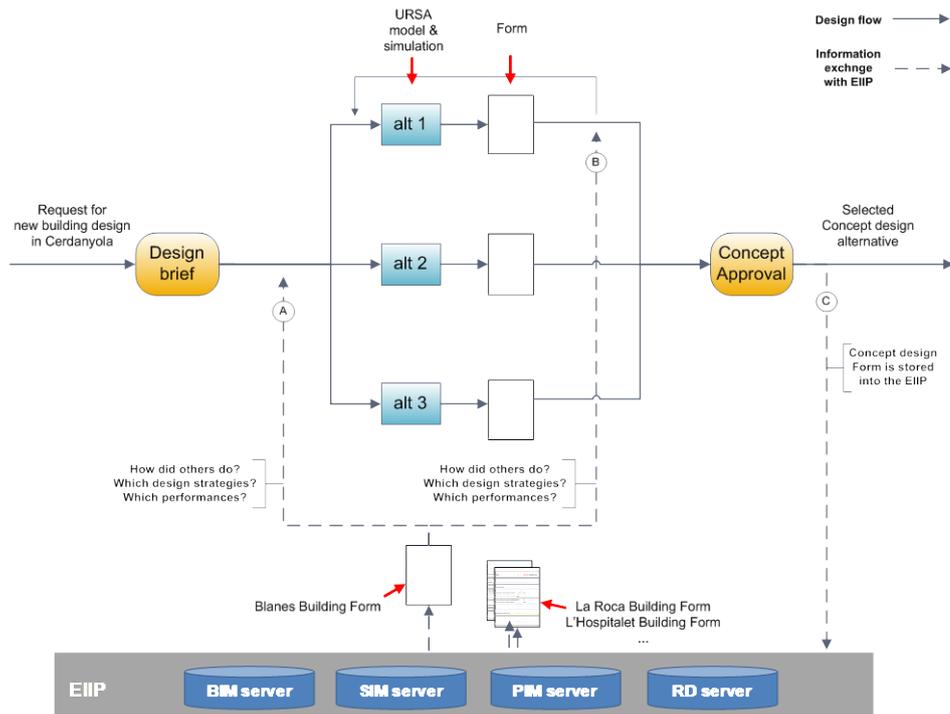


Figure 4 . Conceptual design process for the Cerdanyola building

At the conceptual design stage, the building has been modelled as a single zone representing all the flats, excluding the part of the building with other uses. Two programmes have been used to generate simulations of the design so that they can be stored and compared:

- Archisun 3.0 (Serra, 2000):
- URSA Excel application of pr EN13790 – Simple Hourly Method

Figure 4 outlines the conceptual design process for the building (see RIBA, 2007). The concept design starts when the design team receives the client's key requirements and identifies the main design constraints (including space and use requirements, budget, site conditions, applicable regulations, etc.). The URSA tool has been used in this scenario.

In order to develop several initial designs, the design team may search the EIP for similar buildings which share some of the characteristics with the one to be designed. In fact, the team can see the design options adopted for other buildings (such as the building shape, the level of thermal insulation, the type, area and orientation of windows, mechanical and passive heating, cooling and ventilation, the type and area –if any– of solar thermal collectors, the type and surface of passive systems and different options for the inclusion of renewable energy technologies) and their energy performance.

To make this search possible, we have populated the EIP repositories with simulation data from the

other buildings –located in Blanes, La Roca and L'Hospitalet– which are similar to the case study. These are publicly subsidised homes from the same public agency. They share characteristics like area, construction cost and building technique, which make them comparable; however, they differ in location and in architectural expression.

Archisun was used to simulate the apartment buildings in Blanes and La Roca. The URSA tool has been used to simulate the apartment building in L'Hospitalet.

The design team used a standard form to search the EIP for similar buildings and retrieve one or more specific buildings (process A, in Figure 4) in order to evaluate its design characteristics with regard to the desired performances. After that, the team created the different design alternatives for the Cerdanyola building. Two design variations of the original building (alternative 1, Figure 3) were considered in order to reproduce a possible design process of the building at the concept stage. In alternative 2 (Figure 5), the dwellings are entered through walkways placed on the north façade. In alternative 3 (Figure 6), no solar walls are used in the façade. It should be noted that when the URSA application is used for the Cerdanyola building, there cannot be any differences between alternatives 1 and 3 since the solar wall cannot be modelled with this tool.



Figure 5. Cerdanyola residential building, alternative 2. Walkways located on the north facade. In red, solar wall façades.

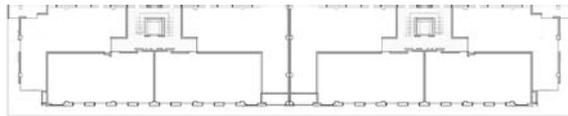


Figure 6. Cerdanyola residential building, alternative 3. Solar walls removed.

The information obtained from the similar buildings may be useful for creating design alternatives. For example, the design team noted that the insulation level in the similar buildings is roughly the same, and it used this value in the alternatives for the Cerdanyola building (see thermal transmittance in Table 2 and compare it to the one previously used in the building in Blanes, Table 3). In other words, the design team decided to take advantage of the know-how stored in the platform and use the data it provides as a design hypothesis. At this point, it should be noted that the use of standard parameters is fundamental in order to extract this input data from different buildings. Moreover, having easy access to the different energy information through the form speeds up the creation of design alternatives and provides valid inputs for the simulation. Furthermore, comparing the performance of the design alternatives with that of similar buildings can help to better adjust the design performance targets.

Once the three design alternatives have been modelled and simulated with the URSA tool, they are translated to the form (Figure 4) in order to be stored in the platform.

Now it is possible to compare the design characteristics as well as the simulation results of the alternatives with the similar buildings. Figure 4 (process B) shows that the design team may compare the energy performance of a design alternative with one or more similar buildings. In fact, thanks to this it is possible to have quick access to this information in a comparable format to verify whether the simulated performances are reliable, to detect possible anomalous results and, if necessary, to make the corresponding changes in the proposed design alternative.

Once the design team has created the three alternatives, they can be compared and decisions regarding the further development of the design can be discussed together with the client (c.f. A lanne

2004). The form of the selected design alternative will finally be stored in the EIIP (process C in Figure 4) together with the building model and the simulation. Subsequent users of the platform can take advantage of this information in other projects.

In process A and B, described in this scenario, the information on specific buildings is provided through the form. Much more helpful information is expected using the form to compare the design alternatives of the Cerdanyola building with typical buildings based on statistical information such as energy consumption benchmarks for similar buildings (see Blanes, 2005). However, this kind of information is not yet available with the limited amount of data currently used in this case study. The population available will, in fact, be extended to buildings in the advanced design stage and in operation, and it will increase in each of these stages. Specific services to provide such processed information through the EIIP are currently under development.

Through this case study scenario, we can see that users can get useful information from the platform while also providing useful information to other users. In fact, while the design team benefits from the information obtained, at the same time the model and the simulation performed for the Cerdanyola building will contribute to populate the EIIP, thus benefiting future users of the platform. Using forms to compare simulation results

Table 2 and Table 3 provide a comparison between design alternative 1 –which corresponds to the design actually built in Cerdanyola– simulated with URSA (Table 2) and the apartment building in Blanes simulated with Archisun (Table 3). The buildings' energy models and corresponding simulations were both described with the same form.

The example shows that most of the information can be compared. However, certain kinds of data cannot be compared simply because the domain of each tool has its specific limitations. For example, opaque and transparent surfaces are described by different input parameters in Archisun and URSA. Whereas Archisun considers all the façades to be of the same kind, URSA provides for multiple types of façades. However, after being translated to a common form, these parameters can be compared.

On the other hand, in heating and cooling calculations Archisun calculates sensible plus latent energy use, whereas the URSA tool provides the sensible energy demand only. Therefore, the sensible energy demand is not comparable. Some parameters of the forms can be filled in for one tool but not for the other; however, the overall objective to have simulation results from different tools represented in a standard form has been fulfilled.

Table 2. Form of the design alternative 1 for the Cerdanyola residential building simulated with URSA

FORM		
General data of the building		
Building name	-	Social Housing Block - Cerdanyola
Design alternative	-	alternative 1
Location	-	Cerdanyola, Barcelona, Spain
Year of construction	-	2008 (expected)
Useful floor area	m ²	1703
Building use	-	residential
People	-	96
Cost	€/m ²	...
Climate and location		
Mean annual temperature	-	...
Mean annual humidity	-	...
Mean solar radiation	-	...
Opaque & Transparent surface		
Area of building envelope	m ²	2885
Thermal transmittance average of building envelope	W/(m ² ·K)	0.93
Area of external building envelope	m ²	1823
Area of transparent external building envelope	m ²	495
Area of transparent external building envelope by Orientation S	m ²	290.1
Area of transparent external building envelope by Orientation SE+E+O+SO+Horizontal	m ²	46
Presence of special elements (Yes / No)	-	Yes
Class of construction (for thermal inertia)	-	Heavy
Systems		
overall system efficiency for heating per gas	-	0.75
overall system efficiency for heating per carrier i	-	...
overall system efficiency for cooling per carrier i	-	no cooling system
Calculation OUTPUTS		
Tool / Method of calculation used	-	URSA application / ISO 13790 - Simple Hourly Method
Annual energy needs for heating (sensible)	MJ	148418
Annual energy needs for cooling (sensible)	MJ	0
Energy use by gas	MJ	197891
Energy use by carrier i (Oil, Gas, Electricity, etc.)	MJ	...
Renewable energy generated in situ - thermal	MJ	...
Renewable energy generated in situ - electric	MJ	...
Energy evaluation - Primary energy delivered	MJ	...
values in red is information that cannot be obtained from this tool		

Table 3. Form of conceptual design for the Blanes residential building simulated with Archisun, from the EIP population

FORM		
General data of the building		
Building name	-	Social Housing Block - Blanes
Design alternative	-	...
Location	-	Blanes, Barcelona, Spain
Year of construction	-	2010-11
Useful floor area	m ²	1264.47
Building use	-	residential
People	-	62
Cost	€/m ²	...
Climate and location		
Mean annual temperature	-	...
Mean annual humidity	-	...
Mean solar radiation	-	...
Opaque & Transparent surface		
Area of building envelope	m ²	1992
Thermal transmittance average of building envelope	W/(m ² ·K)	0.95
Area of external building envelope	m ²	1844
Area of transparent external building envelope	m ²	234
Area of transparent external building envelope by Orientation S	m ²	0
Area of transparent external building envelope by Orientation SE+E+O+SO+Horizontal	m ²	234
Presence of special elements (Yes / No)	-	no
Class of construction (for thermal inertia) by one	-	...
Systems		
overall system efficiency for heating per gas	-	0.7
overall system efficiency for heating per carrier i	-	...
overall system efficiency for cooling per carrier i	-	no cooling system
Calculation OUTPUTS		
Tool / Method of calculation used	-	Archisun 3.0
Annual energy needs for heating (sensible)	MJ	...
Annual energy needs for cooling (sensible)	MJ	...
Energy use by gas	MJ	139400
Energy use by carrier i (Oil, Gas, Electricity, etc.)	MJ	...
Renewable energy generated in situ - thermal	MJ	...
Renewable energy generated in situ - electric	MJ	...
Energy evaluation - Primary energy delivered	MJ	...
values in red is information that cannot be obtained from this tool		

CONCLUSIONS

We have described a methodology based on the use of standardized forms which enables a design team to store and retrieve quality information from a platform and use it at the conceptual stage of building design. More comprehensive results are expected at the end of the project as the ongoing work in the different work packages is completed. Then, it will be possible to more precisely identify the services operating with the information extracted from the BIM, SIM and PIM servers (e.g., making predictions by means of simulations which are calibrated with the monitoring data). These services will be provided by different stakeholders (energy providers, consultants, technical teams, etc.) operating with the IntUBE EIP, giving rise to innovative business models. The valid information they provide to the agents involved in different stages of the building lifecycle will contribute to improving the energy efficiency of buildings.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study reported in this paper has been carried out in collaboration with our partners in the InTUBE project. In particular, we would like to thank Tracey Crosbie and Nash Dawood from the University of Teeside, coordinators of the work package Energy Profiling, and Wim Plokker from Vabi Software, for their contributions to the discussions related to the ongoing work.

REFERENCES

- Alanne, K. 2004, "Selection of renovation actions using multicriteria " knapsack" model, Automation in Construction 13 (3) pp. 377-391
- Blais, S., Parekh, A., Roux, L. 2005, EnerGuide for Houses Database – An Innovative Approach to Track Residential Energy Evaluations and Measure Benefits, Ninth International IBPSA Conference, pp. 71-78
- Clarke, J.A. 2001, Energy simulation in building design, Butterworth-Heinemann, Oxford
- Crawley, D.B., Hand, J.W., Kummert, M., Griffith, B.T. 2008, Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs, Building and Environment n. 43, pp. 661-673
- Dawood, N., Mardza, L., Vidal, J., Crosbie, T., Dean J., Loh, E. 2008, Review of the current state of energy profiling technology, www.intube.eu [2010-04-22]
- Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings
- EN 15603: 2008, Energy Performance of Buildings—Overall Energy Use and Definition of Energy Ratings
- Hand, J.W., Crawley, D.B., Donn M., Lawrie, L.K. 2008, Improving non-geometric data available to simulation programs, Building and Environment, Volume 43, pp. 674-685
- ISO 13790: 2008 (E), Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling
- RIBA, RIBA Outline Plan of Work 2007, www.architecture.com [2010-04-30]
- Serra, R., Roset, J. 2000, Energy Conscious Design Programme, World Renewable energy Congress VI, pp. 494-499

THERMAL BUILDING SIMULATION WITH MAPLESIM

Adhi Susilo and Martin Bauer
Faculty of Architecture and Civil Engineering
Hochschule Augsburg, Germany

ABSTRACT

This work is based on a systematic approach in construction process. The idea is to break down the building into its basic part and then we model the basic part and finally we rearrange that components to build the system and do the simulation. With that idea and using a computational tool, MapleSim, we build the model.

MapleSim is one of simulation tools that is able to work on both approaches; causal and acausal. This new development in simulation tool can be used to build a custom thermal building simulation for our purpose.

We took VDI 6020 as a benchmark to evaluate a developed room model. The model is built from basic components provided by MapleSim library. However, some bugs exist in this version of software.

ZUSAMMENFASSUNG

Zur Unterstützung von Konstruktionsvorgängen beim methodischen Konstruieren wird ein graphenbasiertes Simulationssystem aufbereitet.

Hierzu wird in Analogie eines Vorgehensmodells für die Baukonstruktion auf Basis des kommerziell verfügbaren Simulationswerkzeuges MapleSim eine Raumsimulation aufgebaut.

Aus Basiskomponenten heraus werden Konstruktionsteilsysteme für die Simulation gebildet. Die Kombination der Teilsysteme ergibt das Gesamtsystem.

Zur Validierung der Simulation wird die VDI-Richtlinie 6020 herangezogen.

INTRODUCTION

This section gives short explanation about systematic in construction process. The systematic process is base of this work.

Systematic Engineering Design

A construction as a technical system is developed in seven basic working steps, from abstract to detail, as shown in Figure 1 (Pahl et al., 2007). The working steps are associated with construction phases. Those phases are defined as :

1. Planning and task clarification
2. Conceptual design
3. Embodiment design
4. Detail design

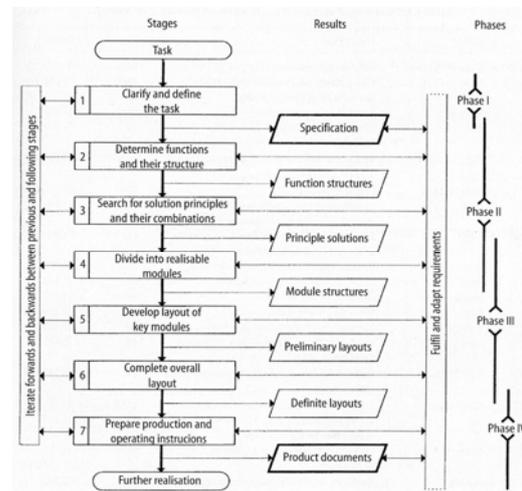


Figure 1 General construction process (Pahl et al., 2007)

Formalizing Building Construction Process

With the construction point of view, we are going to synthesis a system, from abstract to detail (Figure 2).

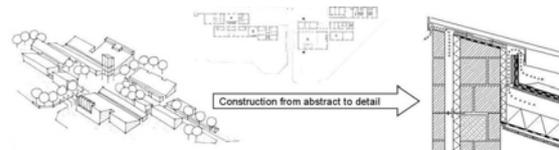


Figure 2 Synthesizing construction

The construction and its behavior can be modeled as a formal system represented by graphs (Bauer, 2000), as depicted on Figure 3.

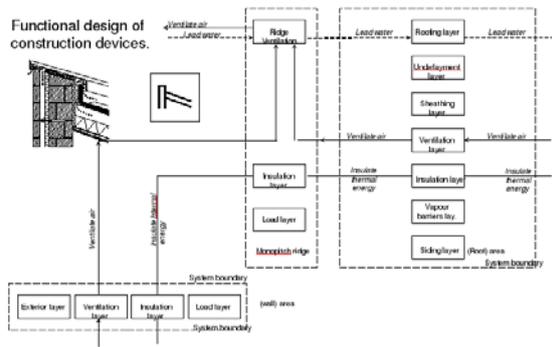


Figure 3 Graph method of construction (Bauer 2000, 2008)

This work focuses on the energetic behavior of the building system and its thermal functions. The objective is to formalize simulation as a graph based method as analogy to systematic design. At the end simulation should follow the phases in construction process in different levels of detail.

The plan is simulating a model from VDI 6020 test. In this work, as our concept, we only consider energy transfer from zone to environment (or boundary to system). In systematic model, it can be represented as Figure 4. The model complies with conceptual design model.

It shows a single zone which has a periodic internal gain, a constant temperature side (at 22°C) and adiabatic condition on the other sides. Heat travels by convection only, and it is assumed that there is no radiation.

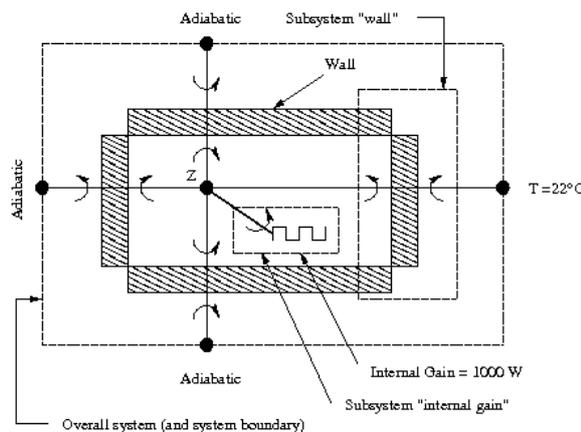


Figure 4 The system, a single zone model

Then that concept is embodied. The system enclosed by walls (ceiling and floor) and window. Energy

moves in 1D direction through those surfaces. For further analyzing, the surfaces consist of layer or layers. The system elements can be associated with simulation properties.

It is defined that layer may behave as conductor and capacitor. However, there is component, such as air, that uses radiation and convection mechanism to transmit the heat.

Finally, the detail design breaks down the construction into single component, we use MapleSim to build this basic component, and then we synthesize the component to simulate a complex system. The following section will explain the synthesizing further.

MODELICA AND MAPLESIM

Many components in MapleSim are taken from the Modelica standard library (Maplesoft homepage). Modelica is a non proprietary, object-oriented, equation based language to conveniently model complex physical systems containing, e.g., mechanical, electrical, electronic, hydraulic, thermal, control, electric power or process oriented subcomponents (Modelica homepage). As mentioned before, the equation based language, or called an acausal system, makes simulating complex physical system easier. In acausal system it can be written $x = y + C$, although there are unknown variables on both sides. On the contrary, a causal system demands value on the right side, that is an assignment statement, i.e $x := y + C$, where y and C must be solved before reaching this line.

With this ability, man can build a model without worrying direction of input and output. The complex model can be built from simple components that are provided in standard library. Following describes some papers that show Modelica availability. Felger et. al. built their model with Modelica. Their building simulation can handle weather data, heating, and controller with fuzzy logic method (Felgner et al., 2002). Hoh, et. al. also built their model with Modelica. Their model includes internal gains, solar gains, and air exchange (Hoh et al., 2005). Another example of using Modelica in building simulation is shown by Wetter's work. His model even includes humidity gains and CO₂ gains (Wetter, 2006).

This paper is also discussing on the usage of this acausal method in solving thermal problems, especially on the thermal building system. However, instead of using Modelica, we build the model with MapleSim (MapleSim3). MapleSim library contains more than 300 modelling components, including electrical, mechanical, and thermal devices; sensors and sources; and signal blocks (Maplesoft, 2001-2009).

Following is thermal library components in MapleSim, that is to be used by our model:

- Boundary Condition Controls
 - Fixed Temperature
- Heat Transfer Components
 - Body Radiation
 - Convection
 - Heat Capacitor
 - Thermal Conductor
 - Prescribed Heat Flow

With those components we build a model to simulate a thermal building. In this paper, we are going to take one of VDI 6020 tests as a bench mark.

BASIC MODEL

VDI 6020

We use VDI 6020 Example 1 as a bench mark for the simulation (VDI Richtlinie 6020, 2001) and we choose Room type S only for this work. Before discussing the construction, we would like to show the surrounding of the model. The environment or boundary condition of the room is set in these following tables, i.e. Table 1 and 2 respectively, and other parameters of the building which are not included in Table 2 are assumed as zero.

Table 1

The convective heat transfer coefficients

BUILDING COMPONENTS	INTERNAL W/(M ² K)	EXTERNAL W/(M ² K)
External wall	2.70	20.00
Internal wall	2.70	2.70
Door	2.70	2.70
Floor	1.67	1.67
Ceiling	1.67	1.67
Window	2.70	20.00

Table 2

The boundary conditions

PARAMETER	UNIT	VALUE
Outside temperature	°C	22
Internal gain (from machine)	Watt	1000
Operating time (the machine)	hour	6-18
All adjacent rooms	°C	adiabatic

The material properties of the construction are shown in the next tables. However, the materials of the window are not mentioned clearly on the text; in this work we are using Natronglas (Hohmann et al.,

2004) for clear glass layer, as shown on Table 3 and 4, respectively.

Building element

The Room type S is a ‘box shoe’ room with dimension 3.5m x 5.0m x 3.0m. The surfaces are categorised into four types, i.e. ceiling and floor, internal walls, internal door, and external wall. The internal walls or internal door has one layer only. The ceiling and floor consist of four layers. The external surface has two parts, an external wall that consists of three layers and a window that also consists of three layers.

A solid layer is simulated with two thermal conductors and a heat capacitor and convection component for both sides. Example 1 of VDI 6020 does not take account the short-wave and long-wave radiation, so in this paper we assume heat travels through conductors and convection flows. Figure 5 shows typical layer of the system. It also shows the components for convection on the both sides. The internal gain is the only heat source for this system, so convection is the important variable for this test (Van Treeck, 2010).

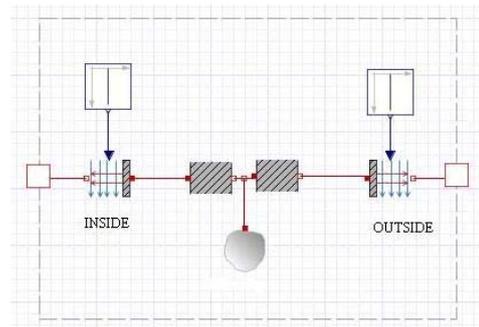


Figure 5 Typical layer

If a wall consists of many layers, then we put those additional layers between convection components, as depicted on Figure 6. This figure represents a detailed wall as a graph.

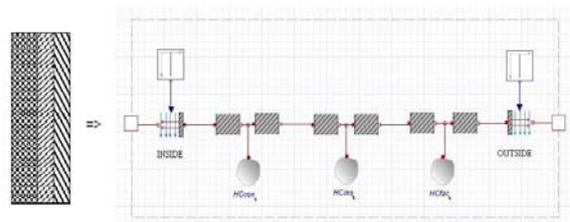


Figure 6 A wall with three layers

Table 3
Material properties of the Room type S (VDI Richtlinie 6020, 2001)

TYPE	CONSTRUCTION	THICKNESS m	λ W/(mK)	ρ kg/m ³	C J/(kgK)
Ceiling and floor	PVC covering	0.002	0.210	1300	1470
	Screed	0.045	1.400	2200	1050
	Rock wool	0.012	0.060	50	840
	Concrete	0.150	2.035	2400	1050
Internal walls	Cavity blocks	0.240	0.560	1300	1050
Internal door	Beech, solid	0.040	0.210	700	2520
External wall	Concrete	0.240	2.035	2100	920
	Insulation	0.062	0.047	75	840
	Façade slab	0.025	0.450	1300	1050

Table 4
Material properties of the window, two-panes glazing

TYPE	CONSTRUCTION	THICKNESS m	λ W/(mK)	ρ kg/m ³	C J/(kgK)
Window	Clear glass	0.006	1.000	2500	750
	Air	0.012		1.205	1.005
	Clear glass	0.006	1.000	2500	750

The window is two-panes glazing that contains air, so we have to treat this layer differently because conductance of air is zero. Therefore, instead of a thermal conductor we replace this component with body radiation component and convection component, as shown on Figure 7.

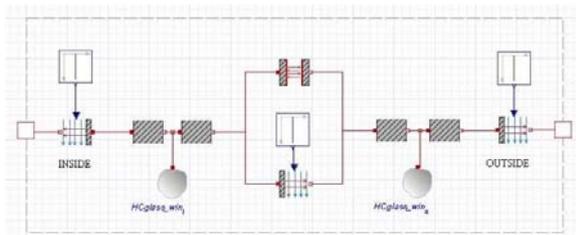


Figure 7 Air in window is simulated by body radiation and convection component

The next step is computing the parameter of each component. For detail explanation can be found on the Modelica Standard Library (Modelica Association, 2008).

The heat capacitor needs parameter C , heat capacity, that is defined as

$$C = cp \times m \quad (1)$$

where cp is specific heat capacity and m is the mass. The constant thermal conductance, G , is needed by thermal conductor and computed as

$$G = k \times \frac{A}{d} \quad (2)$$

where k is thermal conductivity, A is area, and d is thickness.

Next parameter is G_c , the convective thermal conductance, which is defined as

$$G_c = A \times h \quad (3)$$

where A is convection area, h is heat transfer coefficient which equals to $12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ for free convection and equals to $7.8 \times V^{0.78} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ and V is air velocity (m/s). The last parameter, which is needed to simulate the window, is G_r , the net radiation conductance between two surfaces. G_r of two parallel plates is stated as

$$G_r = \frac{A}{\frac{1}{e_1} + \frac{1}{e_2} - 1} \quad (4)$$

Table 5
 Computed parameters of the layers

COMPONENT	MATERIAL	W(x) m	D(y) m	H(z) m	A m ²	Vol m ³	C J/K	G(0.5d) W/K	G _{c,in} W/K	G _{c,out} W/K
Top / Bottom	PVC covering	3.5	0.002	5.0	17.5	0.035	66885	3675.00	29.225	29.225
	Screed	3.5	0.045	5.0	17.5	0.787	1819125	1188.89		
	Rock wool	3.5	0.012	5.0	17.5	0.210	8820	175.00		
	Concrete (I)	3.5	0.150	5.0	17.5	2.625	6615000	474833.33		
Wall-east	Cavity blocks	3.0	0.240	5.0	15.0	3.600	4914000	70.00	40.5	40.5
Wall-west	Cavity blocks	3.0	0.240	5.0	15.0	3.600	4914000	70.00	40.5	40.5
Wall-north	Cavity blocks	3.0	0.240	3.5	8.5	2.040	2784600	39.67	22.95	22.95
Door	Beech, solid	1.0	0.040	2.0	2.0	0.080	141120	10.50	5.4	5.4
Wall-south	Concrete (II)	3.5	0.240	3.0	3.5	0.084	1622880	59354.17	9.45	70
	Insulation	3.5	0.062	3.0	3.5	0.217	13671	5.31		
	Façade slab	3.5	0.025	3.0	3.5	0.087	119437.5	126.00		
Window	Clear glass		0.006		7.0	0.042	78750	2333.33	18.9	140
	Air		0.012		7.0	0.084				
	Clear glass		0.006		7.0	0.042	78750	2333.33		
Room	Air	3.5	5.000	3.0		52.5	63.5			

where A is area of plate, e_1 is emission value of plate 1 (from 0 to 1), and e_2 is emission value of plate 2 (from 0 to 1). With the emission of glass 0.91, a free convection between glasses, and area of window 7 m², we get Gr and Gc for air layer are 5.8440 m² and 84 W/K respectively. Computed parameters of other layers are shown in Table 5.

hours is beyond MapleSim pulse function (at the moment, the pulse function works well in unit second or less). Therefore we have to feed this internal gain with an external file, a spreadsheet that contains two columns, time in second and magnitude of the gain in watt respectively.

ROOM MODEL AND HEAT GAIN

This is one zone simple room which has 6 walls. With those heat transfer components we build the wall. There are 8 surfaces (floor, ceiling, north wall, east wall, south wall, west wall, door, and window). The outside temperature of external surfaces (south wall and window) is constant, 22°C. Other surfaces are bounded with zero heat flux (adiabatic).

MapleSim works in SI unit, second is default for time and Kelvin is default for temperature, therefore we have to adjust the unit for both input and output data according to the defaults. After all wall is set and putting required boundary conditions, we build the model as depicted on Figure 8.

The system has internal heat gain, which is a 1000 watt machine and operates everyday from 6.00 to 18.00. MapleSim has pulse function in signal blocks library, but unfortunately at the moment (the time the paper is written), there is bug in MapleSim (in this case MapleSim3) which makes this program can not generate the pulse function that has long span, the 12

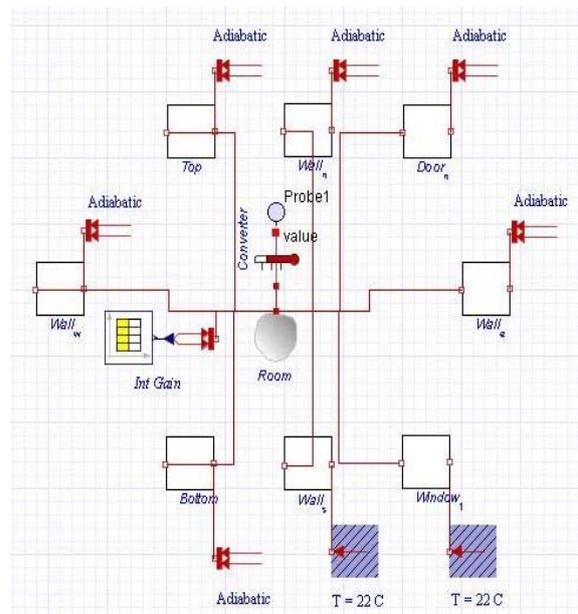


Figure 8 The room model, the overall system

However, the data from spreadsheet is discrete, and MapleSim will change it into continuous data, then the continued signal will overshoot or undershoot on the corners as shown on Figure 9.

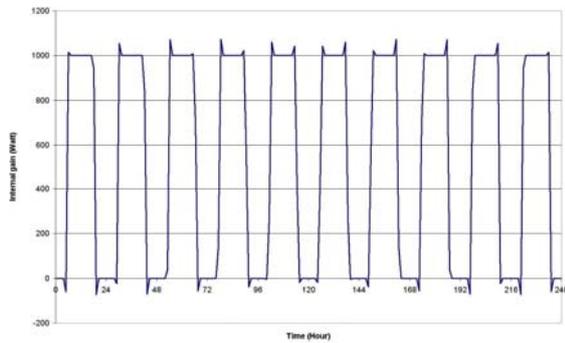


Figure 9 An example of internal gain within ten days

RESULTS IN SIMULATION

The simulation is run for 60 days with boundary condition as mention on Table 4. This is similar to the Example 1 of VDI 6020 test. VDI 6020 test used seven different simulation tools, but we just pick up one of the simulation results for the comparison. The results of first day, 10th day, 60th day, and 60 day simulation are plotted, as shown on Figure 10, 11, 12, and Figure 13 respectively.

Results from the MapleSim are little bit different from VDI results. Temperatures on starting/finishing internal gain also experience undershooting and overshooting. VDI simulation shows that the room temperature reaches steady states faster than MapleSim simulation as shown on the result of day 10th. In this work, the gain is generated discretely in hourly interval, then we have to use hourly time step. It is possible that time step influences the computation, therefore MapleSim result is slower to get steady state. A small time step computation may give a better achievement. However, in general MapleSim results show a good trend as VDI test.

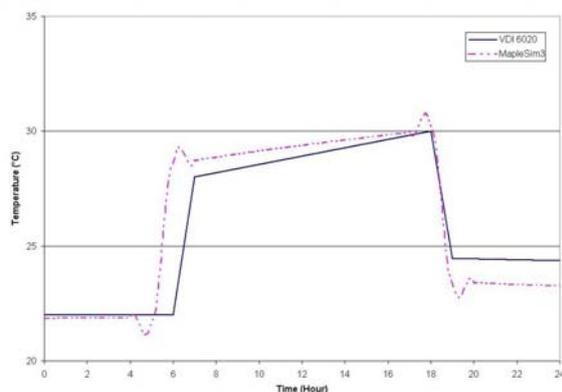


Figure 10 Simulation result on day 1

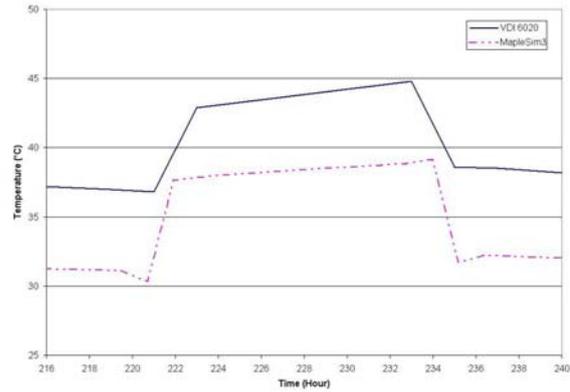


Figure 11 Simulation result on day 10

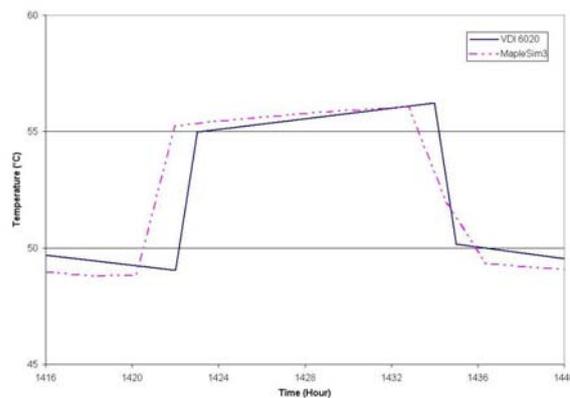


Figure 12 Simulation result on day 60

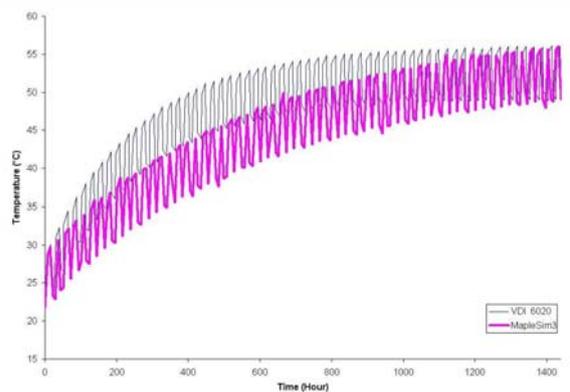


Figure 13 Simulation result for 60 days

CONCLUSIONS AND FURTHER WORK

It is shown that simulation model can be prepared like a systematic approach in construction process. It can help developing construction design in different level of detail. For that a complex system is broken down into basic components. After that we rearrange

and synthesize the basic component to simulate the overall system.

This model is one-dimensional heat transfer with lumped elements method. The results show that the model can simulate the dynamic energy flow in thermal building system. Though the gradient of the steady state of both results is different, but both simulations reach steady state at around day 60.

This work also shows that MapleSim can be used as an alternative tool to simulate the thermal building. Though MapleSim is relatively slow, especially for complex system, this tool (with its basic components in the library) is suitable for users with less computation background.

There are two aims for further work. First, before bugs fixed, we have to create input (in this case is internal gain) with combination of other functions, for example combining sine function and on-off function. Secondly, we extend this model to accommodate a multizone building.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by *Urlaubskasse des Bayerischen Baugewerbes e.V.*

REFERENCES

- Bauer, M. 2000. Computergestützte Wissensmodellierung im Konstruktionsprozess des Hochbaus, Doctoral thesis, Technische Universität München, München, Germany.
- Bauer, M. 2008. A Systematic Approach to Architectural Engineering, Presented at University of Texas, Austin, Texas, USA.
- Felgner, F., Agustina, S., Bohigas, R.C., Merz, R., Litz, L. 2002. Simulation of Thermal Building Behaviour in Modelica, Proceedings: 2nd International Modelica Conference, pp. 147-154, Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen, Germany.
- Hoh, A., Haase, T., Tschirner, T., Müller, D. 2005. A combined thermo-hydraulic approach to simulation of active building components applying Modelica, Proceedings of the 4th International Modelica Conference, Hamburg.
- Hohmann, Setzer, Wehling 2004, Bauphysikalische Formeln und Tabellen, Werner Verlag, Betz Druck GmbH, Darmstadt.
- Maplesoft 2001-2009, MapleSim user's guide.
- Maplesoft homepage, <http://www.maplesoft.com/products/maplesim/modelica.aspx>

Modelica Association 2008. Modelica Standard Library ver.3, Tutorial and Reference.

Modelica homepage, <http://www.modelica.org/>

Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., Grote, K.H., 2007, Engineering Design A Systematic Approach, Springer, London.

Van Treeck, C. 2010, the habilitation thesis.

VDI Richtlinie 6020 2001, Anforderungen an Rechen verfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation Gebäudesimulation, VDI, Düsseldorf, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

Wetter, M. 2006, Multizone building model for thermal building simulation in Modelica, Proceedings: Modelica Conference 2006 at arsenal research in Vienna, Austria.

MONITORING FOR SIMULATION VALIDATION

Robert Zach and Ardeshir Mahdavi

Department of Building Physics and Building Ecology, Vienna University of Technology,
Austria

ABSTRACT

One of the key problems in building simulation is to determine the accuracy of a simulation model. Due to the complexity of a building, a comprehensive and exhaustive mathematical proof is usually not possible. Therefore, an appropriate way to validate a building model is to compare simulation results with measurements obtained from real buildings. Such comparisons not only allow for the validation of simulation models used in the context of building design support, but also provide calibrated simulation models to be applied in the context of real-time simulation-assisted building systems control.

INTRODUCTION

This paper deals with the monitoring infrastructure necessary to validate building simulation models and implement simulation-based control strategies (Mahdavi et al. 2009, Orehounig et al. 2010). Required sensors are discussed and technologies for different domains are compared and assessed. Possible network infrastructures to collect the measured data are discussed. To fully validate building simulation models, a multi-layered architecture for concurrent energy, performance, and occupancy monitoring is defined.

Two buildings in Vienna, Austria are equipped with multi-layered monitoring systems. One is a new building, which already provides some monitoring infrastructure. This paper illustrates how this building can be enhanced with a comprehensive monitoring system, while reusing the existing infrastructure as much as possible. The second building was built more than 100 years ago and provides no reusable building automation infrastructure. Therefore, an independent system must be installed for monitoring.

Motivation

There is currently a paucity of systematic and comprehensive implementations of monitoring infrastructures in buildings (Raftery et al. 2010, J. O'Donnell 2009, Neumann and Jacob 2008). Thus, the critical benefits that could result from the integrated and concurrent analysis of multiple

building data streams are not exploited. Such benefits include:

- i) Energy optimization through improved management of technical building systems.
- ii) Increased awareness of building users regarding their impact on buildings' energy use.
- iii) Early detection (and treatment) of deficiencies and malfunctions in energy systems and devices, thus effectively supporting a preventive maintenance regime.
- iv) Successive building performance improvement and optimization via the analyses of dynamically updated building energy and performance data bases.
- v) Long-term accumulation of empirical information on buildings' energy and environmental performance toward improving the design, construction, and operation of existing and new buildings.

Further, to validate simulation models and to implement simulation-based control strategies, real-time sensor-data is required. Therefore a monitoring network is essential.

APPROACH

Research efforts involve the following steps. First, a network based monitoring in two buildings of the Vienna University of Technology will be realized to obtain real-world data. Then simulation models are validated and improved based on the monitored data. Finally, the models are used to execute simulation-based control strategies in real-world scenarios. The present paper focuses on the required design and implementation of the monitoring infrastructure.

Summary

First, an overview of relevant technologies for monitoring systems is presented. To structure technologies a four layer model is used. Then, two prototypical implementations of the proposed multi-layered monitoring system are described in detail.

The paper concludes with discussion and future outlook.

MONITORING NETWORK TECHNOLOGIES

Usually building communication networks are described with the three layer model defined in ISO 2004. This model is appropriate to describe network communication strategies, but lacks the coverage of sensor/actor technologies. It does not deal with the challenge of getting the information of different physical domains into an electronical signal and their different requirements regarding fieldbus networks. To fully cover monitoring strategies, an additional layer describing sensor/actor technologies is added as shown in Figure 1.

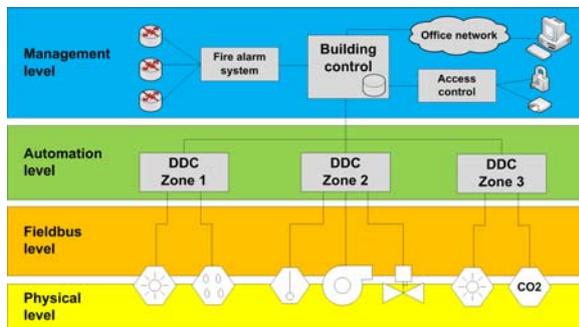


Figure 1 Four layer model of a generic monitoring system

Physical level

The physical level addresses pertinent sensory devices and technologies that are required toward an efficient, dynamic, and scalable acquisition of the required data. Table 1 provides an overview of relevant data streams together with their required sensor technologies.

Table 1

Data streams and required sensor technologies

	DATA STREAM	SENSOR TECHNOLOGIES
i	Energy use	(Sub-)Meters for electricity, gas, oil, water, etc.
ii	Indoor environment	Temperature, humidity, CO ₂ , VOC, illuminance
iii	Outdoor environment	Temperature, wind, rain, solar radiation
iv	Occupants' presence, actions, and feedback	Motion/presence detectors, number of people, location sensing
v	Environmental control systems states	Window and door states, blinds
vi	Economical information	Documents, reports, bills

Different sensor technologies do often require different fieldbus characteristics. For example, a presence-detector to turn on the light needs to send its information in a fraction of seconds while a CO₂

sensor for heating, ventilation, and air-conditioning (HVAC) can work with longer intervals (i.e., minutes).

Fieldbus level

The function of the fieldbus level is to transfer the measured data streams to the automation layer, which then acts as a backbone. Common service parameters for networks are throughput, reliability, security, scope, real-time, and power use. These characteristics can be used to describe a fieldbus, but it is not always possible to directly compare them based on these properties. For example, KNX has a much smaller throughput than LonTalk on the wire. But, depending on the system design and the grouping of devices in different KNX lines, the overall network load can be less than in a comparable LonTalk system. To get a starting point for technology decisions, current wired and wireless fieldbuses and their field of applications are listed in Table 2 and Table 3 (Daniels 2003, KNX 2004, LON 2010).

Different monitoring strategies can be used to get the measured data from the sensor to the management level. The sensor can send measurements event triggered when some predefined conditions occur, or periodically with a fixed interval, or the Direct Digital Controller (DDC) can poll the stations.

Depending on the data stream, different strategies fit best. For example, data from a presence detector is most accurate when an event based strategy is used while an electrical meter is usually polled with a periodic interval to obtain a temporal view. An event based strategy can also be used to reduce power consumption of battery or self-powered devices.

Table 2

Wired fieldbuses and their field of applications

FIELDBUS	FIELD OF APPLICATIONS
KNX/TP	General purpose fieldbus. Used for lights, blinds and HVAC systems. KNX is the successor of the European Installation Bus (EIB) and is therefore mostly used in the European Union.
LonTalk	General purpose fieldbus. Used for lights, blinds and HVAC systems.
M-Bus	Used for metering devices (electrical meter, heat meter, flow meter, etc.).
DALI	Used for controlling lights in isolated applications.

Table 3

Wireless fieldbuses and their field of applications

FIELDBUS	FIELD OF APPLICATIONS
ZigBee	Supports the dynamic creation of meshed networks which increases reliability and scope. ZigBee is based on the IEEE 802.15.4 standard and can work in the 2,4 GHz and 868 MHz ISM band. Most devices use the 2,4 GHz band which is often crowded when, for example, wireless local area networks (WLAN) are used too. ZigBee is used as a general purpose fieldbus.
EnOcean	Is optimized for low power consumption, which therefore allows the construction of self-powered sensor/actor devices. EnOcean uses the 868 MHz ISM band with amplitude modulation optimized for short packet transmission time and low power consumption. This increases throughput and reliability. EnOcean is mainly used for self-powered sensors and simple actuators.
KNX/RF	Is the wireless version of KNX. Only a few devices are available on the market at the time.
Z-Wave	Is designed for small systems in the field of home automation.
M-Bus/RF	Is the wireless version of M-Bus. Only a few devices are available on the market at the time.
IEEE 802.15.4	Defines only the lowest levels of a wireless communication. IEEE 802.15.4 is reused in some other standards and proprietary systems.

Automation level

The goal of the automation layer in a monitoring system is to transfer all data streams to a central control station. It therefore acts as a backbone which needs to handle higher data rates than the fieldbus networks.

Common network technologies in the automation level are Ethernet/IP, BACnet, KNX and LonTalk. Ethernet/IP provides high bandwidth, cheap mass-components and flexible integration possibilities and is therefore the most common technology for backbone networks. Underlining fieldbus packets can be encapsulated in Ethernet or IP frames (e.g. BACnet/Ethernet, BACnet/IP, KNX/IP, etc.) or the measured data can be directly transferred with pure Ethernet/IP communication (OPC Unified Architecture, proprietary Ethernet/IP protocol, etc.). Because Ethernet/IP provides only limited support for real-time data transfer and bandwidth allocation, a combination with an unpredictable office network is not recommended (Kastner et al. 2005).

Pure BACnet, KNX or LonTalk provides only limited bandwidth which is usually not sufficient for monitoring systems in the automation level.

Management level

The management layer handles the data storage, the visualization and the further processing of the data streams. Possible technologies for historical storage and abstract data representation are OPC (Data Access - DA, Historical Data Access - HDA, Unified Architecture - UA), BACnet/Web-Services (WS), oBIX and custom database designs.

OPC DA is highly used to provide a common interface to different automation and fieldbus networks in the management layer. So called OPC DA servers abstract the sensors and actors as data points. The data of the OPC servers can then be accessed with OPC clients, which can be a user interface or any other processing application. OPC DA server provide only live data and run only on windows operating systems. To provide historical data access the OPC HDA standard or a custom database is usually used (Iwanitz and Lange 2002, OPC 2010).

To overcome the restriction of running OPC DA and OPC HDA server on windows only and to integrate all OPC sub-standards (DA, HDA, etc.), the OPC UA standard was created. It provides high potential, but is not fully supported by common products yet (Mahnke et al. 2009).

The standards BACnet/WS (ASHRAE 2004) and oBIX (OASIS 2006) provide comparable functionality as the OPC standards, but are only rarely supported by available products at the time.

PROTOTYPICAL MONITORING IMPLEMENTATIONS

To validate real-life simulation scenarios, two buildings used to house offices, labs and lecture rooms of the Vienna University of Technology are partly equipped with necessary monitoring infrastructure.

One of the building is finished 2010 and provides reusable building automation infrastructure to various degrees. The second building was built more than 100 years ago and provides no reusable building automation infrastructure.

As such, these buildings are representative for a large number of existing building stocks in Vienna. They thus represent a wide range of technical challenges that need to be met in order to realize the postulated dynamic data acquisition and processing architecture in the context of existing buildings. Such challenges pertain specifically to the technology update requirements for incorporation of high-resolution sensory and metering capabilities, device connectivity, and cross-platform data transfer.

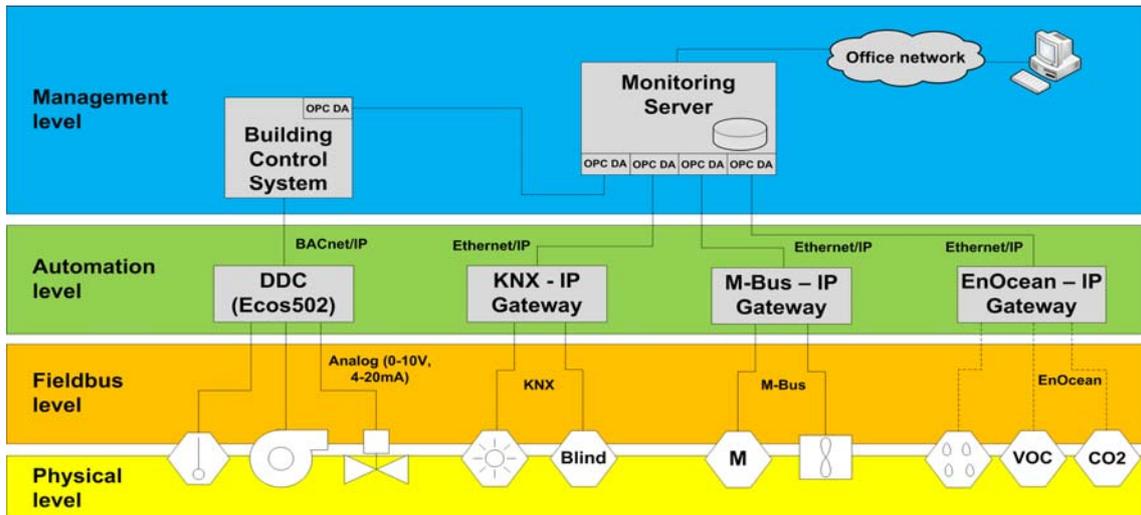


Figure 2 Four layer model of the monitoring system in Lehartrakt

Lehartrakt

Lehartrakt is a new building to be completed in 2010. It is equipped to various degrees with current building automation technologies. Therefore the monitoring system can reuse some of the sensor and network infrastructure to reduce installation efforts.

Figure 2 shows a four layer model of the entire monitoring infrastructure. Many sensors in the existing BACnet, KNX and M-Bus networks are reused. Electricity meters are added to the M-Bus system. All other sensors are added with the wireless fieldbus EnOcean to reduce installation costs.

To provide a common interface in the management layer, all building automation networks are accessed with OPC DA servers. The data-points in the central building control system are accessed through an OPC-tunnel. Since OPC-DA provides only live data, historical storage is achieved by storing all data points in a mysql database.

Because some sensors push their measured values

sporadic (depending on local changes) to the OPC server, it is necessary to store this data event based too. Therefore, data is only written to the database when a value changes in one of the OPC servers. To prevent flooding the database with unnecessary data, a value dead band is set depending on the sensor measuring range and accuracy. This event based data storage strategy maximizes temporal accuracy while minimizing the database size. To simplify data processing in some applications, periodic values can be generated with a 5 minute interval too.

To provide a scalable database design, all sensor data is written into one fixed table with the columns keyid, name, timestamp, value and quality. The keyid is the primary index for the table. The name field is the identifier of the sensor and needs to be unique for each sensor. To prevent overlapping data sets during the switch of summertime and wintertime the Coordinated Universal Time (UTC) is used as timestamp. The value field contains the measured data represented in units of the International System of Units (SI) where possible. The quality field

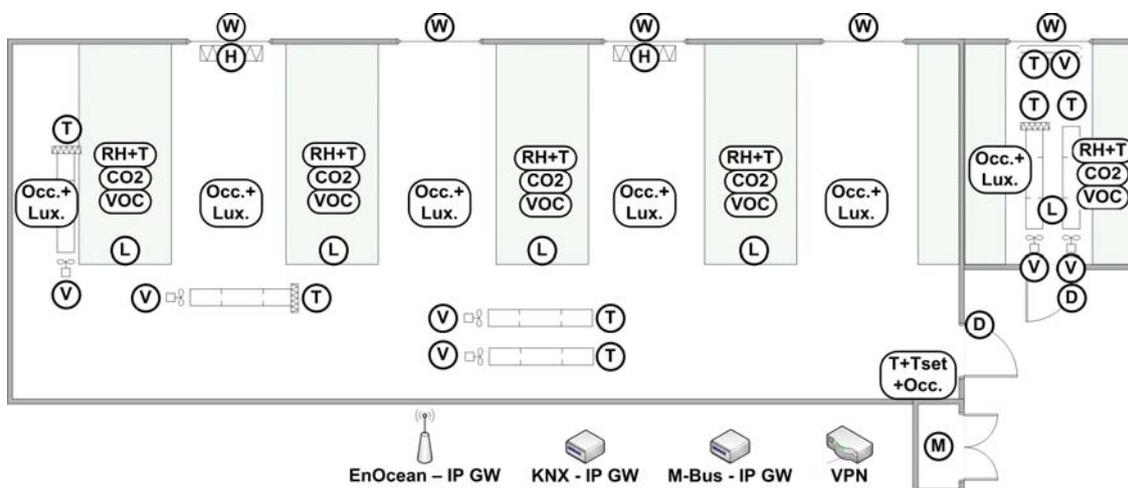


Figure 3 Floor plan including sensors of two laboratories in Lehartrakt

contains information about the measurement and network transfer accuracy where possible. Using this scalable database design, additional sensors can be easily added in the future. The user interface and other processing applications can access the current value directly from the OPC DA servers or use the mysql database for historical data access.

The monitored area in Lehartrakt covers two labs, two office rooms and one conference room. Figure 3 and Figure 4 show the floor plans including all sensors.

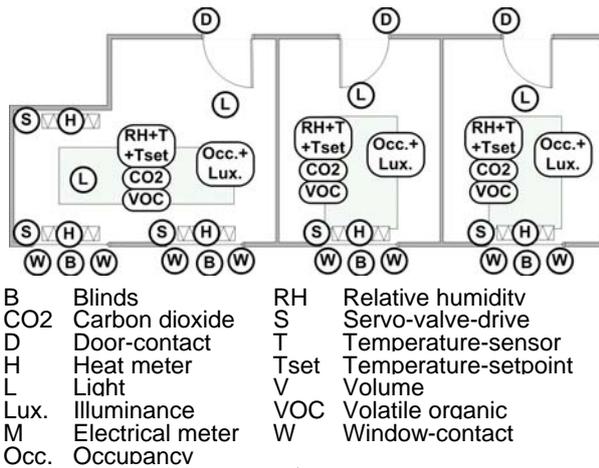


Figure 4 Floor plan including sensors of two office rooms and one conference room in Lehartrakt

Karlsplatz

The building Karlsplatz provides no reusable building automation infrastructure at all. To reduce installation costs, a fully independent wireless approach for the fieldbus network is used.

EnOcean was chosen as the wireless fieldbus system because of its optimized design for low power consumption. It allows the construction of self-powered sensor devices which reduces installation

efforts and increases installation flexibility. Nevertheless, some sensors still need a power supply due to the energy use of the sensor technology. For example, a CO₂ sensor needs a significant power supply to drive its heating coil.

Many sensors with integrated EnOcean communication technology are available on the market. Missing sensors can be easily extended with EnOcean-wireless support by using the EnOcean-modules of the STM and TCM series.

Figure 5 shows the four layer model of the entire monitoring infrastructure in Karlsplatz. To transfer the measured data from the EnOcean - IP gateway to the monitoring server, a Virtual Private Network (VPN) is used.

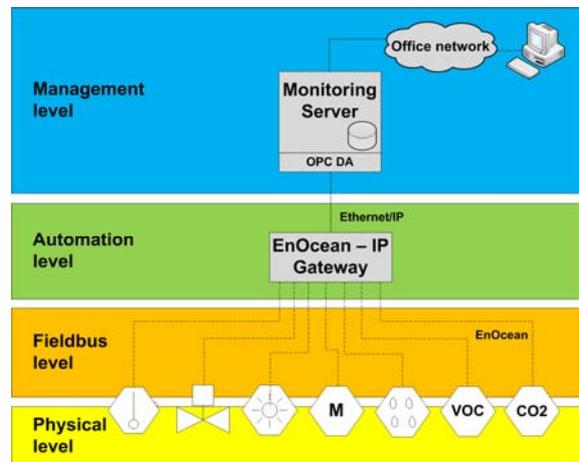


Figure 5 Four layer model of the monitoring system in Karlsplatz

Figure 6 shows the floor plan of the monitored area including all sensors. The heating energy of the radiators is calculated by measuring the temperature of the radiator and the room. Using the K values described in DIN 1994 an adequate calculation of the heat energy can be done.

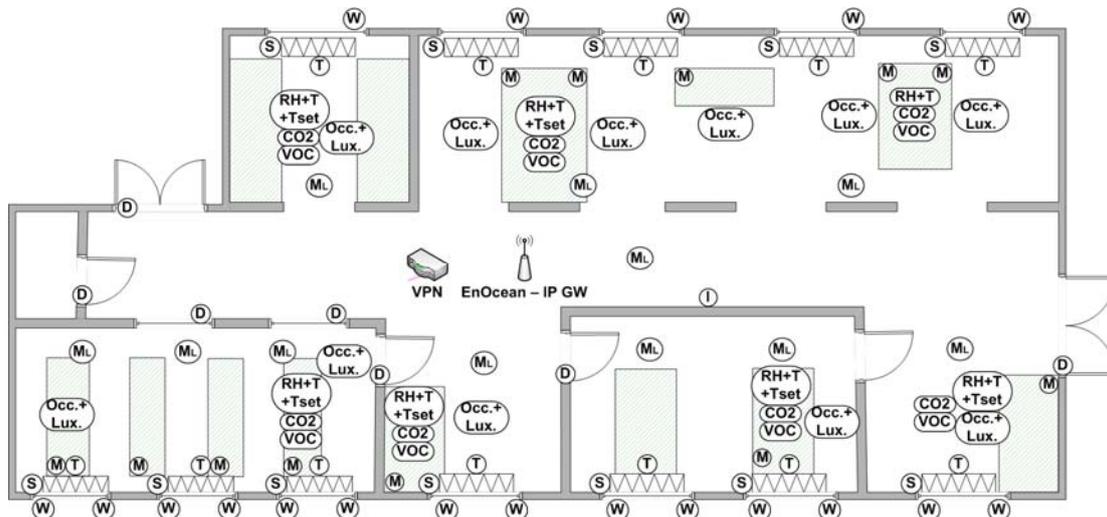


Figure 6 Floor plan including sensors in Karlsplatz

CONCLUSION AND DISCUSSION

The described monitoring infrastructure provides a flexible base to validate simulation models and to realize simulation-based control strategies.

Future research and development challenges involve the validation and improvement of thermal simulation models based on the monitored data. Two different building model validation techniques are possible. Firstly, the energy usage of the respective building/room is taken as input value for simulation and the calculated temperature trend is compared with the measured data for validation. Secondly, the temperature is taken as input value for simulation and the calculated energy usage is compared with the measured data for validation. Finally, the models will be incorporated in the control unit of these buildings toward a simulation-powered building system control strategy.

ACKNOWLEDGEMENT

The research presented in this paper was supported by funds from the “Innovative Projekte” of the Vienna University of Technology. Additional support was provided from the division Gebäude und Technik (Amtsdir. Hodecek) by supplying us with real-world testbeds.

REFERENCES

- ASHRAE 2004, ANSI/ASHRAE, Std. 135, BACnet – A Data Communication Protocol for Building Automation and Control Networks
- Daniels K. 2003, *Advanced Building Systems, A Technical Guide for Architects and Engineers*, Birkhäuser
- DIN 1994, DIN EN 834, *Heat cost allocators for the determination of the consumption of room heating radiators - Appliances with electrical energy supply*
- ISO 2004, ISO 16484-2, *Building automation and control systems (BACS) – Part 2: Hardware*
- Iwanitz F and Lange J 2002. *OPC: Grundlage, Implementierung und Anwendung*. Heidelberg: Hüthig. ISBN 3-7785-2866-1
- Kastner W., Neugschwandtner G., Soucek S., Newman H.M. 2005, *Communication systems for building automation and control*, Proceedings of IEEE, vol. 93, no. 6, pp. 1178-1203
- KNX 2004, Konnex Association, *KNX Specifications*, Version 1.1
- LON 2010, LonMark International, June 2010, <http://www.lonmark.org>
- Mahnke W, Leitner S-H, Damm M 2009. *OPC Unified Architecture*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-68898-3
- Mahdavi A, Schuss M, Suter G, Metzger S, Camara S, Dervishi S 2009. *Recent advantages in simulation-powered building systems control*. July 27 – 30, Glasgow, Scotland, Eleventh International IBPSA Conference.
- Neumann C and Jacob D 2008. *Guidelines for the evaluation of building performance*. Freiburg, Germany: Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems.
- OASIS 2006, *oBIX 1.0 Committee Specification 01*
- O'Donnell J 2009. *Specification of Optimum Holistic Building Environmental and Energy Performance Information to Support Informed Decision Making*. Doctorate, University College Cork, Ireland.
- OPC 2010, OPC Foundation, June 2010, <http://www.opcfoundation.org>
- Orehounig K, Mahdavi A, Pröglhöf C, Schuss M 2010. *Virtual implementation of a simulation-assisted passive cooling strategy in buildings*, 9 – 12 May, Antalya, Clima 2010, International Conference on Sustainable Energy Use in Buildings.
- Raftery P, Keane M, O'Donnell J, Costa A 2010. *Energy Monitoring Systems: value, issues and recommendations based on five case studies*. 9 – 12 May, Antalya, Clima 2010, International Conference on Sustainable Energy Use in Buildings.

MONITORING AND SIMULATING A PRIVATE HOUSE FOR BUILDING PERFORMANCE ANALYSIS

Zeynep Durmuş Arsan, Nihal Sökmen

Izmir Institute of Technology, Department of Architecture, TR-35430, Urla, Izmir, Turkey
 zeynepdurmus@iyte.edu.tr, nihalsokmen@iyte.edu.tr

ABSTRACT

The preliminary results of building performance analysis study aiming at retrofitting an existing house to fulfil passive house standards is presented. The case building, i.e. two storey private house in Izmir, Turkey, has been monitored and simulated for the winter period of 2010. Local data collection involves physical identification and measurements. Besides, a digital performance simulation model representing existing situation (pre-retrofit) of the house is developed. The simulation output is compared to the measured indoor air temperature, solid fuel, and electrical use data to refine and calibrate the model. At the end, the error ratios of digital model are obtained in order to predict factual performance of alternative architectural scenarios for energy efficient retrofit.

INTRODUCTION

Retrofitting a building is a way to adopt an existing one to energy efficient structure. Through this process, the detailed documentation (monitoring) of existing thermal performance characteristics and energy consumption pattern is of primal importance to understand problems and potentials housed in the building. For the decision of case-specific retrofitting strategies, a digital performance simulation model can be used as an effective tool to formulate set of retrofitting scenarios among one of which will be later chosen for the implementation. In order to have the most factual performance results of retrofitting scenarios, the difference between simulation and monitoring results, i.e. the error ratios of digital model, must be calculated.

This paper presents the preliminary results of building performance analysis study aiming at retrofitting an existing house to fulfil passive house standards. Using the private house located in Izmir, Turkey, we examine the results of data collection campaign during the winter period of 2010 as well as the correspondence between the empirically collected data and the initial simulation results.

Local data collection comprises two parts: physical identification, e.g. location, design qualities, building materials, construction technique, occupancy profile,

and measurements, e.g. energy consumption for heating, residential electrical use, indoor conditions and outdoor micro-climate.

The target of paper, at the end, is to find error ratios of digital model through refinement and calibration process by using values of indoor air temperature, solid fuel consumption and electrical use. In this way, a simulation model can provide more factual predictions about the consequences of alternative architectural scenarios for energy efficient retrofit.

PHYSICAL IDENTIFICATION

Location

The building performance analysis study is conducted in a private house in Izmir, a harbor city located in the western coast of Turkey. The building is situated in the suburb, gradually isolated land from the crowd of city, where two- or three-storey single detached houses lie on the southern slopes of a hilly area. It is located at the highest level of suburb, the altitude 205 m, longitude 27°19'67" E, and latitude 38°48'43" N. The house lies in northwest-southeast direction, 128° from north to east.

Description of the private house

The single detached house, built step by step between 1990 and 2008, consists of two floors without a basement; each has one flat. The flat on the first floor is used by the owner of house, while the other is rented periodically. The total area of each flat is approximately 100 m². Flats typically include a living room, kitchen, bathroom, WC and three bedrooms (Figures 1 to 4).



Figure 1 West view of the house



Figure 2 Southwest view of the house

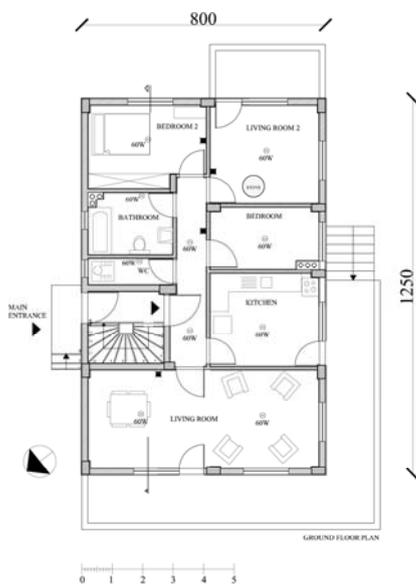


Figure 3 Ground floor plan

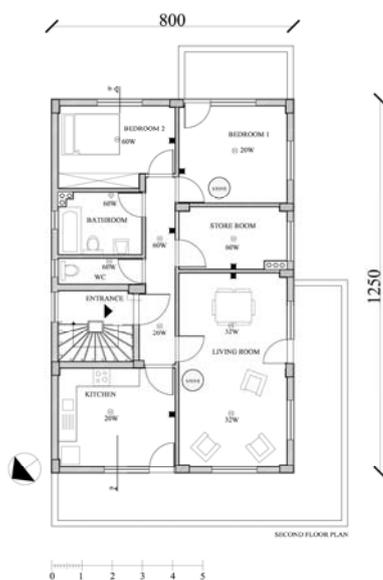


Figure 4 First floor plan

Building materials and construction technique

The construction of house is based on a reinforced concrete skeleton. Exposed surfaces are non-insulated. It is essential to point out that the building does not fulfill the Turkish Standard on Thermal Insulation in Buildings (TS 825) which came into force in 2000 and partly renewed in November 2008. External walls consist of cement mortar bound horizontal perforated bricks (190/190/135 mm) with a density of 900 kg.m^{-3} and a conductance of $0.45 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (TS 825, 2008). Walls have 2 cm interior and 2.5 cm exterior cement-lime plaster finishes ($1800 \text{ kg.m}^{-3} / 0.87 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$). The calculated wall U-value amounts to $1.553 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. The house has a non-insulated flat roof, composed of 10 cm reinforced concrete slab with 1 mm outer bitumen ($1050 \text{ kg.m}^{-3} / 0.17 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) and 2 cm interior cement-lime plaster with U-value of $4.709 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. The calculated ground slab U-value ranges from 0.905 to $3.251 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. In terms of openings, windows and doors are made of aluminum frame with 8 mm air-gap double-paned clear glass (4 mm) with U-value of $3,019 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

Occupancy profile

During winter season of 2010, the ground floor was rented between mid-January and mid-April for a family, i.e. a young couple with a mother. The first floor was occupied by three persons, i.e. parents and a daughter. In weekdays, most of the building occupancy for whole building occurs between 18:00 and 08:00 except the occupancy of mother who stay in whole day on the ground floor. The unoccupied spaces are the living room 1 in the ground and storeroom in the first floors.

MEASUREMENTS

This study uses Monitored Energy Protocol (MEP), thus two types of monitoring are performed: monitoring of energy consumption and monitoring of thermal parameters (Santamouris, 2005). The house is monitored in whole winter (from January 1st to March 31st), but this paper focuses on the results of the representative month, February 2010. The energy consumed in the house can be classified according to the type of fuel: solid fuel (coal and wood) for space heating, grid electricity for equipment, plugs, hot water production and lighting, and LPG for cooking. Except LPG, the other two are monitored periodically. As for thermal parameters, the indoor air temperature measurements are crucial, since it will later be used in finding the error ratios of digital model.

Energy consumption for space heating

The building has neither central heating nor cooling system. Instead, the occupants applied heating intermittently and to a limited number of rooms in the house. In both floors, the stove using solid fuel

(coal and wood) is the main heat supplier. In the ground floor, the only heated space was the living room 2, while in the first floor, there were two stoves located in the living and child (bedroom 1) rooms (note to circles in Figure 3 and 4). Only the first floor was monitored for space heating. Apart from the stoves, occupants of the first floor sometimes preferred using electrical radiant heater to heat up the child room at late nights and the kitchen at early mornings. In order to calculate heat by suppliers, daily amount of solid fuel and daily duration of use of electrical heater were noted down.

Residential electrical use

The inspection was made in order to evaluate electrical loads due to lighting, domestic equipment, hot water production and heating. In both floors, there is no need for artificial lighting in daytime. Table 1 shows the minimum and maximum values of internal electrical loads defined in this study.

Table 1
Values of internal electrical loads

INTERNAL LOAD	MAXIMUM	MINIMUM
Lighting devices	60 W	20 W
Domestic equip.	1200 W	30 W
Hot water heater	1500 W	-
Radiant heater	2000 W	-

The energy consumption for electricity was recorded with a portable energy analyzer, ENTES MPR63 of a local producer, in every fifteen minutes. Because of the scarcity in number of energy analyzer, only the first floor was monitored for a particular week in February (from January 31st to February 6th). It is clear from Figure 5 that the consumption rises up in weekdays when the occupancy mostly occurs for 06:00 - 08:00, 12:00 - 13:00 and 18:00 - 24:00 at weekdays and 09:00-24:00 at weekends.

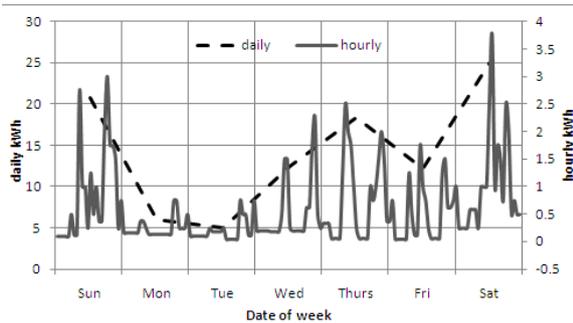


Figure 5 Daily and hourly electrical use between January 31st and February 6th

Indoor conditions and outdoor micro-climate

The main aim of air temperature measurements was to follow internal fluctuations related to outdoor climatic conditions, physical capacity of building envelope, and occupancy pattern. Furthermore, the

degree of satisfaction about winter thermal comfort in different thermal zones of the house was questioned. The specific target of this paper is to find the error ratios of digital model by using indoor air temperature for calibration. Therefore, the private house was equipped with tools for seasonal internal and external climate measurements. Indoor thermal parameters like air temperature, relative humidity and luminance levels were recorded with totally 10 HOBO U12 dataloggers, placed at a height of 150 cm in various rooms in both floors, symbolizing 10 separate zones in the simulation model (Figure 3 and 4). Outdoor thermal parameters like air temperature, relative humidity, wind speed and wind direction are measured by the meteorological station (Comet datalogger combined with R.M. Young wind speed, direction, relative humidity, and dry-bulb air temperature sensors), placed on the roof of house.

According to recorded climatic data, during February 2010, the number of heating degree-hours was 4568 as the base temperature of 15°C (Table 2). Monthly mean air temperature and relative humidity were 11.8°C and 67.6%. The average wind speed was 1.4 m/s from south, yet colder winds were from west/southwest with quite above the averages. Table 2 indicates minimum, maximum and diurnal ranges for four climatic parameters specific to the case area. The big difference in diurnal ranges indicates the instability of weather conditions.

Table 2
Range of measured hourly outdoor climatic parameters in February 2010

	MIN RANGE	MAX RANGE	DIURNAL RANGE
Air temp. °C	-0.6 – 15.4	3.8 – 22.8	1.9 – 9.4
Relative hum. %	30.8 – 79.9	62.9 – 96.7	14.5 – 62.9
Wind speed m/s	0.07 – 1.1	1 – 7.8	0.8 – 7.4
Wind direction	SE – SW	S – E	–

SIMULATION

Digital building performance simulation helps the architects and engineers evaluate environmental performance of existing buildings and define their energy saving potentials. There are many building simulation softwares available, among which, some are hourly simulation models, which can provide detailed hour-by-hour energy and environmental performance analysis. A complex digital performance simulation model was prepared by using DesignBuilder v.1.8.1., a software tool simulating dynamically the thermal performance of buildings and their systems (DB, 2008).

Existed IWEC.epw weather file of Izmir was edited with on-site measured outdoor micro-climate parameters such as dry-bulb air temperature, relative humidity, and wind speed/direction in an hourly

basis. Global solar radiation and barometric pressure were extracted from the closest local meteorological station located 15 km far on the south of case area. Calculated dew point temperature and direct/diffuse solar radiation were also added into new weather file.

The house was modeled with all parts and each room is modeled as separate zones. Real physical features for each space are entered (Figure 6). The internal loads including lighting, domestic equipments, cooking facilities, hot water production and occupancy, and the operating schedules were specified based on-site observations and interviews. Occupant density and occupancy schedule per room were determined. The unheated and heated zones in the house were separated and heating efficiency of stove (fueled by coal and wood) was estimated as 40%. Set point temperature for heated rooms were accepted as 26 °C in both floors. All simulations were conducted with an assumption of 0.4 ac.h⁻¹ infiltration rate (Table 4).

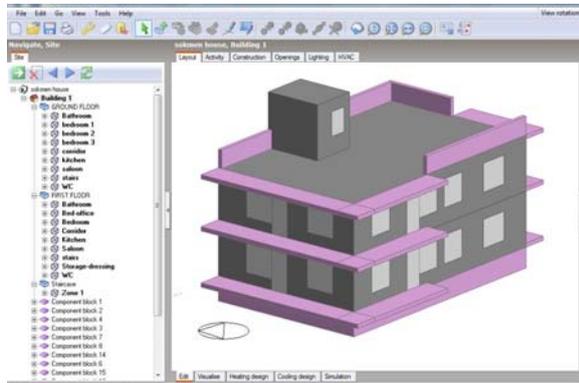


Figure 6 Screenshot of modeled house

Model calibration process

It should be emphasized that the broader purpose of this study is to predict, within reasonable calibration levels, future thermal and energy profile of the private house. Thus the calibration of simulation is necessary for the accuracy and usability of digital model. It is defined in three guidelines: ASHRAE guideline 14-2002: measurement of energy and demand savings (ASHRAE Guildeline, 2002), IPMVP: international performance measurement and verification protocol (IPMVP, 2001), and U.S. M & V guidelines: measurement and verification for federal energy projects (M & V Guidelines, 2008). The calibration process compares the results of simulation with empirical data and tunes the simulation until its results closely match the measured data.

Considering availability of measurement cycle, the calibration with hourly data approach is employed in this paper. Three types of data were utilized through calibration process. Model predictions for hourly electrical use and indoor air temperature were compared with measured hourly ones. Else, predicted

monthly solid fuel data was compared with the collected one on daily basis.

Three guidelines define two statistical indices: hourly mean bias error (MBE) and coefficient of variation of the root mean squared error (CV(RMSE)). Lower values of the latter informs us about better prediction by digital model. Several iterations are required to reach acceptable levels of error ratios. The tolerances of hourly calibration indices are specified in Table 3.

Table 3 Acceptable error ratios for hourly and monthly data calibration

STATISTICAL INDICE	ASHRAE 14-2002	IPMVP	MVFEM P
hourly	MBE	±10	±10
	CV(RMSE)	30	10 – 20
monthly	MBE	±5	–
	CV(RMSE)	15	1 – 5

RESULTS AND DISCUSSION

Through model calibration, indoor air temperature values of 10 zones were evaluated with a full month hourly comparison (672 hours). They were also tuned by using collected solid fuel and monitored grid electricity data. The model inputs were nearly 120 times revised. The model assumptions and finalized results are indicated in Table 4 – 6.

Table 4 Model assumptions before and after calibration

		Ground floor				First floor					
		LVR1	LVR2*	C	B2	LVR*	C	K	SR	BI*	B2
lighting (W/m ²)	BC	-	5	-	-	3	-	2	-	2	-
	AC	-	5	-	-	3	-	2	-	2	-
plug (W/m ²)	BC	-	-	-	-	10	-	25	-	-	-
	AC	-	-	-	-	59	-	32	-	70	-
occ. dens. (m ² /pers.)	BC	-	0.22	-	0.18	0.2	-	0.23	-	0.07	0.18
	AC	-	0.22	-	0.18	0.2	0.11	0.18	0.15	0.07	0.18
set point t. (°C)	BC	-	26	-	-	26	-	-	-	26	-
	AC	-	30	-	-	26	-	-	-	25	-
infiltr. rate (ac.h ⁻¹)	BC	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	
	AC	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	
efficiency coefficient of heat. s.	BC	-	0.4	-	-	0.4	-	-	-	0.4	-
	AC	-	0.3	-	-	0.3	-	-	-	0.3	-
radiant fraction of heat. sys.	BC	-	0.5	-	-	0.5	-	-	-	0.5	-
	AC	-	0.8	-	-	0.6	-	-	-	0.7	-

* Rooms heated by stove; BC: before calibration, AC: after calibration, LVR: living room, C: corridor, B: bedroom, K: kitchen, SR: storeroom

Results for indoor air temperature

Figures 7 to 16 depict simulated to measured mean hourly indoor air temperatures for 10 zones in February 2010. By analyzing the results of hour-by-hour indoor measurements in ‘unheated rooms’, it is deduced that air temperatures were greatly influenced by occupancy patterns of the rooms. Thus occupation schedule of these rooms were tuned in detail. Besides, internal loads not by lighting, but domestic equipment was found influential in indoor thermal conditions of unheated spaces especially in

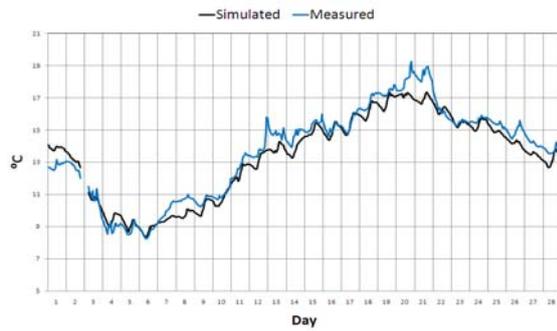


Figure 7 Simulated versus measured indoor air temperature in living room 1 in ground floor (mean hourly values for February 2010)

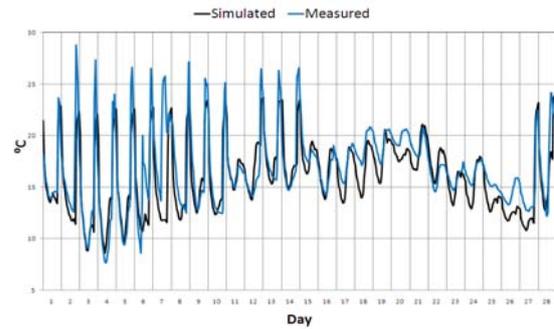


Figure 11 Simulated versus measured indoor air temperature in living room in the first floor (mean hourly values for February 2010)

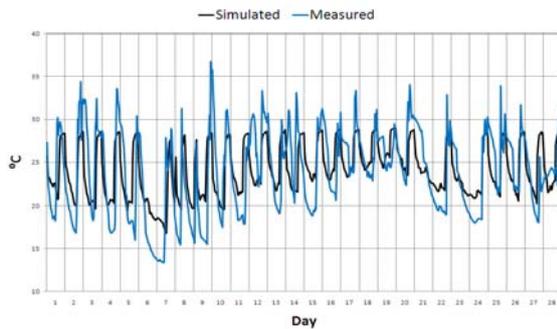


Figure 8 Simulated versus measured indoor air temperature in living room 2 in the ground floor (mean hourly values for February 2010)

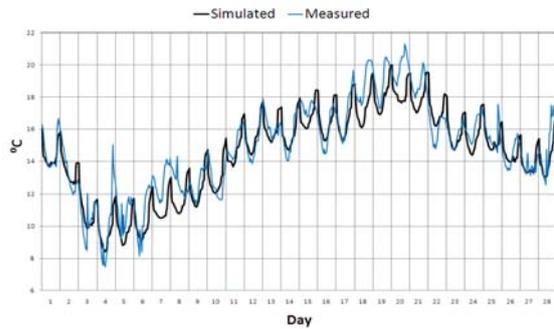


Figure 12 Simulated versus measured indoor air temperature in kitchen in the first floor (mean hourly values for February 2010)

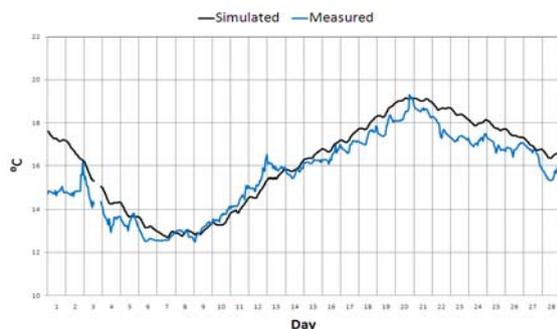


Figure 9 Simulated versus measured indoor air temperature in corridor in the ground floor (mean hourly values for February 2010)

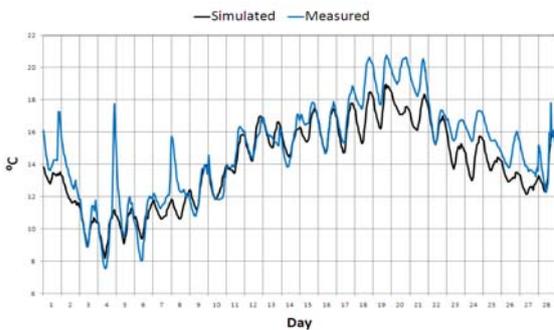


Figure 13 Simulated versus measured indoor air temperature in corridor in the first floor (mean hourly values for February 2010)

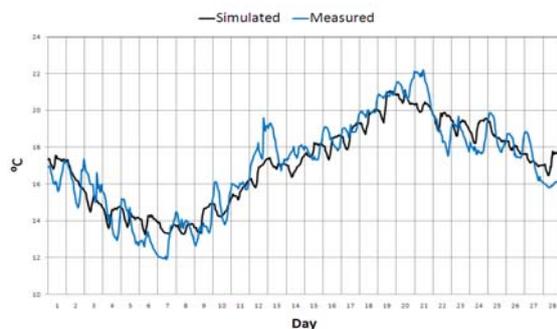


Figure 10 Simulated versus measured indoor air temperature in bedroom 2 in the ground floor (mean hourly values for February 2010)

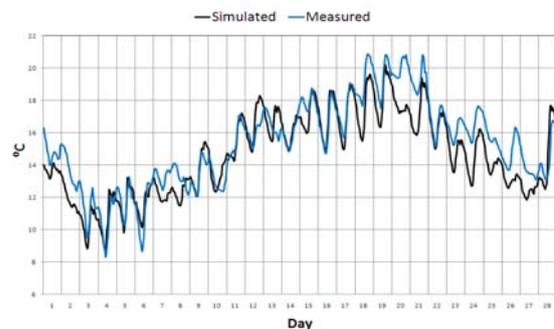


Figure 14 Simulated versus measured indoor air temperature in storeroom in the first floor (mean hourly values for February 2010)

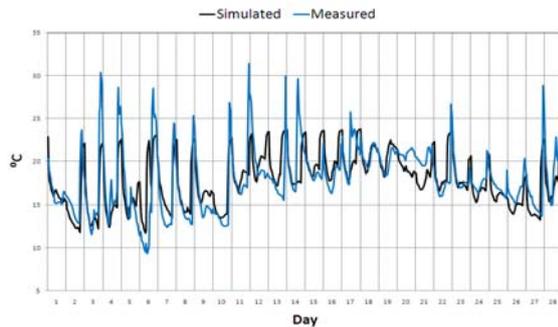


Figure 15 Simulated versus measured indoor air temperature in bedroom 1 in the first floor (mean hourly values for February 2010)

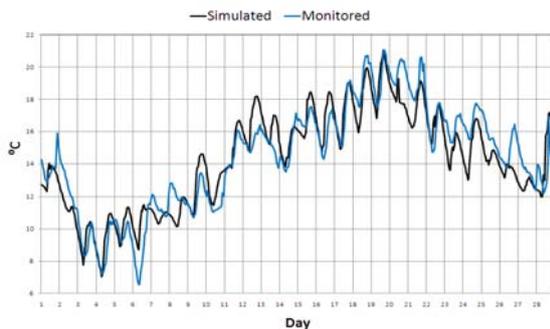


Figure 16 Simulated versus measured indoor air temperature in bedroom 2 in the first floor (mean hourly values for February 2010)

colder days. Yet they mostly fluctuate day-by-day, and hard to generalize. Therefore, the deviations in temperatures are possibly caused by equipment and cooking scheduling.

In rooms heated by stove (Figures 8, 11 and 15), measured peak temperatures fluctuates, and this makes harder to define a set point temperature for each room. This problem was overcome by testing many options for set point temperature (Table 4). Besides, there is no consistency on starting a room to heat, because of personal choices. That's why the higher MBE and CV(RMSE) values are found for heated rooms. Table 5 presents that the indices for 10 zones are totally within the acceptable tolerances specified by three guidelines, while those for heated spaces are gradually higher due to reasons explained above.

Table 5 Error ratios for indoor air temperature

Indoor air temperature (°C)	Ground floor				First floor					Average	
	LVR1	LVR2*	C	B2	LVR*	C	K	SR	B1*		B2
MBE _{hourly}	-2.5	0.9	3.3	-0.1	-4.3	-5.8	-2.5	-4.5	-0.4	-1.1	-1.7
CV(RMSE) _{hourly}	4.9	15.7	5.4	5.6	14.2	9.2	7.2	8.4	14.6	8.7	9.4

* Rooms heated by stove; LVR: living room, C: corridor, B: bedroom, K: kitchen, SR: storeroom

Results for heating energy consumption

The inputs were tuned for heating system according to daily data based on information obtained by interviews with occupants. The amount of coal and wood in kilogram consumed per day and the number of heated days give us information about monthly solid fuel consumption in kcal. The model prediction is mainly calibrated by changing the efficiency coefficient and radiant fraction values of stoves (Table 4). Table 6 indicates that daily and monthly indices for solid fuel consumption are totally within the acceptable tolerances specified by three guidelines.

Table 6 Error ratios for solid fuel and electricity consumption

First floor (%)	MBE _{hourly}	MBE _{daily}	MBE _{monthly}	CV(RMSE) _{hourly}	CV(RMSE) _{daily}	CV(RMSE) _{monthly}
Solid fuel	-	1.3	1.8	-	9.7	1.8
Electricity	7.5	7.8	-	131.8	54.7	-

Results of electrical use

Depending on the availability of hourly electricity consumption data measured for the first floor, the calibration study was performed on weekly basis (from 1st to February 6th). The calibration tolerances with hourly data were found extremely above the acceptable levels even if the power densities of equipment, lighting, radiant heater and hot water heater were checked carefully and tuned several times. The problem may arise from that operating schedules of electricity consumed domestic devices is hard to be defined. It is almost impossible to generate a generalized type of schedule for electrical use, since it is case dependent on occupancy pattern and habits, ambient weather conditions, age of equipments, as well as differentiating coefficients of efficiency for electrical equipments and lighting devices in real conditions. Table 6 indicates that hourly and daily indices are totally outside the acceptable tolerances specified by three guidelines.

CONCLUSION

This paper presented the error ratios of digital simulation model employed for analysing building performance and developing retrofitting scenarios for energy efficiency. Necessary data and information of the private house have been collected and measured on site for heating season of 2010 as input of digital model. The model has been refined to comply with the calibration. The calibration process and refined input data are described in detail. After calibration, the model can predict the factual energy usage, especially affected by the physical problems of building both for energy gain and saving. Therefore, this was one of essential reasons why we first try to reach acceptable levels of error ratios for indoor air

temperature, rather than error ratios for energy consumption for space heating and electrical use.

On the other hand, in terms of electrical use and space heating in the private house, the differences and errors exist between simulated and measured results. The main reasons for these errors can be analyzed as follows:

- the actual randomness of the operating schedule of internal loads, e.g. lighting, hot water producer, domestic equipments, and radiant heater, in the house can not be simulated exactly in the model.
- the software is more specialized on the simulation of HVAC systems, not on a domestic heater as the stove.
- the software can only simulate one type of solid fuel, not as of both coal and wood in this case.
- the software provides results for total fuel consumption per fuel type in the building level, but not partly in each zone level.

ACKNOWLEDGEMENT

This research, as an ongoing master study in the Department of Architecture, is supported by the grant of the Izmir Institute of Technology, Commission for the Scientific Research Projects; project: 'Retrofit of the Existing House for Upgrading to Zero Energy House Standards', BAP 2010IYTE29, scientific coordinator: Z. Durmuş Arsan, Izmir, Turkey. We would like to thank Başak Güçyeter, the PhD Student in the same university for her valuable contributions to model calibration process.

REFERENCES

- ASHRAE Guideline 14-2002: Measurement of Energy and Demand Savings. 2002. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta.
- DB (2008). DesignBuilder Building Simulation Software (Version 1.8.1.) URL: www.designbuilder.co.uk.
- IPMVP: International Performance Measurement and Verification Protocol-Concepts and Options for Determining Energy and Water Savings V.1. 2001. International Performance Measurement and Verification Committee.
- M & V Guidelines: Measurement and Verification for Federal Energy Projects, Version 3.2008. U.S. DoE, Federal Energy Management Program.
- Santamouris, M. 2005. Energy Performance of Residential Buildings: A Practical Guide for Energy Rating and Efficiency, James & James/Earthscan USA, London.

TS 825 - Turkish Standard on Thermal Insulation in Buildings. 2008. Official Gazette, 09.09.2008, #27019, Turkish Republic - The Ministry of Public Works and Settlement.

SIMULATION EINER PRÄDIKTIVEN RAUMTEMPERATURREGELUNG UNTER VERWENDUNG EINER IDEALEN WETTERVORHERSAGE

Gregor Görtler¹, Barbara Beigelböck²

¹ Fachhochschulstudiengänge Burgenland Ges.m.b.H., Pinkafeld, Österreich

² A. Porr Allgemeine Baugesellschaft AG, Wien, Österreich

KURZFASSUNG

Durch die Anwendung von prädiktiven Regelalgorithmen (MPC-Model Predictive Control) für die Raumheizung versprechen sich Errichter und Betreiber eine nennenswerte Energieeinsparung.

Mittels einer Simulation soll für einen ausgewählten Fall das Energieeinsparpotential eines prädiktiven Regelalgorithmus zur Raumtemperaturregelung unter Verwendung einer idealen Wettervorhersage im Vergleich zu gängigen Algorithmen (PI-Regler, Zweipunktregler) abgeschätzt werden.

Als Regelstrecke mit der Regelgröße Raumtemperatur dient ein Raum mit Fußbodenheizung, der in TRNSYS modelliert wurde. Mittels geeigneter Identifikationsmethoden wurde ein lineares Zustandsraummodell der Regelstrecke entworfen, welches vom prädiktiven Regelalgorithmus, der in MATLAB programmiert wurde, verwendet wird. Durch Einbindung eines Referenzwetterdatensatzes aus der TRNSYS-Bibliothek, welcher dem Regelalgorithmus zur Verfügung gestellt wird, sind alle relevanten Wetterdaten bereits im Voraus bekannt (ideale Wettervorhersage).

Für die in diesem Beitrag betrachtete Konfiguration ergab sich ein Energieeinsparpotential von ca. 10 %, pro Jahr bei der Verwendung eines MPC-Reglers verglichen mit einem PI-Regler.

ABSTRACT

Due to the use of MPC (Model Predictive Control) for room heating applications users and constructors expect nameable energy savings.

By usage of a simulation for a special case the energy saving potential of predictive control algorithm for room temperature control in connection with an ideal weather forecast, in comparison to established algorithms (PI-control, two level controller) is estimated.

The controlled system with the control variable room temperature is a room with floor heating which was modelled in TRNSYS. A linear state space model of the controlled system was derived with suitable identification methods. This model was used by the

predictive control algorithm, which was programmed in MATLAB. The weather data was taken from the TRNSYS library and has been made available also for the control algorithm, so that an ideal weather forecast was established.

For the example considered in this paper, the amount of energy saving was 10% per year with the MPC-controller compared to a PI-controller.

EINLEITUNG

Energieeinsparungen durch intelligente Regelungen sind in Zeiten des Klimawandels und zunehmend erschöpfter fossiler Ressourcen ein Gebot der Stunde. Einen besonderen Beitrag können moderne Regelsysteme in der Gebäudetechnik leisten, da der energetische Endverbrauch zu einem erheblichen Teil von Raumheizung- und klimatisierung beeinflusst wird. Durch Einbeziehung einer Wettervorhersage und Verwendung eines prädiktiven Regelalgorithmus sollte eine Energieeinsparung gegenüber herkömmlichen Reglern möglich sein. In manchen Fachartikeln, wie z.B. bei Schmid (2008) werden sogar Einsparpotentiale bis zu 40% publiziert.

Durch Simulation einer Raumtemperaturregelung soll für einen ausgesuchten Raum mit Fußbodenheizung versucht werden, Energieeinsparpotentiale sowie Stärken und Schwächen eines prädiktiven Regelalgorithmus abzuschätzen. Alle in diesem Beitrag angeführten Untersuchungen sind im Detail in der Diplomarbeit von Frau Beigelböck (2009) nachzulesen.

STAND DER TECHNIK

Im Wesentlichen befindet sich die prädiktive Regelung in der Gebäudetechnik noch in der Entwicklungsphase. Käufliche Produkte existieren zwar bereits am Markt, sind jedoch noch wenig etabliert.

Einen kleinen Einblick in bestehende Pilotanlagen zeigen z.B. Bollin (2008) oder Gwerder (2007).

Ein größeres Forschungsprojekt, welches sich mit prädiktiver Regelung und Wettervorhersage beschäftigt, ist das OptiControl-Projekt (2010), bei dem unter Anderem auch die ETH Zürich beteiligt

ist. Das Projekt startete 2007 und läuft über drei Jahre. Auf der Webseite des Projekts wird eine große Anzahl an Artikeln zum Thema MPC und Wettervorhersage im *.pdf-Format auch zum freien Download angeboten.

SIMULATIONSTECHNISCHE UNTERSUCHUNG

Abgrenzungen

Da eine wesentliche Aufgabe darin bestand, Unterschiede zwischen herkömmlichen und prädiktiven Regelalgorithmen herauszuarbeiten, wurde das Objekt der Betrachtungen möglichst einfach gestaltet. Untersucht wurde in diesem Fall das Temperaturverhalten eines Raumes mit Fußbodenheizung (die wesentlichen Eckdaten des Raumes sind in Tabelle 1 angeführt). Die Regelgröße stellte die Raumtemperatur dar, als Stellgröße wurde die Vorlauftemperatur gewählt (die Wärmebereitstellung wurde daher nicht mitmodelliert). Die Störgrößen stellten lediglich die Außentemperatur und die solare Einstrahlung dar. In der Realität wirken natürlich noch eine Vielzahl anderer Störgrößen, wie z.B. innere Lasten oder Verschattungen, um nur zwei wichtige Faktoren zu nennen.

In der Simulation wurde der Raum nur beheizt, eine Kühlung war nicht vorhanden. Der natürliche Luftwechsel wurde mit $0,25 \text{ h}^{-1}$ festgelegt, eine mechanische Wohnraumlüftung war nicht vorhanden.

Die Betrachtungen beschränkten sich auf die Vorgänge in der Heizperiode.

Tabelle 1: Wesentliche Daten des Raumes

Grundfläche	30,7 m ²
Volumen	79,0 m ³
U-Wert Außenwände	0,3 W/(m ² K)
Außenwandfläche Ost	20,8 m ²
Verglasungsanteil Ost	26 %
Außenwandfläche Süd	11,8 m ²
Verglasungsanteil Süd	50 %

Als Regelalgorithmus wurde ein linearer MPC-Algorithmus aus der Model Predictive Control Toolbox (Bemporad (1995)) von MathWorks verwendet. Der ausgewählte MPC-Algorithmus verwendet ein lineares Zustandsraummodell des Raumes und erlaubt die Vorgabe von Stellgrößenbeschränkungen (constraints) sowie von Gewichtungen (weights) für die Regelgröße und die Stellgröße. Theoretische Hintergründe zur prädiktiven Regelung

zeigen z.B. Bemporad (1995), Dittmar (2004) oder Wang (2009).

Sowohl für die Wetterdaten als auch für die Wettervorhersage wurde derselbe Wetterdatensatz verwendet. Das bedeutet, dass in der Simulation das vorausgesagte Wetter auch immer exakt dem tatsächlichen Wetter entsprach (ideale Wettervorhersage). Dieser Weg wurde gewählt, um das höchstmögliche Potential des verwendeten Algorithmus aufzuzeigen.

Simulationsumgebung

Abbildung 1 zeigt die Struktur der Simulation im TRNSYS Simulation Studio.

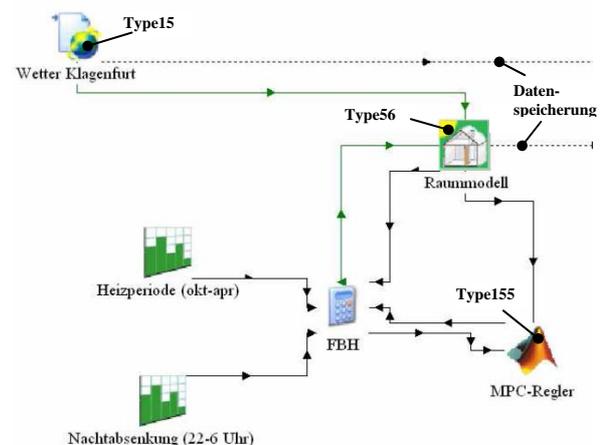


Abbildung 1: Struktur der Simulation in TRNSYS

Der ausgewählte Raum wurde mit dem Simulationsprogramm TRNSYS (2007) mit dem Type56 (multizone building) modelliert. Als Wetterdatensatz wurde der Klimadatensatz von Klagenfurt (Kärnten/Österreich) aus dem Jahr 1995 verwendet, welcher in der TRNSYS Wetterdatenbibliothek verfügbar war.

Für den Regelalgorithmus wurde die Model Predictive Control Toolbox von MATLAB herangezogen. Diese erlaubt es über den Befehl „mpc“ ein MPC-Objekt zu erstellen, welches das (lineare) Regelstreckenmodell, den Prädiktions- und Kontrollhorizont sowie die Beschränkungen (constraints) und Gewichtungen (weights) enthält.

Die Kopplung der Programme TRNSYS und MATLAB erfolgte über den TRNSYS Type155, welcher eine vorprogrammierte Schnittstelle zu MATLAB darstellt. Diese Schnittstelle erlaubt es in jedem Zeitschritt von TRNSYS ein MATLAB-Script aufzurufen, welches dann von MATLAB ausgeführt wird. Als Schrittweite wurden 15 Minuten gewählt.

Aus TRNSYS wird in jedem Zeitschritt die Regelgröße Raumtemperatur an MATLAB übergeben. MATLAB berechnet für jeden Zeitschritt die Stellgröße Vorlauftemperatur und sendet diesen Wert

an TRNSYS zurück. Für das Wetterdatenfile wird in TRNSYS der Weather Data Processor Type15 verwendet. Für MATLAB wurden diese Wetterdaten in ein *.mat – File konvertiert und so für den MPC-Algorithmus direkt im MATLAB-Workspace zur Verfügung gestellt. Dies war nötig, um eine (ideale) Wettervorhersage simulieren zu können.

Der für Vergleichszwecke herangezogene PI-Regler wurde direkt in TRNSYS mit dem Type23 realisiert.

Vorgangsweise

Da der prädiktive Regler in MATLAB ein lineares Zustandsraummodell zur Voraussage der Zustandsgrößen benötigt, wurden mit Hilfe einer Identifikation die erforderlichen Parameter bestimmt. Dazu wurde (ausgehend vom Arbeitspunkt) ein PRBS Signal (Pseudo Random Binary Signal) in TRNSYS auf das Raummodell (Type56) aufgebracht und der Verlauf der Raumtemperatur aufgezeichnet. Dabei wurde immer nur eine Größe verändert (z.B. Stellgröße), während die anderen Größen (z.B. Störgrößen) konstant gehalten wurden.

Für die Identifikation in Bezug auf solare Einstrahlung wurde lediglich die Einstrahlung auf die Südwand herangezogen, da sie auf Grund der Orientierung und des Verglasungsanteils des Raumes den weitaus größten Anteil am Temperaturverhalten des Raums hatte. Weiters wurde durch diese Wahl auch die Identifikation vereinfacht.

Mittels eines Least Squares Algorithmus wurden mit Hilfe der MATLAB Identification Toolbox (process model) die zugehörigen linearen Übertragungsfunktionen identifiziert. Das Ergebnis der Identifikation waren drei Übertragungsfunktionen, die das dynamische Verhalten der Raumtemperatur in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur (Stellübertragungsfunktion) und in Abhängigkeit der Außentemperatur sowie der solaren Einstrahlung auf die Südwand (Störübertragungsfunktionen) darstellten. Diese Übertragungsfunktionen wurden schließlich in ein lineares Zustandsraummodell umgewandelt (7x7 Zustandsmatrix).

Da es zur Zeit nur sehr wenige Erfahrungswerte zur Einstellung der Reglerparameter (Horizontlängen, Beschränkungen und Gewichtungen) bei einem MPC-Regler gibt, wurden unterschiedliche Parametrierungen getestet und mittels trial and error sowie Literaturvergleichen die vermutlich geeigneten Parameter festgesetzt (siehe Tabelle 2). Insgesamt wurden aus acht unterschiedlichen Parameterkonfigurationen drei vermutlich geeignete Reglerparametrierungen ausgewählt, wovon eine in diesem Bericht vorgestellt wird.

Für den in TRNSYS modellierten Vergleichsregler wurde ein PI-Regler mit den Reglerparametern $K_P = 5$ und $T_n = 4$ h verwendet.

Schließlich wurde mit dem ausgewählten Wetterdatensatz eine Jahressimulation erstellt und die relevanten Daten (Temperaturen, Leistungen etc.) aufgezeichnet und miteinander verglichen.

Tabelle 2: Reglerparameter des MPC-Reglers

Schrittweite	15 min
Prädiktionshorizont	12 h
Kontrollhorizont	5 h
Zielwert der Stellgröße	25 °C
Stellgrößenbeschränkungen	25 – 45 °C
Regelgrößenbeschränkungen	Keine
Stellgrößenänderungsbeschränkungen	± 5 °C/15 min
Gewichtung der Regelgröße	1
Gewichtung der Stellgröße	0,15
Gewichtung der Stellgrößenänderung	0,1

Simulationsergebnisse

Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen das Verhalten des geregelten Systems für ausgewählte Febertage. Diese Febertage wurden gewählt, weil sie die unterschiedlichen Verhaltensweisen der untersuchten Regler besonders deutlich zeigen.

Der Raumtemperatursollwert beträgt 22°C mit einer Nachtabsenkung auf 19°C. Aus Abbildung 2 ist zu erkennen, dass der Raumtemperaturverlauf qualitativ ähnlich verläuft, wobei der Absolutwert der Raumtemperatur mit PI-Regler ca. 1°C über dem Wert mit MPC-Regler liegt. Diese Abweichung ist jedoch nicht ausschließlich auf den unterschiedlichen Regelalgorithmus zurückzuführen, sondern auch durch die Anfangsbedingungen im betrachteten Zeitraum bedingt.

In Abbildung 2 wurden zum einfacheren Vergleich mit der solaren Einstrahlung und den üblicherweise verwendeten Größen nicht die Stellgröße Vorlauftemperatur, sondern die Heizleistung eingezeichnet. Dabei ist deutlich der Unterschied in der Arbeitsweise der beiden Regler zu erkennen. Während der MPC-Regler bereits heizt, bevor der Sollwert der Raumtemperatur von 19 auf 22°C springt (da er die Sollwertänderung bereits im Vorhinein kennt), kann der PI-Regler erst auf eine Abweichung des Istwerts vom Sollwert reagieren. Da auch die solare Einstrahlung durch die Wettervorhersage für den MPC-Regler bekannt ist, nimmt er die Heizleistung wesentlich früher zurück als der PI-Regler. Insgesamt ist im betrachteten Zeitraum auch gut zu erkennen, dass der MPC-

Regler eine geringere maximale Heizleistung aufbringt als der PI-Regler. Am 22. Feber zeigt sich der größte Vorteil des MPC-Reglers. Da durch die Prädiktion der Raumtemperatur deren Verlauf bekannt ist, heizt der MPC-Regler überhaupt nicht, während der PI-Regler auf Grund seines Regelalgorithmus eine Heizleistung aufbringen muss. Generell zeigten sich die größten Vorteile des MPC-Algorithmus dann, wenn die solare Einstrahlung im Verlauf des Tages eine zusätzliche Heizleistung aufbringt. Bei Tagen ohne nennenswerte solare Einstrahlungen waren nahezu keine Energieeinsparungen feststellbar.

Bei den Simulationen zeigte sich, dass die solare Einstrahlung im Vergleich zur Außentemperatur die dominierende Störgröße für das System war. Dies ist bei der betrachteten Konfiguration auf zwei wesentliche Ursachen zurückzuführen:

- Die solare Einstrahlung kann auch während der Wintermonate sehr groß werden, während sich die Außentemperatur in einem relativ gesehen

viel engeren Bereich bewegt. Dadurch beeinflussen sowohl der absolute Leistungseintrag als auch die Schwankungen durch die solare Einstrahlung die Raumtemperatur wesentlich stärker als die Außentemperatur.

- Durch den Aufbau (vor allem durch den Verglasungsanteil der Außenflächen und die gute Wärmedämmung) und die Orientierung des betrachteten Raums, reagiert der Raum auf Änderungen der solaren Einstrahlungen empfindlicher als auf Änderungen der Außentemperatur.

Aus diesen Gründen ist in Abbildung 3 die Außentemperatur auch nicht eingetragen.

Im in Abbildung 2 und Abbildung 3 dargestellten Zeitraum ergibt sich eine Heizenergieeinsparung von ca. 17%.

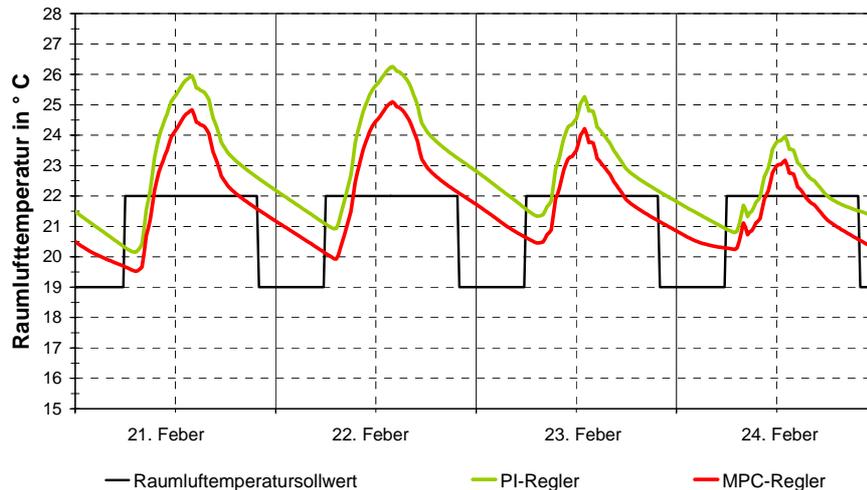


Abbildung 2: Vergleich des Verlaufs der Raumlufitemperaturen der Systeme mit MPC-Regler und PI-Regler für ausgewählte Febertage

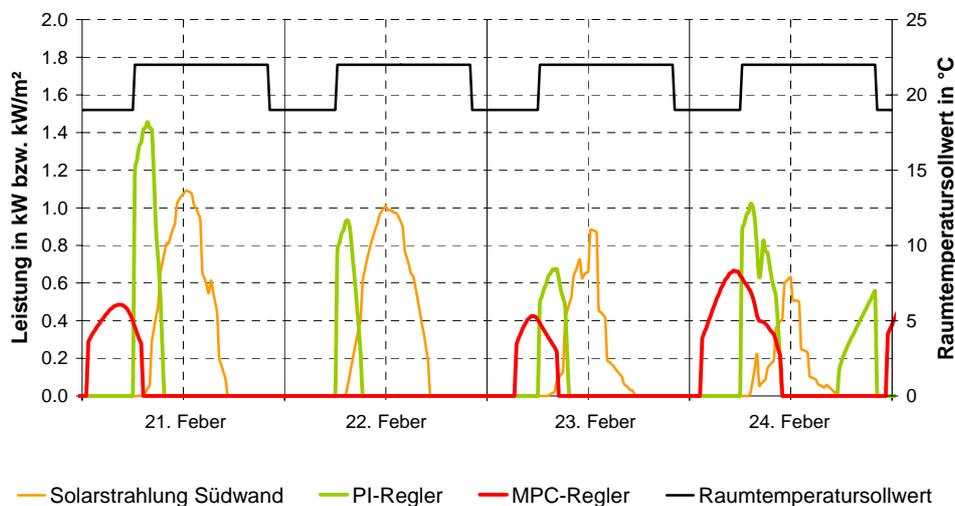


Abbildung 3: Vergleich des Verlaufs der Heizleistungen der Systeme mit MPC-Regler und PI-Regler und der solaren Einstrahlung auf die Südwall für ausgewählte Febertage

Abbildung 4 zeigt die Einsparpotentiale des MPC-Reglers im Vergleich zu einem PI-Regler und einem Zweipunktregler, aufgeschlüsselt nach den Monaten der Heizperiode.

Dabei zeigt sich, dass in den kältesten Monaten das geringste Einsparpotential vorhanden ist. Dies kann damit begründet werden, dass der PI-Regler sehr wohl in der Lage ist, die Schwankungen der Außentemperatur auszuregulieren, ohne dafür eine Voraussage der Außentemperatur zu benötigen. Da sich die Außentemperatur relativ gesehen zur Solarstrahlung nicht so stark ändert und die Außenwände ausreichend gedämmt sind, kann diese Störgröße auch vom PI-Regler relativ gut ausgeregelt werden.

Ein deutlicher Unterschied zeigt sich jedoch im März und im Oktober. In diesen Monaten ist die solare Einstrahlung in den Raum wesentlich höher als in den kältesten Monaten, wobei die Einstrahlung einen großen Einfluss auf die Raumtemperatur hat. Durch die Kenntnis der solaren Einstrahlung und die Prädiktion der Raumtemperatur ist der MPC-Regler in der Lage die Heizleistung früher zurückzunehmen und somit Energie zu sparen.

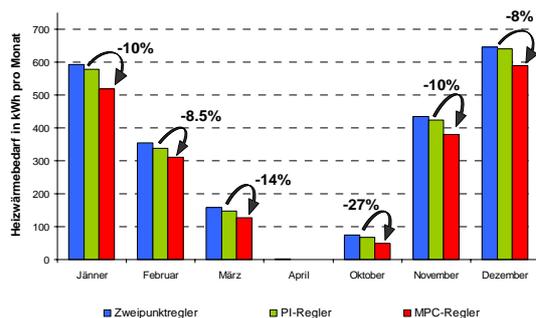


Abbildung 4: Einsparpotentiale des MPC-Reglers gegenüber einem Zweipunktregler und einem PI-Regler während der Heizperiode

Eine Jahressimulation zeigt schließlich eine **Energieersparnis (Heizwärmebedarf) von ca. 10%** durch Verwendung des MPC-Reglers gegenüber einem PI-Regler für den betrachteten Raum.

An dieser Stelle sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die berechneten Ergebnisse lediglich für den betrachteten Raum und die ausgewählten Regler mit den erwähnten Reglerparametern und eine ideale Wettervorhersage gültig sind. Da lediglich die Außentemperatur und die Solareinstrahlung als Störgrößen wirkten und die Identifikation von Stell- und Störverhalten der Regelstrecke gute Ergebnisse zeigte, ist diese Energieersparnis eher als oberer Grenzwert anzusehen denn als mittlerer Wert.

Zweifellos werden mögliche Energieeinsparungen sehr stark von dem Verhalten der Regelstrecke (in diesem Fall der Raum) beeinflusst. Eine Übertragung

dieser Ergebnisse auf andere Konfigurationen, wie z.B. einem Raum mit schlechter Wärmedämmung und Radiatorenheizung ist nicht möglich.

Für den Fall einer Raumtemperaturregelung kann jedoch vermutet werden, dass ein MPC-Regelalgorithmus umso mehr Vorteile bringt, je größer die Zeitkonstanten des Stellverhaltens der Regelstrecke sind und je kleiner die Zeitkonstanten des Störverhaltens der Regelstrecke sind. Diese Zeitkonstanten sind im Wesentlichen vom Raumaufbau (schwere Bauweise ergibt große Zeitkonstanten) und dem Wärmeabgabesystem (Fußbodenheizung oder Betonkernaktivierung bedingen ebenfalls große Zeitkonstanten) abhängig.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Bei der Untersuchung der Raumtemperaturregelung konnten folgende Vor- und Nachteile eines MPC-Reglers für eine Raumtemperaturregelung festgestellt werden:

Vorteile

Durch die zusätzlichen Informationen aus der Wettervorhersage und dem im Regler implementierten Modell der Regelstrecke sind Energieeinsparungen ohne Komforteinbußen möglich.

Der in diesem Artikel vorgestellte MPC-Regler benötigt als zusätzliche Messgröße lediglich die solare Einstrahlung. Eine Messung der Außentemperatur ist grundsätzlich vorhanden. Eine spezielle Konfiguration von Wärmeerzeugungs- oder Wärmeabgabesystem ist nicht nötig. Bei der heutigen Rechengeschwindigkeit von Mikroprozessoren bzw. Leitetchnikkreisläufungen stellen auch die Leistungsanforderungen an die Hardware kein besonderes Problem dar.

Zumindest in der betrachteten Konfiguration ergaben sich keine Stabilitätsprobleme des geschlossenen Regelkreises mit MPC-Regler.

Nachteile

Ein (möglichst gutes) Modell der Regelstrecke ist erforderlich. Die Modellbildung kann einen sehr hohen Arbeitsaufwand verursachen. Zusätzlich ist die Performance des MPC-Regelkreises wesentlich von der Güte des Modells abhängig.

Eine Wettervorhersage ist nötig. Der MPC-Regler muss daher stets „online“ sein, um Wetterdaten abrufen zu können, falls eine Wettervorhersage durch einen Wetterdienst verwendet wird.

Die Parametrierung des MPC-Reglers erfolgt grundsätzlich anders als die Parametrierung der bekannten linearen (PID) Regler. Ein wesentliches Umdenken des Regelungstechnikers wird damit erforderlich. Zusätzlich gestaltet sich die Theorie

relativ komplex im Vergleich zur klassischen Regelungstechnik.

Weitere Erkenntnisse

Die Kombination von TRNSYS und MATLAB stellt eine sehr brauchbare Basis zur Untersuchung von Regelungen in der Gebäudetechnik dar.

In TRNSYS kann mit dem Type56 (multizone building) das dynamische Verhalten eines Gebäudes relativ komfortabel simuliert werden, da lediglich der physikalische Aufbau des Gebäudes eingegeben werden muss und die dynamischen Zusammenhänge (z.B. Übertragungsfunktionen der Wände oder Strahlungsmodelle) vom Programm zur Verfügung gestellt werden. Eine Programmierung von Regelalgorithmen erscheint jedoch als schwierig, da hierfür eigene Types entworfen werden müssten und zusätzlich leistungsfähige Matrizenoperationen, wie sie für MPC benötigt werden, nicht unmittelbar vorhanden sind.

MATLAB wiederum stellt leistungsfähige Toolboxes für den Entwurf und die Parametrierung von Reglern zur Verfügung. Die Ausrichtung des Programmpakets auf Vektor- und Matrizenoperationen kommt MPC-Algorithmen besonders entgegen.

Die Schnittstelle zu MATLAB in TRNSYS (ausgeführt durch den Type155) ist relativ einfach in Form eines m-Scripts gestaltet und bereitet bei der Programmierung keine besonderen Schwierigkeiten.

So können durch die Kombination der beiden Programmpakete die durchaus unterschiedlichen Welten von Gebäudesimulation und Regelungstechnik einigermaßen unkompliziert miteinander kombiniert werden. Einen Nachteil stellt die Ausführungsgeschwindigkeit der Simulation dar, da durch den Aufruf von MATLAB in jedem Zeitschritt die Simulation stark eingebremst wird.

ZUSAMMENFASSUNG

Für die Simulation einer prädiktiven Raumtemperaturregelung wurden die Simulationsplattformen TRNSYS und MATLAB über eine in TRNSYS verfügbare MATLAB-Schnittstelle (Type155) gekoppelt. Die gebäudetechnischen Berechnungen sowie die Bereitstellung der Wetterdaten wurden in TRNSYS durchgeführt. An MATLAB wurden alle für den Regelalgorithmus relevanten Daten übergeben und dann in jedem Zeitschritt die Stellgröße berechnet, welche wieder an TRNSYS übergeben wurde.

Die simulationstechnische Untersuchung einer Raumtemperaturregelung mit einem prädiktiven Regler (MPC-Regler) lieferte für den betrachteten Raum ein Energieeinsparungspotential von ca. 10% für eine Heizperiode gegenüber einem herkömm-

lichen PI-Regler. Für bestimmte Wetterkonstellationen mit hoher solarer Einstrahlung war über einen begrenzten Zeitraum eine Energieeinsparung von ca. 30% zu beobachten.

LITERATUR

- Beigelböck, B (2009): Abschätzung des Energieeinsparungspotentials durch Simulation einer Raumtemperaturregelung mit Hilfe von modellbasierten prädiktiven Regelalgorithmen unter Verwendung einer idealen Wettervorhersage, Diplomarbeit, FHS-Burgenland, Bibliothek Pinkafeld.
- Bemporad, A.; Morari, M. und Ricker, N.L. (1995): Model Predictive Control Toolbox™ 3 – User Guide, Revision March 2009, The MathWorks Inc., Natick (USA)
- Bollin, E. (2008): Predictive Operation of Sustainable Buildings, Hochschule Offenburg, Boston Symposium, 08.12.2008, Boston
- Dittmar, R. und Pfeiffer, B.-M. (2004): Modellbasierte prädiktive Regelung, Oldenburg Verlag, München Wien
- Gwerder, M. und Tödtli, J. (2007): The use of weather forecasts in building automation and control systems (BACS): How to use them? What is the benefit?, 9th REHVA World Congress for Building Technologies – CLIMA 2007, 12.-14. Juni 2007, Helsinki
- OptiControl-Projekt (2010): Webseite des Projekts Opticontrol, <http://www.opticontrol.ethz.ch/>, abgerufen am 2.6.2010 um 08:15 Uhr
- Schmid, W. (7/2008): Mit Wetterprognose Energie sparen, Zeitschrift: TGA-Fachplaner, Ausgabe 7/2008, S. 30-36, München
- TRNSYS (2007): Dokumentation Volume 6 – Multizone Building modelling with Type56 and TRNBuild, Transsolar Energietechnik GmbH, Stuttgart
- Wang, L. (2009): Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB, Springer-Verlag

DIE GEBÄUDEHÜLLE ALS AKTIVES BAUTEIL: OPTIMIERUNG DER INTERAKTION VON GEBÄUDETECHNIK UND SONNENSCHUTZSTEUERUNG

Carina Sagerschnig, Axel Seerig, Christian Dietrich
 Gruner AG, Gellertstrasse 55, 4020 Basel, Schweiz

KURZFASSUNG

In vielen Gebäuden ist die Sonnenschutzsteuerung bereits automatisiert und in die Gebäudeleittechnik eingebunden. Eine Interaktion mit den gebäudetechnischen Anlagen für Heizung und Kühlung und eine Abstimmung des Sonnenschutzbetriebs auf den aktuellen Anlagenbetriebs des Gebäudes sind jedoch in den seltensten Fällen gegeben. Ein vollautomatisierter, den äußeren und inneren Gegebenheiten angepasster Sonnenschutz macht die Fassade zu einem aktiven Bauteil, das Energie und Behaglichkeit im Raum kontrolliert mit beeinflusst.

Im vorliegenden Artikel wird eine Steuerungsstrategie für Raffstoren unter Einbeziehung von Anlagenbetriebssignalen für Heizung und Kühlung sowie der Raumbelastung vorgestellt. Mit Hilfe eines Gebäude- und Anlagenmodells werden die Einflüsse der Sonnenschutzsteuerung auf den Heiz-, Kühl- und Beleuchtungsenergiebedarf aufgezeigt. Bei gleich bleibendem Komfort können Energieeinsparpotenziale bis zu 30% für Heiz- und Kühlenergie erzielt werden.

ABSTRACT

In many buildings, the sun protection control system is already automated and integrated with the building automation system. An active interaction, however, with the building's heating and cooling systems, and a complementing sun protection control system for the current energy demands of the building are present only in the rarest of cases.

A fully automated sun protection system, considering external and internal conditions, makes the facade an active building component, which also controls and influences energy use and comfort.

In this article, control strategies for blinds, taking into account the heating and cooling plant and the room occupancy will be presented. The influence of these integrated control strategies on heating, cooling and lighting energy demand is shown through simulation models. While ensuring the same comfort levels, energy savings of up to 30% are shown to be possible for heating and cooling.

STATE-OF-THE-ART

SONNENSCHUTZSTEUERUNG

Die thermische Behaglichkeit und der Energiebedarf, insbesondere von hoch verglasten Gebäuden werden massgeblich durch die Qualität der Fassade beeinflusst. Nicht nur bauphysikalische Eigenschaften, sondern auch die Art und Weise der "Betriebsführung der Fassade" spielen eine entscheidende Rolle. Insbesondere der Betrieb und die Bedienung von Sonnenschutzvorrichtungen können das Raumklima massgeblich beeinflussen.

In Abhängigkeit der gewünschten Anforderungen an den Sonnenschutz werden heute vielfältige Steuerungsmöglichkeiten von Systemherstellern angeboten und umgesetzt, welche vorwiegend äussere Führungsgrössen (z. B. Niederschlag, Wind, Sonneneinstrahlung) berücksichtigen.

Diente der Sonnenschutz früher primär dem Schutz vor direkter Sonneneinstrahlung und Blendung, übernimmt er heute durch die Einbeziehung in die Raumautomation weitere reichende Aufgaben, um das Raumklima zu verbessern.

So werden zum Beispiel Lamellennachführungen bei Raffstoren zur Optimierung der Tageslichtnutzung und/oder der Verbesserung des sommerlichen Verhaltens in den betreffenden Zonen realisiert. Zudem werden vermehrt Verschattungseinflüsse in urbaner Lage in eine Sonnenschutzsteuerung implementiert. Die Fassade wird damit zunehmend ein integraler Bestandteil der Gebäudetechnik.

Ein Schwerpunkt der aktuellen Forschung und Entwicklungen in der Sonnenschutzsteuerung liegt auf der Verbesserung der Tageslichtnutzung und des visuellen Komforts (Wienold, 2007), bzw. der Minimierung von künstlicher Beleuchtung (Mahdavi et al., 2007). Untersuchungen zur Optimierung des Lamellenanstellwinkels finden sich u. a. bei Deuk-Woo Kim (2009) und Kuhn et. al. (2003).

Für die Sonnenschutzsteuerung wird meist die solare Einstrahlung auf die Fassade, beispielsweise in Form von Helligkeitssensoren, als Führungsgrösse berücksichtigt. Umfangreiche Untersuchungen zum energetischen Verhalten dieser Art von Sonnen-

schutzsteuerung wurden von de Boer (2006) durchgeführt.

Die Steuerung nach äusseren Einflüssen muss jedoch nicht den tatsächlichen Lastverhältnissen im Gebäude und den Möglichkeiten der gebäudetechnischen Anlagen entsprechen. So können z. B. bei einer Steuerung in Abhängigkeit der solaren Einstrahlung im Winter durchaus erwünschte solare Gewinne nicht genutzt werden.

Um den Sonnenschutz sowohl zur aktiven Unterstützung des Kühl- als auch des Heizbetriebes einsetzen zu können, ist die Kenntnis über die Betriebsweise der Heiz- und Kühlanlagen für die Sonnenschutzsteuerung notwendig.

SONNENSCHUTZSTEUERUNG IN INTERAKTION MIT HEIZ- UND KÜHLANLAGEN

Ziel der Anwendung einer integrierten Storensteuerung ist die Verringerung des Endenergiebedarfs für Heizung, Kühlung und Beleuchtung bei möglichst geringen Anstellwinkeln, um die Tageslichtnutzung zu maximieren.

Das Ablaufdiagramm einer Raffstorensteuerung, die sich sowohl für den sommerlichen als auch den winterlichen Wärmeschutz eignet, wird in Abbildung 2 dargestellt. Diese Steuerung für die Heiz- und Kühlunterstützung basiert auf aktuellen Betriebszuständen der Heiz- und Kühlanlagen sowie der solaren Einstrahlung auf die Fassade.

Die Heiz- und Kühlanlagen werden über Anlagenbetriebssignale (On/Off) in die Storensteuerung eingebunden. Nur wenn weder Heizung noch Kühlung aktiv sind, erfolgt die Steuerung ausschliesslich über die solare Einstrahlung auf die Fassade.

Im Heizfall können über einen Schwellwert für die solare Einstrahlung die solaren Gewinne bewertet und durch ein Öffnen der Storen genutzt werden. Sind keine Personen anwesend und die solaren Gewinne niedrig, werden die Storen vollständig geschlossen, um den Wärmeschutz zu erhöhen.

Im Kühlfall werden die Storen in Abhängigkeit von Personenanwesenheit bei hoher solarer Einstrahlung entweder in einem für die Tageslichtnutzung optimalen Anstellwinkel oder vollständig geschlossen. Nachts werden die Storen geöffnet um eine Auskühlung der Fassade zu ermöglichen.

Optional kann für Anlagen, welche einen FreeCooling-Betrieb ermöglichen, ein FreeCooling-Modus integriert werden. Dies ermöglicht eine Flexibilisierung des Sonnenschutzbetriebs indem variable Schwellwerte für die solare Einstrahlung eingesetzt werden können.

Im FreeCooling-Betrieb der Anlagen ist der Endenergiebedarf der Kühlung geringer. Um die Tageslichtnutzung zu maximieren und den Aussenbezug (Durchsicht) für die Nutzer zu erhöhen, kann ein verzögerter Storenbetrieb (d.h. bei höherer solarer Einstrahlung auf die Fassade) ermöglicht werden. Dies setzt voraus, dass für den Blendschutz ein unabhängiges System eingesetzt wird.

Die in diesem Artikel vorgestellte integrierte Storensteuerung wurde in Verbindung mit zwei verschiedenen Methoden zur Ermittlung der Lamellenanstellwinkel untersucht.

Die CutOff-Strategie (Abbildung 1, links) verfolgt den Ansatz, den Innenraum vor direkter, solarer Einstrahlung zu schützen und die Tageslichtnutzung zu maximieren. Die Lamellen werden dabei so nachgeführt, dass gerade keine direkte Strahlung in den Raum tritt. Zur Kühlunterstützung wird das Öffnen des Sonnenschutzes über den CutOff-Winkel hinaus gesperrt.

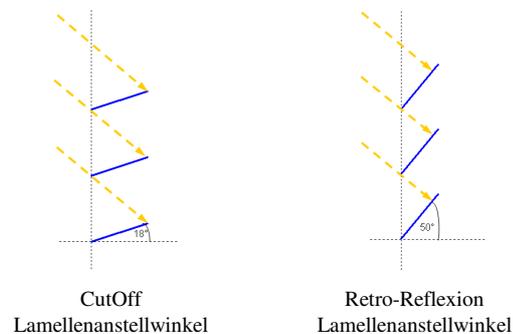


Abbildung 1: Steuerungsstrategien für Lamellenanstellwinkel zur Blockierung direkter solarer Einstrahlung bei gleichem Einfallswinkel

Die Retro-Reflexion-Strategie verhindert ebenfalls die direkte Einstrahlung in den Raum (Leidenroth et. al., 2003). Bei dieser Strategie wird die Sonneneinstrahlung durch eine Lamellenstellung im 90°-Winkel zur Einstrahlung direkt nach aussen reflektiert (Abbildung 1, rechts). Die Möglichkeiten der Tageslichtnutzung sind im Vergleich zur CutOff-Strategie eingeschränkter, da die Lamellen steiler angestellt werden.

Bei der in Abbildung 2 dargestellten Storensteuerung hängt die Wahl der Lamellenanstellwinkel von der Raumbelegung ab. Sind Personen im Raum, kommt die CutOff- oder Retro-Reflexion-Strategie zum Einsatz. In nicht belegten Räumen können die Storen vollständig geschlossen werden, da es keine Anforderungen an die Tageslichtnutzung gibt.

Die vorgestellte Storensteuerung basiert auf dem aktuellen Kühl- oder Heizbetrieb. Eine alternative Sonnenschutzsteuerung in Abhängigkeit historischer Betriebszustände der Heiz- und Kühlanlagen wird von Gwerder et. al. (2005) beschrieben.

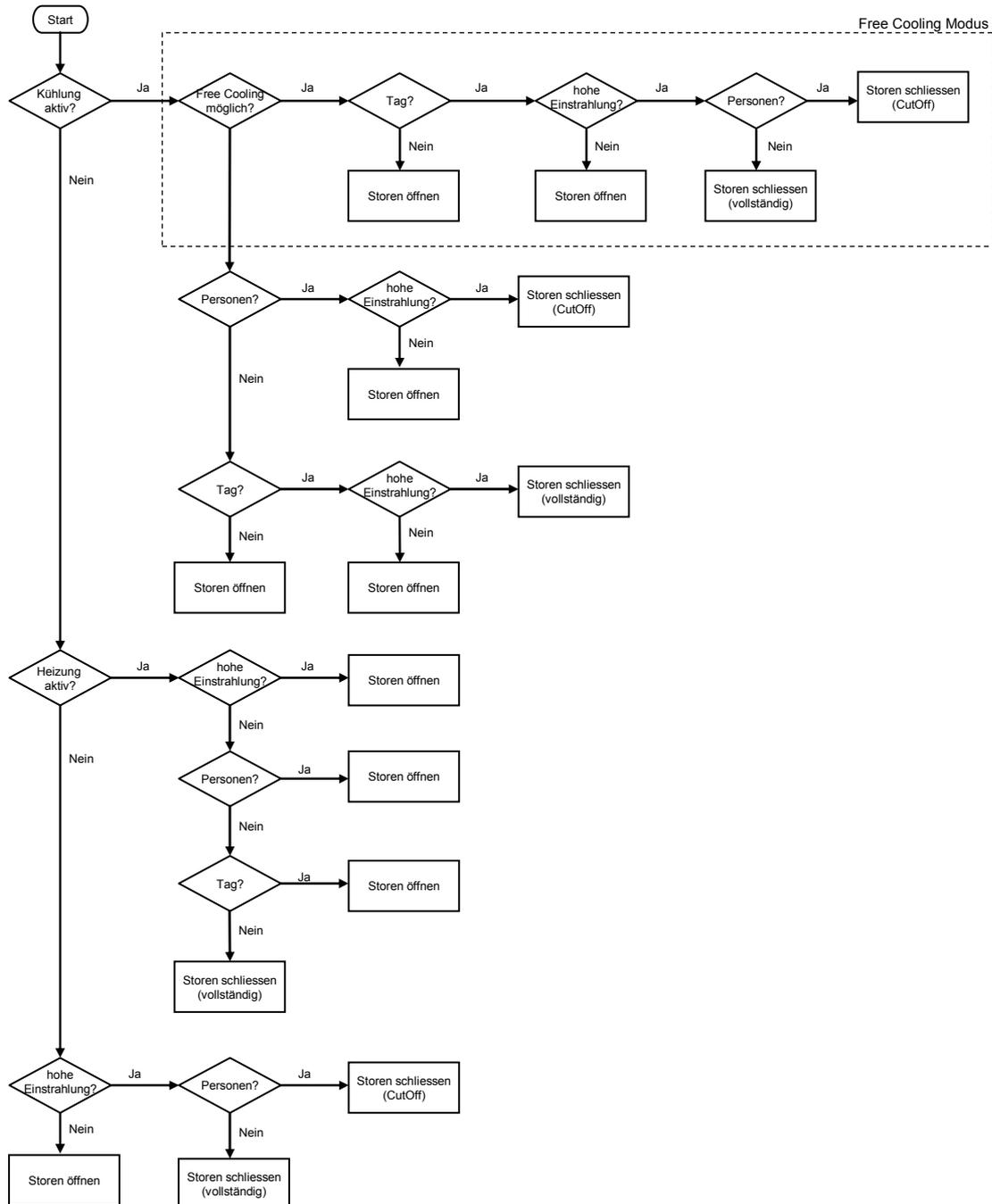


Abbildung 2: Ablaufdiagramm für eine integrierte Storensteuerung unter Berücksichtigung des Heiz-/Kühlanlagenbetriebs sowie eines optionalen FreeCooling-Betriebs der Kühlanlagen

SIMULATIONSMODELL

Die in Abbildung 2 beschriebene Storensteuerung wurde im Rahmen von Simulationen getestet und für den Praxiseinsatz optimiert.

Es wurde eine Bürozone in schwerer Bauweise mit Glasanteil von ca. 50% auf der Südfassade mit dem Simulationsprogramm EnergyPlus 4.0 untersucht. Die Gebäudenutzung orientiert sich an den Standardnutzungsbedingungen für Bürogebäude nach der Schweizer Norm SIA 2024. Für die Simulationen wurde der DRY Klimadatensatz nach SIA 2028 für Basel verwendet.

Die Energieversorgung erfolgt über eine umschaltbare Kältemaschine / Wärmepumpe. Das Kriterium für die Bewertung des Energiebedarfs ist der Endenergiebedarf an Strom für Heizung, Kühlung und Beleuchtung. Für die Berechnung des Endenergiebedarfs wurde ein COP von 3.0 für Kälte bzw. ein COP von 4.0 für Wärme zugrunde gelegt.

Neben dem Endenergiebedarf kann die Schalthäufigkeit der Storen, d.h. die Betriebszeit während der Anwesenheit von Personen, als Kriterium für den Aussenbezug der Personen herangezogen werden.

Das Gebäude besitzt eine 2-fach Isolierverglasung (U-Wert = 1.4 W/m²K, g = 0.60) sowie aussenliegende, helle Raffstoren mit einem Strahlungsreflexionsgrad von 50% (z. B. Fabrikat: Warema, Typ: 80 AF, g_{tot} = 0.10).

LAMELLENANSTELLWINKEL UND SOLARE EINSTRAHLUNG

Für die Untersuchungen wurden sowohl konstante Lamellenanstellwinkel als auch die CutOff- und die Retro-Reflexion-Strategie im Simulationsmodell umgesetzt. Die Berechnung der CutOff-Anstellwinkel erfolgte nach Honma (2009).

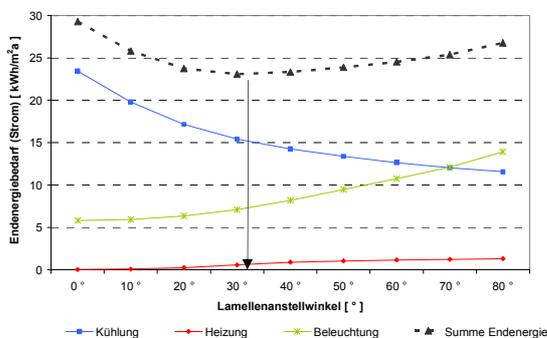


Abbildung 3: Endenergiebedarf bei verschiedenen, konstanten Lamellenanstellwinkeln

Bei konstanten Lamellenanstellwinkeln sinkt der Kühlenergiebedarf je steiler die Lamellen gestellt

werden. Gleichzeitig steigt jedoch der Energiebedarf der künstlichen Beleuchtung. Bei einem Schaltpunkt der Storen von 150 W/m² solarer Einstrahlung auf die Fassade ergibt sich ein minimaler Endenergiebedarf bei einem Anstellwinkel von ca. 30° bis 40° (Abbildung 3).

Für den Vergleich der CutOff- bzw. Retro-Reflexion-Strategie wurden Storen mit einem Anstellwinkel von 40° und einem Schaltpunkt von 150 W/m² Globalstrahlung auf die Fassade ausgewählt.

Die Auswahl des Schaltpunkts erfolgte auf Basis einer Parameterstudie zum Endenergiebedarf für Heizung, Kühlung und Beleuchtung in Abhängigkeit des Storenschaltpunkts (Abbildung 4).

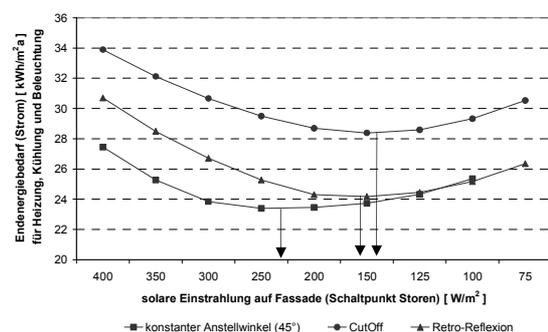


Abbildung 4: Endenergiebedarf für verschiedene Lamellenanstellwinkel-Strategien in Abhängigkeit des Schaltpunkts der Storen

ENERGIEEINSPARUNGSPOTENTIAL DER INTEGRIERTEN STORENSTEUERUNG

Der Endenergiebedarf in Abhängigkeit der Storensteuerung ist in Abbildung 6 dargestellt. Erfolgt die Steuerung der Raffstoren ausschliesslich an Hand der Einstrahlung, ist bei gleichen Komfortanforderungen der gesamte Endenergiebedarf der CutOff-Strategie um ca. 22% höher als bei einem konstantem Anstellwinkel von 40°. Der Beleuchtungsenergiebedarf sinkt im CutOff-Betrieb um rund 9% im Vergleich zum Konstantwinkel.

Wird zusätzlich zur Steuerung nach äusseren Einflüssen die oben beschriebene Integration von Betriebssignalen zum Heiz- und Kühlbetrieb eingesetzt, kann – bei gleich bleibendem Komfort – der Heizenergiebedarf bei CutOff-Steuerung um ca. 30% reduziert werden, während der Endenergiebedarf für Kühlung um ca. 15% verringert wird (im Vergleich zu einer CutOff-Strategie ohne Integration von Anlagenbetriebssignalen).

Die Nutzung niedrigerer Aussentemperaturen bzw. Aussenthalpien für den FreeCooling-Betrieb der Kältemaschine ermöglicht eine Flexibilisierung des Sonnenschutzes (FreeCooling-Modus).

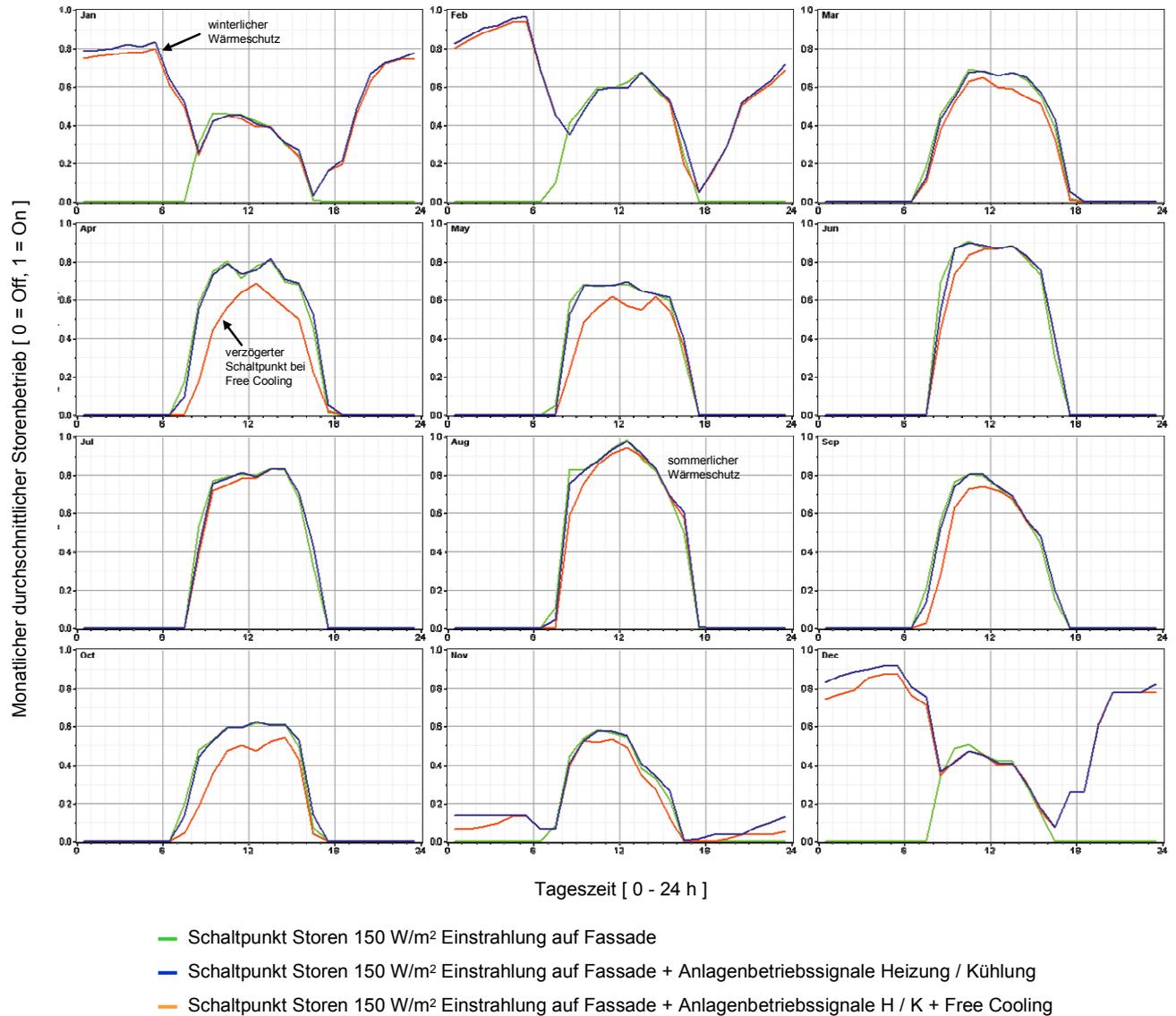


Abbildung 5: Monatlicher durchschnittlicher Betrieb der Storen während eines Tages für verschiedene Steuerungsstrategien der 'CufOff'-Lamellenansteuerung

Im FreeCooling-Betrieb wird der Schwellwert der äusseren Einstrahlung auf die Fassade von 150 auf 300 W/m² erhöht. Der Nutzenergiebedarf für Kühlung steigt dadurch um ca. 8%, wobei die Leistungsspitze unverändert bleibt.

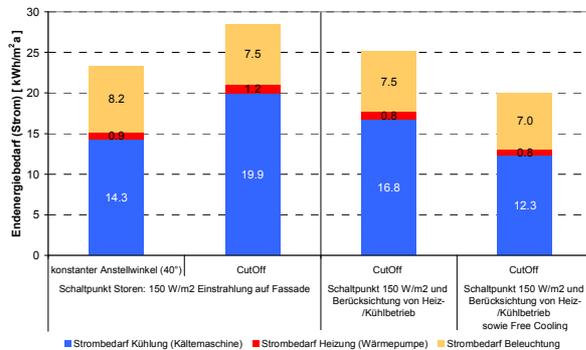


Abbildung 6: Endenergiebedarf der CutOff-Steuerung unter Einbeziehung des Kühl- und Heizbetriebes sowie von FreeCooling

Ist FreeCooling möglich, kann auf den Betrieb der Kältemaschine verzichtet werden. Der Endenergiebedarf für Kühlung sinkt daher um ca. 27%. Der gesamte Endenergiebedarf für Heizung, Kühlung und Beleuchtung sinkt um ca. 30% (CutOff nur nach Einstrahlung) bzw. 20% (CutOff-Strategie mit Integration von Anlagenbetriebssignalen).

Die Betriebszeit der Storen sinkt bei der Integration von Anlagenbetriebssignalen von 1.523 h/a während der Bürozeiten geringfügig auf 1.491 h/a. Bei zusätzlicher Berücksichtigung des FreeCooling-Betriebs sinken die Storenbetriebszeiten hingegen auf 1.319 h/a auf Grund des verzögerten Schaltpunkts.

In Abbildung 5 sind die durchschnittlichen täglichen Betriebsverläufe der Storen der einzelnen Monate dargestellt. Bei der Anlagen-integrierenden Steuerung sind in den Wintermonaten die Storen nachts geschlossen.

In den Übergangszeiten, wenn Kühllasten bei niedrigen Aussentemperaturen auftreten und FreeCooling möglich ist, kann der Storenbetrieb verzögert werden. In den Sommermonaten Juli und August zeigen sich keine Unterschiede im Storenbetrieb, da hier zumeist die äussere solare Einstrahlung ausschlaggebend ist.

Abbildung 7 stellt die Ergebnisse der integrierten Sonnenschutzsteuerung für einen Konstantwinkel (40°), die CutOff-Strategie sowie die Retro-Reflexion-Strategie gegenüber. Auf Grund der durchwegs steiler angestellten Winkel ist der Kühlenergiebedarf der Retro-Reflexion-Strategie jeweils geringer als jener der CutOff-Strategie.

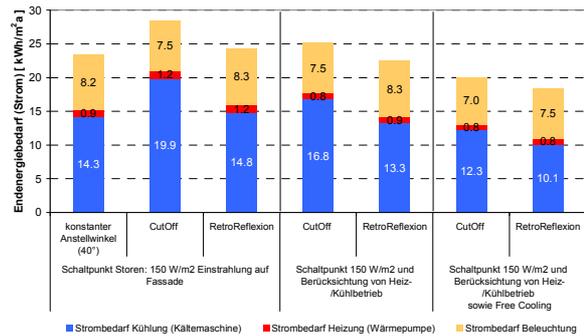


Abbildung 7: Vergleich der CutOff und RetroReflexion Steuerung

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Es wurde eine Storensteuerung vorgestellt, die Anlagenbetriebssignale (On / Off) integriert. Dies ermöglicht Raffstoren sowohl zur Kühlungs- als auch zur Heizungsunterstützung einzusetzen.

Eine Flexibilisierung des Sonnenschutzbetriebs ist weiters möglich, wenn zusätzlich Informationen über die Art des Anlagenbetriebs für die Sonnenschutzsteuerung zur Verfügung stehen. In diesem Beitrag wurde der Einsatz von FreeCooling der Kältemaschine untersucht.

Es wurde gezeigt, dass der zusätzliche Kühlenergiebedarf der sich aus einem Kompromiss aus Tageslichtnutzung und sommerlichem Wärmeschutz ergibt (z. B. durch Einsatz der CutOff-Strategie mit nicht vollständig geschlossenen Lamellen), durch die Integration von Anlagenbetriebssignalen wieder reduziert werden kann - wobei auf die Tageslichtnutzung und den erhöhten Aussenbezug nicht verzichtet werden muss.

Die vorgestellte Storensteuerung wird zurzeit für die Implementierung in einem Büroturm vorbereitet. Die Autoren sehen weitere Entwicklungsmöglichkeiten in der Kombination mit Beleuchtungssensoren im Innenraum, um die Tageslichtnutzung weiter zu optimieren.

Ebenfalls sinnvoll erscheint eine Integration von Wetterprognosen sowohl für die Heizungsunterstützung (Vermeidung der Nachtauskühlung) als auch zur Kühlunterstützung. Untersuchungen werden hierzu u. a. im Rahmen des OptiControl-Projekts (Gyalistras et al., 2009) durchgeführt.

LITERATUR

- de Boer J.: Lichttechnisches und energetisches Verhalten von Fassaden moderner Verwaltungsbauten, Bauphysik 28, pp. 27-44 und pp. 103-110, 2006.
- Deuk-Woo Kim, Cheol-Soo Park: Manual Vs. Optimal Control of Exterior And Interior Blind Systems, Proceedings of 11th International IBPSA Conference, p. 1663-1670, Glasgow 2009
- EnergyPlus: Building Energy Performance Simulation Tool, www.energyplus.gov, 2010
- Gwerder M., Tödtli J.: Predictive Control For Integrated Room Automation, Proceedings of 8th REHVA World Congress for Building Technologies - CLIMA 2005, Lausanne 2005
- Gyalistras, D., Gwerder, M. (Eds.): Use of weather and occupancy forecasts for optimal building climate control (OptiControl): Two Years Progress Report. Terrestrial Systems Ecology ETH Zurich, Switzerland and Building Technologies Division, Siemens Switzerland Ltd., Zug, Switzerland, 2009
- Honma M., Kawase T., Yoneda S.: Judgement On The Presence Of Direct Sunlight For Blind Slat Angle Control Systems, Proceedings of 11th International IBPSA Conference, p. 2146-2153, Glasgow 2009
- Kuhn T., Wienold J.: Regelstrategien zur simultanen Optimierung von Sonnenschutz, Blendschutz und Tageslichtversorgung, 9. Symposium Innovative Lichttechnik in Gebäuden, Staffelstein/ Deutschland 2003
- Leidenroth H., Imhoff T.: Sonnenschutz mit Rechenpower, Produktinformation 24.09.2003, <http://www.leitech.de/pdf/sonnenschutz-mit-rechenpower.pdf?PHPSESSID=02f0c3dd879a3dbc527374a756e6f33f>, Zugriff 03.06.2010
- Mahdavi A., Spasojevic B.: Incorporating Simulation Into Building Systems Control Logic, Proceedings of 10th International IBPSA Conference, p. 1175-1181, Beijing 2007
- SIA Merkblatt 2024: Standard-Nutzungsbedingungen für die Energie- und Gebäudetechnik, SIA 2006
- SIA Merkblatt 2028: Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik, SIA 2008
- Warema Raffstoren, Produktinformation 2010, www.warema.ch
- Wienold J.: Dynamic Simulation Of Blind Control Strategies For Visual Comfort And Energy Balance Analysis, Proceedings of 10th International IBPSA Conference, p. 1197-1204, Beijing 2007

ENERGIESPARPOTENZIAL EINES PASSIVHAUSES UNTER BERÜCKSICHTIGUNG VON WETTERPROGNOSEN

Christian Hettfleisch¹, Florian Dubisch¹ Stephan Ledinger¹
¹AIT Austrian Institute of Technology, Vienna, Austria

KURZFASSUNG

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit Energieeinsparpotenzialen, die durch innovative Regelungen in Gebäuden erreicht werden können. Besonderes Augenmerk ist hierbei auf Gebäude gelegt, die in einem gesteigerten Maße von ihrer Umwelt thermisch entkoppelt sind: dazu wird ein nach Passivhausstandard gebautes, real existierendes Bürogebäude modelliert, das Modell mit Monitoring-Daten validiert und simuliert. Anhand der Simulationen mit der Simulationsumgebung TRNSYS und der Hinzunahme von gemessenen Wetterdaten werden mögliche Energieeinsparpotenziale erkannt und ausgewertet. In dieser Betrachtung, die den Zeitraum eines kompletten Jahres (Zeitraum 2009/2010) beinhaltet, liegt der Fokus auf Energieeinsparungen, die durch intelligentes Heizen und Kühlen des Gebäudes erzielt werden können.

Abstract

This article deals with energy saving potentials that can be achieved by innovative controls in buildings. The main focus is on buildings that are thermally decoupled from their environment: an existing building that was built according to the passive house standard is modeled, validated with monitoring data and simulated. By adding actual, measured weather data in the simulations (which were done in the simulation environment TRNSYS) possible energy savings are identified and evaluated. In this analysis, which includes a full year (2009/2010), we concentrate specifically on energy savings in the building's heating and cooling systems.

EINLEITUNG

In der konventionellen Gebäudeautomatisierung ist der Einsatz von Wetterdaten weit verbreitet. Schaltzeiten und Vorlauftemperaturen gemäß der gemessenen Außenlufttemperaturen zu regeln ist ein gängiger Ansatz. Ein weiterer Schritt ist die Einführung von Prognosewerten in die Gebäudeautomation. In den vergangenen Jahren gab es einige theoretische und Demonstrationsprojekte, die den innovativen Ansatz einer wetterprognoseunterstützten Regelung bewerteten. Es wurden unterschiedliche Zielobjekte, wie z. B. Wohngebäude und Nichtwohngebäude, mit unterschiedlichem baulichem und systemtypischen Standard betrachtet (Krauss et al. 1998; Hube and Witt-

wer 2000; Freire, Oliveira, and Mendes 2008). Es zeigt sich allerdings, dass vor allem träge Systeme von einer prognosegeführten Regelung profitieren. Ein solches träges System findet sich in Gebäuden z. B. in Form der Bauteiltemperierung (BTT). Die Regelung der Raumlufttemperaturen erweist sich durch diese systeminhärente Trägheit als außerordentlich schwierig und bedient sich deshalb häufig unterstützend wirkender HLK Systeme. Eine prädiktive Regelung der Bauteiltemperierung wirkt sich, neben dem optimalen Betrieb der BTT auch auf die zusätzlich installierten HLK Systeme aus. Somit wird eine Reduktion der Schaltzeiten, eine Verminderung des Primärenergiebedarfs und eine Steigerung des Komforts bewirkt (Boller 2007). Auch bei konventionellen Heiz- und Kühlsystemen ist der Ansatz der wetterprognoseunterstützten Regelung vielversprechend. Anhand von Simulationen und prototypischen Testläufen konnte nachgewiesen werden, dass durch eine Anwendung von prädiktiver Regelung eine Einsparung des Primärenergiebedarfs von bis zu 13% erreicht werden kann (Krauss et al. 1998; Krauss et al. 1999). In anderen Studien liegt die Einsparungen des Energiebedarfs aus fossilen Quellen bei ca. 3% (Hube and Wittwer 2000). Die Differenz der Ergebnisse in der Verminderung des Primärenergiebedarfs ist in hohem Maße von den Randbedingungen der einzelnen Versuche abhängig. Das schließt sowohl die HLK Systeme als auch die Gebäudephysik mit ein.

Motivation

Die unterschiedlichen Ergebnisse der vorangegangenen Untersuchungen zeigen, dass eine starke Abhängigkeit der möglichen Einsparungen von der gewählten Gebäudenutzung, der Bauphysik, den verbauten Systemen und den klimatischen Voraussetzungen besteht. Eine Übertragbarkeit der Einsparpotenziale auf andere Randbedingungen ist nahezu unmöglich.

Diese Untersuchung der Einsparung beschäftigt sich mit einem nach Passivhausstandard errichteten Nichtwohngebäude bzw. Bürogebäude. Diese Aufgabenstellung unterscheidet sich von den bekannten Studien vor allem bezüglich der Sensitivität des Gebäudes hinsichtlich der Wetterdaten. Das heißt, dass die herkömmliche Herangehensweise unter Anderem die Außenlufttemperatur als einen wichtigen Parameter in der prädiktiven Gebäudeautomatisierung berücksich-

tigt, was im Falle eines Gebäudes nach Passivhausstandard nicht relevant ist. Der hohe Dämmungsstandard lässt den Parameter Außenlufttemperatur in der Wichtigkeit hinter andere Parameter wie etwa solare Strahlung, zurückweichen. Diese Erkenntnis führt zu der Fragestellung, ob der Einsatz einer prädiktiven Gebäuderegelung im Bereich der Gebäude, die nach Passivhausstandard errichtet sind, den möglichen Einsparungen im Primärenergiebedarf im Verhältnis zum Aufwand Rechnung trägt. Diese Frage soll hier untersucht werden.

Das Gebäude

Bei dem betrachteten Gebäude handelt es sich um das Gewerbegebäude ENERGYbase in Wien Floridsdorf. Der Heiz- und Kühlenergiebedarf dieses Gebäudes wird gänzlich über die Bauteiltemperierung erbracht, die im Heizfall über Wärmepumpen und im Kühlfall mittels einer Grundwasserversorgung beladen werden. Grundvoraussetzung für ein derartiges haustechnisches Konzept ist ein energieeffizientes und solares Architekturkonzept. Die Summe der Maßnahmen beginnt beim großen Volumen (30 000 m³ umbaute Raum) und setzt sich fort über die kompakte Oberfläche, konsequente solare Orientierung und zahlreiche weitere Parameter, die den Heiz- und Kühlbedarf verringern. Dennoch handelt es sich um ein Gebäude mit hohem Verglasungsanteil. Anspruch der Architekten war es zu zeigen, dass der Wunsch nach reichem Tageslichtangebot und direktem Sonnenlicht auch in einem Bürogebäude energetisch effizient und sinnvoll umgesetzt werden kann. Das Objekt ENERGYbase wurde gewählt, weil es sich in der Charakteristik maßgeblich von den bisher untersuchten Gebäuden unterscheidet. Durch den hohen Automatisierungsgrad des ENERGYbase sind die Auswirkungen einer intelligenten Regelung weitläufiger als bei Wohnobjekten, die z. B. lediglich mit regelbaren Heizungsventilen ausgestattet sind. Durch ein umfassendes Monitoring sind Daten vorhanden, die bei der Validierung des Modells eine signifikante Rolle spielen. Es sind aufgezeichnete Temperatur- und Wärmemengenwerte von unterschiedlichen thermischen Zonen über einen Zeitraum von 18 Monaten verfügbar.

Das ENERGYbase kann grob in drei Bereiche gegliedert werden:

- Bürobenutzung in den Obergeschossen
- Fachhochschulbetrieb im Erdgeschoß
- Garage und Haustechnik im Kellergeschoß

Besondere Merkmale des architektonischen Konzepts sind die sogenannten Grünpflanzenpuffer und die gefaltete Südfassade, die ebenfalls im Simulationsmodell berücksichtigt wurden. Diese Grünpuffer dienen als Funktionseinheit der Lüftungsanlage zur Vorkonditionierung der Luft, wenn dies möglich und erforderlich ist. Die gefaltete Südfassade trägt die Photovoltaikmodule des Gebäudes und wirkt als fixe geometrische



Abbildung 1: Süd-Westansicht des ENERGYbase

Verschattung für die im Süden gelegenen Großraumbüros. Die Geometrie dieser Kombination aus opaken und transparenten Flächen ist so dimensioniert, dass die direkte Solarstrahlung bei niedrigem Sonnenstand in den Innenraum eindringen kann und bei hohem Sonnenstand von den Photovoltaikmodulen ausgeblendet wird. Dieser Zusammenhang ist durch die Abbildung der Fassadengeometrie im Gebäudemodell ebenfalls enthalten.

MODELLIERUNG UND SIMULATION

Datenerfassung der Randbedingungen

Basierend auf den Polierplänen aus der Zeit der Bauerstellung des ENERGYbase wurde die Raumaufteilung der einzelnen Geschosse erfasst und für die weitere Verarbeitung aufbereitet und bereitgestellt. Es fand eine Einteilung der verschiedenen Nutzungsbereiche statt, die für eine detaillierte Zuweisung der unterschiedlichen internen Lasten bzw. des Benutzungsgrads der Räumlichkeiten im Modell herangezogen wurde. Des Weiteren wurden die Topologie und die Komponenten der HLK Anlagen erfasst. Insbesondere die Bauteiltemperierung zum Heizen und Kühlen des Gebäudes wurde in dieser Phase berücksichtigt, da diese in der Entscheidungsfindung der Zonierung des Modells eine maßgebliche Rolle spielte. Den Plänen wurden die Dimensionen der relevanten Flächen und die detaillierten äußeren und inneren Wandaufbauten, sowie die Beschaffenheit der verbauten Fensterflächen entnommen und für eine Implementierung in das Gebäudemodell aufbereitet.

Gebäudemodell

Die geometrischen und bauphysikalischen Daten des Objekts wurden mittels Google SketchUp (Google Inc. 2006) in Verbindung mit OpenStudio für TRNSYS (Klein, Duffie, and Beckman 2008) erfasst (siehe Abbildung 2), und in einem IDF (Input Data File) mit TRNSYS-spezifischer Formatierung gespeichert. Dieses IDF diente als Ausgangsbasis für das Simulationsmodell im TRNSYS-eigenen Editor für Gebäude, TRNBuild. Mittels TRNBuild wurden der

Baustruktur interne thermische Lasten (künstliche Beleuchtung, elektrische Geräte, Personen), Energieverteilungssysteme und bauphysikalische Daten (thermodynamisch relevante Materialdaten, Infiltration, g-Werte, etc.) zugewiesen. Wesentliches Augenmerk wurde auf die Unterteilung der thermischen Bauteiltemperierung in den Decken- und Fußbodenkonstruktionen gelegt. Diese wurde in Übereinstimmung mit der tatsächlichen Ausführung modelliert; die Zonierung der Geschosse basiert ebenfalls auf diesen Unterteilungen.

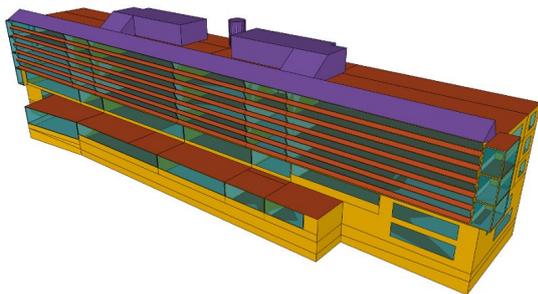


Abbildung 2: Süd-Ostansicht des Modells ENERGY-base

Aus den vier Obergeschossen, dem Erdgeschoss und Kellergeschoss ergibt sich ein umfangreiches Gebäudemodell mit 68 thermischen Zonen, ca. 750 zugewiesenen Wand-, Decken- und Bodenelementen und ca. 150 Fensterflächen. Die Zonierung teilt sich vorwiegend in Büroräume, Sanitärräume, Teeküchen, einen Laborbereich, und Lehrsäle für den Betrieb einer Fachhochschule mit teilweiser Nutzung als EDV-Räume, auf. Weitere haustechnische Anlagen, vor allem Lüftungsgeräte, befinden sich auf dem Dach des Gebäudes. Die Einhausungen dieser Anlagen wurden nicht als thermische Zonen sondern als Verschattungselemente, Abbildung 2, modelliert.

Eine wesentliche Schnittstelle zwischen der Gebäudephysik und der technischen Gebäudeausrüstung bildet die Betonkern- oder Bauteiltemperierung. Die Versorgung der Bauteilaktivierung findet über vier Hauptverteiler statt, die sich auf den unterschiedlichen Geschossen auf insgesamt 48 Unterverteiler aufteilt. Ausgehend von den Unterverteilungen wurden die einzelnen Kreisläufe in den Zonen realitätsgetreu nachgebildet. Die Bauteiltemperierung wird für den Heizfall von zwei Wärmepumpen mit einer Wärmeleistung von jeweils 177 kW gespeist. Zur Modellierung der Wärmepumpen wurden die spezifischen Kennlinien der verbauten Geräte in einer Komponente modelliert, in das Gesamtmodell implementiert und hydraulisch verschaltet.

Validierung bzw. Kalibrierung des Modells anhand der Monitoringdaten

In ersten Simulationen wurde das bauphysikalische Gebäudeverhalten sowie die Funktionsweise der modellierten Betonkernaktivierung und der Wärmepumpenmodelle auf Plausibilität geprüft. Dies war möglich durch den Vergleich der Simulationsergebnisse mit den in den ENERGYbase-Referenzräumen aufgezeichneten Messdaten.

Die zu vergleichenden Parameter waren die Innenraumtemperaturen und die Wärmemengen in den Unterverteilungen der Betonkernaktivierung der ausgewählten Zonen. Für die Bewertungen der Modelle wurden gemessene Daten der Wetterstation Donaufeld (ca. ein Kilometer Entfernung zum Standort des Gebäudes) in die Simulation eingepflegt. Die tatsächlich vorherrschenden Regelstrategie der Lüftung und Wärmepumpen wurde sowohl aus der regelungstechnischen Spezifikation, als auch mit Zuhilfenahme der aufgezeichneten Schaltzustände in die Simulation übertragen. Die internen Lasten entsprachen den Bedingungen zur Zeit der Messwertaufzeichnung, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erreichen. Die Simulation zur Bewertung der thermischen Funktionalität der Bauteiltemperierung wurde für den Zeitraum von 1. November 2009 bis 7. November 2009 durchgeführt. Exemplarisch ist in Abbildung 3 die Beladeleistung der Bauteiltemperierung für diesen ausgewählten Bereich zu erkennen. Durch die relativ „loosen“ Randbedingungen bezüglich der Regelung für die Bauteilaktivierung ist eine Abweichung in der zeitlichen Abhängigkeit der Beladeleistungen zu erkennen. Jedoch ist die kumulierte Beladeleistung über den Zeitraum dieser Woche fast identisch. Diese Tatsache und der qualitative Verlauf der summierten Leistungen lassen darauf schließen, dass die Abbildung der Bauphysik, die angenommenen internen Lasten und die Belüftung der thermischen Zonen im Modell eine sehr gute Näherung der tatsächlichen Beschaffenheiten darstellen.

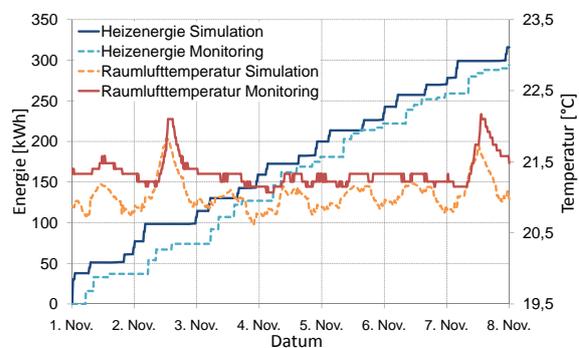


Abbildung 3: Vergleich Monitoringdaten/Simulation

Simulation exemplarischer Szenarien

Das größte Potenzial wetterprognoseunterstützter Regelung ist bei starken Änderungen der Außenlufttemperatur oder der solaren Strahlung zu erwarten. Simulationen mit realen Wetterdaten vom Standort des Objektes zeigen jedoch, dass eine starke Änderung der Außenlufttemperatur im Falle eines Gebäudes nach Passivhausstandard wenig direkten Einfluss auf die Innenraumtemperatur hat.

Abbildung 4 zeigt eine Gegenüberstellung der Außenlufttemperaturen und der Innenraumtemperaturen für den Zeitraum von 07. Oktober 2009 bis 13. Oktober 2009. Die betrachtete thermische Zone des Modells ist den realen Parametern bezüglich der inneren Lasten und der Belüftung der Räumlichkeiten nachempfunden. Der Zone wurde während dieser Periode keine zusätzliche Heizenergie zur Verfügung gestellt. Die Außentemperaturwerte entsprechen den tatsächlich gemessenen Werten der Wetterstation Wien Donauefeld. Es ist erkenntlich, dass trotz einer Temperaturänderung von über 20 K in einem Zeitraum von ca. 5 Tagen, die Innenraumtemperatur in sehr gedämpfter und verzögerter Form der Tendenz folgt. Durch diese Tatsache wird eine Berücksichtigung

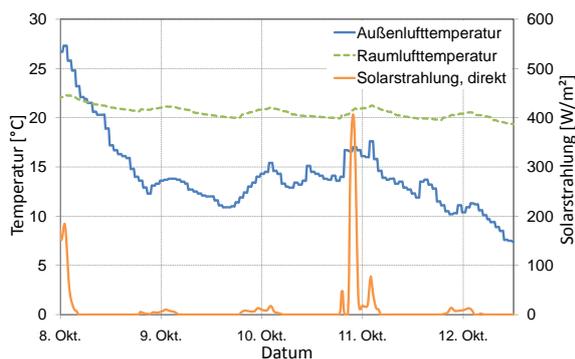


Abbildung 4: Solare Strahlungsintensität, Innenraumtemperatur und Raumlufttemperatur für den Zeitraum 08.10.09 bis 13.10.09

einer starken Änderung der Außenlufttemperatur bei einer wetterprognoseunterstützten Regelung in einem Passivhaus obsolet. Bei einer starken Dämmung der Gebäudehülle ist vielmehr der Anteil der internen und der solaren Lasten von Interesse. Im Zuge dieser Untersuchung soll daher der Fokus auf die solare Lasteinbringung gelegt werden.

Die Energiebilanz in Abbildung 5 verdeutlicht das thermische Verhalten der Gebäudehülle und zeigt einen geringen Anteil der Transmissionsverluste im Vergleich zum solaren Eintrag in die thermische Zone. Für eine Regelung, die die prognostizierte Intensität der solaren Last mit einbezieht ist zu berücksichtigen, dass eine ausreichende Prognostizierbarkeit gewährleistet werden kann. Die Genauigkeit der Prognose von Temperaturwerten im Tagesverlauf ist bei hinreichendem Aufwand und adäquatem Prädik-

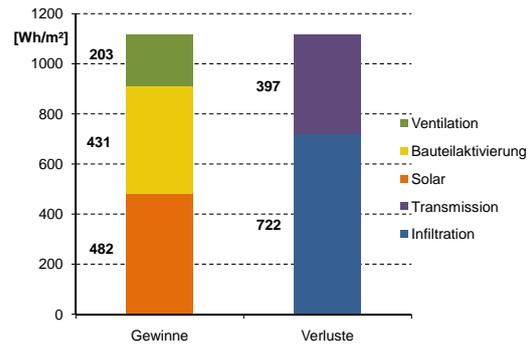


Abbildung 5: Energiebilanz einer thermischen Zone im Gebäudemodell

tionshorizont für eine Regelung im Gebäudebereich ausreichend. Hingegen ist eine Vorhersage von Einstrahlungsintensitäten nur in einem bestimmten Rahmen für eine prädiktive Regelung von Nutzen. Eine realistische Zeitkonstante der thermischen Zone liegt bei Lasteintrag durch direkte Strahlung bei ca. fünf Stunden (Hube 2004). Ein stark wechselndes Auftreten solarer Last ist zum einen bei gerechtfertigtem Aufwand nicht ausreichend genau prognostizierbar und zum anderen für regelungstechnische Belange nicht von Bedeutung. Aus diesem Grund wurden für die betrachteten Szenarien Tage ausgewählt, die einen hohen Unterschied der gemittelten direkten Strahlungsintensitäten zwischen Vormittag ($E_{vm\text{gem}}$) und Nachmittag ($E_{nm\text{gem}}$) aufweisen. Abbildung 6 zeigt die für diese Betrachtung relevanten Tage aus dem Wetterdatensatz der Wetterstation mit dem Standort Wien Donauefeld im Zeitraum 01. April 2009 bis 31. März 2010.

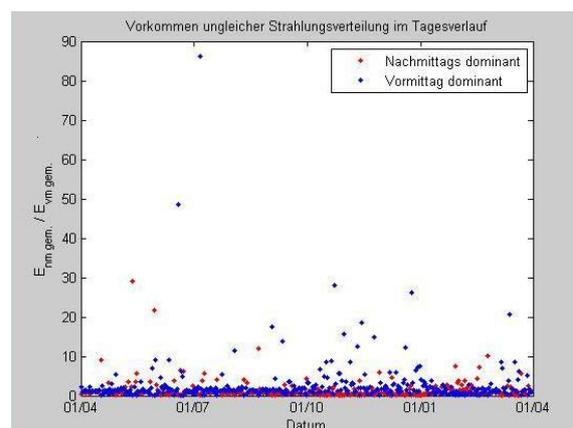


Abbildung 6: Ungleiche Strahlungsverteilung vor und nach 12:00 Uhr

Als exemplarisches Simulationsbeispiel wurde der Zeitraum zwischen dem 21. Februar 2010 und dem 28. Februar 2010 herangezogen. Anhand dieses

Beispiels soll untersucht werden, ob eine Einsparung der Primärenergie zu Heiz- und Kühlzwecken durch die Berücksichtigung der prognostizierten solaren Strahlung erreicht werden kann und in welchem Umfang sich diese bewegt. Die ausgewählte Zeitperiode zeigt eine Problematik, die mit prognostizierten Werten vermindert oder vermieden werden könnte. Es ist in Abbildung 7 die Strahlungsintensität und die Außenluft der ausgewählten Zeitperiode zu sehen. Dieser Woche ist eine längere kältere Zeitspanne vorausgegangen. Es ist zu berücksichtigen, dass ein Zeitraum beschrieben wird, in dem der Azimutwinkel der Sonne im Zenit für den Standort Wien knapp über 30° liegt (<http://homepage.boku.ac.at>). Der flache Einfallswinkel der direkten solaren Strahlung hat somit einen starken Einfluss auf die Innenraumtemperatur des Gebäudes.

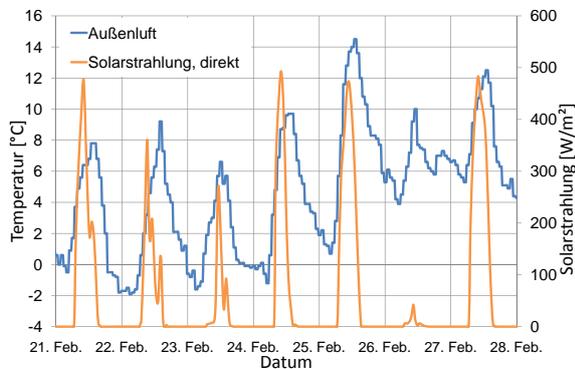


Abbildung 7: Solare Strahlungsintensität und Außenlufttemperatur für den Zeitraum 21.02.10 bis 28.02.10

Die regelungstechnische Vorgabe der Vorlauftemperatur richtet sich nach den vergangenen 48 h des jeweiligen Zeitpunktes. Durch die relativ niedrigen Temperaturen zu Beginn der betrachteten Periode ist eine unverhältnismäßig hohe Vorlauftemperatur der BTT im Heizfall für die Tage mit starker solarer Last vorgesehen. Die ungünstigste Auswirkung ist in Abbildung 8 zu beobachten.

Die aktuellen Außenlufttemperaturen und der Temperaturverlauf der vergangenen 48 h regeln die Beladung der BTT. Mit der zusätzlichen solaren Last im Gebäude kommt es zu einer Überhitzung der südlich orientierten Zonen. Eine Kühlung der Zone wird notwendig um den Komfortbereich nicht zu verletzen. Es ergibt sich der Fall, dass vormittags geheizt und nachmittags gekühlt wird. Im optimalen Betrieb würde die Wärmeerbringung über die BTT vermindert stattfinden und keine Kühlung notwendig sein. Die Einsparung würde sich sowohl durch die verminderte Heizenergie als auch durch die fehlende oder stark verminderte Kühlenergie (in diesem speziellen Fall die Energie für die Förderpumpen der freien Kühlung) bemerkbar machen. Durch die hohe Kapazität der aktivier-

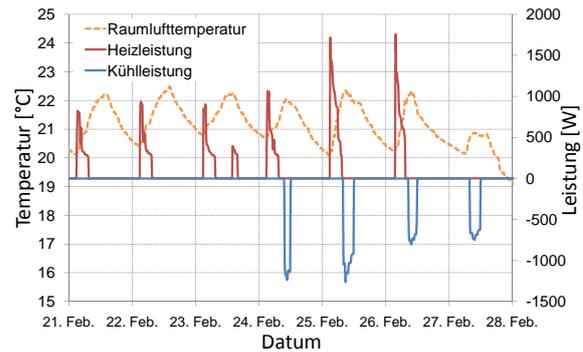


Abbildung 8: Simulation der Heiz- und Kühlleistung ohne Prädiktion

ten Baumasse ist die Energieaufwendung bei einem gegensätzlichen Arbeiten der BTT nicht unerheblich. Das Ergebnis der Simulation mit adaptierten Schaltzeiten der BTT ist in Abbildung 9 zu sehen. Der Vergleich der Kühl- und Heizleistungswerte aus Abbildung 8 zeigt, dass sowohl die Heizleistung als auch die Kühlleistung maßgeblich vermindert wurde. Die Raumlufttemperaturen sinken im adaptierten Fall auf unter 19°C . Dies liegt jedoch noch im angegebenen Komfortbereich, der sich in diesem Fall von $18\text{--}23^\circ\text{C}$ erstreckt. Für diese Beispielwoche konnte durch eine

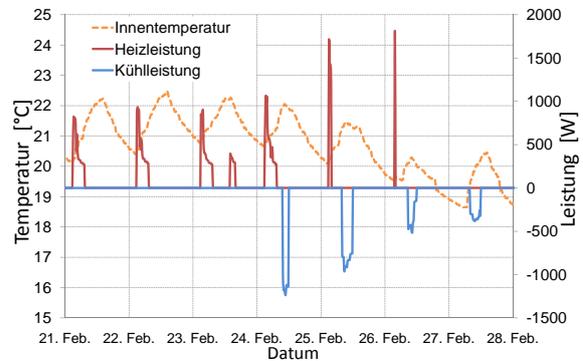


Abbildung 9: Simulation der Heiz- und Kühlleistung mit Prädiktion

einfache Verkürzung der Beladezeiten der BTT eine Einsparung der Heizenergie um 15% und eine Verminderung der verbrauchten Energie zu Kühlzwecken um 35% erreicht werden. Weiters ist Abbildung 6 zu entnehmen, dass es sich bei einer ungleichen Strahlungsverteilung über den Tagesverlauf um keine Ausnahme handelt. Durch eine Einbeziehung der Wetterprognosen und der Ausweitung der Regelungstechnik diese zu berücksichtigen, sind somit auch im Passivhausbereich durchaus Potenziale in der Energieeinsparung zu erreichen.

ZUSAMMENFASSUNG

Die komplexe Modellierung und Simulation des ENERGYbase, ein Bürogebäude im Passivhausstandard am Standort Wien, Floridsdorf, konnte erfolgreich mit den Monitoringdaten des Objektes validiert und verglichen werden. Das validierte Modell wurde für die Simulation des Einflusses einer wetterprognosegeführten Steuerung der Bauteiltemperierung auf den Heiz- und Kühlenergiebedarf herangezogen. Eine Analyse der Energieströme durch die Gebäudehülle zeigte, dass aufgrund des hohen Ausführungsstandard der Gebäudestruktur die Innenraumkonditionen durch die Außenlufttemperatur geringfügig beeinflusst wird. Die Solarstrahlung ist neben den internen Wärmequellen hauptsächlich für tägliche Temperatur und Feuchtigkeitschwankungen in den simulierten Zonen verantwortlich. Die Untersuchung einer potentiellen Energieeinsparung wurde daher für den Zeitraum Ende Februar 2010 durchgeführt. Diese zeigt, dass ein Überschwingen der Raumlufttemperatur und der damit verbundene Kühlenergiebedarf infolge eines Wetterschwungs mit stark steigender Solarstrahlung durch Berücksichtigung der Wetterprognose vermieden und somit Heiz- als auch Kühlenergie eingespart werden kann. Die Verwendung idealer Prognosedaten in diesem Fall zeigt die maximal möglichen Einsparungen. Zukünftige Analysen mit unterschiedlichen Vorhersagegenauigkeiten inklusive Falschprognose werden zur Veranschaulichung des möglichen Potentials angestellt. Weiters ist die Solarstrahlung aufwändiger zu prognostizieren als die Außenlufttemperatur. Deren Einfluss ist bei Bestandsgebäuden mit niedrigem Wärmedämmstandard signifikanter und kann ebenfalls als Vorhersageparameter in die Steuerung miteinbezogen werden.

Neben der Adaptierung der Schaltzeiten, wie in dieser Untersuchung angewendet, kann zusätzlich eine Adaptierung der Vorlauftemperaturen erfolgen um die Effizienz noch zu erhöhen. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass der direkte Einfluss der solaren Einstrahlung auf die Raumtemperaturen und der damit zusammenhängenden Energiebilanz unterstützt wird vom Einfluss der solaren Strahlung auf die solarthermischen Systeme des Gebäudes. Durch eine intelligenten Einbindung der solaren Prognosen in die passiven und aktiven Systeme des Passivhauses kann die Effizienz noch maßgeblich gesteigert werden.

REFERENCES

- Boller, U. 2007. *Wettervorhersagen bringen mehr Komfort und sparen Energie*. Lissabon: Pressemitteilung Siemens Building Technologies Deutschland, Fachpresseforum.
- Freire, R.Z., G.H.C. Oliveira, and N. Mendes. 2008. *Predictive controllers for thermal comfort optimization*. Energy and Buildings 40. 1353-1365.
- Google Inc. 2006. Google SketchUp version 6.1.

- Hube, W. 2004. *Prädiktive Wärmeflussregelung solaroptimierter Wohngebäude mit neuartigen Verschattungs- und Speichersystemen*. Kaiserslautern: Thesis, Universität Kaiserslautern.
- Hube, W., and C. Wittwer. 2000. *Entwicklung von neuartigen Regelungskonzepten mit Hilfe der Simulationsumgebung ColSim und deren Validierung im Feldtest*. Bad Staffelstein: 10. Symposium Thermische Solarenergie, OTTI-Kolleg.
- Klein, S.A., J.A. Duffie, and W.A. Beckman. 2008. *TRNSYS, a Transient System Simulation Program. User's Manual (version 16)*. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison.
- Krauss, J., M. Bauer, N. Morel, and M. El-Khoury. 1998. *Neurobat - Predictive Neuro-Fuzzy Building Control System. Schlussbericht*. Bern: BfE.
- Krauss, J., M. Bauer, Ch. Oberhauser, and N. Morel. 1999. *Neuro-Fuzzy Heizungsregler (Phase II). Jahresbericht*. Bern: BfE.

SIMULATIONSVERGLEICH VON PELLETSKESSELMODELLEN

Heike Huber-Fauland, Dietrich Wertz, Karl Ponweiser, Markus Haider
 Institut für Energietechnik und Thermodynamik, TU Wien
 Getreidemarkt 9/302, 1060 Wien
 +43 1 58801 30217
heike.huber-fauland@tuwien.ac.at

KURZFASSUNG

Diese Arbeit befasst sich mit der Gegenüberstellung von Simulationsmodellen eines Pelletskessels in Trnsys, Dymola und Excel. Zusätzlich werden die Ergebnisse der Simulationen mit den Messwerten eines realen Kessels verglichen. Untersucht werden zwei verschiedene Lastfälle, nämlich das Auskühlverhalten und das Aufheizverhalten des Kessels. Es wird dazu der zeitliche Verlauf des Anforderungssignals an den realen Kessel aus den gemessenen Werten in die Simulationsprogramme eingelesen und die Kesselwassertemperatur sowie die benötigte elektrische Leistung aus den Messdaten mit den Ergebnissen der Simulation verglichen.

ABSTRACT

This paper deals with the comparison of simulation models of a pellets boiler in Trnsys, Dymola and Excel, in addition to comparing the simulation results with measurement results of a boiler. Two different load cases are analyzed, one shows the cool-down behaviour, the other the heating-up respectively reheating behaviour. The boiler water temperature and the electric power consumption are compared.

EINLEITUNG

Am IET (Institut für Energietechnik und Thermodynamik) wird mit den Programmen Dymola¹ und Trnsys² gearbeitet. Zwischen den Anwendungsgebieten dieser Simulationsprogramme gibt es Überschneidungen. Dabei stellt sich immer die Frage, welches Programm die Realität in welchem Anwendungsfall besser abbildet. Ein wichtiger Aspekt für die Entscheidung für oder gegen ein bestimmtes Simulationsprogramm ist die Diskrepanz zwischen verfügbaren und benötigten Daten um den Kessel abzubilden. In der Praxis sind die Parameter, die in der Simulationsumgebung eingegeben werden müssen, in Prüfprotokollen oder in Herstellerangaben nicht immer enthalten. Der Trend geht in Richtung umfassende Gebäudesimulation; alle dafür notwendigen Aspekte

soll dieses Modell abbilden können; vorausgesetzt wird eine richtige Installation auf handwerklich/ingenieurmäßiger Ebene.

Die Simulationsmöglichkeiten von Pelletskesseln sind mit Trnsys schon sehr vielfältig (Klein, 2000):

- Type 370 (Koschak et al., 1998),
- Type 210 (Persson et al., 2009), (Nordlander S. 2003)
- Type 869 (Haller, 2009).

Das zuletzt genannte Modell wird in dem Projekt TecNet zum Vergleich verschiedener Hausanlagen-Standards verwendet.

In Dymola gibt es einige Kesselmodelle wie z.B. in der AT plus library für Modelica (BoilerFF, 2005). Dieses Modell ist aber nicht spezifisch für Pellets ausgelegt.

Für die Abbildung eines Pelletskessels im Forschungsprojekt ADRES³, an dem das IET beteiligt ist, wurde ein neues einfaches Modell eines Blockheizkraftwerks entwickelt (Penthor, 2009). In abgewandelter Form kann dieses Modell für die Darstellung eines Pelletskessels herangezogen werden. Im Rahmen einer Bachelorarbeit (Salcher, 2010) ist weiters ein Exceltool geschaffen worden, das das Betriebsverhalten eines Pelletskessels abbildet.

Die Modelle der einzelnen Simulationsprogramme sind untereinander jedoch bis jetzt noch nicht verglichen worden.

Einen Vergleich zwischen den Programmen gibt es bei der Gebäudesimulation zwischen Modelica und Trnsys (Wetter et al., 2006). Andere Vergleiche sind nicht bekannt.

BESCHREIBUNG DER MODELLE

Bei den herangezogenen Modellen werden die Betriebsführung und das thermische Verhalten des Kessels betrachtet. Auf Strömungs- und Verbrennungsvorgänge im Kessel (wie z.B. in (Musil, 2003) behandelt) wird nicht eingegangen.

¹ Dynamic Modeling Laboratory

² TRaNsient SYstems Simulation

³ Autonome Regenerative Dezentrale Erneuerbare Energiesysteme

Auch die Rauchgasseite und der Pelletsverbrauch werden nicht berücksichtigt.

Für den Vergleich werden folgende Modelle herangezogen:

- BHKW, (Penthor, 2009) für Dymola,
- Typ 869, (Haller, 2009) für Trnsys,
- Pelletskessel, (Salcher, 2010) für Excel.

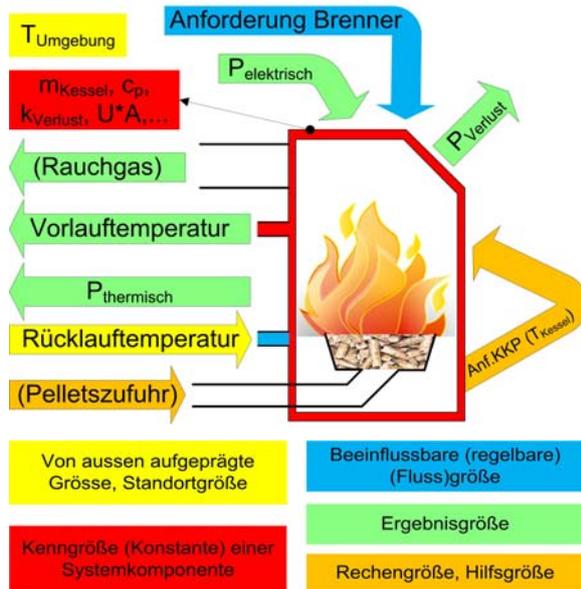


Abbildung 1: Prinzipdarstellung des Pelletskesselmodells mit Input- und Outputgrößen und kesselspezifischen Kennwerten; darunter: Farbklassen für die verschiedene Größen [Anf.KKP – Anforderung Kesselkreispumpe in Abhängigkeit von der Kesseltemperatur].

Kesselmodell in Dymola

Es handelt sich hierbei um ein am IET entwickeltes Modell eines pelletsbetriebenen Blockheizkraftwerks. Wird die Stromproduktion bei dem Blockheizkraftwerk ausgeschaltet, ist das Modell im Wesentlichen einem Pelletskessel gleichzusetzen. Die aus dem Netz bezogene elektrische Leistung wird derzeit nicht berücksichtigt, da in diesem Modell der Eigenverbrauch gegenüber der Produktion des Stroms vernachlässigt wird. Das Modell ist so ausgelegt, dass sich der Kessel wie eine einfache Masse verhält, die aufgewärmt wird. Der Pelletsbrenner liefert die thermische Leistung $P_{\text{th.nenn}}$ an das Kesselwasser. Die Wärmeverluste an die Umgebung (Aufstellraum) werden mit Hilfe des Newton'schen Abkühlungsgesetzes berechnet.

$$Cp_{\text{kessel}} \dot{T}_{\text{kessel}} = P_{\text{th.nenn}} - \dot{Q}_{\text{ver}} + \dot{m}_{\text{WTfluid}} (T_{\text{RL}} - T_{\text{VL}}) \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{\text{ver}} = k (T_{\text{VL}} - T_{\text{u}}) Cp_{\text{kessel}} \quad (2)$$

Cp_{kessel}	Wärmekapazität des Kessels	[J/K]
T_{kessel}	Temperatur des Kessels	[K]
$P_{\text{th.nenn}}$	thermische Nennleistung	[W]
\dot{Q}_{ver}	thermische Verluste	[W]
T_{vl}	Vorlauftemperatur	[°C]
T_{rl}	Rücklauftemperatur	[°C]
T_{u}	Umgebungstemperatur	[°C]
k	Abkühlfaktor	[1/s]
\dot{m}_{wtfluid}	Massenstrom des Wärmetauscherfluids	[kg/s]

Der zeitabhängige Brennstoffmassenstrom sowie der Füllstand im Pellettspeicher wird abgebildet. Die An- bzw. Abfahrvorgänge sind mit Hilfe eines exponentiellen Ansatzes beschrieben. Auf diese Aspekte wird in diesem Bericht aber nicht eingegangen.

Kesselmodell in Trnsys

Type 869 Version 5.02 ist ein physikalisches Kesselmodell, das Gas-, Öl- und Biomasse simulieren kann. Weiters kann man damit Brennwert- und modulierende Kessel abbilden. Dieses Modell ist von Haller an der TU Graz entwickelt und validiert (Haller, 2009) worden.

Die Brennkammer und die Wärmeübertragung vom Abgas ans Wasser werden stationär -, die thermische Masse des Kessels instationär gerechnet. Die genaue Modell - Beschreibung ist in der Dokumentation nachzulesen (Haller, 2009).

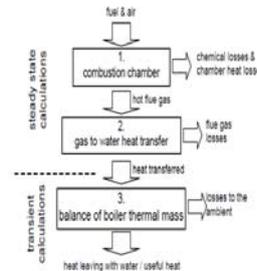


Abbildung 2: Modell – Konzept (Halle et al., 2009)

Kesselmodell in Excel

Die Abbildung des Pelletskessels in Excel beruht auf einfachen physikalischen Zusammenhängen. Die Berechnung erfolgt mit der Finite-Differenzen-Methode. Der Kessel ist als nicht modulierend abgebildet, berücksichtigt jedoch die Gluterhaltung. Die Modellgleichungen entsprechen dem Dymola Modell.

VERGLEICH DER MODELLE

Teillast- und Start/Stopp Verhalten

Lange Laufzeiten sind gefordert, um die Emissionen zu reduzieren, die während des Zündvorgangs maximal sind (Streicher, 2006). Mit der Anzahl der Zündungen steigt außerdem der elektrische

Energiebedarf des Kessels. Eine Mindestlaufzeit und eine daran anschließende Sperrzeit (Kessel startet nicht, auch wenn der übergelagerte Regler den Kessel anfordert) ist bei Type 869 einstellbar. Durch modulierenden Betrieb ergeben sich längere Laufzeiten des Kessels, dies kann man aber einfacher durch Schichtladung in den Pufferspeicher erreichen.

Das Dymola Modell BHKW und die Excel-Berechnung sind nicht auf die Abbildung des Teillastverhaltens ausgelegt. Trnsys Type 869 kann zwar auch einen modulierenden Betrieb simulieren, da Pelletskessel in Österreich aber üblicherweise ohnedies in Verbindung mit Pufferspeichern installiert werden, wird der Teillastbetrieb des Kessels nicht näher betrachtet.

Gluterhaltung

Im Gluterhaltungsbetrieb werden die Pellets nach Beendigung des Anforderungssignals langsam weiter verbrannt. Dies bewirkt eine weitere Energiezufuhr zum Kesselwasser.

Falls im Gluterhaltungsbetrieb eine erneute Anforderung kommt, läuft der Zündvorgang dadurch schneller ab. Die Gluterhaltung funktioniert, indem der Luftstrom aufrechterhalten, allerdings reduziert wird. Pellets werden keine mehr auf den Brennteller gefördert.

Die Restwärme aus der Gluterhaltung wird in der Excel Berechnung berücksichtigt, in Dymola und Trnsys hingegen nicht.

VALIDIERUNG

Für die Validierung stehen Messdaten des Anforderungssignals, die Kesselaustrittstemperatur und die elektrische Leistung des Pelletskessels Ökofen PE08 zur Verfügung.

Die Messung erfolgt im Rahmen des laufenden Betriebs an dem oben genannten Kesseltyp. Aufstellungsort ist ein Einfamilienhaus im Südburgenland. Der Pelletskessel ist in ein Heizsystem mit einer Solaranlage eingebunden (Abbildung 3).

Das Anforderungssignal kommt aufgrund der Speichertemperatur zu Stande: Wenn die Speichertemperatur im Bereich des oberen Pelletskesselanschlusses (Kesselvorlaufleitung) unter 55°C fällt, wird so lange geheizt, bis die Temperatur auf Höhe des Kesselrücklaufs 65°C erreicht hat. Durch diese Regelung werden im praktischen Betrieb durchschnittliche Laufzeiten von ca. einer Stunde erreicht.

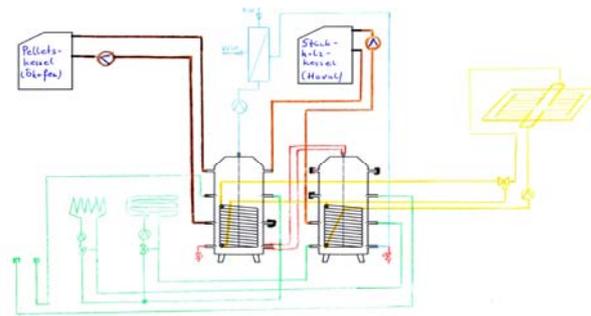


Abbildung 3: Vereinfachtes hydraulisches Schaltschema, Anlage Wertz

SIMULATION

Für die Simulation werden die Parameter des Prüfberichtes (Schrottmaier, 2004) und das Anforderungssignal der Messung übernommen.

Tabelle 1

Eckdaten der Simulation

P_{thnen}	8 kW
T_{Raum}	22°C
T_{RL}	22°C
T_{VL}	60°C
m_{kesselw}	40 l
C_{Kessel}	257 kJ/K
\dot{m}_{Pumpe}	0,15 kg/s

Es werden zwei Lastfälle simuliert:

1. Anfahren aus dem Stillstand, 2stündiger Betrieb und 1.pwhhAuskühlen
 Simulationsdauer 48 Stunden
 - Vergleich der Kesselwassertemperaturen
2. Anfahren aus dem Stillstand, 1stündiger Betrieb, 2stündige Pause und wieder 1stündiger Betrieb.
 Simulationsdauer 5h.
 - Vergleich der Kesselwassertemperaturen
 - Vergleich der elektrischen Leistung

Die elektrische Leistung kann bei dem Dymola Modell nicht mit betrachtet werden.

Dymola

Die zeitliche Diskreditierung der Simulation wird vom Programm selbst bestimmt, die Ausgabeschrittweite kann aber vom Benutzer festgelegt werden.

Trnsys

Type 869 hat viele verschiedene Parameter und Input Möglichkeiten, die bei diesem Vergleich nicht notwendig sind. Der Kessel wird als nicht modulierend und ohne Brennwertbetrieb eingestellt. Das Modell wird mit dem Anforderungssignal gesteuert. Die benötigte Kesselkreislaufpumpe wird mit Type 3b und einem Hystereseregler – Type 2d dargestellt. Die Pumpe liefert dem Kessel die

Kesselwassereintrittstemperatur und den Massenstrom. Es wird in Zeitschrittweiten von einer Minute simuliert.

Excel

Es wird nur das Anforderungssignal als einziger Input benötigt, alle anderen Parameter sind aus dem Prüfbericht als Fixwerte übernommen. Es wird in Ein-Minuten Zeitschrittweiten simuliert

VERGLEICH SIMULATION

Lastfall 1

In Abbildung 4 sind die Kesselwassertemperaturen für den ersten Lastfall dargestellt (linke Skala). Weiters findet man in der Darstellung noch das Anforderungssignal (blau gepunktet, rechts skaliert).

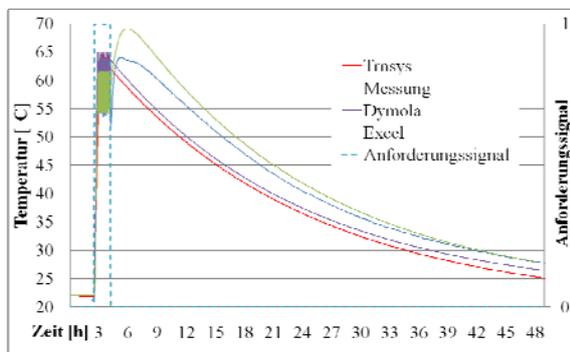


Abbildung 4: Temperaturverlauf für Lastfall 1

Dabei fällt auf, dass die Messung (blau) und die in Excel (grün) berechneten Kurven beide nach dem Abfallen des Anforderungssignals eine Restwärme aus dem Gluterhaltungsbetrieb aufweisen.

Durch diese Restwärme kommt es auch nach Beendigung der Anforderung zu einer weiteren Erwärmung des Kesselwassers. Bei dem gemessenen Kessel läuft die Kesselkreispumpe so lange, bis 65°C überschritten werden. Der Peak der Excel Berechnung ergibt sich dadurch, dass die Kesselkreislumpumpe nur dann läuft, wenn der Kessel angefordert wird. Somit erfolgt kein Wärmeabtransport, wenn keine Anforderung anliegt.

Die Restwärme wird in Trnsys (rot) und in Dymola (violett) nicht abgebildet. Dadurch ergibt sich, dass die Abkühlung schon früher einsetzt. In Abbildung 4 ist im Detail ersichtlich, wie sich der Restwärme auswirkt.

Die Abkühlungsdauer liegt bei allen 3 Simulationsarten in der gleichen Größenordnung. Nach 48 Stunden liegt die Kesselwassertemperatur nur noch knapp über der Raumtemperatur von 22°C.

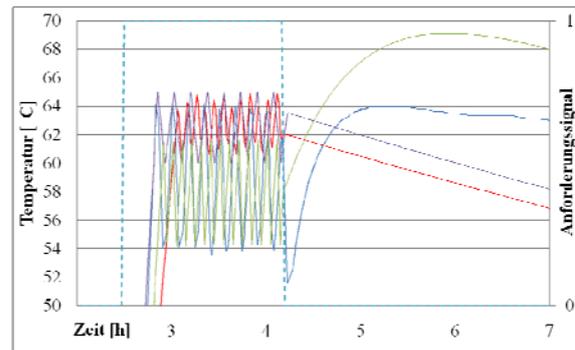


Abbildung 5: Lastfall 1 Aufheizen

Die Temperaturschwankungen, die sich ergeben, während das Anforderungssignal anliegt, stammen aus dem Regelverhalten der Kreislaufkesselpumpe. Sie sind aus Abbildung 5 einfach abzulesen. Da in jedem Simulationsprogramm die Kesselkreislumpumpe anders abgebildet wird, ergeben sich hier unterschiedlichen Schwankungsbreiten. Qualitativ bleiben sie aber alle im gleichen Bereich.

Weiters ist in Abbildung 4 zu erkennen, dass es bei allen drei Simulationen, wie in der Realität, keinen sprunghaftigen Temperaturanstieg gibt. Es braucht auch in den Simulationen eine gewisse Zeit, bis die Pellets tatsächlich brennen und thermische Energie an das Kesselwasser abgeben.

Lastfall 2

In Abbildung 5 ist die elektrische Leistung während eines Wiederlaufvorgangs abgebildet. Bei der ersten Anforderung hat das Trnsys Modell und die Excel Berechnung eine erhöhte elektrische Aufnahme gegenüber der Messung. Dies ist durch den Zündvorgang zu erklären. Die Zünddauer ist bei Trnsys Modell fix eingestellt. In der Realität hingegen ergibt sich eine von der Rauchgastemperatur abhängige Zündungsdauer. In Excel wird anstelle der Rauchgastemperatur zur Vereinfachung die Kesseltemperatur als Kriterium herangezogen, woraus folgt, dass bei der zweiten Anforderung der Kessel in der Excel-Berechnung nicht mehr zündet, da die Kesselwassertemperatur noch über der Zündtemperatur von 60°C liegt. Die hohe Temperatur ergibt sich, wie im ersten Lastfall beschrieben, durch das Nicht-Einschalten der Kesselkreispumpe.

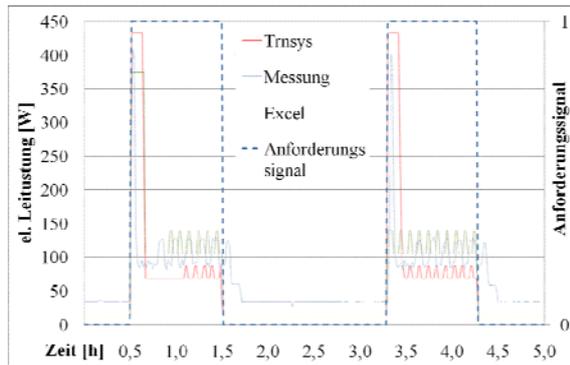


Abbildung 6: Lastfall 2: elektrischer Leistungsverlauf

Während das Anforderungssignal null ist, geht die elektrische Leistung auf den Standby Betrieb zurück. Hier wird jedoch offensichtlich, dass die Excel Berechnung und die Trnsys Simulation auf den Wert des Prüfberichts fallen. Bei der Messung ist noch ein Heizkreisregler samt Heizkreispumpe mit erfasst, der diesen Wert erhöht.

Bei allen Kurven sind nach dem Zündvorgang Schwankungen zu beobachten, die sich durch die Kesselkreispumpe ergeben. Dass diese Pumpe während der Messung auch nach dem Anforderungssignal noch kurz nachläuft, wird in Abbildung 6 ersichtlich.

Die elektrische Arbeit für den Zeitraum findet man in Tabelle 2.

Tabelle 2: elektrische Arbeit Lastfall 2

0-5 Stunden	Arbeit	Relativer Fehler
Messung	351,05Wh	-
Trnsys	283,65Wh	-19,20%
Excel	303,65Wh	-13,50%

Dieser Fehler lässt sich durch die oben schon erwähnten Punkte erklären:

- Zünddauer
- Standbybetrieb
- Regelung der Pumpe

In Abbildung 7 sind die Temperaturen für den zweiten Lastfall dargestellt.

Hier ist wieder die Restwärme des Kessels in der Realität und in der Berechnung mit Excel zu erkennen.

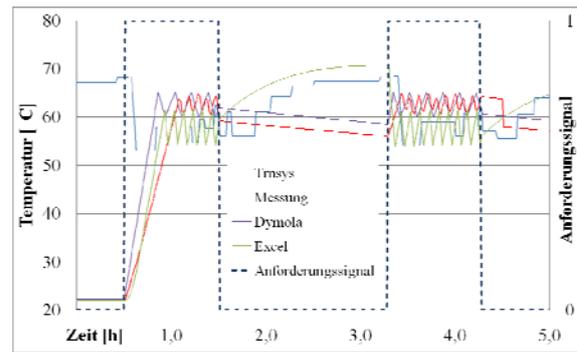


Abbildung 7: Lastfall 2: Temperaturverlauf

Die Temperaturschwankungen ergeben sich wieder aufgrund der Regelung der Kesselkreislaufpumpe. Es ist zu berücksichtigen, dass diese Periode von Messungen aus einer Gesamtmessreihe entnommen ist. Somit ist die Anfangstemperatur höher als bei den Simulationsprogrammen.

Während des Heizvorganges schwankt je Reglereinstellungen die Temperatur um die 60 °C.

ZUSAMMENFASSUNG

Die drei verglichenen Simulationsmodelle bilden das globale Verhalten, wie man an Hand der Messdaten sieht, eines realen Pelletskessel gut ab. Aufpassen muss man jedoch bei der Regelung der Kesselkreispumpe. Hier sind die größten Unterschiede zu erkennen. Jedoch ist es von der Problemstellung abhängig, wie sehr diese Abweichungen des Regelverhaltens in die Betrachtungen mit einbezogen werden müssen. Es ist bei allen drei Modellen möglich, aus dem Prüfbericht den Kessel im Rahmen unserer Vorgaben nachzubilden.

DANKSAGUNG

Unser Dank gilt Herrn Haller, dass er uns das Modell für die Arbeit am Projekt TecNet und für den Vergleich zur Verfügung gestellt hat.

LITERATUR

BoilerFF, 2005, ATplus.Hvac.Heating.Advanced. Uni Karlsruhe: (http://www.eit.uni-kl.de/litz/forschung/BuildingSimulation/Modelica-html/help/ATplus_Hvac_Heating_Advanced.html. 4.6.2010)

Haller M., Haberl, R., Dröscher, A., Konersmann, L., Frank, E., 2009, Vergleich verschiedener Ansätze zur Simulation von Öl-, Gas- und Pellets-Kessel. Bad Staffelstein: 19. OTTI Symposium Thermische Solarenergie.

- Haller, M., 2009, Type 869 Boiler Model. IWT TU Graz, Graz .
- Klein, et al. 2000. Trnsys 16, a transient system simulation program. Madison USA: Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin.
- Nordlander S. 2003 TRNSYS model for Type 210, Pellet stove with liquid heatexchanger., Solar Energy Research Center, Höskolan Dalarna, Borlänge, Sweden.
- Koscha, A., Friedler,T., Knirsch, A., Breuer, C. 1998. TRNSYS-TYPE 370 Erweiterung des. Bisherigen Gaskesselmoduls um eine Holzfeuerung mit der Möglichkeit der Brennwertnutzung – Ergänzung um einen Simulationsmodus zur realitätsnahen Simulation des Betriebsverhalten von Gaskesseln mit Takten.
- Penthor, S., 2009. Modellierung eines Mikro-Blockheizkraftwerks mit Dymola. TU Wien.
- Persson, T., Frieder, F., Nordlander, S., Bales, C., Paavilainen J., 2009. Validation of a dynamic model for wood pellet boilers and stoves. Applied Energy , 86 (5), pp. 654-656.
- Salcher A., 2010, Abbildung eines Pelletsessel in Excel. Bachelorarbeit, TU Wien, Wien.
- Schrottmaier, J., et. al. 2005. Prüfbericht Pellematic PE08. F. J. Wieselburg, Wieselburg.
- Streicher, W. et al., 2006. „Fortschrittliche Wärmespeicher - Erhöhung von solarem Deckungsgrad und Kesselnutzungsgrad und Emissionsverringierung durch verringertes Takten“, Projektbericht im Rahmen der Programmlinie Energiesysteme der Zukunft, Graz
- Wetter, M., Haugstetter C., 2006: Modelica versus Trnsys – a comparison between an equation-based and procedural modeling language for building energy simulation, United Technologie Research Center, USA. (<http://simulationresearch.lbl.gov/WETTER/download/WetterHaugstetter-2006.pdf>, 04.06.2010)

QUEEN – EIN TOOL ZUR EVALUIERUNG INNOVATIVER GEBÄUDE- UND ANLAGENKONZEPTE AUF BASIS DYNAMISCHER SIMULATION

Markus Brychta, Florian Dubisch, Peter Palensky, Florian Stift
 AIT Austrian Institute of Technology – Energy Department, Wien, Österreich

{markus.brychta, florian.dubisch, peter.palensky, florian.stift}@ait.ac.at

KURZFASSUNG

Der gegenwärtig in der Baubranche etablierte Planungsprozess ist in mancher Hinsicht konservativ. Eine frühe, abschätzende Evaluierung des energetischen Verhaltens von innovativen Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz von Gebäude- oder Haustechnik-Konzepten schon in der Vorentwurfsphase wird durch eine unzureichende Datengrundlage und fehlende Bewertungstools erschwert. Darüber hinaus resultiert aus der Anforderung nach Risikominimierung, dem Kostendruck und der Komplexität des Planungsprozesses ein hoher Erfolgsdruck auf das Planungsteam. Die genannten Faktoren stellen wesentliche Hemmnisse für den vermehrten Einsatz innovativer Gebäudetechnologien dar.

Das vorgestellte Tool ermöglicht in realen Bauvorhaben eine frühzeitige, abschätzende Bewertung unterschiedlicher Planungskonzepte hinsichtlich Energieeffizienz mittels dynamischer thermischer Simulation. Des Weiteren ist eine laufende Anpassung des Detaillierungsgrades des Modells an die Datengrundlage des aktuellen Planungsstandes möglich.

ABSTRACT

The currently established planning and design process in the building industry is in some ways a very conservative one. An early evaluation of the energetic performance of innovative architectural design- and HVAC system concepts during the concept phase of a construction project is hindered due to missing detailed data and suitable tools. Furthermore, the pressure on the planning team to succeed is extremely high due to cost-pressure, the complexity of the planning process itself and the demand to minimize the risk-potential. The mentioned factors are a substantial barrier for the increased usage of energy efficient, innovative building technologies.

The presented tool enables an evaluation of different design concepts during a very early stage in the planning process. By using results of dynamic thermal building simulation, the concepts are judged with regard to their energy efficiency. An ongoing adaptation of the level of detail of the model to the actual state of planning is possible.

EINLEITUNG

Der weltweit ansteigende Energiebedarf legt immer höhere Ansprüche an die Entwicklung und Implementierung von energiesparenden Technologien. Die primär verwendeten Energieträger sind jedoch immer noch fossile Energieträger wie Öl oder Gas (EU: Öl 37%, Gas 24%, EC, 2009)

Mit einem Anteil von 40% trägt der Gebäudesektor einen maßgebenden Teil des Primärenergiebedarfs der Europäischen Union und ist dabei Hauptverursacher der gesamten Treibhausgasemissionen (EU Parlament, 2010). Um den Bedarf an Energie des Gebäudesektors zu minimieren wurden in den letzten Jahren mehr und mehr Normen zur Steigerung der Effizienz von Gebäuden und deren Anlagen erlassen – auf Europäischem Level die EU Gebäuderichtlinie.

Im Prinzip ist jedes neu geplante Gebäude ein Prototyp, bei dem traditionell hohe Baukosten und ein komplexer Planungsprozess, sowie normative Vorgaben eher Barrieren für innovative Techniklösungen darstellen. Um Innovation zu ermöglichen und ein optimales Gebäudedesign zu erreichen, sind verbesserte Planungsabläufe notwendig. Durch einen integralen Ansatz im Hinblick auf die Funktionalität, Effizienz und weiterer relevanter Eigenschaften eines Gebäudes können innovative Planungsprozess die Gebäude der Zukunft einen Schritt näher an die 20/20/20 Ziele der EU bringen.

PROBLEMSTELLUNG

Aufgrund der in der Einleitung beschriebenen Situation im Energiebereich soll die Energieeffizienz von Gebäuden gesteigert werden. Erreicht werden kann dies durch die Planung und Umsetzung energieeffizienter Konzepte für Gebäude- und HLK-Anlagen.

Datengrundlage in frühen Projektphasen

Wie in (BAIK, 2002) skizziert, wird bereits in frühen Phasen eines Bauvorhabens (Vorentwurf, Entwurf) das grundsätzliche Konzept für das Gebäude und die haustechnischen Anlagen und damit die Grundlage für ein, oft nur implizit vorhandenes, Energiekonzept entwickelt. Oft sind gerade in diesem frühen Projektstadium viele relevante Parameter noch nicht

verfügbar, so werden z.B. Sonnenschutzeinrichtungen, Luftwechselraten (Tag-, Nachtlüftung) oder innere thermische Lasten erst im späteren Projektverlauf berücksichtigt. Nichtsdestotrotz sind auf Basis dieser geringen Datengrundlage die verschiedenen, vom Planungsteam entwickelten Konzeptvorschläge zu vergleichen und zu bewerten (BRAHME, 2001).

Bewertungskriterien

Die Bewertung der Konzeptvorschläge erfolgt anhand vielfältiger Kriterien (z.B. Funktionalität, Ästhetik), aufgrund des vorherrschenden Kostendruckes dominiert jedoch oft der Kostenfaktor. Im Gegensatz dazu ist eine Bewertung hinsichtlich Energieeffizienz untergeordnet. Darüber hinaus führen die fehlenden Informationen zum zukünftigen Betriebsverhalten und des damit verursachten Energieverbrauches des Gebäudes zu einer Überbewertung der Investitionskosten bei gleichzeitiger Vernachlässigung der Betriebskosten.

Aufwand an Ressourcen

Neben dem finanziellen besteht auch ein starker Zeitdruck während des Planungsprozesses. Es sollen deshalb sowohl die oben beschriebene Bewertung und Vergleich der Konzeptvorschläge, wie auch die weitere Optimierung der ausgewählten Konzepte mit möglichst geringem Aufwand erfolgen. Eine detaillierte Betrachtung innovativer Gebäude- und HLK-Konzepte wird dadurch erschwert.

Integrale Planung

Erfolgt die Optimierung hinsichtlich Energieeffizienz getrennt in den einzelnen Planungsdisziplinen (Architektur, HLK...), so führt dies nur selten zu einem Optimum für das Gesamtsystem „Gebäude-HLK“ - Ein integraler Planungs- und Optimierungsansatz ist nötig.

Informationsfluss

Der Einsatz von „Building Information Models“ (BIM) ermöglicht eine weitere Vernetzung der einzelnen Planungsdisziplinen. In einem BIM werden neben den architektonischen Geometriedaten, die haustechnischen Eigenschaften, alle weiteren relevanten Informationen in einem Modell zusammengefasst. Dem verbreiteten Einsatz von BIMs wird in (KNIGHT, 2010) große Bedeutung beigemessen, jedoch ist die Anwendung solcher Konzepte nur gering verbreitet (SHEN, 2010).

ZIELE

Unter Berücksichtigung der im vorigen Abschnitt skizzierten Problemstellung wird ein Tool entwickelt, welches zur Bewertung unterschiedlicher Gebäude- und Anlagenkonzepte dienen und zu diesem Behufe die folgenden Eigenschaften aufweisen soll:

- Die Bewertung der untersuchten Konzepte erfolgt auf Basis dynamischer thermischer Simulation über den Zeitraum eines Jahres. Die Eingabe der modellrelevanten Daten (Geometrie, Bauphysik,

Nutzung, HLK-System) soll mit geringem Aufwand durch den Benutzer möglich sein.

- Die Simulationen sollen Gebäude, HLK-System und Regelung in einem Modell berücksichtigen.
- Die Ergebnisse der Simulationen zum thermischen und energetischen Verhalten werden mittels vergleichender Analyse bewertet.
- Zur Ergänzung fehlender Daten in frühen Planungsphasen und zur einfacheren Handhabung sind Standarddatensätze verfügbar (Bauteile, Materialien, Verglasungen, Nutzungsprofile usw.)
- Neben oft realisierten HLK-Standardkonzepten, sind auch innovative Konzepte in der Datenbank vorkonfiguriert verfügbar.
- Das erstellte Modell kann im Projektverlauf weiterentwickelt und an den aktuellen Planungsstand angepasst werden.

BESCHREIBUNG DES QUEEN TOOLS

Das Tool QUEEN ermöglicht bereits in einem sehr frühen Stadium der Projektbearbeitung eine rasche Erfassung und Modellierung eines Gebäudes inkl. HLK-System mit dem Ziel einer thermischen und energetischen Analyse unterschiedlicher Gebäude- und HLK Konzepte auf Basis dynamischer Simulationen. Ein in QUEEN erstelltes Projekt gliedert sich in unterschiedliche Konzepte: Ein Basiskonzept und eventuell ein oder mehrere innovative Konzepte, welche aus dem Basiskonzept durch Berücksichtigung möglicher energetischer Verbesserungen abgeleitet werden. Jedes Konzept enthält zumindest folgende Daten, welche die Grundlage des BIM bilden:

- 3D Geometrie
- Bauphysik
- Nutzungsprofile
- Infiltration
- Wetter (stündliche Werte)
- HLK System
- Simulationsparameter

Basiskonzept

Hervorzuheben ist das Basiskonzept, welches eine Abbildung des derzeitigen Planungsstandes des Bauvorhabens darstellt. Für das Basiskonzept werden dem Benutzer vorkonfigurierte Standard-HLK Systeme vorgeschlagen aus denen das passende ausgewählt wird: Gas- oder Ölkessel, Fernwärme, Kompressionskältemaschine, Fan Coil, Radiator und Betonkernaktivierung.

Innovative Konzepte

Ausgehend vom Basiskonzept werden dem Benutzer dann weitere Konzepte zur Steigerung der Energieeffizienz im Bereich Gebäudehülle und HLK vorgeschlagen. Diese innovativen Konzepte umfassen einerseits Maßnahmen im Bereich der

Gebäudehülle wie z.B.: Verschattung innen/außen, erhöhte Dämmstärke, Variation der thermischen Schwere der Wandaufbauten oder der thermischen und optischen Eigenschaften der Verglasung. Darüber hinaus werden auch Vorschläge für die Gestaltung der HLK-Systeme erstellt, z.B. Wärmepumpe, Absorptionskälte, Nachtlüftung.

Technologiematrix

Die Vorauswahl, welche Konzepte und Technologie-Kombinationen sinnvoll erscheinen, erfolgt auf Basis einer Reihung hinsichtlich Energieeffizienz. Diese Informationen, wie auch Kriterien für den Ausschluss unmöglicher Kombinationen, sind in der Technologiematrix (TM) enthalten und führen zu einem Vorschlag verschiedener Maßnahmen, aus denen der Benutzer auswählt. Die TM ist editierbar und kann gegebenenfalls aktualisiert werden.

Group	Subgroup	1					2		3		4		5						
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1						1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2						1	1	4	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1
	3						1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	4						1	1	3	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1
	5						1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	6							1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	7							1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	8									1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	9									1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	10											1	1	1	1	1	1	1	1
	11											1	1	1	1	1	1	1	1
5	12																		
	13																		
	14																		
	15																		
	16																		
	17																		
	18																		

Abbildung 1: Technologiematrix

Abbildung 1 zeigt schematisch den Aufbau der Matrix: Die obere horizontale und die linke vertikale Achse sind ident und enthalten die Informationen welche innovativen Technologien in QUEEN verfügbar sind. Diese werden in der TM als Untergruppen abgebildet und in Gruppen zusammengefasst. So bilden beispielsweise die Technologien Fußbodenheizung, Konvektor und Gasdunkelstrahler die Gruppe der raumseitigen Heizungssysteme. Die Matrix besteht aus 19 Gruppen, wobei die ersten fünf Gruppen das Projekt beschreiben und vom Benutzer definiert werden. Hier werden u.a. Eigenschaften wie Gebäudetyp (Wohnung, Hotel, Büro, Lagerhalle oder Einkaufszentrum), Art der Klimatisierung oder Glasanteil der Fassade definiert. Jedes Feld der Matrix ist durch seine Koordinaten ausgedrückt, in Untergruppen definiert, und enthält einen ganzzahligen Wert zwischen null und sechs. Eine Null repräsentiert eine unmögliche Kombination, die weiteren Zahlenwerte deuten auf eine mögliche (1 Punkt) bis zu einer sehr empfehlenswerten (6 Punkte) Kombination hin. Generell werden passive Maßnahmen (1, 4, 6 Punkte) an der Gebäudehülle,

die der Steigerung der Energieeffizienz dienen, höher bewertet als aktive Maßnahmen (1, 2, 3 Punkte) am HLK System. Nach der Identifikation und dem Ausschluss unmöglicher Kombinationen, wie z.B. „Doppelboden“ und „Fußbodenheizung“, wurden im Rahmen mehrerer Workshops basierend auf Literaturrecherchen und Ergebnissen früherer Projekte die Wertungen der Kombinationen festgelegt. Mit Hilfe eines Bewertungsalgorithmus werden alle möglichen Pfade durch die Gruppen und Untergruppen auf ihre Gültigkeit hin untersucht. Die gültigen Kombinationen werden anhand der enthaltenen Punkte gereiht. Aus diesen gültigen Kombinationen werden vom Benutzer Systemkombinationen ausgewählt, welche mittels Simulation weiter untersucht werden. Die Informationen der TM dienen somit der Vorauswahl, die tatsächliche Evaluierung der untersuchten Konzepte hinsichtlich des energetischen und thermischen Verhaltens erfolgt dann durch die dynamische thermische Simulation. Für die Analyse der generierten Ergebnisse stehen unterschiedliche Auswertemöglichkeiten zur Verfügung.

Das vorgestellte Tool ist als Client-Server Applikation entwickelt. Die Erstellung der Geometrie, die Definition des Projektes und die Steuerung des QUEEN Tools geschieht lokal auf dem Benutzer-PC. Durch einen implementierten Wizard werden die Projektdaten in ein Datenbanksystem importiert, welches auf einem zentralen Webserver abgelegt und gesichert ist. Dies hat den Vorteil, dass mehrere Benutzer unabhängig von ihrem Standort an einem oder mehreren Projekten am zentralen Server gemeinsam arbeiten können. Die Bearbeitung eines Projektes ist durch ein Passwort geschützt, Zugriffskonflikte werden von QUEEN gemeldet.

ABLAUF PROJEKTBEARBEITUNG

Erstellen der Gebäudegeometrie

Um eine dynamisch thermische Gebäudesimulation durchzuführen wird ein geometrisches Modell benötigt welches die zu betrachtenden Zonen sowie Verschattungsflächen definiert. Die Erstellung der Geometrie und die Definition der thermischen Zonen findet mit dem Programm Google SketchUp (GOOGLE, 2008) statt. Ein Plugin ermöglicht den Import der geometrischen Daten in das Simulationsprogramm EnergyPlus (ENERGYPLUS, 2008; CRAWLEY, 2005), ein weit verbreitetes, und validiertes Gebäudesimulationswerkzeug (HENNINGER, 2004). Jeder gezeichneten Fläche einer Zone werden eine Konstruktion und eine Randbedingung zugewiesen. Durch Speichern der Datei werden alle für die weitere Bearbeitung erforderlichen Daten des geometrischen Modells in einer Datei mit der Endung IDF abgelegt. Diese Datei wird anschließend in das Datenbanksystem importiert.

Import in Projektdatenbank

Ein Hauptbestandteil des QUEEN-Tools ist die Expertendatenbank in der alle projektrelevanten Daten abgelegt werden. Die Datenbank beinhaltet umfangreiche Datensätze von verschiedenen für die Simulation erforderlichen Inputs. Daten für Konstruktionen, Materialien, interne Lasten sowie Zeit- und Verfügbarkeitsprofile wurden aus den Datenbanken NCM, ASHRAE, bzw. Normen des VDI übernommen. Das im vorigen erstellte Modell wird mit Hilfe eines Wizards in die Datenbank importiert und als neues Projekt angelegt. Nach Auswahl der IDF-Datei und Angabe eines Projektnamens bzw. Projektbearbeiters werden die Solltemperaturen für den Betrieb der Heiz- und Kühlsysteme, interne thermische Lasten, sowie ein Standard HLK ausgewählt. Das Gebäude kann nach erfolgreichem Import bereits mit dem ausgewählten HLK System simuliert werden um eine erste Aussage über den Energiebedarf zu treffen. Im nächsten Bearbeitungsschritt werden ausgehend vom Standardsystem und ausgewählten Prioritäten innovative HLK Konzepte erstellt und verglichen.

Simulation/Ergebnisauswertung

In den vorangegangenen Schritten wurden alle erforderlichen Daten für eine dynamische thermische Simulation definiert und innovative HLK-Konzepte erstellt welche verglichen werden sollen. Ein entscheidender Teil des QUEEN Tools ist die Bestimmung des Energiebedarfs der einzelnen Konzepte anhand einer dynamischen thermischen Simulation. Es kann somit die rasche Eingabe eines Projektes bereits in der Planungsphase mit einer detaillierten Simulation gekoppelt werden um fundierte Aussagen über das thermische Verhalten des Projektes zu treffen. Die Daten werden an das Simulationstool EnergyPlus exportiert und auf dem Webserver simuliert. Der Benutzer bekommt Rückmeldungen über den Verlauf der Simulation und eine Zusammenfassung nach Beendigung. Die Ergebnisse der Simulationen werden daraufhin wieder in die Datenbank importiert und den Projekten zugewiesen.

Das QUEEN Tool enthält auch einige Möglichkeiten zur Auswertung der Ergebnisse.

Es wird ein Bericht ausgegeben in dem alle relevanten Energiekennzahlen zusammengefasst sind. Weiters können in einem Charting-Tool die stündlichen Verläufe vieler Ausgabeparameter wie der Raumtemperaturen oder der Leistungen analysiert werden. Zum energetischen Vergleich der einzelnen HLK-Konzepte ist ein Benchmarking-Tool inkludiert welches den Jahresenergiebedarf der Konzepte vergleicht.

BEISPIELE

Die zuvor beschriebene Arbeitsweise des QUEEN-Tools soll im Folgenden an einem Beispiel verdeutlicht werden. Das Geometriemodell stellt ein zweigeschossiges Wohnhaus mit rund 410 m² Grundfläche dar und beinhaltet insgesamt sieben thermische Zonen. Abbildung 2 zeigt das Modell in der Darstellungsweise von Google SketchUp.

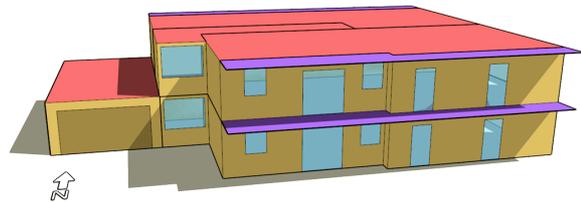


Abbildung 2: Gebäudemodell

Der Detaillierungsgrad des Modells entspricht typischerweise dem Planungsstand in der (Vor)Entwurfsphase. An der südlich orientierten Fassade sind Verschattungselemente angebracht, welche der Vermeidung sommerlicher Überhitzung dienen. Ziel ist es zunächst, unterschiedliche Lüftungskonzepte und deren Auswirkung auf den Innenraumkomfort während der Sommerperiode zu untersuchen. Mit Hilfe des zuvor erwähnten Import-Wizards wird das Geometriemodell in das QUEEN-Tool importiert. Schrittweise werden im Import-Wizard alle benötigten Details (Standort, Konstruktionen, etc.) ausgewählt. Zu erwähnen ist, dass alle definierten HLK-Systeme sowie Heiz- und Kühlsolltemperaturen für alle Zonen gültig sind. Für das vorgestellte Beispiel hat das zur Folge, dass auch die westseitig angegliederte Garage mit der definierten HLK-Technik klimatisiert wird, was bei der Auswertung der Simulationsergebnisse zu berücksichtigen ist.

Nach Auswahl der Projektdetails und Erstellung des Basisprojektes in der Datenbank, wird die Prioritätenliste zur Erstellung der innovativen Konzepte bearbeitet. In der Prioritätenliste werden nun jene Felder für die Erstellung innovativer Konzepte aktiviert, welche in Bezug auf die gewünschten Lüftungskonzepte des Wohnhauses relevant sind. Zur Auswahl stehen hier zwei verschiedene Ansätze: Zum einen eine Fensterlüftung, bei welcher die Außenluft nach variablen Zeitprofilen und Luftwechselraten in die Zonen eingebracht wird. Zum anderen die Außenluftkühlung, welche in Abhängigkeit einer einstellbaren Temperaturdifferenz von Raumlufttemperatur zu Außentemperatur einen bestimmten Luftwechsel bereitstellt. Technologien oder passive Maßnahmen die nun nicht in den verschiedenen Konzepten variiert werden sollen, wie beispielsweise Technologien zur Kühlung des Gebäudes oder eine Erhöhung der Dämmstärke, können in der Liste deaktiviert werden.

Die zwei Konzepte werden anschließend automatisch generiert. Zuvor zugewiesene Konstruktionen und Zeitprofile interner Lasten werden beibehalten um die Vergleichbarkeit der Konzepte zu gewährleisten. Im nächsten Schritt können die neu angelegten Konzepte bereits simuliert und nachfolgend die Simulationsergebnisse mit dem Charting-Tool ausgewertet werden. Abbildung 3 zeigt beispielhaft einen Screenshot der Visualisierung.

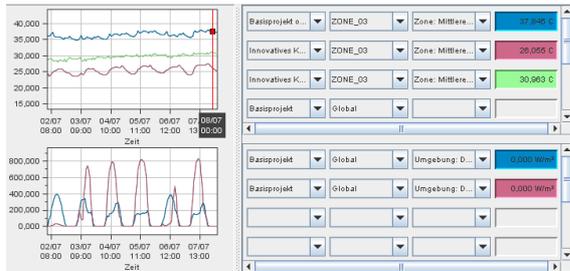


Abbildung 3: Charting-Tool

Das Charting-Tool und das zuvor beschriebene Benchmarking-Tool der QUEEN-Software bieten leistungsstarke Werkzeuge zur schnellen Analyse von generierten Konzepten mit unterschiedlicher Haustechnik und Gebäudehülle. Darüber hinaus lassen sich die gewonnenen Ergebnisse auch als Textdatei (Format CSV) exportieren und ermöglichen somit die weitergehende Auswertung in anderen Softwaretools wie Excel oder Matlab.

Da die Visualisierung des Charting-Tools zu umfangreich ist um sie in diesem Rahmen ausreichend darzustellen, sind die exportierten Simulationsergebnisse nochmals in Abbildung 4 abgebildet. Zu sehen ist die Raumtemperatur der südlich orientierten Zone im Dachgeschoss für die zwei unterschiedlichen Lüftungskonzepte. Weiters ist der Verlauf der stündlichen Werte für die Solarstrahlung, Außentemperatur (Standort Wien) und für einen zusätzlichen Vergleich die Raumtemperatur für ein Konzept ohne aktive Lüftung (nur Infiltration) aufgezeigt. In der dargestellten Woche im Juli wird hier nur beim Konzept mit Außenluftkühlung die Komfortgrenze von 26 °C dauerhaft eingehalten.

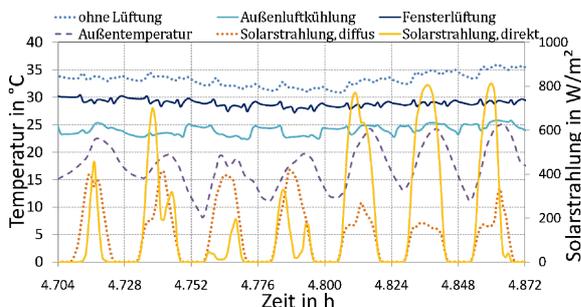


Abbildung 4: Simulationsergebnisse

Neben der Möglichkeit innovative Konzepte mit Hilfe der Prioritätenliste zu generieren ist es zudem möglich das zu Beginn erstellte Basisprojekt zu kopieren um in der Kopie manuelle Änderungen durchzuführen. So können beispielsweise Konstruktionen wie Wände und Fenster in ihrem Schichtaufbau und physikalischen Eigenschaften angepasst und die Auswirkung der Änderung in den Simulationsergebnissen untersucht werden. Aufbauend auf dem vorab gezeigten Beispiel soll die Möglichkeit der manuellen Anpassung im weiteren Verlauf verdeutlicht werden. Ziel ist der Vergleich des Heizbedarfs zweier Konzepte, wenn den im Geometriemodell definierten Fenstern unterschiedliche Konstruktionen zugeordnet werden.

Ziel ist der exemplarische Vergleich des Heizbedarfs zweier Konzepte bei der Annahme unterschiedlicher thermischer Qualität der eingesetzten Fenster. Das bereits erstellte Basisprojekt wird zu diesem Zweck kopiert. Im Basisprojekt wurde zuvor ein Fenster mit Doppelverglasung und einem U-Wert von 1,6 W/m²K definiert. Das verwendete Fenster wird durch ein in der Datenbank enthaltenes Fenster mit Dreifachverglasung und einem U-Wert von 0,4 W/m²K ersetzt. Die Simulationsergebnisse beider Konzepte sind in Abbildung 5 dargestellt. Das Diagramm zeigt den monatlichen Heizbedarf in kWh für die nördlich orientierte Zone im Dachgeschoss und zeigt deutlich das Einsparpotenzial an Heizenergie aufgrund der verwendeten Verglasung.

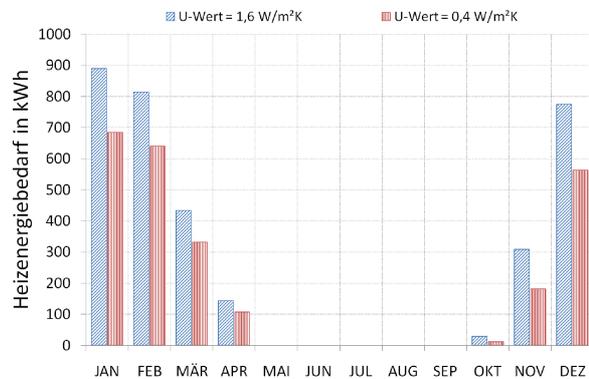


Abbildung 5: Monatlicher Heizenergiebedarf

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Das Softwaretool QUEEN ist im Planungsprozess bereits ab dem Vorentwurf zur vergleichenden und abschätzenden Bewertung der implementierten aktiven und passiven Gebäudetechnologien einsetzbar.

Die Anpassung des Gebäude- und Anlagenmodells an die im Projektverlauf in ihrem Detaillierungsgrad variierende Datengrundlage ist in den Bereichen Aufbauten, variable Verschattungselemente, wie auch Design und Parametrisierung des untersuchten HLK-Systems möglich. Anpassungen der Gebäudegeometrie können nur durch Erstellung eines neuen Projektes berücksichtigt werden. Eine zonen-

individuelle Definition der innovativen Konzepte ist nicht möglich. Dies kann bei realen Bauvorhaben eine Einschränkung bedeuten, welche auf Kosten eines höheren Arbeitsaufwandes in der Ergebnisauswertung teilweise behoben werden kann.

Generell erhöht sich mit steigendem Detaillierungsgrad des Modells der Aufwand für die Eingabe der nötigen Daten.

Im Zuge der automatisierten Erstellung der HLK-Konzepte wird die interne EnergyPlus-Routine zur Dimensionierung der Anlagen benutzt. Die Notwendigkeit eines zusätzlichen Heiz- oder Kühlsystems wird hierbei nicht berücksichtigt. So kann es bei manchen HLK-Konzepten, z.B. beim Einsatz von Flächenheiz-, oder kühlensystemen in hohen Räumen zu einem Nichteinhalten der geforderten Temperatursollwerte im Raum kommen.

Die implementierte Datenbank ermöglicht bereits in einem frühen Planungsstadium mit geringem Aufwand die Ergänzung fehlender Daten durch auf normativen Werken basierende Standardwerte. Die Referenzierbarkeit der in der Datenbank enthaltenen Daten, wie auch die Möglichkeit der Erweiterung derselben stellen für den Nutzer wichtige Leistungsmerkmale des Tools dar.

Die Datenauswertung mittels Report, Charting und Benchmarking wird durch die Möglichkeit, die Ergebnisse in Textformat zur weiteren Bearbeitung zu exportieren, sinnvoll ergänzt.

AUSBLICK

Innovative, energieeffiziente Gebäudetechnologien können aufgrund des komplexen Planungsprozess nur sehr schwierig in den Markt eindringen. Das präsentierte Softwaretool QUEEN kann während einer sehr frühen Phase des Planungsprozesses eingesetzt werden um diese Problematik zu mindern. Die beschriebenen Limitierungen führen zu einigen Verbesserungen durch die das Tool in dem beschriebenen Umfeld leistungsfähiger verwendet werden kann.

Die erstellte Technologiematrix, in der die Gewichtungen der Systemkombinationen hinterlegt sind, ist nicht als eindimensionales Modell darzustellen, da viele weitere Parameter Einfluss auf die Effizienzbewertung nehmen. Eine Weiterentwicklung sollte jedenfalls in diesen Teil des Tools fließen, um die automatisierte Generierung von alternativen HLK-Systemvarianten zu optimieren.

Wie bereits mehrmals erwähnt stellen die Kosten im Planungs- bzw. Bauprozess einen sehr wichtigen Faktor dar. Da das Gebäudemodell in QUEEN mit sehr vielen spezifischen Daten, die auch mit Kosten verknüpfbar sind, versorgt ist, könnte eine weitere Funktion auch die Abschätzung von Kosten sein.

Um den hohen Detaillierungsgrad der Gebäudemodelle in QUEEN noch umfangreicher auszunutzen, könnte QUEEN auch dahingehend erweitert werden, nicht nur rasche Abschätzungen im

Bereich Energieeffizienz durchzuführen, sondern auch Optimierungsaufgaben für den Betrieb der Gebäude zu lösen.

DANKSAGUNG

Das Projekt QUEEN wurde initiiert und aktiv unterstützt von STRABAG SE AG.

LITERATUR

ASHRAE, ASHRAE Handbook of Fundamentals, 2009

R. Brahme et al., Complex Building performance analysis in early stages of design: A solution based on differential modeling, homology-based mapping and generative design agents, 7th International IBPSA conference, Rio de Janeiro, Brazil, August 13th -15th, 2001.

Bundeskammer der Architekten und Ingenieurkonsolenten (BAIK), Honorarordnung für Architekten, 2002.

D. Crawley, J. Hand, M. Kummert, B. Griffith, Contrasting the Capabilities of Building Energy Performance Simulation Programs, U.S Department of Energy; Univ. of Strathclyde, Glasgow, Scotland; Univ. of Wisconsin, Madison; National Renewable Energy Laboratory; 2005.

EU Parlament, Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden

European Commission (EC), EU Energy and Transport in figures, Statistical Pocketbook, 2009

R. Henninger, M. Witte, D. Crawley, Analytical and comparative testing of EnergyPlus using IEA HVAC BESTEST E100-E200 test suite, Energy and Buildings, Issue 36, pp.855-863, 2004.

D. Knight et al., Using BIM in HVAC Design, ASHRAE Journal, June 2010.

W. Shen et al., Systems integration and collaboration in architecture, engineering, construction and facility management: A review, Advanced Engineering Informatics, Issue 24, pp. 196-207, 2010.

Internet

EnergyPlus V2.2, <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/openstudio.cfm>; Zugriff 04.09.2008

Google SketchUp, <http://sketchup.google.com/intl/de/>; Zugriff 04.09.2008

NCM Database, <http://www.ncm.bre.co.uk/>; Zugriff: 25.11.20

SIMULATION DER THERMISCHEN BEHAGLICHKEIT

Conrad Völker und Oliver Kornadt
 Lehrstuhl Bauphysik, Bauhaus-Universität Weimar, Deutschland

KURZFASSUNG

Vorgestellt wird ein Ansatz, der eine Bewertung der thermischen Behaglichkeit auch unter komplexen, inhomogenen raumklimatischen Verhältnissen unter Berücksichtigung der menschlichen Physiologie zulässt. Dabei wird die Strömungssimulation an ein numerisches Modell (UCBerkeley Comfort Model), welches die Thermoregulation des menschlichen Körpers abbildet, gekoppelt. Mit Hilfe der Strömungssimulation können die klimatischen Bedingungen in Räumen detailliert bestimmt werden. Darauf basierend können durch das Thermoregulationsmodell die Temperaturverteilung im menschlichen Körper, die resultierende Wärmeabgabe an die Umgebung sowie die thermische Behaglichkeit bestimmt werden. Beispielhaft wird dieser Ansatz bei der Simulation der thermischen Behaglichkeit sowie des Empfindens bei Flächenkühlungen angewendet.

ABSTRACT

An approach is introduced, which enables the assessment of thermal comfort considering the complex and inhomogenous climatic conditions in buildings as well as the human physiology. Computational fluid dynamic is linked with a numerical model representing the thermophysiological behavior of the human body (UCBerkeley Comfort Model). By dint of CFD, the climatic conditions in buildings are simulated with a detailed resolution. Basing on the simulations, the thermophysiological model is able to determine the temperature distribution of the human body, the heat flux to the environment as well as thermal comfort. The approach is used for the exemplified investigation of thermal comfort and sensation in a room equipped with a radiant cooling floor.

EINLEITUNG

Bereits (Rubner 1887) stellte fest, dass „jeder eine besondere Meinung über die Bedeutung klimatischer Einflüsse hat, in der sich ein gutes Maß von Missverständnissen mit einem Körnchen Wahrheit findet“. Dass dieser Satz auch heute nicht viel von seiner Aktualität eingebüßt hat, verdeutlicht sich an

der in der Fachliteratur vorhandenen Vielzahl unterschiedlichster Definitionen des Begriffes ‚thermische Behaglichkeit‘. Diese definieren über die unterschiedlichsten Parameter die Zufriedenheit mit der Umgebung, womit sich die Komplexität dieses Begriffes begründen lässt.

Für (Richter et al., 2007) ist die thermische Behaglichkeit durch einen lediglich geringfügigen thermoregulatorischen Einsatz des Organismus zur Aufrechterhaltung der Körperkerntemperatur definiert. Außerdem muss die Wärmeabgabe des Menschen an die Umwelt anstrengungslos und nicht wahrnehmbar sein. Hinzu kommt die nicht zu unterschätzende subjektive Empfindung des Wohlbefagens. Inwieweit dieser Zustand erreicht werden kann, hängt von vielen verschiedenen Parametern ab, wobei Luft- und Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit und -feuchtigkeit, Kleidungssituation und Tätigkeitsgrad als dominierend bezeichnet werden.

Diese sechs Kriterien bilden die Grundlage für die derzeit gebräuchlichste Methode zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit, das so genannte PMV-Modell (PMV - Predicted Mean Vote) (Fanger 1970; Fanger 1977).

Um die komplexen raumklimatischen Verhältnisse in Gebäuden unter Berücksichtigung der

- inhomogenen klimatischen Verhältnisse
- Interaktion Mensch – Raumklima
- Divergenz der Körpersegmente (Thermosensitivität, Bekleidung, Wärmeübergangskoeffizienten etc.)

detailliert zu bewerten, sind die herkömmlichen Methoden zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit allerdings nicht immer ausreichend geeignet.

Eine Alternative bietet die Kopplung der Strömungssimulation an ein numerisches Modell, welches die Thermophysikologie des menschlichen Körpers abbildet. Mit Hilfe der Strömungssimulation können die klimatischen Bedingungen in Räumen verhältnismäßig exakt und insbesondere auch lokal bestimmt werden. Darauf basierend können durch das Thermoregulationsmodell sowohl die Temperaturverteilung im menschlichen Körper als

auch die daraus resultierende Wärmeabgabe an die Umgebung berechnet werden, was wiederum Rückschlüsse auf die thermische Behaglichkeit ermöglicht.

Dies bedeutet, dass der thermische Komfort nicht mehr nur anhand weniger stationärer Raumparameter bestimmt wird, sondern die Anwesenheit des Menschen und seine Interaktion mit der Umgebung modelliert werden kann. Im Gegensatz zu den bisherigen Ansätzen lassen sich damit die mitunter in hohem Maße instationären und heterogenen Bedingungen in einem Gebäude und ihre Auswirkungen auf das Wohlbefinden des Nutzers abbilden. Mit der Kopplung der thermophysiologicalen Reaktion des Menschen an die klimatischen Bedingungen im Raum lassen sich in Zukunft neue Lösungen für ein auf die Nutzungsanforderungen abgestimmtes, thermisch behagliches Klima finden.

METHODE

Thermal Comfort Model

Im Rahmen dieser Untersuchung wird auf ein thermophysiologicals Modell (UC Berkeley Thermal Comfort Model) zurückgegriffen (Huizenga et al., 2001; Hoffmann et al., 2008), welches den menschlichen Körper in 16 Segmente (Kopf, Torso, rechter Oberarm, ...) unterteilt. Durch diese hohe Genauigkeit sind auch die Effekte inhomogener Bedingungen, beispielsweise resultierend aus Temperaturschichtungen oder Strahlungsasymmetrien, darstellbar. Der hohe Grad an Detailliertheit ist aber auch notwendig, da Empfinden und Komfort selbst bei einheitlichen Randbedingungen für jedes Körperteil unterschiedlich sein können. Ferner wird jedes dieser Segmente in vier konzentrisch angeordnete Schichten zerlegt (Kern, Muskulatur, Fett, Haut). Der Wärme- und Feuchtigkeitstransport durch die Kleidung wird gegebenenfalls berücksichtigt (Voelker et al., 2009). Jedes Teilstück wird mit den ihm eigenen charakteristischen Parametern dargestellt. Jede Schicht eines jeden Segmentes ist an den Blutkreislauf gekoppelt, über den der konvektive Wärmeaustausch zwischen den Segmenten stattfindet. Daraus ergibt sich ein System aus einer Vielzahl nicht-linearer Differentialgleichungen, welches die Wärmebilanz des menschlichen Körpers repräsentiert.

Basierend auf der simulierten Temperaturverteilung des menschlichen Körpers ist das UCB Modell in der Lage, sowohl die thermische Behaglichkeit als auch das thermische Empfinden des Nutzers global als auch lokal zu bestimmen. Hintergrund ist die Korrelation des thermischen Empfindens mit der Hauttemperatur (Zhang et al., 2010).

Kopplung an CFD

Nach der Eingabe des geometrischen Modells sowie der Ausgangsbedingungen werden die notwendigen Randbedingungen (Lufttemperatur, Strömungsgeschwindigkeit, etc.) mit Hilfe der numerischen Strömungssimulation für jedes der durch das thermophysiologicals Modell definierten Segmente des menschlichen Körpers bestimmt. Anschließend erfolgt die Übergabe dieser Daten an das thermophysiologicals Modell, welches sowohl die Temperaturverteilung im menschlichen Körper als auch die daraus resultierende Wärmeabgabe an das Raumklima bestimmt. Da diese wiederum das Raumklima beeinflusst, werden die Daten in einem iterativen Prozess an die Strömungssimulation übermittelt (Abbildung 1).

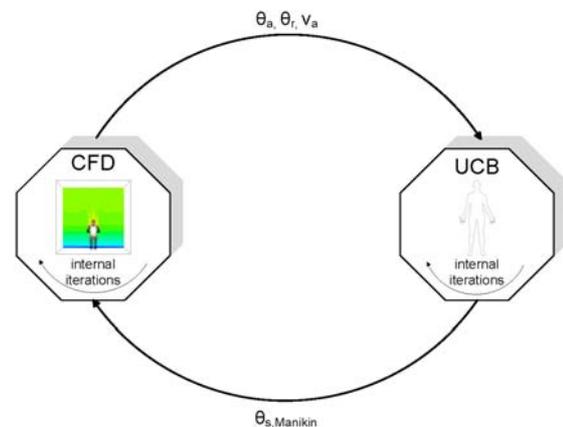


Abbildung 1 Datenaustausch zwischen Strömungssimulation und dem thermophysiologicals Modell

Ist das Konvergenzkriterium $\varepsilon \leq 0,1 \text{ K}$ (Gao et al., 2009) erreicht, wird durch das thermophysiologicals Modell zunächst das lokale thermische Empfinden in Abhängigkeit von der lokalen sowie der global gemittelten Hauttemperatur mit Hilfe einer logistischen Funktion ermittelt. Die Bestimmung des thermischen Komforts erfolgt wiederum in Abhängigkeit des lokalen als auch des globalen Empfindens. Ein Funktionsschema der gesamten Kopplung ist in Abbildung 2 dargestellt.

Mikroklima

Für die Übergabe der durch die Strömungssimulation ermittelten Randbedingungen ist eine profunde Kenntnis der den Menschen umgebenden klimatischen Verhältnisse nötig. Diese werden durch die Wärmeabgabe des menschlichen Körpers, welche bei sitzender Tätigkeit (z.B. Büroarbeit) etwa 130 W entspricht, beeinflusst. Das Resultat ist ein Mikroklima um den Bereich des menschlichen Körpers, mit einer langsam aufsteigenden Grenzschicht, die sich in Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit vom Raumklima deutlich unterscheidet.

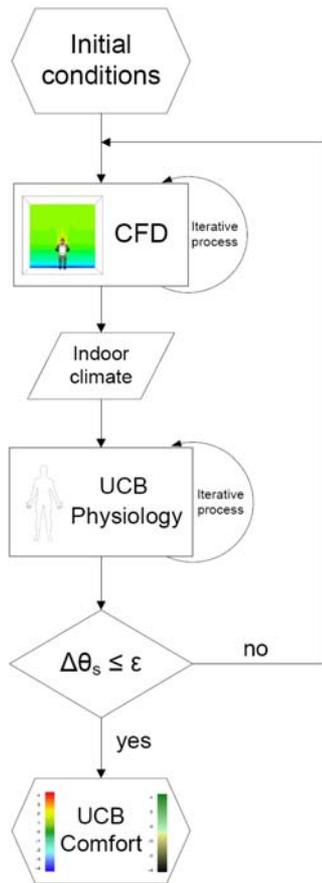


Abbildung 2 Funktionsschema der Kopplung

Die Grenzschichtdicke δ wurde bereits in (Murakami et al., 1997) untersucht: Unter dem Einfluß natürlicher Konvektion ist die Grenzschicht in dieser Untersuchung bezüglich der Geschwindigkeit im Fußbereich etwa 8 cm stark, mit zunehmender Höhe steigt dieser Wert allerdings auf circa 15 cm im Halsbereich an. Die thermische Grenzschicht unterscheidet sich mit 5 cm am Fuß, am Hals sind es unter den angenommen Bedingungen 19 cm.

In Abbildung 3 und 4 ist die Simulation des Strömungs- und Temperaturprofils im Bereich des menschlichen Körpers dargestellt. In der skalaren Darstellung von Abbildung 3 fällt auf, dass die Grenzschicht aufgrund der Wärmeabgabe des Menschen via Konvektion/Leitung deutlich über der Raumtemperatur liegende Temperaturen aufweist.

Dieser Temperaturgradient ist verantwortlich für einen Dichtegradienten, der im Falle der natürlichen Konvektion die Voraussetzung für den Masse-transport darstellt. Die höchsten Lufttemperaturen sind im Bereich des Kopfes vorzufinden, da dieser unbedeckt ist und generell über eine verhältnismäßig hohe metabolische Aktivität verfügt.

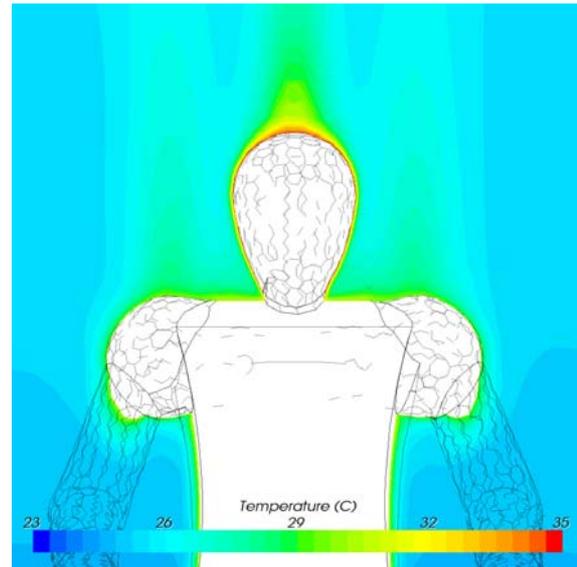


Abbildung 3 Temperatur des Mikroklimas

In Abbildung 4 ist die Strömungsgeschwindigkeit und -richtung des umgebenden Mikroklimas vektoriell dargestellt. Demnach werden in der Grenzschicht Strömungsgeschwindigkeiten von etwa 0,1 m/s erreicht, während im Plüm maximale Werte von bis zu 0,21 m/s vorgefunden werden können. Die Ergebnisse sind vergleichbar mit der Fachliteratur (Omori et al., 2004).

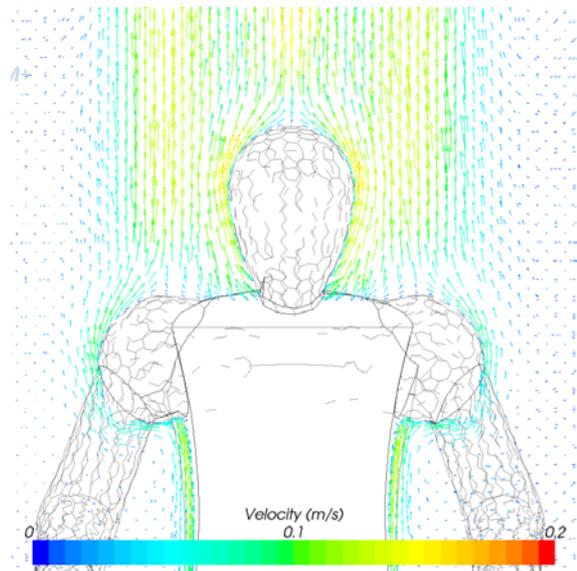


Abbildung 4 Strömungsverhältnisse im Mikroklima

Es wird ersichtlich, dass sich die klimatischen Bedingungen mit zunehmender Entfernung vom Körper dem eigentlichen Raumklima annähern. Das den Menschen umgebende Mikroklima ist jedoch abhängig von den jeweiligen Randbedingungen. Mangels besserer Kenntnisse werden allerdings häufig pauschale Werte angenommen (Gao et al., 2006; Gao et al., 2009).

In Abbildung 5 ist der simulierte Verlauf der Lufttemperatur in der den menschlichen Körper umgebenden Grenzschicht dargestellt. Die abgebildeten Funktionen basieren auf approximierten Punktwolken, die mit Hilfe der Strömungssimulation für die Grenzschicht des gesamten Körpers bestimmt wurden. Im vorliegenden Fall wurden Raumlufttemperaturen von 10 - 30°C simuliert, da die Raumtemperatur nicht nur den Kurvenverlauf, sondern auch die Oberflächentemperatur des Körpers beeinflusst.

Während die mittlere Oberflächentemperatur eines mit 0,8 clo bekleideten Menschen etwa 21,7°C bei einer Raumtemperatur von 10°C entspricht, ergibt die Simulation mit dem thermophysiological Modell etwa 32,7°C bei 30°C Raumtemperatur. Diese Werte sind allerdings stark abhängig vom jeweiligen Körpersegment.

Generell ist zu erkennen, dass sich die Lufttemperatur erwartungsgemäß mit zunehmender Entfernung vom Körper der Raumlufttemperatur nähert. Bei einer Raumtemperatur von 22°C (Oberflächentemperatur des Menschen 28,4°C) entspricht der Anstieg der approximierten Funktion im Abstand von 10 cm lediglich -0,02 K/cm, was auf Ende der Grenzschicht hinweist

Allerdings ist auch festzustellen, dass die Charakteristik der Grenzschicht stark von der Körperposition sowie dem Körpersegment abhängig ist (Murakami 2002; Murakami 2004). Berücksichtigt man zusätzlich die Atmung, sind wiederum andere Ergebnisse feststellbar (Gao et al., 2004). Weitere, detailliertere Untersuchungen sind daher nötig.

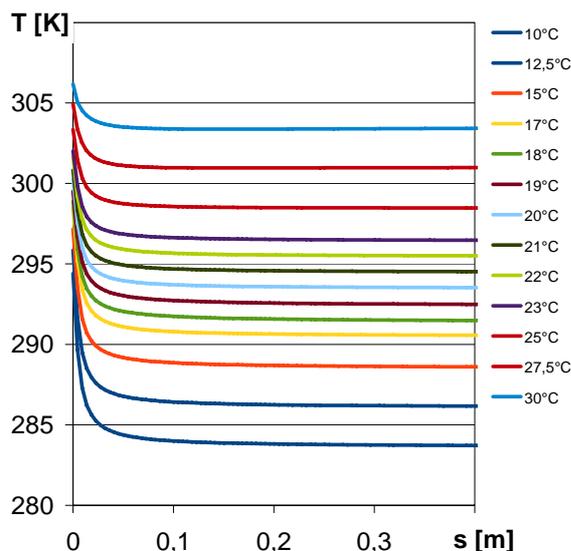


Abbildung 5 Simulation der Grenzschicht – Abnahme der Lufttemperatur mit zunehmender Entfernung vom menschlichen Körper bei unterschiedlichen Raumtemperaturen

SIMULATION

Geometrie & Gittergenerierung

Grundlage der Simulation ist die Eingabe eines Geometriemodells und der entsprechenden Gittergenerierung. Dafür wurde eine einfache, beispielhafte Raumgeometrie (3 m x 3 m x 3 m) ausgewählt (Abbildung 6).

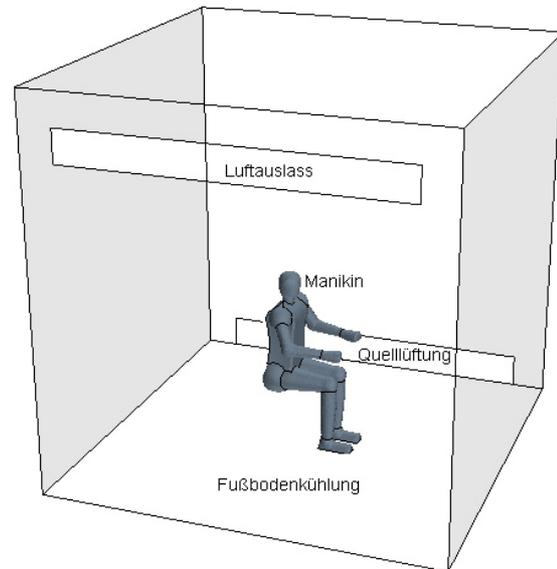


Abbildung 6 Geometrie des simulierten Raumes

In der Mitte des Raumes ist eine menschliche Geometrie platziert, deren Maße in etwa einem durchschnittlichen Europäer nach (Neufert 2005) entsprechen. Es wurde eine sitzende Position gewählt, die ausgestreckten Arme stellen eine Arbeitshaltung am Schreibtisch dar. Die Geometrie der Haare sowie der Bekleidung wurde nicht modelliert, da deren Einfluss auf die Strömungssimulation vernachlässigbar klein ist. Der Einfluss der Kleidung auf den Wärmestrom von der Oberfläche der menschlichen Geometrie zur Umgebung wird allerdings durch das thermophysiological Modell berücksichtigt. Auch auf Einrichtungsgegenstände wird verzichtet, da diese Strömungen und Temperatur des menschlichen Mikroklimas nur bedingt beeinflussen und außerdem nur schwierig allgemeingültigen Positionen zugeordnet werden können.

Von der Qualität des Gitters hängt die Genauigkeit der Simulation ab. Die Gittergenerierung erfolgt mittels Polyederzellen. In Erwartung hoher Gradienten ist das Gitter aus Gründen der Genauigkeit um den Bereich des menschlichen Körpers detaillierter. Dabei wurde auf ein auf 25 % verfeinertes, strukturiertes Gitter zurückgegriffen, wobei manikinnahe Schichten mit Prismen (Expansionskoeffizient 1,5) zur akuraten Model-

lierung des Wärmeübergangs sowie der Turbulenz versehen wurden (Abbildung 7).

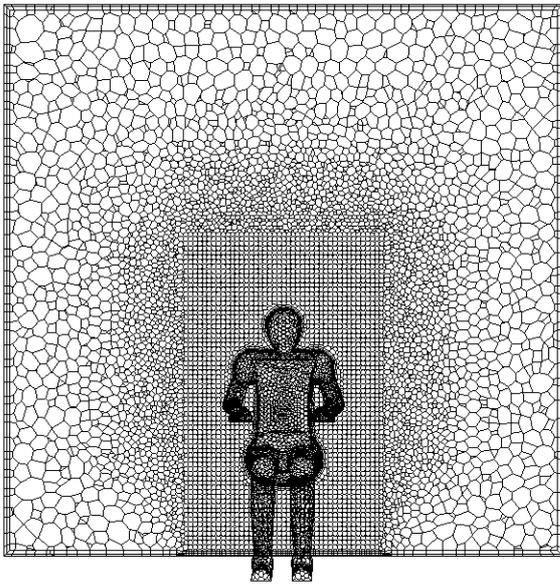


Abbildung 7 Gittergenerierung

Randbedingungen

Für die Simulation ist ein Lufteinlass in Form einer Quelllüftung ($v=0,1 \text{ m/s}$, $A=1,25 \text{ m}^2$, $n=16 \text{ h}^{-1}$) im unteren Bereich der Seitenwand vorgesehen. Ein kongruenter Auslass befindet sich deckennah auf der gegenüberliegenden Seite. Da die Kühlung des Raumes allein von der Flächenkühlung übernommen wird, ist eine zusätzliche Kühlung der einströmenden Luft ($\theta=26^\circ\text{C}$) nicht vorgesehen.

Um Kondensationseffekte zu vermeiden, wird in den Simulationen die Oberflächentemperatur der gekühlten Fläche mit 19°C angesetzt. Die restlichen Flächen weisen eine Temperatur von 26°C auf. Es wird davon ausgegangen, dass die Oberflächentemperaturen gleichförmig sind.

Tabelle 1
Numerische Methoden & Randbedingungen

Turbulenzmodell	$k-\omega$
Algorithmus	coupled flow
Walls	$\theta=26^\circ\text{C}$ bzw. $\theta_{\text{Boden}}=19^\circ\text{C}$
Mesh	Polyhedral & Prism Layer (~500.000)
Inlet	$v=0,1 \text{ m/s}$, $A=1,25 \text{ m}^2$; $\theta=26^\circ\text{C}$
Manikin	Oberflächentemperatur der 16 Segmente entsprechend der Kopplung Bekleidung: 0,8 clo Aktivität: 1,2 met Luftfeuchtigkeit: 50 %

Es werden lediglich sensible, also ‘trockene’ Lasten, berücksichtigt. Die Simulation der Luftfeuchtigkeit wird vernachlässigt, da der Einfluss auf die thermische Behaglichkeit in gewissen Grenzen als gering betrachtet werden kann. Auch auf die Simulation der Atmung wird verzichtet, da der Atemzyklus nur instationär sinnvoll betrachtet werden kann.

Simulation

Im ersten Schritt wird, nach der Eingabe der Initialtemperaturen an der Oberfläche der menschlichen Geometrie, das durch die Flächenkühlung konditionierte Innenraumklima durch die Strömungssimulation bestimmt. Die iterative Näherungslösung der Erhaltungssätze von Impuls, Masse und Energie (‘Navier-Stokes’-Gleichung) wird durch den CFD-Code StarCCM+ umgesetzt. Zur Beschreibung turbulenter Luftströmungen wird, wie in (Cropper et al., 2009), auf das Zweigleichungs-Modell $k-\omega$ zurückgegriffen. Da die Strömungsbedingungen als zeitlich konstant betrachtet werden können, wurde der stationäre Fall simuliert. Durch seine explizite Eignung für Auftriebsströmungen wurde das ‘coupled flow model’, welches Massen- und Impulssatz gleichzeitig löst, verwendet (CD-adapco 2005).

Ergebnis

In Abbildung 8 ist das Temperaturprofil der Simulation dargestellt. Auch hier ist die Grenzschicht, ein Resultat der konvektiven Wärmeabgabe des menschlichen Körpers, deutlich erkennbar. Die Lüftung ist deutlich in der rechten unteren Ecke an der mit einer Temperatur von 26°C einströmenden Luft zu identifizieren. Die Quelllüftung sorgt – trotz der verhältnismäßig warmen Temperatur – für eine Verteilung der Kühllast der Fußbodenkühlung. Die vertikale Temperaturschichtung zwischen Knöchelhöhe (0,1 m) und Kopfhöhe (1,1 m) fällt aufgrund der mischenden Lüftung relativ gering aus, sodass die normativen Vorgaben nach DIN EN ISO 7730 eingehalten werden.

Das sich im Beispielfraum einstellende Strömungsprofil ist in Abbildung 9 dargestellt. In diesem Fall wird der Strömungsverlauf (Streamlines) zur menschlichen Geometrie (backward) bzw. von Menschen weg (forward) gezeigt. Dabei wird offensichtlich, dass die hier beispielhaft angeordnete Lüftung eine hohe Luftqualität sicherstellen kann. Der Nutzer wird aus dem in Fußbodennähe angebrachten Lufteinlass direkt mit Frischluft versorgt. Aufgrund der niedrigen Geschwindigkeit ($<0,1 \text{ m/s}$) sind keine Zugerscheinungen zu erwarten.

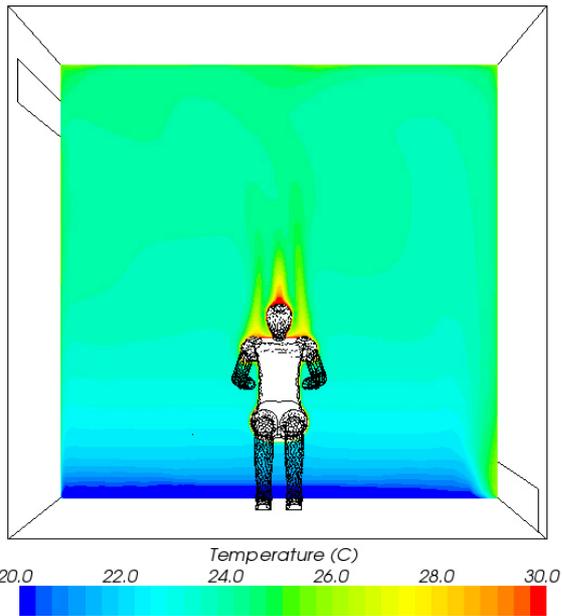


Abbildung 8 Temperaturprofil mit Fußbodenkühlung und Quelllüftung

Die verbrauchte und aufgrund der Wärmeabgabe des Menschen aufsteigende Luft wird direkt über den in Deckennähe angeordneten Auslass abtransportiert. Wie in Abbildung 4 sind auch hier im Bereich der den menschlichen Körper umgebenden Grenzschicht Strömungsgeschwindigkeiten von etwa 0,1 m/s festzustellen. Im Plüm werden durch den zusätzlichen Impuls der in den Raum einströmenden Luft Geschwindigkeiten von etwa 0,3 m/s erreicht (Abbildung 9).

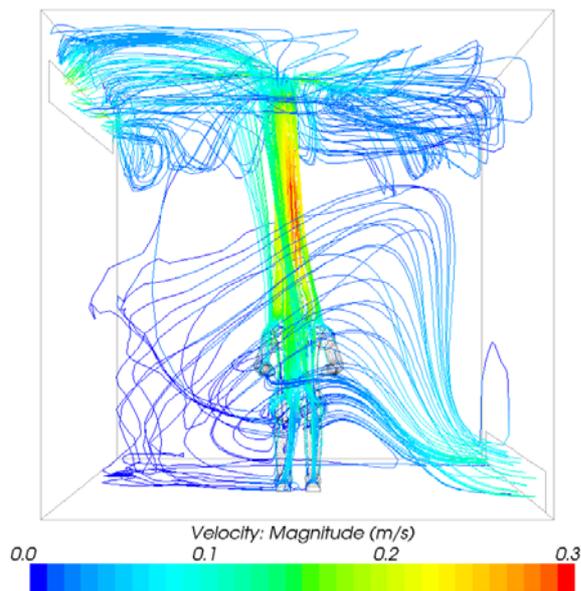


Abbildung 9 Strömungsgeschwindigkeit & Streamlines

Die Auswertung der Behaglichkeit erfolgt, ähnlich der im anfänglich erwähnten PMV-Modell

verwendeten Einteilung, auf einer Skala von -4 (sehr unkomfortabel) bis +4 (sehr komfortabel). Die Untersuchung der thermischen Behaglichkeit der einzelnen Körperpartien ist in Abbildung 10 veranschaulicht. Demnach befinden sich alle Körperteile in einem weitgehend behaglichen Zustand. Unterschiede, die durch die inhomogenen Bedingungen (einströmende Luft) hervorgerufen werden können, sind auf Grund der niedrigen Geschwindigkeit nicht zu beobachten. Der aufgrund der hohen Thermosensitivität für die globale Behaglichkeit wichtige Kopf wird als *komfortabel* eingestuft. Die Füße hingegen können lediglich als *noch komfortabel* bezeichnet werden. Global betrachtet wird der Wert 0,9 erreicht, was als *noch komfortabel* empfunden wird.

Das thermische Empfinden hingegen wird auf einer Skala von -4 (sehr kalt) bis +4 (sehr warm) dargestellt, im Unterschied zur Behaglichkeit ist die Zielgröße folglich 0. In der Beispielsimulation entspricht das thermische Empfinden 0,38, ein aus Sicht des thermischen Empfindens *neutraler* Wert.

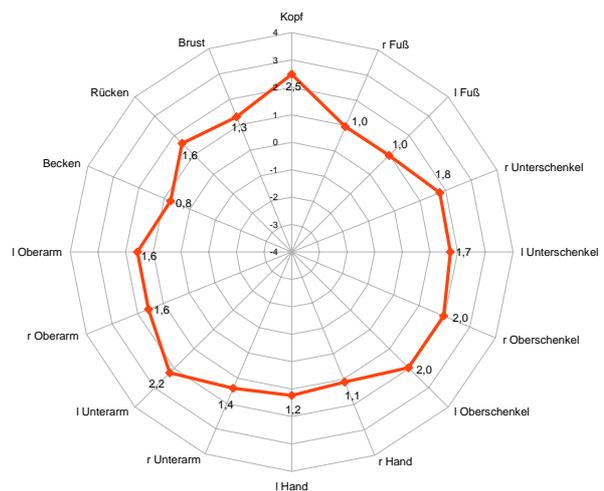


Abbildung 10 Lokale thermische Behaglichkeit

ZUSAMMENFASSUNG

Es wurde eine Methode zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit und Empfindung vorgestellt, bei der die numerische Strömungssimulation an ein thermophysiologisches Modell gekoppelt wird. Dabei werden in einem ersten Schritt die raumklimatischen Bedingungen mit Hilfe der Strömungssimulation detailliert bestimmt. Diese Randbedingungen dienen als Input für ein so genanntes thermophysiologisches Modell. Im vorliegenden Fall wird auf das an der UC Berkeley entwickelte Modell zurückgegriffen. Dieses simuliert die Wärmeabgabe des menschlichen Körpers sowie die daraus resultierende Verteilung der Oberflächen-, Haut- und Kerntemperaturen. In einem iterativen Verfahren dienen die so gewonnenen Ergebnisse als Randbedingung in einer erneuten CFD-Simulation.

Nachdem das Konvergenzkriterium erreicht ist, kann sowohl die thermische Behaglichkeit als auch das thermische Empfinden bestimmt werden.

Dieses Verfahren wurde auf die Untersuchung des den menschlichen Körper umgebenden Mikroklimas angewendet. Beispielhaft wurden weiterhin die raumklimatischen Verhältnisse im Fall einer Fußbodenkühlung simuliert. Dabei konnte im vorliegenden Fall festgestellt werden, dass der Einbau einer Quellaftung für eine gleichmäßige Verteilung der Kühllast der aus konvektiver Sicht benachteiligten Fußbodenkühlung sorgt. Eine die thermische Behaglichkeit beeinträchtigende vertikale Temperaturschichtung konnte demzufolge nicht festgestellt werden. Da allerdings nur ein exemplarischer Fall untersucht wurde, sind weitere, umfangreichere Untersuchungen notwendig.

Abschließend ist festzustellen, dass sich das vorgestellte Verfahren zur Untersuchung der thermischen Behaglichkeit unter Berücksichtigung inhomogener klimatischer Bedingungen sowie der menschlichen Physiologie eignet.

DANKSAGUNG

Diese Publikation ist im Rahmen des Forschungsprojektes „Methoden und Baustoffe zur nutzerorientierten Bausanierung“, welches vom Bundesministerium Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wird, entstanden. Dank gilt weiterhin dem Center for the Built Environment der UC Berkeley.

LITERATUR

CD-adapco 2005. STAR-CCM+ Version 3.06.006.

Cropper, P. C., Yang, T., Cook, M. J., Fiala, D. & Yousaf, R. 2009. Simulating the effect of complex indoor environmental conditions on human thermal comfort. Building Simulation 2009, Glasgow, Scotland.

Fanger, P. O. 1970. Thermal Comfort: Analysis and applications in environmental engineering. Copenhagen: Danish Technical Press.

Fanger, P. O. 1977. Local discomfort to the human body caused by non-uniform thermal environments. The annals of occupational hygiene 20 (3): 285-291.

Gao, N. & Niu, J. 2004. CFD study on micro-environment around human body and personalized ventilation. Building and Environment 39 (7): 795-805.

Gao, N., Niu, J. & Zhang, H. 2006. Coupling CFD and human body thermoregulation model for the assessment of personalized ventilation. HVAC&R Research 12 (3): 497-518.

Gao, N. P., Niu, J. & Zhang, H. 2009. Coupling outer-body airflow and inner-body thermoregulation models to predict thermal comfort in nonuniform environments. Building Simulation, Glasgow, Scotland.

Hoffmann, S., Kornadt, O., Arens, E., Zhang, H. & Huizenga, C. 2008. Simulationssoftware zur Berechnung der lokalen Behaglichkeit in einem Raum. BauSim, Kassel.

Huizenga, C., Hui, Z. & Arens, E. 2001. A model of human physiology and comfort for assessing complex thermal environments. Building and Environment 36: 691-699.

Murakami, S. 2002. CFD study on the micro-climate around the human body with inhalation and exhalation. Roomvent 2002, Copenhagen, Denmark.

Murakami, S. 2004. Analysis and design of micro-climate around the human body with respiration by CFD. Indoor Air 14 (7): 144-156.

Murakami, S., Kato, S. & Zeng, J. 1997. Flow and temperature fields around human body with various room air distribution. CFD study on computational thermal manikin - Part 1. ASHRAE Transactions 103 (1): 3-15.

Neufert, E. 2005. Bauentwurfslehre. Wiesbaden, Germany: Vieweg+Teubner Verlag.

Omori, T., Yang, J. H., Kato, S. & Murakami, K. 2004. Coupled simulation of convection and radiation on thermal environment around an accurately shaped human body. Roomvent2004, Coimbra, Portugal.

Richter, W., Gritzki, R., Knorr, M., Müller, I., Persch, A. & Rösler, M. 2007. Thermische Behaglichkeit unter sommerlichen Bedingungen bei Berücksichtigung verschiedener Raumkühlungsverfahren. Abschlussbericht. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

Rubner, M. 1887. Biologische Gesetze. Marburg.

Voelker, C., Hoffmann, S., Kornadt, O., Arens, E., Zhang, H. & Huizenga, C. 2009. Heat and moisture transfer through clothing. Proceedings of Building Simulation, Glasgow, Scotland, 27th-30th July 2009.

Zhang, H., Arens, E., Huizenga, C. & Han, T. 2010. Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments: Part I: Local sensation of individual body parts. Building and Environment 45 (2): 380-388.

THERMISCHE BEHAGLICHKEIT UND ENERGIEAUFWAND BEI FLÄCHENHEIZUNGEN IN BÜROGEBÄUDEN

Benjamin M. Behrendt¹, Bjarne W. Olesen und Lorenzo Mattarolo
 International Center for Indoor Environment,
 Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby, Denmark

Kontakt E-Mail: ¹benbe@byg.dtu.dk

KURZFASSUNG

Die vorliegende Studie befasst sich mit der Anwendbarkeit von Flächenstrahlungssystemen unter bestimmten kritischen Bedingungen.

Dem Risiko von Kondensation an den aktiven Flächen sowie den Leitungen während der Kühleisaison wurde dabei besonderes Augenmerk geschenkt.

Es wurde getestet, ob durch Kombination des Systems mit natürlicher Belüftung sichergestellt werden kann, dass eine thermisch akzeptable Umgebung erreicht wird.

Durch unterschiedliche Platzierung der Messstellen für Taupunkt und operative Temperatur soll der Einfluss einzelner interner Konditionen bewertet werden.

ABSTRACT

This report is concerned with the feasibility of radiant systems in certain critical environments.

A focus of the study was put on the condensation risk on active surfaces as well as on the pipes themselves.

It has been tested if natural ventilation in combination with the system can secure a thermal acceptable environment.

The influence of individual internal conditions was tested by placing the sensors for operative temperature and dew point to different locations.

Schlüsselwörter:

Kondensation, Kühlen, Energieaufwand, Computersimulation, thermische Behaglichkeit, Flächenheizung, Flächenkühlung

EINLEITUNG

Es wurden Simulationen mit IDA Indoor Climate and Energy (Version 3) und dem dazugehörigen Modul für Strahlungssysteme durchgeführt.

Es wurden insgesamt fünf Zonen simuliert, wobei der Fokus in dieser Arbeit auf den Zonen mit hohen latenten Wärmen, hier die Konferenzräume, lag.

Die folgenden Resultate beziehen sich daher auf die Konferenzräume.

Die Simulation wurde für vier Orte in Schweden durchgeführt: Malmö (mit Wetterdaten einer Messstation in Kopenhagen), Göteborg, Stockholm und Kiruna. Malmö, Göteborg und Stockholm liegen dabei im Süden Schwedens, wohingegen Kiruna die nördlichste Stadt Schwedens ist (rund 1000km nördlich von Stockholm).

SIMULATIONEN

Das Schema des simulierten Gebäudes ist in Abbildung 1 dargestellt. Tabelle 1 beinhaltet die wichtigsten Eckdaten für die Simulationen. Die hier genannten Werte wurden für alle durchgeführten Simulationen verwendet.

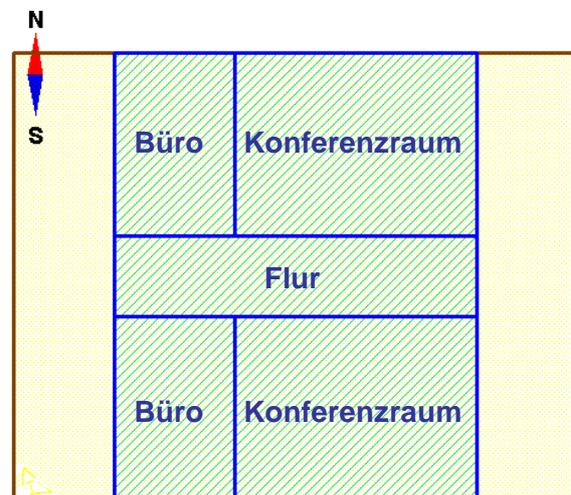


Abbildung 1 Schema des simulierten Gebäudes

Tabelle 1 Im Modell verwendete Annahmen und interne Bedingungen

	KONFERENZ- RAUM	BÜRO
Grundfläche	39,6 m ²	19,8 m ²
Personen	12 occ., 1,1 Met, 0,5 – 1 Clo	2 occ., 1,2 Met, 0,5 – 1 Clo
Licht	100 W	50 W
Equipment	350 W	
Infiltration	0,1 ACH	
Verschattungsfaktor	0,5 (wenn Top > 23°C)	
Lasten und Systeme	8:00 – 12:00 und 13:00 – 17:00	

Die Simulationen wurden sowohl für die Sommer- als auch die Wintersaison durchgeführt. Der Betrieb aller Anlagen richtet sich nach den in Tabelle 1 angegebenen Zeiten. Außerhalb dieser Zeiten sind die Systeme inaktiv.

Lüftung

In den Sommermonaten wurde mit Luft bei Umgebungstemperatur gelüftet. Zur Vermeidung von Zug wurde ein unteres Limit von 17°C eingehalten, auf das die Zuluft gegebenenfalls aufgeheizt wurde. Als Zulufraten wurden Kategorie C (entsprechend dem Standard EN ISO 15251; 4 l/s·pers + 0.4 l/sm²) und Kategorie „low“ (nicht im Standard enthalten; 2 l/s·pers + 0.4 l/sm²) untersucht. Der Fall „low“ stellt die Situation dar, in der sich mehr Personen in dem Raum befinden als ursprünglich vorgesehen.

Flächenstrahlungssystem – „Cooling Panel“

Cooling Panels wurden in allen Räumen modelliert. Sie bestehen aus MDF-Platten (Medium Density Fiberboard), einem EPS-Paneel (Expanded Polystyrene), einer geformten Aluminiumschicht, PEX-Rohren mit einem Innendurchmesser von 8mm und einer Wandstärke von 1,8mm sowie einem Verlegeabstand von 120mm. Der Aufbau ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt. Die Paneele waren ganzjährig aktiv.



Abbildung 2 Schematische Darstellung eines "Cooling Panels"

Flächenstrahlungssystem – Bodensystem

In der zweiten Simulation kam ein Bodensystem zum Einsatz. Das System besteht aus Rohren mit einem Durchmesser von 17mm, die in eine 45mm Estrichschicht eingelassen sind. Direkt unter den Rohren ist eine 30mm starke Isolation vorgesehen. Der eigentliche Boden ist 150mm stark und besteht aus Beton. Abbildung 3 ist eine schematische Darstellung des Bodens.

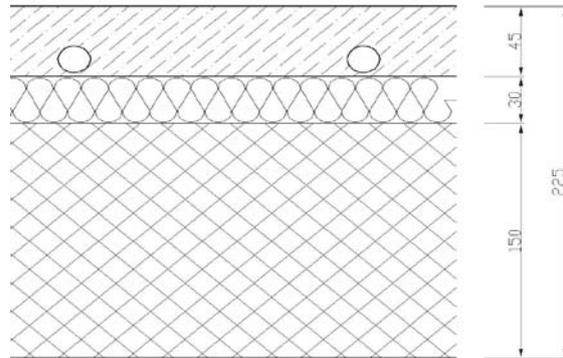


Abbildung 3 Schema des Bodensystems

Vorlauftemperaturkontrolle

Es wurden zwei unterschiedliche Funktionen für die Kontrolle der Vorlauftemperatur (T_s) untersucht. Beiden gemein ist, dass T_s immer größer als 17°C sein muss um Probleme durch Strahlungsasymmetrie zu vermeiden. Eine weitere Randbedingung ist, dass T_s die Taupunkttemperatur (T_{dp}) nie unterschreiten darf. Die erste Kontrolle ist sowohl von der Umgebungstemperatur (T_{ex}) als auch von der operativen Temperatur (T_{op}) abhängig, vgl. Gl. 1. Die zweite untersuchte Kontrollfunktion ist lediglich von T_{ex} abhängig, vgl. Gl. 2 (Olesen et al., 2004).

$$T_s = 0,52 \cdot (20 - T_{ex}) - 16 \cdot (T_{op} - 22) + k \quad (1)$$

$$T_s = 0,35 \cdot (18 - T_{ex}) + h \quad (2)$$

mit $k_0=20$; $h_0=18$.

Taupunktmessung

Weiterhin wurde untersucht welchen Einfluss auf die Performace unterschiedliche Orte für die Messung der Taupunkttemperatur haben. Zu diesem Zweck wurden Simulationen verglichen, bei denen die Taupunkttemperatur in einem Büro bzw. in einem Konferenzraum gemessen wurde.

ERGEBNISSE

Die Ergebnisse sind stark von den klimatischen Bedingungen abhängig. Für die hier untersuchten Orte sind diese vorwiegend moderate Luft- und niedrige Taupunkttemperaturen. Unter anderen Bedingungen können deutlich abweichende Ergebnisse festgestellt werden.

Das Kondensationsrisiko steigt an, wenn die Lüftung unter die Minimalanforderungen reduziert wird oder der Raum überladen ist.

Die Platzierung der Sensoren kann das Kondensationsrisiko deutlich beeinflussen. Es muss darauf geachtet werden, dass, sollte sich der Sensor nicht im Raum mit den höchsten latenten Lasten befinden, eine Minimaltemperatur für die Vorlauftemperatur eingehalten wird.

Zwischen den unterschiedlichen verwendeten Regelungsverfahren konnten nur geringe Unterschiede in Bezug auf Komfort und Kondensationsrisiko festgestellt werden. Steuerungen, bei denen eine Raumabhängigkeit enthalten war, haben bei ähnlichem Energieverbrauch geringfügig besser abgeschnitten.

Beim Einsatz einer Deckenheizung muss beachtet werden, dass es bei einem hohen Wärmebedarf, z.B. auf Grund schlechter Isolierung, ein erhöhtes Risiko für Strahlungsasymmetrien gibt.

Bei korrekter Dimensionierung der Fußbodenheizung hatte diese keine negative Auswirkung auf die lokale Behaglichkeit. Auch bei erhöhtem Wärmebedarf kann die Fußbodenheizung die Behaglichkeitsbedingungen erfüllen, das Risiko für Strahlungsasymmetrien ist vergleichsweise gering.

Lüftung - Reduzierte Lüftungsrate

Die Reduzierung der Lüftungsrate von Kategorie C (4 l/s-pers + 0.4 l/sm²) zu Kategorie „low“ (2 l/s-pers + 0.4 l/sm²) hatte unterschiedliche Folgen. In den Städten Kiruna und Göteborg, die ein allgemein kühleres Klima haben, blieben die Auswirkungen verhältnismäßig gering. Wie in Abbildung 4 zu sehen, wurde hingegen in Malmö und Stockholm Kategorie B in Bezug auf die thermische Behaglichkeit in mehr als 5% der Zeit verfehlt.

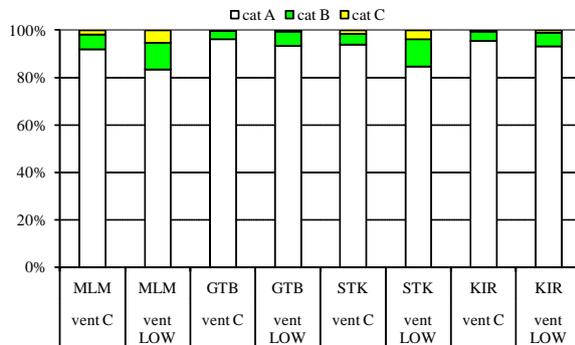


Abbildung 4 Thermische Behaglichkeit - Kategorien A bis C nach Standard EN ISO 15251

Der Einfluss auf die Taupunkttemperatur wird in Abbildung 5 deutlich. Durch die reduzierte Lüftungsrate steigt dieser um bis zu 2°C. Dies führt vor allem in Malmö und Stockholm zu Problemen, da die Taupunkttemperatur hier 24°C erreicht.

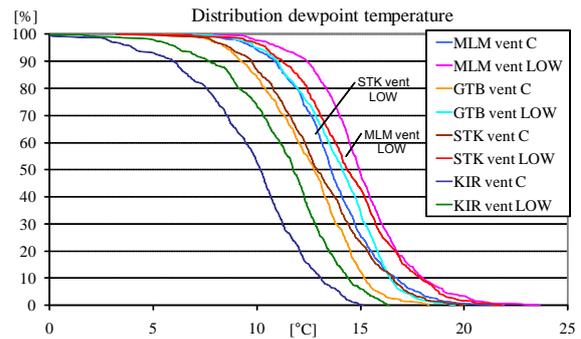


Abbildung 5 Akkumulierte Taupunkttemperatur in Abhängigkeit von Ort und Lüftungsrate

Wie aber in Abbildung 6 zu sehen ist, herrscht auch in Malmö und Stockholm zu jeder Zeit eine Temperaturdifferenz (ΔT) von wenigstens 2,5°C zwischen der Oberfläche des aktiven Bauteils (T_{surf}) und der Taupunkttemperatur (T_{dp}). Dies könnte in einigen Fällen zu Kondensation führen, unabhängig davon, ob die reduzierte oder aber die Lüftungsrate entsprechend Kategorie C gewählt wurde.

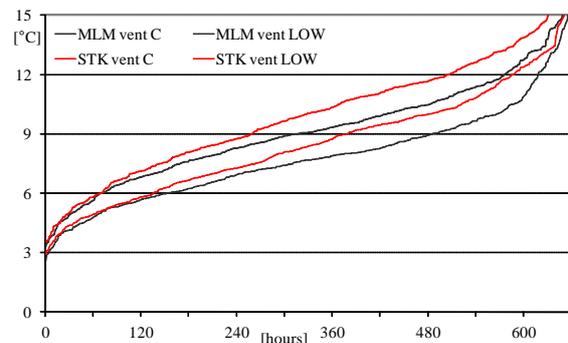


Abbildung 6 $\Delta T = T_{surf} - T_{dp}$ (Unterschied zwischen Oberflächen- und Taupunkttemperatur)

Taupunktmessung – Änderung der Messstelle

Um zu beurteilen, in wie weit eine ungeschickte Platzierung der Sensoren Einfluss auf die Güte des Raumklimas hat, wurde der Aufstellungsort variiert. Wie in Abbildung 7 zu sehen ist, wird bei der Platzierung der Sensoren in einem Büro eine höhere thermische Behaglichkeit in den Konferenzräumen erreicht. Dieses Verhalten war zu erwarten, da eine Begrenzung der Vorlauftemperatur nun nicht anhand der Zone mit den größten Lasten, sondern anhand eines eher unproblematischen Büros. Der Einfluss ist allerdings mit Änderungen kleiner 5% vergleichsweise gering. Beide Standorte sind daher Akzeptabel.

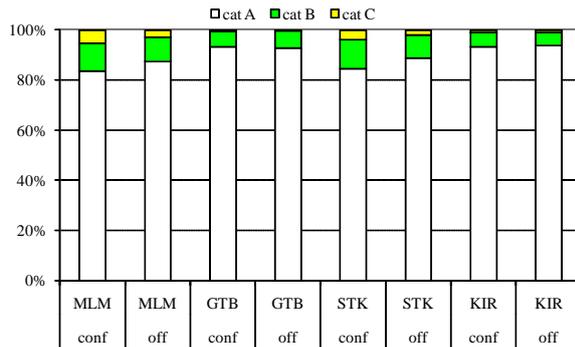


Abbildung 7 Auswirkungen der gewählten Messstelle auf die thermische Behaglichkeit

In Abbildung 8 werden die Auswirkungen der unterschiedlichen Plazierungen deutlich. Der Zeitraum, in dem die Vorlauftemperatur durch die Taupunkttemperatur begrenzt wird, unterscheidet sich in beiden Fällen deutlich. Es ist aber zu beachten, dass bei abnehmender Begrenzung durch die Taupunkttemperatur die Vorlauftemperatur stärker durch die minimale Vorlauftemperatur beschränkt wird.

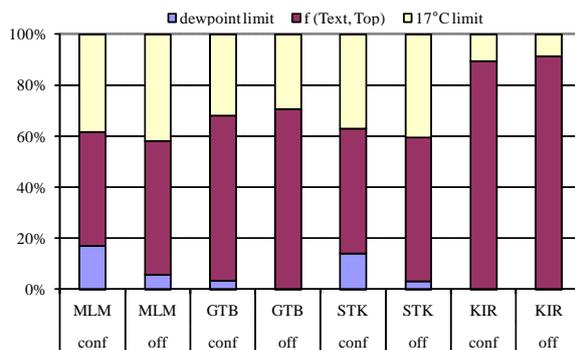


Abbildung 8 Vorlauftemperaturkontrolle in Abhängigkeit von der Sensorplatzierung

Der Temperaturunterschied zwischen Oberflächentemperatur und Taupunkttemperatur verändert sich, wie in Abbildung 9 gut zu sehen ist, nur bei kleineren Temperaturdifferenzen um 0,5 bis 1K. Dies führt zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit von Kondensation. Da die Oberflächentemperatur aber noch um 2K über der Taupunkttemperatur liegt besteht trotzdem nur ein Begrenztes Kondensationsrisiko.

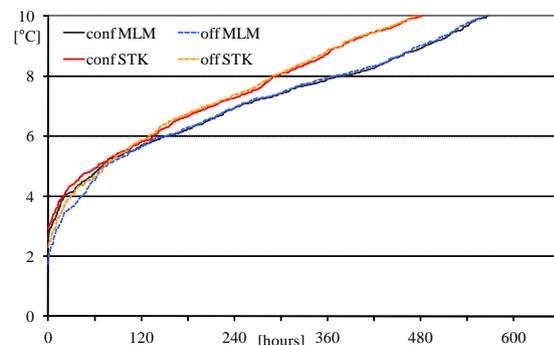


Abbildung 9 $\Delta T = T_{surf} - T_{dp}$ bei variation der Sensorstandorte

Kontrolle der Vorlauftemperatur

Beim Vergleich der beiden Strategien zur Kontrolle der Vorlauftemperatur konnten keine nennenswerten Unterschiede festgestellt werden. Wie in Abbildung 10 zu sehen ist, ermöglichen beide Kontrollen das Erreichen von zumindest Kategorie B für deutlich über 90% der Zeit. Das Einbeziehen von T_{op} geht aber einher mit einer leichten Steigerung der thermischen Behaglichkeit. Dies wird durch die leicht erhöhten Anteile der Kategorie A deutlich.

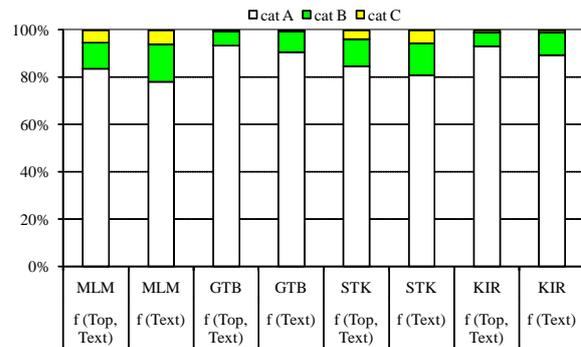


Abbildung 10 Auswirkungen der verwendeten Kontrollfunktion auf die thermische Behaglichkeit

Mit Hilfe von GenOpt wurden Gl. 1 und 2. optimiert. Dabei wurden für k bzw. h Werte entsprechend Tabelle 2 angenommen. Über die Berechnung des Index n , wie in Abbildung 11 exemplarisch dargestellt, können die Werte für k bzw. h in Abhängigkeit von den Anforderungen gewählt werden. Für die weitere Analyse wurden die in Tabelle 2 farblich markierten Werte gewählt.

Tabelle 2 Fälle für die GenOpt-Analyse

K WERTE FÜR GL. 1 $T_s = f(T_{ex}, T_{op})$		H WERTE FÜR GL. 2 $T_s = f(T_{ex})$	
$k_0=20$	$k_1=18$	$h_0=18$	$h_1=22$
$k_2=19$	$k_3=20$	$h_2=23$	$h_3=24$
$k_4=21$	$k_5=22$	$h_4=25$	$h_5=26$
$k_6=23$	$k_7=24$	[°C]	

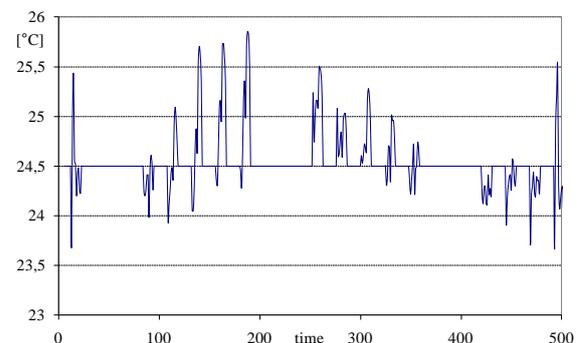


Abbildung 11 Exemplarische Berechnung des Index n bei einer neutralen Temperatur von 24,5°C

Abbildung 12 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Komfort-Index n und dem Energieverbrauch auf.

Wird ein besserer, d. h. kleinerer Komfort-Index n angestrebt, steigt hier der Energieverbrauch grundsätzlich an.

Die in Abbildung 13 dargestellten Ergebnisse verdeutlichen, dass eine Feinjustierung der Kontrollfunktion zu einer erheblichen Verbesserung des Ergebnisses führen kann, ohne dabei den Energieverbrauch wesentlich zu verändern.

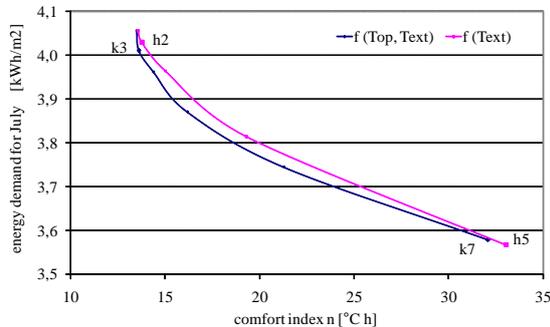


Abbildung 12 Abhängigkeit von Komfort-Index n und Energieverbrauch

Dies wird besonders beim Vergleich der in Abbildung 13 gegenüber gestellten Fälle k7 und h5 deutlich. In diesem Fall ist die Einbeziehung der operativen Temperatur in die Regelung der Anlage positiv zu bewerten. Vergleicht man hingegen die Fälle k3 und h2 miteinander, findet sich kein nennenswerter Unterschied zwischen den erreichten Kategorien.

Die Fälle k3 und h2 schneiden zwar gegenüber den Fällen k7 und h5 besser ab, erwartungsgemäß geht dies allerdings zu Lasten des Energieverbrauchs.

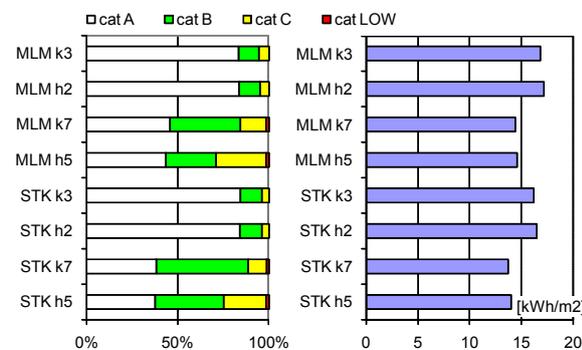


Abbildung 13 Unterschiede der Parameteruntersuchung der Kontrollfunktion für ausgesuchte Parameter

Aufhebung der minimalen Vorlauftemperatur

Verzichtet man auf eine absolute minimale Begrenzung der Vorlauftemperatur, erhöht sich sowohl die Zeit, in der die normale Kontrollfunktion zur Anwendung kommt, als auch der Zeitraum, in dem die Vorlauftemperatur durch die Taupunkttemperatur begrenzt wird. In Abbildung 14 wird deutlich, dass die Wahl des Standortes für die Temperatur- und Taupunktmessung erhebliche Auswirkungen haben kann. Bei ansonsten unveränderten Bedingungen wird die Vorlauftemperatur sowohl für den Fall Malmö als auch Stockholm 10% länger durch die

Taupunkttemperatur begrenzt, wenn die Sensoren im Konferenzraum platziert waren. In den Fällen, in denen sie in den Büros angeordnet waren, ist daher mit einem erhöhten Kondensationsrisiko in den Konferenzräumen zu rechnen.

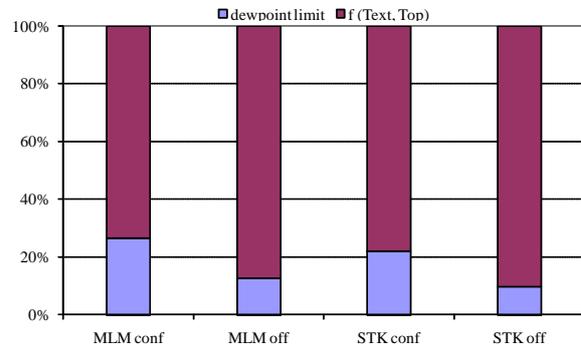


Abbildung 14 Vorlauftemperatur ohne minimale Begrenzung

Durch die veränderte Vorlauftemperatur ändert sich, wie in Abbildung 15 dargestellt, auch die Oberflächentemperatur über den gesamten Simulationszeitraum. In Malmö beschränken sich die größeren Abweichungen allerdings auf Temperaturen oberhalb von 22°C. Die Abweichungen bei niedrigeren Oberflächentemperaturen sind so geringfügig, dass nicht mit einer Beeinflussung des Kondensationsrisikos zu rechnen ist. Für Stockholm sind aber die Abweichungen größer als in Malmö und sie sind vor allem auch bei niedrigeren Temperaturen vorhanden. So sinkt die minimale Oberflächentemperatur um etwa 0,2°C, wenn die Sensorik im Büro steht. Zwar wird durch diese Änderung kein Einfluss auf den lokalen Komfort genommen, in ungünstigen Fällen kann diese Temperaturänderung aber zu einer vermehrten Kondensation am Boden führen.

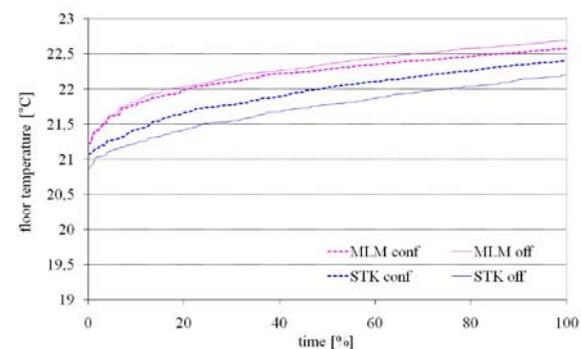


Abbildung 15 Verteilung der Oberflächentemperatur bei verändertem Aufstellungsort der Sensoren

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die durchgeführte Analyse hat sich hauptsächlich auf das Kondensationsrisiko bei Verwendung von Flächenstrahlungssystemen bezogen. Die Ergebnisse sind stark von den klimatischen Bedingungen abhängig. Der Sommer in Schweden zeichnet sich vor allem durch moderate Temperaturen und

vergleichsweise geringe Taupunkttemperaturen aus. Unter anderen Bedingungen ist zu erwarten, dass eine ähnliche Untersuchung zu anderen Ergebnissen kommt.

Das Kondensationsrisiko ist erwartungsgemäß mit einer Verringerung der Lüftungsrate bzw. bei Überbelegung des Raumes angestiegen. Gerade bei der Verwendung von Flächenstrahlungssystemen ist daher eine bedarfsorientierte Auslegung von besonderer Bedeutung.

Die Untersuchung hat ebenfalls erwartungsgemäß gezeigt, dass die Platzierung der Sensoren einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Dies trifft im besonderen Maße zu, wenn es keine minimale Begrenzung der Vorlauftemperatur gibt. Zur Minimierung des Kondensationsrisikos sollten die Sensoren daher immer im Raum mit den höchsten Lasten platziert sein. Anders aber als in einer Simulation kann gerade diese Anforderung zu großen Problemen führen. Es ist zum Beispiel nicht anzunehmen, dass ein Konferenzraum im gleichen Umfang genutzt wird wie ein normales Büro. Empfehlenswert wäre daher eine individuelle Raumsteuerung. Um den Zusatzaufwand hierfür ins Verhältnis zum zusätzlichen Nutzen zu setzen, sind weitere Untersuchungen notwendig.

Die Güte der verwendeten Regelungssysteme hat direkten Einfluss auf die thermische Behaglichkeit und den Energieverbrauch. Die Wahl des Regelungssystems muss daher mit Blick auf den gewünschten thermischen Komfort und die benötigte Leistung getroffen werden. Es ist aufgefallen, dass in einzelnen Fällen eine Regelung, die ausschließlich auf der externen Temperatur beruht, mit einer Regelung, die zusätzlich die operative Temperatur berücksichtigt, konkurrieren kann. Bei ungünstigeren Bedingungen ist allerdings die Berücksichtigung der operativen Temperatur vorteilhaft. Bei annähernd gleichem Energieverbrauch kann dadurch ein besseres thermisches Raumklima geschaffen werden.

Der Verzicht auf eine untere Grenze der Vorlauftemperatur führt in den hier vorliegenden Fällen nicht zu einer Beeinträchtigung des thermalen Wohlbefindens. Die Oberflächentemperaturen erreichen auch ohne diese Begrenzung minimale Temperaturen geringfügig unterhalb von 21°C.

Abschließend ist festzustellen, dass Flächenkühlssysteme in Schweden anwendbar sind und dabei gute bis sehr gute Ergebnisse erwartet werden können, wenn die oben genannten Punkte bei der Planung und dem Betrieb der Anlage berücksichtigt werden.

LITERATUR

EN ISO 15251, Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy

performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics, CEN, 2006

GenOpt, Generic Optimization Program, LBNL, Berkeley, 2008

IDA Indoor Climate and Energy 3.0, EQUA Simulation Technology Group, Sweden

Olesen, B.W., Dossi, F.C., 2004. Operation and Control of Activated Slab Heating and Cooling system, CIB World Building Congress

INTEGRATION OF LOW-E SURFACES AND SHORTWAVE SOLAR RADIATION INTO HUMAN COMFORT CALCULATION IN TRNSYS 17

Marion Hiller, Johannes Aschaber, Marius Dillig
 TRANSSOLAR Energietechnik GmbH, Stuttgart, Germany

KURZFASSUNG

Die mittlere Strahlungstemperatur (engl. mean radiant temperature, MRT) ist eine wichtige Eingangsgröße für die Bestimmung des thermischen Komforts. Bei einfachen Modellen basiert die Ermittlung der mittlere Strahlungstemperatur i.d.R. auf rein geometrischen Größen wie Flächengewichtungs- oder Viewfaktoren. Die Abbildung von optischen Eigenschaften wie nicht-schwarzen Oberflächen und Mehrfachreflektionen z.B. für low-e Effekten ist mit diesen Modellen nicht möglich.

Zur Berücksichtigung geometrischer und optischer Effekte verwendet das detaillierte Komfortmodell in TRNSYS 17 sogenannte Gebhart-Faktoren. Hierfür wird ein Sensor in Kugelform in Anlehnung an DIN EN ISO 7726 und VDI 3787 simuliert. Allerdings ist auch dieses Modell noch auf langwellige Infrarotstrahlung beschränkt.

In diesem Beitrag wird das detaillierte Komfortmodell von TRNSYS 17 kurz beschrieben. Darüber hinaus wird eine Erweiterung des physikalischen Modells vorgestellt, um auch den Einfluss kurzweilig direkter und diffuser Solarstrahlung auf den thermischen Komfort abbilden zu können. Zur Überprüfung werden die Simulationsergebnisse mit Messungen eines Sensors in einem Testraum verglichen. Die Messergebnisse stimmen gut mit den TRNSYS 17 Berechnungen überein und liegen im Rahmen der Messgenauigkeit.

ABSTRACT

The mean radiant temperature (MRT) is a key factor for determining thermal comfort. Simple models apply pure geometric factors like area weighted factors or view factors for calculation of the mean radiant temperature. The influence of optical properties as non-black surfaces and the multiple reflections necessary for low-e effects are generally neglected.

To account for both geometrical and optical properties, the detailed comfort model of TRNSYS 17 is based on Gebhart factors. A sphere shaped sensor on the base of DIN EN ISO 7726 and VDI

3787 is simulated. However, this model is currently restricted to long-wave radiation.

This paper briefly describes the detailed comfort model of TRNSYS 17 integrating the effect of highly reflecting surfaces and a generalization of the model including short-wave beam and diffuse solar radiation.

In addition, the results of a comparative study between TRNSYS 17 calculations and measurements in a test environment are presented. Mean radiant temperature thereby is evaluated in different radiative environments including short wave radiation and effects of reflecting surfaces. The measurements show good consistency with TRNSYS 17 calculation results and validate the chosen model within the measurement accuracy.

1. INTRODUCTION

For indoor spaces the impact of solar radiation on the thermal comfort is mostly neglected due to the assumption that people are shaded. However, for highly glazed spaces this assumption may not be valid and the exposure of solar shortwave radiation has a large impact.

In the recently released version 17 of the dynamic simulation program TRNSYS a detailed model for thermal indoor comfort including low-e effects is available. However, this model is still restricted to longwave radiation. Therefore the model has been extended to solar shortwave radiation. The modelling approach is validated by a comparative study between TRNSYS 17 simulation results and measurements in a test environment.

2. MEAN RADIANT TEMPERATURE CALCULATION

The mean radiant temperature (MRT) is a key factor for determining thermal comfort. Several well known climate indices are based on the MRT.

The MRT in relation to a person in a given body posture and clothing placed at a given point in a room, is defined as that uniform temperature of black surroundings which will give the same radiant heat loss from the person as the actual case under study. (Definition by Fanger,1970)

Black environment without solar radiation (TRNSYS standard model)

Since most surface materials have a high emissivity, reflection is often neglected. Thus, all surrounding surfaces are assumed to be black. The mean radiant temperature depends on the surface temperatures and the view factor of a person in relation to the surrounding surfaces, which depends on the shape, size and arrangement of the area to the person:

$$(T_{MR}^{ir})^4 = T_1^4 F_{p-1} + T_2^4 F_{p-2} + \dots + T_n^4 F_{p-n} \quad (1)$$

with:

T_{MR}^{ir} the mean radiant temperature in [K],

T_i the surface temperature of the surface i in [K],

F_{p-i} the view factor between a person and the surface i .

The view factor $F_{A \rightarrow B}$ is defined as the part of diffuse radiation, that leaves surface A (or a differential surface element) and strikes surface B on the direct path (Siegel et al., 2002). The view factor is a pure geometrical factor and does not include any optical properties.

If there is no geometric information available, the mean radiation can be assumed to be the area weighted mean surface temperature of all the surface of a zone:

$$T_{MR}^{ir} = \frac{T_1 A_1 + T_2 A_2 + \dots + T_n A_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} \quad (2)$$

This rough approximation neglects the effect of the location and the orientation of the person and the surrounding walls. Due to its simplicity this approach is widely used in practical engineering and is implemented in the standard longwave radiation model in TRNSYS 17.

Non-black (reflecting) environment without solar radiation (TRNSYS detailed model)

For taking into account different emissivities of surrounding surfaces especially of low- ϵ effects the MRT calculation has to include reflection. Therefore, the view factors are replaced by the so called Gebhart factors. The Gebhart factor G_{A-B} , defined as the part of the emissions of a surface A (or a differential surface element) that is absorbed on a surface B including all possible paths (multi-reflections). For further details see Aschaber et al. 2008 & 2009.

In the detailed model a sphere shaped so-called bulb thermometer with a diameter of 0.07m based on DIN EN ISO 7726 and 3787 is modelled. A bulb

thermometer can be used to determine the mean radiant temperature in a room by measurement. The sphere offers practical advantages with respect to the view factor calculation of the sensor to surrounding surfaces and the validation procedure versus a “real (human) shaped” sensor.

The sphere’s MRT can be used to approximate the mean radiant temperature of a more complex human body for most of the realistic situations. Particularly for seated persons viewfactors of the human body and a sphere match with very small deviations (Dillig, 2009). Compared to standing humans a sphere overestimates the influence of floor and ceiling on MRT. However, this does not create a remarkable error except for abnormally high temperature inhomogenities in a room.

If all surface temperatures of a thermal environment are known the mean radiant temperature is given by:

$$T_{MR}^{ir} = \left[\sum_{i=1}^n T_i^4 G_{s,i}^{ir} \right]^{1/4} \quad (3)$$

with:

$G_{s,i}^{ir}$ the Gebhart factor from sensor surface s to surface i in the IR range

The equation is derived from Fanger’s definition of the mean radiant temperature based on longwave radiation. It is important to notice that the surface of the sensor is part of the radiation exchanging environment. Consequently its surface temperature T_s has to be known in order to evaluate MRT according to equation (3).

The sensor surface temperature T_s can be obtained by the thermal equilibrium condition between convection and radiation driven heat fluxes:

$$\dot{Q}_s^{conv} + \dot{Q}_s^{ir} = 0 \quad (4)$$

A detailed description of this calculation procedure can be found in the TRNSYS 17 manual (Klein et al., 2009).

Non-black (reflecting) environment including shortwave solar radiation (extended detailed model of TRNSYS)

Since shortwave solar radiation has a major influence on the mean radiant temperature the existing model of the sensor was extended to the shortwave solar spectrum including direct, diffuse and reflected radiation effects. Therefore, the thermal equilibrium condition of equation 4 has to be extended by a direct solar and diffuse solar heat flux:

$$\dot{Q}_{dir}^{solar} + \dot{Q}_{diff}^{solar} + \dot{Q}_s^{ir} + \dot{Q}_s^{conv} = 0 \quad (5)$$

Both solar heat fluxes have to include the primary as well as the reflected solar radiation. Therefore, a new set of Gebhart factors is computed for the shortwave spectrum and the fluxes can be described by

$$\dot{Q}_{dir}^{solar} = f_p A_s \alpha_s^{solar} i_n^{dir} + \sum_{i=1}^n I_i^{dir} \rho_i^{solar} G_{i,s}^{solar} \quad (6)$$

$$\dot{Q}_{diff}^{solar} = \sum_{i=1}^n I_i^{diff} G_{i,s}^{solar} \quad (7)$$

With

f_p the projection factor of the sensor

A_s the sensor surface

α_s^{solar} the solar absorbance of the sensor

i_n^{dir} incident direct solar radiation density on a surface perpendicular to the incident radiation direction

ρ_i^{solar} the solar reflectivity of a surface i

I_i^{dir} incident direct solar radiation on surface i

I_i^{diff} transmitted diffused radiation through surface i (=0 for opaque walls and >0 for windows)

$G_{i,s}^{solar}$ shortwave Gebhart factors from surface i to sensor surface s

Consequently, the total mean radiant temperature including infrared as well as solar effects can be obtained by:

$$T_{MR} = \left[(T_{MR}^{ir})^4 + \frac{1}{\varepsilon_s^{ir} \sigma \cdot A_s} (\dot{Q}_{diff}^{solar} + \dot{Q}_{dir}^{solar}) \right]^{1/4} \quad (8)$$

For outdoor spaces, VDI 3787 gives an equation for the MRT including solar effects. However, this equation is valid only for perfectly black surrounding surfaces. The equation given by VDI can be derived from Eq. 8 by setting all emissivities to 1.

Comparability to MRT of human body

Equation (8) allows computing mean radiant temperature of the sensor. To gain comparability to the more complex human body optical properties have to be fixed to specific values that represent the

thermal relations at the human body surface. For a 0.07m sized sphere an IR emissivity of 0.82 and solar absorbance of 0.53 were chosen (Dillig, 2009).

Additionally, the high intensity of direct solar radiation demand closer consideration of the differences in shape between the human body and the sensor. Direct solar heat flux depending on the projection factor f_p (eq. 6) causes an important dependency of human MRT on solar altitude angle. Consequently, the projection factor of the sphere, being constantly at 0.25, is replaced by the angle depending projection factors of the human body (see table 1). Thereby a correction of the direct solar heat flux is done. The low intensity diffuse and reflected solar radiation fluxes however can be well approximated using the sphere as a human body representation.

γ	0°	10°	20°	30°	40°
f_p	0.308	0.304	0.292	0.271	0.237
γ	50°	60°	70°	80°	90°
f_p	0.205	0.174	0.140	0.108	0.082

Table 1: Surface projection factor f_p of the human body as a function of the angle γ of the solar altitude angle (VDI 3787, 2008)

3. IMPLEMENTATION INTO TRNSYS17

The previously described extended detailed model has been implemented as a prototype into TRNSYS 17.

In addition, the existing insolation calculations for direct radiation have been extended to determine if a given point is sunlit (depending on external shading), and from which external windows it receives sunlight. The sunlit factor's are written to an external file (*.IPM) which is read in by the multizone building model at the start of the simulation.

4. EXPERIMENTAL VALIDATION USING GLOBE SENSORS

In order to verify the above introduced modelling approach and to proof correctness of the numerical mean radiant temperature calculations within TRNSYS 17 a comparison between simulation results and experimental data was carried out. Therefore it was necessary to measure mean radiant temperatures in a well known thermal environment, i.e. surface and air temperatures.

To obtain mean radiant temperature data a sphere shaped sensor on base of DIN EN ISO 7726 and VDI 3787 was placed into different radiation environments in a climatic chamber at the Institute for Energy Economy and Application Technology of

the TU Munich. At TU Munich, well resolved surface temperature measurements were possible due to fine grid, radiation shaded contact sensors at all wall surfaces. Additionally air temperatures at different positions within the climate chamber were recorded by radiation shaded platinum resistance thermometers (PRTs, sensor accuracy ± 0.2 K). In front of the façade of this chamber an artificial sun, i.e. a lighting platform (1 m²) consisting in metal halide lamps (26 x 400 W) and halogen lamps (80 x 150 W) were installed. These spotlights are thereby combined in a way to obtain a realistic simulation of the terrestrial solar spectrum and almost isotropic radiation intensities on the window plane of the climatic chamber.

The experimental set up including dimensions and sensor positioning for mean radiant temperature measurement are indicated in Figure 1. Three different sensor locations were defined to show the influence of position on MRT calculation. During each test the sensor was placed in one of these positions in a height of 1.20 m. Normal incident solar radiation intensity at the sensor position was detected using pre-calibrated pyranometer measurements near to the actual sensor position. The used pyranometer was a KippZonen CM11 installed perpendicular to the incident beam direction.

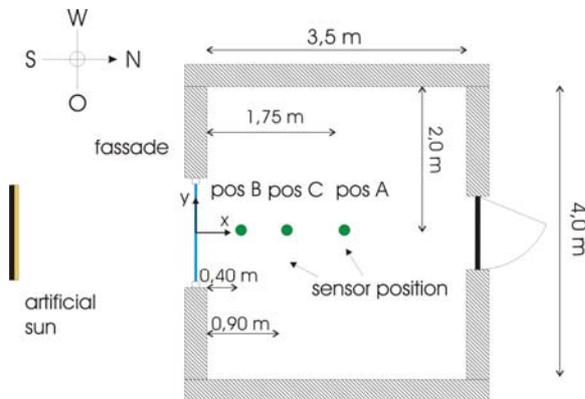


Figure 1: Test facility: climatic chamber dimensions and set up for different measurements

To determine experimentally mean radiant temperatures at a certain position in the climate chamber a metal globe sensor on base of DIN EN ISO 7726 was used. In the center of the metal sphere with 5cm of diameter a PRTs (Pt100 1/3 DIN class B, accuracy: $\Delta T = \pm 1/3 (0.30^\circ\text{C} + 0.005 t)$) was placed to determine the mean sensor body temperatures. Its optical surface properties, i.e. emissivities for IR-radiation ϵ_s^{ir} as well as for the solar spectrum α_s^{solar} were determined to 0.87 / 0.57 using spectral reflectivity measurements. Figure 2 shows an image of the used sphere sensor including its thermally detached support.



Figure 2: Example of the sphere shaped sensor used to determine mean radiant temperatures

The mean radiant temperature of the sphere sensor T_{mr} can be calculated for steady state values using the measured mean sensor temperature T_s as well as the air temperature at the sensor position (T_a) by conversion of relation (4):

$$T_{mr} = \left[\frac{h_{conv}}{\epsilon_s^{ir} \sigma} (T_s - T_a) + T_s^4 \right]^{1/4} \quad (9)$$

With

- T_a the air temperature,
- T_s surface temperature of the sensor,
- h_{conv} convective heat transfer coefficient
- ϵ_s^{ir} IR - emissivity of the sensor
- σ Stephan-Boltzmann constant

During each test the dynamic behaviour, i.e. evolution of temperature values, of sphere sensors and surroundings was recorded. It was aimed to reach steady state room conditions, however due to large time constants of the climate chamber only quasi equilibrium conditions could be reached. As T_{mr} calculations of TRNSYS 17 do not account for heat capacities of the sensing device, Equation 9 was adapted to obtain mean radiant temperature for non-equilibrium conditions and to eliminate deviations due to dynamic delays.

These are compared to the result of a T_{mr} calculation procedure of TRNSYS 17 (see chapter 1) fed with the measured boundary conditions of the climatic chamber. Thereby the dynamics of room were not computed but surface and air temperatures were

forced to the measured data of the experiments in the climatic chamber.

Measurement 1: Inhomogenic IR- radiation environment

An objective of this test was to verify correctness of mean radiant temperature calculation in a purely IR-radiation environment for different sensor positions. To generate significant results large temperature inhomogeneities were produced. Therefore the climatic chamber was cooled overnight down to 3 °C wall surface temperatures. After starting the measurement the 100% shaded window surface (IR-emissivity of 0.89) was heated up using the artificial sun as continuous, homogeneous heating device. The sphere shaped sensor was placed in pos B initially. After the room reached an almost steady state condition the sensor was moved to position C resulting in a drop in mean radiance temperature of 13 K. Analyzing Figure 3 with a comparison of measured (crosses) and TRNSYS17 computed mean radiant temperatures for the three predefined position (continuous, dashed, and dotted and dashed line) leads to the conclusion of great conformity within the measuring accuracy. The non-immediate change of MRT when moving the sensor from pos B to C is caused by an averaging approach in MRT calculation. The influence of low-e surfaces, i.e. highly IR-reflecting, could not be shown in this experiment due to high absorption wall surfaces.

Measurement 2: Influence of direct solar radiation

In a second measurement the influence of direct solar radiation at sensor position was studied. Therefore the sensor was placed in position A being irradiated by the artificial sun outside the climatic chamber. In Figure 4 mean radiant temperatures obtained by sphere sensor measurement (crosses) and TRNSYS calculation (dotted-and-dashed line) are plotted on left y-axis, while direct normal irradiance (continuous line) is plotted on the right y-axis. One

can see the solar radiation induced an immediate step in mean radiant temperature of about 14 K while rising surface temperature only caused a small delayed effect. This underlines the great importance of correct consideration of solar influences on human comfort calculation. Furthermore the plot shows the good agreement of measured and computed mean radiant temperatures within a certain measurement accuracy, i.e. a correct calculation of mean radiant temperatures for thermal comfort evaluation in sun exposed spots based on DIN EN ISO 7726 and VDI 3787. In the case shown horizontal irradiation from south was chosen, but due to the sphere-shaped sensor solar position theoretically has no influence on mean radiant temperature (as long as sensor is not shaded). The sensor hanging however causes some measurement deviation for low zenith-angles of the artificial sun due to partly shading the sensor surface. This imperfection of the physical sensor is not represented numerically; hence, a comparison is only reasonable for horizontal irradiation.

Measurement 3: Diffuse/Reflected solar radiation

To show the reasons and effects of mean radiant temperature calculation using the Gebhart factors (see chapter 1) instead of a simple, viewfactor based approach, a test environment with highly reflective surfaces is necessary. Consequently, considering surface properties of the test facility, the available climatic chamber did not allow a verification of reflected radiation influence in the IR-spectrum, but only for the solar radiation. To obtain significant test results, the overwhelming influence of direct solar radiation had to be suppressed. Thus, an experimental set up was chosen where the sphere shaped sensor in position A is shaded against direct solar radiation entering the room from an artificial sun turned 40°. Thereby the total amount of incident radiation through the window was calculated and could be distributed to the different wall surfaces using the geometrically computed insolation matrix (see chapter 1). The local distribution of solar

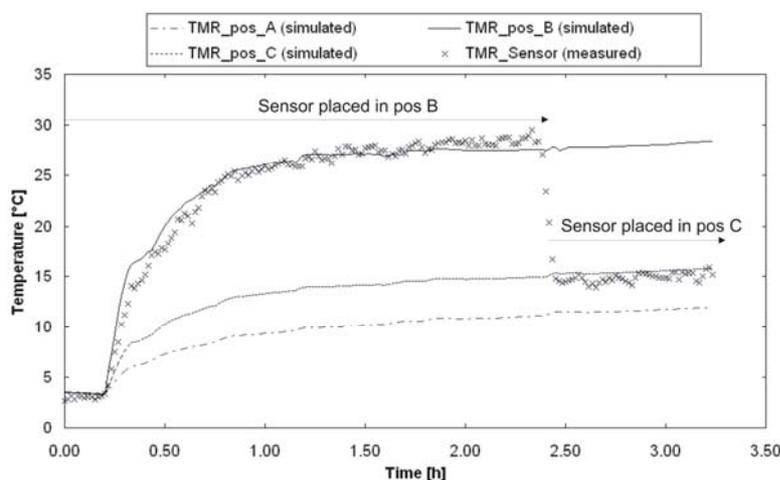


Figure 3:

Measurement 1 showing a comparison of measured and TRNSYS 17 computed mean radiant temperature values for purely IR-radiation environments

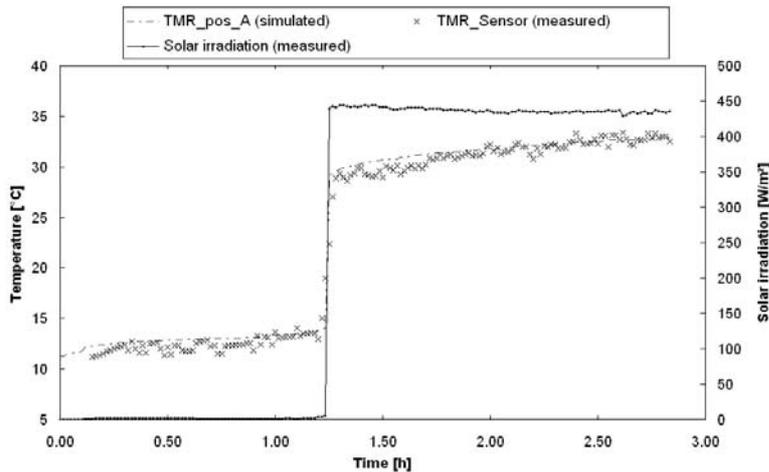


Figure 4:

Measurement 2 showing a comparison of measured and TRNSYS 17 computed mean radiant temperature values for the case of direct solar irradiation

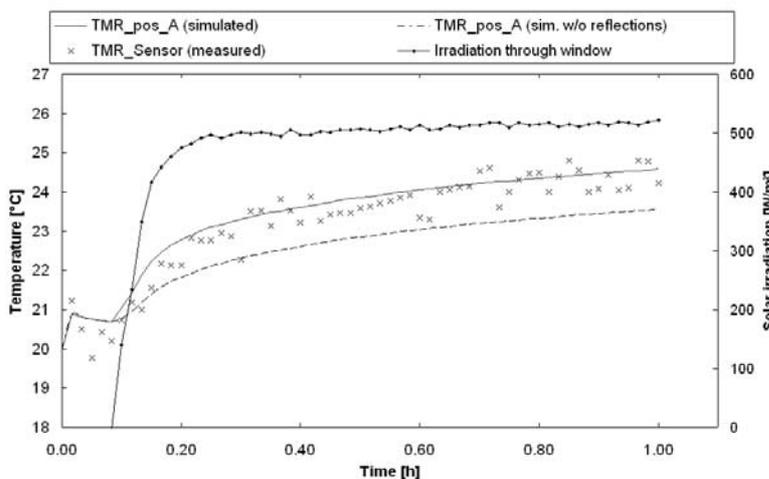


Figure 5:

Measurement 3 showing a comparison of measured and TRNSYS 17 computed mean radiant temperature values for the case of reflected solar irradiation.

radiation was supposed to be homogeneous in order to simplify calculations. In Figure 5 the results of the experiment can be found. The continuous line represents the TRNSYS 17 calculation of mean radiant temperatures considering reflections while the dashed line shows the same calculations ignoring wall reflectivities. Since total amount of incident radiation into the room is rather small due to a low effective window area, the final difference in mean radiant temperature caused by reflected sunlight is 1 K. Hence, the measured T_{mr} values from the sphere shaped sensor (crosses) do not clearly indicate the necessity of the Gebhart approach. However, a trend showing an improvement of the calculated results can be deduced from this measurement. To obtain more reliable conclusions experiments with higher total incident radiation or higher surface reflectivities would have to be carried out.

4. CONCLUSION AND FURTHER WORK

The mean radiant temperature (MRT) is a key factor for determining thermal comfort. In this paper an extension of the detailed comfort model (including highly reflecting/low-e surfaces) of TRNSYS 17 is presented, which integrates short-wave beam and diffuse solar radiation. The derived relationship for

the mean radiant temperature includes the MRT equation of VDI 3787 as a special case, which is valid for perfectly black surrounding surfaces only. The derived MRT expression can be used for all approximated geometrical shapes of the human body. In the detailed comfort model of TRNSYS 17 a sphere shaped sensor was used due to computational issues. The extended solar comfort model pursues this approach and uses specific values for the optical properties to achieve a good correlation to the more complex human body.

The experiments clearly confirm the need of a detailed radiation modeling approach. Effects of position, solar radiation and reflecting surfaces have a major influence on mean radiant temperature calculation and thus, on comfort evaluation in buildings. The measurements show good consistency with TRNSYS 17 calculation results and validate the chosen model within the measurement accuracy. In order to clearly proof the correctness of the IR Gebhart model, further measurements in a low-e environment would have to be performed.

REFERENCES

- Aschaber, J. et al. 2008. TRNSYS17: Das 3D-Strahlungsmodell, BauSIM 2008 Conference, Kassel Germany
- Aschaber, J et al. 2009. TRNSYS17: New Features of Multi-zone Building Model, 11th International Building Performance Simulation Association Conference, Glasgow Scotland
- ASHRAE; ASHRAE Handbook Fundamentals, SI edition, Atlanta GA, 2005
- Dillig, M. 2009. Master thesis, Entwicklung von Sensoren zur Messung der operativen Temperatur in unterschiedlichen Umgebungen, Lehrstuhl für Thermodynamik, Technische Universität München
- DIN EN ISO 7726:2002-04. Umgebungsklima – Instrumente zur Messung physikalischer Größen. Berlin: Beuth Verlag
- Fanger, P.O. 1970. Thermal Comfort Analysis and Applications in Environmental Engineering, Copenhagen,
- Klein, S.A. et al. 2009. TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program, SEL, University of Wisconsin, Madison USA.
- VDI 3787 Blatt 2:2008-11. Umweltmeteorologie - Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Luftthygiene für die Stadt- und Regionalplanung - Teil 1: Klima Berlin: Beuth Verlag

DYNAMISCH-THERMISCHE SIMULATIONEN ALS EIN BAUSTEIN IN DER BEWERTUNG DER WAHREN ENERGIEEFFIZIENZ VON GEBÄUDEN

Andreas Ampenberger
 Institut für Gebäude und Energie, TU Graz, Österreich

KURZFASSUNG

Diese Studie bestimmt für unterschiedliche Planungsoptionen eines Zielbüros die wahre Energieeffizienz, definiert als das Verhältnis von erreichter Qualität des Innenraumkomforts zu aufgewendetem Energiebedarf (Cody B., 2008), mit der sog. BEEP-Methode (Building Energy and Environmental Performance).

Die Beurteilung des Innenraumkomforts wird erstmals umfassend durchgeführt, indem zwischen mechanisch und natürlich betriebenen Gebäuden differenziert wird, die Luftqualität berücksichtigt wird und ein einfacher Ansatz zur Tageslichtbewertung als Experiment zur Anwendung kommt.

Die Studie macht deutlich, daß sich vor allem die Komfortparameter bei Gebäuden, die zur Raumkonditionierung auch das Potential der Umgebung nutzen, in kurzen Zeitabständen stark ändern. Hier helfen dynamische Simulationen die Zustände exakt zu erfassen.

ABSTRACT

This study determines for different planning options for an office room the true energy efficiency, defined as the ratio of achieved indoor comfort to the expended energy demand.

The rating of indoor comfort here differentiates between mechanical and naturally operated buildings, considers air quality and uses a simple approach for evaluation of daylight performance.

The study shows that comfort parameter may change quickly in period of time, that is why dynamic simulation is the right instrument to capture these conditions.

EINLEITUNG

Zur Verbesserung der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden wird derzeit die europäische Richtlinie 2002/91/EG durch nationale Gesetze und Regelwerke umgesetzt und angewendet.

Der Begriff der Energieeffizienz bzw. deren Steigerung wird meist unscharf verwendet und gleichgesetzt mit Verbrauchsreduktion und hoher Wirksamkeit bei der Verbrauchsdeckung. In (Hauser G., 2008) wird festgestellt, daß es eigentlich um die Energiemenge geht, die benötigt ist, um eine gewünschte Nutzung sicherzustellen. Auch in der genannten EU-Richtlinie erfolgt keine exakte Begriffsdefinition. Es wird von einer Energiemenge gesprochen, die auch unter Berücksichtigung anderer Faktoren, wie dem Innenraumklima, zu berechnen ist (EU-Richtlinie 2002/91/EG).

Cody schlägt in (Cody B., 2008) vor, die Energieeffizienz für Gebäude ähnlich einem technischen Effizienzindikator als Quotient von Nutzen zu Aufwand zu definieren. Hieraus entsteht der sog. BEEP-Wert (Building Energy and Environmental Performance), der die erreichte Qualität des Raumklimas mit dem hierfür notwendigen Energieaufwand in Beziehung setzt. Damit unterscheidet sich diese Methode grundlegend von üblichen Methoden (z. B. nach EAVG oder EnEV), die von einem als Randbedingung definierten Raumklima ausgehen und bei dem daraus resultierenden Nutzenergiebedarf eine Effizienzbetrachtung der Anlagentechnik und der Energiebereitstellung durchführen.

Aufgrund der dynamischen Wechselwirkungen im Raum, des zeitlich variablen Umgebungsklimas und der zunehmenden Zahl von Energiekonzepten, die mit der Umgebung als Quelle für Heizen, Kühlen und Belüften interagieren, kann nicht davon ausgegangen werden, daß die angestrebten Sollwerte im Raum immer erreicht werden. Deshalb muß man für eine umfassende Gebäudebeurteilung jederzeit genau wissen, welcher Grad des Raumkomforts bei welcher Option und mit welchem Energieeinsatz erreicht wird.

Das genannte Bewertungsverfahren BEEP zur Bestimmung der wahren Energieeffizienz soll hier vorgestellt und an einer Planungsstudie angewendet werden. Durch den umfassenden Ansatz ist es geeignet, begleitend während der Planung Gebäudeoptionen/-varianten in einem ausreichenden Detaillierungsgrad bezüglich ihrer Energieeffizienz zu untersuchen.

METHODE

Die Energieeffizienz eines Gebäudes soll als das Verhältnis zwischen der Qualität des Raumklimas und der Quantität des notwendigen Energiebedarfs, um dieses Raumklima aufrecht zu halten, verstanden werden und wird durch die BEEP-Methode bestimmt (Cody B., 2008).

Die Qualität des Raumklimas wird durch die Anzahl der Nutzungsstunden (bzw. deren Prozentsatz N an der Nutzungszeit) mit unzureichender Behaglichkeit bestimmt. Für den aufgewendeten Energiebedarf werden Betriebsenergien (Primärenergie PED) bilanziert. Die Betriebsenergien werden durch eine dynamisch-thermische Simulation ermittelt, wobei die Verbraucher Wärme, Kälte, Beleuchtung und Luftförderung als Nutzenergien berücksichtigt werden. Die Umrechnung auf Endenergie erfolgt hier vereinfacht über einen Faktor (15%), die Umrechnung auf Primärenergie für Wärme über den Faktor 1.14, für EU-Netzstrom über den Faktor 2.35.

Der BEEP-Wert als Kennwert der Energieeffizienz wird wie folgt bestimmt:

$$BEEP = \frac{NOH(100 - N)}{100PED}$$

BEEP	Building Energy and Environmental Performance (Einheit: Anzahl der Stunden mit akzeptabler Behaglichkeit je kWh/m ² a)
NOH	Anzahl der Stunden im Jahr, bei denen das Büro belegt ist (hier: 2610h)
PED	Primärenergiebedarf (Heizung, Kühlung, Beleuchtung, Luftförderung) (kWh/m ² a)
N	Prozentsatz der Arbeitsstunden mit unzureichender Behaglichkeit (PPD > 10%)

Der Begriff des behaglichen Raumklimas soll den thermischen Komfort, die Luftqualität und auch den visuellen Komfort umfassen.

Thermischer Komfort

Als Kriterium für den thermischen Komfort wird der von Fanger (Fanger, P.O., 1970) definierte PMV-/PPD-Index herangezogen, der auch in das Normenwerk (ÖNORM EN ISO 7730, 2006) aufgenommen wurde. Der PPD-Index gibt an, wieviel Prozent der Personen mit der thermischen Umgebung voraussichtlich unzufrieden sein werden. In der ISO 7730 wird ein PPD-Wert von kleiner 10% empfohlen, so daß für den BEEP-Wert die Anzahl der unbehaglichen Nutzungsstunden mit der Kondition PPD > 10% ermittelt wird.

Ein Kritikpunkt an Fangers anerkanntem Behaglichkeitsmodell ist der Umstand, daß es durch Versuchsreihen mit Personen entstanden, die keinen Einfluß auf das Raumklima nehmen konnten und nach dem Behaglichkeitsempfinden, nicht aber nach ihrer Zufriedenheit befragt wurden. Aktuelle Forschungsergebnisse (deDear R. et al., 1998) zeigen zudem, daß bei Nutzerbefragungen im Zusammenhang mit frei belüfteten Gebäuden größere Abweichungen zu Vorhersagen mit dem herkömmlichen PMV-/PPD-Modell auftreten. Die Nutzer dieses Gebäudetypus tolerieren offenbar ein breiteres Spektrum der operativen Raumtemperatur als Nutzer von klimatisierten Gebäuden (Hellwig R., 2005). Die Unterschiede werden mit der Möglichkeit einer größeren persönlichen Einflußnahme und einer geringeren Erwartungshaltung für das Raumklima erklärt.

Auf die genannten Untersuchungen hin erweiterte Fanger (Fanger P.O. et al., 2002) das PMV-/PPD-Modell um einen Anpassungsfaktor, dem expectancy-Faktor, der berücksichtigen soll, daß in warmen Klimazonen lebende Personen mit niedrigen Erwartungen an ihre thermische Umgebung höhere Temperaturen als akzeptabel hinnehmen. Die Erwartungshaltung ist um so geringer, je weniger üblich klimatisierte Gebäude in dieser Klimazone sind. Fanger stellt anhand einer weniger ausgewählter Orte die Bandbreite der Faktoren zwischen 0.5 und 1 vor und erklärt Forschungsbedarf für eine genaue ortssabhängige Bestimmung der Faktoren. In der BEEP-Bewertung werden Gebäude mit keiner oder geringer Klimatisierung mit dem Expectancy-Faktor bewertet. Lt. Fanger sollte er sich für Regionen mit einigen wenigen klimatisierten Gebäuden und warmer Sommersaison, wie dem hier angenommenen Standort München, in einem Bereich von 0.7 bis 0.9 bewegen.

Luftqualität

Die Luftqualität wird als unzureichend bewertet, sobald der sog. Pettenkofer-Wert 1000ppm überschreitet.

Visueller Komfort

Der visuelle Komfort, speziell die Tageslichtsituation, hat einen wichtigen Stellenwert. Elke Gossauer (Gossauer E., 2008) zeigt aus einer Feldstudie mit 17 Bürogebäuden, daß die Bedeutung von Tageslicht bei einer Nutzerumfrage in Bezug auf die eingeschätzte Wichtigkeit in der Nähe der thermischen Faktoren angesiedelt wird und zudem bisher eher unzufriedene Zustände empfunden werden (vgl. Abbildung 1).

Visueller Komfort sollte auch nicht isoliert vom thermischen Komfort betrachtet werden, da er wesentlich von Elementen, wie z.B. Sonnenschutz-einrichtungen, beeinflusst wird, die für die Regulierung des thermischen Komforts vorgesehen werden.

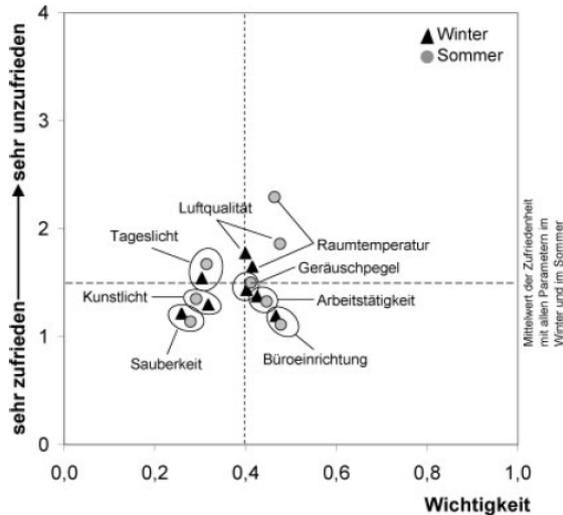


Abbildung 1: Handlungsrelevanzmatrix aus (Gossauer E., 2008)

Die Integration einer geeigneten Bewertung in BEEP wird zur Zeit intensiv untersucht, gestaltet sich aber schwierig, da viele Faktoren zum visuellen Komfort beitragen und bisher keine umfassende quantitative Beurteilungsmöglichkeit für unbehagliche Zustände existiert.

Besonders wichtig erscheint die Ermittlung und Bewertung von Blendungssituationen und die Behandlung der Fragestellung, inwieweit ein zu geringer Tageslichtanteil an der Raumbelichtung zu Diskomfort führen kann. Hier gibt es Hinweise aus der Literatur, daß Nutzer Tageslicht gegenüber Kunstlicht als hochwertiger einschätzen und die Bewältigung von Arbeit streßfreier und angenehmer erfolgt (Galasiu, A. et al., 2006) (Heerwagen, J.H., 1986).

Innerhalb dieser Untersuchungsreihe soll betrachtet werden, wie sich die Anwendung der sog. Useful Daylight Illuminance (Mardaljevic et al.) innerhalb der BEEP-Bewertung auswirkt. Mardaljevic definiert Intensitätsbereiche von Momentanbeleuchtungsstärken im Raum, die erstrebenswert sind und als „gutes“ Tageslicht bezeichnet werden können. Es ist dies der Bereich am Arbeitsplatz mit einer Beleuchtungsstärke E ab 50 lux bis 250 lux. Mardaljevic stellt fest, daß generell Tageslicht mit $E < 50$ lux, gleichgültig ob als alleinige Quelle oder ergänzt durch Kunstlicht „ungenügend“ ist. Ab 250 lux besteht ein erhöhtes Risiko auf potentielle Blendung (Mardaljevic J et al., 2006).

Für diese Studie wird angenommen, daß an teilige Tageslichtbeleuchtungsstärken $E < 50$ lux (auch bei Ergänzung durch Kunstlicht) und größer 2500 lux potentiell Diskomfort hervorrufen können.

SIMULATIONSSTUDIE UND ZIELE

Es ist der Anspruch von BEEP durch seine Gesamtenergieeffizienzbewertung - mit den beiden verknüpften Kernindikatoren Energiebedarf und Komfort - eine gute umfassende Planungsunterstützung zu bieten, indem Planungsvarianten - im folgenden für ein Zellenbüro - hinsichtlich ihrer Effizienz im BEEP-Diagramm direkt verglichen werden können.

Zunächst wird ein Ausgangsfall definiert, der durchaus üblich ist und ein konservatives Energie- und Klimakonzept aufweist. Es ist eine umfassende TGA mit RLT-Anlage und Kühldecke vorhanden, welche vermutlich in der Lage sein wird, ein konstantes und gutes Innenraumklima herzustellen, wobei der Energiebedarf aufgrund moderner Anlagentechnik akzeptabel sein wird.

Ausgehend von diesem Ausgangsfall sollen zwei Untersuchungsreihen zu Planungsoptionen hinsichtlich Lüftung und Raumkonditionierung (Untersuchungsreihe [L]) sowie hinsichtlich Tageslichtperformance (Untersuchungsreihe [T]) die Notwendigkeit eines Bewertungsverfahrens wie BEEP zeigen, das durch eine umfassende, integrierte und zeitlich hochauflösende Komfort- und Effizienzbewertung in der Lage ist, „sanft“e“ Konditionierungskonzepte mit einem variablen Innenraumklima zu beurteilen.

Ausgangsfall

Die Geometrie des betrachteten Zellenbüros mit Standort München bleibt für alle Varianten unverändert und ist in Abbildung 2 dargestellt. Es handelt sich um einen 3-achsigen südorientierten Büroraum für 3 Personen mit einem Achsenmaß von 1.35m, einer Raumbreite von 4.05m, einer Raumtiefe von 6.5m und einer lichten Höhe von 3m.

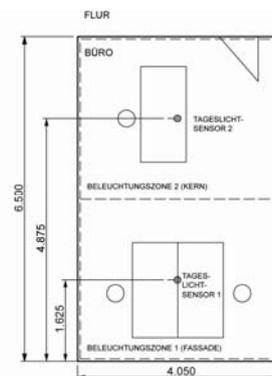


Abbildung 2: Betrachtetes 3-achsiges Zellenbüro

Tabelle 1: Daten der Fassade, Ausgangsfall

opak	
u_{opak} [W/m ² K]	0.1
Fenster, nicht öffenbar	
u_F [W/m ² K]	0.6
g [-]	0.55
T_L [-]	0.72
Sonnenschutz	
zweigeteilt, Lichtlenkung im oberen Drittel	
Aktivierung bei [W/m ²]	200
Transmission oben [-]	0.41
Transmission unten [-]	0.11
Infiltration	
LW [1/h]	0.05

Das Büro soll für den Ausgangsfall eine hochwärmegedämmte Fassade in Holzkastenbauweise mit hoher Dichtheit erhalten und zudem einen auch bei hohen Winddrücken zuverlässig funktionierenden Sonnenschutz. Aus diesen Gründen wird der transparente Teil der Fassade mit einer 3-Scheiben-WSV-Verglasung, vorgesetzter Prallscheibe und einem zwischenliegenden Lamellen-Sonnenschutz ausgeführt. Auch der Fensteranteil der Fassade sollte aus Gründen des Wärmeschutzes nicht zu hoch sein, er betrachtet von innen betrachtet 50% (vgl. Tabelle 1).

Die Belüftung erfolgt kontrolliert über eine RLT-Anlage, so daß die Fenster als nicht öffenbar ausgeführt werden. Diese wird mit dem hygienisch notwendigen, konstanten 1.3fachen Luftwechsel betrieben und ist mit einer Wärmerückgewinnung (Rückwärmezahl 0.7) ausgestattet. Da die Raumkühlung über eine Kühldecke erfolgt, wird der Zuluftvolumenstrom auf einen Wassergehalt von 10g/kg tr. Luft entfeuchtet. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die eingesetzte TGA zur Raumkonditionierung.

Tabelle 2: TGA zur Raumkonditionierung

RLT-Anlage	
LW [1/h]	1.3
Rückwärmezahl [-]	0.7
Specific fan power [W/(l/s)]	2.4
Entfeuchtung [g/kg tr.L.]	8
Zulufttemperatur [°C]	20
Raumkühlung (Kühldecke)	
Sollwert [°C]	gleitend bis 26
Verfügbare Leistung [W/m ²]	50W/m ²
Raumheizung (Radiatoren)	
Sollwert [°C]	20 (abgesenkt 17)
Verfügbare Leistung [W/m ²]	70

Planungsvarianten Belüftung (Untersuchungsreihe [L])

In einer ersten Untersuchungsreihe [L] werden unterschiedliche Konzepte zur Lüftung und Konditionierung des Raumes untersucht. Diese Konzepte versuchen in unterschiedlichem Maß eine direkte Fensterlüftung zu nutzen. Die Effektivität des Konzeptes in Bezug auf Erreichen eines gewünschten Raumklimas ist deshalb unmittelbar an die klimatischen Bedingungen des Ortes gekoppelt. Für alle Varianten ist damit von Interesse, inwieweit ein angestrebter Raumluftzustand mit welchem Energiebedarf erreicht werden kann. Tabelle 3 gibt eine Übersicht über die Varianten.

Tabelle 3: Überblick über die Planungsvarianten Belüftung

A	Fenster nicht öffenbar RLT Anlage mit mechanischem LW Kühldecke
L1	Fenster potentiell öffenbar RLT Anlage mit mechanischem LW Kühldecke mit Taupunktüberwachung
L2	Mixed-Mode-Lüftung Kühldecke mit Taupunktüberwachung
L3	Reine Fensterlüftung Kühldecke mit Taupunktüberwachung
L4	Reine Fensterlüftung Keine aktive Kühlung Nachtlüftung

Variante [L1] sieht gegenüber dem Ausgangsfall öffenbare Fenster vor, die jedoch nicht effektiv in das Lüftungskonzept eingebunden sind, d.h. die RLT-Anlage versorgt den Raum weiterhin konstant mit dem hygienischen Luftwechsel. Es ist nun eine zusätzlich Taupunktüberwachung für die Kühldecke notwendig. Eine zeitweise erzwungene Leistungsreduktion der Kühldecke könnte Auswirkungen auf den thermischen Komfort, Energiebedarf und die Effizienz haben.

Variante [L2] implementiert ein Mixed-Mode-Lüftungskonzept. Bei Außentemperaturen zwischen 5°C und 20°C sind die Nutzer selbst verantwortlich, über Fenster den nötigen Luftwechsel herbeizuführen. Die RLT-Anlage kann zu diesen Zeiten abgeschaltet werden, um Energie für Luftförderung einzusparen. Da versucht werden soll, auch den Einfluß einer unregelmäßigen Fensterlüftung auf die Behaglichkeit zu untersuchen, wird diese über ein integriertes Zonenlüftungsmodell abgebildet. Das Zeitprofil für das Lüftungsverhalten – angewendet auf 40% der zur Verfügung stehenden Fensterfläche – wurde in Anlehnung an die Arbeiten von (Iftikhar A., 2001) entwickelt und berücksichtigt eine zu beobachtende Außentemperaturabhängigkeit bei der Lüftungsintensität (vgl. Tabelle 4).

Tabelle 4: Zeitprofile für Fensterlüftung

Stündliche Öffnungsdauer			
$t_{\text{außen}} < 0^\circ\text{C}$	$0^\circ\text{C} < t_{\text{außen}} < 14^\circ\text{C}$	$14^\circ\text{C} < t_{\text{außen}} < 18^\circ\text{C}$	$t_{\text{außen}} > 18^\circ\text{C}$
1/12h	2/12h	5/12h	9/12h
Resultierender mittlerer Luftwechsel			
Winter	Frühjahr S	ommer	Herbst
1.9 [1/h]	3.1 [1/h]	3.5 [1/h]	2.5 [1/h]

Während der übrigen Zeit sorgt die RLT-Anlage mit einer Wärmerückgewinnung für den nötigen Luftwechsel. Eine Kühldecke ist weiterhin vorhanden.

Variante [L3] konditioniert über natürlichen Luftwechsel und eine Kühldecke, während Variante [L4] auch auf eine aktive Kühlung verzichtet und stattdessen über gesteuerte Fenster in der Nacht lüftet und kühlt.

Planungsvarianten Tageslicht (Untersuchungsreihe [T])

Der Ausgangsfall besitzt lediglich eine Fensterfläche von 50% bzw. eine transparente Glasfläche von 35%. Eine ungünstige Tageslichtperformance sowie ein hoher Kunstlichtbedarf ist zu erwarten. Aus diesem Grund wurden zwei weitere Optimierungsansätze untersucht:

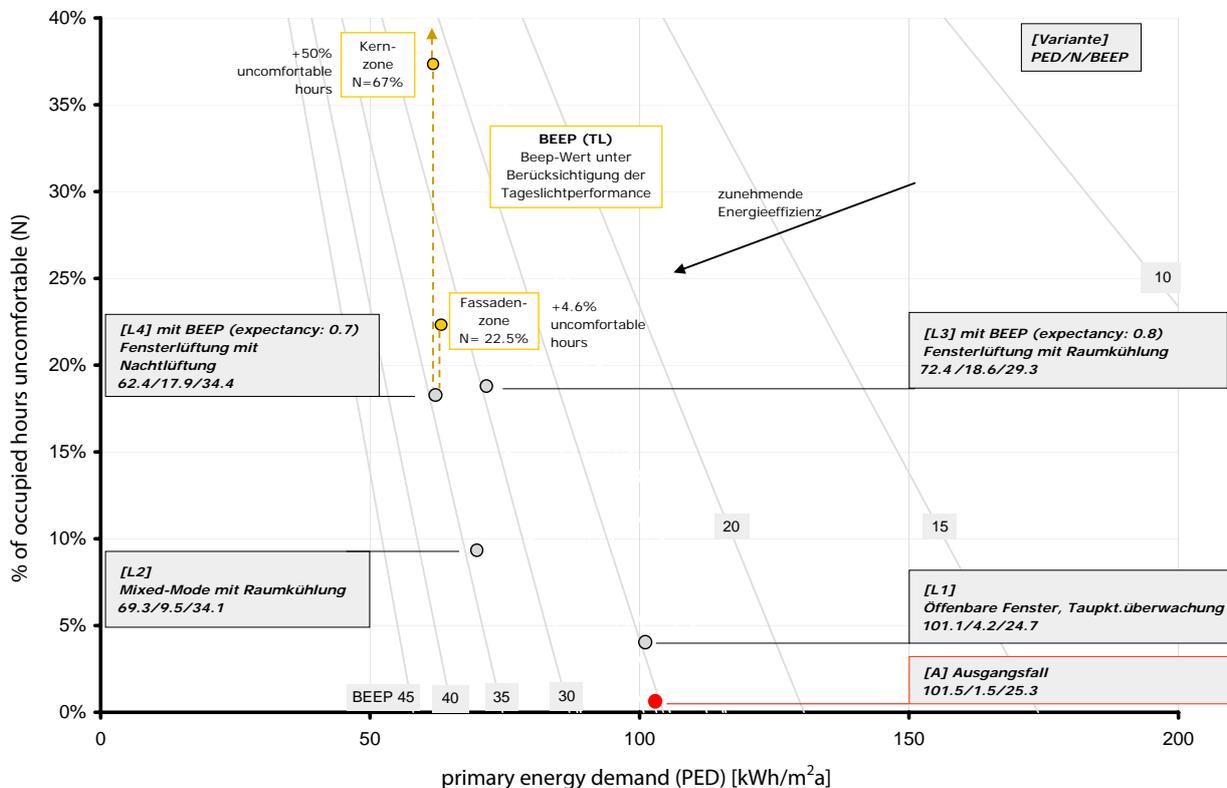
In Variante [T1] wird die innenseitige 3Scheiben-WSV-Verglasung durch eine 2Scheiben-WSV-Verglasung mit den Kennwerten 1/0.62/0.8 ($u/g/T_L$) ersetzt. Der Fensteranteil wird von 50% auf 70% erhöht, es wird ein transparenter Glasanteil von 60% erreicht.

Variante [T2] verzichtet auf eine Kastenfensterlösung und nutzt eine einschichtige Sonnenschutzverglasung ohne zusätzlichen Sonnenschutz mit den Kennwerten 1.1/0.37/0.70 ($u/g/T_L$). Der einschichtige Aufbau ohne Prallscheibe wird durch den Wegfall des Sonnenschutzes ermöglicht. Wie in Variante [T1] wird der Fensteranteil von 50% auf 70% erhöht.

ERGEBNISSE

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse für den Primärenergiebedarf der Untersuchungsreihe [L] (Lüftung) und [T] (Tageslicht). Dies sind im wesentlichen die Informationen, die man durch die Bewertung nach EAVG/EnEV erhält.

Der Energiebedarf von Variante [L1] bis [L4] nimmt (mit Ausnahme von Variante [L3]) kontinuierlich ab. Dies ist eine Folge der Nutzung des direkten, freien Kühlpotentials über Fensterlüftung und der


Abbildung 3: BEEP-Diagramm für die Untersuchungsreihe [L] (Lüftung)

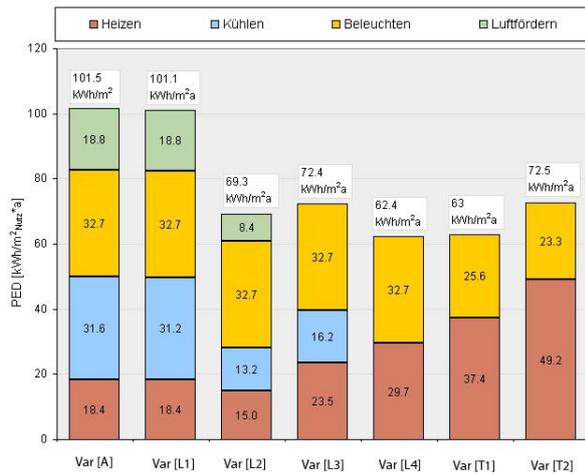


Abbildung 4: Primärenergiebedarf für die Untersuchungsreihen

Reduktion des Energiebedarfs für Lufttransport, auch wenn gleichzeitig der Wärmebedarf durch die fehlende Möglichkeit einer Wärmerückgewinnung steigt. Auffällig ist auch der hohe Bedarf an Kunstlicht.

Obwohl nun der Energiebedarf bekannt ist, kann man keine Aussage zu dem tatsächlich erreichten Komfort sowie keine Aussage zur Energieeffizienz, dem Verhältnis von Energiebedarf zu Komfort treffen. Dies ist mit Hilfe des BEEP-Diagramms möglich. Es spannt mit dem Primärenergiebedarf auf der x-Achse und den Prozentsatz unbehaglicher Stunden auf der y-Achse ein Feld auf, in dem die Zustandspunkte der einzelnen Varianten eingetragen werden (vgl. Abbildung 3). Punkte gleicher Energieeffizienz sind durch die sog. BEEP-Linien miteinander verbunden. Die Energieeffizienz nimmt mit steigendem BEEP-Wert von rechts nach links zu.

Bis auf Variante [L4], die ein frei betriebenes Konzept verfolgt, verwenden alle Varianten denselben Sollwert für Kühlung und Heizung. Dennoch erreichen sie aus den folgenden Gründen eine unterschiedliche Qualität des Raumklimas (vgl. auch Tabelle 3, Aufgliederung der unbehaglichen ppd-Werte in die Ursachen):

[L1] Aufgrund der potentiell öffnbaren Fenster, muß die Vorlauftemperatur der Kühldecke bei Tauwassergefahr reduziert werden. Dies führt zu Überhitzungszuständen und einem Komfortverlust an rd. 4% der Nutzungsstunden.

[L2] Im Mixed-Mode-Betrieb werden die kritischen Stunden der Tauwassergefahr reduziert, da sie meist in der Periode der RLT-Anlagen-Nutzung liegen. Zu diesem Zeitpunkt bleiben die Fenster geschlossen und es muß keine Leistungsreduktion der Kühldecke erfolgen. Allerdings findet nun während der Periode der Fensterlüftung ein intensiverer Luftwechsel statt,

da der notwendige Luftwechsel nun ausschließlich über die Fenster bereitgestellt werden muß. Es kommt häufiger zu kurzzeitig zu kalten oder zu warmen und damit unbehaglichen Raumluftzuständen. An 140 zusätzlich unbehaglichen Stunden wird außerdem die geforderte Luftqualität mit einem CO₂-Gehalt von maximal 1000ppm nicht erreicht.

[L3] Diese Variante mit Fensterlüftung und Raumkühlung wird als frei belüftetes Gebäude mit dem modifizierten PMV-/PPD-Expectancy-Index bewertet. Obwohl Fanger keine Abhängigkeit des Faktors vom Grad der mechanischen Klimatisierung definiert, erscheint es sinnvoll dies in die Bewertung mit einzubeziehen. Anstelle des für die Klimazone maximal möglichen Faktors von 0.7 wird aufgrund der vorhandenen mechanischen Raumkühlung lediglich ein Reduktionsfaktor von 0.8 verwendet. Dies bewirkt eine Reduktion der „herkömmlichen“ ppd-Stunden um 53%.

Tabelle 5: Aufgliederung der unbehaglichen ppd-Werte in die Ursachen

	ppd-Stunden thermisch	ppd-Stunden Taupunkt	ppd-Stunden CO ₂	ppd-Stunden Licht Fassade		ppd-Stunden Licht Kern	
				Blendung	zu wenig Tageslicht	Blendung	zu wenig Tageslicht
VAR [A]	39	-	0	73	10	13	1380
VAR [L1]	39	70	0	73	10	13	1380
VAR [L2]	93	14	140	73	10	13	1380
VAR [L3]	60 (exp)	137	290	73	10	13	1380
VAR [L4]	183 (exp)	-	283	73	10	13	1380
VAR [T1]	294 (exp)	-	151	250	0	25	498
VAR [T2]	484 (exp)	-	0	1032	0	70	298

Bei Fensterlüftung mit Nachtlüftung ohne aktive Kühlung [L4] wird eine höhere Zahl thermisch unbehaglicher Stunden erreicht. Da allerdings keine Taupunktüberwachung erfolgt, verbessert sich die Behaglichkeit gegenüber Variante [L3] sogar geringfügig.

Betrachtet man nicht nur den Komfort, sondern die Energieeffizienz, so wird aus dem BEEP-Diagramm ersichtlich, daß beide Varianten mit natürlicher Lüftung energieeffizienter sind als die Ausgangsvariante mit hohem Klimatisierungsgrad. Allerdings ist zu bedenken, daß für diese Varianten an rund 18% der Nutzungszeit unbehagliche Zustände herrschen. Überraschend ist auch, daß die Low-Tech-Variante (abgesehen von der Notwendigkeit stuerbarer Fenster) geringfügig besser abschneidet als das Mixed-Mode-Konzept.

Gesondert soll die Auswirkung der Beurteilung der Tageslichtsituation durch Integration der Schwellwerte für die Raumbeleuchtungsstärke nach dem UDI-Index in den sog. BEEP (TL)-Index gezeigt werden (vgl. Tabelle 5 und Abbildung 3, orange Punkte). Es erscheint eine Unterteilung in

Raumzonen sind voll, sobald diese sich stark in der Tageslichtperformance unterscheiden. In diesem Fall wird eine Teilung in eine fassadennahe Zone mit 2 Arbeitsplätzen und eine kernnahe Zone mit einem Arbeitsplatz vorgenommen. Für die fassadennahen Arbeitsplätze werden 73 potentiell unbehagliche Stunden durch Blendung ($E > 2500 \text{ lux}$) und 10 Stunden mit zu wenig Tageslicht ($E < 50 \text{ lux}$, an Nutzungsstunden mit Tageshelligkeit) bestimmt. Für die kernnahe Zone sind es 1380h mit $E < 50 \text{ lux}$. Für das BEEP-Diagramm bedeutet dies die Verschiebung der Zustandspunkte entlang der y-Achsen-Richtung hin zu einem Anteil von 22.5% für den Fassadenbereich bzw. 67% unbehaglicher Nutzungsstunden für den Kernbereich.

Die Untersuchungsreihe [T] soll nun Erkenntnisse bringen, wie eine veränderte Tageslichtsituation durch BEEP (TL) bewertet wird (vgl. Abbildung 5). Für Fall [T1] zeigt sich aufgrund des größeren Fensteranteils und der verbesserten Lichttransmission für den Fassadenbereich, daß nun mehr keine Stunden mit einem Tageslichtanteil $< 50 \text{ lux}$ auftreten, dafür jedoch eine hohe Zahl an Stunden mit potentieller Blendungsgefahr. Der Sonnenschutz wird nicht als Blendschutz betrieben wird. Insgesamt wird so eine höhere Zahl unbehaglicher Stunden erreicht. Dies legt nahe, daß in der Simulation auch ein (nutzerbetriebener) Blendschutz betrachtet werden muß und dabei überprüft werden muß, ob er die Beleuchtungsstärke unter den kritischen Schwellwert

von 2500 lux senkt. In weiteren Untersuchungen ist auch zu prüfen, ob dieser Schwellwert geeignet ist, um das Phänomen Blendung zu beurteilen. Für den kernnahen Bereich werden die unbehaglichen Stunden aufgrund des zu geringen Tageslichtanteils stark auf ca. ein Drittel gesenkt. Trotz optimierter Fassade verbleiben für diese tief liegende Zone noch immer 498 Stunden unbehagliche Stunden.

Für den Fall [T3], der ein Sonnenschutzglas ohne Sonnen- und Blendschutz vorsieht, ergeben sich über 1000 unbehagliche Stunden aufgrund Gefahr von Blendung in der Fassadenzone und auch in der Kernzone bereits ein Anteil von 70 Stunden.

DISKUSSION UND AUSBLICK

Die BEEP-Methode ist sehr gut geeignet, die wahre Energieeffizienz als Verhältnis von Nutzen (Raumklima) zu Aufwand (Energieeinsatz) zu bestimmen. Die gezeigten Planungsvarianten haben deutlich gemacht, daß je nach Klima- und Energiekonzept ein deutlich unterschiedliches Raumklima erreicht wird. Nur durch den Bezug des eingesetzten Energiebedarfs auf das erreichte Klima kann gesagt werden, ob es sich um ein energieeffizientes Gebäude handelt oder nicht.

Die BEEP-Methode liefert gute Ergebnisse, wenn das thermische Raumklima und die Luftqualität bewertet werden. Wie gezeigt wurde, ist eine

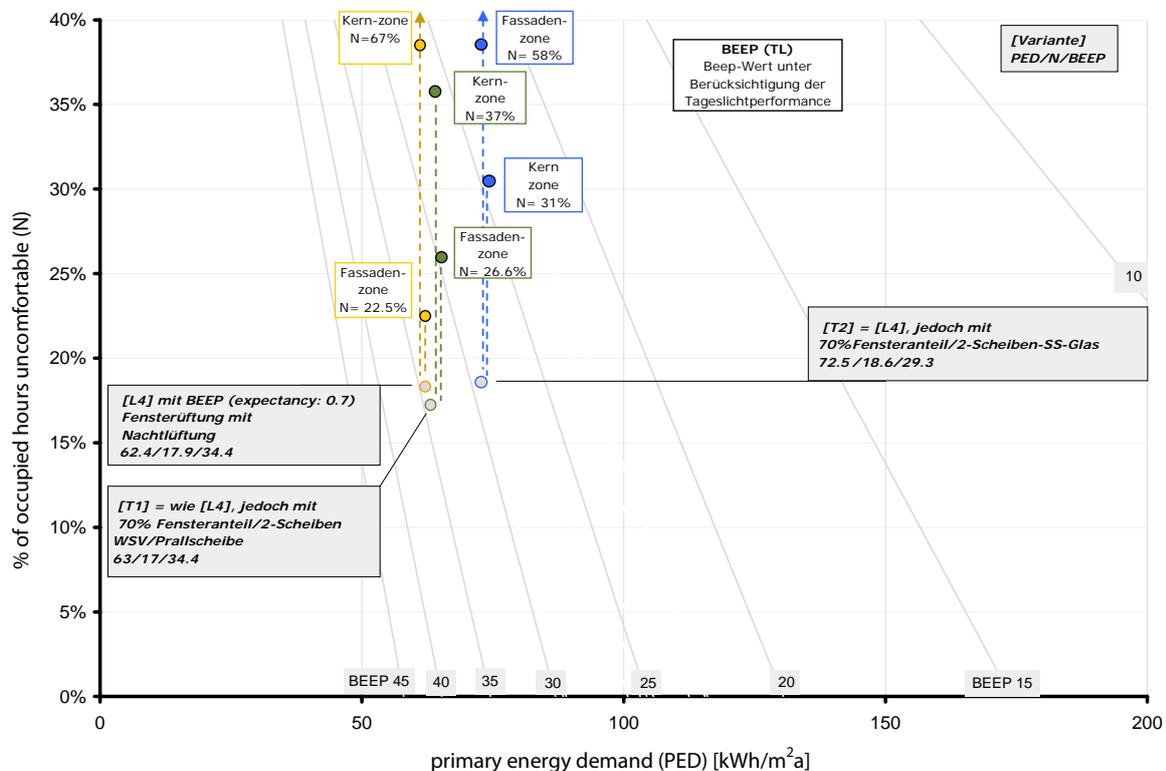


Abbildung 5: BEEP-Diagramm für die Untersuchungsreihe [T] (Tageslicht)

hochauflösende Betrachtung der Dynamik vor allem bei der Bewertung des Raumkomforts nötig. Die Werte wurden auf Basis einer 10-Minuten-Auswertung gewonnen, Stundendaten zeigen bereits zu geringe Aussagekraft.

Den zugrunde gelegten Nutzerprofilen kommt eine große Bedeutung zu. Sie müssen deshalb in der Zukunft noch näher spezifiziert werden, eventuell mit der Unterscheidung eines trägen und intensiven Nutzerverhaltens. Es ist auch zu klären, ob kurzzeitige, dynamische Überschreitungen genauso relevant für den Komfort sind wie längerfristige, so könnte z.B. die Fensterlüftung, die kurzzeitig zu kalte oder warme Raumluftzustände verursachen kann, auch als belebend gewertet werden.

Für frei belüftete und mit weitgehend natürlichen Konzepten betriebene Gebäude ist zu klären, ob die Bewertung mit dem durch einen expectancy-Faktor abgeänderten PMV-/PPD-Index die geeignete ist. Hier gibt es bereits mehrere weitere Ansätze, die zu überprüfen sind (DeDear R. et al., 1998). Dabei wäre es wünschenswert, wenn der Grad einer mechanischen Konditionierung berücksichtigt wird.

Die hier als Experiment eingesetzte Methode des UDI (Useful Daylight Illuminance) gibt zwar eine Information über einen Ausschnitt des visuellen Raumklimas, nämlich über Stunden mit wenig Tageslichtanteil <50lux und Stunden mit einem sehr hohen Anteil, der potentiell zu Blendung führen könnte. Ob bzw. welcher Anteil dieser Stunden wirklich als unbehaglich bezeichnet werden kann, muß noch geklärt werden. Eventuell ist neben dem „harten“ Indikator Unbehaglichkeit ein weiterer Index in die BEEB-Bewertung zu integrieren, der z.B. die Stunden einer UDI-Bewertung auf eine andere Art, wie z.B. als Stunden mit ungenügender Tageslichtperformance, beurteilt. Dann eben sollten weitere Gesichtspunkte des visuellen Komforts, wie die Möglichkeit eines Ausblicks oder die Gleichmäßigkeit einer Beleuchtung in Zukunft berücksichtigt werden.

LITERATUR

Cody B. 2008. Entwicklung einer Methode zum Vergleich der tatsächlichen Energieeffizienz von Gebäuden, in: HLH Bd. 59 (2008) Nr. 1

DeDear R. et al. 1998. Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference, ASHRAE Transactions 1998, Vol. 104, Part 1

EU-Richtlinie 2002/91/EG. 2002. EU-Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, erlassen vom europäischen Parlament und dem Rat der Europäischen Union

Fanger, P.O. 1970. Thermal Comfort. Analysis and applications in environmental engineering, Copenhagen

Fanger P.O. et al. 2002. Extension of the PMV-model to non-air-conditioned buildings in warm climates, Energy and Buildings 34, S.533-536

Galasiu, A. et al. 2006. Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylight offices: a literature review

Gossauer, E. 2006. Nutzerzufriedenheit und Komfort am Arbeitsplatz – Ergebnisse einer Feldstudie in Bürogebäuden, in: Bauphysik 30, Heft 6

Hauser G. 2008. Energieeffizientes Bauen – Umsetzungsstrategien und Perspektiven, in: Energieeffizientes und solares Bauen, Jahrestagung des Forschungsverbands Erneuerbare Energien, Berlin

Heerwagen J.H. et al. 1986. Lighting and psychological comfort, in: Lighting Design and Application 16 (4) S. 47-51

Hellwig R. 2005. Thermische Behaglichkeit. Unterschiede zwischen frei und mechanisch belüfteten Gebäuden aus Nutzersicht. Dissertation. München

Iftikhar A., 2001. Thermal comfort: use of controls in naturally ventilated buildings, in: Energy and Buildings 33, S.235 -244

Mardaljevic et al. Climate-Based Daylight Analysis For Residential Buildings, Internet-Dokument, Institute Of Energy And Sustainable Development

Mardaljevic J. 2006 et al. Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors, Energy And Buildings (38) S. 905 - 913

ÖNORM EN ISO 7730. 2006. Ergonomie der thermischen Umgebung, Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit

AN APPLICATION OF BUILDING SIMULATION TECHNIQUES TO THE ASSESSMENT OF NATURAL VENTILATION IN OFFICE WITH DOUBLE SKIN FACADE

Milan Janak, Katarina Moravcikova
 Slovak University of Technology, Civil Engineering Faculty, Department of Building
 Constructions, Bratislava, Slovakia

ABSTRACT

In our paper we describe an application of the building simulation techniques to the assessment of an energy, thermal comfort and natural ventilation effectiveness in the office with a double skin facade.

Two distinct building simulation techniques are applied. Firstly, it is a Computational Fluid Dynamics (CFD) technique to assess wind effects on a building facade and to carry out detailed simulation of natural ventilation of an office.

Secondly, it is a dynamic building energy simulation coupled with an air flow network model to predict annual performance related to the energy, thermal comfort and natural ventilation.

Results of this application simulation study clearly show that a particular design of a double skin facade has a significant negative effect on natural ventilation when compared to the typical operable window. On the other hand results show that with the aid of simulation approach it is possible to identify a construction measures to optimise facade performance.

KEYWORDS

Simulation application, double skin facade, natural ventilation, energy simulation, CFD simulation

INTRODUCTION

Despite of many known positive effects of double skin facade constructions on energy efficiency and thermal comfort (Oesterle et. al. 2001), the effect on the room natural ventilation is usually negative. The reason for this is that double skin facade construction represents increased air flow resistance, increased air temperature and more importantly in some cases an unwanted mixing of an ambient fresh air with used room air.

Two distinct building simulation techniques are applied in this application study. Firstly, it is a Computational Fluid Dynamics (CFD) technique to assess wind effects on building facade as a main driving force to the natural ventilation and to carry out detailed simulation of natural ventilation of an office via double skin facade with main focus on predicting CO₂ concentrations, mean age of air and an overall air exchange number.

Secondly, it is a dynamic building energy simulation coupled with an air flow network model to predict annual statistics of natural ventilation effectiveness such as time distribution of CO₂ concentrations and thermal comfort parameter such as time distribution of the operative room temperatures.

An application of these simulation techniques is demonstrated on a case study project of a retrofit of northeast and southwest facade. The case study building is a high rise (22 floors) office building in the centre of Bratislava, Slovakia (see figure 1).

The main focus of an analysis is given on the southwest naturally cross ventilated double skin element facade (see figure 2 and figure 3).



Figure 1 Building of Faculty of Civil Engineering STU Bratislava with new facade in construction progress (May 2010)



Figure 2 New double skin facade – interior view

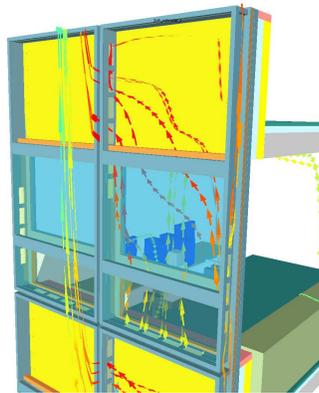


Figure 3 Visualisation of the double skin façade ventilation pattern

The aims that have been set out for the simulation were to predict the façade performance related to the expected heating demand reduction, reduction of the summer overheating potential and the effect on natural ventilation via new proposed double skin façade.

WIND STUDY

Wind pressure coefficients C_p (-) are used to determine wind induced boundary condition on a building façade as a main driving force for a natural ventilation in a windy location as Bratislava, Slovakia. In this study a computational wind engineering method (Blocken et. al. 2009) was applied to determine a database of wind pressure coefficients for both northeast and southwest façades as a function of wind directions.

CFD program Phoenics – Flair 2009 (Phoenics 2009) has been used for this task. A digital 3D model of Bratislava city has been used to setup a computational domain for a wind study (see figure 4). Logarithmic wind profile with an effective terrain roughness $z_0 = 1$ m has been used together with a standard $k - \epsilon$ turbulence model (Versteeg 1995). Resulting pressures at the building façades (see figure 5) have been processed in order to derive a set of C_p coefficients.

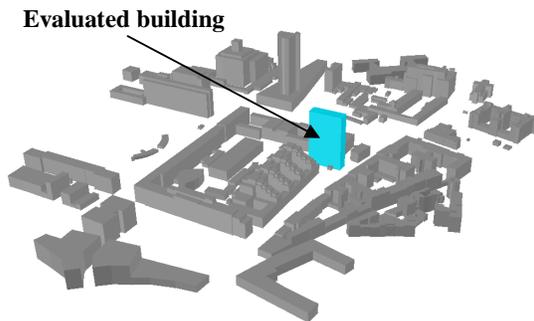


Figure 4 3D model for CFD wind study

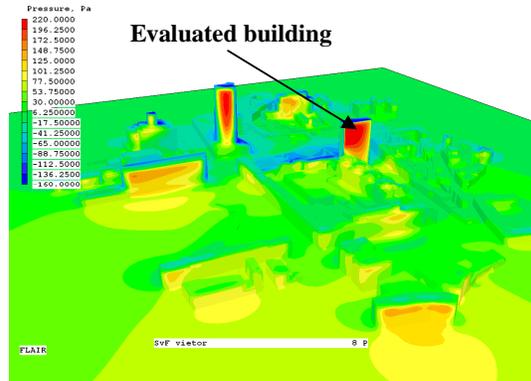


Figure 5 Predicted building façade pressure field

Figure 6 shows an example of the predicted sets of C_p coefficients.

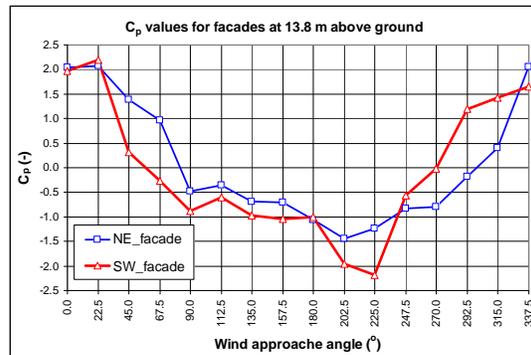


Figure 6 Predicted wind pressure coefficients

ENERGY SIMULATION

The main aim of the study was to determine the proposed façade retrofit performance related to the reduction of heating demand, summer overheating and natural ventilation effectiveness.

A method of building energy simulation coupled with a mass flow network (Clarke 2001, Hensen 2002) has been selected for an analysis because of its ability to simulate an annual dynamic performance of the analysed system of climate – building/façade – natural ventilation – thermal comfort – indoor air quality.

Two building energy simulation models in program ESP-r (Clarke 2001) has been set up. A base case model that represents an existing poorly performing building façade (see figure 7) and a new case that represents proposed façade retrofit with the double skin façade at southwest façade and a typical façade design with internal shading on northeast façade (see figure 8) have been constructed. A new case has been modelled in two alternatives – alternative 1 northeast façade with insulation triple glazing unit and

alternative 2 northeast façade with insulation double glazing unit.

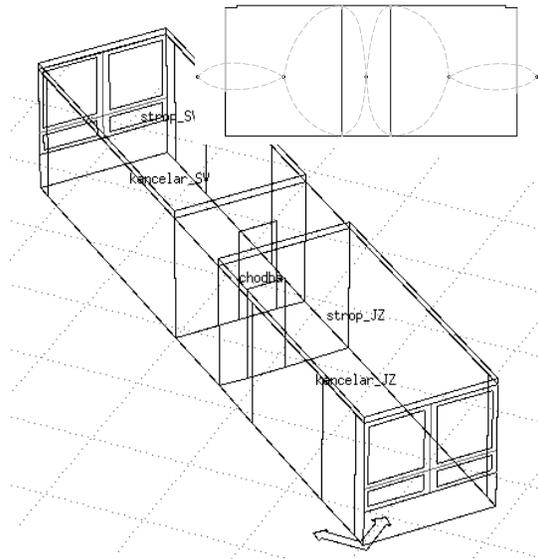


Figure 7 Energy simulation model with mass flow network of the existing façade

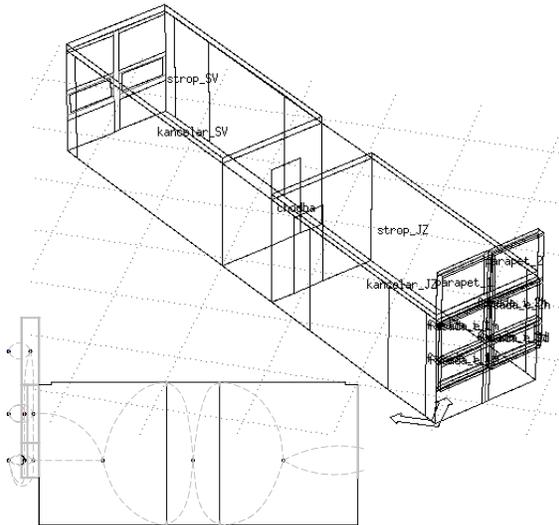


Figure 8 Energy simulation model with mass flow network of the new façade

The main model operational and control parameters has been set as follows:

- Typical office schedule based on two person per office emission of heat and CO₂
- Solar blind control based on incident solar irradiance on the façade plane over 100 W/m².

- Natural ventilation window opening based on CO₂ concentration over 1.5 g/kg

The main simulation results from an annual runs are summarised on figure 9 to figure 11. Comparison of predicted heating demand (see figure 9) shows a significant theoretical heating energy saving potential of 70 % to 80 % that could be attributed mainly to the very poor insulation and air permeability performance of an existing old façade together with inadequate heating system zoning and control.

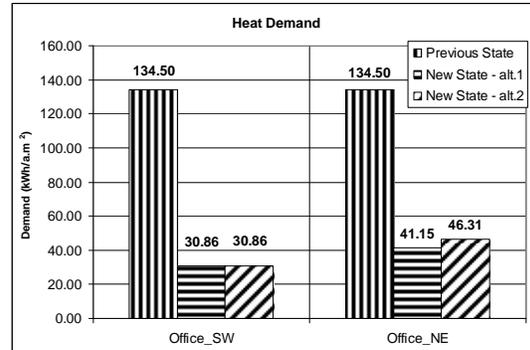


Figure 9 Comparison of an annual heating demand

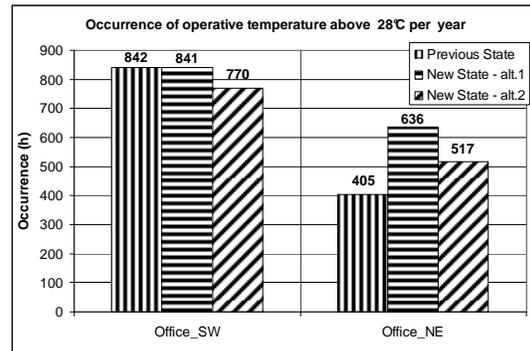


Figure 10 Comparison of an occurrence of operative temperature above 28 °C.

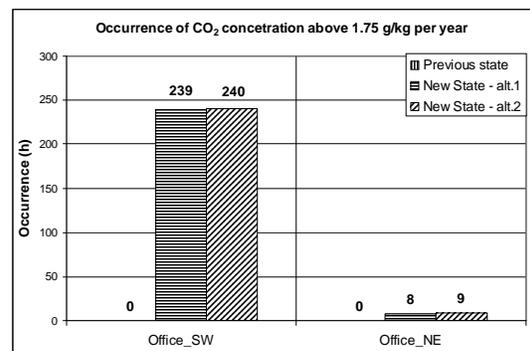


Figure 11 Comparison of an occurrence of CO₂ concentration above 1.75 g/kg.

In order to realise this predicted theoretical heating energy saving potential the most important factor will be an ability of the existing heating system zoning and control to adjust to the new heating load requirements after façade retrofit. The failure to do so could result in building overheating even in winter and in reduction of heating energy saving potential.

Figure 10 shows an annual statistics of an operative temperature over 28 °C occurrence that we used as an indication for the office overheating. Two trends are visible from the results.

For the northeast office there is predicted a clear trend towards increased overheating by more than 200 hours with triple glazing unit and by over 100 hours with double glazing unit. This tendency is a result of a dramatic improvement in thermal insulation and air permeability performance of the new façade that helps to retain heat in the building.

For the southwest office with the double skin facade there is predicted almost no change in overheating potential if triple glazing unit is used in the northeast office. However if double glazing unit is used in the northeast office there is predicted a slight decrease by 70 hours of an overheating potential.

Figure 11 shows an annual statistics of an occurrence of CO₂ concentration over 1.75 g/kg that we have considered as border line between ideally and marginally ventilated room (see table 1). The effect of decreasing natural ventilation via double skin façade in the southwest office is clearly visible. On the other hand predicted around 240 hours with marginal natural ventilation represents about 10 % of a working hours and can be attributed to the situations with no or low wind velocities and small temperature differences between ambient and the office.

Table 1
 CO₂ concentration limits as indicator of room ventilation (Sand 2004)

Ventilation	Concentration CO ₂ (ppm)	Concentration CO ₂ (g/kg)	Air Rate
Exterior	400 - 600	0,6 - 0,9	-
Overventilated	600 - 800	0,9 - 1,2	25-30 clm/p
Ideal	800 - 1200	1,2 - 1,8	15 - 20 clm/p
Marginal	1200 - 1400	1,8 - 2,1	10 clm/p
Underventilated	1400 - 1800	2,1 - 2,7	
Poor	1800 - 2000	2,7 - 3,0	8 clm/ p
Very poor	2000 - 2200	3,0 - 3,3	6 clm/ p
Unacceptable	> 2200	> 3,3	5 clm/ p

CFD METHOD

In order to further investigate in more details a mechanism of a natural ventilation via the double skin façade a CFD simulation under adverse

boundary conditions (no wind, small temperature difference) has been carried out with aim to optimise natural ventilation.

Stable state CFD simulation have been carried out on the model of the southwest office with corresponding double skin façade modules to preserve principal flow patterns in the façade (see figure 12 and figure 13)

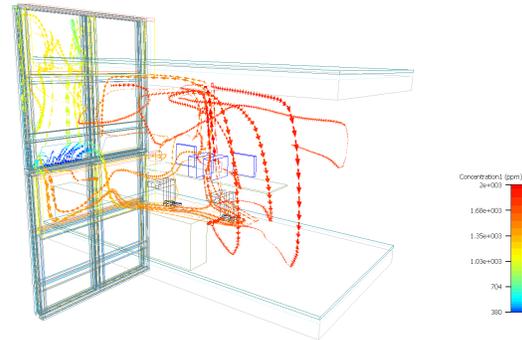


Figure 12 Visualisation of natural ventilation flow pattern with only low windows opened

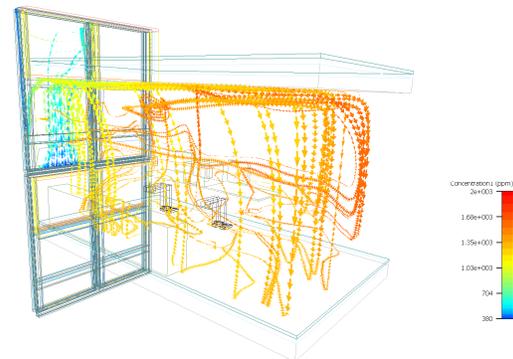


Figure 13 Visualisation of natural ventilation flow pattern with low and upper windows opened

The number of alternatives of lower and upper ventilation window opening have been simulated:

- Alternative 1: only lower windows (figure 14) - with solar irradiance
- Alternative 2: only lower windows (figure 14) - without solar irradiance
- Alternative 3: lower and upper windows (figure 15) - without solar irradiance
- Alternative 4: lower and upper windows (figure 15) - with solar irradiance
- Alternative 5: lower and one upper windows (figure 16) - without solar irradiance
- Alternative 6: lower and one upper windows (figure 16) - with solar irradiance

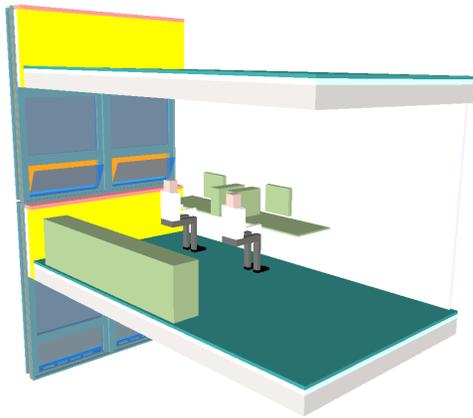


Figure 14 CFD model with lower window opening

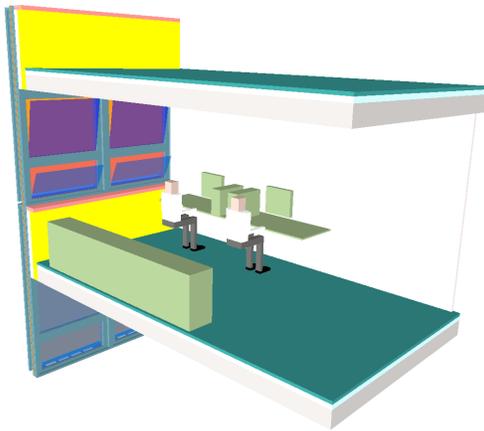


Figure 15 CFD model with lower and upper window opening

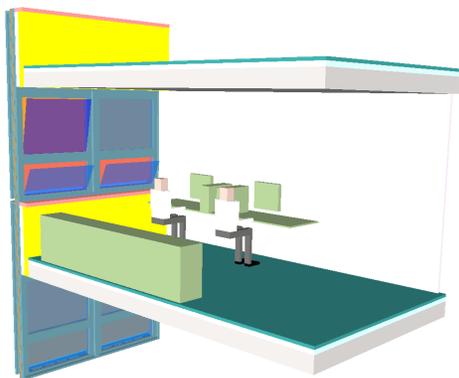


Figure 16 CFD model with lower and only one upper window opening

In order to simulate two distinct ventilation patterns we have used the boundary conditions with no solar irradiance (façade gap air temperature lower than

office temperature) and boundary condition with solar irradiance (façade gap air temperature above office temperature). Otherwise all boundary conditions were set to 20 °C and only a heat source from two occupants was considered. These boundary conditions have resulted in a small temperature difference up to 2 K between ambient and office that represents very small driving forces for the natural ventilation.

The results from CFD analysis of the natural ventilation of the office via the double skin facade are summarised in table 2. Table 2 shows predicted air flow rates, air exchange number and CO₂ concentration at the level of occupant head.

Table 2
CFD summary results for office ventilation

Alternative	Air flow rate	Air flow rate	Air exchange number	CO ₂ Concentration
	(m ³ /h)	(m ³ /h.person)	(1/h)	(ppm)
1	33,74	16,87	0,78	1650
2	57,26	28,63	1,325	2900
3	102,0	51,0	2,36	1350
4	158,55	79,275	3,67	1400
5	66,98	33,49	1,55	1750
6	120,1	60,05	2,78	1920

Based on the results from table 2 an important design conclusion related to the ventilation window opening has been made. It was demonstrated that to achieve at least marginal ventilation under adverse boundary conditions it is necessary to open both windows lower and upper ones at the given opening angle.

CONCLUSION

Results of this application simulation study clearly show that a particular design of a double skin façade has a significant negative effect on natural ventilation when compared to the typical operable window ventilation. On the other hand simulation results also show that this negative effect is limited only to the relatively small number of working hours mainly connected with no or low wind velocity and small temperature differences between ambient and the office.

An application of simulation techniques also helped to optimise double skin façade ventilation openings sizing and positioning and to find an optimal office window opening strategy to achieve at least marginal natural ventilation effectiveness even under boundary conditions with very small driving force.

The most interesting research observation from this application study is the fact that natural ventilation assessment based on typical parameter of an office air exchange number could lead to the erroneous conclusions. The main reason for this is a presence of very strong mixing effect of an ambient fresh air and

polluted room air in the double skin façade that is being re-circulated to the ventilated room.

The facade retrofit is currently (May 2010) under a construction and therefore no site experimental measurements could be presented in this paper. However authors are already planning ahead the experimental measurements of the double skin facade thermal and ventilation performance that will be confronted with the theoretical results from building simulations.

ACKNOWLEDGEMENT

Work on this paper has been supported by APVV-0204-07 and VEGA No. 1/9647/09.

REFERENCES

- Clarke J. A. Energy Simulation in Building Design 2nd ed. Oxford (UK): Butterworth-Heinemann, 2001.
- Versteeg H. K., Malalasekera W.: An introduction Instruction to computational fluid dynamics. The finite volume method. Longman Group Ltd 1995
- Sand James R., Demand – Controlled Ventilation Using CO₂ Sensors. U.S. Department of Energy Efficiency and Renewable Energy, by Oak Ridge National Laboratory. Washington D.C. 2004.
- Oesterle E., Lieb R-D., Lutz M., Heusler W. 2001. Double Skin Facades – Integrated Planning. Prestel Verlag: Munich, Germany 2001
- Hensen, J.L.M., Bartak, M., & Drkal, F. 2002. *Modeling and simulation of double-skin facade systems*. ASHRAE Transactions, vol. 108:2, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Atlanta 2002, GA.
- Blocken B., Stathopoulos T., Carmeliet J., Hensen J., 2009. Application of CFD in building performance simulations for outdoor environment. Eleventh International IBPSA conference 2009, Glasgow, Scotland.

Phoenix: <http://www.phoenix.co.uk/>

ESP-r 11.4: <http://esru.strath.ac.uk/>

SIMULATION-ASSISTED SPACE COOLING IN EXISTING BUILDINGS: A CASE STUDY

Claus Pröglhöf, Matthias Schuss, Kristina Orehounig, and Ardeshir Mahdavi
 Department of Building Physics and Building Ecology, Vienna University of Technology,
 Karlsplatz 13, 1040 Wien, Vienna, Austria.

ABSTRACT

The implementation of predictive control approach for passive cooling in an existing, heritage protected office building is described. Thereby, control options (alternative positions of windows, shades, etc.) are proactively simulated (using weather forecast data for the next 24 hours) and evaluated to identify the option with the most desirable performance.

INTRODUCTION

The combination of relatively low energy prices, increasing user demands and low costs for active cooling devices led to spread of energy-intensive mechanical systems for space cooling technologies particularly in areas with moderate climate. However, recent ecological and economical developments (e.g., climate change, urban heat island effect, energy prices) have brought about, amongst other things, a renewed interest in energy-efficient alternative for building controls. The intelligent use of passive cooling methods combined with innovative materials as well as advance sensory and actuating components and building control has the potential to significantly decrease the energy consumption for space cooling (Lomas 2006). Instances of this approach have been implemented in new build structures in the last years in different climate zones (e.g. Krausse et al. 2007; Salmeron et al. 2009).

The usage of natural ventilation in buildings has a long history. Many recently constructed buildings focus on the use of natural ventilation (e.g.: San Francisco Federal Building by Morphosis; Garça et al. 2003). The principle possibility to combine natural ventilation and building controls in existing buildings was presented in previous publications (Mahdavi & Pröglhöf 2004, 2005, and 2006; Mahdavi 2008).

The present contribution focuses on the integration of a novel predictive control approach (Mahdavi et al. 2009) using passive cooling technologies in an existing office building. The objective is to provide appropriate indoor conditions while operating in a sustainable manner. For implementation an existing heritage-protected university building in Vienna,

Austria, was chosen (Pröglhöf et al. 2010). The following measures were considered: i) natural (mostly night-time) ventilation using windows equipped with software-controlled actuators, ii) solar control via shading devices equipped with actuators, iii) thermal mass, iv) phase change materials (PCMs), and v) ceiling fans. These measures were integrated within a novel systems control context that deploys a predictive (simulation-assisted) strategy.

METHODS

Three similar south oriented offices in a building of our university campus were selected (Figure 1) for our study. The building with its walls out of brick and wooden ceilings is typical for Vienna and its heritage protected structures. The selected rooms are referred to as R1, R2 and R3. R1 was left untouched and used as reference room. The room is equipped with manual internal, low quality venetian blinds. The users can open the windows manually. In R2 and R3 the existing windows have been partly motorized. R2 was equipped with automated internal venetian blinds and R3 with automated external venetian blinds (Figure 2). In R3 PCMs and a ceiling fan were installed in addition (Figure 3).

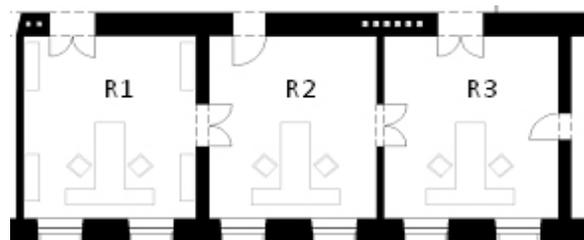


Figure 1 Floor plan of the three offices



Figure 2 Windows and shades of R3



Figure 3 Ceiling fan and suspended ceiling with PCM in R3

Additionally sensors were installed to measure indoor and outdoor environmental data. Outdoor environmental data is collected by sensors mounted at the façade (air temperature, relative humidity, wind speed, and precipitation) in front of the offices. Additional data is collected by a weather station on the rooftop (global horizontal radiation, and diffuse horizontal radiation). All rooms were equipped with sensors for measuring air, globe, and surface temperature, humidity, illuminance at the ceiling and at the workplace, CO₂, and flow velocity. Occupancy, shade position and door/window status were also monitored (Figure 4). R2 and R3 are run by a novel, predictive building control system, which controls the building based on weather forecast and thermal simulation. The users can overrule the control system using a graphical user interface (GUI) and directly control windows, shades and the ceiling fan (Figure 5).



Figure 4 Workplaces in R2 with motorized window, internal venetian blinds and sensors

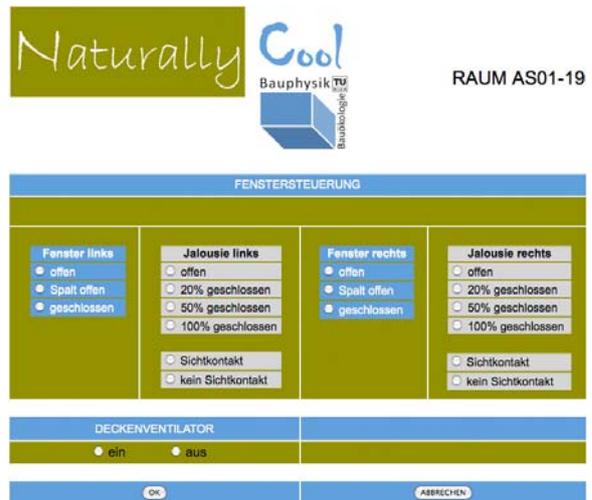


Figure 5 Graphical user interface for R3

The user interface was implemented in the programming language PHP to reach platform independence. The room controller handles all actors, conventional building sensors as well as high accuracy measurement equipment. The communication is realized via Ethernet/IP.

The novel idea is not to react to sensor data in a control loop, but to simulate the building performance using weather forecast and control scenarios to determine the most favorable scenario and run the building in this mode in the next control loop. Figure 6 depicts the data flow of the predictive control scheme.

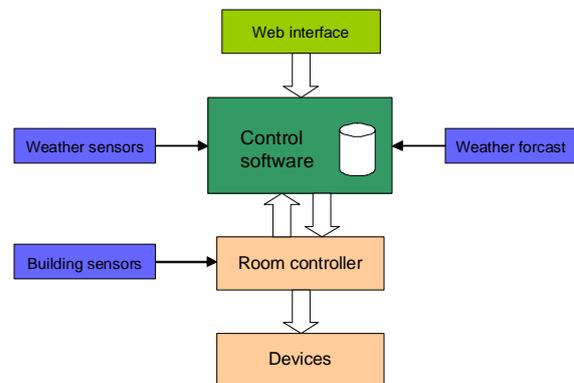


Figure 6 Dataflow diagram for the predictive control scheme

First an exploratory test was conducted in two rooms using fixed control rules (instead of simulations) to learn how the building reacts and how the three differently equipped rooms perform. In this phase the windows opened fully when the indoor air temperature θ_i was higher than the outdoor air temperature θ_{out} , under the condition that the indoor air temperature θ_i was >20 °C. The shades were deployed 80% when a certain vertical illuminance level (5000 lx) was reached at the façade. Based on

these experiences the simulation model could be calibrated to a satisfying level as exemplarily shown in Figure 7, where the simulated indoor air temperature $\theta_{i,sim}$ for R3 is compared with the measurements.

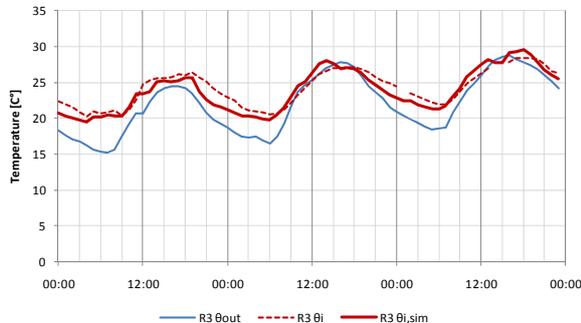


Figure 7 Comparison of the predictions of the calibrated simulation application for R3 over the period of three days in August 2009 with corresponding measurements

In a next phase the predictive control (Mahdavi et al. 2009) was implemented. Thereby, two sets of tests were performed as follows:

Predictive control I. Based on weather forecast data, various alternative control scenarios are computed using the above mentioned simulation model (Orehounig et al. 2010). The simulation results are then used to rank these alternative control scenarios for window and blind operation are ranked according to the simulation results. The best performing control scenario is selected as the preferable control strategy for the next control period (24 hours).

As benchmark indicator the mean overheating OH_m of the indoor air temperature during working hours (8:00-18:00) was established (Equation 1). The hourly indoor air temperature θ_i (in °C) subtracted by the reference indoor air temperature θ_r (=26°C) divided by the number of considered hours ($n=10$) is summed up for one day. The term $\theta_i - \theta_r$ in Equation 1 is considered for those hours when $\theta_i > \theta_r$, otherwise the term is set zero.

$$OH_m = \sum_{j=1}^n \frac{\theta_{i,j} - \theta_r}{n} \quad (1)$$

As simulation tool EDSL Tas (EDSL 2008) was used to simulate the various alternative scenarios every twentyfour hours. The above described method was first tested in the summer of 2009.

Predictive control II. A second test of the approach was conducted in June 2010. Thereby, a different simulation engine was adopted (HAMBBase, van Schijndel 2007) and integrated in a MatLab-routine. A genetic algorithm is used to generate best performing control scenarios based on simulation

results. This scenarios are evolved every hour. The method uses extrem (e.g. all windows open; shades fully deployed) and randomly chosen initial settings for all actuators, as the starting point toward computing internal conditions for the next 24 hours. The genetic algorithm uses the results to optimize the scenarios (Schuss et al. 2010).

Parallel to system operation, users in the offices were interviewed to obtain their evaluations of the indoor conditions and the operation of the systems.

RESULTS AND DISCUSSION

Exploratory test results

Results of the first exploratory test are shown in the next figures. Figure 8 shows the resulting indoor air temperatures θ_i in all three offices, together with the outdoor air temperature θ_{out} . While the outdoor air temperature increases day by day, R3 (best equipped) tends to resist the overheating better than R2 (less equipped), followed by R1 (reference room).

The average surface temperature of the rooms $\theta_{s,room}$ are compared in Figure 9. The surface temperatures for the rooms and the PCMs is measured at three different points and averaged. Again the performance of R3 leads to cooler temperatures than in the other two rooms. In terms of room surface temperatures R1 performed better than R2.

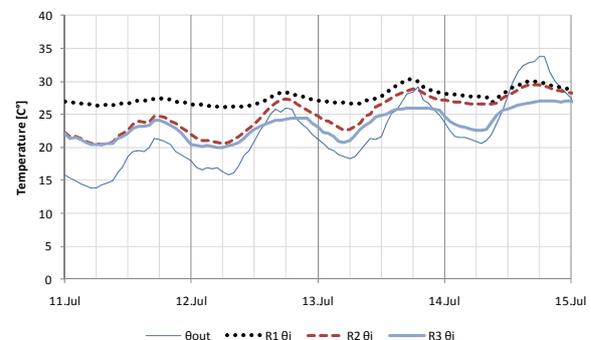


Figure 8 Comparison of the indoor air temperatures θ_i in the three office rooms (R1-3)

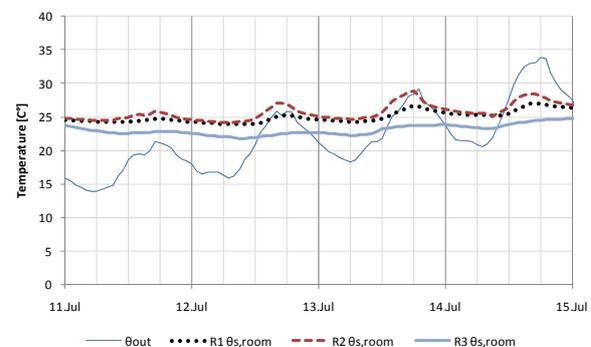


Figure 9 Comparison of the average surface temperatures ($\theta_{s,room}$) in the three office rooms

The development of indoor air (θ_i), averaged room surface ($\theta_{s,room}$) and averaged PCM surface temperatures ($\theta_{s,pcm}$) in R1 over the mentioned three day period of increasing outdoor air temperature are shown in Figure 10.

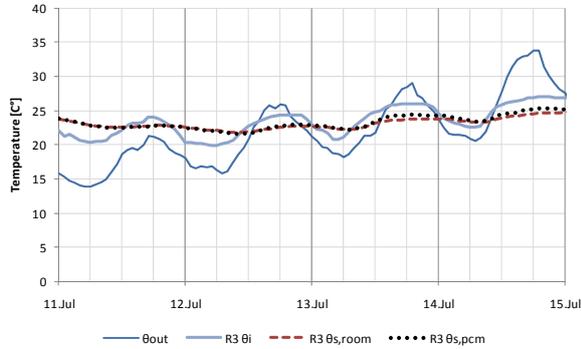


Figure 10 Development of outdoor and indoor temperatures in R3 over a three day period of increasing external temperature

Predictive control I

The weather forecast for the outdoor air temperature $\theta_{out,forecast}$, basis for the predictive control approach, is exemplarily shown in Figure 11 and compared with the measured outdoor air temperatures θ_{out} over a period of three days. To get these predictions, web based services are used. This is the reason why there is a difference between the measured value and the starting value of the prediction at 18:00. Although the prediction is renewed every 24 hours at 18:00 the forecast shows no obvious jumps between the single days.

To illustrate the operation of the system, we focus here on four scenarios (amongst the set of scenarios considered) with different schedules for window position and shade deployment. These scenarios are described in Table 1 (Orehounig et al. 2010). Thereby, "0" denotes window closed or shade not deployed, whereas 1 denotes window/shade fully open/deployed. Figure 12 shows, for these scenarios, the predicted indoor temperatures in R3.

The scenario showing the least mean overheating OH_m of the indoor air temperature during working hours was then chosen. The indoor air temperatures, resulting out of the predictive control strategy, are presented in Figure 13 for all three offices over a period of one week. The effect of natural ventilation during the night time can be seen in the performance of the indoor air temperature in R2 and R3. In questionnaires, users in R2 and R3 assessed the air temperature in the offices in times with predictive control cooler than without. Nighttime ventilation as well as the additional shading devices, and the possibility to control the devices with the GUI were explicitly rated positive.

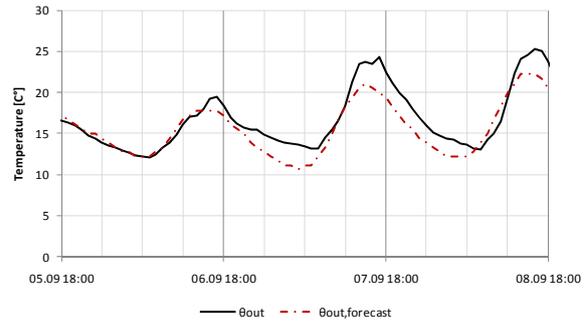


Figure 11 Comparison of the daily 24 hour outdoor air temperature forecast with the measured outdoor air temperature values

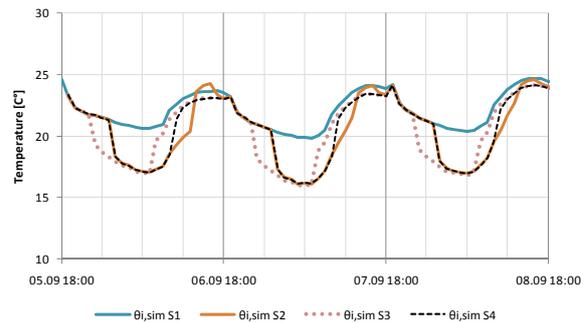


Figure 12 Simulation results of four control scenarios for indoor air temperature ($\theta_{i,sim}$) in R3

Table 1

Illustrative alternative control scenarios (s1 to s4)

hour	S1		S2		S3		S4	
	w	sh	w	sh	w	sh	w	sh
19:00	0.4	0.8	0.4	0.8	0.4	0.8	0.4	0.8
20:00	0.4	0.8	0.4	0.8	0.4	0.8	0.4	0.8
21:00	0.4	0	0.4	0	0.4	0	0.4	0
22:00	0.4	0	0.4	0	1	0	0.4	0
23:00	0.4	0	0.4	0	1	0	0.4	0
00:00	0.4	0	0.4	0	1	0	0.4	0
01:00	0.4	0	1	0	1	0	1	0
02:00	0.4	0	1	0	1	0	1	0
03:00	0.4	0	1	0	1	0	1	0
04:00	0.4	0	1	0	1	0	1	0
05:00	0.4	0	1	0	1	0	1	0
06:00	0.4	0	1	0	1	0	1	0
07:00	0.4	0	1	0	0.4	0	1	0
08:00	0.4	0	1	0	0.4	0	1	0
09:00	0.4	0	1	0	0.4	0	1	0
10:00	0.4	0.8	1	0	0.4	0.8	0.4	0.8
11:00	0.4	0.8	1	0	0.4	0.8	0.4	0.8
12:00	0.4	0.8	1	0	0.4	0.8	0.4	0.8
13:00	0.4	0.8	0	0.8	0.4	0.8	0.4	0.8
14:00	0.4	0.8	0	0.8	0.4	0.8	0.4	0.8
15:00	0.4	0.8	0	0.8	0.4	0.8	0.4	0.8
16:00	0.4	0.8	0.4	0.8	0.4	0.8	0.4	0.8
17:00	0.4	0.8	0.4	0.8	0.4	0.8	0.4	0.8
18:00	0.4	0.8	0.4	0.8	0.4	0.8	0.4	0.8

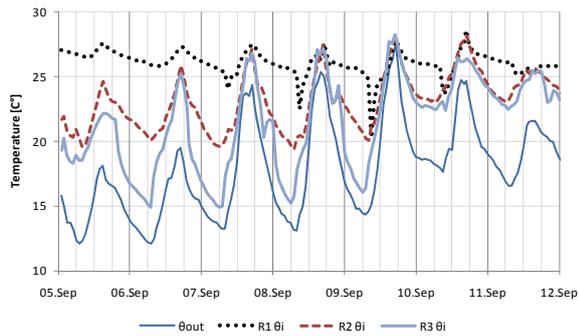


Figure 13 Performance of air temperatures θ_i as result of predictive control in all three offices over the period of one week

Predictive control II

Figure 14 shows the simulated inoor air temperature ($\theta_{i,sim}$) for R3 and all scenarios for the next 24 hours. Hour 0 corresponds to the time when simulations were executed (in this case, at 20:00). The best performing scenario is plotted black and the related window and shade position is highlighted.

Figures 15 and 16 show the temperature ($\theta_{i,sim}$) for R3 one and two hour later respectively. Again the results of all scenarios for the next 24 hours (calculated at 21:00 = 0 hours and 22:00 = 0 hours). As input for this prediction the history of the measured values (last 24 hours) for outdoor air temperature θ_{out} and indoor air temperature θ_i is used (left part of the graphs).

These three Figures show, that the best performing scenario is recomputed on an hourly basis.

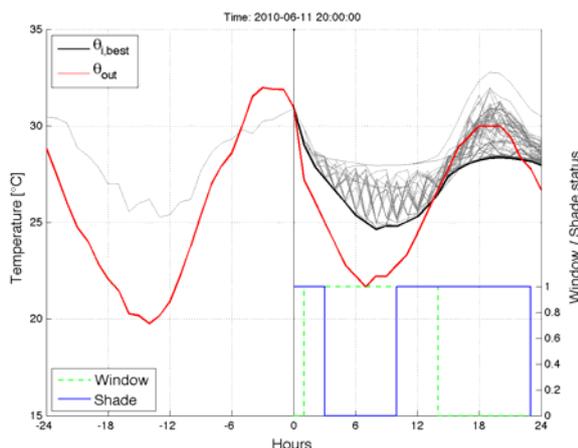


Figure 14 Temperature for R3 ($\theta_{i,sim}$), simulations conducted at 20:00

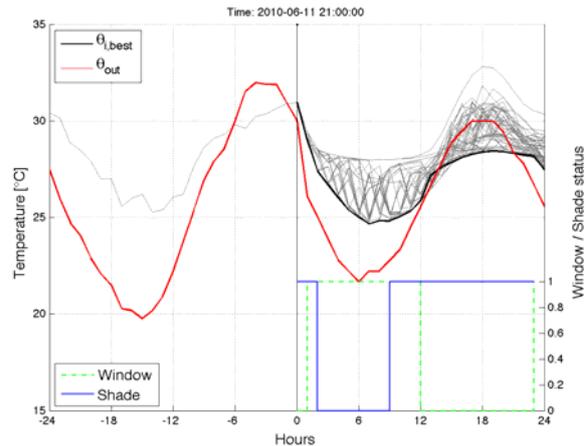


Figure 15 Temperature for R3 ($\theta_{i,sim}$), simulations conducted at 21:00

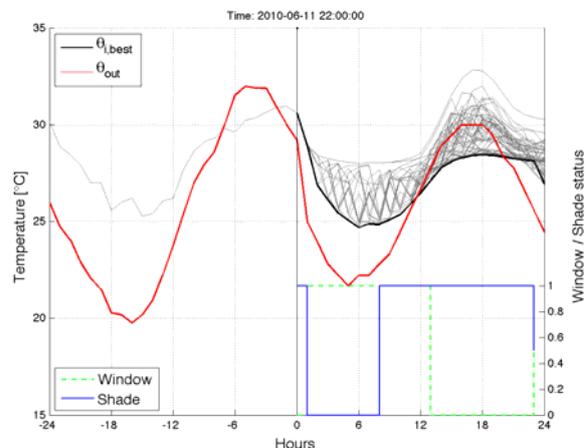


Figure 16 Temperature for R3 ($\theta_{i,sim}$), simulations conducted at 22:00

CONCLUSION

The implementation of the predictive control started in 2009 and was reintiated for the summer of 2010. Results to date are promising, in the sense that the feasibility of the approach is clearly demonstrated. Given reliable simulation models (with calibrated input assumptions and boundary conditions), the approach reliably identifies preferable control options. Ongoing research addresses, amongst other issues, users' impact on the system's performance, particularly whenever users have the opportunity – as they should – to overrule systems settings and recommendations.

ACKNOWLEDGEMENT

The research presented in this paper is supported in part by a fund from FFG "Naturally Cool" (Project-Nr: 817575) and supported by the K-Project "Multifunctional Plug & Play Façade" (Project-Nr: 815075) and the "Hans Höllwart – Forschungszentrum für integrales Bauwesen AG" (CEO, Mario J.Müller). The Vienna University of Technology,

Division Gebäude und Technik (Amtsdir. Hodecek) provided additional support.

REFERENCES

- EDSL, 2008. A-TAS Version 8.5, Environmental Design Solutions Limited, www.edsl.net.
- Garça, G.C., Linden, P.F., McConahey, E., Haves, P. 2003. Design and testing of a control strategy for a large, naturally ventilated office building, Proceedings of the 8th International IBPSA Conference, Building Simulation 2003, Augenbroe, G., Hensen, J. (eds.), Volume 1, Eindhoven, Netherlands, pp. 399 - 406.
- Krause, B., Cook, M.J., Lomas, K.J. 2007. Environmental performance of a naturally ventilated city centre library, Energy and Buildings, Todorovic B., Meier A.K. (eds.), Elsevier, Volume 39, Issue 7, pp. 792 - 801.
- Lomas, K.J. 2006. Architectural design of an advanced naturally ventilated building form, Energy and Buildings, Todorovic B., Meier A.K. (eds.), Elsevier, Volume 39, Issue 2, pp. 166 - 181.
- Mahdavi, A., Pröglhöf, C. 2004. Natural ventilation in buildings – Toward an integrated control approach, Proceedings of the 35th Congress on Heating, Refrigerating and Air-Conditioning, Belgrade, Serbia, pp. 93 - 102.
- Mahdavi, A., Pröglhöf, C. 2005. A model-based method for the integration of natural ventilation in indoor climate systems operation, Proceedings of the 9th International IBPSA Conference, Building Simulation 2005, Montreal, Canada, pp. 685 - 692.
- Mahdavi, A., Pröglhöf, C. 2006. A model-based approach to natural ventilation, Building and Environment, Elsevier, Volume 43(4), pp. 620 - 627.
- Mahdavi, A. 2008. Predictive simulation-based lighting and shading systems control in buildings, Building Simulation, an International Journal, Springer, Volume 1, Number 1, ISSN 1996-3599, pp. 25 - 35.
- Mahdavi, A., Orehounig, K., Pröglhöf, C. 2009. A simulation-supported control scheme for natural ventilation in buildings, Proceedings of the 11th IBPSA Conference, Building Simulation 2009, Glasgow, Scotland, pp. 783 - 788.
- Orehounig, K., Mahdavi, A., Pröglhöf, C., Schuss, M. 2010. Virtual implementation of a simulation-assisted passive cooling strategy in buildings, Proceedings of the 10th Rehva World Congress, Sahin N. (ed.), Antalya, Turkey, 8 pages.
- Pröglhöf, C., Schuss, M., Orehounig, K., Mahdavi, A. 2010. Incorporation of a novel passive cooling method in an existing building, Proceedings of the 10th Rehva World Congress, Sahin N. (ed.), Antalya, Turkey, 8 pages.
- Salmeron, J.M., Sanchez, J., Ford, B., van Steenberghe, T., Alvarez, S. 2009. Passive and hybrid draught cooling in buildings and software for design, Rehva Journal, Seppänen O. (ed.), Teknik Yayincilik Tanitim A.S., Volume 46, Issue 6, ISSN 1307-3729, pp. 34 - 39.
- van Schijndel, A.W.M. 2007 Integrated heat air and moisture modeling and simulation, PhD thesis, Eindhoven University of Technology, <http://alexandria.tue.nl/extra2/200612401.pdf> or <http://sts.bwk.tue.nl/hamlab> accessed June 2010.
- Schuss, M., Pröglhöf, C., Orehounig, K., Dervishi, S., Müller, M., Wascher, H., Mahdavi, A. 2010. Predictive model-based control of ventilation, lighting, and shading systems in a building, accepted for BauSIM 2010, Vienna, Austria.

OVERHEATING PROBLEM IN SINGLE FAMILY PASSIVE HOUSE

Jana Mlakar¹ and Janez Štrancar²

¹Eko produkt d.o.o., Ljubljana, Slovenia

²Jožef Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia

ABSTRACT

Interior temperature significantly influences the comfort in the house. While temperatures lower than 20°C can be found in poorly insulated objects accompanied with the condensation problems, the temperatures above 26°C usually points to the overheating problem in a passive house as a highly insulated object and extremely weakly coupled to an environment. Since already a small energy input can raise the internal temperature significantly, the shadowing and internal energy sources minimization should be considered to reduce the overheating problem. To provide more information on that issue we analyzed data collected from a single Slovenian family passive house and associated different energy sources' contributions to overheating of the passive house. Results show that cooling of the house at night in hot summer days and strict shading of the western windows is necessary to keep internal temperature on level comfortable for their residents.

INTRODUCTION

Comfort in building is a very important issue affecting not only the perception of the local environment, but influencing also an efficiency of the residents and residents' health. Although we can identify many factors influencing the comfort, e.g. temperature, humidity, noise level, dust level, the temperature is certainly the first one to be addressed by the house regulation systems. Already Fanger's Model from 1972 pointed out indoor conditions that contribute to comfort of people. These are physical variables (air temperature, air velocity, mean radiant temperature, and relative humidity), and two personal variables (clothing insulation and activity level). A comfort zone in balance with the outdoor climate conditions, lies between 20 and 26°C and between 30 and 60 % relative humidity according to ANSI/ASHREA standard 55-1992. The temperature level should therefore be kept at least within the 20°C - 26°C range. Lower temperatures cause feeling of a cold, uncomfortable space since such temperatures constrict blood capillaries and efficiently slow down the blood circulation making the skin colder. On the other hand, lower temperatures also reduce the efficiency of the respiratory system protection against

bacteria. However, lower temperatures are very rarely found in the highly insulated objects like passive houses as the are connected with poor insulation and thermal bridging. On the contrary, higher temperatures are not so uncommon in passive houses when the latter are located in a climate region with a hot summer and autumn like a Slovenian one. In such a case a passive house is obviously loaded at the same time with an extensive solar radiation and very high external temperatures. Since a passive house is highly insulated object, it is therefore extremely weakly coupled to environment. With a specific loss of up to maximally 60 W/K, one can imagine that an afternoon passive solar energy influx through a single unshaded western window can easily reach 500 W, requiring for a 10 K temperature gradient needed for a house to release this energy. Since such a temperature gradient is unimaginable in aforementioned climates, already a small energy inputs will have large effect on internal temperature, especially if the internal heat capacity is as low as is the case of low-weight construction which became more and more popular in Europe and also in Slovenia. Even more problematic can be reduction of an internal energy sources which can be neutralized only through an extensive ventilation during the night time, when the temperatures more or less fall below the internal temperatures.

Protection against overheating should be taken into account already when planning the house including orientation, size of windows, building elements, ventilation etc. Solar protection, solar gain, thermal mass, thermal insulation, internal heat gains, night cooling, ventilation rate, glazing properties (ratio, transmittance, orientation) are obviously all important factors that influence the overheating phenomena. Nevertheless, it is very important to know how to properly shade windows and avoid excessive internal energy release to teach the passive house residents to use their passive objects in a proper way.

The problem of the overheating has been addressed by several studies till now. According to the simulations performed by Orme et al. (2003) the most important factors for overheating in well-insulated houses are balanced mechanical ventilation They proved that mechanical ventilation system of a thermally heavy weight building normally cannot

remove heat to sufficiently prevent the overheating of the house during the daytime. Night time excessive cooling appeared to be the most effective in preventing building overheating.

Also Badescu et al. (2010) identify overheating in passive houses, especially in southern Europe climate, as an important issue. According to a steady-state model they presented a simple technique to decrease the overheating rate is opening the windows during the night.

Artmann et al. (2008) investigated the most important parameters affecting night ventilation performance in preventing overheating in commercial buildings. They concluded that climatic conditions and air flow rate during night-time ventilation mode have the most significant effect on reducing overheating. Also thermal mass and heat gains have a considerable effect on thermal comfort in summer.

Lehmann et al. (2007) investigated the role of thermal mass on reducing peak cooling load while Robinson and Haldi (2008) constructed mathematical model for predicting overheating risk which considers human tolerance to overheating stimuli.

The results of the simulation performed by Florides et al. (2000) indicate that the inside house temperature, when no air-conditioning is used, varies between 10–20°C for winter and between 30–50°C for summer. Window shading in summer, resulted in savings of 8–20% of the cooling loads with the savings increasing with the amount of insulation of the construction.

Breesch et al. (2005) research results show that passive cooling has an important impact on the thermal summer comfort in the building. Furthermore, natural night ventilation appears to be much more effective than an earth-to-air heat exchanger to improve comfort.

Shaviv et al. (2001) investigation showed that in the hot humid climate of Israel it is possible to achieve a reduction of 3–6°C in a heavy constructed building without operating an air conditioning unit. The reduction depends on the amount of thermal mass, the rate of night ventilation, and the temperature swing of the site between day and night.

Although the overheating problem has already been addressed in the literature, no serious attempts has been made so far to explain the real passive house temperature dependencies during the hot summer periods from the point of view of shading and night-time ventilation. In our work an extensive data array has been acquired on a minute interval through a control system of a passive house located in northern Slovenia to estimate and allocate energy input contributions to the overheating of the real passive house. It was not our aim to only identify the possible strategies to reduce the overheating problem, but to determine to what extent the internal temperature could increase if the residents would not cool house

with opening the windows at night and would not shade the windows. Our study therefore wants to contribute to an important discussion of appropriateness of a passive house strategy in hot-summer climate regions like the one of Slovenia by proving that the internal temperatures can still be kept on a comfort level without additional cooling system.

METHODS

Description of test house

In our study the data were acquired in single family passive house in Limbuš near Maribor (Figure 1), in a northeastern part of Slovenia, typical for a continental climate with a hot summer. House was constructed in 2006, and has been occupied since July 2006. The house has wood frame construction with rectangular floor plans on both base and first floor. Concrete basement is outside of the thermally insulated volume. It has a 113 m² of a residential floor area and an approximately 260 m³ of internal volume. Walls, roof and floor towards basement are very well cellulose-insulated with U-values less than 0,1 W/m²K. Windows are triple glazed with two low emissive coatings and krypton between glass, with the effective thermal transmittance of 0,8 W/m²K. On the south side windows are shaded with the roof extension as shown on Fig. 1. This extension was calculated to prevent any solar energy influx during the summer time period. The east and west side windows are shadowed with external movable Venetian blinds, which are manually controlled by the residents. Tightness of the house falls below onetime exchange of air at 50 Pa. Air flow of the ventilation system is 80 m³/h. Counter flow heat recovery unit works with 83 % efficiency. Ventilation system includes two infrared-based preheaters of 100 W and 200 W individually controlled to enable 3-step frost-prevention in the range between 0°C and -12°C. The ventilation system is switched off below -13°C, which is considered as an average minimum winter temperature of this region. In addition, the ventilation system involves a water-air 280 W heat exchanger connected to floor heating system and places just behind the counter flow heat recovery unit to heat up for the last 2.8 K in average reaching the projected internal temperature of approximately 22 °C.

House is heated with floor heating system with maximal temperature of 29 °C and maximal power of 1800 W calculated to an average minimum winter temperature of -13°C. All mechanical engineering systems, like pumps and valves of the floor and hot-water heating systems are controlled by sensory-control system and software on a PC that is also stores the measurements each minute.



Figure 1: Passive house in Limbuš, Slovenia

Acquisition system

The sensors acquire the following data:

- the external temperature – T_{ext} [°C]; this sensor is placed on the north wall under extension of the roof to be protected against direct sunlight and eliminate the fast oscillations due to fast-heated ground; all the temperature sensors are Zenner-like diodes calibrated against absolute temperature and reaching absolute accuracy of a 0.3K;
- the internal temperature – T_{int} [°C]; this sensor is placed in the middle of an open staircase in the north central part of the building to be protected from direct sunlight, direct heat source from kitchen, bathrooms and any of the home appliances as well as from direct cooling from the uncontrolled convection through the main entrance of the house;
- the solar flux – j [W/m²]; the photo-diode is placed on the roof with a normal oriented to the azimuth of 183° and elevation of 55°. The real incident solar flux is calculated from the measurement flux taking into account the real direction of the solar flux, the incident angle of absorption, the supplier angular and flux sensitivity of the photo-diode and calibrated against the maximum solar flux defined in the solar noon at June 21st; The direction of the solar flux with an 1-hour accuracy is calculated within a model of the Earth motion against Sun, taking into account the position of Slovenia, which is defined with a 46° north and 16° east; Local solar time is used with an appropriate transformation to UTC, CET and CEST.
- other temperature sensors are used to measure temperature in the pipelines of the mechanical engineering systems (like the floor heating systems, heat buffers, etc).

Description of model

To characterize the overheating in the house, the internal temperature has to be measured and simulated at the same time. The analysis of the

discrepancies between simulated and measured internal temperature summer time-variations finally reveals the sources of the overheating.

To model the internal temperature one has to calculate all the heating and cooling powers which altogether change the internal temperature via heat capacity C of the house inside the thermal shell. Energy law gives us:

$$C \frac{dT}{dt} = \sum P \quad (1)$$

The main cooling sources are the transmission and ventilation losses. Since they depend on the difference between internal and external temperature, the proportionality coefficient describes the specific heat loss (Λ in W/K), sometimes also denoted as the heating number. Note, that such an effective specific heat loss includes the effective heat transfer coefficient, heat loss due to nonideal heat recovery in ventilation system as well as uncontrolled ventilation heat loss through the main entrance. Heat loss in passive houses can be calculated, but the most accurate numbers are gained through the fitting of the time-variations in winter. For our example, the latter was done for several winter periods and the specific heat loss of 60 W/K were determined for all the aforementioned energy-loss sources.

$$P_{loss} = \Lambda [T_{ext}(t) - T_{int}(t)] \quad (2)$$

On the other hand, the energy is firstly supplied through a heating system with a power P_{heat} , which was in this house during the energy balance analyzes based on the 3 electrical heaters of 300 W, 600 W and 900 W, placed directly into pipelines of the floor heating system and digitally controlled by a PC-based control system, making the incorporation into the simulation models very straightforward.

In additional, the energy in a passive house is gained also through passive, i.e. uncontrolled, absorption of solar flux through the glazing as well as through internal gains. There are many sources of the latter such as the heat generated by cooking, the metabolic activity of the human bodies of the residents, the heat generated by nonideal efficiency of electrical home appliances especially heat pumps (in refrigerating) and data processing (multimedia, computers, controllers, etc. which pay the energy to reduce the data entropy). The amount of internal energy gain varies significantly with time. For example, already one person that irradiates in average 80 W is not continuously present in a house. This makes the simulations more demanding especially in the case of real house where the occupancies are not strictly tracked. Moreover, the energy release by cooking is also very stochastic and discrete process – energy is

not released continuously, but in big quanta imposing serious difficulties for simulations. The internal gain power is therefore approximated with an average internal gain power which was also gained through the fitting of the time-variations in winter. The aforementioned internal energy-gain sources (P_{int}) were determined to be in average 400 W.

As indicated previously, passive solar gains are also one of the main energy gains in the passive house. High accuracy of solar gain determination is desired in simulations due to high energy density in order to characterize the overheating problem correctly. For that purpose the analyzed passive house measures the solar current directly. The power of solar gains P_{sol} can be calculated as

$$P_{sol} = \sum_i \alpha_g \alpha_{shad,i}(t) \begin{cases} \bar{S}_i \cdot \bar{j}(t); > 0 \\ 0; < 0 \end{cases} \quad (3)$$

where α_g represents the glazing transmittivity which is 50% for the windows of the analyzed house, $\alpha_{shad,i}$ the effective transmittivity of each i -th window due to the shading which obviously depends on the solar current direction and architecture, S_i the area of transparent part of each i -th window, and the j solar current flux.

Firstly, the solar gain depends on the incident solar current which amplitude is measured in real time by the photo-diode taking into account the orientation of the photodiode and the direction of the solar current. The latter is calculated as described in previous subsection.

Secondly, the solar gain depends also on the direction of the solar current against each of the window. To take this into account, each of the transparent surface is defined as a vector quantity with a direction of a normal vector perpendicular to the window, defined in the same coordinate system as the solar flux is. For example, the eastern, southern and western windows have the azimuths of 90° , 180° and 270° , respectively, and a constant elevation of 0° .

Finally, the solar energy is partially restricted due to shading. This can be done in a fixed way with a roof extension, or in a manual-controlled way by external shading of Venetian blinds. The shading is taken into account by the real-time calculation of the shaded area on the outside of each window and appropriate incident solar current reduction.

Although the ventilation system of the analyzed house is also equipped with preheating and additional heating of air, the first one is operating only when the external temperature is below freezing point while the second one is effective only when the floor heating system is operational. This means that in the summer time, the two mentioned systems contribute no additional energy input to the house energy balance and will therefore not be included in the simulation model.

Finally, the internal air temperature (T_{int}) and therefore energy balance of the house depends on thermal losses (P_{loss}); heat gains due to solar radiation (P_{sol}); heat produced by the heating system (P_{heat}); and the thermal internal gains due to energy emitted by the residents electrical appliances in the house (P_{int}).

$$C \frac{dT_{int}}{dt} = P_{loss}(t) + P_{sol}(t) + P_{heat}(t) + P_{int}(t) \quad (4)$$

$$C \frac{dT_{int}}{dt} = \Lambda(T_{ext} - T_{int}) + \sum_i \alpha_g \alpha_{shad,i} \begin{cases} \bar{S}_i \cdot \bar{j}; > 0 \\ 0; < 0 \end{cases} + P_{heat} + P_{int} \quad (5)$$

Simulation of internal temperature

To simplify the simulations, one has to identify the proper time scales of all the quantities in the above equations. The external temperatures change on an hour time scale, while solar current change on a minute time scale (although the effect of solar energy influx is usually delayed by the buffer systems). Also the internal heat sources do not change faster than on a minute time scale, defining the later to be the final time scale of the simulations. For that reasons, also the data are acquired each minute.

Approximating that the quantities are quasi constant on a time scale of one minute, the above differential equation can be transformed into difference equation:

$$T_{int}(t+1) = T_{int}(t) + \frac{\Delta t}{C} \sum_i P_i(t) \quad (6)$$

As in the case of specific heat loss and average internal gain power, also the effective heat capacity of the house was gained through the fitting of the time-variations in winter, where the temperatures gradients are large and these quantities significantly affect the internal temperature time variation. The aforementioned effective heat capacity (C) was determined to be 20 MJ/K.

Fitting the response of the house

If the general temperature response of the house is determined (during the winter period) in terms of the specific heat loss, internal power gains and effective heat capacity, the internal temperature can be simulated and also predicted for a hot summer period. Under conditions of heavy solar current load, very high external temperature and practically no energy release with conduction or convection via forced ventilation, the energy balance of the house significantly depends on the two factors: shading, i.e. preventing solar current entering the house, as well as

on cooling the house during the night with opening of windows.

For this purpose, the manual-control shading strategy has to be implemented in the simulation in addition to a cooling term which represents the effect of window

opening. The shading strategy which was used by the residents was very simple – eastern and western windows must be strictly shaded before noon or after noon, respectively. This diminishes the solar energy influx through these windows. The southern windows

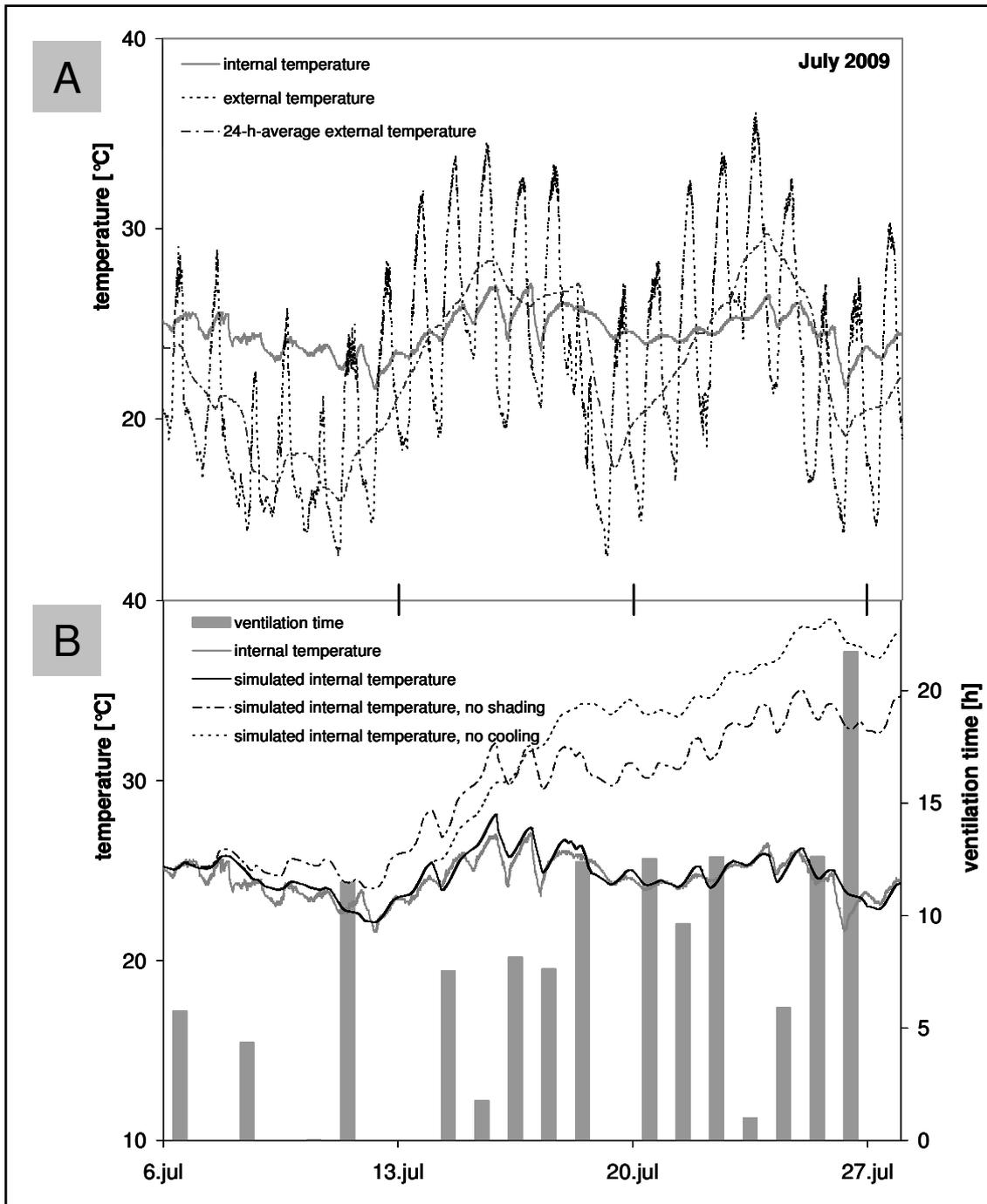


Figure 2: Overheating problem in a passive house in Slovenia. A: Temperature dependences of internal (gray) and external (dotted) temperature are shown together with 24-h integral of external temperature (dash dotted) which is used in controller to decide about the day-variation of the weather. B: Simulated internal temperatures (black solid) are shown as a fit to measured internal temperature (gray) at real conditions taking into account the real shading and real window opening as presented in the ventilation time. In addition, to predicted internal temperatures are shown for the same house without shading (dash-dotted) and without window opening (dotted), which would clearly result in an overheating of the house.

are perfectly shaded by the roof extension, that has already been introduced in the shading calculation. Cooling via manual-controlled free ventilation was utilized in a very simple way: as the external temperature felt below the internal temperature, the windows were opened manually for approximately the time, which is noted (and plotted on a Figure 2B). This effect was simulated as extensive mixing of the external and internal air at known temperatures and air exchange rate of 600 m³/h effectively representing the specific heat loss of 220 W/K.

RESULTS AND DISCUSSION

The selected period demonstrate a typical climate pattern of a hot summer with an external temperature reaching 35°C and significantly exceeding the desired internal temperatures (Figure 2A). In a period slightly shorter than a week, a 24-h average external temperature increase for almost 10 K, imposing huge load on a passive house that should keep the internal temperature within a comfort level below 26°C without the additional cooling system.

One can see that the real passive house responds to a two subsequent weeks of excessive external temperatures with an increase in the internal temperature of few K. However, this is achieved by the effective shading of the eastern and western windows in addition to free ventilation achieved by the opening of the windows during the night. The latter is enabled by the large daily temperature oscillations of a 15 K, in which the lower temperatures fall below internal temperatures for at least few hours during the night time. The approximate cooling time, i.e. time when windows were completely open during the night time, is presented in the Figure 2B. One can clearly see that the residents intuitively increase the free ventilation during the hot periods. Additionally, they use the cold days immediately after to restore the lower internal temperature conditions as fast as possible by excessive ventilation. These results indicate that the model is capable of explaining the time-variations of internal temperature in great detail and that the shading and night ventilation through open windows can be efficient enough to prevent overheating.

To prove the latter statement, the internal temperature is simulated (predicted) for the same house under the same conditions but without shading or without opening of the windows. One can see that the simulated dependencies deviate within a week leading to excessive overheating.

These results show the response of the real passive house under hot summer climate and prove that the simple strategies can prevent serious overheating. However, modeling the same real house proves that the residents need to be taught and adopted for the life in a passive house to keep the living comfort within excessively hot periods.

CONCLUSION

With a relatively simple model of energy flux in the passive house internal temperature dependencies were explained during the hot summer periods. Effect of the shading and night-cooling by ventilation through opened windows were determined. In such a way the problem of overheating has been addressed. Results prove that a real passive house can resist excessively hot periods in a hot continental climate of northern Slovenia and that simple strategies like strict shading during the day and excessive ventilation through opened windows can keep the internal temperatures within the comfort level. The modeling clearly revealed that neglecting this strategies would result in serious overheating.

The knowledge gained in this study is crucial to the passive house building sector, proving that the passive house concept can survive even in the climates with extreme hot and cold months if the residents implement some of the anti-overheating strategies into their way of living.

ACKNOWLEDGEMENTS

This project was partially financed by The European Union, European Social Fund and Slovenian Technological Agency.

REFERENCES

- ANSI/ASHRAE Standard 55, 1992. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ASHREA, Atlanta
- Artmann, N., Manz, H., Heiselberg, P., 2008. Parameter study on performance of building cooling by night-time ventilation, *Renewable Energy*, 33: 2589-2598
- Badescu, V., Laaser, N., Crutescu, R., 2010. Warm season cooling requirements for passive buildings in Southeastern Europe (Romania), *Energy* (2010), doi:10.1016/j.energy.2010.04.013
- Breesch, H., Bossaer, A., Janssens, A., 2005. Passive cooling in a low-energy office building, *Solar Energy*, 79: 682-696
- Feist, W., Puger, R., Kaufmann, B., Schnieders, J., Kah, O., 2007. Passive house planning package 2007, Darmstadt, Passive House Institute
- Florides, G.A., Kalogirou, S.A., Tassou, S.A., Wrobel, W.C., 2000. Modeling of the modern houses of Cyprus and energy consumption analysis, *Energy*, 25 (10): 915-937

- Lehmann, B., Dorer, V., Koschenz, M., 2007. Application Range of Thermally Activated building system tabs, *Energy and Buildings*, 39 (5): 593-598
- Orme, M., Palmer, J., Irving, S., 2003. Control of overheating in well-insulated housing, CIBSE/ASH RAE Conference (24-26 Sept)-Building Sustainability, Value&Profit ISBN 190328743X
- Robinson, D., Haldi, F., 2008. Model to predict overheating risk based on an electrical capacitor analogy, *Energy and Buildings*, 40 (7): 1240-1245
- Fanger, P.O., 1972. *Thermal Comfort*, McGraw-Hill, New York
- Shaviv, E., Yezioro, A., Capeluto, I.G., 2001. Thermal mass and night ventilation as passive cooling design strategy, *Renewable Energy*, 24: 445-454

ABOUT UNCERTAINTIES IN SIMULATION MODELS FOR BUILDING SYSTEMS CONTROL

Kristina Orehounig, Matthias Schuss, Claus Pröglhöf, and Ardeshir Mahdavi
 Department of Building Physics and Building Ecology
 Vienna University of Technology
 Vienna, Austria

ABSTRACT

This paper presents the process and the results of a calibration effort of a thermal simulation model of an existing office building in Vienna, Austria. The model is an integral component of the building's innovative model-based control logic for the operation of windows and shades. To achieve the desirable level of accuracy, sources of uncertainty in the simulation model are identified and treated. In the present contribution, we focus on two sources of uncertainty namely the prediction capability of a calibrated simulation model, and errors in weather predictions.

INTRODUCTION

In previous research and the respective publications, we have introduced and described the concept and various implementations of a simulation-based approach to building systems control (Mahdavi 2008). In this approach, control decisions are made based on a proactive comparison of simulated implications of alternative control actions. The best-performing control option can thus be identified and executed on a regular basis. In a recent implementation effort, we implemented and started to test such a simulation-assisted control system for effective passive room cooling in an office building, in which three rooms were selected and equipped with motorized windows and automated blinds (Pröglhöf et al. 2010, Orehounig et al. 2010). Thereby the control scheme was as follows: at a specific point in time in a typical summer day, the control unit applies simulation to predict how various window and shade operation regimes would affect the indoor temperature over the course of the following hours. The essential advantage of this method is the possibility to bypass conventional air-conditioning systems and harness instead the naturally occurring day-night temperature difference toward free space cooling.

To endow the window and shade operation unit with predictive capabilities, we developed simulation models for the office spaces using a numeric simulation application. The initial testing phase of the system's operation highlighted the importance of

the accuracy of the simulation model's predictions. To achieve the desirable level of accuracy, sources of uncertainty in the simulation model must be identified and treated. In the present contribution, we focus on two sources of uncertainty in the simulation process:

- i) Simulation model requires input data regarding window positions towards the estimation of the resulting air change rates. We illustrate the potential for the calibration of the simulation process based on the comparison of measured and predicted air change rates given a set of input assumptions.
- ii) Simulation model's prediction of the future conditions in the office spaces uses weather data forecast as input assumption. Our experiences so far suggest that the implications of weather forecast errors for the reliability of the control system are significant. Preferably, weather predictions should be based on data obtained from a local weather station at the close proximity of the building.

METHODS

In a recent implementation effort, we started to test a simulation-assisted control system for effective passive room cooling in an office building. The object is a University building located in Vienna (see Figure 1), in which three adjacent rooms were selected and equipped with motorized windows and automated blinds. These three rooms are south facing (Figure 2) and are referred to as R1, R2 and R3. R1 acts as a reference room and was left untouched. The room is equipped with manual internal, simple venetian blinds. The users can open the windows manually. In R2 and R3 the existing windows were partly motorized. R2 was equipped with automated internal venetian blinds and R3 with automated external venetian blinds (Figure 2).

Additionally, offices were equipped with indoor environmental sensors for air temperature, humidity, illuminance, flow velocity, and surface temperatures (Figure 3). External environmental data such as temperature, relative humidity, wind speed, wind direction, global horizontal radiation, and diffuse horizontal radiation were collected. Moreover, window opening and shading positions were

recorded. As to the external environmental conditions, a weather station was installed on the roof of a close-by building.



Figure 1 External view of the selected building

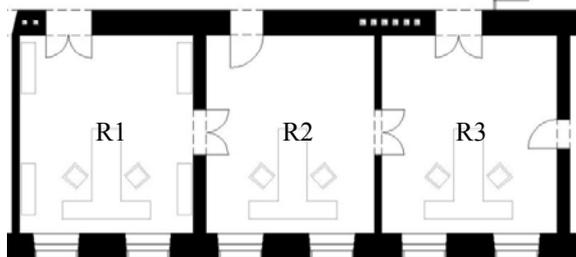


Figure 2 Floor plan of the three offices



Figure 3 Workplaces in R2 with motorized window, internal venetian blinds, and sensors

Control approach

The potential for the application of a simulation-based natural ventilation control strategy has been addressed, in principle, in our previous publications (Mahdavi & Pröglhöf 2004, 2005, Mahdavi 2008, and Mahdavi et al. 2009). The idea was to utilize the day-night difference in outdoor air temperature toward passive space cooling via optimized operation of natural (window) ventilation. Therefore a

simulation model was generated and calibrated for the above mentioned building.

As to the control scheme approach: At a specific point in time in a typical summer day (d_j), the control unit applies simulation to predict how various window operation regimes would affect the indoor temperature in a building over the course of the following day (d_{j+1}). An "operation regime" denotes in this context which windows, when, how long, and to which extent, are opened. To compare and rank the performance of various control options (alternatives), we applied in this case the Mean Overheating (OH_m) of the indoor air in selected spaces (see Equation 1) as the relevant performance indicator.

$$OH_m = \sum_{i=1}^n \frac{\theta_i - \theta_r}{n} \quad (1)$$

Where θ_i denotes indoor air room temperature (°C) at hour i in day d_{j+1} , θ_r the reference indoor air temperature for overheating (°C), and n the total number of considered hours in day d_{j+1} . This number was considered to be 10 for the office spaces. Note that the term $\theta_i - \theta_r$ (in Equation 1) is considered only for those hours when $\theta_i > \theta_r$. In our illustrative example, the reference overheating temperature (θ_r) was assumed to be 26 °C. In the control situation, weather forecast information for the following day is used as input information for the simulation runs. In the present emulations, weather predictions are taken at 18:00 for the following 24 hours. These weather predictions were derived from a web-based service (Weather channel 2009). Thus, amongst a number of discrete alternative window operation scenarios, one could be selected, which, according to simulation results, would minimize the overheating of the indoor air in the following day. To illustrate this process, Table 1 shows a number of alternative window operation scenarios (schedule and degree of window opening).

Simulation process

The initial testing phase of the system's operation highlighted the importance of the accuracy of the simulation model's predictions. To achieve the desirable level of accuracy, sources of uncertainty in the simulation process must be identified and treated. In the present contribution, we focus on two sources of uncertainty in the simulation process:

1. Simulation model uncertainties: The simulation model, which is used for the control strategy was generated based on building information (geometry and construction) using a numeric simulation application (EDSL 2007, 2008). Material properties such as thermal conductivity and specific heat capacity were based on in-situ observations and applicable document archives. Information regarding occupancy, lighting,

equipment, window positions, and shades position was based on monitoring in the office spaces. Air change rates were computed by the simulation application based on input data on window opening positions. To calibrate this computation, measured values of air change (in room R2 and R3) for various window positions on two days in June 2009 were used. Simulated and measured air change rates were compared to calibrate the window opening degree. Simulations were run using weather files specifically generated based on data obtained from the local weather station. Simulation results were compared with corresponding measurements (such as room air temperature), resulting in a calibrated simulation model.

- Weather forecast uncertainties: The weather forecast information used for the simulation-assisted passive cooling in buildings, is derived from a web-based meteorological weather service (for the city of Vienna), which provides hourly data regarding air temperature, humidity, wind speed, wind direction, probability of precipitation, and sky condition for the next 48 hours (Weather channel 2009). Typical weather files for building performance simulation require air temperature, humidity, wind speed, and wind direction. Moreover, information is needed regarding global horizontal radiation, diffuse horizontal radiation, and cloud cover, which was not provided by the web based service. Instead, this service provides sky condition information in verbal terms such as "clear sky", "partly cloudy", "mostly cloudy", and "sunny". These terms typically refer to the fraction of the sky obscured by clouds (e.g., 0: clear sky, 10: overcast sky). We used this information to estimate the cloud cover values and further to estimate input data for global and diffuse horizontal radiation. Subsequently, global horizontal irradiance ($E_{G,H}$) was approximated as a function of cloud cover (CC) and global clear sky irradiance ($E_{G,C}$) according to the relationship which we derived based on empirical data (see Equation 2). Diffuse horizontal radiation was further calculated based on the clearness index, which takes the temperature, humidity, extraterrestrial radiation, and global horizontal radiation into account (Reindl 1990).

$$E_{G,H} = -0.0085 \cdot CC^2 \cdot E_{G,C} + 0.0174 \cdot CC \cdot E_{G,C} + 0.8288 \cdot E_{G,C} \quad (2)$$

To further explore the extent of weather forecast errors, weather predictions were compared to actual data (for August 2009). We used the outcomes of this analysis to further adjust

weather predictions (which are generated for the city of Vienna) to the location of our building.

RESULTS

Control method implementation

To test the simulation-based control system's operation, different scenarios were generated (see Table 1) and simulated every evening at 18:00 for the next 24 hours (using the respective weather forecast information). Figure 4 shows, for R3, the predicted indoor air temperature resulting from these alternative control scenarios. Table 2 shows calculated Mean Overheating values for these scenarios. Scenarios with better performance (highlighted in grey in Table 2) were implemented in the actual operation.

Figure 5 shows measured indoor air temperatures in all three offices together with the outdoor air temperature for the test period. R3 and R2 were controlled by the simulation-based method. R1 acts as a reference room and remained mostly unoccupied with closed windows.

Table 1

Illustrative alternative control scenarios (s1 to s7) for window (W) operation ("f": fully open, "p": 40% open, "c": closed) in selected offices. The operation of the blinds (B) is specified either as "f" (fully open) or "c" (80% closed).

hr	s1		s2		s3		s4		s5		s6		s7	
	W	B	W	B	W	B	W	B	W	B	W	B	W	B
19	p	c	p	c	p	c	p	c	c	c	c	c	p	f
20	p	c	p	c	p	c	p	c	f	f	f	f	f	f
21	p	f	p	f	p	f	p	f	f	f	f	f	f	f
22	p	f	p	f	f	f	p	f	f	f	f	f	f	f
23	p	f	p	f	f	f	p	f	f	f	f	f	f	f
00	p	f	p	f	f	f	p	f	f	f	f	f	f	f
01	p	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f
02	p	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f
03	p	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f
04	p	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f
05	p	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f
06	p	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f
07	p	f	f	f	p	f	f	f	f	f	f	f	f	f
08	p	f	f	f	p	f	f	f	f	f	f	f	f	f
09	p	f	f	f	p	f	f	f	f	f	f	f	f	f
10	p	c	f	f	p	c	p	c	f	f	f	f	f	f
11	p	c	f	f	p	c	p	c	c	c	c	f	f	f
12	p	c	f	f	p	c	p	c	c	c	c	f	c	f
13	p	c	c	c	p	c	p	c	c	c	c	f	c	f
14	p	c	c	c	p	c	p	c	c	c	p	c	p	c
15	p	c	c	c	p	c	p	c	c	c	p	c	p	c
16	p	c	p	c	p	c	p	c	c	c	p	c	c	c
17	p	c	p	c	p	c	p	c	c	c	c	c	c	c
18	p	c	p	c	p	c	p	c	c	c	c	c	c	c

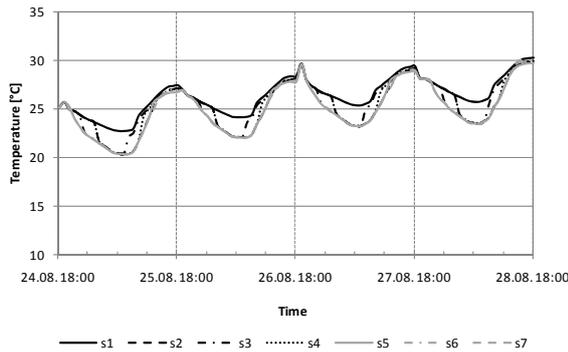


Figure 4 Simulation-based predictions of the indoor air temperature in R3 (day d_{j+1}) for alternative control scenarios (s1 to s7 as per Table 1) for four days in August 2009

Table 2

Comparison of control scenarios (Table 1) based on predicted Mean Overheating (OH_m in K)

	OH_m [K]						
	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7
24.8.	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
25.8.	1.2	1.0	1.1	1.0	0.9	0.9	0.9
26.8.	2.1	1.6	1.9	1.8	1.6	1.6	1.5
27.8.	2.9	2.2	2.6	2.3	2.1	2.3	2.2

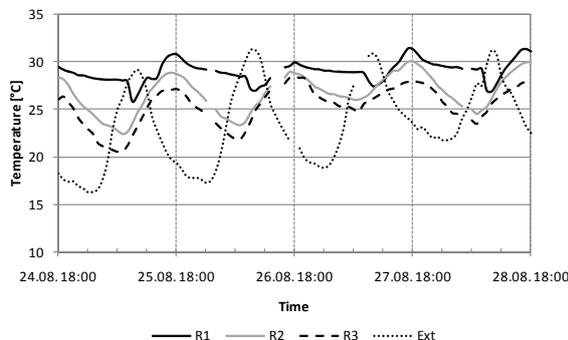


Figure 5 Measured indoor air temperature in rooms R1 to R3 together with external temperature over the test period

Simulation calibration

The operation of the system, as documented in the above results, was based on multiple runs with a calibrated simulation engine. As previously noted, the simulation model applied uses window opening degrees (in %) as input information. As part of the simulation calibration process, we compared the results of air change measurements with corresponding simulation results. Measured air change rates for R2 and R3 are shown in Table 3. Table 4 includes, for these, a summary comparison of measured and simulated air change results. We consider these results satisfactory, given the considerable uncertainties involved in simulating air

change rates in buildings. Note that, in the present case, the simulation application's default standard pressure coefficient values were used. We would expect, that even a better reproduction of measured values could be achieved, if pressure coefficients would be computed in a detailed manner using CFD (or empirically obtained via wind tunnel tests).

Table 3

Measured air change rates in office R2 and R3 on 16th and 17th of June 2009

Room	Window position	ACH [h^{-1}]	Wind speed [$m.s^{-1}$]	Wind dir. [$^{\circ}$]
R2	open	8.6	6.8	270
	partly open	1.6	6.8	270
	closed	0.3	3.2	270
R3	open	8.3	2.7	315
	partly open	1.1	2.5	45
	closed	0.3	1.7	135

Table 4

Simulated versus measured air change rates in office R2 and R3 on 16th and 17th of June 2009

Room	Window position	Measured ACH [h^{-1}]	Simulated ACH [h^{-1}]	Window opening degree [%]
R2	open	8.6	7.6	40
	partly open	1.6	1.5	8
	closed	0.3	0.3	1.3
R3	open	8.3	8.0	40
	partly open	1.1	1.3	8
	closed	0.3	0.3	1.3

To address the extent of weather forecast errors, weather predictions were compared to actual data (for August 2009). Figure 6 shows the Mean relative error of outdoor temperature and irradiance predictions as a function of prediction time horizon (from 1 hour to 18 hours ahead). Predicted temperatures show an error of about -5% fairly independent of the prediction time horizon. Thus, as part of the simulation process calibration, this systematic error was reflected in the simulation input assumptions regarding weather information. Consequently, Figure 7 shows the comparison between the predicted (locally adjusted weather forecasts from the web-based service) and the measured (weather station based) outdoor temperatures for four days in August 2009. Predictions were made every day at 18:00 for the following 24 hours.

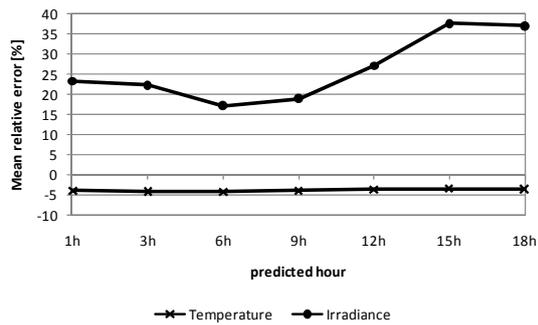


Figure 6 Mean relative error of outdoor temperature and irradiance predictions (August 2009) as a function of prediction time horizon (from 1 hour to 18 hours ahead)

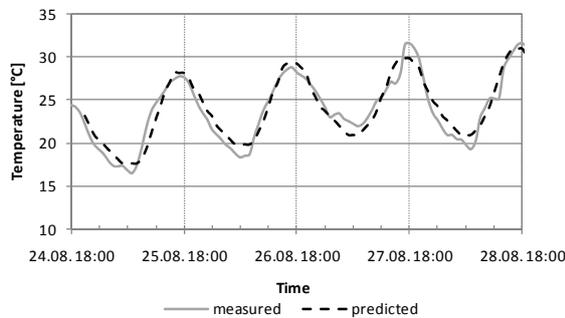


Figure 7 Comparison predicted and measured outdoor temperature over a period of 4 days in August 2009

Having thus calibrated the simulation model in view of ventilation rates and weather conditions, we could compare measured and predicted indoor air temperatures in the test space (R3). To demonstrate this point, Figure 8 shows, as an example, simulated and measured indoor air temperatures for the actually selected scenarios (grey areas in Table 2) for the four day test period in office R3.

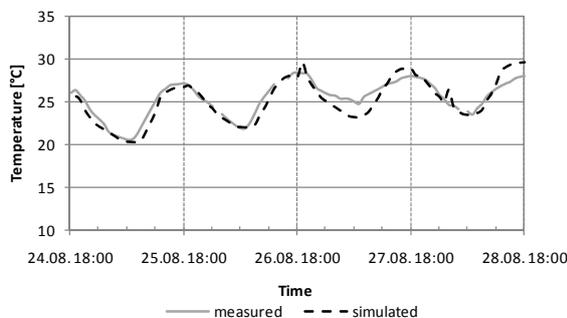


Figure 8 Comparison simulated and measured indoor air temperature R3 resulting from the system's operation

DISCUSSION AND CONCLUSION

In this paper, we presented the process and the results of a calibration effort related to a thermal simulation model of an existing office building in Vienna, Austria. This model is an integral component of the building's innovative model-based control logic for the operation of windows, shades, and lights. To enhance the prediction capability of the simulation model, it was subjected to a systematic calibration effort.

Results of the implementation effort suggest that the predictive simulation-based control approach toward intelligent space cooling is feasible. As Figure 5 suggests, indoor temperatures in R3 (equipped with external shades) display lower values than in R2 (equipped with internal shades), followed by R1 (reference room). Mean Overheating was calculated for this observation period as 2.9 K in R1, 1.9 K in R2, and 0.9 K in R3 during occupancy hours.

The quality of the system operation depends on the reliability of the simulation application's algorithms, relevant input assumptions, as well as input data regarding window positions towards the estimation of the resulting air change rates. The predictive accuracy of the simulation models can be improved via calibration. In the present implementation, we illustrated the potential for the calibration of window position assumptions based on the comparison of measured and predicted air change rates. Likewise, we argued that a good predictive performance of the simulation application requires high-quality and locally adjusted weather forecast data.

The resulting calibrated simulation model provided reliable predictions: for the 4-day period depicted in Figure 8, compared pairs of measured and simulated room temperature values showed a mean relative error of -1.2% (simulated values were in average 1.2% lower than the measured values). The corresponding error in terms of RMS amounted to 0.54 K.

We are currently exploring potential toward fine-tuning of system performance through more frequent control state updates. In the implementation illustrated in this paper, simulation-based assessment of alternative control options was conducted once each day (in the afternoon) for the following day. However, such assessments could be performed more frequently (e.g. every hour). This continuous mode of operation with shorter intervals would make it possible to examine, evaluate, and revise control decisions regularly. Moreover, refinements of control scenario generation and selection process are being undertaken using stochastic search routines and genetic algorithms.

ACKNOWLEDGEMENT

The research presented in this paper is supported in part by a fund from FFG "Naturally Cool" (Project-Nr: 817575) and by the K-Project "Multifunctional Plug & Play Façade" (Project-Nr: 815075, Project coordinator: Dr. M. Müller, FIBAG). Additional support was provided by TU-GUT, Vienna University of Technology (Project collaborator: G. Hodecek).

REFERENCES

- EDSL 2007. A-TAS Theory Manual. EDSL Documentation.
- EDSL 2008. A-TAS Version 8.5. Environmental Design Solutions Limited. www.edsl.net.
- Mahdavi, A. 2008. Predictive simulation-based lighting and shading systems control in buildings. *Building Simulation, an International Journal*. Springer. Volume 1, Number 1. ISSN 1996-3599. pp. 25 – 35.
- Mahdavi, A., Orehounig, K., and Pröglhöf, C. 2009. A simulation-supported control scheme for natural ventilation in buildings. *Building Simulation 2009, Proceedings of the 11th International Building Performance Simulation Association Conference and Exhibition*. Glasgow, Scotland. McElroy L.B., Turley J.S.(Editors)
- Mahdavi, A., and Pröglhöf, C. 2004. Natural ventilation in buildings – Toward an integrated control approach. *Proceedings of the 35th congress on air-conditioning, heating, refrigerating. "AMD Sistem"*. pp. 93 – 102.
- Mahdavi, A., and Pröglhöf, C. 2005. A model-based method for the integration of natural ventilation in indoor climate systems operation; in: "*Building Simulation 2005, Proceedings of the 9th International Building Performance Simulation Association Conference and Exhibition, Montreal, Canada*". pp. 685 - 692.
- Orehounig, K., Mahdavi, A., Pröglhöf, C., and Schuss, M. 2010. Virtual implementation of a simulation-assisted passive cooling strategy in buildings; in: *Clima 2010 - 10th REHVA World Congress, Antalya, Turkey*. N. Sahin (Editor), 8 pages.
- Pröglhöf, C., Schuss, M., Orehounig, K., and Mahdavi, A. 2010. Incorporation of a novel passive cooling method in an existing building; in: *Clima 2010 - 10th REHVA World Congress, Antalya, Turkey*. N. Sahin (Editor), 8 pages.
- Reindl, D. T., Beckman, W. A., and Duffie, J. A. 1990. Diffuse fraction correlations. *Solar Energy*, Volume 45, Issue 1, 1990, Pages 1-7.
- Weather Channel 2009. Data download August 2009. <http://www.weather.com>

ARCHITECTURAL DESIGN OPTIMIZATION FOR ENERGY EFFICIENCY USING MIXED-MODE SYSTEM: TRACING THE CHALLENGES AND OPPORTUNITIES IN A WARM-HUMID CLIMATIC CONTEXT

Sanyogita Manu and Satish Kumar
 International Resources Group, New Delhi, India

ABSTRACT

This paper is based on the experiences of designing an energy efficient building in the warm-humid climatic zone of India. The building is a part of a government project to promote awareness and use of energy efficient home appliances. From the stage of conception, therefore, it was designed as a demonstration project in order to integrate the knowledge dissemination objective with the performance of the building itself. This paper highlights the various challenges and opportunities that were part of the process of design, procurement (of building materials and components) and execution, towards making it an energy efficient building. It also presents in detail the thermal comfort analysis that was done to capture the adaptive model of thermal comfort for a mixed-mode strategy.

INTRODUCTION

The project under analysis is the upcoming Regional Energy Efficiency Centre (REEC) in Kolkata, India. It is one of the three REECs being established in different parts of the country by the Government of India in partnership with other organizations and institutions to focus on the three sectors for implementation of energy efficiency – buildings, small and medium industries (SMEs) and home appliances. The West Bengal Renewable Energy Development Agency (WBREDA) is a state-designated agency for the state of West Bengal and will be housing the REEC at Kolkata in their existing premises. The main objectives of the Centre, with a focus on energy efficient domestic appliances, are as follows:

- Enhance energy efficiency awareness and education among energy end-users
- Facilitate showcasing and demonstration of energy efficient products for public at large
- Promote development (incubation) of energy efficient technologies
- Encourage research and interdisciplinary collaboration on energy efficiency

- Catalyze the development and growth of energy efficiency market and business in the country.

REEC Kolkata is envisaged as a regional hub that will attract visitors from nearby states and regions along with other interested audience such as scientists, engineers, government officials, consumers, entrepreneurs, college and school-going students and enterprises dealing in the manufacture and sale of home appliances.

The building will be located in the Solar Energy Educational Park, on a land-fill site, in Science City situated near the renowned Birla Museum in Kolkata, one of the prime locations in the city. The architectural design firm working on the project is based within the city. Their initial response to the program and purpose that the Centre is going to serve was to propose to 'create a climate responsive structure to achieve energy efficiency through the ECBC guidelines'. Energy Conservation Building Code (ECBC) was launched in May 2007 by the Bureau of Energy Efficiency (BEE), Ministry of Power, Government of India. The Code specifies minimum requirements for the energy performance of various components of a building such as envelope, heating, ventilation, and air conditioning system, interior and exterior lighting system, service hot water, electrical power system and motors. It also lays down the standards for compliance through the Whole Building Performance Method using building energy simulation tools.

As part of the initial design exercise, the architect carried out a sun path analysis and proposed following measures as part of the building design:

1. Reduce solar heat gain by incorporating different external shading devices - a combination of horizontal and vertical shading devices on south and south-west facades and vertical shading devices on north and east
2. Hollow brick wall with insulation to reduce conductive heat gain from outside
3. High performance glazing to mitigate solar radiation

4. Multiple numbers of small openings with deep overhangs on south facade and relatively larger openings on the north

It is important to note here that the limitations of the site do not allow the flexibility of changing the orientation and profile of the building. At this stage, the project was introduced to us (the USAID ECO-III Project) to provide technical assistance towards making the proposed design more energy efficient using the Whole Building Performance method, and to help in procurement of building components, materials and services to realize the design in construction. The pages that follow outline the main barriers and challenges and the way they are being dealt with. The study is still in progress; this paper, therefore, covers the process in parts.

Building Description

The total built up area is 250m², divided over three floors. The ground floor has the reception area and a hall for rotating demonstration of energy efficient home appliance and other related products along with display and information panels. The first floor has a similar hall which can either be used for exhibits or as a training/ presentation room for occasional lectures. The floor also has offices and a small conference room. The facility is assumed to be run by a staff of five, including one Centre in-charge, two assistants and two people as maintenance crew. The second floor has rest room facility, including a pantry, for the occasional visitor (of non-official and technical cadre) and an open terrace. The overall window-to-wall ratio is about 20%.

CHALLENGES AND BARRIERS

Climate and Client Brief

The foremost challenge we faced with the project was to propose a low-energy design while maintaining thermal comfort in response to the difficult climatic conditions. National Building Code of India (BIS, 2005) divides the country into five climatic zones based on ranges of mean monthly maximum temperature and mean monthly relative humidity. According to this classification, Kolkata falls within the Warm-Humid climatic zone. Mean monthly temperatures range from 19 °C to 30 °C and maximum temperatures can often exceed 40°C. During winter months of December and January, the lowest temperatures range between 10 °C - 14 °C. Day and night time temperature differential is not significant enough to aid night-time cooling. Annual average relative humidity is as high as 78%. This, coupled with summer high temperatures, is a very challenging climate to design for. High humidity also leads to ingress of moisture into the envelope, reducing its integrity envelope and creating conditions for mould growth. A slight compromise on

the quality of material and construction workmanship can lead to high maintenance costs in the long run. Natural ventilation is one of the most important strategies to improve thermal comfort. However, the wind speed is less; about 50% of blowing wind is classified as 'Calm'. Solar radiation levels are high which means shading devices such as overhangs and fins are important strategies to improve the envelope.

Some of the other challenges were a result of the nature of the project and the client. As mentioned earlier, the project is a public undertaking. The initial brief from the client strongly stressed on avoiding air conditioning at all costs, because the general notion of a 'green' building is that of a building without any mechanical system for air-conditioning and relying entirely on passive strategies. In the process of interacting with the client, it became obvious that the idea of a 'green' or 'sustainable' building is to avoid air conditioning at all costs. Many of the existing public sector buildings in India are considerably old and were designed without any provisions for air conditioning, and were later retrofitted as and when needed. Well-designed buildings in passive mode became inefficient when air conditioning systems were haphazardly used. In many new constructions, such as this one, the brief does not include the provision of air conditioning. One of the challenges, therefore, was to convince the clients of the need for cooling, and dehumidification, especially in zones that have high occupancy levels, such as the demonstration and presentation halls where conditions would become unbearable during peak summer months. It had to be emphasized that between the two extremes of fully-conditioned spaces and fully-naturally ventilated space, there is an option of mixed-mode ventilation where *'the building "changes-over" between natural ventilation and air-conditioning on a seasonal or even daily basis'*. However, it is important to state here that the government is gradually making it mandatory for the new buildings to be energy efficient and has been taking many initiatives towards this objective.

It has been observed that it is usually difficult to experiment with material and construction in a government project. The Public Works Department (PWD) has a set of material specifications as given in the 'Schedule of Rates', and norms for construction practices, that have to be adhered to. These specifications or standards are rarely modified to reflect the changing scenario of the construction industry wherein new innovative materials of better quality and more efficient construction processes are being introduced in the market at a fast pace. Also, most of the projects have a limited budget. The emphasis, therefore, is to cut down on the short-term expenditure. Overlooking the long-term needs of the buildings leads to increased wear and tear making the envelope inefficient.

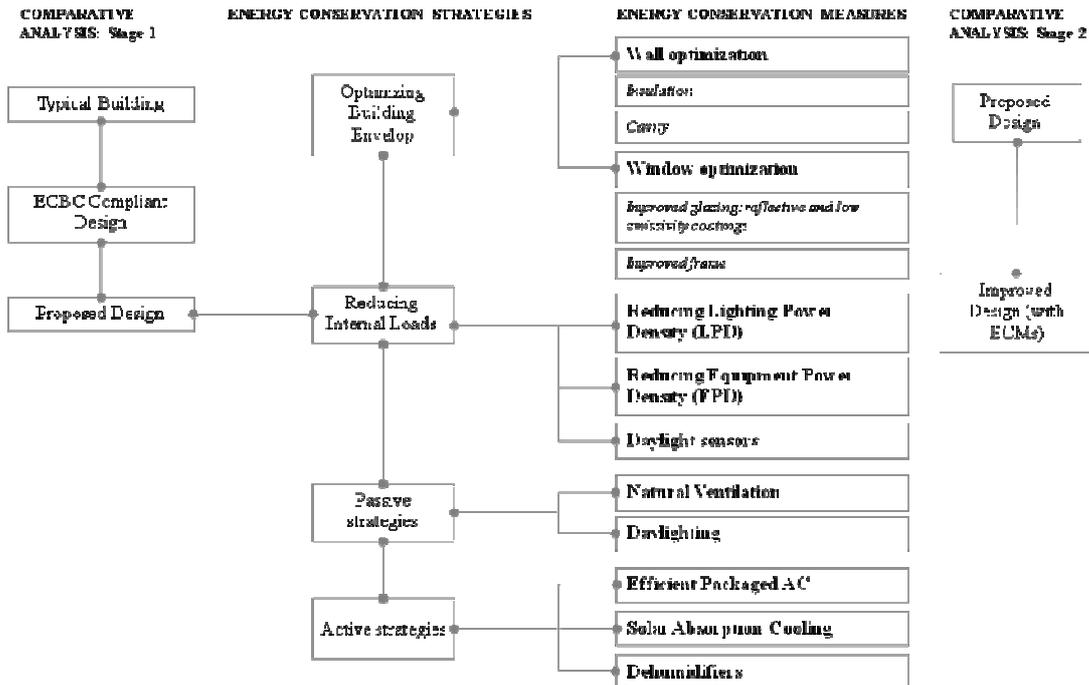


Figure 1, Process followed for ECBC compliance, showing various ECMs

Maintaining the flow of continuous exchange between the client, the architect and other stakeholders was a major issue. At various stages, it seemed that the project timeline was never pinned down, especially when it came to formal approvals and the documentation process; things either moved too fast or slowed down to the extent of reaching an absolute standstill.

We also faced a few challenges in terms of finding appropriate technological solutions for services like air-conditioning. The conditioned area within the building is small and usually the only option for such a building and function is a packaged direct expansion system or splits. This is the most commonly used system type in the country. These systems, however, cannot dehumidify the air. Most of the low-energy air conditioning (and dehumidification) solutions available in the market were either not cost effective to use in such a small building or were high maintenance requiring more manpower than the facility would be able to afford.

Simulation-based Analysis

Since the process of building energy simulation was new for both the architect and the clients, we had to continuously interact with them in order to understand and extract information required as simulation inputs. For example, the programmatic requirements of the facility were very vague initially. Gradually, through discussions, we narrowed down on the schedules of occupancy, number of occupants for each zone and their activities. These interactions

also helped the architect to understand the program better and refine the space organization accordingly. More important, it helped us to understand the extent of detail we need to incorporate to get meaningful results from the simulations, and concurrently, which inputs were critical to receive from the clients/architect and which ones we could assume with certain level of reasoning in place.

The most challenging task, however, was to design for climatic conditions of high humidity, high temperature ranges and low wind speeds, almost all the year round. While such a scenario would have been easy to handle if the building was to be made air-tight and completely conditioned, it had to be ruled out to demonstrate a mixed-mode system which could be termed as more climate responsive in nature. A mixed-mode system involves natural ventilation and it was unclear from our initial analysis if this was a reasonable strategy.

We followed a two-pronged approach to building energy simulation. In order to understand the impact of various Energy Conservation Measures (ECMs) on the Energy Performance Index (EPI) of the proposed design, we modeled the two most prominent zones (namely A and B for the following discussion) within the building that function as the exhibition and demonstration halls and, put together, account for almost half of the building area (volume) were modeled as air-conditioned zones, while the rest of the building was modeled with provision for natural ventilation. The modeling was done in DesignBuilder which uses EnergyPlus engine for simulation. The

various ECMs based on the ECBC requirements were incorporated within the proposed case to arrive at an ECBC compliant improved case. The methodology followed is described in Figure 1. Based on the impact of ECMs on the EPI of the proposed design, we were able to select the ones we thought were most appropriate in terms of availability, ease of execution and cost-effectiveness.

The second part of the analysis was to model zones A and B as mixed-mode zones with provision to switch between air-conditioning and natural ventilation. The challenge towards accurate modeling of a mixed-mode system was in specifying the temperature setpoints for cooling and ventilation so that both would work in tandem within the same zone. We developed a mixed-mode strategy where the zone air would be cooled down using natural ventilation whenever the outdoor conditions were favourable and when the zone air temperature would go beyond cooling temperature setpoint (because of rise in outdoor dry bulb temperature), the cooling system would kick-in to maintain the zone air temperature at the given cooling setpoint. It was difficult to understand how these setpoints interacted and what would be the temperature range within which cooling and natural ventilation would work most efficiently. The runs showed that mixed mode zones are comfortable only during the winter months. The climate in Kolkata is predominantly warm and the results showed that during these months the window were never open and therefore, the mixed-mode system did not work. This meant that even though we have provided for natural ventilation, the cooling in mixed-mode zones was always on during occupied hours and we could not see any benefit in terms of cooling energy savings.

Based on this finding, it was decided that focusing on EPI values was not the correct way to capture the advantages of natural ventilation. Rather, it was essential to work towards understanding thermal comfort in a naturally ventilated building in this type of climate. The following text provides a detailed description of the analysis.

Thermal Comfort analysis

The objective of this analysis was to be able to predict thermal comfort sensation within the proposed building with reasonable level of accuracy given the limited amount of time and resources. The entire building was modeled as consisting of 15 thermal zones each corresponding to a spatial zone. Zones A and B (discussed earlier) were modeled as air-conditioned / mixed-mode zones. The rest of the zones were naturally ventilated with provisions for ceiling fans. Four cases were modeled and simulated to understand and compare the impact of mixed-mode cooling, natural ventilation and increased air speed (ceiling fans) on the PMV-PPD.

The first set of simulation runs (Run 1) has mixed-mode for zones A and B while all other zones are naturally ventilated. In the second set of runs (Run 2), zones A and B are conditioned without mixed-mode and the cooling setpoint is increased to 26 °C. Both the third and fourth set of simulation runs (Run3 and 4) were modeled with natural ventilation in all zones, with cases in Run 4 having the capability to use ceiling fans to reduce energy use (Table 1).

Table 1, Description of Runs modeled for Thermal Comfort analysis

RUN	DESCRIPTION	HVAC	NAT-VENT	MIXED-MODE
1	Cooling setpoint 24 °C	On	On	On
2	Cooling setpoint 26 °C	On	Off	Off
3	Without Ceiling fans	Off	On	Off
4	With Ceiling fans	Off	On	Off

Results from EnergyPlus simulation runs reported hourly PMV values for occupied periods for each zone of the building, using Fanger's comfort model algorithms (EnergyPlus, 2009). PMV calculations are based on the six parameters of mean air temperature, mean radiant temperature, relative humidity, air speed, clothing and activity level. It is a mathematical model and does not account for any of the adaptive mechanisms wherein: 'if a change occurs such as to produce discomfort, people react in ways which tend to restore their comfort' (Nicol and Humphreys, 2002). Even though the PMV model is well validated and is known to predict thermal comfort in air conditioned buildings reasonably well, it has shown to predict thermal sensations warmer than occupants actually feel in case of naturally ventilated buildings (Brager and de Dear, 1998). For such buildings an adaptive model was proposed which is dependent on one single variable of mean monthly outdoor temperature.

Fanger and Toftum (2002) proposed an extension of the PMV model to bridge the gap arising due to discrepancies between the results of the mathematical and the adaptive models. This extension is based on two adaptive mechanisms of expectation and change in metabolic rate. Expectation is a psychological adaptation which recognizes that an occupant's past thermal experiences have a direct impact on his expectations of comfort (Brager and de Dear, 1998). Change in metabolic rate is a behavioral adaptation which acknowledges that people slow down their activity when they feel warm (Fanger and Toftum, 2002).

The extension of the PMV model thus formed the basis of this analysis. To be able to model the impact

of change in metabolic rate, a spreadsheet for calculating PMV PPD was developed based on ASHRAE Thermal Comfort algorithms. Hourly PMV PPD for occupied hours were calculated for occupied periods using hourly data for zone mean air temperature, mean radiant temperature and relative humidity from the simulation output. Metabolic rate was assumed to be 60 W/m² for light office work, and a clo value of 0.75 for winters (Oct-Mar) and 0.5 for summers (Apr-Sep).

The calculated PMV results were then modified to account for slowing down of metabolic rate. For every unit of PMV above the neutral, the metabolic rate was reduced by 6.7%, as per the PMV extension model. The resultant PMV was then adjusted by

multiplying it with an expectancy factor 'e' of 0.7 to account for the fact that the occupants are used to living in warm conditions and their expectation of comfort in an indoor environment are more relaxed. For example, if there are many air-conditioned buildings in a given region, the occupants would have a higher level of expectation of comfort because of the socio-economic and cultural context (Fountain et al., 1996). Similarly, if the occupants are habitual of living in a predominantly warm climate, their comfort setpoints get adjusted to the seasonal variation (or lack of it) or even long-term climatic changes which also contribute to their expectation of a warmer environment as opposed to if they had been living in a climatic zone where the warm periods are shorter.

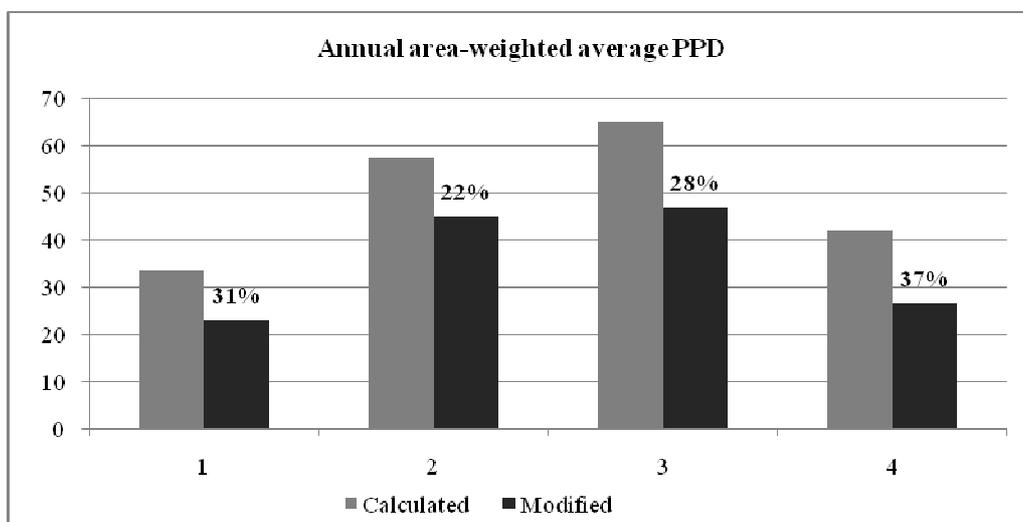


Figure 2, Annual area-weighted average PPD from calculated PMV and modified PMV (Data labels show percentage of reduction from calculated to modified PPD)

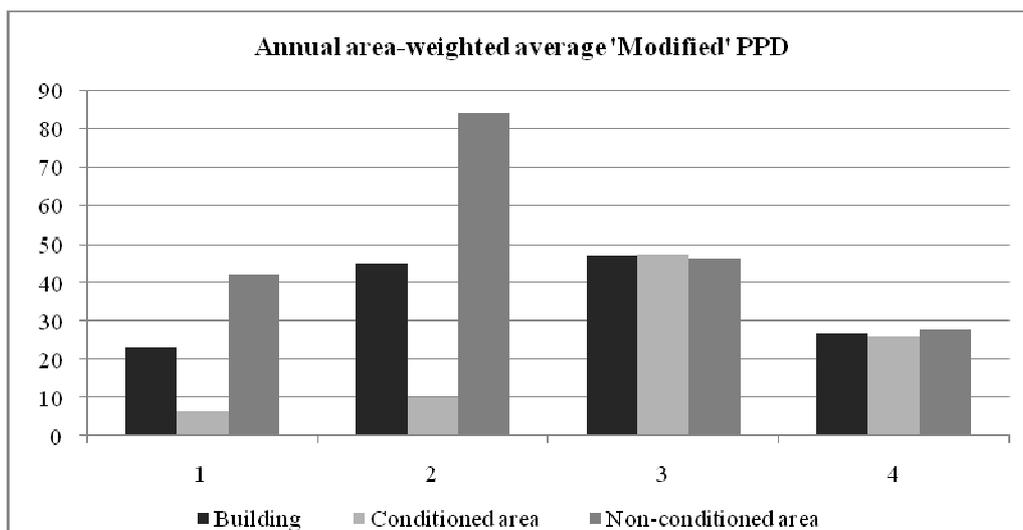


Figure 3, Annual area-weighted average modified PPD for conditioned and non-conditioned zones of the building

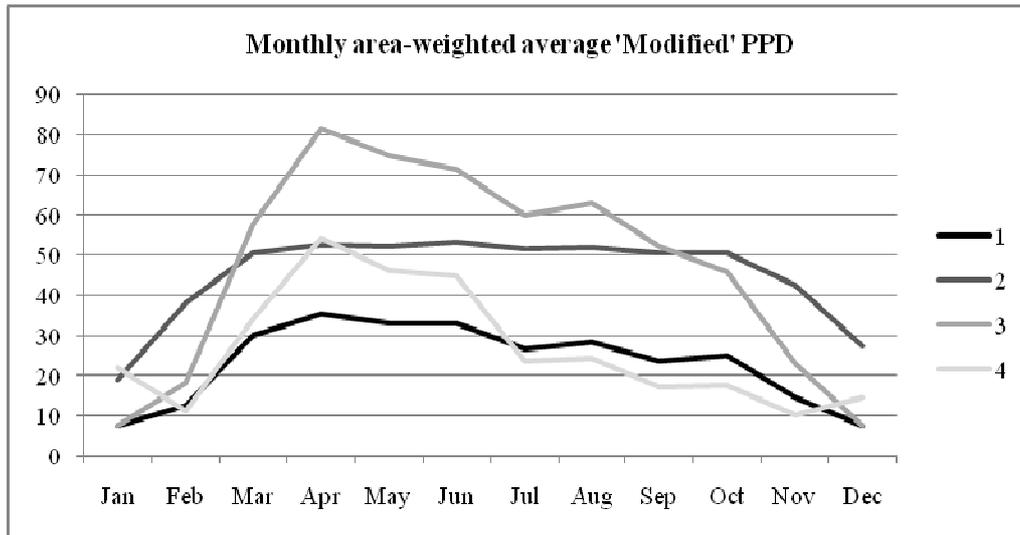


Figure 4, Monthly variation of area-weighted average modified PPD for the four runs

Results of the analysis are presented here in terms of zone area-weighted monthly and annual averages of hourly PPD values. Figure 2 shows that the Predicted Percentage of Dissatisfied decreases from 50% to 35% (on an average) when the PMV is modified to account for adaptive mechanisms, bringing the thermal comfort prediction closer to reality for mixed-mode buildings in warm and humid climates. The reduction is even more significant (37%) in case of Run 4 where ceiling fans lead to increased air speed.

In Figure 3, PPD increases from 1 to 2 in conditioned zones because of the increase in cooling setpoint temperature, and in non-conditioned zones because of unavailability of natural ventilation in Run 2. Switching off natural ventilation almost doubles the PPD in non-conditioned zones. Since both Runs 3 and 4 are both non-conditioned and naturally ventilated, the PPD levels are considerably high. They, however, decrease by almost half when air speed is increased to account for ceiling fans in Run 4. This indicates that controlling air speed with natural ventilation is a very important adaptive strategy, especially in the summer months, for a warm-humid climate like that of Kolkata.

Figure 4 shows monthly PPD values at a building level (area-weighted average of conditioned and non-conditioned zones). A very important observation to be drawn from this graph is that Run 1 with mixed-mode air conditioning and Run 4 with natural ventilation and ceiling fans, almost coincide, except during peak summer months of Apr-Jun. This indicates that air conditioning can be easily avoided during rest of the year through well-designed passive measures.

CONCLUSION: LESSONS LEARNT

Some of the experiences we have shared in this paper might be true for many other contexts and, therefore, are not novel. Nevertheless, since not much has been written to document the process of designing an energy efficient or a Code compliant building focusing on issues that we found were challenging on more than one levels, we have attempted to collate our experiences through this paper. The project is still a work in progress and we feel it is important to have another round of such documentation wherein we would be able to report more solutions rather than challenges of the situation.

In projects such as these, where multiple stakeholders are involved and some of the most critical issues are also the most challenging in nature, the importance of Integrated Design Process increases many-fold. In due course of the project, we realized that besides providing technical assistance, our role was increasingly becoming that of a facilitator. Having realized that, we felt that the most important task was to keep the interaction going in order to keep all the stakeholders in the loop. Gradually, we feel that it is very important to understand where to stop intermediating between two groups after a certain stage, for instance the architect and the product vendors, and encourage an exchange keeping our involvement to a minimum.

Results from the simulation exercise provided us with an important insight into the understanding of occupant thermal comfort for the given climatic conditions, reiterating the need for a revised thermal comfort model for a detailed building energy simulation analysis. Modeling of ceiling fans in both mixed-mode as well as naturally ventilated zones by

changing (increasing) the zone air velocity showed that they have a far greater impact on improving thermal comfort than we realized - the results show a significant improvement in PMV in summer months due to increased air movement. The improved PMV does not fall within the comfort range but is an improvement nonetheless. This will also be helpful in future to understand the already established thermal comfort models in the context of Indian climatic conditions and to set-up a more relevant set of simulation inputs for further exercises.

ACKNOWLEDGEMENT

This paper was made possible by the support of the United States Agency for International Development (USAID). The contents of this paper are the sole responsibility of International Resources Group (IRG) and do not necessarily reflect the views of USAID or the United States Government. The authors would like to acknowledge Ministry of Power and the Bureau of Energy Efficiency of the Government of India, and West Bengal Renewable Energy Development Agency, for their support. The authors would also like to express their gratitude to P. C. Thomas and Justin Wong of Team Catalyst for their assistance towards developing and running the simulations for the thermal comfort analysis.

REFERENCES

- Brager, G. S., de Dear, R. J. 1998. Thermal adaptation in the built environment: a literature review, *Energy and Buildings*, Vol. 27, pp. 83-96
- (BIS) Bureau of Indian Standards. 2005. National Building Code of India, Second Revision 2005, New Delhi, India
- EnergyPlus. 2009. EnergyPlus Engineering Reference, U. S. Department of Energy
- Fanger, P. O., Toftum J. 2002. Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates, *Energy and Buildings*, Vol. 34, pp. 533-536
- Fountain, M., Brager G., de Dear, R. 1996. Expectations of indoor climate control, *Energy and Buildings*, Vol. 24, pp. 179-182
- Nicol, J. F., Humphreys, M. A. 2002. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings, *Energy and Buildings*, Vol. 34, pp. 563-572

MESSTECHNISCHE UND SIMULATIONSBASIERTE ANALYSEN AN EINEM THERMISCHEN MODELLHAUS

Manuel Ljubijankic, Christoph Nytsch-Geusen, Michael Schmidt, Daniel Unterberg
 Institut für Architektur und Städtebau, Universität der Künste Berlin,
 D-10623 Berlin, Germany
 Email: nytsch@udk-berlin.de

SCHLÜSSELWÖRTER:

Thermisches Modellhaus, Messwerterfassung mittels LEGO-Mindstorms, vergleichende CFD-Analyse

KURZFASSUNG

Am Lehrstuhl für Versorgungsplanung und Versorgungstechnik der UdK Berlin wird ein thermisches Modellhaus für Lehr- und Forschungszwecke entwickelt [1]. Mit dieser Versuchseinrichtung soll in Lehrveranstaltungen das Grundprinzip der Raumenergiebilanz (messtechnische Analyse der thermischen Verluste und Gewinne sowie der Lufttemperaturschichtung), die Wärme- und Lufttransportvorgänge im Gebäude (z.B. Kamineffekt) sowie der Grundfunktionalitäten der energetischen Gebäudetechnik (Heizen, Kühlen, Lüften, Fassadenverschattung etc.) im realen physikalischen Prozess erfahrbar gemacht werden. Mittels vergleichender CFD-Simulationsrechnungen sollen die Wärmetransportvorgänge und die Raumluftströmungen innerhalb des thermischen Modellhauses analysiert werden.

ABSTRACT

A thermal model house is being developed at the chair of supply planning and building services engineering of UdK Berlin for the use in education and research [1]. With this testing facility the basic principle of the room energy balance (measurement analysis of the thermal losses and gains as soon as air temperature stratification), the heating transport and air movement phenomena (e.g. stack-effect) and also basic functionalities of energy building technologies (heating, cooling, ventilation, façade shadowing) shall be experienced within the real physical process. In addition, comparative CFD calculations were carried out to analyse the heating transfer processes and the air ventilation effects within the thermal model house.

EINFÜHRUNG

Das thermische Modellhaus wurde mit sehr kompakten Abmessungen konzipiert (Innenmaße: 1m x 0,5m x 0,5m), damit es von zwei Personen noch einfach transportiert werden kann (vgl. Abbildung 1).

Die mehrschichtigen Außenwände, der Boden und das Dach bestehen weitgehend aus Holz und Polystyrol und die Fenster aus einer Einfachverglasung.

Das Modellhaus wurde mit einer hohen Flexibilität ausgestattet: Seine Fassade und sein Dach können gegen Typen unterschiedlicher Bauart ausgetauscht werden. Optional lässt sich eine Innenwand ergänzen, welche das Gebäudeinnere in zwei getrennte thermische Zonen aufteilen kann. Jede dieser Zonen kann jeweils über eine Fußbodenheizung beheizt und/oder über eine Kühldecke mittels Peltier-Elemente gekühlt werden.



Abbildung 1 Thermisches Modellhaus mit Kühldeckenvariante

Zwei Zu- und Abluftventilatoren ermöglichen zudem einen kontrollierten Luftaustausch mit der Umgebung. Der thermische Zustand des Modellhauses wird über das *LEGO Mindstorms NXT 2.0 System* [2] messtechnisch erfasst und optional auch geregelt: Über Temperatursensoren werden z.B. die Außen- und Innenluftzustände gemessen und über einen programmierbaren Algorithmus weiterverarbeitet (z.B. Anpassung der Heizleistung zur Einhaltung einer Soll-Raumtemperatur).

DIDAKTISCHES KONZEPT

Bei der Ausbildung von Studierenden der Architektur sowie der fachplanerischen Studiengänge (Gebäudetechnik, Energietechnik, Bauingenieurwesen) werden das Fachwissen über das thermische "Funktionieren" des Baukörpers sowie die Strategien zur Herstellung bestimmter Raumklimata zunächst qualitativ diskutiert. Ergänzend werden bei der Wissensvermittlung bauphysikalische Rechenmodelle genutzt und in Simulationsexperimenten angewandt.



Abbildung 2 Das thermisches Modellhaus im Einsatz bei der studentischen Ausbildung (Durchführung eines Aufheizversuchs mit „künstlicher Sonne“)

I.d.R. fehlt aber darüber hinaus die Möglichkeit die bauphysikalischen Effekte in der Gebäudehülle (z.B. thermische Trägheit) oder die einzelnen Anteile in der thermischen Raumenergiebilanz (Wärmetransmission, Lüftungsverluste, kurzweilige Strahlungsgewinne etc.) für ein Gebäude im Experiment direkt messtechnisch erfahrbar zu machen (vgl. Abbildung 2).

Das in diesem Beitrag vorgestellte thermische Modellhaus soll helfen diese Lücke zu schließen, in dem mit ihm eine Versuchseinrichtung zur Verfügung gestellt wird, mit deren Hilfe alle wesentlichen Aspekte der Gebäudeheizung und -klimatisierung im Experiment nachvollzogen werden können. Hierzu gehören u.a.

- die Bestimmung von Transmissions- und Lüftungswärmeverlusten eines Raumes,
- die thermische Zonierung von Gebäuden,
- das Verstehen der thermischen Dynamik eines Raumes,
- die Analyse der thermischen Luftschichtung,
- die Einflüsse natürlicher und erzwungener Lüftung auf das Raumklima,

- der Einfluss kurzweiliger Strahlung auf die transparente Fassade und das Raumklima,
- die Untersuchung und Entwicklung von Regelungsstrategien zur Herstellung eines bestimmten Raumklimas (z.B. gezielte Beeinflussung der Heiz- und Kühlleistungen bzw. der Fassadenverschattungseinrichtung).

BAUKONSTRUKTION

Die Geometrie des Gebäudes ist symmetrisch gehalten (vgl. Abbildung 3): Durch die Spiegelung der linken und der rechten Gebäudehälfte in Wand- und Fensterabmaßen, sowie bzgl. der gedoppelten Fußbodenheizungen und Kühldecken werden klare Voraussetzungen für die Versuchsanordnungen geschaffen. Aus diesem Grund ist auch der Grundaufbau aller Decken und Wände im Sinne der Überprüfbarkeit gleich gehalten: 30mm Kerndämmung wird beidseitig von Holz (6mm / 12mm) bekleidet. Der Einsatz von besonders stabilen und verformungssicheren Multiplex-Sperrholz bietet robuste Stabilität für den Einsatz in der Lehre.

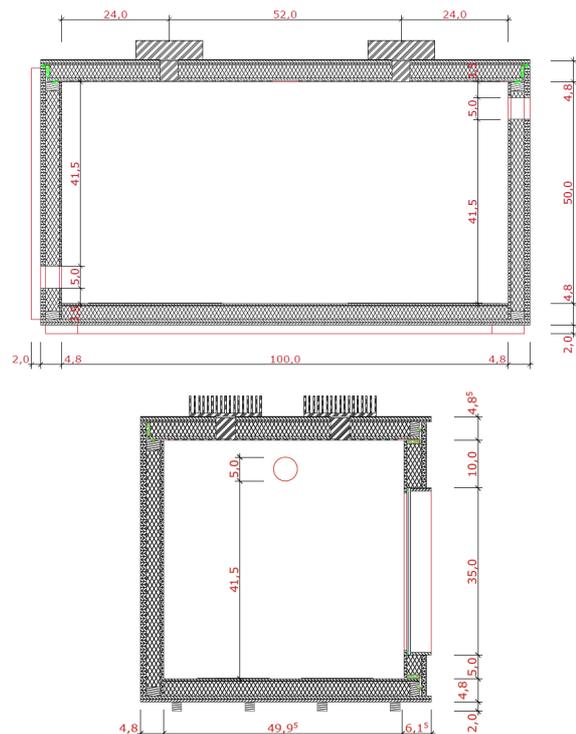


Abbildung 3 Baukonstruktion des thermischen Modellhauses im Längs- und Querschnitt

Alle Fugen sind mit dauerelastischem PU-Leim luftdicht verklebt. An den Doppelfalzen der austauschbaren Deckenteile und Vorderfront sorgen zwei Gummidichtungen für die Luftdichtheit, sodass durch die Ventilatoren ein definierter Luftstrom eingelassen werden kann. Die Fenster sind ebenfalls luftdicht eingebaut - können aber bei Bedarf auch angekippt werden.

Um Wärmebrücken zu vermeiden, wurde die gesamte Verkabelung der elektrischen Versorgung und der Meß- und Regeltechnik in maximal 8mm tiefen Kanälen in der Dämmebene direkt unter der inneren Verkleidung angelegt. Außerdem können einzelne Komponenten wie Stecker oder Kabel so bei Bedarf leicht ausgetauscht werden.

Eine mittig umlaufende Nut ermöglicht das Einsetzen von Innenwänden, welche dann das Modellgebäude in zwei gleich große thermisch getrennte Kammern mit jeweils eigenem Fenster und eigener Heiz- und Kühlfläche aufteilt. Eine Variante dieser Innenwände ist mit zwei klappbaren runden Öffnungen versehen, über welche ein Luftaustausch zwischen den beiden inneren Zonen über einen *LEGO Mindstorms NXT*-Stellmotor gezielt ermöglicht oder unterbunden werden kann.

GEBÄUDETECHNIK

Das thermische Modellhaus kann in seiner jetzigen Ausbaustufe sowohl über eine Flächenheizung als auch über eine Flächenkühlung klimatisiert werden. Zur Energieversorgung dieser beiden Funktionen werden zwei programmierbare Labornetzgeräte genutzt, über welche sich auch Leistungsprofile generieren und so dem Modellhaus als äußere Randbedingungen aufprägen lassen. Die Netzgeräte versorgen zwei „Fußbodenheizungen“ (Heizfolien) mit jeweils max. 70W Heizleistung oder zwei „Kühldecken“ mit jeweils max. 28W Kühlleistung (Peltier-Elemente). Alle Heiz- und Kühldecken lassen sich getrennt schalten, sodass im Versuch auch gleichzeitig geheizt und gekühlt werden kann. Die Verwendung vollflächiger Aluminiumplatten an Decke und Boden sorgt in beiden Fällen für eine gute Wärmeübertragung bei kleinen Temperaturdifferenzen.

Ein Zuluft- und ein Abluftventilator werden über ein eigenes regelbares Netzteil versorgt und ermöglichen gemeinsam einen maximalen Luftvolumenstrom von 27m³/h, was einem Luftwechsel von 108h⁻¹ entspricht. Die Ventilatoren sind in den beiden gegenüberliegenden Querseiten des Modellgebäudes eingelassen, wobei im unteren Bereich des Gebäudes die Außenluft einströmt und die Abluft im oberen Bereich das Gebäude verlässt.

MESSTECHNIK

Zur Messwerterfassung und -auswertung wird beim thermischen Modellhaus das *LEGO Mindstorms NXT 2.0* System [2] verwendet. Drei Temperatur-sensoren messen in der Standardversuchsordnung in der Raummitte die Lufttemperaturen in 7cm, 24cm und 42cm Höhe oberhalb der Fußbodenheizungen. Durch die relativ große geometrische Ausdehnung der derzeit verwendeten NXT-Temperatur-sensoren kann die horizontale Position der gemessenen

Lufttemperaturen nur ungefähr angegeben werden. In Erwartung, dass der Sensor jedoch an der Spitze des Metallstabes am empfindlichsten ist, wurden sie so ausgerichtet, dass die Spitze genau in der Raummitte liegt. Über adaptive Halterungen können die Lufttemperatur-sensoren auch leicht an anderen Punkten im Raum positioniert werden. Ein weiterer Temperatursensor zusätzlich die Umgebungslufttemperatur in etwa einem halben Meter Abstand zum Modellhaus.

Die Messwerte werden über einen NXT-Baustein erfasst, dort zwischengespeichert und zur Darstellung und weiteren Auswertung an das auf LabVIEW basierende NXT-Datenaufzeichnungs-programm weitergeleitet (vgl. Abbildungen 4 und 5).



Abbildung 4 Messwerterfassung über das *LEGO Mindstorms NXT 2.0* System (Temperatursensor und NXT-Baustein zur Datenaufzeichnung)

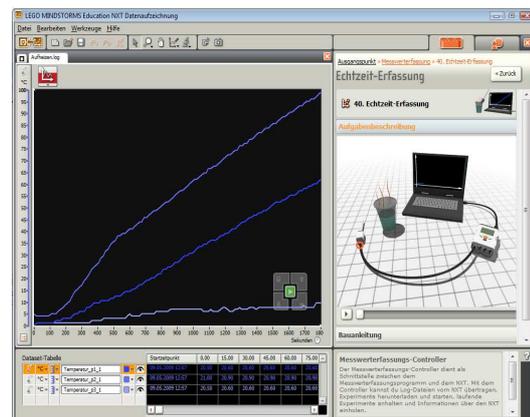


Abbildung 5 Datenaufzeichnungsprogramm des *LEGO Mindstorms NXT 2.0* System

MESSTECHNISCHE UNTERSUCHUNGEN AM MODELLHAUS

Im Rahmen einer Studienarbeit [3] wird das thermische Modellhaus derzeit intensiv vermessen. Das Messprogramm umfasst verschiedene Szenarien zur Gebäudeheizung und zur Gebäudekühlung. Abbildung 6 zeigt den gemessenen Verlauf der Lufttemperaturen für den reinen Aufheizvorgang, bei dem beide Heizflächen mit einer konstanten Leistung (2 x 60W, mit durch das Netzteil bedingte Schwankungen von +/- 2W) betrieben werden und der Luftwechsel mit der Umgebung unterdrückt wird.

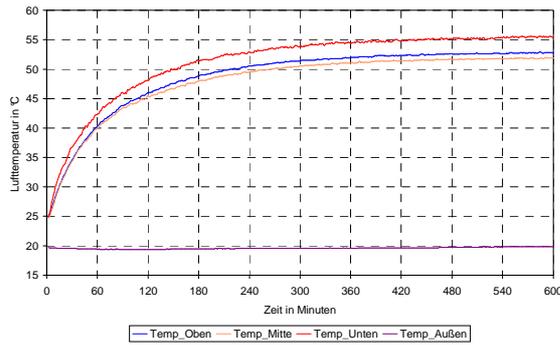


Abbildung 6 Aufheizvorgang ohne Außenluftwechsel bei voller Heizleistung (2 x 60W)

Es stellt sich eine maximale Raumlufttemperatur von ca. 52 bis 56°C bei einer Umgebungstemperatur von knapp 20°C nach ca. 10 Stunden Aufheizzeit ein. Während der gesamten Aufheizphase zeigt der Temperatursensor über der Bodenheizplatte den höchsten Wert an. Im thermisch eingeschwungenen Zustand kann mit dem Aufheizversuch aus der Differenz der Außenlufttemperatur (20,1°C) und der über die drei Sensoren gemittelten Raumlufttemperatur (53,7°C) bei bekannter Heizleistung (120W) für das Modellhaus ein thermischen Verlustfaktor von 3,6W/K bestimmt werden.

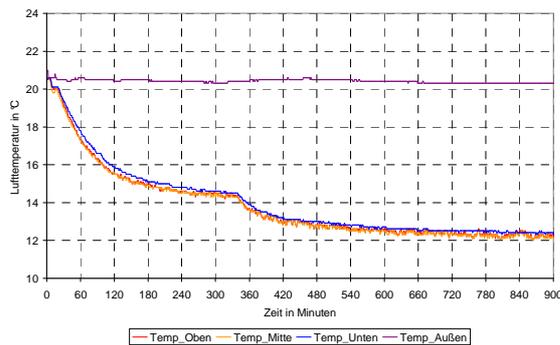


Abbildung 7 Abkühlvorgang ohne Außenluftwechsel bei voller Kühlleistung

Abbildung 7 zeigt den gemessenen Verlauf der Lufttemperaturen für den reinen Abkühlvorgang, bei dem Peltier-Elemente zunächst 340 Minuten mit verminderter elektrischer Leistung und danach mit voller elektrischer Leistung (2 x 40W) betrieben werden. Auch in diesem Versuch ist der Luftwechsel mit der Umgebung unterdrückt.

Bei voller Kühlleistung der Peltier-Elemente stellt sich nach ca. 15 Stunden Abkühlzeit ein stationärer Zustand ein, wobei an den drei Meßpunkten Raumlufttemperaturen von etwas über 12°C bei einer Umgebungslufttemperatur von 20,3°C gemessen werden. Während der gesamten Abkühlphase liegen die Werte aller drei Temperatursensoren dicht beieinander, wobei die Lufttemperatur in Bodennähe stets minimal nach oben abweicht. Auf Grundlage des im Heizversuch ermittelten thermischen Verlustfaktors von 3,6W/K, einer maximal

erzielbaren Differenz zwischen der Außenlufttemperatur und der aus den drei Meßpunkten gemittelten Raumlufttemperatur vom 8,0°C ergibt sich für den Gleichgewichtszustand eine aus dem Raum abgeführte Kälteleistung von ca. 29W. Dies entspricht einem mittleren COP (Coefficient of Performance) für die Peltier-Elemente unter realen Betriebsbedingungen von

$$COP = \frac{Q_{kühlen}}{P_{elektrisch}} = \frac{29W}{80W} = 0,36.$$

MODELLIERUNG UND SIMULATION

Für eine vergleichende theoretische thermische Analyse wurde die Gebäudehülle des thermischen Modellhauses als dreidimensionaler wärmeleitender Baukörper und sein Raumluftvolumen als dreidimensionales Strömungsgebiet mittels des Simulationswerkzeugs ANSYS-CFD [4] modelliert (vgl. Abbildung 8).

Die dreidimensionale Modellierung hat den Vorteil, dass die am realen Modellhaus erhobenen Messwerte direkt mit den Simulationsergebnissen des numerischen Modells verglichen werden können.

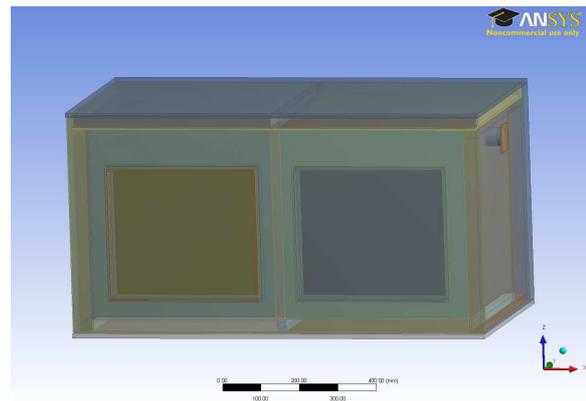


Abbildung 8 Thermischen Modellhauses, modelliert in ANSYS CFD

Darüber hinaus können im numerischen Modell auf diese Weise alle geometrischen und stofflichen Wärmebrücken realitätsnah abgebildet werden. Die detaillierte dreidimensionale Modellierung in ANSYS-CFD erfordert einen hohen Berechnungsaufwand. Das Berechnungsgebiet der Gebäudehülle (Festkörper) wird für eine ausreichende Berechnungsgenauigkeit in 0,35Mio. Volumenelemente und die des Raumluftvolumens in 2,14Mio. Volumenelemente diskretisiert.

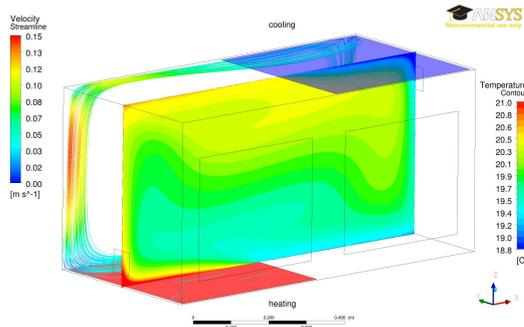


Abbildung 9 CFD-Simulation des kombinierten Heiz- und Kühlfalls
(Temperaturfeld und Stromlinien)

Abbildung 9 zeigt eine beispielhafte stationäre Simulation für einen gemischten Heiz- und Kühlfall, bei dem die linke Bodenheizplatte beheizt und die rechte Kühldecke gekühlt wird. Die Außenlufttemperatur wurde hierbei mit 20°C angenommen. Die Heiz- und Kühlleistungen sind vom Betrag her gleich groß (15W), so dass die Energiebilanz des Modellhauses insgesamt ausgeglichen ist. Die Simulationsrechnung zeigt bei dieser Konfiguration für den Raumluftzustand eine maximale Luftgeschwindigkeit von 0,15m/s bei einem vertikalen Temperaturgradient von knapp 2°C.

VERGLEICH MESSUNG / SIMULATION

Für die Variante des reinen Aufheizversuchs ohne Außenluftwechsel (vgl. Abbildung 6) wird ein vergleichendes stationäres CFD-Simulationsexperiment, basierend auf einem k-ε-Modell gegenübergestellt. Hierzu wird dem Simulationsmodell als äußere Randbedingung die gemessene Außenlufttemperatur im thermisch eingewungenen Zustand nach 600 Minuten (19,8°C) sowie den Fußbodenheizungen ein Wärmestrom von jeweils 60W aufgeprägt.

Abbildung 10 zeigt die berechneten Geschwindigkeitsvektoren im Längsschnitt in der Gebäudemitte sowie im Querschnitt des Gebäudes auf der Mitte der rechten Gebäudehälfte (vgl. Schnittebenen der Abbildung 12). Es ist deutlich zu erkennen, daß die maximalen Luftgeschwindigkeiten von 0,14m/s, auf Grund der sich einstellenden freien Konvektion, direkt oberhalb der Fußbodenheizung auftreten. Auf Grund der Wärmeverluste durch die Gebäudehülle sinkt die sich abkühlende Luft an den Gebäudeseiten herab, streicht über beide Heizflächen in Richtung Raummitte und steigt dann erwärmt in der Mitte des Modellhauses bis zur Decke, wo sich die warme Luft sammelt. Der erhöhte Transmissionswärmeverlust durch die beiden Fenster bewirkt an der Innenfensteroberfläche eine verstärkte Abwärtsbewegung der abgekühlten Raumluft.

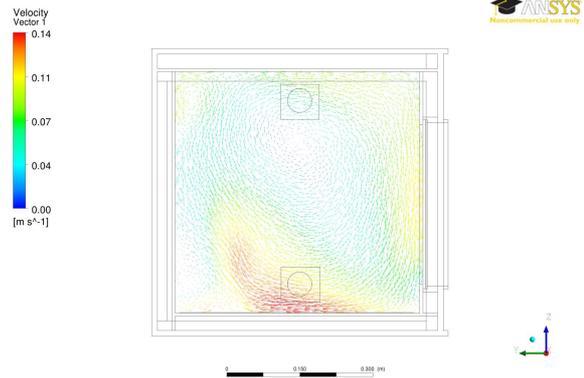
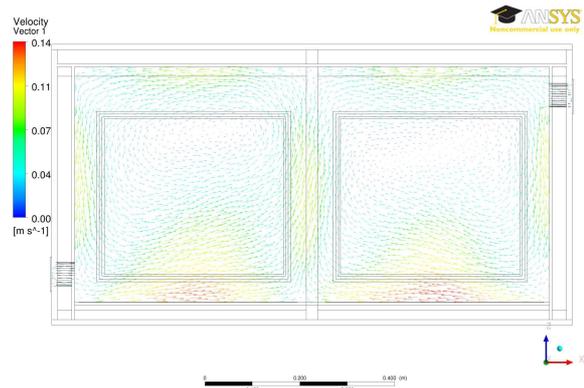


Abbildung 10 CFD-Simulation des Heizfalls
(Strömungsfelder der Raumluft im Längs- und Querschnitt)

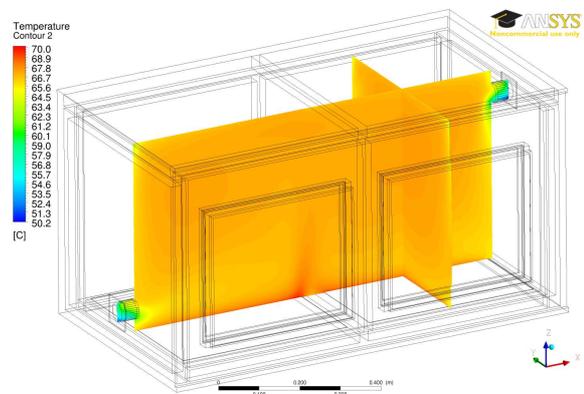


Abbildung 11 CFD-Simulation des Heizfalls
(Temperaturfelder der Raumluft)

Aus Abbildung 11 ist zu ersehen, dass sich im Modellhaus ein relativ gering ausgeprägter vertikaler Temperaturgradient bei der Raumluft einstellt. Es wurde eine über das gesamte Raumluftvolumen gemittelte Temperatur von 66,9°C im Simulationsexperiment berechnet. Die geringsten Lufttemperaturen von ca. 5°C finden sich in den Bereichen der mit dicker Pappe und Klebeband abgedichteten Luftein- und auslässe, da diese beiden Orten eine Wärmebrücke darstellen.

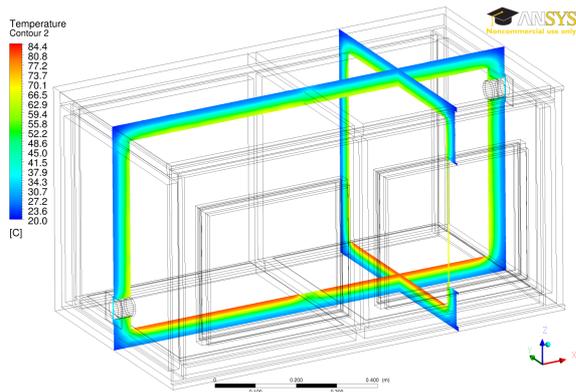


Abbildung 12 CFD-Simulation des Heizfalls
(Temperaturfelder in der Gebäudehülle)

In Abbildung 12 ist auf den gleichen Schnittebenen der Temperaturverlauf in der Baukonstruktion des Modellhauses und in den Fußbodenheizplatten dargestellt. Deutlich ist der Wärmebrückeneffekt in den Wand- und Bodenanschlüssen, den Luftein- und auslässen sowie bei den einfach verglasten Fenstern zu sehen. Die höchsten Temperaturen von gut 80°C treten an der Oberfläche der Fußbodenheizungen auf. Die Simulation zeigt aber auch, daß der Fußboden nach unten ausreichend gedämmt ist, so dass die Heizwärme nahezu ausschließlich der Raumluft zugeführt wird.

Der direkte Vergleich von gemessener und simulierter Raumlufttemperatur läßt sich zur Zeit erst ansatzweise durchführen. Werden die Lufttemperaturen im Versuch und in der Simulation an den gleichen Positionen verglichen, stellt sich in beiden Fällen qualitativ die gleiche Abfolge bei den Temperaturniveaus ein (höchste Temperatur über der Heizplatte, zweit höchste Temperatur unter der Decke, gefolgt von der Temperatur in Raummitte).

Allerdings liegen die im Aufheizversuch gemessenen Werte mit ca. 52°C - 56°C insgesamt noch deutlich unterhalb der in der Simulation ermittelten durchschnittlichen Raumlufttemperatur von 66,9°C. Daher wird nun sowohl auf experimenteller Seite als auch auf CFD-Modellierungsebene versucht die Fehlerquellen für diese erhebliche Abweichung aufzufinden und abzustellen. Als mögliche Ursachen und Abhilfen kommen hierfür in Betracht:

- zusätzlicher Wärmeverlust beim thermischen Modellhaus auf Grund eines unkontrollierten Luftwechsels durch eventuell noch vorhandener Undichtigkeiten an der Gebäudehülle
→ Verbesserung der Gebäudeabdichtung,
- eventuelle Meßungenauigkeit der Sensoren
→ derzeit werden die Standard NXT-Temperatursensoren mit hochwertigeren Temperatur-Meßfühlern verglichen,

- eventuell nicht repräsentative Positionen für die Meßfühler
→ wiederholte Messungen mit alternativen Meßfühleranordnungen,
- Unzulänglichkeiten des numerischen CFD-Modells
→ Verwendung von noch örtlich besser aufgelöster Diskretisierungen, Berechnungen mit alternativen ANSYS CFD-Strömungsmodellen.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In der jetzigen Ausbaustufe besitzt das thermische Modellhaus die Grundfunktionen Flächenheizung, und Flächenkühlung sowie Lüften. Mit vergleichenden CFD-Simulationsrechnungen läßt sich zur Zeit das experimentell ermittelte Verhalten im reinen Aufheizversuch qualitativ, jedoch noch unzureichend quantitativ nachvollziehen.

Zukünftig soll über eine weiteres Zusatzmodul die beiden Funktionen „Luftheizung“ und „Luftkühlung“ ergänzt werden, wobei die ebenfalls über Peltier-Elemente vorkonditionierte Zuluft über die bisherige Ventilatoröffnungen eingebracht bzw. als Abluft abgeführt werden soll.

Eine weitere Ausbaustufe sollen geregelte Funktionen über das Lego Mindstorms NXT System darstellen, wie z.B. der motorbetriebene Regelung einer Verschattungseinrichtung (Außenrollo) in Abhängigkeit der gemessenen Helligkeit im Modellhaus und/oder der Raumlufttemperatur.

LITERATUR

- [1] Homepage Thermisches Modellhaus:
<http://www.thermisches-modellhaus.de>
- [2] Homepage Lego Mindstorms NXT:
<http://mindstorms.lego.com>
- [3] Michael Schmidt: Messtechnische Untersuchung, Modellierung und Simulation des thermischen Modellhauses. Studienarbeit an der TU Berlin (in Bearbeitung), 2010
- [4] Homepage ANSYS CFD:
<http://www.ansys.com/products/fluid-dynamics/cfd>

STRUKTURBILDUNG IN REALITÄTSNAHEN INNENRÄUMEN

Claudia Kandzia und Dirk Müller
 RWTH Aachen, E.ON Energy Research Center
 Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik

Mathieustraße 6, 52074 Aachen
 Email: ckandzia@eonerc.rwth-aachen.de

ABSTRACT

Thermal comfort and the ventilation effectiveness are important targets for the construction of modern supply systems. Both targets depend on the distribution of local temperatures and velocities of air in a room. In a new experiment the modelling processes in room air streams are examined experimentally. The construction of the test facility provides forced convection in the upper part of the room due to the supply air jets and free convection at the walls of the heat sources. A comparison of the experimental data of the room air structure inside the test facility with a CFD simulation shows similar results.

KURZFASSUNG

Menschen in der Industriegesellschaft verbringen mehr als 90 % ihrer Zeit in Innenräumen. Bei der Auslegung von Gebäuden ist die thermische Behaglichkeit daher ein wichtiges Kriterium. Diese ist abhängig von der lokalen Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilung im Raum. Das instationäre Verhalten dieser Strömungsstrukturen ist auch heute noch nur unzureichend erforscht.

In einem neuen Experiment werden Strukturbildungsprozesse in Raumluftströmungen untersucht. Die dafür aufgebaute Versuchskabine hat eine für Innenräume charakteristische Geometrie. Vergleiche der experimentellen Untersuchungen mit CFD Simulationen zeigen ähnliche Ergebnisse.

AUFBAU DER VERSUCHSKABINE

Die Versuchskabine ist drei Meter hoch, vier Meter breit und fünf Meter tief. Über die gesamte Länge der Versuchskabine sind direkt unter der Decke an beiden Seiten des Prüfraumes Schlitzdurchlässe angebracht. Jeder der Durchlässe ist einen Meter lang, so dass ein gleichmäßiges Geschwindigkeitsprofil der Zuluft über die gesamte Länge der Versuchskabine gewährleistet werden kann. Ein Volumenstromregler vor jedem Durchlass ermöglicht das Variieren der Zuluftgeschwindigkeit zwischen 0,8 m/s und 5,0 m/s. Die sich daraus ergebende Reynoldszahl liegt somit zwischen 1000 und 6500.

Die Abluftdurchlässe befinden sich im Bodenbereich der Versuchskabine. Acht Volumenstromregler

garantieren ein gleichmäßiges Abführen der Luft aus der Versuchskabine.

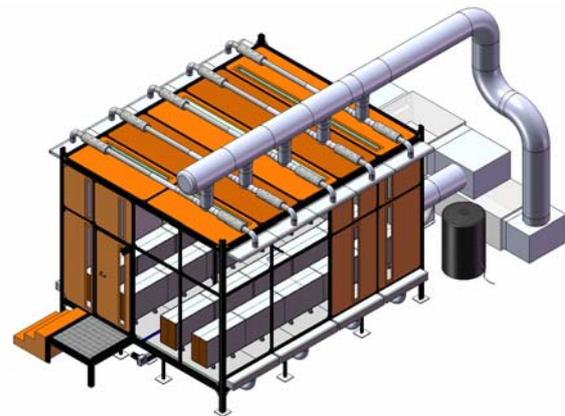


Abbildung 1 Versuchskabine: Aachener Modellraum

In Abbildung 1 ist die beschriebene Innenraumgeometrie dargestellt.

Thermische Lasten in der Versuchskabine werden mithilfe von elektrisch beheizten Wärmequellen bereitgestellt. Die Wärmequellen sind 0,6 Meter hoch, 0,4 Meter breit und 5,0 Meter lang. Sie sind aus Aluminiumplatten gefertigt, die mit Heizfolien beklebt sind. Durch das Einbringen von Dämmmaterial im Inneren der Wärmequellen wird eine Temperaturschichtung vermieden. Die Leistung der Wärmequellen kann mithilfe von Labornetzgeräten zwischen 0 und 6000 Watt variiert werden. Abbildung 2 zeigt die Wärmequellen in der Versuchskabine.



Abbildung 2 Wärmequellen in der Versuchskabine

Der Aufbau der Versuchskabine berücksichtigt sowohl freie Konvektionsströmung an den in der

Versuchskabine befindlichen Wärmequellen als auch die erzwungene Konvektion im Bereich der Zuluftdurchlässe im Deckenbereich

Neben experimentellen Untersuchungen werden numerische Berechnungen durchgeführt.

Für den Vergleich der Messergebnisse mit Ergebnissen numerischer Berechnungen ist es hilfreich Effekte einzeln bestimmen und den Strahlungseinfluss vernachlässigen zu können. Mit dieser Randbedingung können die Rechenzeiten verkürzt werden. In der Versuchskabine sind alle Innenwände mit Aluminiumfolie beklebt. Aluminium-folie hat einen sehr niedrigen Emissionsgrad, was das Vernachlässigen des Strahlungseinflusses ermöglicht.

In den beiden Längsseiten des Prüfraumes sind fünf, an Vorder- und Rückseite jeweils vier Sichtfenster eingebaut. Jedes dieser Sichtfenster ist 0,1 Meter breit. So kann der Einsatz optischer Messtechnik ermöglicht werden.

In Abbildung 3 sind die Sichtfenster für die optische Messtechnik und die mit Aluminiumfolie beklebten Innenoberflächen dargestellt.



Abbildung 3 Mit Aluminiumfolie beklebte Innenoberflächen und Sichtfenster

Die Temperatur in jedem Zu- und Abluftdurchlass wird mithilfe von Widerstandsthermometern gemessen. In der Versuchskabine ist eine Traversiervorrichtung eingebracht. An dieser befinden sich an der horizontalen Achse zwölf Geschwindigkeitssensoren und ebenfalls zwölf Widerstandsthermometer in einem Abstand von jeweils 0,33 Metern. So kann sowohl die Geschwindigkeit als auch die Temperatur an nahezu allen Punkten im Raum gemessen werden. Für die Messungen der Geschwindigkeit werden omnidirektionale Geschwindigkeitssensoren verwendet. Sie senden alle zwei Sekunden einen über 16 Werte gemittelten Wert der Geschwindigkeit per Funksignal an den Rechner.

Von besonderem Interesse bei diesen experimentellen Untersuchungen sind instationäre Effekte der Strömungsstrukturen. Die Messzeit der Geschwindigkeit und der Temperatur beträgt daher bis zu 30 Minuten an einem Messort.

Die Funkboxen der Geschwindigkeitssensoren, der Datalogger für die Temperatursensoren und die Motoren für die Traverse sind unterhalb des Prüfstandes befestigt. So kann der Einfluss der Traverse auf die Raumluftrömungsstruktur minimiert werden. In Abbildung 4 ist die vertikale Achse der Traverse in der Versuchskabine und die Haltevorrichtung unterhalb des Prüfstandes dargestellt.



Abbildung 4 Traversiervorrichtung

ERGEBNISSE

Für den Vergleich der experimentellen Untersuchungen mit den Ergebnissen der numerischen Berechnung sind sowohl örtlich als auch zeitlich konstante Randbedingungen für die Messungen notwendig. Daher ist ein gleichmäßiges Geschwindigkeitsprofil über die gesamte Länge des Zuluftdurchlasses zu gewährleisten.

Messtechnische Untersuchungen am Zuluftdurchlass geben Aufschluss über die Randbedingungen direkt am Einlass. Diese werden für erste experimentelle Untersuchungen zur Raumluftrömungsstruktur im Inneren der Versuchskabine genutzt.

In Abbildung 5 ist die Strömungsvisualisierung der austretenden Luft an zwei Zuluftdurchlässen dargestellt. Es ist ein gleichmäßiges Geschwindigkeitsprofil über die gesamte Länge des Durchlasses zu erkennen. Des Weiteren kann verdeutlicht werden, dass das Verbinden zweier Durchlässe nahezu keinen Einfluss auf die Strömungsstruktur hat.



Abbildung 5 Visualisierung der austretenden Strömung an zwei Zuluftdurchlässen

Detailliertere Informationen über die austretende Geschwindigkeit an einem Zuluftdurchlass werden mit hochauflösenden Messungen mit dem Laser-Doppler-Anemometer (LDA) erzielt. Mit dem LDA

können zwei Geschwindigkeitskomponenten gemessen werden, die Komponente in Hauptströmungsrichtung und eine Komponente senkrecht dazu.

In Abbildung 6 sind zwei verschiedene Messebenen über dem Zuluftdurchlass dargestellt. In der Mitte des Durchlasses (Messebene 1) wird über die gesamte Länge des Durchlasses ein Geschwindigkeitsprofil vermessen. Über die Höhe des Durchlasses (Messebene 2) werden die Geschwindigkeitskomponenten vermessen, um zusätzlich Aussagen über die turbulente kinetische Energie treffen zu können.

Neben den Messebenen sind in der Abbildung zusätzlich fünf Distanzstücke abgebildet. Mithilfe dieser wird eine gleichmäßige Höhe von 20 mm über die gesamte Länge des Durchlasses erreicht.

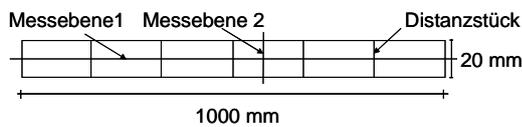


Abbildung 6 Messebenen am Zuluftdurchlass

In Abbildung 7 ist das Geschwindigkeitsprofil in Hauptströmungsrichtung und senkrecht zu dieser dargestellt. Die Geschwindigkeitsprofile sind für zwei verschiedene Entfernungen (2 mm und 30 mm) von der Durchlassöffnung aufgetragen.

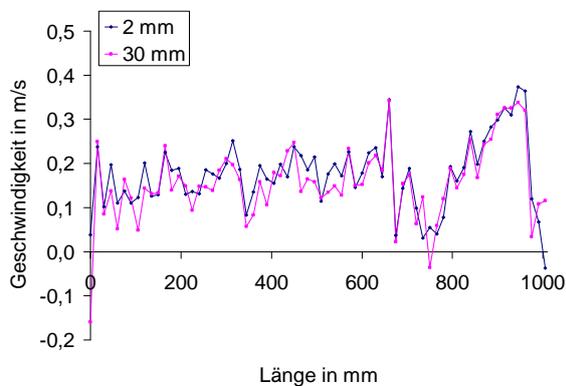
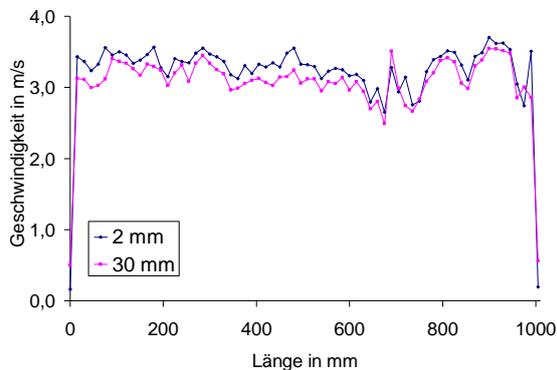


Abbildung 7 Geschwindigkeitsprofile in Hauptströmungsrichtung und senkrecht zu dieser

Beide Entfernungen liefern ein sehr gleichmäßiges Geschwindigkeitsprofil. Die mittlere Geschwindigkeit

liegt dabei bei etwa 3,3 m/s in Hauptströmungsrichtung.

Die Messung der Geschwindigkeitskomponenten in Messebene 2 (Abbildung 6) soll Aufschluss über das Geschwindigkeitsprofil und die turbulente kinetische Energie über die Höhe der Durchlassöffnung geben. Diese Messung wird direkt an der Durchlassöffnung durchgeführt. Die Berechnung der turbulenten kinetischen Energie basiert auf den Schwankungsgrößen der Geschwindigkeit und erfordert alle drei Geschwindigkeitskomponenten. Da mit dem LDA lediglich zwei Geschwindigkeitskomponenten gemessen werden können, wird die Komponente senkrecht zur Hauptströmungsrichtung doppelt gewichtet. Voraussetzung für diese Annahme ist, dass die Turbulenz als isotrop betrachtet werden kann.

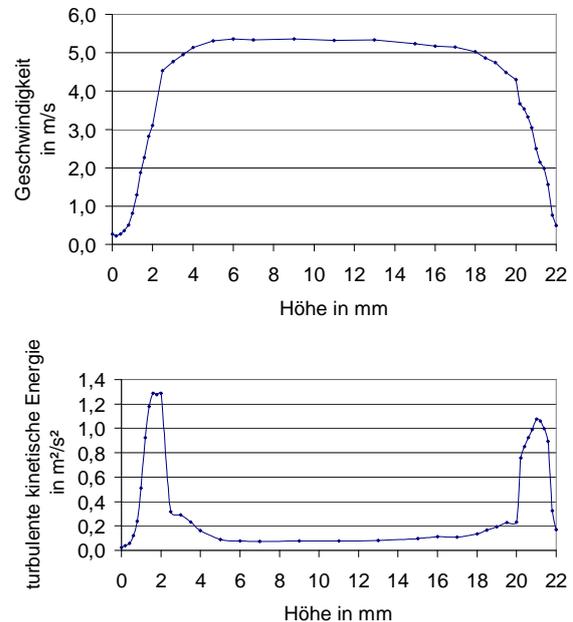


Abbildung 8 Profil der turbulenten kinetischen Energie und der Geschwindigkeit

In Abbildung 8 ist die turbulente kinetische Energie sowie das Geschwindigkeitsprofil über die Höhe des Durchlasses dargestellt. Beide Verläufe entsprechen den erwarteten Werten.

Mithilfe von CFD Simulationen mit dem $k-\omega$ Baseline Modell [1] werden erste Informationen zu den Raumluftströmungsstrukturen im Inneren der Versuchskabine gewonnen. In Abbildung 10 ist die über 1000 Sekunden zeitlich gemittelte Geschwindigkeit für die mittlere Ebene der Versuchskabine dargestellt.

Die Zuluftstrahlen legen sich an der Decke an, treffen sich in der Mitte der Versuchskabine, bilden einen gemeinsamen Strahl und strömen abwärts. Neben dem Strahl hoher Geschwindigkeit bilden sich

links und rechts von diesem Raumwalzen niedriger Geschwindigkeiten aus. Die Geschwindigkeiten in der Mitte dieser Raumwalzen sind nahezu Null.

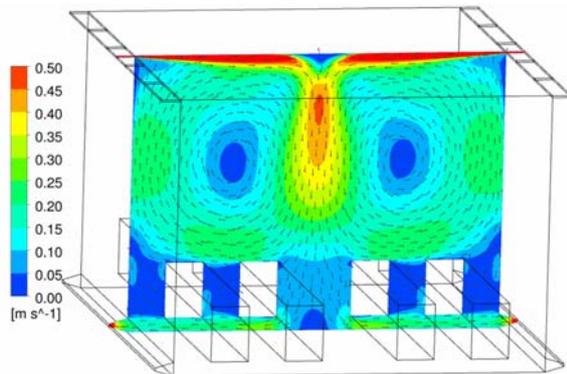


Abbildung 9 Ergebnisse der CFD Simulation mit dem $k-\omega$ BaselineModell

Die ersten experimentellen Untersuchungen werden bei isothermen Randbedingungen durchgeführt. Basierend auf den Simulationsergebnissen werden für diese Experimente drei verschiedene Messhöhen (1,1 m 1,7 m and 2,5 m) in der Versuchskabine definiert. Die Messungen werden in der Mitte der Versuchskabine durchgeführt. Die Zuluftgeschwindigkeit beträgt wie im Fall der Simulation 1,5 m/s.

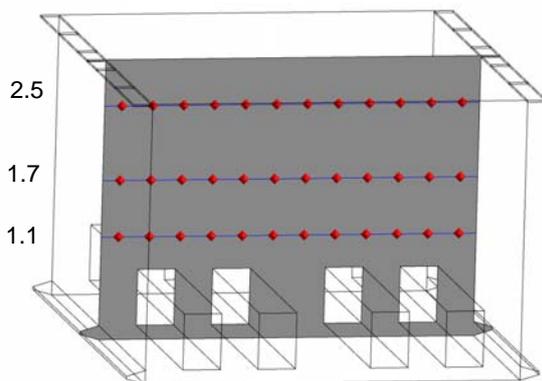


Abbildung 10 Messebenen in der Versuchskabine

In Abbildung 11 ist der Vergleich der experimentellen Untersuchungen mit den Ergebnissen der numerischen Berechnung dargestellt. Der beschriebene Einfluss der Zuluftstrahlen kann auch in den Messergebnissen gefunden werden. In einer Höhe von 2,5 m sind die Geschwindigkeiten in der Mitte der Versuchskabine deutlich höher als im Randbereich. In einer Höhe von 1,7 m ist neben den höheren Geschwindigkeiten in der Mitte der Versuchskabine zu sehen, dass die Geschwindigkeiten links und rechts davon etwas niedriger sind als im Randbereich der Versuchskabine. Dies lässt vermuten, dass die Walzenstruktur der Strömung bei einer hoch aufgelösten Messung ebenfalls gefunden wird.

In einer Höhe von 1,1 m ist die mittlere Geschwindigkeit über die gesamte Breite der

Versuchskabine mit einem Wert von 0,15 m/s nahezu konstant.

Die Geschwindigkeitssonde an Position 7 ist während dieser Messung ausgefallen. Der Wert der mittleren Geschwindigkeit ist daher Null.

Der Vergleich zwischen Experiment und Simulation zeigt eine ähnliche Geschwindigkeitsverteilung.

Mithilfe der Simulationsergebnisse ist es möglich, eine sinnvolle Messzeit der Geschwindigkeit und der Temperatur im Inneren der Versuchskabine zu bestimmen. Des Weiteren können signifikante Gebiete der Strömungsstrukturen ermittelt werden.

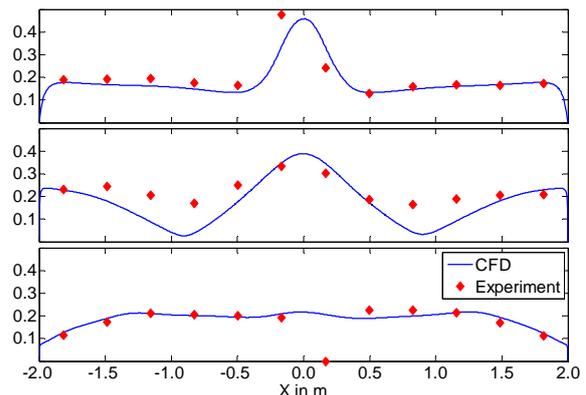


Abbildung 11 Vergleich zwischen Simulation und Experiment

DANKSAGUNG

Wir danken der DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) für die finanzielle Unterstützung.

LITERATUR

- [Menter 1994] MENTER, F.: Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. In: *AAA Journal* 32 (1994), S.1598–605

AEROELASTISCHE UNTERSUCHUNGEN EINER DACHSTRUKTUR

Bernd Hagenah¹, Helmut Steiner²

¹Gruner GmbH, Otto-Bauer-Gasse 6, 1060 Wien, Österreich
 E-Mail: bernd.hagenah@gruner.at

²ÖBB Infrastruktur AG, Projektleitung Koralmbahn 1, Griesgasse 11, 8020 Graz, Österreich
 E-Mail: Helmut.Steiner2@oebb.at

ABSTRACT

The Austrian Federal Railways (ÖBB) plan a new roof construction for the Graz main railway station. The open span of the arched steel beams has a width of up to 40m.

A large width between supports can lead to a risk of self induced displacement (flutter) of the roof, due to the dynamic interaction of air flow and the elastic behaviour of the structure.

A numerical analysis of the aerodynamic (Flutter) stability of the roof construction has been conducted with a 2D-Euler CFD method for moving grids. The following results were achieved:

- The analysed cases (lowest Eigenfrequencies) are aerodynamically damped and hence, stable for the applied air speeds.
- The aerodynamic damping decreases with increasing air speed.
- The aeroelastic stability of the roof construction for the air speed of 20.4 m/s(ÖNORM, 2009) has been confirmed.

KURZFASSUNG

Im Zuge des von der österreichische Bundesbahn (ÖBB) betriebenen Umbaus des Grazer Hauptbahnhofes ist es notwendig die vorhandenen Bahnsteigdächer im Zentralbereich zu ersetzen. Die geplante bogenförmige Dachkonstruktion mit Stützweiten über 40 m überdeckt mehrere Gleisachsen und Bahnsteige.

Bei Dachkonstruktionen großer Stützweite besteht die Gefahr selbst erregter Schwingungen, die auf die dynamische Wechselwirkung von Luftströmung und elastischer Struktur zurückzuführen sind.

Zur Untersuchung der aerodynamischen Stabilität der Dachkonstruktion wurde ein CFD-Verfahren auf Basis der 2D-Euler-Gleichungen genutzt. Die aeroelastischen Untersuchungen ergaben folgende Erkenntnisse:

- Alle betrachteten Rechenfälle sind aerodynamisch gedämpft.

- Mit zunehmender Anströmgeschwindigkeit nimmt die aerodynamische Dämpfung ab.
- Die aeroelastische Stabilität der Dachkonstruktion ist für die Anströmgeschwindigkeit gemäß ÖNORM von 20.4 m/s nachgewiesen.

EINLEITUNG

Der Bahnhof Graz Hauptbahnhof ist mit einer täglichen Kundenfrequenz von derzeit rund 30.000 und zukünftig 40.000 Personen einer der wichtigsten Verkehrsknotenpunkte Österreichs. Durch den Bau der Koralmbahn, des Semmering-Basistunnels und den Verbesserungen entlang der Pyhrn-Schober-Achse wird Graz zu einem Knotenpunkt mit weiterhin stark steigender nationaler sowie internationaler Bedeutung. Dies erfordert eine entsprechende Anpassung der bestehenden Eisenbahnanlagen an die zukünftig zu erwartenden betrieblichen Anforderungen und Erfordernisse.

DIE BAHNSTEIGDÄCHER

Die derzeit bestehenden Bahnsteigdächer stammen aus mehreren Epochen und wurden teilweise als Provisorien errichtet und entsprechen nicht mehr den heutigen Anforderungen, die an eine zeitgemäße Infrastruktur gestellt werden. Die durch den Bahnhofumbau erforderlichen neuen Abmessungen der Bahnsteige hinsichtlich Lage, Länge, Breite, Höhe machen den Abbruch der bestehenden Dächer unumgänglich.

Die vorhandenen räumlichen Randbedingungen des Grazer Hauptbahnhofs, ermöglichen eine Verbreiterung der Inselbahnsteige nur in sehr beschränktem Ausmaß. Durch die geplante zentrale Dachkonstruktion die mehrere Bahnsteige und Gleisachsen überdeckt wird eine möglichst stützenlose und somit gut nutzbare Bahnsteiggestaltung erreicht



Abbildung 1 Draufsicht der geplanten Dachstruktur

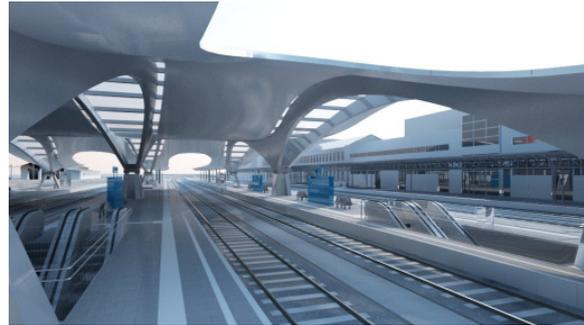


Abbildung 3 Ansicht von einem Bahnsteig



Abbildung 2 Seitenansicht der geplanten Dachstruktur (oben) sowie Ansicht von einem Bahnsteig (unten)

Die sechs Bogenträger sind Zweifeldträger mit Spannweiten von über 40 m und werden als dichtgeschweißte Stahlkästen ausgebildet, die in ihrer Konfiguration dem Kräfteverlauf folgen und im Auflagerbereich bis zu 4 m Bauhöhe aufweisen. Pro Bahnsteig ist ein Hauptträgerpaar situiert. Der Abstand zwischen den Trägern weitet sich nach oben V-förmig auf, dadurch entsteht ein linsenförmiger „Spalt“ zwischen den Trägerpaaren, der zur natürlichen Belichtung des darunter liegenden Bahnsteiges genutzt wird.

Querträger / Pfetten sind in regelmäßigen Abständen an die Hauptträger angeschlossen und bilden die Unterkonstruktion der Dachhaut, die über den Bahnsteigen als transluzente PTFE-Membran und über den Gleisen als Alu-Gleitbügeldach ausgebildet wird. In den Randbereichen kragen die Querträger aus, um auch den äußeren Bahnsteigkanten einen Witterungsschutz zu bieten.

Die an die großflächige Bahnsteigüberdachung angeschlossenen „konventionellen“ Dächer entsprechen der ÖBB-Regelplanung.

GRUNDLAGEN

Aeroelastische Grundlagen

Gerät eine überströmte elastische Struktur infolge kleiner Störungen in Schwingungen, entstehen aufgrund der Auslenkungen instationäre Luftkräfte, die entweder dämpfend oder anfachend auf den Schwingungsvorgang wirken.

Die physikalische Ursache der Schwingungsanfachung liegt in der Phasenvoreilung der bewegungsinduzierten instationären Luftkräfte gegenüber der momentanen Auslenkung der Struktur. Dieses als Flattern bekannte aeroelastische Phänomen bewirkt im Mittel einer Schwingungsperiode einen Energiefluss von der Luftströmung in die elastische Struktur und führt zum Bruch der Struktur, sofern die aeroelastische Anfachung die strukturelle Eigendämpfung überwiegt (vgl. Försching, 1974).

Die das Flutterphänomen begünstigenden physikalischen Parameter sind niedrige Struktureigenfrequenzen gepaart mit einer bestimmten Gestalt der Eigenschwingungsformen. Setzt man in erster Näherung voraus, dass die instationären Luftkräfte, die neben der Dämpfung auch einen geringen Beitrag zu Masse und Steifigkeit des schwingungsfähigen Systems liefern, Eigenfrequenzen und Eigenformen der Struktur nicht ändern, reicht allein die Untersuchung der instationären Luftkräfte bei vorgegebenen Frequenzen und Schwingungsformen aus, um zuverlässige Aussagen über die aeroelastische Stabilität der Dachkonstruktion zu treffen.

Ein Maß für die aerodynamische Dämpfung bzw. Anfachung von Schwingungen der elastischen Struktur ist die vom Fluid während eines Schwingungszyklus an die Struktur abgegebene oder von dieser aufgenommene aerodynamische Arbeit.

Berechnung der instationären Luftkräfte

Zur Berechnung der auf die Dachkonstruktion wirkenden instationären aerodynamischen Kräfte wird ein vereinfachtes zweidimensionales Modell

verwendet. Dies besteht aus einem in Längsrichtung (Gleisrichtung) des Daches geführten Schnitt, der in der Mitte der Querausdehnung des Daches zu denken ist. In diesem Schnitt wird die Dachlinie entsprechend den strukturellen Eigenschwingungsformen in zeitharmonische Schwingungen versetzt. Die dadurch an der Dachoberfläche entstehenden instationären aerodynamischen Kräfte werden mit Hilfe eines CFD-Verfahrens (CFD: Computational Fluid Dynamics) in einer 2D-Feldrechnung ermittelt. Aus der an der Dachoberfläche wirkenden zeitabhängigen Druckverteilung wird dann die während eines Schwingungszyklus vom Dach aufgenommene bzw. abgegebene aerodynamische Arbeit berechnet, die Aufschluss über Anfachung oder Dämpfung der Schwingbewegung gibt.

Strukturdynamische Eigenformen

Die strukturdynamischen Eigenformen des Daches ergeben sich im Mittelschnitt als Kurven, die die Vertikalauslenkung der Dachoberfläche darstellen.

Ist die räumliche Auslenkung des Daches durch die Kurve $z_0(x)$ gegeben, lautet die jeweilige Eigenform $z(x,t) = z_0(x) \sin(\omega t)$ (1)

mit der Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$, wobei f die in Hz gemessene Schwingfrequenz der jeweiligen Eigenform ist.

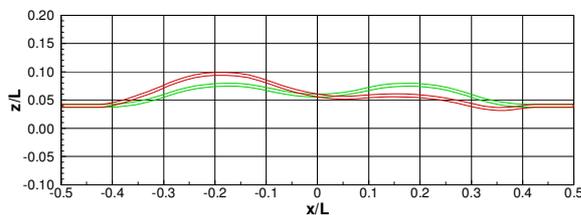


Abbildung 4 Antisymmetrische Eigenform 1,
 $f = 1.4$ Hz (rot: ausgelenkte Dachstruktur, grün:
 Ruhelage)

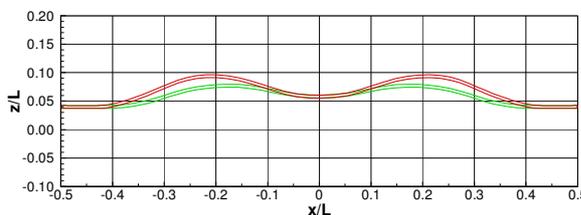


Abbildung 5 Symmetrische Eigenform 4
 $f = 2.25$ Hz (rot: ausgelenkte Dachstruktur, grün:
 Ruhelage)

Unter den ersten berechneten 5 Eigenformen mit den niedrigsten Eigenfrequenzen sind die Eigenformen mit den Nummern 1,2,3,5 antisymmetrische Formen,

bei denen sich die beiden Kuppeln des Daches gegensinnig verformen (vgl. Abbildung 4), während die Eigenform 4 eine symmetrische Verformung aufweist (vgl. Abbildung 5).

Netzgenerierung

Zur Berechnung des instationären Strömungsfeldes um die schwingende Dachstruktur ist die Generierung eines konturangepassten Rechennetzes erforderlich. Verwendet wird ein so genanntes strukturiertes Rechennetz, das durch die Lösung eines elliptischen Differentialgleichungsproblems erzeugt wird. Das verwendete Netz besitzt eine C-Struktur und besteht aus einem einzigen Block, der die Dachkontur umschließt.

Die Besonderheit dieses Netzes besteht nicht nur in einer wählbaren Konzentration von Netzpunkten in der Umgebung der Dachkontur, um Gradienten der Strömungsgrößen entsprechend aufzulösen, sondern auch in der Fähigkeit des Netzes, den Auslenkungen des Daches während des Schwingungsvorganges beliebig zu folgen. In Abbildung 6 ist das Rechennetz als Gesamtnetz dargestellt. Abbildung 7 und Abbildung 8 zeigen einen vergrößerten Ausschnitt der Dachmitte bzw. der Anströmkante.

Das Rechennetz besteht aus 275×41 Netzpunkten mit 275 Punkten in C-Richtung (um die Dachkontur herum) und 41 Punkten in der Richtung von der Dachkontur zum Außenrand.

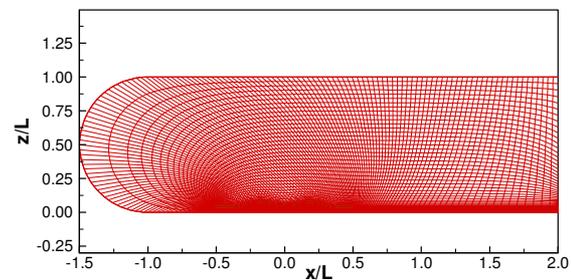


Abbildung 6 Gesamtnetz für aeroelastische
 Untersuchungen

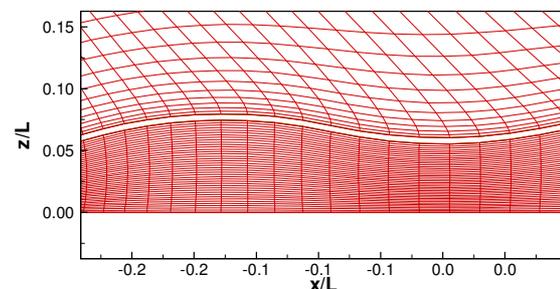


Abbildung 7 Ausschnitt der Dachmitte

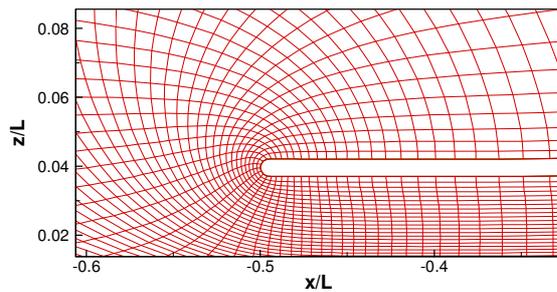


Abbildung 8 Ausschnitt an der linken Vorderkante des Daches / Anströmseite

CFD-Verfahren / Rechenverfahren

Das verwendete CFD-Verfahren löst die 2D-Euler-Gleichungen für reibungsfreie instationäre Strömung. Eine Besonderheit des Verfahrens ist die ALE-Formulierung (Arbitrary Lagrange Euler) der Flussvektoren, bei der die durch die Netzbewegung entstehenden Zusatzflüsse bezüglich Masse, Impuls und Energie entsprechend berücksichtigt werden. Die räumliche Diskretisierung der Euler Gleichungen basiert auf dem Upwind-Verfahren von Roe und Pike, während für die zeitliche Diskretisierung das implizite AF-Verfahren (Approximate Factorization) von Beam und Warming verwendet wird.

Als Ergebnis der Strömungsberechnung ergeben sich das Geschwindigkeitsfeld $\vec{v}(x, y, t)$ sowie die beiden thermodynamischen Größen Druck $p(x, y, t)$ und Dichte $\rho(x, y, t)$. Aus diesen Variablen lassen sich die folgenden, zur Beurteilung der aeroelastischen Stabilität benötigten dimensionslosen bzw. dimensionsbehafteten Größen berechnen:

Druckbeiwert der instationären Strömung auf der Dachkontur (dimensionslos):

$$c_p(s, t) = \frac{p(s, t) - p_\infty}{\rho_\infty U_\infty^2} \quad (2)$$

mit

s	dimensionslose Bogenlängenkoordinate der Dachkontur auf die Gesamtlänge L des Daches bezogen	[-]
p_∞	konstanter Druck der Anströmung	[Pa]
ρ_∞	konstante Dichte der Anströmung	[kg/m ³]
U_∞	konstante Geschwindigkeit der Anströmung	[m/s]
A	dimensionslose Amplitude (maximale Auslenkung / Gesamtlänge)	[-]

lokaler Arbeitsbeiwert der instationären Strömung (dimensionslos):

$$w(s) = \int_0^T c_p(s, t) (\vec{n}(s, t) \cdot \vec{v}_{kin}) dt \quad (3)$$

mit

$\vec{n}(s, t)$ Normaleneinheitsvektor an der Dachkontur [-]

\vec{v}_{kin} Schwinggeschwindigkeit der Dachstruktur [s⁻¹]

T Schwingungsdauer eines Schwingungszyklus [s]

Arbeit pro Flächeneinheit während eines Schwingungszyklus ([J/m²]):

$$W = A \frac{\rho_\infty U_\infty^2}{2} \int_0^{s_0} w(s) ds \quad (4)$$

mit

s_0 Gesamtbogenlänge der Dachstruktur [m]

mittlere Leistung pro Flächeneinheit während einer Periode ([W/m²]):

$$P = \frac{W}{T} \quad (5)$$

Validierung

Das benutzte CFD-Verfahren wurde in vielen Anwendungen zur Berechnung instationärer Luftkräfte herangezogen und im Vergleich mit experimentellen Daten validiert (vgl. Carstens, 1991, Carstens und Schmitt 1999, Grüber und Carstens 2000). Ein Beispiel für den Vergleich mit gemessenen Daten ist in den Abbildungen 9 und 10 dargestellt, die den Vergleich zwischen berechneter und gemessener Druckverteilung für die Beschaukelung eines Triebwerk-Verdichters zeigen, dessen Schaufeln Schwingungen in einer vorgegebenen Eigenform ausführen.

In Abbildung 9 ist zunächst die stationäre Druckverteilung dargestellt, die sich bei ruhender Beschaukelung in einem typischen Betriebspunkt des Verdichters einstellt. Obwohl auf der Saugseite der Verdichterprofile leichte Abweichungen von den gemessenen Werten zu beobachten sind, muss die Übereinstimmung als gut bezeichnet werden.

Abbildung 10 zeigt die sich der stationären überlagernde instationäre Druckverteilung, die sich einstellt, wenn die Verdichterschaukelungen mit einer bestimmten Frequenz ausführen. Das obere Bild enthält den Absolutwert der Druckverteilung, das untere Bild die Phase gegenüber der Schwingbewegung. Die Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Werten im Absolutwert sind zwar signifikant, von größerer Bedeutung ist jedoch die

sehr gute Übereinstimmung der Phasenlage des lokalen Druckes gegenüber der Schwingbewegung.

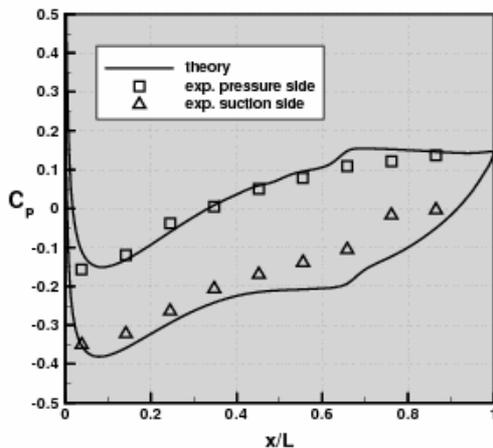


Abbildung 9 Stationäre Druckverteilung an der Beschauung eines Triebwerk-Verdichters

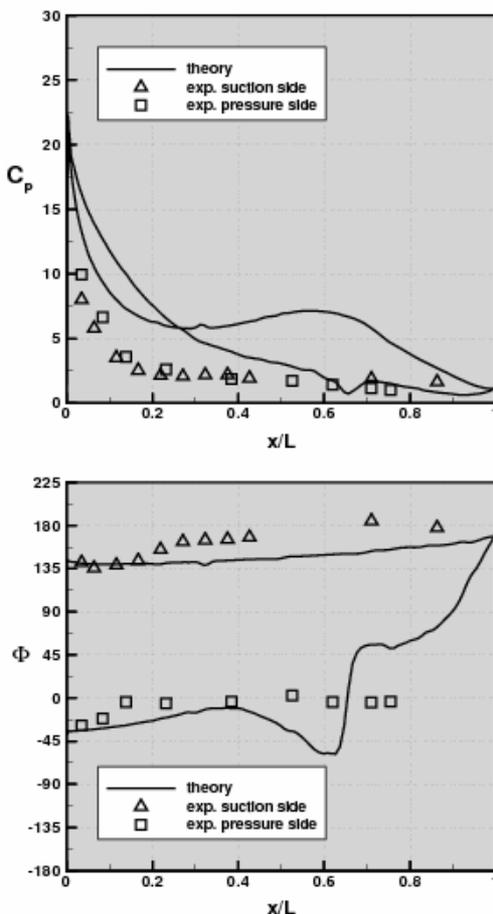


Abbildung 10 Instationäre Druckverteilung an der Beschauung eines Triebwerk-Verdichters, oberes Bild Absolutwert, unteres Bild Phasenlage gegenüber der Schwingbewegung

Diese Phasenlage steuert den Energietransfer zwischen Strömung und Struktur und ist damit entscheidend für die Selbsterregung (Flattern) oder Dämpfung der Struktur.

Strouhalzahl

Eine bedeutende Kennzahl der instationären Umströmung schwingender elastischer Strukturen ist die Strouhalzahl Str bzw. der 2π -fache Wert – die reduzierte Frequenz ω^* .

$$Str = \frac{fL}{U_\infty} ; \omega^* = \frac{2\pi fL}{U_\infty} \quad (6)$$

Physikalisch bedeutet die Strouhalzahl das Verhältnis zweier Zeiten, nämlich der Zeit $t_s = L/U_\infty$, die ein Strömungsteilchen benötigt, die Referenzlänge L zu durchlaufen, im Verhältnis zur Schwingungsdauer T der Struktur. Die zugehörige reduzierte Frequenz beschreibt dann den in der Zeit t_s durchlaufenen Schwingungswinkel im Bogenmaß. Bei kleinen Strouhalzahlen liegt quasi-stationäre Strömung vor, d.h. ein über die Referenzlänge strömendes Teilchen wird nur wenig von der zeitlichen Änderung der Kontur beeinflusst, bei mittleren und großen Strouhalzahlen bzw. reduzierten Frequenzen ist die zeitliche Deformation der Struktur beim Durchlaufen der Referenzlänge deutlicher spürbar. Setzt man als Referenzlänge für die reduzierte Frequenz die Längsausdehnung einer Kuppel zwischen zwei Unterstutzungen an, ergeben sich für die 5 gegebenen Schwingungsformen die in Tabelle 1 angegebenen Werte für eine Zuströmgeschwindigkeit von 20 m/s.

Tabelle 1

Reduzierte Frequenzen der ersten Eigenformen

EIG.-FORM NR.	F _{EIGEN} [HZ]	REDUZIERTE FREQUENZ [-]
1	1.49	16.38
2	1.50	16.49
3	2.14	23.53
4	2.25	24.74
5	2.61	28.70

ERGEBNISSE

Zunächst wird für eine Zuströmgeschwindigkeit von 20 m/s die Strömung bei starrer, d.h. nicht schwingender Dachkontur berechnet. Diese stationäre Strömung dient jeweils als Startlösung für die Berechnung der instationären Umströmung der schwingenden Struktur. Nach Inangsetzen der Schwingung gemäß den Eigenformen aus Gl. (1) wird die Rechnung so lange fortgesetzt, bis sich ein

eingeschwungener Zustand einstellt, d.h. bis sich die Amplituden der instationären Druckbeiwerte an der Dachkontur zwischen zwei aufeinander folgenden Schwingungszyklen nur noch um eine vorgegebene Fehlerschranke unterscheiden.

Abbildung 11 zeigt die stationäre Druckverteilung bei horizontaler Anströmung des Daches, also die sich einstellende lokale Kraftverteilung bei nicht schwingender Dachkontur, deren Strömungsfeld als Startlösung für die jeweiligen Schwingungslösungen dient.

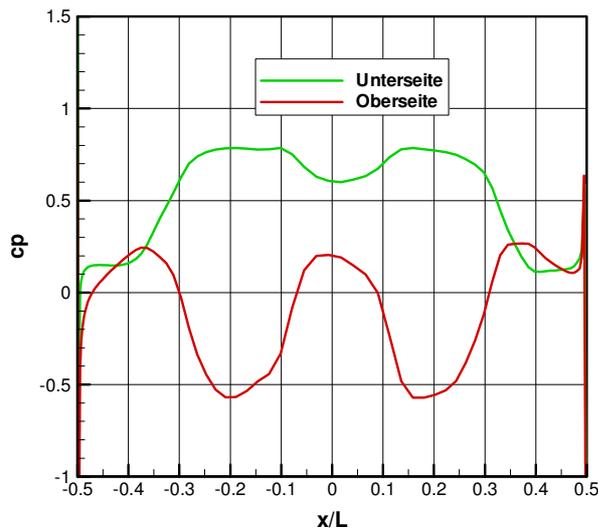


Abbildung 11 Stationäre Druckverteilung an der Dachkontur

Aufschluss über den lokalen Eintrag oder Entzug von Schwingungsenergie liefert der lokale Arbeitsbeiwert, dessen Definition durch Gl. (3) gegeben ist. Abbildung 12 und Abbildung 13 zeigen diese Funktion für die Eigenformen 1 und 4.

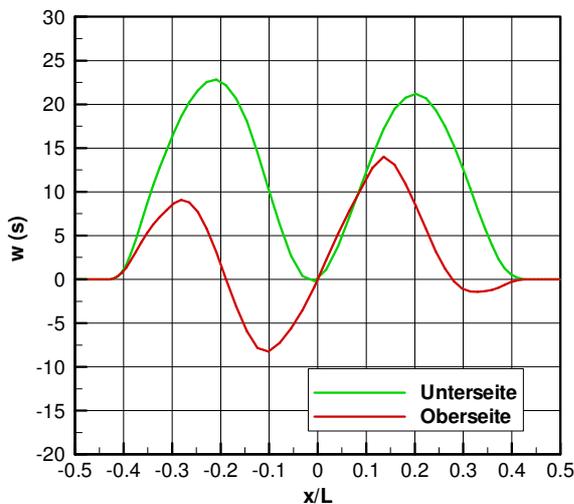


Abbildung 12 Stationäre Druckverteilung an der Dachkontur

Negative Werte des Arbeitsbeiwertes zeigen eine lokale Energieaufnahme, positive Werte eine Energieabgabe an. Bemerkenswerterweise weist nur die Eigenform 1 in einigen Bereichen der Dachoberseite eine Energieaufnahme auf, wogegen die Eigenform 4 sowohl auf der Dachunterseite als auch -oberseite vollständig gedämpft wird.

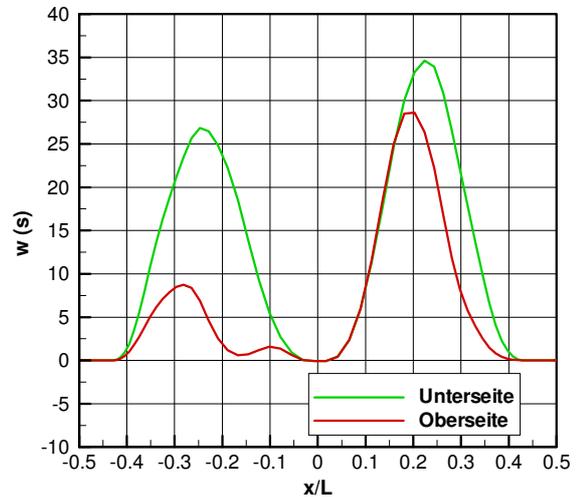


Abbildung 13 Stationäre Druckverteilung an der Dachkontur

Entscheidend für die aeroelastische Stabilität der Dachkontur ist der integrale Wert des lokalen Arbeitsbeiwertes, der sich durch Integration dieser Funktion über die Unterseite und Oberseite der Dachkontur ergibt. Es zeigt sich, dass die schwingende Dachstruktur für alle 5 Eigenformen bei einer Zuströmgeschwindigkeit von 20 m/s aeroelastisch stabil ist. In nachfolgender Tabelle 2 sind die aerodynamischen Arbeiten und mittleren Leistungen der 5 betrachteten Eigenformen aufgelistet.

Tabelle 2

Reduzierte Frequenzen der ersten Eigenformen

EIG.-FORM NR.	F_{EIGEN} [HZ]	AERODYN. ARBEIT [J/M ²]	MITTLERE LEISTUNG [W/M ²]
1	1.49	6.4	9.5
2	1.50	6.2	9.3
3	2.14	15.4	33.0
4	2.25	9.4	21.1
5	2.61	26.5	69.2

Führt man die Untersuchungen für sukzessive gesteigerte Zuströmgeschwindigkeiten bis zu 36 m/s durch, erweisen sich alle betrachteten Eigenformen ebenfalls als stabil, allerdings mit verminderten Dämpfungswerten. Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse für die Eigenform 1 bei steigender Geschwindigkeit

Tabelle 3

Aerodynamische Arbeit und mittlere Leistung für Eigenform 1 bei steigender Zuströmgeschwindigkeit

409-417, 2001, also published as ASME Paper, 2000-GT-383, 2000

EIG.-FORM NR.	F _{EIGEN} [HZ]	AERODYN. ARBEIT [J/M ²]	MITTLERE LEISTUNG [W/M ²]
1	20	6.4	9.5
1	24	4.1	6.3
1	26	2.9	4.3
1	28	2.2	3.3
1	36	1.7	2.6

ZUSAMMENFASSUNG

Zur Untersuchung der aerodynamischen Stabilität der geplanten Dachkonstruktion mit Spannweiten von über 40 m wurde ein CFD-Verfahren auf Basis der 2D-Euler-Gleichungen genutzt. Die aeroelastischen Untersuchungen ergaben folgende Erkenntnisse:

- Alle betrachteten Rechenfälle sind aerodynamisch gedämpft.
- Mit zunehmender Anströmgeschwindigkeit nimmt die aerodynamische Dämpfung ab.
- Die aeroelastische Stabilität der Dachkonstruktion ist für die Anströmgeschwindigkeit gemäß ÖNORM von 20.4 m/s nachgewiesen.

LITERATUR

- Försching, H., Grundlagen der Aeroelastik, Springer Verlag Berlin / Heidelberg, 1974
- ÖNORM B 1991-1-4 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke, Österreichisches Normungsinstitut, 2009
- Carstens, V., Schmitt, S. Comparison of Theoretical and Experimental Data for an Oscillating Transonic Compressor Cascade, ASME Turbo Expo 1999, Indianapolis, IN, USA, June 7-10, 1999, ASME Paper, 99-GT-408, 1999
- Carstens, V., Computation of the Unsteady Transonic 2D Cascade Flow by an Euler Algorithm with Interactive Grid Generation, 73rd Specialists' Meeting of the ADARD Structures and Materials Panel on Transonic Unsteady Aerodynamics and Aeroelasticity, San Diego, CA, USA, October 7-11, 1991, AGARD Conference Proceedings 507, 1991
- Grüber, B., Carstens, V., The Impact of Viscous Effects on the Aerodynamic Damping of Vibrating, Transonic Compressor Blades, Journal of Turbomachinery, Vol. 123, Nr. 2, pp.

UNTERSUCHUNG DER URSACHEN FÜR RAUMKLIMAPROBLEME IN EINER SCHWIMMBADHALLE MITTELS CFD-SIMULATION

Šikula Ondřej¹, Karl Ponweiser²

¹Institute of Building Services,

Brno University of Technology, Brno, Czech Republic

² Institut für Energietechnik und Thermodynamik,
 Technische Universität Wien, Wien, Österreich

KURZFASSUNG

Der Beitrag beschreibt die Untersuchung des Raumklimas einer Schwimmbadhalle mittels CFD-Simulation (Computational Fluid Dynamics) in FLUENT. Die Halle ist ein großer, gegliederter Raum mit unterschiedlichen Arten von Heizelementen und Auslässen. Experimentelle Messungen im Vorfeld haben bereits den mangelnden thermischen Komfort, der physisch deutlich spürbar ist, bestätigt.

Unter Verwendung von FLUENT wurden detaillierte Simulationen des Raumverhaltens im Winter durchgeführt. Bei diesen stationären Simulationen wurden Wärmeleitung, Strahlung und Konvektion inklusive Feuchtigkeitstransport berücksichtigt. Die Ergebnisse der Simulation haben entscheidend dazu beigetragen, die Problemzonen zu detektieren. Als Hauptursachen für den mangelnden Komfort wurden die kühlende Wirkung der Wasserrutsche sowie eine fehlende Zoneneinteilung des Lüftungssystems identifiziert.

ABSTRACT

The paper describes investigation of the indoor environment of a pool hall by means of CFD simulation (Computational Fluid Dynamics) in software FLUENT. A set of detailed simulations of the indoor air quality as well as thermal comfort was conducted for winter conditions. In these simulations, stationary heat conduction, convection and radiation were considered, including moisture transport. The simulation results greatly helped to identify the problem causing areas. The main causes of the discomfort identified were: the cooling effect of the switchback and the ventilation system design and the poor ventilation system design - zoning ignored.

EINLEITUNG

Unter Betrachtung steht ein Hallenbad, bei welchem Schwierigkeiten mit dem Raumklima aufgetreten sind. Dieses Bad befindet sich in Südmähren, in einem Klimagebiet mit Winterrechnungstemperatur

von -15 °C. Das Bad ist in zwei Höhenniveaus unterteilt. Im unteren Teil enthält das Bad ein Schwimmbecken und ein Becken für eine Wasserrutsche, die im Außenbereich angeordnet ist. Der obere Teil enthält ein Pool für Kleinkinder, ein Whirlpool, eine Sauna, Ankleideräume und andere Nebenräume – siehe Bild 1 und 2.

Das Klima im Bad wird durch eine zentrale Klimaanlage mit Entfeuchtungsfunktion eingestellt. Letztere ist mittels einer Wärmepumpe über das Kondensationsprinzip realisiert. Das ganze Bad ist als eine Temperaturzone konzipiert und im Winterbetrieb ist die Temperatur der zugeführten Luft ca. 35 °C. Die Lufttechnik im unteren Teil enthält folgende Zuleitungselemente: Weitwurfdüsen, Wandauslässe, Deckendrallauslässe, und folgende Heizelemente: Heizkörper und eine Fußbodenheizung.

Die Lufttechnik in dem oberen Teil enthält folgende Zuleitungselemente: Wandauslässe, Deckendrallauslässe und folgende Heizelemente: Fußbodenkonvektoren und Fußbodenheizung.

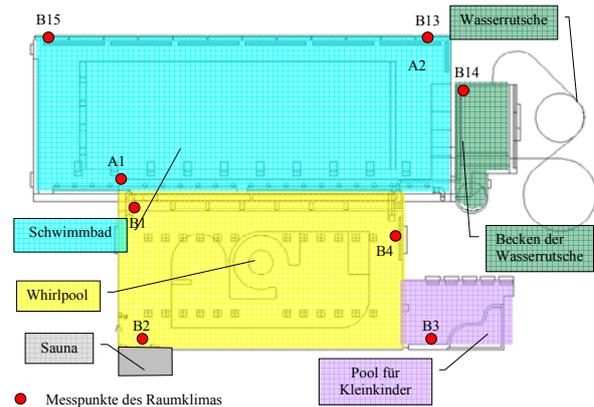


Abbildung 1 Grundriss mit den Messpunkten

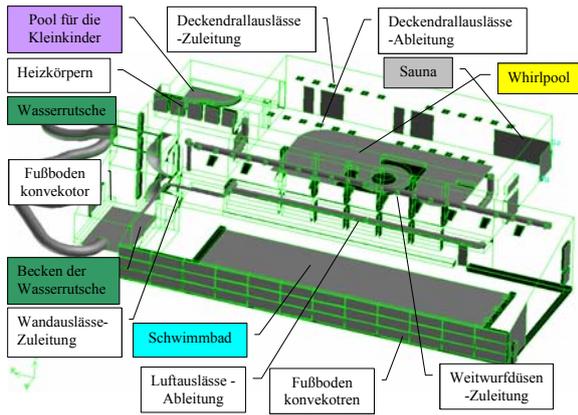


Abbildung 2 Lage der Luft und Heizelemente

PROBLEMSTELLUNG

Im betrachteten Schwimmbad wurde festgestellt, dass die Heizleistung durch Lüftung sowie Heizung höher ist, als die prognostizierten Wärmeverluste. Trotzdem fühlen sich die Besucher im Winter in gewissen Bereichen unbehaglich, vor allem in den niedrigen Teilen des Bades, das sind Schwimmbad und Beckenbereich bei der Wasserrutsche. Außerdem wurden subjektiv ziemlich große Temperaturunterschiede zwischen dem unteren und dem oberen Teil des Bades empfunden. Um die Ursachen für diese Unbehaglichkeiten festzustellen, wurde sowohl eine experimentelle als auch eine theoretische Untersuchung durchgeführt.

Experiment

Es wurden umfangreiche Messungen des Raumklimas mit unterschiedlicher Dauer durchgeführt. Die Lage der wichtigsten Messpunkte ist in Abbildung 1 dargestellt. Es wurden die Parameter des Raumklimas nach ISO 7730:2005 aufgenommen. Nähere Informationen zu diesen Messungen finden sich in Hirš et al., 2009. Diese Experimente haben gezeigt, dass das Raumklima, vor allem in Bereichen geringer Raumhöhen, im Schwimmbad und im Beckenbereich der Wasserrutsche, unzureichend komfortabel ist. Aus den Messungen des Raumklimas wurden auch die Randbedingungen für die theoretischen Untersuchungen abgeleitet.

MODELLIERUNG UND RANDBEDINGUNGEN

Die detaillierten Simulationen des Raumverhaltens wurden unter Verwendung von FLUENT 6.3 durchgeführt. Dabei wurde die Situation für den Winter betrachtet. Die Simulationen sind stationär und berücksichtigen Wärmeleitung, Strahlung und Konvektion inklusive Feuchtigkeitstransport aus den Wasserflächen. Es wurden das Turbulenz-Modell RNG k- ϵ und das Strahlungs-Modell „Discrete

ordinates“ (Fluent Inc. 2006) verwendet. Die Luft wurde als inkompressibles Idealgas modelliert. Alle Oberflächen wurden als matte, diffuse Strahler betrachtet, mit einheitlichem integrealem Emissionskoeffizienten $\epsilon = 0,9$. Zuleitungsauslässe wurden als „mass-flow-inlet“ und Ableitungsöffnungen als „outflow“ modelliert.

Die thermodynamischen Randbedingungen wurden von den experimentellen Daten und Daten aus dem zentralen Mess- und Regelsystem übernommen. Für die Umgebungsrandbedingungen wurde die Wintersituation genommen. Die Wärmewiderstände der Baukonstruktionen wurden vom bauphysikalischen Projekt übernommen. Bezüglich der Wasserrutsche wurde in den Simulationen das ungünstigste Szenarium angenommen, nämlich jenes bei welchem kein Wasser über die Rutsche fließt und diese dadurch nur als Spiralkühler fungiert.

Tabelle 1
Randbedingungen

NAME	TEMPERATUR °C	MASSEN STROM KG/S	TURBULENZ-INTENZITÄT %	HYDRAULISCHER DURCHMESSER M
Weitwurfdüsen	35	3,3660	10	0,15
Wandauslässe	35	0,0904	10	0,15
Deckendrall-Auslässe	35	1,8908	10	0,30
Sauna	36	0,1482	30	2,00
Strömung aus Fußboden-Konvektoren	42	1,0260	30	0,15
Strömung aus Heizkörpern	45	0,0792	30	0,15
Fußboden-heizung	24			
Wasserflächen	29			

Um die Luftfeuchtigkeitsverteilung simulieren zu können, wurden folgende Randbedingungen verwendet:

- die Wasserbeladung der aufbereiteten Luft ist für alle Auslässe 0,001 kg/kg;
- die Wasserbeladung der Luft aus der Sauna ist 0,020 kg/kg;
- die Wasserbeladung in der Wasserrutsche, an Wasserflächen oder nassen Flächen, wurde als Luftfeuchtigkeit in der Grenzschicht mit dem Wert 0,025 kg/kg gesetzt.

SIMULATION

Die Ergebnisse der Simulation sind in den Bildern 3 – 8 zusammengestellt.

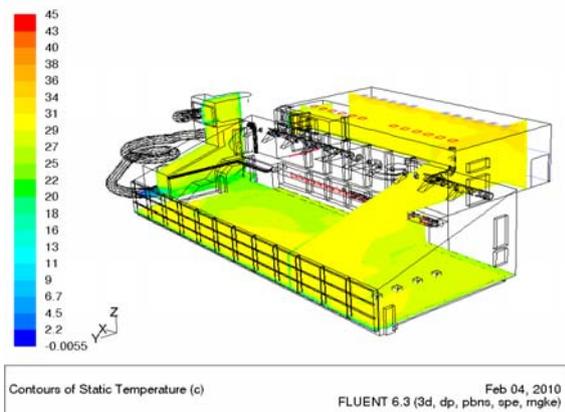


Abbildung 3 Lufttemperaturverteilung in verschiedenen Schnitten

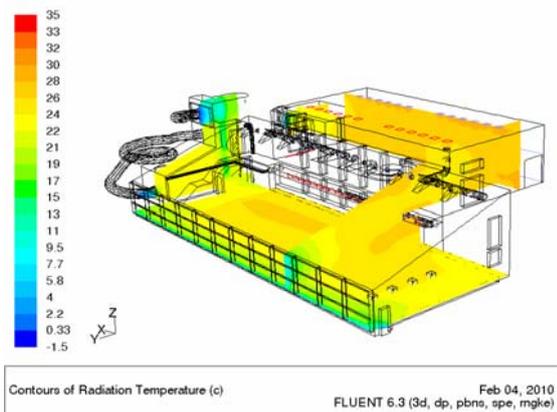


Abbildung 4 Temperaturverteilung zufolge Strahlung

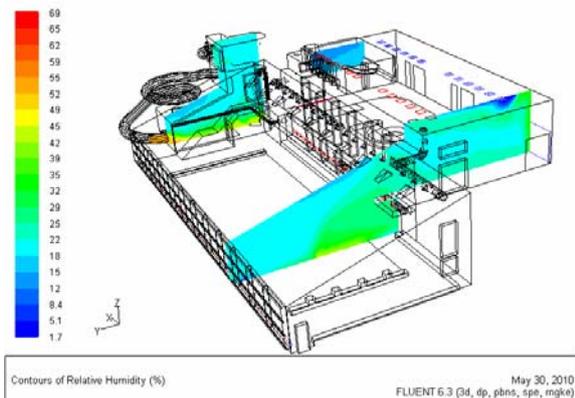


Abbildung 5 Verteilung der relativen Feuchtigkeit

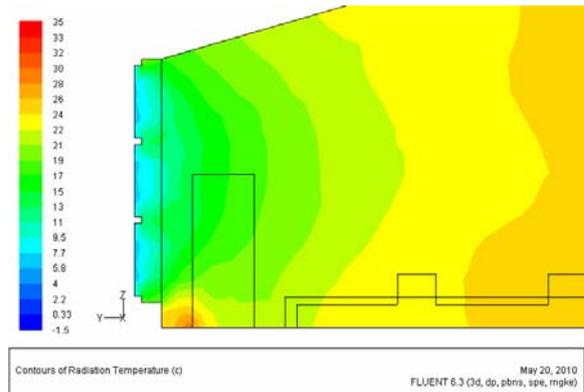


Abbildung 6 Verteilung der Temperatur zufolge Strahlung

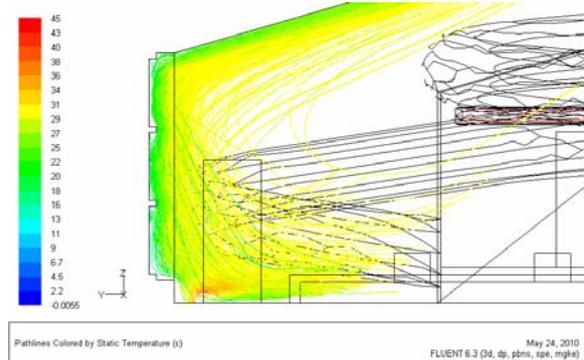


Abbildung 7 Strömung aus Düsen längs Decke und Glas-Wand

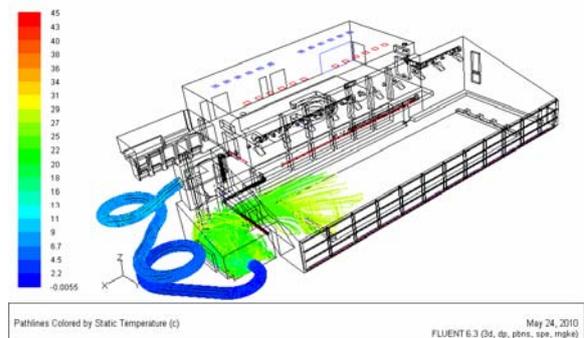


Abbildung 8 Kalte Strömung aus der Wasserrutsche ins Schwimmbad

DISKUSSION DER SIMULATIONSERGEBNISSE

Der thermische Komfort an der äußeren Glaswand ist stark durch die Wärmestrahlung beeinflusst. Daher sinkt hier auch die „operative“ Temperatur.

Als Hauptursachen für das unbehagliche Raumklima wurden folgende Punkte identifiziert:

- die mangelnde Wärmestrahlung der kalten Glaswände im Schwimmbad – siehe Bild 6;
- die starke Dominanz der Strömung aus den Düsen im Deckenbereich des Schwimmbads und die damit einhergehende Umlenkung der

Strömung von den vor der Glaswand angeordneten Fußboden-Konvektoren, welche dadurch wirkungslos gemacht wurden – siehe Bild 7;

- die kühlende Wirkung der Wasserrutsche, welche eine kalte Strömung in das Schwimmbad bewirkt – siehe Bild 8;
- eine fehlende Zoneneinteilung des Lüftungssystems, welche im Allgemein höhere Temperaturen in den oberen Räumen und niedrigere Temperaturen in den unteren Räumen des Bads verursacht – siehe Bild 3.

Die Ergebnisse der Simulation haben gezeigt, dass die relative Luftfeuchtigkeit sich überwiegend in geeigneten Werten bewegt, mit Ausnahme eines Raumes in der Nähe der Sauna – siehe Bild 5. Die Ursache dafür liegt in der sehr warmen Luft, die aus der Sauna in diesen Raum strömt.

SIMULATION MIT VERBESSERUNGSMODIFIKATIONEN

Um die eben genannten Hauptursachen für den mangelnden Komfort zu eliminieren, wurden folgende Verbesserungsmodifikationen vorgeschlagen:

- der Wärmewiderstand der kalten Glaswände im Schwimmbad wird um $0,5 \text{ W}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}^{-1}$ erhöht;
- die Wärmedämmung der Wasserrutsche wird bis auf $0,25 \text{ W}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}^{-1}$ erhöht;
- der ganze Raum wird in zwei Lüftungssystemzonen gegliedert – die erste Zone enthält die oberen Räume und die zweite Zone enthält die unteren Räume, wobei die Temperatur der zugeleiteten Luft aus den Auslässen bis auf 40 °C erhöht wird.

Die Ergebnisse der Simulation nach Umsetzung der Verbesserungsvorschläge sind in den Bildern 9 – 10 dargestellt.

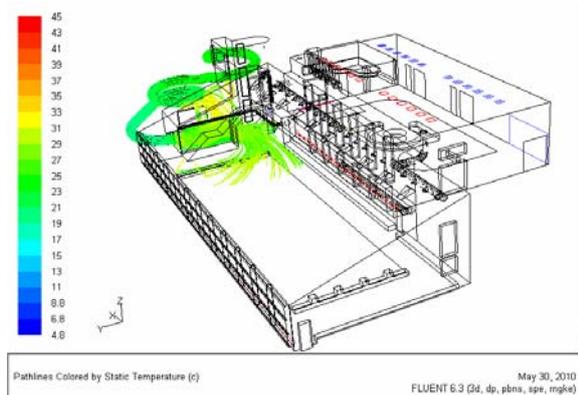


Abbildung 9 Kalte Strömung aus der Wasserrutsche ins Schwimmbad nach der Verbesserung

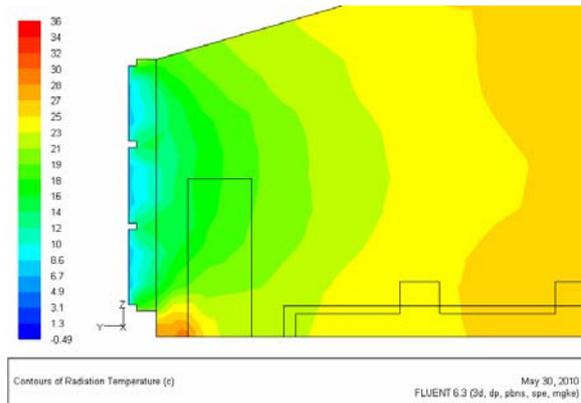


Abbildung 10 Verteilung der Temperatur zufolge Strahlung nach der Verbesserung

ABSCHLIESSENDE DISKUSSION UND ZUSAMMENFASSUNG

Die Ergebnisse nach der Verbesserung sehen zufriedenstellend aus. Vor allem die kühlende Wirkung der Wasserrutsche konnte eliminiert und die mangelnde Wärmestrahlung der Glaswände im Schwimmbad konnte reduziert werden.

Die Anwendung der CFD Simulation hat geholfen:

- bei der Identifikation der Ursachen des unzufriedenstellenden Raumklimas;
- bei der Erprobung verschiedener Verbesserungsmodifikationen.

Unter Verwendung von FLUENT und experimentellen Messungen wurden detaillierte Simulationen des Raumverhaltens im Winter durchgeführt. Bei diesen stationären Simulationen wurden Wärmeleitung, Strahlung und Konvektion inklusive Feuchtigkeitstransport berücksichtigt. Die Ergebnisse der Simulationen haben entscheidend dazu beigetragen, die Problemzonen zu detektieren. Als Hauptursachen für den mangelnden Komfort wurden die kühlende Wirkung der Wasserrutsche sowie eine fehlende Zoneneinteilung des Lüftungssystems identifiziert.

Die Simulationen zeigen auch deutlich den großen Einfluss der außerhalb des Gebäudes geführten und nicht wärmedämmten Wasserrutsche auf das Klima im Schwimmbad.

DANKSAGUNG

Die Forschung wurde teilweise durch die spezifische Forschung an der TU Brno Fakultät für Bauingenieurwesen unterstützt.

LITERATUR

Fluent Inc. 2006. User's guide for Fluent. Release 6.3.

Hirš, J., Šíkula, O., Kalousek, M., Šíma, J.,
Posouzení stávajícího vzduchotechnického
systému bazénových hal Městských lázní v
Boskovicích. Odborný posudek. 28 p. 2010.
Brno. Česká republika.

ISO 7730:2005 Ergonomics of the thermal
environment - Analytical determination and
interpretation of thermal comfort using
calculation of the PMV and PPD indices and
local thermal comfort criteria

CFD-STRÖMUNGSSIMULATION ZUR SICHERSTELLUNG EINES BEHAGLICHEN UND ENERGIEEFFIZIENTEN SCHWIMMBADBETRIEBS

Mirko Klein, Harald Garrecht
 Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen
 Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt, Deutschland

KURZFASSUNG

Vielfach erfordert der Betrieb von Schwimmbädern einen höheren Energiebedarf als andere Nicht-Wohngebäude. Um die energetische Effizienz der Planung, des Bauens und des Betriebs von Hallenbädern zu bewerten und zu steigern, werden am neu errichteten Freizeitbad der Stadt Kelsterbach umfangreiche Forschungen und Entwicklungen vorgenommen, die im Rahmen des Förderprogramms „Energieoptimiertes Bauen“ unterstützt werden. Mit der Eröffnung der Schwimmhalle im Januar 2010 wurde ein zweijähriges Energiemonitoring gestartet, um Maßnahmen zur Optimierung des Betriebs der technischen Anlagen herauszuarbeiten. Neben dem umfassenden Energie- und Klimamonitoring werden auch theoretische Untersuchungen mittels Gebäude- und CFD-Strömungssimulationen vorgenommen, um jene Anlagenparameter und Betriebsoptionen der komplexen HVAC-Technik zu identifizieren, mit denen ein ressourcenschonender und energieeffizienter Schwimmbadbetrieb sichergestellt werden kann. Dabei sollen vor allem die Raumluftverhältnisse im jahreszeitlichen Betrieb untersucht werden, um den Badegästen stets einen behaglichen Aufenthalt zu bieten.

ABSTRACT

In numerous cases the energy consumption of public swimming pools is located far above the energy consumption of non-residential buildings. As a result a research study is conducted in order to assess the energy efficiency of public swimming pools, using the public swimming pool in Kelsterbach as an example. Within the scopes of “Energieoptimierten Bauens” the control of the swimming pools technical system is accompanied over a period of 2 years. Since its opening in January 2010 an elaborate energy- and climate monitoring is being used to identify and optimize system parameters and operation options of the highly sophisticated HVAC-system to assure a long term and efficient energy consumption as well as sustainable use of resources. By means of building performance and fluid dynamics simulations analyses of the indoor climate are included. At this the indoor air conditions of the

seasonal operations are determined in order to guarantee high comfortableness for bathers.

EINLEITUNG

Ziel der Planungen aller bau- und anlagentechnischen Maßnahmen des neuen Freizeitbades der Stadt Kelsterbach war es, ein zeitgemäßes, ansprechendes und vor allem energieeffizientes Gebäude zu entwickeln. Den besonderen Anforderungen an das Raumklima in Schwimmhallen ist zumeist ein hoher Energieverbrauch geschuldet, der deutlich über dem von anderen Nicht-Wohngebäuden liegt. Im Vergleich zu Wohn- oder Bürogebäuden sind zudem nur wenige innovative Maßnahmen bekannt, mit denen sich der Energieverbrauch in Schwimmbädern nachhaltig reduzieren lässt. Hieraus kann die Notwendigkeit abgeleitet werden, das energetische Verhalten von Bädern genauer zu untersuchen, um diverse Maßnahmen hinsichtlich ihres Beitrags zur Energieeffizienzsteigerung zu erproben und diese zielsicher auch auf künftige Projekte übertragen zu können.



Abbildung 1 Schwimmhalle

Zahlreiche energiesparende Maßnahmen sollten in der neuen Schwimmhalle der Stadt Kelsterbach zum Einsatz kommen. So beispielsweise eine hochwärmedämmte Außenhülle, wie auch eine äußerst effiziente Wärmerückgewinnung. Entsprechend wurde ein ausgefeiltes Maßnahmenkonzept entwickelt, mit dem im Vergleich zu üblichen neuen Schwimmhallen in der Bilanzierung 50% des Primärenergieeinsatzes

eingespart werden können. Um dieses Ziel erreichen zu können, waren Bauherr und Betreiber neben den bau- und anlagentechnischen Maßnahmen von Beginn an auch an einem optimalen Betrieb des Schwimmbades und seiner technischen Anlage interessiert. Mit Hilfe der EnOB-Förderung des Forschungsvorhabens sollen daher über einen Zeitraum von zwei Jahren die Wirksamkeit der umgesetzten Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung analysiert und energieoptimierte Betriebsweisen der komplexen Anlagentechnik herausgearbeitet und erprobt werden. Über das reine Energiemonitoring der GLT hinaus wurde seitens der Verfasser ein ergänzendes Sensor-Netzwerk zum Klimamonitoring realisiert, mit dem die zur Bewertung der Raumluftverhältnisse erforderlichen Raumklimagrößen unter Berücksichtigung des jahreszeitlichen Badebetriebs erfasst werden. Insgesamt umfasst die ergänzende Messtechnik dabei mehr als 120 Sensoren, die in verschiedenen Raumbereichen und Höhenlagen der Schwimmhalle in minütlichem Abstand die raumseitigen Luft- und Oberflächentemperaturen, relativen Feuchten, Luftströmungen, Intensitäten der Strahlung (Global, UVA und UVB), CO₂, VOC etc. mittels rechnergestütztem Messsystem erfassen.

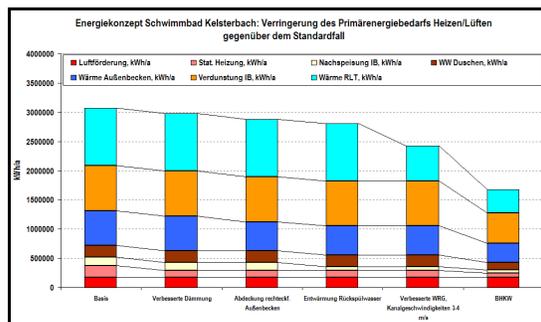


Abbildung 2 Energiekonzept zur Verringerung des Primärenergiebedarfs

Soll ein Freizeit- und Wellnessbad wirtschaftlich betrieben werden, ist es nicht alleine ausreichend Energie einzusparen. Gleichmaßen gilt es hier, den Badegästen auch einen hohen Komfort und einen angenehmen Aufenthalt bei möglichst geringem Energieaufwand bieten zu können. Entsprechend müssen die vielfältigen anlagentechnischen Komponenten für den Betrieb der Schwimmbad-, Sauna-, Wellness-, und Gastronomiebereiche in optimaler Weise zusammenspielen, bzw. sind diese so zu regeln, dass selbst unter widrigen Witterungsverhältnissen und hohen Besucherzahlen die Nutzungsanforderungen energieeffizient erfüllt werden können. In großvolumigen Räumen wie einer Schwimmhalle bestimmen die Temperatur-, Feuchte- und Luftströmungsverhältnisse infolge konvektiver Vorgänge die Behaglichkeit, die nach EN ISO 7730

oder ähnlichen Verfahren nur schwer bewertet werden kann.

Aus diesem Grund werden im laufenden Forschungsvorhaben neben dem Energie- und Klimamonitoring auch rechnerische Untersuchungen zu den Raumluftverhältnissen mittels CFD-Simulation durchgeführt. Einerseits gilt es hierbei die Raumluftströmungsverhältnisse, Temperatur- und Feuchteverteilungen zu analysieren, andererseits sollen die Auswirkungen unterschiedlicher Betriebsszenarien der anlagentechnischen Komponenten erfasst und bewertet werden. Aber auch baukonstruktive Detaillösungen sollen im Bezug auf ihr bauphysikalisches Verhalten unter den extremen Randbedingungen eines Schwimmbadbetriebs untersucht werden, so z.B. das große offenbare Folienkissendach der Schwimmhalle.

Mit dem Abschluss des Vorhabens sollen durch den Einsatz des Monitorings und den modernen Simulationsmethoden (CFD und FEM) hinreichende Erkenntnisse zum Raumverhalten und zu den Wirkungen der bau- und anlagentechnischen Gegebenheiten vorliegen, um geeignete Regelstrategien für einen optimalen Betrieb des Schwimm- und Wellnessbades hinsichtlich Nutzung und Energieeffizienz zu erarbeiten, die zusammen die Wirtschaftlichkeit des Badbetriebs bestimmen werden.

WESENTLICHE GEBÄUDEMERKMALE

Als eine der Besonderheiten des neuen Hallenbades kann die Dachkonstruktion aus Holzleimbändern mit einer Überdeckung in Form von Folienkissen als Hüllelementen genannt werden. Das Folienkissendach lässt die Schwimmhalle im Inneren sehr hell und lichtdurchflutet erscheinen. Die Folienkissenelemente selbst bestehen aus drei, durch transparente Membrane getrennte Druckluftschichten. In einem Teilbereich der Schwimmhalle, in dem sich das Kinderbecken befindet, kamen beschichtete Folien zum Einsatz, um den Eintrag schädigender UV-Strahlung zu reduzieren. Wesentliches Merkmal des Daches ist aber, dass das mittlere Drittel der Dachkonstruktion verfahrbar ausgebildet wurde, um einen beträchtlichen Teil der Dachfläche während der sommerlich warmen Schönwetterperioden öffnen zu können. Dadurch nimmt das Hallenbad aus Sicht der Nutzer einen Freibadcharakter an. Als energetischer Aspekt kann in dieser Zeit ein großer Teil der ansonsten für die Luftaufbereitung und Belüftung erforderlichen Energie eingespart werden. Aus bauphysikalischer Sicht interessant ist das thermische Verhalten der Folienkissenkonstruktion, die insbesondere unter den extremen Randbedingungen eines Schwimmbadbetriebs noch nicht hinreichend erforscht ist. Hier ist es vor allem die Wärmebrückenproblematik im Bereich des Anschlusses der Folienkissen an die

Trägerkonstruktion, die wärme- und feuchtetechnisch zu überprüfen und optimieren ist. Obgleich die Metallprofile als Anschlussdetail flächenmäßig nur 5 – 10 % der Dachfläche einnehmen, dürfte der hohe U-Wert im Bereich des Profils und der hier zusammenlaufenden Folienlagen einen maßgeblichen Einfluss auf das Transmissionswärmeverhalten des Folienkissendaches haben. Zudem gilt es, die Gefährdung der Dachkonstruktion durch Tauwasserausfall und Korrosion der Profile zu untersuchen. Zwar wurden zusätzliche Kondensatablaufrinnen beim Bau montiert, doch lässt sich bei Bedarf auch der Betrieb der Lüftungsanlage weiter optimieren, um erhöhte Tauwasserlasten mit Gefährdungspotenzial zu vermeiden. Völlig unbekannt sind auch die Auswirkungen der Öffnung des mittleren Drittels der Dachkonstruktion auf die Behaglichkeit der Badegäste im Innern der Schwimmhalle. Hier sollen das Monitoring und die CFD-Simulationen weiterführende Erkenntnisse liefern, um die nutzerspezifischen, energetischen und anlagenspezifischen Belange bei einer Teilöffnung des Daches zuverlässig bewerten zu können.

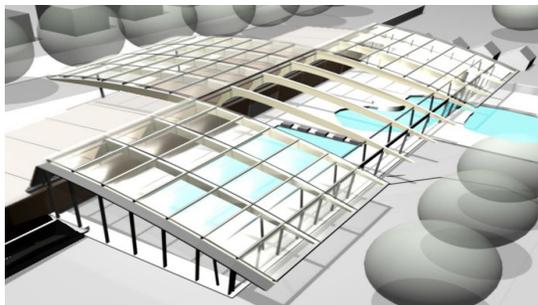


Abbildung 3 Schwimmhalle mit geöffnetem Dach

VORHABENSZIELE

Im Rahmen des Vorhabens sollen grundlegende Untersuchungen zur Bilanzierung des Energieverbrauchs beim Betrieb von Schwimmbädern vorgenommen werden. Das ergänzend zu dem über 900 Sensoren und Zähler umfassende Netzwerk der GLT adaptierte Netz von 120 Fühlern zur Charakterisierung der Temperatur-, Feuchte- und Strömungsverhältnisse innerhalb der Schwimmhalle soll eine differenzierte Bewertung aller Energieflüsse aber auch Raumluftzustände in den verschiedenen Raum- und Nutzbereichen des Schwimm- und Wellnessbades ermöglichen. Mittels rechnergestützter Visualisierung werden die von der GLT ausgelesenen, sowie auch die im ergänzenden Monitoring erfassten Daten in anschaulicher Weise dargestellt und hier weiter bearbeitet, sodass eine umfassende Bewertung aller Energieumsätze ermöglicht wird. Die unverzügliche Analyse aller Messdaten soll dann dazu genutzt werden, mögliche Energieeinsparpotenziale durch einen optimierten

Betrieb der anlagentechnischen Komponenten ohne Komfortverlust herauszuarbeiten. Diese Informationen sollen dann über eine geeignete Schnittstelle der GLT übergeben werden, um entsprechende Regelkreisanpassungen vornehmen zu können. Mit den Erkenntnissen aus dem Monitoring wie auch der Simulationen soll das komplizierte Zusammenwirken der komplexen anlagentechnischen Komponenten optimiert werden, indem der GLT die erforderlichen Informationen übermittelt werden, mit denen ein energieoptimierter Betrieb des Bades bei Wahrung hoher Komfortansprüche erreicht werden kann.

Das Projektziel sieht daher die Erarbeitung eines Maßnahmenkataloges vor, der abhängig der sich im Jahres- und Tagesgang stets verändernden Witterungsverhältnisse unter Berücksichtigung der baukonstruktiven und anlagentechnischen Ausgestaltung des innovativen Freizeitbades, einen ökonomisch sinnvollen und behaglichen Schwimmbadbetrieb gewährt. Nicht zuletzt sollen dabei auch mögliche Gefährdungen schwieriger Bauteilanschlüsse, so z.B. im Bereich des Dachanschlusses der Folienkissen durch einen kontrollierten und optimierten Betrieb der Anlagen unterbunden werden.

KLIMAMONITORING

Um die Raumluftzustände abhängig der denkbaren und zu erprobenden Betriebszustände der verschiedenen Anlagenkomponenten für die Belüftung, Beheizung und Entfeuchtung in den verschiedenen Raumbereichen der Schwimmhalle erfassen und bewerten zu können, wurde seitens der TU Darmstadt das ehemals im Kontext mit dem Forschungsvorhaben stehende umfassende, mit Zählern und Sensoren ausgestattete, GLT-Konzept mit einem ergänzenden Messsystem erweitert, um zusätzliche Informationen zu den Raumluftverhältnissen in den verschiedenen Arealen von der Umkleidezone, über die Schwimmhalle, den Relax- und Gastronomiebereich wie auch von Sauna- und Wellnessbereich zu erhalten. Neben einem kabelbasierten Messwert-Erfassungssystem, das an der TU Darmstadt gemeinsam mit der Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft entwickelt wurde und bislang in mehr als 40 Vorhaben mit je 100 bis 1400 Sensoren erfolgreich eingesetzt werden konnte, kommt dabei im Sauna- und Wellnessbereich auch ein neu entwickeltes funkbasiertes Messkonzept zum Einsatz. Ziel ist, die vielfältigen Informationen beider Messsysteme, dem der GLT und des ergänzenden Monitorings, zu verknüpfen, um über eine umfassende Datenbasis zu verfügen, mit der die Auswirkungen des Betriebs der diversen anlagentechnischen Komponenten sowohl hinsichtlich der Potenziale einer nachhaltigen

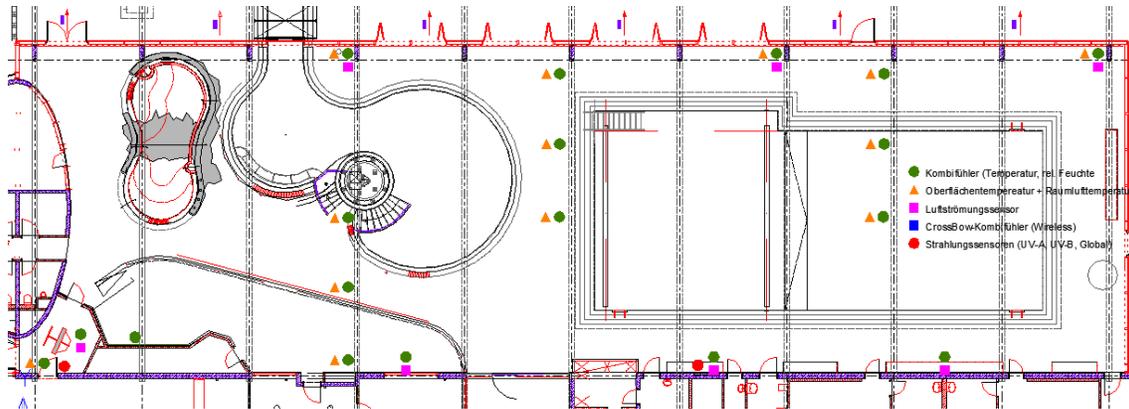


Abbildung 4 Sensoranordnung in der Schwimmhalle

Reduzierung des Energiebedarfs, als auch der Sicherstellung hoher Komfortansprüche untersucht werden können. Werden dabei Defizite oder Verbesserungsmöglichkeiten festgestellt, lassen sich daraus Optimierungspotenziale des anlagentechnischen Betriebs identifiziert, die dann besser aufeinander abgestimmt werden können.

Entsprechend sollen Regelszenarien entwickelt werden, mit denen durch die stete Bewertung und den Vergleich der Messgrößen, ein optimal aufeinander abgestimmter Betrieb gewährleistet werden kann, wobei stets zwischen alternativen möglichen Betriebsphasen, z.B. die Öffnung bzw. das Schließen des Folienkissendaches als Alternative zur alleinigen anlagentechnischen Belüftung und Luftentfeuchtung der Schwimmhalle zu entscheiden ist. Um die Betriebsführung nicht nur von den anlagenspezifischen Informationen abhängig zu machen, sondern auch die Empfindungen der Badegäste berücksichtigen zu können, werden wie bereits angeführt die Raumluftzustände mittels eines gesonderten Messsystems an zahlreichen Orten in Schwimmhalle, Umkleide-, Sauna- und Ruhebereich in kurzen Zeitabständen erfasst. Gemessen werden im Wesentlichen die Temperatur und die relative Feuchte der Raum- und Außenluft. Zusätzlich werden auch innerhalb und außerhalb der Schwimmhalle die Strahlungsintensität, wie auch die Intensität von UVA- und UVB-Strahlung bestimmt, um die über das transparente, teilweise beschichtete Folienkissendach einfallende Strahlung bewerten zu können. An weiteren Positionen werden im Bereich der Glasfassade, an der gegenüberliegenden Wand unmittelbar im Nahfeld der beheizten Sitz- und Ruhebänke und im Umfeld der Gastronomie die Luftströmungsverhältnisse gemessen. Darüber hinaus wird an einzelnen Stellen die Konzentration von CO₂ bzw. VOC gemessen. Um die Folge des Öffnens bzw. Schließens des verfahrenbaren Folienkissendaches auf die sich verändernden Raumluftverhältnisse in der Schwimmhalle zu analysieren, wurden etwa 80 der

insgesamt über 120 Sensoren an 20 im Raum verteilter Messstellen angeordnet. Einen Überblick über die Positionierung der Sensoren in der Schwimmhalle gibt Abbildung 4. Damit die attraktive Innenraumarchitektur der Schwimmhalle nicht negativ beeinflusst wird, befinden sich die Sensoren entweder nur im Randbereich der Schwimmhalle oder sind unterhalb der Holzträger der Dachkonstruktion angeordnet.

GEBÄUDESIMULATION

In großvolumigen Räumen, so auch der untersuchten Schwimmhalle, bilden sich große konvektive Luftströmungen aus, die sich witterungs- und nutzungsbedingt durch Temperaturunterschiede im Raum und an der Raumschale, abhängig des Betriebs der raumluftechnischen Anlagen etc. einstellen. Grundsätzlich sind die sich so ergebenden Raumluftströmungen starken Schwankungen unterworfen, da sich die klimatischen Randbedingungen wie auch Intensität der Nutzung im Tages- und Jahresgang stets verändern. In statischen Bilanzierungsverfahren wird der Einfluss der Raumluftverhältnisse auf den Energiebedarf über Bemessungsgrößen näherungsweise abgeschätzt. Aber auch eine differenziertere Bewertung mittels dynamischer Gebäudesimulation stößt bei der Berücksichtigung des strömungs- und luftführungsbedingten Energiebedarfs an ihre Grenzen, soll die Untersuchung der Entwicklung nutzungs- und energieoptimierter Betriebsweisen dienen. Grundsätzlich bedarf es mit zunehmendem Raumvolumen großen Anstrengungen, um die für einen Schwimmbadbetrieb erforderliche Anlagentechnik in geeigneter Weise auszulegen, da sowohl in einer Schwimmhalle wie auch in Wellnessbereichen außergewöhnlich hohe Anforderungen an die Behaglichkeit gestellt werden, die hierauf abgestimmte Konzepte der Raumluftkonditionierung erfordern. Neben den Komfortansprüchen sind heute energieeffiziente Lösungen zu suchen, die infolge der extremen Raumklimabedingungen auch die Vermeidung von

Feuchteschäden an wärmetechnisch kritischen Anschlussbereichen gewährleisten müssen.

Der dynamischen Gebäudesimulation kommt dabei eine große Bedeutung zu, da sie eine realitätsnahe Bilanzierung aller Energieflüsse erlaubt und hierbei neben den Energiegewinnen und -verlusten über die Gebäudehülle auch die aus der Schwimmhallennutzung resultierenden analagentechnischen Energieumsätze zur Sicherstellung der Behaglichkeitsanforderung berücksichtigt. Mit der dynamischen Gebäudesimulation lassen sich die Energieumsätze innerhalb des Gebäudes wie auch die Wechselwirkung des Gebäudes mit seiner Umwelt abhängig der Nutzung analysieren. Werden energetische Betrachtungen einer Schwimmhalle vorgenommen, müssen darüber hinaus die aufzuwendenden Latentwärmemengen berücksichtigt werden, die mit dem Phasenübergang bei der Verdunstung von Wasser aus dem Becken wie auch bei der Entfeuchtung der Raumluft in den analagentechnischen Systemen einhergehen.

Losgelöst der eigentlichen Ziele und Aufgaben des Forschungsvorhabens sollen daher mit Hilfe der dynamischen Gebäudesimulations-Software IDA Indoor Climate and Energy (ICE) 4.0 des schwedischen Softwareentwicklers EQUA Simulations AB die energetischen Verhältnisse des jahreszeitlichen Gebäudebetriebs erfasst und bewertet werden. Aktuell werden daher am Fachgebiet mehrere Bachelor- und Master-Thesen bearbeitet, die sich mit der Gebäudesimulation im Kontext mit dem Betrieb eines Freizeitbades befassen.

CFD-SIMULATION

Auch wenn mit Hilfe der dynamischen Gebäudesimulation die Energieflüsse innerhalb des Gebäudes rechnerisch realitätsnah bilanziert werden können, lassen sich hiermit keine Aussagen zu den Raumluftverhältnissen in den verschiedenen Raumbereichen der großvolumigen Schwimmhalle erhalten. Auch das ergänzende Klimamonitoring liefert trotz der großen Zahl ergänzend der GLT in der Schwimmhalle installierten Sensoren nur begrenzte Informationen zu den Raumluftverhältnissen innerhalb der großen Schwimmhalle. Grund ist die Anordnung der Sensoren an den außenliegenden Wandflächen, die zur Vermeidung einer optischen Beeinträchtigung möglichst versteckt platziert und zur Vermeidung von Vandalismus in größerer Raumhöhe installiert wurden.

Um einen vollständigen Eindruck über die Raumluftverhältnisse innerhalb der Halle zu erhalten, sollten daher Simulationsrechnungen durchgeführt werden, mit deren Hilfe eine Analyse der Strömungsverhältnisse unter Berücksichtigung der geometrischen und klimatischen Randbedingungen

möglich wird. Der Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den gemessenen Werten an den Orten installierter Sensoren erlaubt dabei die Qualität der Simulation zu validieren, so dass eine Analyse zum Einfluss der Betriebsweise der diversen analagentechnischen Komponenten auf die Raumluftverhältnisse innerhalb der Schwimmhalle vorgenommen werden kann. In erster Linie interessiert dabei das offenbare Folienkissendach, dessen Auswirkungen auf das Raumklima im geschlossenen wie auch im offenen Zustand sich mit herkömmlichen Methoden wenn überhaupt nur schwer bewerten lassen. Neben den Effekten des Verfahrens des mittleren Dachdrittels interessieren dabei aber auch die Wirkweise der im Bad installierten HVAC-Systeme und welche Betriebsweisen nicht nur zu einem energieeffizienten Anlagenbetrieb, sondern auch angenehmen Raumluftverhältnissen führen.

Die Analyse der Raumluftverhältnisse wird mit Hilfe eines CFD-Strömungssimulationsprogramms vorgenommen, mit der die verschiedensten Nutzungsszenarien unter Berücksichtigung der äußeren Witterungseinflüsse untersucht werden sollen. Die im Rahmen des Forschungsvorhabens angedachten Simulationsuntersuchungen untergliedern sich dabei in verschiedene Teilschritte, die von der Modellbildung als Pre-Processing über die eigentliche Berechnung selbst bis hin zur Auswertung der Berechnungsergebnisse mit einem geeigneten Post-Processing reichen müssen. Während die eigentliche Berechnung und Lösung des Problems nur durch den Einsatz von Software und entsprechenden Lösungsverfahren möglich ist, beeinflusst der Anwender derartiger Programme selbst die Aussagefähigkeit der Berechnungsergebnisse, in dem er ein geeignetes Modell des zu untersuchenden Raumes und die zutreffenden Randbedingungen formuliert. Dabei muss er die wesentlichen Einflussgrößen erkennen und entsprechend in seinen Eingabedatensätzen berücksichtigen. Da i.d.R. aber sehr viele Unsicherheiten im Hinblick auf die Übergabe der Daten zur Beschreibung der geometrischen und thermodynamischen Randbedingungen herrschen und auch die Volumenelementnetzbildung nicht beliebig genau vorgenommen werden kann, bleiben vielfach Unsicherheiten, inwieweit die Berechnungsergebnisse der CFD-Simulation zutreffen. In Verbindung mit parallel durchgeführten Messungen am Bauwerk vor Ort lassen sich aber die gewünschten Validierungen der Berechnungsergebnisse unter realen Randbedingungen realisieren, so dass dann Simulationsstudien zum Einfluss verschiedenster Parameter auf die Raumluftverhältnisse durchgeführt werden können. Ein wesentlicher Untersuchungspunkt der Simulationsstudie wird dabei auch dem bauphysikalischen Verhalten des Folienkissendaches zukommen. Hierbei werden die

sich im Tages- und Jahresgang abhängig der Witterungsverhältnisse innerhalb der durch die Folienmembrane getrennten Luftschichten einstellenden Temperatur- und Strömungsverhältnisse analysiert und auch die sich im Bereich der Befestigungsprofile gegebenenfalls einstellende Tauwassergefährdung beachtet. Um bei diesen Untersuchungen zunächst eine Validierung des Modellansatzes vornehmen zu können, wurden an zwei Stellen des Folienkissendaches Temperatursensoren in die drei unterschiedlichen Luftkissenlagen eingebaut, mit denen sich die im Innern der drei Folienkissenlagen abhängig der klimatischen Verhältnisse in der Schwimmhalle und der äußeren Witterungsverhältnisse erfasst und so mit den Berechnungsergebnissen verglichen werden können.

Für die Berechnung der Temperatur- und Strömungsverhältnisse wird das leistungsfähige Softwarepaket Star-CCM+ der Firma CD-adapco verwendet.

Schwimmhalle

Mit den CFD-Strömungssimulationen sollen in erster Linie die Einflüsse technischer Anlagen auf die Raumluftverhältnisse in der Schwimmhalle analysiert und bewertet werden. Besonders interessant sind dabei die Raumluftzustände, wie sie sich beim Öffnen des Folienkissendaches einstellen. Dabei müssen verschiedene Szenarien untersucht werden, um den Einfluss des Öffnungszustandes der Außentüren, Fenster etc. bei unterschiedlichen außerklimatischen Verhältnissen herauszuarbeiten. Zu berücksichtigen sind dabei auch die Energieaufwendungen wie sie eine Raumluftentfeuchtung oder auch eine Vermeidung der Tauwasserbildung im Anschlussbereich des Luftkissendachs erfordert. Die bisherigen Forschungsarbeiten konzentrierten sich insbesondere auf die Modellbildung, um die räumliche Geometrie der Schwimmhalle und die an der Gebäudehülle wirkenden äußeren Wärme- und Feuchtelasten möglichst genau abbilden zu können. Zur Darstellung der Raumstruktur muss hierfür ein dreidimensionales Volumenmodell gebildet werden. Dazu wurde die Geometrie der Schwimmhalle zunächst mit der CAD-Software AutoCAD generiert und das erzeugte 3D-Modell in die CFD-Software Star-CCM+ exportiert. Es wurden zwei Volumenmodelle gebildet. Das eine Modell weist eine stark vereinfachte Geometrie und eine reduzierte Detailgenauigkeit für die ersten Untersuchungen auf. Das zweite Volumenmodell ist detailgetreu, um die Strömungsverhältnisse und die Verteilung der Temperatur und der relativen Feuchte im Raum vergleichsweise realitätsnah abbilden zu können. Die Abbildungen 5 und 6 zeigen die beiden ins Designtool von Star CCM+ importierten Volumenmodelle. Je größer und komplexer die

Oberfläche des Volumenmodells ausgebildet ist, umso mehr Zellen müssen für die Oberflächenvernetzung gebildet werden. Das erfordert einerseits einen deutlich höheren Rechenaufwand und führt zudem zu einer deutlich größeren Fehleranfälligkeit bei der Modellierung und der anschließenden Generierung 3D-Volumennetzes im Simulationstool von Star-CCM+.

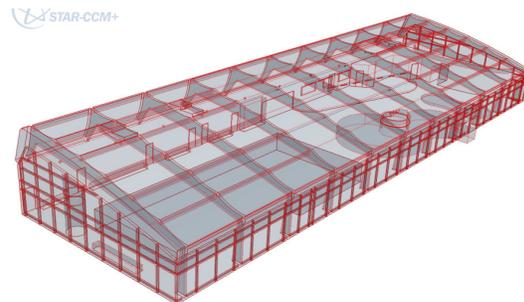


Abbildung 5 Detailliertes Raummodell

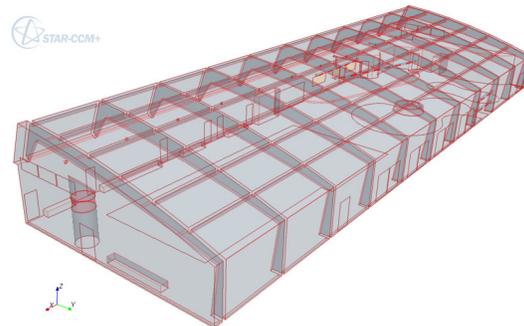


Abbildung 6 Vereinfachtes Raummodell

Nachfolgend werden erste Ergebnisse der Strömungssimulation vorgestellt, die mit dem einfacheren Volumenmodell gewonnen wurden. Abbildung 7 zeigt die Diskretisierung der inneren Raumschale der Schwimmhalle.



Abbildung 7: Generiertes Volumennetz

Im aktuellen Bearbeitungsstand wird das Modell für die Durchführung der Simulationsrechnungen in der Form vorbereitet, so dass die äußeren Randbedingungen (Außenluft, Strahlung, Beckenwasser etc.) wie auch die anlagentechnischen

Betriebszustände (Betrieb der Lüftungsanlage, Heizung etc.) berücksichtigt werden können.

Die bisherigen Simulationsrechnungen konzentrierten sich auf die Überprüfung der fehlerfreien Nutzbarkeit des einfacheren Volumenmodells nach Abb. 6. Darauf aufbauend werden in den weiteren Untersuchungen das Volumenmodell und die Randbedingungen sukzessive erweitert und auf diese Weise immer stärker den realen Bauwerksverhältnissen angepasst. Bei all diesen Untersuchungen lassen sich dann anhand der Messwerte des Klimamonitorings die sich aus den Simulationen ergebenden Raumluftverhältnisse überprüfen. So geben die nachfolgenden Abbildungen einen ersten Eindruck darüber, welche Möglichkeiten sich mit dem Einsatz der CFD-Simulation zur Analyse der Raumluftverhältnisse ergeben. Abhängig der an den Bauteilrändern wirkenden Wärme- und Feuchtelasten wie auch des jeweiligen Anlagenbetriebs stellen sich unterschiedlichste Temperaturverteilungen und Strömungsverhältnisse in großvolumigen Schwimmhallen ein, die das Behaglichkeitsempfinden der Badegäste maßgeblich bestimmen.

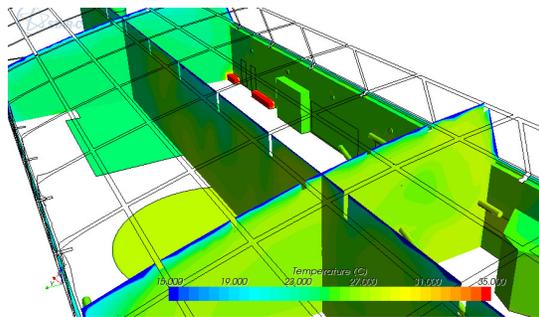


Abbildung 8 Temperaturverteilung in der Schwimmhalle

Desweiteren können Aussagen zur Tauwasserproblematik im Bereich der Wärmebrücken mit bekannter Oberflächentemperatur der Hüllflächenbauteile und den im Nahfeld vorherrschenden Raumklimaten getroffen werden. Im Anschluss daran werden Simulationsberechnungen zu verschiedensten Betriebsszenarien der heizungs- und lüftungstechnischen Anlagen unter Berücksichtigung möglichst realer Klima- und Konstruktionsrandbedingungen im winterlichen und sommerlichen Lastfall durchgeführt. Vor allem die Folgen des Öffnens des mittleren Drittels des Folienkissendaches soll im Rahmen der Simulationsstudien eingehend untersucht werden, schließlich könnten während der sommerlich warmen bis heißen Tagen durch das Öffnen des Daches große Mengen an Energie für die Lüftung und Entfeuchtung eingespart werden.

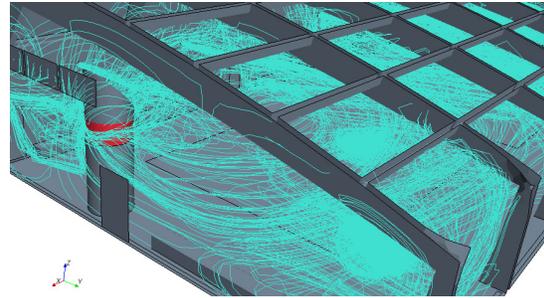


Abbildung 9 Strömungslinien bei geschlossenem Dach im Bereich des turmartigen Luftabzugs

Doch sind die Ergebnisse der Simulationsrechnung ohne eine Validierung durch zusätzliche Messungen vielfach fragwürdig, da sich reale Raumluftverhältnisse im Modell nur bedingt nachzeichnen lassen und eine enorme Rechenleistung erfordern. Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens lassen sich aber die Ergebnisse der Simulationsrechnung mit den Messdatenreihen des Monitorings vergleichen und so die Qualität der Berechnung bewerten.

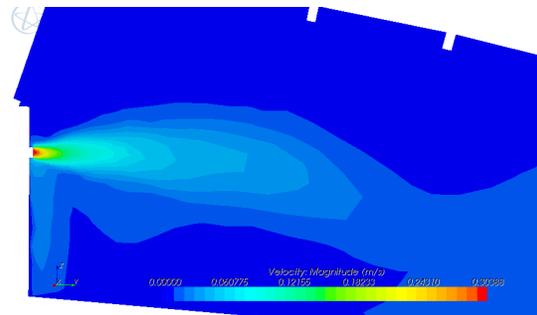


Abbildung 10 Verteilung der Luftgeschwindigkeit im Bereich einer Zuluft-Düse in der Schwimmhalle

Folienkissenelement

Konstruktionen in Form von Membrankissenelementen als thermische Gebäudehülle gewinnen in der modernen Architektur zunehmend an Bedeutung. Dabei ist deren bauphysikalisches Verhalten bisher nur wenig untersucht worden. Bekannt ist, dass der größte Wärmeverlust nicht in Form der Wärmeleitung, sondern in Form der Konvektion erfolgt. So weisen die jeweils unteren, der Schwimmhalle zugewandten Folien der drei übereinander angeordneten Luftkissen höhere Temperaturen auf als die darüber gelegene Folie, so dass sich die innerhalb des Luftkissens befindliche Luft an der unteren Folie erwärmt und in Form der Konvektion zur oberen Folie hin bewegt. Hier angekommen, gibt die erwärmte Luft den zuvor aufgenommenen Wärmeinhalt wieder ab und fällt zurück. Dadurch und infolge der veränderlichen Dicke des Folienkissens kommt es im Dachanschlussbereich zu einer erhöhten

Wärmebrückenwirkung. Eine rein analytische Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten ist entsprechend der komplexen geometrischen Ausbildung der Folienkissen mit stark gewölbtem Verlauf der Folien kaum möglich. Alternativ lassen sich die hier einstellenden Temperaturen und konvektiven Strömungen mittels CFD-Simulation berechnen. Vor allem im Bereich des Hallenbadbaus kommt den CFD-Berechnungen eine große Bedeutung zu, da neben einer Bewertung der Behaglichkeit auch baukonstruktive Fragestellungen, so z.B. die Tauwasserbildung infolge erhöhter Feuchtelasten in Wärmebrückenbereichen zu beantworten sind, um schadensfreie Konstruktionen durch den geeigneten Betrieb der verfügbaren Anlagentechnik sicherzustellen. Eine detaillierte Betrachtung der Membrankissenkonstruktion ist deshalb ein weiteres Ziel des Projektes. Entsprechend wurden wie bereits angedeutet zwei Folienkissenelemente in jeder Kammer mit einem Temperaturfühler ausgestattet, um den Temperaturverlauf über die Schichtgrenzen hinweg erfassen zu können. Werden nun die thermodynamischen Verhältnisse innerhalb der Folienkissenkonstruktion mittels CFD-Strömungssimulation im Tages- und Jahresverlauf analysiert, lässt sich so das bauphysikalische Dachverhalten abhängig der äußeren und raumseitigen Temperatur-, Druck- und Strömungsverhältnisse analysieren.

STAND DES VORHABENS

In einem ersten Arbeitspaket wurde die umfangreiche Sensorik für das Klimamonitoring des Schwimmbades installiert und die Ankopplung an die GLT vorgenommen, um die dort durchgeführten Messungen zu speichern und zu visualisieren. Diese Daten sollen über einen Zeitraum von zwei Jahren gesammelt und ausgewertet werden, um alle jahreszeitlichen Einflüsse zu erfassen. Parallel dazu werden Berechnungen zu den Temperatur- und Strömungsverhältnissen innerhalb der Schwimmhalle unter Berücksichtigung der Wirkung des Membrankissenelements durchgeführt und anhand der gemessenen Daten validiert. Erste umfassendere und auch technisch nutzbare Ergebnisse werden im Herbst 2010 erwartet. Bis dahin werden auch die laufenden Bachelor-Thesen beendet, deren Gegenstand die dynamische Gebäudesimulation unter Berücksichtigung vereinfachter Annahmen zur Schwimmhallennutzung und zum Betrieb der technischen Anlagen bilden.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Erfassung von Messdaten im Rahmen des Klimamonitorings wie auch die parallele Untersuchung der Raumluftverhältnisse mittels CFD-Strömungssimulation sollen in der neuen

Schwimmhalle des Freizeitbads der Stadt Kelsterbach durchgeführt werden, um eine Optimierung des Betriebs der anlagentechnischen Komponenten herausarbeiten zu können. Hierbei interessiert insbesondere die Bewertung des sommerlichen Energieeinsparpotenzials infolge des Öffnens des mittleren Drittels des Folienkissendaches. Neben den Zielen eines energieeffizienten Betriebs der Schwimmhalle hängt ein wirtschaftlicher Betrieb des Freizeit- und Wellnessbades auch von der Behaglichkeitsempfindung der Badegäste wie auch von einer schadensfreien Konstruktion ab. Entsprechend müssen im Rahmen des Forschungsvorhabens die Behaglichkeit der Badbesucher und die Konstruktion des Folienanschlusses hinsichtlich eines Feuchte- und Korrosionsschutzes zuverlässig bewertet werden. Auf diese Weise lässt sich dann der Badbetrieb mit einem minimalen Energieaufwand realisieren. Mit Hilfe der in den Untersuchungen neben dem Monitoring durchzuführenden CFD- und FE-Analysen kann dabei ein sicheres Verständnis zum bauphysikalischen Verhalten des Folienkissendaches geschaffen werden, das eine Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf andere Bauwerke erlauben soll.

AUSBLICK

Aus bisher noch unbekanntem Gründen sind die Verbrauchswerte der ersten Betriebsmonate des neuen Freizeitbades im Vergleich zu den bei der Planung prognostizierten Energieverbrauchswerten deutlich zu hoch. Da die Gebäudehülle in einem energetisch hochwertigen Standard errichtet wurde und so die Transmissionswärmeverluste hierfür nicht verantwortlich sein können, scheinen die Verluste auf einen nicht hinreichend optimierten Betrieb der technischen Anlage zurückzuführen sein. Eine Überprüfung der Anlagenparameter ist demzufolge dringend erforderlich, um den energieeffizienten Betrieb des Bades bei gleichzeitig behaglichem Aufenthalt sicherzustellen.

LITERATUR

- CD-adapco. 2007: STAR-Design Users Guide
- VDI 2089. 2005 „Technische Gebäudeausrüstung von Schwimmbädern“
- Willems, Wolfgang M.; Dinter, Simone; Schild, Kai. 2006. Vieweg Handbuch Bauphysik Teil 1 Wärme- und Feuchteschutz, Behaglichkeit, Lüftung, Vieweg+Teubner Verlag.
- Andreas Kaufmann. 2009. Bauphysikalisches Verhalten von Membrankissenkonstruktionen, 2. Fachsymposium zum konstruktiven Membrankissenbau, Fraunhofer Institut für Bauphysik, Deutschland

MÖGLICHKEITEN UND GRENZEN BEI DER MODELLIERUNG VON EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE MENSCHLICHE LEISTUNGSFÄHIGKEIT

Susanne Urlaub¹, Runa Hellwig², Christoph van Treeck³, Klaus Sedlbauer^{1,3}

¹Lehrstuhl für Bauphysik, Universität Stuttgart

²Hochschule Augsburg, Fachgebiet Energie Effizienz Design und Bauklimatik

³Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen

KURZFASSUNG

Zunehmende Globalisierung und das Erfordernis, immer kostensparender zu wirtschaften stellt für viele Unternehmen eine Herausforderung dar. Um wettbewerbsfähig zu sein, sollen die Mitarbeiter leistungsfähig und motiviert sein und optimal ihr Wissen einbringen können, andererseits sollen sie möglichst wenig Kosten verursachen. In den kommenden Jahren werden immer mehr Menschen im Büro beschäftigt sein. Daher beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit den Einflussfaktoren auf die Leistungsfähigkeit bei Büroarbeit. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf dem Raumklima, da es dazu sehr gegensätzliche Diskussionen in der Literatur gibt. Neben einer Definition der Leistungsfähigkeit und einer Übersicht über mögliche Einflüsse stellt sich auch die Frage, wie Leistung adäquat erfasst werden kann. Nach Auswertung der zugänglichen Literatur ergeben sich widersprüchliche Ergebnisse. Die Ableitung einer Beziehung ist offensichtlich nicht trivial. Außerdem ist anzunehmen, dass das Raumklima offensichtlich keinen alleinigen Einflussparameter bezüglich der Leistungsfähigkeit darstellt. Vielmehr besteht vermutlich eine weite Verzweigung sowohl mit anderen physikalischen Faktoren wie der Akustik oder der Beleuchtung und mit Aspekten wie Raumgestaltung oder psychosozialen Effekten.

ABSTRACT

Increasing globalization and the necessity to reduce costs means a problem for many companies. To act competitively on an global market, the workers should be able to perform their jobs at their best and on the other hand they should produce as little costs as possible. Furthermore, an increasing amount of work will be shifted in offices in the next years. For this reason, this paper concerns the factors that affect the performance of office workers. The focus is on the part of the indoor climate as it is seen very different in the literature. In addition to a definition of performance and productivity and an overview about some possible influences, an important question is how performance could be measured adequately. An analysis of the literature has shown that the results are contradictory. The relationship

between temperature and work performance is apparently not trivial, furthermore, it is supposed that the indoor climate is not the only factor that affects the work performance. In fact, there are probably multiple connections between other physical parameters like acoustics or lighting and as well with psychosocial factors and the interior design.

EINLEITUNG

In Industrieländern verbringen Menschen mehr als 90 % ihrer Zeit in Innenräumen. Ein großer Teil davon entfällt bei Erwerbstätigen auf die Arbeits- bzw. Büroräume. Im Jahr 2002 waren ca. 11,5 Mio. Menschen im Büro beschäftigt (Bulwien 2004). Dies entspricht knapp einem Drittel der gesamten erwerbstätigen Bevölkerung in Deutschland. Der Gestaltung von Büroräumen sollte daher eine hohe Bedeutung zukommen. Im Gegensatz zu Wohnräumen, in denen sich der Raumnutzer primär wohl fühlen sollte, kommt es bei Arbeitsräumen darauf an, dass die darin arbeitenden Menschen produktiv und leistungsfähig sind, ihr Know-How und ihre Kreativität in die Arbeitsprozesse einbringen können und ihren Anteil zur Wertschöpfung des Unternehmens beitragen. Befragt man Unternehmen nach ihren wichtigsten Innovationspotentialen, stehen die Mitarbeiter an vorderster Stelle. Abbildung 1 zeigt die Ergebnisse dieser Umfrage.

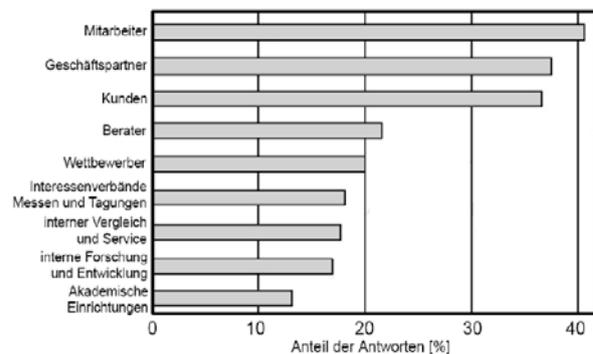


Abbildung 1 Innovationspotentiale für Unternehmen nach (VDI 2008)

Es stellt sich also die Frage, wie die Gestaltung der physikalischen Raumparameter wie Temperatur, Luftfeuchte, Luftqualität, Akustik und Beleuchtung den Menschen bei der Arbeit beeinflusst und wie die Räume leistungsoptimiert gestaltet werden können.

Dies gewinnt im Bereich der Raumtemperatur eine besondere Bedeutung, da in den letzten Jahren vermehrt besonders heiße Sommer auftraten, bei denen Außentemperaturen von bis zu 40 °C im Sommer 2003 gemessen wurden. Dies führt auch zu erhöhten Temperaturen in Innenräumen.

Die Anforderungen an die Raumtemperaturen in Arbeitsräumen sind in der Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) geregelt und in den Arbeitsstättenrichtlinien konkretisiert. In der aktuellen Arbeitsstättenrichtlinie ist angegeben, dass die Raumtemperatur 26 °C nicht überschreiten soll (ASR 6 2001). Dieses „soll“ ist jedoch sehr verbindlich, wie die Rechtsprechung zu diesem Thema zeigt. Eine Reihe von Urteilen haben zur Folge, dass auf Vermieter von Gewerberäumen erhebliche kostenintensive Nachrüstpflichten zukommen können, wenn die Temperaturen in den vermieteten Arbeitsräumen 26 °C überschreiten (LG Bielefeld 2003; OLG Rostock 2000, OLG Hamm 1994). Die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Raumtemperatur und Arbeitsleistung weist somit auch eine enorme wirtschaftliche Bedeutung auf.

BISHERIGE STUDIEN

Diese Fragestellung ist aber nicht erst in den letzten Jahren in den Fokus der Forschung gerückt. Vielmehr werden schon seit einigen Jahrzehnten mögliche Zusammenhänge untersucht. Insbesondere in den 1970er und 1980er Jahren wurde eine Vielzahl an Studien durchgeführt. Dabei handelte es sich fast ausschließlich um Laborstudien, d.h. die Durchführung erfolgte in einer künstlichen Umgebung und nicht am tatsächlichen Arbeitsplatz. Die übrigen physikalischen Variablen wie Luftfeuchte oder Beleuchtung wurden dabei konstant gehalten. Zur Erfassung der Leistungsfähigkeit wurden verschiedene Prinzipien verwendet. Abbildung 2 zeigt die verschiedenen Ansätze.

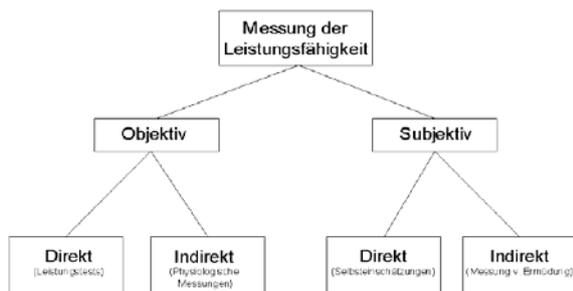


Abbildung 2 Ansätze zur Messung der menschlichen Leistungsfähigkeit (Antikainen et al. 2006).

Zum Einen wurde versucht, die Leistung objektiv zu messen, in dem man die Versuchspersonen eine geistige Aufgabe bearbeiten ließ. Diese wurden anschließend hinsichtlich der Anzahl der bearbeiteten Teilaufgaben (Schnelligkeit) und der Anzahl der Fehler (Qualität der Arbeit) ausgewertet. In vielen Fällen wurden dabei Rechenaufgaben, oder auch Logikaufgaben verwendet, bei denen ein Satz vervollständigt werden sollte, z. B. (Holmberg und Wyon 1969; Wyon et al. 1973; Langkilde 1978). Zum Anderen sollten auch so genannte Ersatzgrößen Aufschluss über die Leistungsfähigkeit geben. Diese Größen messen nicht die Leistung selbst, sondern eine Größe, die direkt mit dieser in Beziehung steht und sie beeinflusst (Antikainen et al. 2006). Dies wurde beispielsweise mit physiologischen Messungen, wie Hauttemperaturaufzeichnungen durchgeführt. Ergänzt wurden die Studien durch subjektive Messungen wie Befragungen der Versuchspersonen hinsichtlich ihrer Einschätzung der eigenen Leistungsfähigkeit, ihrer Anstrengung, Ermüdung oder auch ihrer Wahrnehmung des Raumklimas.

Auch hinsichtlich der Messumgebung gibt es unterschiedliche Studien. So findet eine überwiegende Anzahl von Studien unter kontrollierten, künstlichen Bedingungen statt, in der nur ein Parameter variiert wird. Tabelle 1 zeigt die wesentlichen Unterschiede beider Versuchskonzepte.

Tabelle 1
Eigenschaften von Feld- und Laborstudien nach
(Meister 1986)

EIGENSCHAFT	LABORSTUDIE	FELDSTUDIE
Homogenität der Probanden	Passende Gruppe / Kontrollgruppe	Nur eine Gruppe mit evtl. inhomogenen Personengruppen
Versuchsverlauf	Sehr genau festgelegt	Weniger genau festgelegt (eher stochastisch)
Störvariablen	Weitgehend eliminiert oder kontrolliert	Stark unkontrolliert
Physische Umgebungsparameter	Kontrolliert oder künstlich	Natürlich
Gemessene Zeitdauer	Kurze Zeiteinheiten	Längere, kontinuierliche Messungen
Steuerung der Variablen	Durch Experimentator	Durch systembedingte Betrachtungen
Art der Probanden	Meist Studenten	Meist Systemnutzer
Subjektive Einstellung zum Versuch	Positiv oder neutral	Neutral, oft negativ

In der realen Arbeitsumgebung jedoch sind die übrigen Bedingungen in der Regel nur selten konstant. Dies kann wiederum Interaktionen von Raumklimavariablen zur Folge haben, wie sie in Laborsituationen nie auftreten würden und unter Umständen andere Reaktionen bei den Raumnutzern auslösen. Nur wenige Studien wurden als Feldstudie in tatsächlichen Arbeitsumgebungen durchgeführt.

Auswertung von bisher durchgeführten Studien

Im Bereich des thermischen Raumklimas wurde eine Vielzahl von Studien durchgeführt. Viele davon stellen sehr hohe Temperaturen in den Fokus, um die Belastung auf Soldaten oder Piloten zu simulieren.

Nachfolgend wird eine Anzahl von Studien ausgewertet, die den moderat-warmen Bereich von 20 °C bis ca. 32 °C untersuchen. Bei allen diesen Untersuchungen wurden Leistungstests benutzt. Zusätzlich wurde die thermische Behaglichkeit erfasst und Größen wie Anstrengung oder Ermüdung über Fragebögen erhoben. Außerdem waren alle Studien so konzipiert, dass jeder Proband jeder Temperatur ausgesetzt war und somit in den Ergebnissen der Aufgaben mit sich selbst verglichen werden konnte. Abbildung 3 zeigt die untersuchten Studien und die Tests, die jeweils angewendet wurden.

	Lernverständnis	Rechenaufgabe (Addition, Multiplikation)	Wortgedächtnistest	Pfadfindertest	Lesegeschwindigkeit und -verständnis	Gegensätze suchen	höchste Zahl	Konzentration	Kreativität	Labyrinth	Figur abzeichnen	Wörter/Nummern vergleichen	Analogien	Schreibaufgabe	Satzverständnis	Buchstaben suchen	Fingertätigkeit	Hand-Auge-Koordination	PAB-Testbatterie	Korrekturlesen	Überlappungen geometrischer Figuren	Gedächtnisspanne	Bilderkennung	Symbol-Ziffern-Kombination wiedergeben	Schlussfolgerungen	Räumliche Vorstellung	Bildliches Abstrahieren	Ergebnisse sortieren	
Pepler, Warner 1968	X																												
Holmberg, Wyon 1969		X			X	X	X	X																					
Wyon 1969		X	X	X																									
Wyon et al. 1973		X																											
Schoer, Shaffran 1973	X	X						X	X	X	X	X																	
Langkilde et al. 1973		X	X	X																									
Wyon et al. 1975		X	X	X																									
Langkilde 1978		X	X	X							X			X															
Wyon et al. 1979		X			X				X					X	X	X													
Nishihara et al 2002		X											X					X											
Fang et al. 2004		X							X				X						X										
Tiller et al. 2004		X											X						X										
Witterseh et al. 2004		X		X					X				X																
Tanabe et al. 2007		X																											
Lan et al. 2009		X						X							X					X	X	X	X	X	X	X	X		
Lan, Lian 2009					X												X										X	X	

Abbildung 3 Durchgeführte Studien zu Leistungsfähigkeit unter moderater Wärmebelastung.

Bei der Auswertung gelangen viele Autoren zu einem unbefriedigenden Ergebnis. Es treten in nur wenigen Fällen statistisch signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Raumbedingungen auf. Bei häufig verwendeten Rechentests wie Additionsaufgaben treten lediglich bei (Lan et al. 2009) Signifikanzen auf. Auch der Einsatz von schwierigeren Multiplikationsaufgaben ergab keine statistisch gesicherten Unterschiede. Beim häufig verwendeten Pfadfindertest, bei dem Zahlen oder Buchstaben in einer bestimmten Reihenfolge miteinander verbunden werden müssen, zeigten sich ebenfalls keine Unterschiede in der Bearbeitung.

In neueren Studien wurden die Aufgaben dahingehend ausgewählt, dass damit typische Büroarbeit simuliert werden sollte. Daher wurden Aufgaben zum Abtippen von Text, Korrekturleseaufgaben oder Kreativitätsaufgaben eingesetzt, die Ergebnisse wurden jedoch auch hier nicht signifikant.

Bei Betrachtung von Tendenzen der Ergebnisse treten zudem Widersprüche auf. Abbildung 4 zeigt Ergebnisse von Additionstests aus vier Studien bei verschiedenen Temperaturen. Hierbei treten sowohl Leistungsverbesserungen (Lan et al. 2008; Langkilde 1978) bei höheren Temperaturen auf, als auch Verschlechterungen (Lan, Lian 2009), wobei diese

marginal sind. Bei (Langkilde et al. 1973) lassen sich so gut wie keine Veränderungen in den Ergebnissen feststellen.

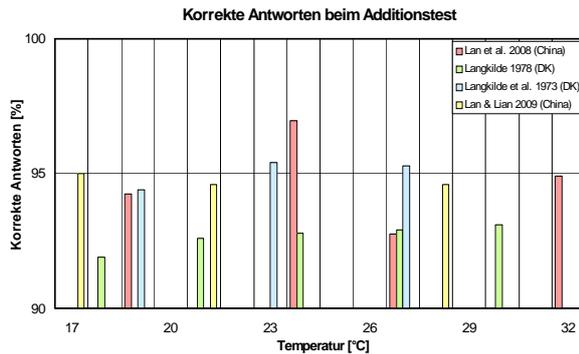


Abbildung 4 Ergebnisse von Additionstests aus vier Studien.

Metaanalysen

Das Ableiten einer Beziehung zwischen Raumtemperatur und Arbeitsleistung ist demzufolge nicht trivial. Die Ableitung von Zusammenhängen wie beispielsweise in (Wyon 1986), der einen linearen Zusammenhang unterstellt und postuliert, dass bei 26 °C die Leistungsfähigkeit bei geistiger Arbeit um 13 % niedriger ist als bei 23 °C, lassen die Ergebnisse der Studien eigentlich nicht zu. Zu dieser Problematik wurden zwei Metaanalysen verfasst (Hancock et al. 2007; Pilcher et al. 2002). Unter Einbeziehung extremer raumklimatischer Verhältnisse wie Temperaturen über 32 °C und unter 15 °C kommen beide zu einem ähnlichen Ergebnis. Hancock et al. fassen dies unter der „Beziehung des erweiterten U“ zusammen. Abbildung 5 zeigt diese Beziehung.

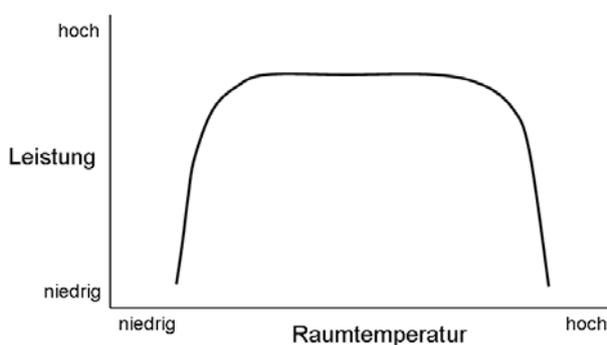


Abbildung 5 Die Beziehung des erweiterten U zwischen Raumtemperatur und Arbeitsleistung nach (Hancock et al 2007).

Dies besagt, dass es einen Bereich gibt, in dem die Anpassung an die Umgebung optimal ist und in welchem die Reaktionen (darunter ist auch die Leistung zu verstehen) auf die Umwelt auf einem einheitlichen Niveau verbleiben. Erst ab einem

gewissen Zeitpunkt werden die Umgebungsbedingungen so ungünstig, dass die Anpassung nicht mehr optimal gewährleistet werden kann und die Reaktionen sich verändern.

PROBLEME VON STUDIEN ZU MENSCHLICHER LEISTUNGSFÄHIGKEIT

Einflussfaktoren

Hinsichtlich seiner Arbeitsleistung wird der Mensch von vielen Faktoren beeinflusst. Die Raumumgebung, insbesondere das Raumklima, stellt dabei nur eine Gruppe von Faktoren dar. Laut (Clements-Croome 2001) lassen sich vier große Einflussbereiche differenzieren. Abbildung 6 zeigt die unterschiedlichen Aspekte. Diese umfassen zum Einen die zwischenmenschlichen Beziehungen, wie etwa das Verhältnis zu den Kollegen und den Vorgesetzten. Zum Anderen spielen organisatorische Variablen eine Rolle, wie etwa die Entscheidungsstruktur im Unternehmen und auch die eigene Stellung. Wichtig sind darüber hinaus die eigenen Karriereziele und die Identifizierung mit der Arbeitsaufgabe. Das Raumklima findet sich unter dem letzten Punkt, der Arbeitsplatzgestaltung. Darunter fallen auch Aspekte wie die Raumgestaltung und Büroeinrichtung. Bei allen diesen Faktoren ist bisher jedoch nur bekannt, dass sie einen Einfluss haben. Wie groß dieser Einfluss im Vergleich zu den jeweils anderen Bereichen ist, und ob es Wechselwirkungen insbesondere mit dem Raumklima gibt, ist bislang nicht ausreichend bekannt.



Abbildung 6 Einflussfaktoren auf die menschliche Leistungsfähigkeit nach (Clements-Croome 2001).

Messung der Leistungsfähigkeit

Bei der hier im Fokus stehenden Büroarbeit handelt es sich dabei vornehmlich um geistige Arbeit, die im

Sitzen ausgeführt wird. Im Gegensatz zu körperlicher Arbeit ist der Grundumsatz des Menschen dabei nur wenig erhöht. Außerdem besteht die Schwierigkeit der Erhebung darin, eine geeignete Beurteilungsgröße für die Arbeitsleistung von Büroarbeit zu finden. Zwar lassen sich beispielsweise Sekretariatsaufgaben wie Abtippen von Text leicht auf die Anzahl der Fehler und die Geschwindigkeit überprüfen, bei höheren und komplexeren Aufgaben jedoch wird dies schwierig. Nach (Last 2000) sind diese dadurch gekennzeichnet, dass es keine standardisierte Vorgehensweise zur Aufgabenerledigung gibt, sondern, dass für jede Arbeitsaufgabe individuell nach Lösungsmöglichkeiten gesucht werden muss. Dies in einem so genannten Leistungstest abzubilden, ist augenscheinlich sehr schwierig.

Definition von Büroarbeitsplätzen

Um eine Aussage über den Zusammenhang zwischen Leistungsfähigkeit von Büroangestellten und der Raumtemperatur geben zu können, muss bekannt sein, welche Arbeiten typischerweise für diese Beschäftigten anfallen. Dies ist jedoch nicht einfach festzulegen. Betrachtet man die Branchen, in denen Menschen im Büro arbeiten, ist festzustellen, dass diese Gruppe von Erwerbstätigen in sehr vielen Berufsbereichen anzutreffen ist. Abbildung 7 gibt hierzu einen Überblick. Demzufolge sind auch technische Berufe teilweise im Büro angesiedelt, deren Tätigkeiten unterscheiden sich jedoch in der Regel grundlegend von beispielsweise Sekretariatsaufgaben. Auch viele Selbstständige üben überwiegend oder häufig Bürotätigkeiten aus, hier besteht jedoch ein Problem der statistischen Erfassung, denn diese Untergruppe wird nicht separat in den Selbstständigen-Statistiken ausgewiesen.

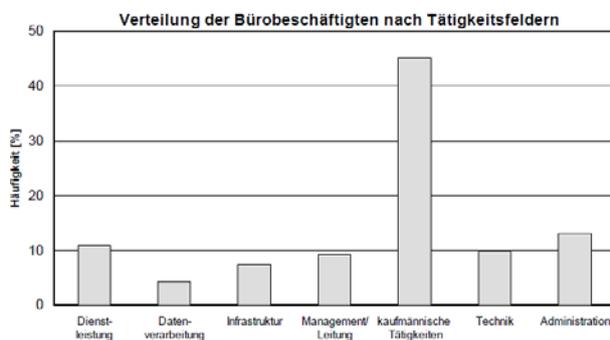


Abbildung 7 Tätigkeitsbereiche von Bürobeschäftigten nach (Troll 1994).

Versuchspersonen

Betrachtet man die Versuchspersonen, mit denen die Untersuchungen durchgeführt wurden, ist festzustellen, dass mit Ausnahme von (Langkilde 1978)

ausschließlich junge Personen bzw. Studenten im Alter von maximal bis zu 30 Jahren teilnehmen. Betrachtet man dagegen Statistiken über die Altersverteilung bei Bürobeschäftigten, zeigt sich das in Abbildung 8 dargestellte Schaubild. Demzufolge ist nur ein kleiner Teil der Bürobeschäftigten, ca. 18 %, jünger als 30 Jahre, ein großer Anteil ist sogar über 50 Jahre alt. Aufgrund dessen ist zu hinterfragen, wie übertragbar die Ergebnisse aus Laborstudien mit sehr jungen Probanden auf die tatsächliche Arbeitswelt von älteren Personen tatsächlich sind.

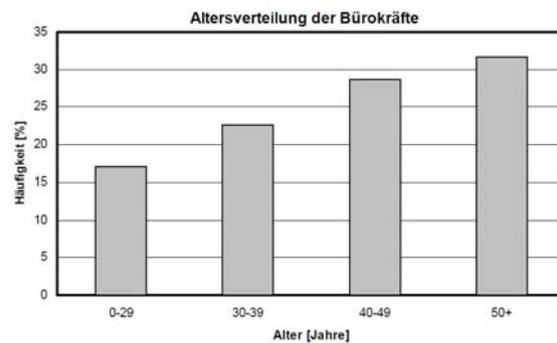


Abbildung 8 Altersverteilung bei Bürobeschäftigten nach (DAK 2005)

ZUSAMMENFASSUNG

Wie die obigen Ausführungen zeigen, lassen sich keine eindeutigen Aussagen über den Zusammenhang zwischen der Raumtemperatur und der menschlichen Leistungsfähigkeit treffen. In den meisten Fällen treten in den Studien keine signifikanten Zusammenhänge auf. Zudem ist unbekannt, welchen Einfluss das Raumklima auf die Leistungsfähigkeit im Vergleich zu anderen Variablen wie z.B. das soziale Umfeld am Arbeitsplatz und die Struktur der Arbeitsaufgaben, hat.

Da häufig Laborstudien in künstlichen Umgebungen durchgeführt und mit vergleichsweise jungen Versuchspersonen durchgeführt werden, stellt sich hier die Frage nach der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf reale Arbeitssituationen.

Zudem ist es bei solchen Studien schwierig, wenn nicht sogar unmöglich, Bürotätigkeiten realistisch abzubilden, die repräsentativ für diese gesamte Gruppe der Erwerbstätigen ist. Eine Differenzierung der Untersuchungen nach einzelnen Branchen ist bislang nicht erfolgt. Auf diesem Gebiet bestehen sehr viele offene Fragen, die ein weites Forschungsfeld einrahmen.

AUSBLICK

Gegenstand aktueller Untersuchungen ist deshalb die Frage, ob und wie sich ein Zusammenhang von

Raumtemperatur und Arbeitsleistung herstellen lässt und ob es auch einen Zusammenhang mit der Raumwahrnehmung gibt.

LITERATUR

- Antikainen R., Lappalainen S., Lönnqvist A., Maksimainen K., Reijula K., Uusi-Rauva E. Studying the relationship between indoor air and productivity: theoretical discussion and empirical experiences. Proceedings of European Productivity Conference 2006. 66-72. Espoo.
- ASR 6. Arbeitsstättenrichtlinie 6, idF v. 08.05.2001.
- Bulwien 2004. Die Situation auf den Immobilienmärkten. Energieeffiziente Büro- und Verwaltungsgebäude. Veranstaltung der IHK, Handwerkskammer und LH München, 15.06.2004.
- Clements-Croome D. 2001. Indoor environment and productivity. In: Clements-Croome D. (Hrsg.). Creating the productive workplace. London, New York: E&FN Spon.
- DAK 2005. DAK Gesundheitsreport 2005-Arbeitsplatz Büro. Arbeitsbedingungen und Gesundheit bei Bürofach- und Bürohilfskräften. Hamburg.
- Hancock P., Ross J. M., Szalma J. L. 2007. A meta-analysis of performance response under thermal stressors. Human factors 49 (2007), 851-877.
- Holmberg I., Wyon D. P. 1969. The dependance of performance in school on classroom temperature. Educational and psychological interactions 31 (1969), 1-20.
- Lan L., Lian Z., Pan L., Ye Q. 2009. Neurobehavioral approach for evaluation of office workers' productivity: the effects of room temperature. Building and Environment 44(2009), 1578-1588.
- Lan L, Lian Z. 2009. Use of neurobehavioral tests to evaluate the effects of indoor environment quality on productivity. Building and Environment 44 (2009), 2208-2217.
- Langkilde G., Alexandersen K., Wyon D. P., Fanger P. O. 1973. Mental performance during slight cool or warm discomfort. Archives des Sciences Physiologiques 27 (1973), A511-A518.
- Langkilde G. 1978 The influence of the thermal environment on office work. In: Fanger P. O., Valbjörn O.(Hrsg.) Indoor Climate. Kopenhagen: Byggeforskningsinstitut.
- Last R. 2000. Arbeitsbedingungen und Belastungen in der Verwaltung. In: Teske U., Witte B. (Hrsg.) Prävention arbeitsbedingter Erkrankungen. Hamburg. VSA-Verlag.
- LG Bielefeld 2003.Urteil vom 16.04.2003. AZ: 3 O 411/01
- Meister D. 1986. Human Factors: Testing and Evaluation. Amsterdam: Elsevier.
- Nishihara N., Yamamoto Y., Tanabe S. 2002. Effects of thermal environment on productivity evaluated by task performance, fatigue feelings and cerebral blood oxygenation changes. Proceedings of the Ninth International Conference on Indoor Air Quality and Climate, 828-833.
- OLG Rostock 2000. Urteil vom 29.12.2000, AZ:3 U 83/98.
- OLG Hamm 1994. Urteil vom 18.10.1994, AZ: 7 U 132/92.
- Pepler R. D., Warner R. E. Temperature and learning: an experimental study. ASHRAE Transactions 74 (1968), 211-219.
- Pilcher J. J., Nadler E., Busch C. 2002 Effects of hot and cold temperature exposure: a meta-analytic review. Ergonomics 45 (2002), 682-698.
- Schoer L., Shaffran J. 1973 A combined evaluation of three separate research projects on the effects of thermal environment on learning and performance. ASHRAE Transactions 79 (1973), 97-108.
- Tanabe S, Nishihara N., Haneda M. 2007. Indoor temperature, productivity and fatigue on office tasks. HVAC & R Research 13 (2007), 623-633.
- Tiller D. K., Wang L. M., Musser A. 2004. Combined effects of noise and temperature on human comfort and performance. ASHRAE Final Report 1128-RP. University of Nebraska.
- Troll L. 1994. Beschäftigungsmagnet Büro. Ein gesamtdeutscher Befund. IAB-Materialien 1/94. Nürnberg.
- VDI. 2008. Hohes Arbeitstempo verschärft gesundheitliche Risiken. VDI-Nachrichten 6, 25.
- Witterseh T, Wyon D. P., Clausen G.: The effects of moderate heat stress and open-plan office noise distraction on SBS-symptoms and on the performance of office work. Indoor Air 14 (2004), Suppl. 8, 30-40.
- Wyon D. P. 1969. The effects of moderate heat stress on the mental performance of children. SIB Document D8:1969, Statens institute för byggnadsforskning.

- Wyon D. P. 1986. The effects of indoor climate on productivity and performance. *VVS & energi* 3 (1986), 59-65.
- Wyon D. P., Asgeirsdottir T., Kjerulf-Jensen P., Fanger P. O. 1973. The effects of ambient temperature swings on comfort, performance and behaviour. *Archives des Sciences Physiologiques* 27 (1973), A441-A458.
- Wyon D. P., Fanger P. O., Olesen B. W., Pedersen C. J. K. 1975. The mental performance of subjects clothed for comfort at two different air temperatures. *Ergonomics* 18 (1975), 359-374.
- Wyon D. P., Andersen I., Lundqvist G. R. 1979. The effects of moderate heat stress on mental performance. In: Cena K, Clark J. A.: *Bioengineering, thermal physiology and comfort*. Amsterdam, New York: Elsevier.

A PARTIAL DOUBLE BLIND EVALUATION OF A COMPREHENSIVE WINDOW OPENING MODEL

Frédéric Haldi¹, Darren Robinson¹, Claus Pröglhöf², Ardeshir Mahdavi²,

¹ Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Solar Energy and Building Physics
Laboratory (LESO-PB), Station 18, CH-1015 Lausanne, Switzerland.

² Department of Building Physics and Building Ecology, Vienna University of Technology,
Karlsplatz 13, 1040 Wien, Vienna, Austria.

ABSTRACT

One of the key sources of uncertainty in building simulation relates to the presence and behaviour of occupants. Fortunately, several academic groups have been working to address this uncertainty, particularly in relation to the use of windows and the corresponding impact on building heat and mass transfers. But these models tend to be based on highly restrictive datasets, typically relating to one building, so that their application to other building situations may be uncertain. The model of Haldi and Robinson (2009) is a case in point. It has been rigorously validated, but only using the original training dataset. In this paper we evaluate the applicability of the model to other circumstances.

We do this in two steps. Firstly we perform a blind comparison of the model which is calibrated using data acquired from an office building in Switzerland to predict the behaviour of occupants of an office building in Austria. We then use part of the Austrian dataset to derive new calibration parameters for the model and perform a second blind comparison with the remainder of the Austrian dataset. We present the results from these two blind comparisons to evaluate the robustness of applications of stochastic models beyond their original training datasets.

INTRODUCTION

Context

The deterministic features of building simulation programs are now considered relatively mature. But their ability to emulate reality is undermined by a poor representation of non-deterministic variables, particularly relating to occupants' presence and their interactions with environmental controls. One example is occupants' actions on windows, whose associated air flows have an important impact on indoor hygro-thermal conditions and indoor air quality (e.g. concentration of pollutants) in naturally-ventilated buildings. It is thus of particular relevance to integrate occupants' behaviour with respect to windows use into dynamic building simulation tools for a more realistic assessment of energy use and thermal comfort at the design stage.

Previous work

A range of studies of occupants' interactions with window openings has been undertaken in recent years. These have resulted in proposed models based on indoor temperature (Yun and Steemers 2008) and outdoor temperature (Herkel et al. 2008) or both (Rijal et al. 2007); with some underlining the determinant influence of occupancy transitions. These models are generally based on a reasonable variable selection procedure, but no assessment of their predictive power is provided. Their calibration basis is furthermore limited to a single building (Yun and Steemers 2008; Herkel et al. 2008), to summertime only (Yun and Steemers 2008) or based on declared states of windows (Rijal et al. 2007).

Long-term high-resolution empirical data on people's presence and control-oriented actions in six buildings were used by Mahdavi and Pröglhöf (2009) to express patterns of occupancy and user control behaviour as a function of environmental parameters such as temperature (indoor and outdoor), illuminance and irradiance. Their study also included statistical window operation data, but not an explicit predictive model.

Meanwhile, Haldi and Robinson (2009) have developed a detailed model in which the impact of each variable is isolated, using an extensive dataset, to support the cross-validation of the model and the choice of its driving variables; as well as comprehensive.

Although Haldi and Robinson (2009) showed that this model soundly reproduces the behaviour of the occupants of its training dataset, this is no guarantee that behaviours in other buildings will be well reproduced.

The need for a blind evaluation

The most conclusive evaluation of a predictive model can be achieved if two completely different data samples are used for its derivation and validation. In the present case, parts of the collected data used for model evaluation was collected by researchers, who did not participate in model development. In this paper, we refer to teams A and B: team A (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne) collected

empirical data in the LESO building, developed the models and run simulations; Team B (Vienna University of Technology) collected data in the Hartberg building and assessed the accuracy of simulations performed by team A.

Summary

The data collection procedure is first presented, followed by a short description of the models to be validated. We go on to describe the validation criteria and conclude with results, to test the quality of predictions using external datasets.

THE FIELD SURVEYS

In order to perform a blind evaluation, two field surveys are used.

Measurements in LESO-PB

Data used for the development of our models were collected from the Solar Energy and Building Physics Laboratory (LESO-PB) experimental building (Figure 1), located in the suburb of Lausanne, Switzerland (46°31'17"N, 6°34'02"E, altitude 396 m). In every office, occupants have the possibility to tilt or open up to any angle each of the two windows (height 90 cm, width 70 cm). Furthermore, external lower and upper roller blinds are controllable from within each office. Six offices are occupied by two persons, which can both individually access their own window, while eight offices accommodate single occupants able to act on the two windows. It is safe to leave windows open (e.g. for night ventilation) during periods of absence, except on the ground floor.



Figure 1 General view (top) and typical cellular office (bottom) of the LESO building

All 14 south-facing cellular offices of this building have been equipped with sensors whose real-time

measurements are archived by a centralised EIB data acquisition system. For a period covering 19th December 2001 to 1st September 2009 (with the exception of a few short interruptions caused by maintenance and technical reasons), local indoor temperature (θ_{in}), outdoor temperature (θ_{out}) on the roof and at a nearby weather station, occupancy, window openings and closings were continuously measured.

A statistical summary of the dataset is provided in Table 1 (left).

Table 1

Statistical summary of the datasets: survey characteristics, global ratio of occupancy and window use and indoor and outdoor conditions

	LESO	HARTBERG
Survey duration	2808 days	196 days
Offices (occupants)	14 (23)	6 (10)
Occupied time	15.1%	15.7%
Open ratio (tot)	25.5%	11.4%
Open ratio (occ)	30.6%	35.6%
Opening actions	2.409 per day	0.66 per day
Quartiles θ_{out} (occ)	5.7° 12.2° 18.5°	-0.6° 4.2° 13.3°
Quartiles θ_{in} (occ)	22.2° 23.4° 24.5°	22.6° 23.7° 24.7°

Measurements in Hartberg

Measurement results of a long-term observational study (Mahdavi et al. 2008) of users' ventilation behaviour in an office building in Hartberg (47°16'56"N, 15°58'23"E, altitude 345m), Austria, were used for validation (see Table 1). Data were collected in four double and two single offices on the 1st and 2nd floors of the regional municipality ("Bezirkshauptmannschaft"). All selected rooms face northeast and are naturally ventilated via operable ("tilt and turn") windows. External, manually operated Venetian blinds as well as curtains are used as shading devices (Figure 2). Both VDT-based and paper-based tasks are performed at the workstations.



Figure 2 General view of the Hartberg building

The following states and events were monitored at five minute intervals: occupancy and indoor environmental data parameters such as relative humidity and air temperature (θ_{in}) were monitored using distributed data loggers. Outdoor

environmental parameters such as relative humidity, air temperature (θ_{out}), wind speed and solar radiation were monitored using a weather station mounted on the top of the building. Window and blinds status (degree of opening) were monitored via time-lapse digital photography. Thereby, pictures of the façade were taken regularly (every 10 minutes) and analyzed via specially developed image processing software to detect opening and closing actions of the windows and shades. To analyze window operation, both "tilt" and "turn" actions were taken into account.

DESCRIPTION OF THE MODELS

Based on detailed statistical analyses of eight years' continuous measurements, three models (Haldi and Robinson 2009) for the prediction of actions on windows performed by office occupants were developed. In each case, explanatory variables have been carefully selected on the basis of statistical relevance.

Bernoulli process based on a single probability

At each time step, the probability to observe a window open is independently determined by a probability formulated as a logistic model:

$$P_{open}(\theta_{in}, \theta_{out}) = \frac{\exp(a + b_{out}\theta_{out} + b_{in}\theta_{in})}{1 + \exp(a + b_{out}\theta_{out} + b_{in}\theta_{in})}$$

Markov chain

At each time step, window openings and closings are modeled by action probabilities P_{ij} from state i to state j ($i, j = 0, 1$) also formulated as logistic models:

$$P_{ij}(x_1, \dots, x_p) = \frac{\exp(a + \sum_{k=1}^p b_k x_k)}{1 + \exp(a + \sum_{k=1}^p b_k x_k)}$$

Action probabilities include different variables x_i depending on the occupancy transition. These are indoor (θ_{in}), outdoor (θ_{out}) and daily mean outdoor ($\theta_{out, dm}$) temperature, the occurrence of rain (f_R) occupant presence (T_{pres}) and expected absence durations (f_{abs}).

Hybrid model

The above occupancy-dependent Markov chain is extended to a continuous-time process based on a Weibull distribution for opening durations. Action probabilities P_{ij} are modelled as above, but closing actions are predicted by the density of the probability distribution of opening durations:

$$f_{op}(t) = \lambda \alpha (\lambda t)^{\alpha-1} \exp(-(\lambda t)^\alpha) \quad \lambda = 1 / \exp(a + b\theta_{out})$$

Based on cross-validation, the predictive accuracy of this latter model has been compared very favourably

with other variants and with previously published work.

EVALUATION

Procedure

Four cases of comparisons were conducted between model predictions and empirical observations. In order to perform an unbiased validation, separate calibration parameters are derived for each dataset. We use alternatively a subset of the data from a building to predict the remaining part, and then all data from one building to perform predictions on another:

1. 50% of LESO data was used to calibrate the model toward predicting the remaining 50% of LESO data.
2. A model calibrated with 100% of LESO data predicts 100% of Hartberg data (team A was provided by team B with exact occupancy and environmental data such as indoor air temperature, relative humidity, task illuminance, as well outdoor climatic conditions).
3. About 25% of Hartberg data was used to calibrate the model in order to predict the remaining 75% of Hartberg data (in addition to the data transferred for case 2, team B provided team A with detailed data concerning the status of windows and shade deployment for about 25% of the time).
4. A model calibrated with 100% of Hartberg data predicts 100% of LESO data.

It may thus be argued, that in cases 2 and 3, the research team responsible for the development of the model was not responsible for the collection of data partially used for model evaluation. This circumstance represents one of the prerequisites of a double blind approach.

Models

In the four cases above, the models must be calibrated from the subset of data used, which determine dataset-specific regression parameters, see Table 2 for the case of full datasets (used in validation cases 2 and 4).

There is generally a good agreement on the obtained regression parameters for the Markov chain between the two datasets. Most of the transition probabilities include a smaller number of significant figures in the Hartberg dataset, associated with higher standard errors, due to the smaller size of the database.

The most noteworthy difference takes place in the Bernoulli process based on a single probability of finding the window open, in agreement with the hypothesis of Haldi and Robinson (2009) that such

an approach may lead to building-specific conclusions.

There are significant differences in transition probabilities in the case of departure ($P_{01,dep}$ and $P_{10,dep}$), where the behaviour is mostly influenced by building and context specificities (such as security or rain protection). Discrepancies appear to a lesser extent in the closing probability during presence $P_{10,int}$, which could be caused by particular window configurations.

Table 2
Regression parameters of the retained models with standard errors and Nagelkerke's R^2

MODELS & VARIABLES	LESO (TOTAL)	HARTBERG (TOTAL)
BERNOULLI	$R^2_N = 0.283$	$R^2_N = 0.188$
a	0.794 ± 0.030	-3.76 ± 0.17
θ_{out}	0.1476 ± 0.0003	0.091 ± 0.001
θ_{in}	-0.1541 ± 0.0013	0.111 ± 0.007
MARKOV		
$P_{01,arr}$	$R^2_N = 0.138$	$R^2_N = 0.070$
a	-13.88 ± 0.37	-13.2 ± 2.5
θ_{in}	0.312 ± 0.016	0.39 ± 0.11
θ_{out}	0.0433 ± 0.0033	
$f_{abs,prev}$	1.862 ± 0.044	1.08 ± 0.28
f_R	-0.45 ± 0.11	
$P_{10,arr}$	$R^2_N = 0.080$	$R^2_N = 0.097$
a	3.97 ± 0.37	4.5 ± 1.4
θ_{in}	-0.286 ± 0.017	-0.322 ± 0.062
θ_{out}	-0.0505 ± 0.0045	
$P_{01,int}$	$R^2_N = 0.044$	$R^2_N = 0.009$
a	-12.23 ± 0.28	-8.04 ± 0.71
θ_{in}	0.281 ± 0.013	0.173 ± 0.030
θ_{out}	0.0271 ± 0.0024	
T_{pres}	$(-8.78 \pm 0.53) \cdot 10^{-4}$	
f_R	-0.336 ± 0.081	
$P_{10,int}$	$R^2_N = 0.083$	$R^2_N = 0.171$
a	-1.64 ± 0.22	5.21 ± 0.61
θ_{in}	-0.0481 ± 0.0098	-0.343 ± 0.028
θ_{out}	-0.0779 ± 0.0020	-0.0853 ± 0.0071
T_{pres}	$(-1.62 \pm 0.06) \cdot 10^{-3}$	$(-1.69 \pm 0.46) \cdot 10^{-3}$
$P_{01,dep}$	$R^2_N = 0.086$	$R^2_N = 0.021$
a	-8.75 ± 0.22	-3.64 ± 0.16
$\theta_{out,dm}$	0.1371 ± 0.0075	
$f_{abs,next}$	0.84 ± 0.12	-1.28 ± 0.53
f_{GF}	0.83 ± 0.13	
$P_{10,dep}$	$R^2_N = 0.100$	$R^2_N = 0.273$
a	-8.54 ± 0.48	5.1 ± 2.0
θ_{in}	0.213 ± 0.022	-0.389 ± 0.090
$\theta_{out,dm}$	-0.0911 ± 0.0061	
$f_{abs,next}$	1.614 ± 0.069	1.85 ± 0.41
f_{GF}	-0.923 ± 0.068	
Open. Dur.	$R^2_N = 0.110$	$R^2_N = 0.260$
a	2.151 ± 0.066	-2.47 ± 0.86
θ_{out}	0.1720 ± 0.0044	0.1108 ± 0.0073
θ_{in}		0.305 ± 0.037
$\log(1/\alpha)$	0.872 ± 0.011	-0.089 ± 0.036

Evaluation criteria

Discrimination criteria are deduced by comparing observed and simulated outcomes under the aspect of status or action.

A detailed definition of the considered status related criteria can be found in Table 3.

Table 3
Overview and definition of status related criteria

CRITERIA	DISCRIPTION
ORO (overall ratio open)	Fraction of instances of open windows over a specific period of time
ORC (overall ratio closed)	Fraction of instances of closed windows over a specific period of time (1-ORO)
TP (truly positive)	Fraction of instances, where a window is correctly predicted to be open
TN (truly negative)	Fraction of instances, where a window is correctly predicted to be closed
FP (falsely positive)	Fraction of instances, where a window is wrongly predicted to be open
FN (falsely negative)	Fraction of instances, where a window is wrongly predicted to be closed
T (true prediction)	Fraction where the state of a window is correctly predicted, $T=TP+TN$
F (false prediction)	Fraction where the state of a window is wrongly predicted, $F=FP+FN=1-T$

To assess the simulation results related to user actions, the following evaluation criteria are considered:

PCC (proportion of correctly predicted opening actions): fraction of actions with a temporal match between observed and simulated opening actions (within a time interval of ± 30 min).

PCO (proportion of correctly predicted closing actions): fraction of actions with a temporal match between observed and simulated closing actions (within a time interval of ± 30 min).

All these indicators are presented for each model in Tables 4 to 7.

RESULTS AND DISCUSSION

The values of the evaluation criteria for the three models are listed in Tables 4 and 7 for LESO data (Cases 1 and 4) and in Tables 5 and 6 for Hartberg data (Cases 2 and 3).

In general, the reproduction of the overall ratio open by simulation amounts to 7% to 53%. Comparing the models on the basis of the evaluation criteria T (see Table 3), the hybrid model performs slightly better than the other two methods, in agreement with the initial cross-validation of Haldi and Robinson (2009). Concerning other status related criteria (such as TP, FP and their intrinsic trade-off), no significant

difference between the models' performance can be discerned.

Action related criteria (PCO, PCC) show that the considered models do not have the ability to precisely reproduce the timing of observed actions. In this the Bernoulli model is an exception; however it predicts a too large number of actions because of its memoryless nature, and thus a large number of false actions, which is not captured by these criteria.

The results do not show any clear improvement in the predictive performance of the models as a result of training (model calibration) with observed data from a building for which predictions are to be made. For instance model predictions for Hartberg that are solely based on models calibrated on LESO data (case 2) are not worse than those done by models calibrated with observed Hartberg data (case 3).

Table 4

Evaluation criteria - Case 1 (Calibration set: 50% of LESO data, validation set: 50% of LESO data)

	Observed LESO data	Markov model	Hybrid model	Bernoulli model
ORO	0.25	0.53	0.18	0.49
TP	0.25	0.17	0.06	0.16
TN	0.75	0.38	0.63	0.42
FP	0	0.37	0.12	0.33
FN	0	0.09	0.20	0.09
T	1	0.54	0.68	0.58
F	0	0.46	0.32	0.42
PCO	1	0.08	0.08	0.54
PCC	1	0.10	0.09	0.59

Table 5

Evaluation criteria - Case 2 (Calibration set: 100% of LESO data, validation set: 100% of Hartberg data)

	Observed Hartberg data	Markov model	Hybrid model	Bernoulli model
ORO	0.14	0.14	0.09	0.18
TP	0.14	0.03	0.01	0.03
TN	0.86	0.75	0.79	0.71
FP	0	0.11	0.07	0.15
FN	0	0.11	0.13	0.11
T	1	0.78	0.80	0.74
F	0	0.22	0.20	0.26
PCO	1	0.03	0.03	0.49
PCC	1	0.03	0.02	0.47

Table 6

Evaluation criteria - Case 3 (Calibration set: 25% of Hartberg data, validation set: 75% of Hartberg data)

	Observed Hartberg data	Markov model	Hybrid model	Single logit model
ORO	0.41	0.50	-	0.07
TP	0.41	0.24	-	0.04
TN	0.59	0.33	-	0.57
FP	0	0.26	-	0.02
FN	0	0.17	-	0.37
T	1	0.58	-	0.61
F	0	0.42	-	0.39
PCO	1	0.16	-	0.33
PCC	1	0.25	-	0.29

Table 7

Evaluation criteria - Case 4 (Calibration set: 100% of Hartberg data, validation set: 100% of LESO data)

	Observed LESO data	Markov model	Hybrid model	Single logit model
ORO	0.25	0.31	0.29	0.31
TP	0.25	0.12	0.13	0.12
TN	0.75	0.56	0.59	0.55
FP	0	0.19	0.16	0.19
FN	0	0.14	0.12	0.14
T	1	0.67	0.72	0.67
F	0	0.33	0.28	0.33
PCO	1	0.06	0.06	0.51
PCC	1	0.09	0.09	0.53

The results provide furthermore insights regarding the following questions:

1. Did the models correctly predict the status of windows as being open (TP)? The best performing model with respect to this criteria (Markov), produced the following true prediction rates (normalized with respect to the maximum possible value): 68% (case 1), 21% (case 2), 58% (case 3), and 48% (case 4).
2. Did the models correctly predict the status of windows as being closed (TN)? The performance of the hybrid models was better in this regard: true prediction rates (normalized with respect to the maximum possible value) were in this case: 84% (case 1), 91% (case 2), and 78% (case 4).
3. Was the timing of the window opening actions correctly predicted (within a tolerance time interval of ± 30 minutes; PCO)? The performance of the models is rather poor in this

regard, with the exception of the Bernoulli model.

4. Was the timing of the window closing actions correctly predicted (within a tolerance time interval of ± 30 minutes; PCC)? Markov and hybrid models performance is in the range of 2% to 25%, whereas Bernoulli's results were in the range of 29% to 47%.

in summer. *Building and Environment*, 43(9): 1471–148.

CONCLUSION

The present contribution provided the result of a first step toward rigorous evaluation of predictions made by stochastic window operation models. The results generally show a similar predictive performance between validation runs on internal and external data.

However, further research is needed in modelling and validation, as the present results are limited in scope (only two buildings, both with office function). A larger data base of observation data would provide the possibility to evaluate models in different contexts – such as residential environments, different construction types (such as light weight buildings) or different climates (e.g. hot and wet climate, where ventilation may be less effective. Finally, validation of behavioural models with respect to other building controls (e.g. shading devices, lighting and HVAC systems) remain to be studied.

REFERENCES

- Haldi, F., Robinson, D., 2009. Interactions with window openings by office occupants, *Building and Environment*, 44(12): 2378-2395.
- Herkel, S., Knapp, U., Pfafferott, J., 2008. Towards a model of user behaviour regarding the manual control of windows in office buildings. *Building and Environment*, 43(4): 588–600.
- Mahdavi, A., Kabir, E., Mohammadi, A., Pröglhöf, C., 2008. User-based window operation in an office building, in *Indoor Air 2008 - proceedings of the 11th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, Olesen B., Strom-Tejsen P., Wargocki P. (eds.), August 2008, Copenhagen, Denmark: 8 pages.
- Mahdavi, A., Pröglhöf, C., 2009. Towards empirically-based models of peoples presence and actions in buildings. *Proceedings of the Eleventh International IBPSA Conference*, July 27-30, Glasgow, Scotland: 537-544
- Rijal, H. B., et al., 2007. Using results from field surveys to predict the effect of open windows on thermal comfort and energy use in buildings. *Energy and Buildings*, 39(7): 823–836.
- Yun, G. Y., Steemers, K., 2008. Time-dependent occupant behaviour models of window control

MONITORING DES WÄRMEVERBRAUCHS IN WOHNGBÄUDEN ZUR ANALYSE DES NUTZERVERHALTENS IM SCHARNHAUSER PARK

Aneta Strzalka¹, Martin Huber, Dirk Pietruschka und Ursula Eicker
 Hochschule für Technik Stuttgart, Zentrum für Eingewandte Energietechnik zafh.net,
 Schellingstr. 24, 70174 Stuttgart, Deutschland
¹E-mail: aneta.strzalka@hft-stuttgart.de

KURZFASSUNG

Die vorliegende Forschungsarbeit wurde im Rahmen des EU-Projektes POLYCITY durchgeführt. Dieses von der Hochschule für Technik in Stuttgart koordinierte Projekt hat die nachhaltige Entwicklung von großen Siedlungen zum Ziel. Ziel der hier präsentierten Arbeit ist die Entwicklung einer praxisorientierten Methode für die Wärmebedarfsberechnung der Wohngebäude und auch ganzer Siedlungen, welche auch die Möglichkeit zur Untersuchung des Nutzereinflusses geben wird. Es wurden dabei zwei Modelle für die Wärmebedarfsberechnung zunächst an einem Testraum getestet um später diese für ein konkretes Gebäude und dann für alle Gebäude der Siedlung anzuwenden. Eine anschließende Visualisierung der Ergebnisse mittels eines Geoinformationssystems soll die Einsparpotenziale sichtbar machen und eine Handlungsorientierung geben.

ABSTRACT

The research work hereby presented is part of a research European Union project named POLYCITY. The goal of this project, which is coordinated by the Stuttgart University of Applied Sciences, is the sustainable communal energy management of residential areas. The purpose of the research work presented here, is the development of a method to predict the heating energy demand of urban quarters, which will also give a possibility to analyze the user behavior. To achieve this goal, two models to predict the heating energy demand are developed and first tested on a test room to use it later for all buildings of the analyzed area. The additional visualization and publication of the results via a geo-information system should serve to make residents aware of the sustainable development in their city.

EINLEITUNG

Die vorliegende Forschungsarbeit wurde im Rahmen des EU-Projektes POLYCITY durchgeführt. Dieses an der Hochschule für Technik in Stuttgart koordinierte Projekt hat die nachhaltige Entwicklung von großen Siedlungen zum Ziel.

Die hier untersuchte Siedlung Scharnhauser Park (SHP) liegt in der Nähe von Stuttgart, Deutschland. Es ist ein ehemaliges Militärgelände, mit ca. 180 ha Wohnfläche und mit ca. 10.000 Einwohnern.

Infolge der Klimaschutz-Verpflichtungen der Bundesrepublik Deutschland entsteht die Notwendigkeit, den bundesdeutschen Energieverbrauch im Gebäudebereich bis zum Jahr 2050 um ca. 80% zu reduzieren [Everding, 2007]. Um Energieeinsparpotenziale zu erzielen bilden sich 3 Wege. Zu einem die Verbesserung der Effizienz der Energieumwandlung hin zur Nutzenergie, zum anderen das Energiesparen und die Nutzung regenerativer Energien.

Ein langfristiger Erfolg eines kommunalen Energiemanagementsystems benötigt das systematische Erfassen und Evaluieren von Energieverbräuchen was zur Etablierung strategischer Konzepte für eine effiziente Gebäudebewirtschaftung notwendig ist [Kreiblich, 2002]. Auch die Prognose des Energieverbrauchs spielt eine bedeutende Rolle um Energieeinsparungen zu erzielen. Es gibt verschiedenen Methoden zur Bestimmung des Wärmebedarfs von Siedlungsgebieten. Alle Verfahren jedoch, beruhen auf einer Aggregation des Wärmebedarfs von Einzelgebäuden [Blesl, 2002]. Für die Ermittlung regionaler Nah- und Fernwärmepotenziale wird eine gebäudescharfe Ermittlung des Raumwärmebedarfs benötigt. Hier liegt der Fokus auf der flächendeckenden Verfügbarkeit der Datenquellen [Sester, 2002]. Hierzu kommen Datenquellen zum Einsatz, wie Laserscannerdaten, Automatische Liegenschaftskarten (ALK) und photogrammetrische Bilder, welche ermöglichen das Gebäudevolumen automatisch oder zumindest semi-automatisch zu ermitteln. Diese Daten können dann später als Input für die Simulationsmodelle zur Berechnung des Wärmebedarfs dienen. Es gibt schon viele sehr detaillierte Gebäudesimulationsmodelle am Markt, welche sehr genaue Ergebnisse des Wärmebedarfs liefern. Die Modelle benötigen aber sehr detaillierte Gebäudeparameter, was im Fall der Berechnung des Wärmebedarfs für eine ganze Siedlung von Nachteil ist. Die einfachen Methoden, wie z.B. die Siedlungstypmethode, beschrieben in Blesl, 2002,

geben nicht viel Spielraum, wenn es um die Analyse der einzelnen Parameter, wie z.B. die nutzerrelevanten Parameter geht. Bei dieser Methode wird der Wärmebedarf nicht gebäudescharf, sondern für einzelne Siedlungsgebiete ermittelt.

Um Energieeinsparung in modernen Siedlungen, in welchen die Gebäude mit einem hohen Wärmestandard gebaut sind zu erzielen, spielt das Nutzerverhalten eine wichtige Rolle. Hier können die statistischen Nutzermodelle für Anwesenheit, Fensterlüftung, Sonnenschutz, Beleuchtung und Geräte (Stromverbrauch) die thermische Gebäudesimulation genauer machen [Herkel, 2008].

Um ein Modell für die Wärmebedarfsberechnung der Siedlung SHP zu entwickeln wurden zwei Modelle mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad an einem Testraum getestet. Der Schwerpunkt war dabei, ein möglichst einfaches Modell zu erstellen, welches sehr genaue Ergebnisse liefert. Das Modell soll einerseits einfach sein um es für alle Gebäude der analysierten Siedlung anwenden zu können. Auf der anderen Seite soll das Modell auch die Möglichkeit haben die nutzerrelevanten Parameter zu variieren um die Energieeinsparpotenziale bestimmen zu können.

Um dieses Ziel zu erreichen wurde zunächst ein Testraum verwendet, in welchem die Genauigkeit der Modelle getestet werden konnte. Zusätzlich wurde eine Datenerfassung mit Fernübertragung der Wärmeverbrauchsdaten in einem Mehrfamilienhaus des SHPs installiert um die Ergebnisse des Gebäudesimulationsmodells mit den realen Gebäudewärmeverbrauchsdaten vergleichen zu können. Durch die in dem Mehrfamilienhaus installierte Datenerfassung können die Tagesprofile einzelner Haushalte erstellt werden, welche später als Basis für die Analyse des Nutzerverhaltens dienen werden.

Anschließend wird das ermittelte Einsparpotenzial in die schon existierende Visualisierung der Wärmeverbrauchsdaten aller Gebäude mittels des Geoinformationssystems (GIS) integriert. Dies wird dann auch auf der POLYCITY Webseite publiziert um die Einsparpotenziale für die Bewohner der Siedlung sichtbar zu machen und eine Handlungsorientierung zu geben.

EXPERIMENT

Testraum der HfT Stuttgart

Zunächst wurde ein Testraum der HfT Stuttgart eingerichtet, in dem kontrolliert interne und externe Lasten eingebracht und nutzerabhängige Einflüsse ausgeschlossen werden können. Mit den Testraummessungen können die verwendeten Simulationsmodelle validiert werden.

Dieser Raum mit den Abmessungen von 2.31 x 5.84 x 2.08 m (Breite x Länge x Höhe) befindet sich im

Zentrum von Stuttgart. Das Fenster des Raumes ist Süd-Süd-Ost (154,5° von Norden) orientiert.

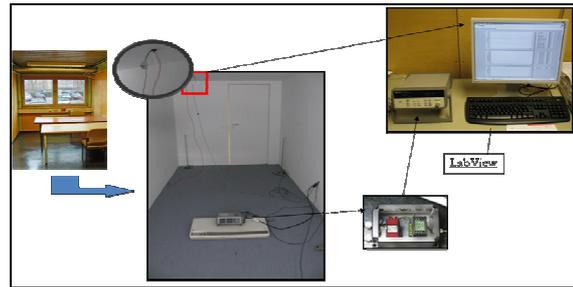


Abbildung 1: Messausstattung des Testraums

Der Testraum wurde mit folgenden Geräten, wie in obiger Abbildung zu sehen ist, ausgestattet:

- Elektroheizlüfter mit 2000 W
- Temperatursensoren im Testraum und in den Nachbarräumen, sowie einem Außentemperatursensor
- Pegelwandler zur Messung der Stromleistung des Elektroheizlüfters
- Programm LabView für die Akquisition der Messdaten

Die Messung wurde mit einem Zeitschritt von 5 Minuten durchgeführt. Die Messung im Zeitraum vom 23-30.03.2009 wurde mit einer Nachtabschaltung der Heizung (16:00 bis 9:00) durchgeführt. Ein Beispiel für zwei Tage ist in Diagramm 1 zu sehen:

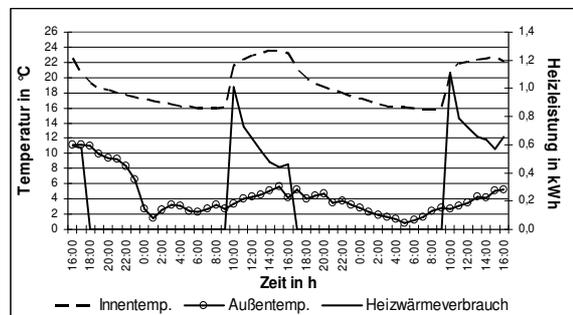


Diagramm 1: Messung im Testraum mit Nachtabschaltung

Die zweite Messreihe für die Zeiträume 8-12.02.2010 und 15-18.02.2010 wurde ohne Nachtabschaltung durchgeführt. Ein Beispiel hierfür ist in Diagramm 2 zu sehen:

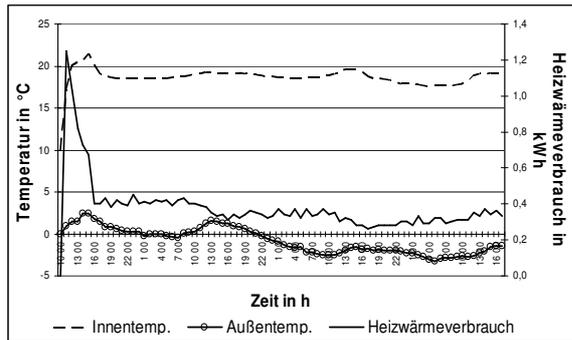


Diagramm 2: Messung im Testraum ohne Nachtabschaltung

Mehrfamilienhaus im SHP

Das Monitoring des Wärmeverbrauchs bei realen Bedingungen (mit Nutzereinfluss) wurde an einem repräsentativen Wohngebäude des Scharnhäuser Parks durchgeführt. Das betrachtete Gebäude ist ein 6-geschossiges Mehrfamilienhaus mit 12 Eigentumswohnungen, welches im Jahr 2005 für die Nutzung zur Verfügung gestellt wurde.

Die Erhebung der Messdaten erfolgte anfangs mittels eines M-Bus Datenloggers der Firma Relay GmbH mit einem einstündigen Messintervall im Zeitraum von April 2008 bis Juli 2009. Danach wurde es durch ein TIXI GSM-Modem mit M-Bus Schnittstelle und integriertem Datenlogger ersetzt. Sämtliche Wärmemengenzähler des Gebäudes sind über M-Bus Schnittstellen mit dem TIXI GSM-Modem verbunden. Das TIXI GSM-Modem ermöglicht mittels Interneteinwahl über das Mobilfunknetz die automatisierte Fernübertragung der gemessenen Daten per E-mail an den zafh.net Server der HfT Stuttgart. Die GSM-Technik erlaubt eine einfache und zuverlässige Übertragung von Messdaten bei Messobjekten bei welchen vor Ort keine Internetanbindung vorhanden ist. Auch die Konfiguration des TIXI GSM-Modems kann über das Mobilfunknetz erfolgen, so dass aufwendige vor Ort Termine nach der erstmaligen Einrichtung der Datenerfassung entfallen. Der Verlauf der Fernübertragung der Daten ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt:

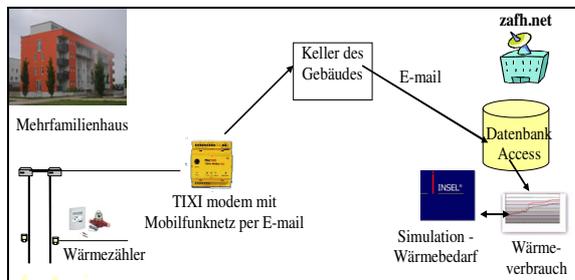


Abbildung 2: Schema der Fernübertragung der Wärmeverbrauchsdaten

Diagramm 3 zeigt jahreszeitliche Stundenprofile für das gesamte Gebäude.

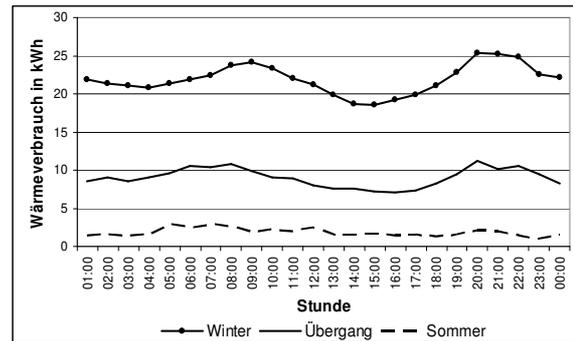


Diagramm 3: Stundenprofile des Mehrfamilienhauses

SIMULATION

Ziel der hier beschriebenen Forschungsarbeit war es eine Methode für die Wärmebedarfsberechnung, welche auch die Möglichkeit zur Untersuchung des Nutzereinflusses beinhaltet, zu entwickeln. Dieses Modell soll es ermöglichen die Wärmebedarfsberechnung nicht nur für ein einzelnes Gebäude sondern für die ganze Siedlung durchzuführen. Deshalb lag der Schwerpunkt dabei ein möglichst einfaches Modell zu entwickeln, welches aber gleichzeitig die Realität präzise abbildet.

Um diese Aufgabe zu erfüllen wurden zwei Modelle zunächst an einem Testraum und dann anhand von dem oben beschriebenen Mehrfamilienhaus getestet und validiert.

Transmissionsmodell

Das erste Modell berücksichtigt nur die Transmissionswärmeverluste über die Gebäudeaußenhülle. Die Transmissionsverluste wurden aus der Größe der Außenflächen der Gebäude und dem Aufbau der Flächen mit ihren Wärmedurchgangskoeffizienten und zusätzlich der inneren und äußeren Lufttemperatur berechnet. Das Modell basiert auf die folgende Gleichung:

$$Q_H = A * U * \Delta T \quad (1)$$

Wobei:

Q_H - Heizwärmebedarf [kWh]

A - Fläche der Gebäudeaußenhülle [m²]

ΔT - Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen

Bilanzverfahrenmodell

Das zweite Modell basiert auf dem Berechnungsverfahren der EU-Norm DIN V 18599. Hier wird die gesamte Energiebilanz des Gebäudes betrachtet. Dieses Berechnungsverfahren wurde in der Simulationssoftware INSEL (www.insel.eu) implementiert, so dass der Wärmeverbrauch in verschiedenen Zeitschritten simuliert werden konnte. Die Struktur des Modells ist in unterer Abbildung zu sehen:

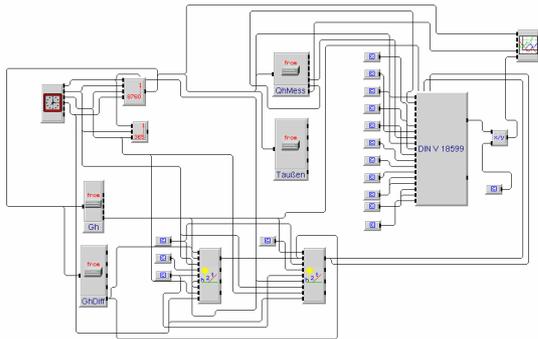


Abbildung 3: Struktur des Modells in INSEL software

Das Gebäudesimulationsmodell wurde zunächst an oben beschriebenem Testraum getestet, in welchem alle nutzerabhängigen Einflüsse ausgeschlossen werden konnten. In einem nächsten Schritt wurde dieses Modell für die Wärmebedarfsberechnung des Beispielsmehrfamilienhauses verwendet.

DISKUSSION UND ERGEBNISANALYSE

Analyse des Testraums

Der Vergleich zwischen den gemessenen und berechneten Tageswerten (auf Stundenbasis) für den Testraum kann aus dem Diagramm 4 entnommen werden.

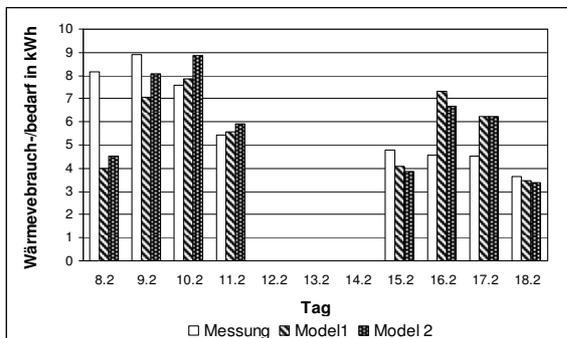


Diagramm 4: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Tageswerten für Testraum

In beiden Modellen wurden die gemessenen Innentemperaturen sowie Außentemperaturen als Input verwendet. Die Simulation basiert auf Stundenwerten, daher sind einige Abweichungen

zwischen den gemessenen und berechneten Werten zu sehen. Die Abweichungen können wie folgend erklärt werden:

- das Modell 2 berücksichtigt keine Aufheizleistung, was für eine intermittierende Beheizung nötig wäre. Die Ursache ist die sehr große Abweichung zwischen Messung und Simulation am 08.02 (Diagramm 4). Dieser Tag ist der erste Tag an welchem nach einer langen Pause der Testraum beheizt wurde.
- das Modell 2 ist ein statisches Modell, welches keine Wärmespeicherkapazität der Wände berücksichtigt. Der Verlauf der simulierten Werte in Diagramm 5 zeigt, dass trotz Abschaltung der Heizung der Wärmebedarf berechnet wurde.

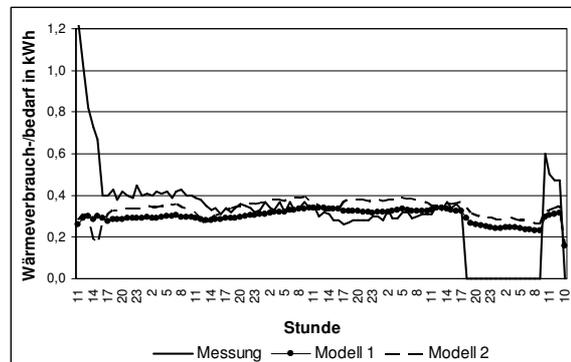


Diagramm 5: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Stundenwerten für beide Modelle

- die Werte der solaren Einstrahlung wurden nicht gemessen sondern aus den Messwerten der nahe liegenden Wetterstation übernommen. Aus der Horizontalstrahlung wurden dann Strahlungswerte auf die geneigte Fläche generiert. Der Sonnenschutz wurde bei diesem Modell nicht berücksichtigt.

Diagramm 6 zeigt zwei Varianten der Berechnung mit Modell 2. Die erste Variante, bei welcher die Sonneneinstrahlung nicht berücksichtigt ist (ohne Fenster) entspricht der Berechnung mit Modell 1, bei welchem nur die Transmissionswärmeverluste berücksichtigt wurden. Bei der zweiten Variante von Modell 2 wird die Sonneneinstrahlung berücksichtigt. Da die Werte der Sonneneinstrahlung nicht gemessen wurden, wie schon oben erwähnt, kommt es zu deutlichen Abweichungen zwischen Messung und Simulation.

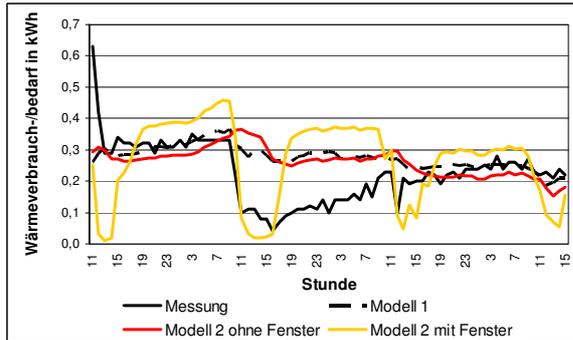


Diagramm 6: Einfluss der Sonneneinstrahlung auf die Simulation

Beide Modelle sind vereinfachte Modelle, was zu den Abweichungen zwischen simulierten und gemessenen Stunden- und auch Tageswerten führt. Es wäre daher sinnvoll ein detailliertes dynamisches Modell zu entwickeln und zu testen.

Analyse des gesamten Mehrfamilienhauses

Beide Modelle wurden auch verwendet um den Tageswärmebedarf des Mehrfamilienhauses zu berechnen. Die Berechnungen erfolgten mit folgenden Annahmen:

- beim Modell 1 - konstante Innentemperatur von 20°C, Heizgrenztemperatur von 15°C,
- beim Modell 2 – zusätzlich konstanter Luftwechsel von 0,5 1/h, konstante internen Gewinne von 5W/m².

Die Stundenwerte der Außentemperatur, die mittels der Wetterstation des Scharnhäuser Parks gemessen wurde dienten als Input für diese Simulationsberechnungen.

Der Vergleich zwischen den berechneten und gemessenen Daten ist in Diagramm 7 zu sehen.

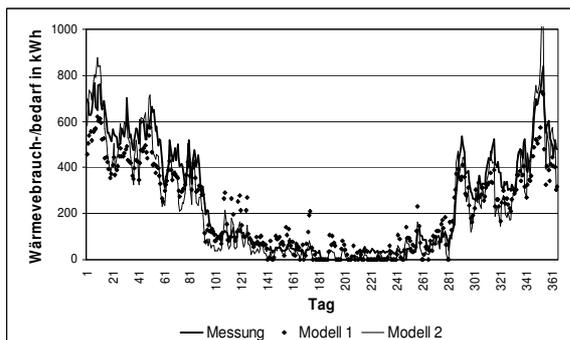


Diagramm 7: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Tageswerten für Mehrfamilienhaus

Die Abweichungen betragen an einzelnen Tagen bis zu 100%. Dies kann teilweise durch die Ungenauigkeit der Modelle, aber auch durch das Nutzerverhalten verursacht werden. Wird die gesamte Winter- oder Sommerperiode betrachtet, liegen die Abweichungen, wie in Tabelle 1 zu sehen ist, in einem vertretbaren Bereich.

Tabelle 1

Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Werten

Modell_Typ	Modell 1		Modell 2	
Periode	Winter	Sommer	Winter	Sommer
Abweichung in %	20	19	11	29

Diagramm 8 zeigt den Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Monatswerten des Mehrfamilienhauses. Hier sieht man besonders bei Modell 2 eine deutlich bessere Korrelation zwischen den gemessenen und berechneten Werten.

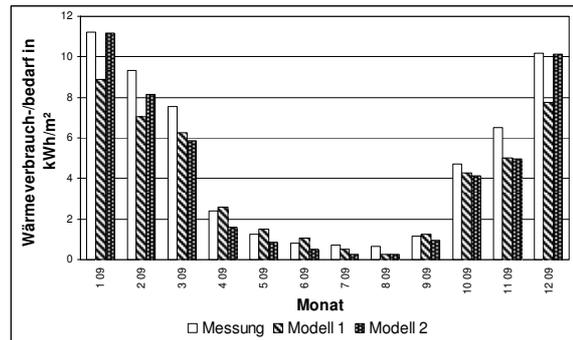


Diagramm 8: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Monatswerten für Mehrfamilienhaus

Analyse der einzelnen Wohnungen

Die Analyse der einzelnen ähnlichen Wohnungen bezüglich des Wärmeverbrauchs zeigte große Differenzen, was auf einen großen Einfluss des Nutzers und ein enormes Einsparpotenzial deutet. Hier konnten auch relativ große Differenzen zwischen den einzelnen Wohnungen und dem ganzen Gebäude beobachtet werden.

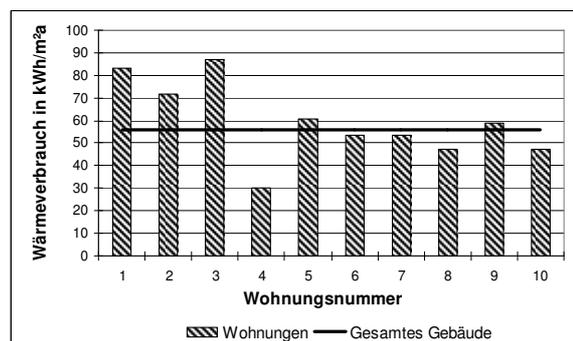


Diagramm 9: Jahreswärmeverbrauch 2009 einzelner Wohnungen des Mehrfamilienhauses

Diese Abbildung zeigt, dass der Nutzer einen sehr großen Einfluss auf den Wärmeverbrauch der Wohngebäude hat. Daher, sollen die einzelnen nutzerrelevanten Parameter zukünftig sehr detailliert untersucht werden. Die hier erstellten Modelle könnten für diese Aufgabe der erste Schritt sein. Bei

Modell 1 kann die Raumtemperatur sowie der intermittierende Betrieb der Heizung mittels Parameterstudien variiert werden und somit die gemessenen und simulierten Werte des Wärmeverbrauchs validiert werden. Modell 2 bietet zusätzlich die Möglichkeit die internen Wärmegewinne und den Luftwechsel zu variieren. Zunächst wird versucht diese Parameterstudie anhand von statistischen Werten durchzuführen.

Analyse der ganzen Siedlung

Das POLYCITY Projekt verfügt bei allen Gebäuden außer dem detailliert untersuchten Mehrfamilienhaus nur über die Jahreswärmeverbrauchsdaten der analysierten Siedlung und nicht über stündlich aufgelöste Daten. Aus diesem Grund beschränkt sich die Wärmebedarfsprognose aller anderen Gebäude der analysierten Siedlung nur auf die Jahreswerte.

Die Betrachtung der Jahreswerte des analysierten Mehrfamilienhauses zeigt eine relativ gute Übereinstimmung, was die Extrapolation dieses Modells auf alle Wohngebäude der analysierten Siedlung erlauben wird. Die Abweichungen zwischen den gemessenen (56 kWh/m²a) und berechneten Werten liegen bei ca. 15% bei beiden Modellen.

ZUSAMMENFASSUNG

Die beschriebene Forschungsarbeit zeigt eine praxisorientierte Methode für die Wärmebedarfsberechnung der Wohngebäude und auch ganzer Siedlungen. Diese Arbeit zeigt auch die Abhängigkeit des Wärmeverbrauchs vom Nutzerverhalten. Es ist daher geplant, dieses Modell zu optimieren, so dass in diesem Modell die nutzerabhängigen Parameter validiert werden können. Dies wird ermöglichen das Einsparpotenzial des Wärmeverbrauchs bezüglich jedes einzelnen Parameters zu ermitteln. Eine anschließende Visualisierung der Ergebnisse mittels eines Geoinformationssystems kann die hohen Einsparpotenziale sichtbar machen und eine Handlungsorientierung geben.

DANKSAGUNG

Ein Dank für die Europäische Kommission, welche mittels des POLYCITY Projektes (REF EC: TREN/05FP6EN/S07.43964/513481/) die hier beschriebene Arbeit finanziert hat.

Speziellen Dank für Andreas Biesinger (wissenschaftlicher Mitarbeiter der HfT Stuttgart) und Siegfried Riedl (technischer Angestellter der HfT Stuttgart) für die Unterstützung bei der Messausstattung sowie Durchführung der Messungen im Testraum.

LITERATUR

- Blesl, M., 2002. Räumlich hoch aufgelöste Modellierung leitungsgebundener Energieversorgungssysteme zur Deckung des Niedertemperaturwärmebedarfs. Dissertation der Universität Stuttgart.
- Everding, D. 2007. Solarer Städtebau. Vom Pilotprojekt zum planerischen Leitbild. Buch. Verlag W. Kohlhammer GmbH Stuttgart.
- Hensen, J. 2003. Paper Preparation Guide and Submission Instruction for Building Simulation 2003 Conference, Eindhoven The Netherlands.
- Herkel, S., 2008. NuMoSim Nutzermodelle für die thermische Simulation. Zwischenbericht anlässlich des Kolloquiums Umweltforschung und Umweltechnik Baden-Württemberg.
- Kreibich, R. 2002. Emissionsminderung durch neue Wege im kommunalen Energiemanagement. Endbericht. Technische Fachhochschule Berlin.
- Sester, M., Brenner, C., Datenquellen und Methoden für eine automatische Bestimmung von Gebäude- und Siedlungsvolumen. Aus Forschung und Entwicklung - Mitteilungen der Forschungsstelle und des Forschungsbeirats der AGFW, Aktuelle Fragen der Kraft-Wärme-Kopplung und der Wärmeverteilung , vol. Heft 7 , p. 138-150.

THE IMPACT OF OCCUPANTS' BEHAVIOUR ON URBAN ENERGY DEMAND

Frédéric Haldi and Darren Robinson

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Solar Energy and
 Building Physics Laboratory (LESO-PB), Lausanne, Switzerland

ABSTRACT

Using extensive field survey data acquired over the past seven years at the Solar Energy and Building Physics Laboratory at EPFL in Switzerland, models of occupants' presence, opening and closing of windows and the raising and lowering of blinds have been developed. These new models, together with existing models of lighting and appliance use, have been integrated within a new urban energy modelling tool, called CitySim.

In this paper we describe briefly the structure of CitySim together with the means for representing occupants' presence and behaviour; both deterministic and stochastic. For a hypothetical scenario we then go on to present simulations of the impact that occupants' behaviour may have on the indoor environment in buildings' as well as on buildings' energy demands at the urban scale.

We close this paper by discussing a more general framework for the more comprehensive representation of occupants and their activities in building and urban simulation tools.

Keywords

Urban energy modelling, Behavioural modelling, Windows, Shading devices

INTRODUCTION

Context

Although the deterministic features of building simulation programs are now considered relatively mature, their ability to emulate reality is still undermined by a poor representation of factors relating to occupants presence and their interactions with environmental controls. Among the most noteworthy is the influence of buildings' occupants actions on windows, whose associated air flows have an important impact on indoor hygro-thermal conditions and indoor air quality; likewise actions on shading devices, which strongly influence solar heat gains and daylight availability. It is thus of particular relevance to integrate stochastic models of occupants' behaviour into dynamic building

simulation tools for a more realistic assessment of energy needs at the design stage.

Previous work

Previous examples of models for occupants' use of windows have been integrated into ESP-r (Rijal et al, 2007; Yun and Steemers, 2008). However, the diversity of behaviours among occupants is not considered and the algorithm is based on the results from an 'average' occupant arising from aggregated data collected from several people. Furthermore, these algorithms have been shown to perform less satisfactorily than the more comprehensive model of Haldi and Robinson (2009).

More recently, interest shifted to the study of the impact of different types of behaviour, typically defined as 'active' or 'passive', as originally proposed by Reinhart (2004). For instance, according to Schweiker and Shukuya (2010), changes in occupant behaviour towards the use of air-conditioning has a higher effect on exergy demand than building envelope improvements. Comparing the impact of ideal and worst case scenarios in simulations, Roetzel et al. (2010) found that the behaviour of occupants regarding control of lighting and shading predominates the influence of building design on total greenhouse gas emissions and running costs in offices. Parys et al. (2010) developed this type of study by considering four distributions of active and passive users of artificial lights and shading devices. They concluded that heating energy use remains rather robust to variations in occupant behavior, in contrast with cooling and lighting energy use.

However, only the case of extreme behaviours expressed as best and worse cases are treated. In order to correctly evaluate the impact of behavioural diversity on building energy demand, it is necessary to explore the realistic distribution of predicted energy demands on the basis of a representative sample of encountered behavioural patterns.

Summary

We start this article with a brief presentation of CitySim – a software designed for the prediction of energy demands of urban neighbourhoods – which

was used for this study. The models for simulating occupants' behaviour are then presented, followed by the case study on which our analyses are based. We conclude with a presentation of the results.

CITYSIM: UP TO THE URBAN SCALE

CitySim is a software in development that is conceived to support the more sustainable planning of urban settlements. CitySim simulates energy demand, storage and supply of urban developments ranging from a small neighbourhood to an entire city. For these purposes, specific models were developed to achieve a good compromise between accuracy, computational overheads and data availability. Robinson et al. (2009) provides a description of the modelling methodology.

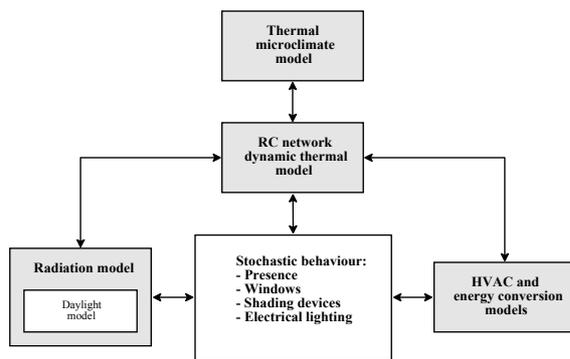


Figure 1 Conceptual structure of CitySim

Thermal model

The thermal model is based on a resistor-capacitor network, in which a conducting wall is represented by one or more temperature nodes. The heat flow between a wall and the outside air can be represented by an electric current through a resistor linking the two corresponding nodes and the wall's inertia can be represented by a capacitance linked at that node.

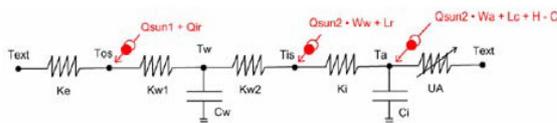


Figure 2 Monozone form of the thermal model

In our model (Kämpf and Robinson, 2007), an external air temperature node T_{ext} is connected with an outside surface temperature node T_{os} via an external film conductance K_e , which varies according to wind speed and direction (Figure 2). T_{os} , which also experiences heat fluxes due to shortwave and longwave exchange, is connected to a wall node T_w of capacitance C_w via a conductance defined by the external part of the wall. In fact this node resembles a mirror plane, so that we have similar connections to an internal air node T_a of capacitance C_i via an internal surface node T_{is} . T_{is} may also experience shortwave flux due to transmitted solar radiation and a longwave flux due to radiant heat gains from internal sources (people and appliances) and T_a may

experience convective gains due to absorbed shortwave radiation, internal casual gains and heating or cooling systems. Finally, our internal air node may be connected with our external air temperature node via a variable resistance due to infiltration and ventilation (see next section). Predictions from this simplified model compare well with those of ESP-r for a range of monozone and multizone scenarios. In its current form, the thermal model performs predictions at a one hour time step.

Radiation model

A Simplified Radiosity Algorithm (SRA) is used to solve for the shortwave and longwave irradiance incident on the surfaces defining our urban scene, see Robinson and Stone (2004) for a detailed description.

Plant and equipment models

This category of model includes both heating, ventilating and cooling (HVAC) systems and energy conversion systems (ECS).

The HVAC model computes the psychrometric state of the air at each stage in its supply (e.g. outside, heat recovered, cooled and de-humidified, re-heated, supply). Given the required mass flow rate (which may be defined by the energy to be delivered or the room fresh air requirement) the total delivered sensible and latent loads for all stages in the heating and/or cooling of air q is calculated.

The family of ECS models comprise a range of technologies that provide/store heat and/or electricity to buildings. If the ECS models have insufficient capacity to satisfy the HVAC demands then the supply state is adjusted and the predicted room thermal state is corrected using the thermal model.

BEHAVIOURAL MODELS

Actions on windows

The model developed by Haldi and Robinson (2009) is used in this study. It is formulated as an occupancy-dependent Markov chain extended to a continuous-time process based on a Weibull distribution for opening durations. The retained explanatory variables x_i are indoor (θ_{in}), outdoor (θ_{out}) and daily mean outdoor ($\theta_{out, dm}$) temperature, the occurrence of rain (f_R) occupant presence (T_{pres}) and expected absence durations (f_{abs}). Action probabilities P_{ij} from state i to state j are formulated as logistic models:

$$P_{ij}(x_1, \dots, x_p) = \frac{\exp(a + \sum_{k=1}^p b_k x_k)}{1 + \exp(a + \sum_{k=1}^p b_k x_k)}$$

with parameters a and b_i as displayed in Table 1 (top). The density of the probability distribution of opening durations is:

$$f_{op}(t) = \lambda \alpha (\lambda t)^{\alpha-1} \exp(-(\lambda t)^\alpha) \quad \lambda = 1/\exp(a + b\theta_{out})$$

Air flow from ventilation

A time step of one hour being too large for a reliable integration of behavioural models, an additional prediction of indoor temperature was implemented using an explicit solution scheme for the thermal model at a time step of 5 minutes. In parallel, the hourly implicit prediction is used for the prediction of heating and cooling power demands, based on infiltration but not on ventilation. At each one hour time step, the current explicit prediction is used to update the value for the next prediction with the implicit model.

In the case of a single-sided ventilation (CIBSE, 1997), the wind-driven ventilation rate Q_w (m^3/s) is expressed as $Q_w = 0.05 A V$, where A is the opening area (m^2) and V the wind speed (m/s) at the building height. The stack-driven air flow Q_s is then given by

$$Q_s = \frac{1}{3} C_d A \cdot \sqrt{\frac{gh |T_{in} - T_{out}|}{(T_{in} - T_{out})/2}}$$

with h the height (m) of the opening and T_{in} , T_{out} the indoor and outdoor absolute temperatures (K). The total air flow is then obtained by $Q_{tot} = (Q_w^2 + Q_s^2)^{1/2}$, linked with the indoor air by an added variable resistance $\rho Q_{tot} C_p (T_{in} - T_{out})$ to the RC network.

Actions on shading devices

The model for the prediction of actions on blinds (Haldi and Robinson, 2010) is also based on a Markov chain, predicting lowering and raising probabilities. The model takes pre-processed occupancy states, outdoor illuminance and indoor illuminance E_{in} as inputs (requiring coupling with a daylight model, see below). The following action probabilities determine lowering and raising actions:

$$P_{act}(E_{in}, B_L) = \frac{\exp(a + b_{in} E_{in} + b_L B_L)}{1 + \exp(a + b_{in} E_{in} + b_L B_L)}$$

where B_L is the current unshaded fraction, with parameters a , b_i displayed in Table 2 (bottom). If an action is predicted, the probabilities of adjusting blinds to their fully (un)shaded position are:

$$P_{fullact}(E_{in}, B_L) = \frac{\exp(a + b_{out} E_{gl,hor} + b_L B_L)}{1 + \exp(a + b_{out} E_{gl,hor} + b_L B_L)}$$

Finally, if a partial raising action is predicted, the deduced shaded fraction is drawn from a uniform distribution and in the case of partial lowering the increase in shading ΔB is drawn from the Weibull distribution

$$f(\Delta B) = \frac{\alpha}{\lambda} \left(\frac{\Delta B}{\lambda}\right)^{\alpha-1} \exp\left(-\left(\frac{\Delta B}{\lambda}\right)^\alpha\right)$$

with $\alpha = 1.708$ and $\lambda = \exp(-2.294 + 1.522 B_{L,init})$.

The incident shortwave irradiance is then multiplied by the unshaded fraction to obtain the transmitted irradiance.

Table 1

Regression parameters for probabilities of action on windows and shading devices, based on aggregated data from all occupants

WINDOWS: VARIABLES	OPENING PROB. P ₀₁	CLOSING PROB. P ₁₀
Arrival		
a	-13.88 ± 0.37	3.97 ± 0.37
θ _{in}	0.312 ± 0.016	-0.286 ± 0.017
θ _{out}	0.0433 ± 0.0033	-0.0505 ± 0.0045
f _{abs,prev}	1.862 ± 0.044	
f _R	-0.45 ± 0.11	
During pres.		
a	-12.23 ± 0.28	-1.64 ± 0.22
θ _{in}	0.281 ± 0.013	-0.0481 ± 0.0098
θ _{out}	0.0271 ± 0.0024	-0.0779 ± 0.0020
T _{pres}	(-8.78±0.53) · 10 ⁻⁴	(-1.62±0.06) · 10 ⁻³
f _R	-0.336 ± 0.081	
Departure		
a	-8.75 ± 0.22	-8.54 ± 0.48
		0.213 ± 0.022
θ _{out,dm}	0.1371 ± 0.0075	-0.0911 ± 0.0061
f _{abs,next}	0.84 ± 0.12	1.614 ± 0.069
f _{GF}	0.83 ± 0.13	-0.923 ± 0.068

BLINDS: VARIABLES	LOWERING PROB. P _{LOWER}	RAISING PROB. P _{RAISE}
Arrival		
a	-7.41 ± 0.16	-1.520 ± 0.051
E _{in}	(10.35±0.19) · 10 ⁻⁴	(-6.54±0.46) · 10 ⁻⁴
B _L	2.17 ± 0.16	-3.139 ± 0.068
During pres.		
a	-8.013 ± 0.086	-3.625 ± 0.030
E _{in}	(8.41±0.13) · 10 ⁻⁴	(-2.76±0.22) · 10 ⁻⁴
B _L	1.270 ± 0.086	-2.683 ± 0.040
Full lowering or raising		
a	-0.27 ± 0.14	0.435 ± 0.062
E _{gl,hor}	(0.91±1.33) · 10 ⁻⁶	(-2.31±0.11) · 10 ⁻⁵
B _L	-2.23 ± 0.16	1.95 ± 0.11

Internal illuminance prediction

Internal illumination is also simulated using the simplified radiosity algorithm, as described by Robinson and Stone (2006). This method predicts the internal illuminance at two penetration distances. The value closest to the window (1.5 m by default) is retrieved as input E_{in} for the model for actions on blinds. A proportionality constant accounts for the effect of shaded fraction.

Individual diversity

The behavioural diversity between occupants is modelled using regression parameters similar to those found in Table 1, but derived from the analysis of control actions performed by individuals (rather than from aggregate data). These values are presented in Haldi and Robinson (2009, 2010).

CASE STUDY AND TEST VARIABLES

The case study

In this study we focus more precisely on the influence of occupants' behavioural diversity on energy demand and indoor conditions. The influence of different types of building designs is not specifically examined. Rather we study a simple fixed office configuration as depicted in Figure 3, with a volume of 44.1 m³. The heating system consists of a boiler of maximum power $P = 1000$ W. Real occupancy data monitored from an office building are used, totalling a presence of 8.5% of the simulated period.

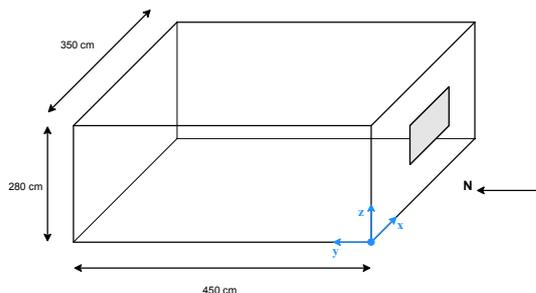


Figure 3 General scheme of the simulated room

Parameters studied

The influence of the following parameters has been evaluated:

- Glazing ratio of the south façade: $G = 0.10$, and alternatively $G = 0.05$, which are set equal to the openable ratio of the façade.
- Setpoint temperatures for heating $H = 18^{\circ}\text{C}$ and 21°C , and cooling: $C = 26^{\circ}\text{C}$ and 30°C . The cases of no heating and no cooling are also investigated.
- Individual behaviours, denoted by P (set to 0, 1, ..., 22, 23, D), linked with corresponding regression parameters; where 0 denotes the models based on the aggregated data (Table 1) and D a deterministic control strategy (window opening if $\theta_{in} > 26^{\circ}\text{C}$, closing if $\theta_{in} < 20^{\circ}\text{C}$; blind lowering if $E_{in} > 2500$ (lx), raising if $E_{in} < 300$ (lx)).

The influence of these parameters are studied with respect to:

- Thermal comfort: Overheating and underheating are assessed by the proportion of occupied time above 28°C and below 18°C .
- Energy use: Total heating and cooling consumption.
- Use of controls: state of windows and shading devices.

The use of stochastic behavioural models suggests the replication of simulations for the assessment of the variability between predictions. In each considered case, simulations are repeated 50 times, which allows us to study the distribution of results rather than deceptive fixed mean values.

RESULTS

In this section results with respect to stochastic fluctuations, design influence and occupants' diversity are presented.

Pure stochastic variation

Replicates of simulations with identical design and behavioural inputs display significant variability in their results, which is in agreement with observations in reality: a given occupant will not behave identically even for similar environmental conditions. Figure 4 (top) and Table 2 illustrate this fact for 50 simulations of the case G0.10-H21-C26-P0, where for instance the heating load ranges from 2417 to 4496 (kWh/year) for 95% of cases. The degree of this dispersion varies between design variants, as shown in Figure 4 (middle).

Influence of design and setpoint temperatures

Figure 4 (middle) presents the distributions of simulation results for the above mentioned levels of glazing ratio and setpoint temperature, yielding $2 \times 3 \times 3 \times 50 = 900$ replicates. The simulations show that an increased glazing ratio raises heating needs but lowers cooling needs, and quantifies this expected effect. We also observe the greater sensitivity of cooling loads to setpoint temperatures compared to heating loads.

Influence of behavioural diversity

Due to the large number of required simulations, the impact of occupants' different behaviours was investigated exclusively in the configuration G0.10-H18-C30; such a setting is characterised by relatively distant setpoint temperatures and a large opening area, which offer together a large degree of adaptation to the occupant.

Figure 4 (bottom) shows the distributions of heating and cooling loads with respect to the simulated individual behaviours. Compared to the model P0 of an "average occupant", the dispersion of the results is strongly reduced, which is a consequence of higher

slopes in the regression parameters (and thus higher determination) in the case of models for individuals.

On the other hand, the overall spread of results between occupants outweighs by far the spread initially noticed in the case of the aggregated behavioural model. The explicit simulation of behavioural diversity brings thus a more realistic estimation of the distribution of outcomes in building simulation.

Nevertheless, no clear trend emerges on the link between energy demand and behavioural specificities. Using $\theta_{50,act}$ – the indoor temperature at which the probability of action is 0.5 – as a realistic proxy for the “behavioural activity” of occupants, no clear correlation can be noticed with heating or cooling loads (Figure 4, bottom right).

Finally, the failure of deterministic rules is clear in the context of modelling occupants’ behaviour: not only are the effects of stochastic variations and occupants’ diversity ignored, but the fixed result is wholly unrepresentative of reality (Figure 4, bottom left and centre).

CONCLUSION

Repeated simulations of occupants’ stochastic behaviour allow for more realistic estimations of energy demand, and a more informative presentation of building simulation results. Indeed fixed deceptive and inexact values can be replaced by results such that “*in 95% of cases the heating needs will lie in a given range*”, information of interest for the dimensioning of building services and for testing the robustness of passive design strategies. However, this work should be further developed with parametric studies, where the interactions between building design and occupant behaviour are studied in greater detail.

Finally, such results must be based on behavioural models which correctly reflect the population which occupies the building. As such further research is essential to enable calibration parameters for stochastic behavioural models to be derived for a sufficiently representative set of building types.

ACKNOWLEDGEMENTS

Financial support received from the European Commission as part of the CONCERTO II Project HOLISTIC is gratefully acknowledged. We are particularly thankful to Jérôme Kämpf for his help in the implementation of the behavioural models.

REFERENCES

CIBSE, 1997. Natural ventilation in non-domestic buildings – CIBSE Applications Manual AM10.

- Haldi, F., Robinson, D., 2009. Interactions with window openings by office occupants, *Building and Environment*, 44(12): 2378-2395.
- Haldi, F., Robinson, D., 2010. Adaptive actions on shading devices in response to local visual stimuli, *Journal of Building Performance Simulation*, 3(2): 135-153.
- Kämpf, J., Robinson, D., 2007. A simplified thermal model to support analysis of urban resource flows, *Energy and Buildings* 39(4): 445-453.
- Parys, W., Saelens, D., Hens, H., 2010. Implementing realistic occupant behavior in building energy simulations – the effect on the results of an optimization of office buildings, In *Proc. Clima 2010, Antalya, Turkey*.
- Reinhart, C. F., 2004. Lightswitch-2002: a model for manual and automated control of electric lighting and blinds, *Solar Energy* 77(1):15–28.
- Rijal, H. B., et al., 2007. Using results from field surveys to predict the effect of open windows on thermal comfort and energy use in buildings. *Energy and Buildings*, 39(7):823–836.
- Robinson, D., Stone, A., 2004. Solar radiation modelling in the urban context, *Solar Energy* 77(3): 295-309.
- Robinson, D., Stone, A., 2006. Internal illumination prediction based on a simplified radiosity algorithm, *Solar Energy* 80(3): 260-267.
- Robinson, D. et al., 2009. CitySim: Comprehensive micro-simulation of resource flows for sustainable urban planning, In *Proc. 11th Int. IBPSA Conf: Building Simulation 2009*, 1083-1090, Glasgow, United Kingdom.
- Roetzel, A., Dietrich, U., Tsangrassoulis, A., Busching, S., 2010. Balancing buildings and occupants, a holistic approach to thermal comfort and greenhouse gas emissions in mixed mode offices, In *Proc. Adapting to change: New Thinking in comfort*, Windsor, United Kingdom.
- Schweiker, M., Shukuya, M., 2010. Comparative effects of building envelope improvements and occupant behavioural changes on the exergy consumption for heating and cooling, *Energy Policy* 38(6): 2976-2986.
- Yun, G.Y., Steemers, K., Baker, N., 2008. Natural ventilation in practice: Linking facade design, thermal performance, occupant perception and control, *Building Research and Information* 36(6): 608-624.

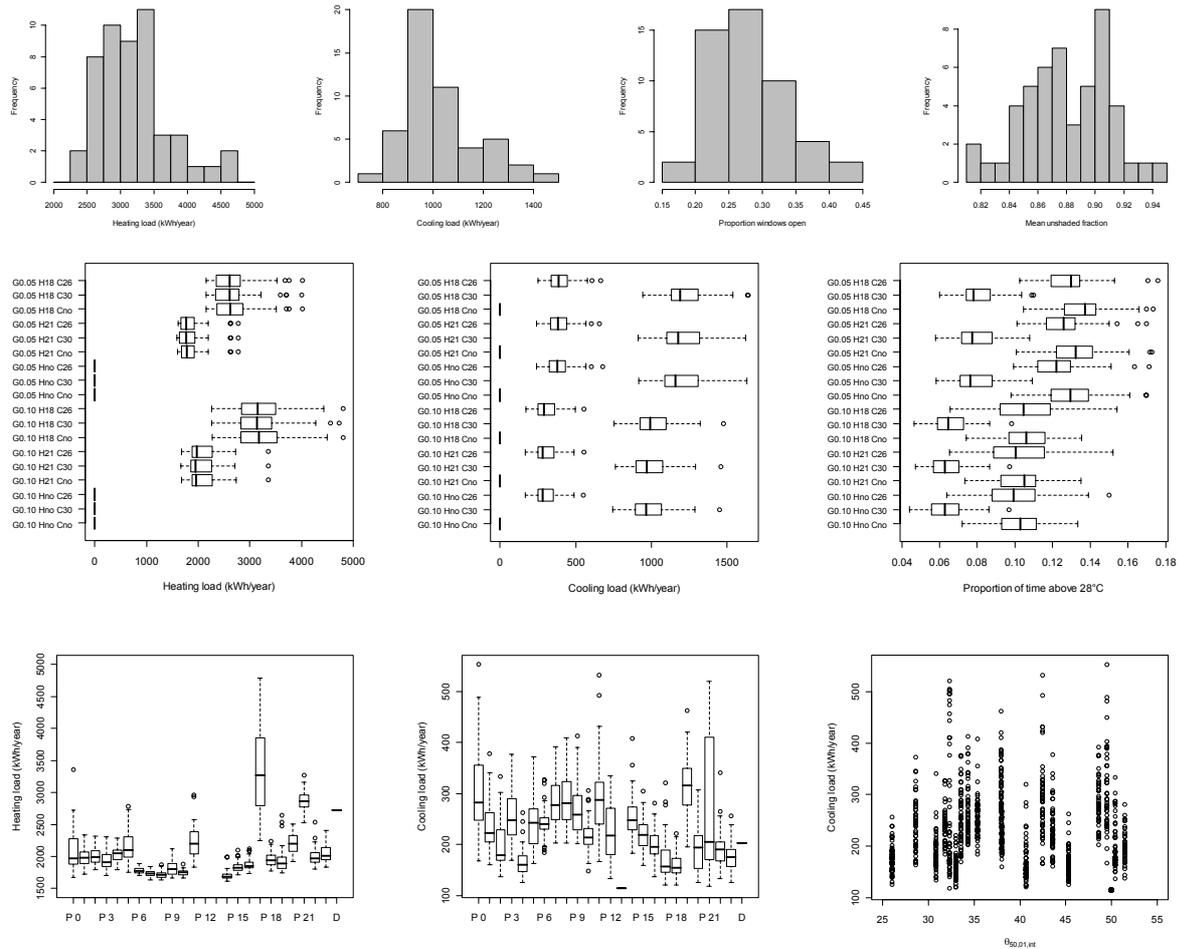


Figure 4 - Top: Distributions of simulation results for the case G0.10-H21-C26-P0 based on 50 iterations.
 Middle: Distributions of results for 18 design variants based on average occupant behaviour (P0)
 Bottom: Distribution of heating and cooling loads with respect to behavioural diversity

Table 2
 Medians and 2.5% - 97.5% quantiles of a selection of simulation results

	G0.10H21 C26P0	G0.05H21 C26P0
Heating load (kWh/year)	3138 (2417 - 4496)	2605 (2185 - 3709)
Cooling load (kWh/year)	991 (809 - 1320)	1189 (973 - 1617)
Mean temp. (°C)	21.9 (21.0 - 22.5)	22.5 (21.8 - 22.9)
Fraction above 28°C	6.5% (5.0 - 8.6)	7.8% (6.2 - 10.8)
Fraction below 18°C	7.5% (2.9 - 15.8)	3.3% (0.9 - 10.8)
Ratio window open (any occ)	27.6% (19.3 - 39.9)	24.4% (14.4 - 38.1)
Opening actions	25 (19 - 32)	27 (20 - 33)
Mean unshaded fraction	87.9% (82.1 - 92.9)	91.0% (83.9 - 94.7)
Lowering act.	39 (28 - 51)	33 (22 - 46)
Raising act.	34 (26 - 42)	28 (19 - 35)

SIMULATIONSBASIERTE EVALUIERUNG VON GEBÄUDEDESIGN IM BEZUG AUF DIE GEPLANTE NUTZUNG

Štefan Emrich¹, Martin Bruckner², Sanja Zerlauth¹, Shabnam Tauböck²,
 Julia Funovits³, Niki Popper³, Marijana Srećković¹, Dietmar Wiegand¹, und Felix
 Breitenecker²

¹Institut für Städtebau, Landschaftsarchitektur und Entwerfen, TU Wien, Österreich

²Institut für Analysis und Scientific Computing, TU Wien, Österreich

³dwh GmbH, Simulation Services, Wien, Österreich

ABSTRACT

The present paper describes the development of a new simulation approach for evaluation of building design with respect to its utilization. Hereby the focus is set on buildings other than industry (currently university campuses), as for these – to the authors' knowledge – no appropriate methods exist.

From the starting point of a potential benefit for the whole society, the applied modeling techniques (discrete event simulation, cellular automata, agent-based approaches and business process modeling) are sketched and their – for the project approach necessary – adaption described.

First results obtained by the model are presented and analyzed – due to the early stage of the project these are to be treated with caution. Nevertheless the tendency is promising.

KURZFASSUNG

Das vorliegende Paper beschreibt die Entwicklung eines neuen Simulationsansatzes für die Bewertung von Gebäudedesign unter Berücksichtigung der Gebäudenutzung – abseits von Industrieobjekten. Ein Gebiet für welches (nach gegenwärtigem Wissenstand der Autoren) bisher keine Methoden existieren.

Ausgehend von der Motivation, bedingt durch den potentiellen gesamtgesellschaftlichen Nutzen dieses Modellansatzes, werden die verwendeten Simulationsmethoden (Discrete Event Simulation, zelluläre Automaten, agentenbasierte Ansätze und Business Process Modelling) skizziert, sowie die für den spezifischen Einsatz notwendigen Modifikationen bzw. Adaptionen beschrieben.

Erste mit dem Werkzeug produzierte Ergebnisse werden präsentiert und analysiert, wobei aufgrund des relativ frühen Projektstadiums diese noch nicht als gesichert betrachtet werden dürfen, jedoch eine klare und positive Tendenz abzeichnen.

EINLEITUNG

Im Lauf der vergangenen Jahre, spätestens mit den Diskussionen rund um die globale Erwärmung, ist die Reduktion des Energiebedarfs von Gebäuden (über den gesamten Lebenszyklus) in den Fokus breiten Interesses gerückt. Bei der Betrachtung des Energiebedarfs wird aber – in der Regel – die Frage nach der Sinnhaftigkeit des (Energie-)Einsatzes außer Acht gelassen: energiepassive bzw. -aktive Gebäudemodelle gelten per se als gut, eine Einschätzung welche das Gebäude aus dem Kontext reißt – die Nutzung wird nicht berücksichtigt. Ein Niedrigenergie-Gebäude welches gebaut und nie genutzt wird, weist ein schlechteres Verhältnis zwischen ökologischem Fußabdruck und Nutzung auf als ein „normales“ Gebäude welches hocheffizient Bewirtschaftet wird.

Es steht daher außer Frage, dass ein energieoptimiertes Gebäude (neben den bauphysikalischen Gesichtspunkten) so beschaffen sein muss, dass es der Nutzung bestmöglich entspricht. Gegenwärtig wird die Darstellung der „Nutzung“ von Gebäuden jedoch bestenfalls durch (3D) Visualisierungen abgedeckt – die keinesfalls die tatsächliche Nutzung aussagekräftig beschreiben, sondern höchstens den Anschein eines „belebten“ Gebäudes (z.B. animierte Videosequenzen) vortäuschen.

Eine Untersuchung hinsichtlich der Nutzung wird im Allgemeinen nur bei hochspezialisierten Gebäuden (v.a. in Produktion und Logistik, z.B. Fabriken oder Flughäfen) durchgeführt. Vor allem in Großgebäuden wie etwa (Hoch-) Schulen oder Bürokomplexen kann jedoch durch ein effizientes Management die Nutzung der vorhandenen (Raum-) Ressourcen deutlich verbessert werden (siehe Wiegand et al., 2007).

PROBLEMSTELLUNG

Während für andere, vor allem bauphysikalische, Aspekte (Thermodynamik, Lüftung, Steuersysteme, etc.) Gebäudesimulationen bereits Standard ist, ist die Untersuchung und Optimierung – möglichst vor

Errichtung des Gebäudes – der „Nutzbarkeit“ zurzeit kein Thema. Um auf die eingangs besprochene Herausforderung adäquat reagieren zu können, ist diese jedoch unerlässlich.

Als problematisch erwies sich das gänzliche Fehlen vergleichbarer Ansätze – mit Ausnahme der bereits erwähnten „industriellen“ Nutzung (entsprechen dem Wissensstand der Autoren nach eingehender Recherche). Es war daher notwendig ein neues Konzept für die Gebäudesimulation auf individueller Nutzerbasis zu entwickeln.

Um den Aufwand hierbei trotzdem in einem angemessenen Rahmen zu halten, lag es nahe als Basis dafür bereits bewährte Modellbildungsansätze zu wählen. Unter diesen bieten sich vor allem Logistikanalysen wie etwa Discrete Event Simulation (DEVS) an. Die Komplexität der betrachteten Systeme erfordert jedoch ein flexibles und anpassbares Modell. Logistikmodelle sind in der Regel zwar modular aufgebaut müssen jedoch per drag & drop aus Libraries zusammengesteckt werden. Bei großen, sich ändernden Systemen (z.B. regelmäßig revidierte Gebäudepläne mit mehreren hundert Räumen) ist dieser klassische DEVS-Ansatz zu wartungsintensiv.

Des Weiteren muss das Modell individuelles Nutzerverhalten berücksichtigen, wofür sich

agentenbasierte Ansätze eignen – jedoch mit dem Nachteil deutlich höherer Rechenintensivität behaftet sind. Dasselbe gilt für die Berechnung von Wegezeiten innerhalb der zu simulierenden Gebäudekomplexe: agentenbasierte Ansätze erlauben individuelle Modellierung, stellen gleichzeitig aber hohe Ressourcenanforderungen.

Durch diese Anforderungen beziehungsweise „Rahmenbedingungen“ fiel die Entscheidung zugunsten eines hybriden zweiteiligen Modells. Als Rahmenkonstruktion kommt darin Discrete Event Simulation zum Einsatz, wird jedoch um agentenbasierte Ansätze erweitert.

Für die Simulation der Wegezeiten wurden zelluläre Automaten (CA) als Basis gewählt, die allerdings ebenfalls agentenbasiert erweitert wurden. Dieses (Sub-)Modell kann per TCP/IP-Schnittstelle mit dem DEVS-Modell gekoppelt werden.

Ein weiteres für Bauprojekte beziehungsweise im Gebäudebereich gängiges Problem war die Koordination aller involvierten Stakeholder: von der Datenbeschaffung über die handelnden Entitäten bis zu den prozessrelevanten Entscheidungsträgern – wofür auf eine modifizierte Version des Business Process Modelling zurückgegriffen wurde.

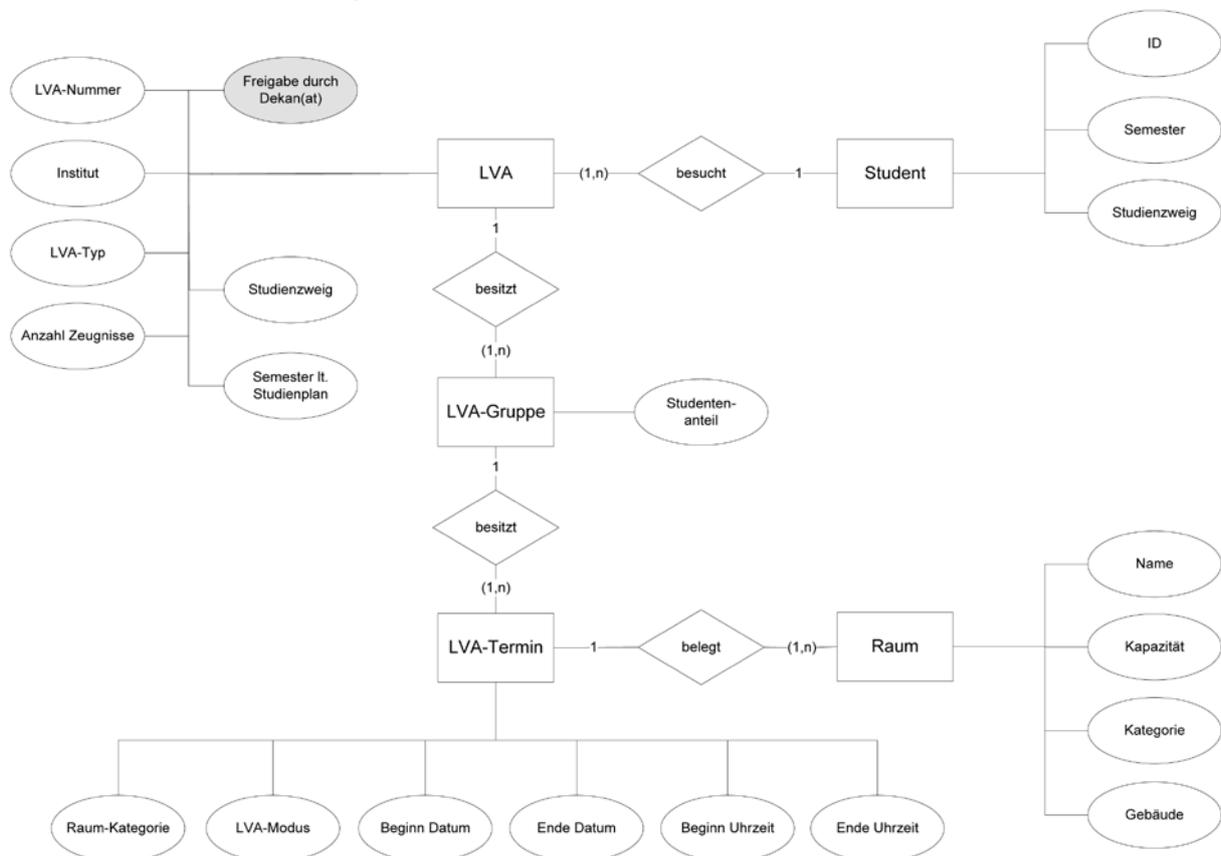


Abbildung 1: Entity-Relationship-Diagramm des Systems am Beispiel einer Hochschule

Das in diesem Paper beschriebene Simulationsmodell wurde in Kooperation mit der TU Wien entwickelt und wird gegenwärtig für einen Praxiseinsatz an dieser vorbereitet. In der bisherigen Implementierung liegt daher der Modellierungsschwerpunkt auf Hochschulgebäuden.

ADAPTION DER DEVS

Die Ursprünge von Discrete Event Simulation reichen bis zur Mitte des vorigen Jahrhunderts zurück (Nance, 1993). DEVS zählt seit langem zum Standardwerkzeug zahlreicher Anwendungsgebiete, in denen die Analyse und Verbesserung von Ressourcenplanung bzw. -Nutzung eine zentrale Rolle einnimmt.

Dazu zählen unter anderem Chain Supply, Produktion und Logistik, aber auch Krankenhausmanagement. Das Entity – Ressourcen bzw. Entity-Flow Konzept bilden die theoretische Grundlage dieses Modellierungskonzeptes. Entities suchen sich ihren Weg durch den Prozess zu den Ressourcen. Der Weg wird dabei durch Ereignisse (Events) gesteuert bzw. beeinflusst.

Im Facility Management bzw. im Management der Ressource „Raum“ kommt DEVS bisher kaum zum Einsatz. Es muss daher zuerst eine Definition respektive eine Zuordnung für das DEVS-Konzept gefunden werden: während Ressourcen eindeutig mit den Räumen identifiziert werden können stehen für Entities mehrere Ansätze frei.

Raum wird für einen bestimmten Bedarf, also Aufgaben, reserviert. Dieser Bedarf kann jedoch auf zwei Arten identifiziert werden: als Person(en)gruppen) welche bestimmte Arbeiten/Aufgaben durchführen wollen, oder als Arbeiten/Aufgaben welche einen Raum benötigen – und mit Personen verknüpft sind.

Für die Modellbildung wurde dabei der erste Ansatz gewählt, und die Personengruppen – wie bereits erwähnt – auf Individualbasis, also jeden einzelnen Nutzer, herunter gebrochen. Der Fokus des Modells lag dabei während der Entwicklung – und im aktuell anlaufenden Praxiseinsatz – vorerst auf Hochschulgebäuden, soll jedoch noch im weiteren Projektverlauf ausgeweitet und verallgemeinert werden.

Im so definierten DEVS-Ansatz suchen sich also Entities mit einer gemeinsamen Aufgabe (z.B. Studenten und Studienplan) den Weg durch das System zu den Ressourcen (Räume bzw. Hörsäle). Dabei treffen sie auf andere Entitäten und werden von Events (Veranstaltungen/Lehrveranstaltungen) beeinflusst.

Dabei ist das Modell jedoch nicht starr, vergleichbar einer Produktionsstraße, sondern kann – abhängig

vom notwendigen Grad der Modellierungsdetails - ebenfalls verändert werden. Wegzeiten zwischen zwei Räumen können so statisch angenommen oder mittels CA-Modell dynamisch gerechnet werden, um etwa einer hohen Dichte auf Gängen/in Stiegenhäusern Rechnung zu tragen.

Selbst die Räume (Ressourcen) sind modifizierbar, da diese bei Bedarf (und je nach technischer Möglichkeit der jeweiligen Räume) geteilt bzw. zusammengelegt werden können um dem Bedarf besser entsprechende Kapazitäten zu schaffen. Eine detaillierte Übersicht dieser Zusammenhänge ist im Entity-Relationship-Diagramm (ERD) zu finden (siehe Abbildung 1).

Wie bereits erwähnt, werden dabei die Entitäten individuell modelliert, also mit einer agentenbasierten Erweiterung versehen. Dadurch wird es möglich, dass die Entitäten individuelle „Ziele“ (Steuerungslogiken) besitzen und somit das Systemverhalten deutlich dynamischer und realitätsnäher gestaltet wird.

ERWEITERUNG ZELLULÄRER AUTOMATEN

Die zellulären Automaten (CA, vom englischen cellular automata) sind, wie auch DEVS, ein bewährtes Modellierungswerkzeug, dessen Ursprünge ebenfalls um die Hälfte des vorigen Jahrhunderts herum liegen.

Wie der Name nahelegt, ist ihre Modellbildungsgrundlage die einzelne Zelle: wengleich unzählige Variationen von CA existieren, so wohnt ihnen allen doch ein kleinster gemeinsamer Nenner inne: zelluläre Automaten sind in der Lage extrem komplexe Systeme abzubilden, dies jedoch bei gleichzeitig äußerst einfacher Beschreibung, bzw. auf Computersysteme übertragen, äußerst einfacher und ressourcenschonender Programmierung (siehe Gladrow, 2000).

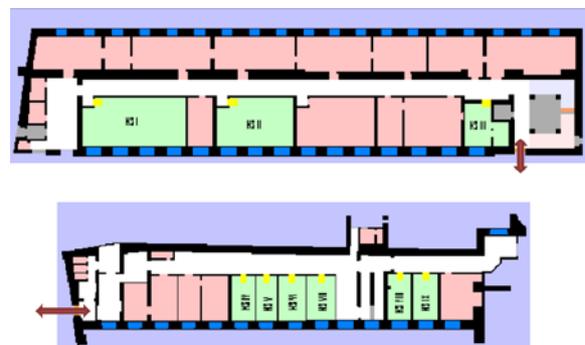


Abbildung 2: Screenshot zweier Gebäudetrakte mit Link (roter Pfeil) für die Verbindung der entsprechenden zellulären Automaten

Zusammen mit Elementen der agentenbasierten Programmierung eröffnen CA ein riesiges

Anwendungsfeld zur Simulation, darunter auch die Modellierung von unabhängigen Individuen in räumlichen Systemen (für weiterführende Information zu CA sowie einen Vergleich zwischen zellulären Automaten und agentenbasierten Systeme: Emrich, 2007).

Abbildung 2 zeigt einen Screenshot des verwendeten CA-Modells: zwei Trakte des TU Hauptgebäudes, welche aus den originalen Gebäudeplänen semi-automatisch erstellt wurden. Die einzelnen Gebäudeteile werden dabei als jeweils eigene CA realisiert und mittels Links (Türen, Treppen, Schnittstellen, Ausgänge, ...) verbunden. Diese Trennung ermöglicht zudem die parallelisierte Berechnung der einzelnen CA, und somit eine deutliche Effizienzsteigerung gegenüber einem Gesamt-CA.

MODIFIKATION DER BPMN-NOTATION

Wie bereits erwähnt fand für die Koordination der Stakeholder das Business Process Modelling (BPM) Verwendung. Zurückgegriffen wurde dabei auf die

Business Process Modelling Notation (BPMN), eine von der IBM entwickelte Notation für die grafische Darstellung von Geschäftsprozessen, welche die Erstellung von gut lesbaren Diagrammen (Zitat aus White, 2004) gewährleisten soll. Dies soll vor allem dazu führen, dass die damit kreierten Prozessbeschreibungen von allen Beteiligten – begonnen bei den Analysten die die Beschreibungen erstellen, über die technischen Mitarbeiter die mit der Umsetzung betraut sind, bis zu den involvierten Wirtschaftskräften die diese dann umsetzten – verstanden und nachvollzogen werden können (Zitat aus Wolter, Schaad, 2007).

Der Einsatz solche Techniken bei interdisziplinären Projekten ist (binahe) zwingend, da gerade zu Projektbeginn eine gemeinsame Sprache gefunden werden muss – BPMN stellt diese gemeinsame Sprache dar. Vom Auftraggeber über involvierte Wissenschaftler bis hin zum Endnutzer kann sie von jedem (mit minimaler Einarbeitungszeit) genutzt und verstanden werden.

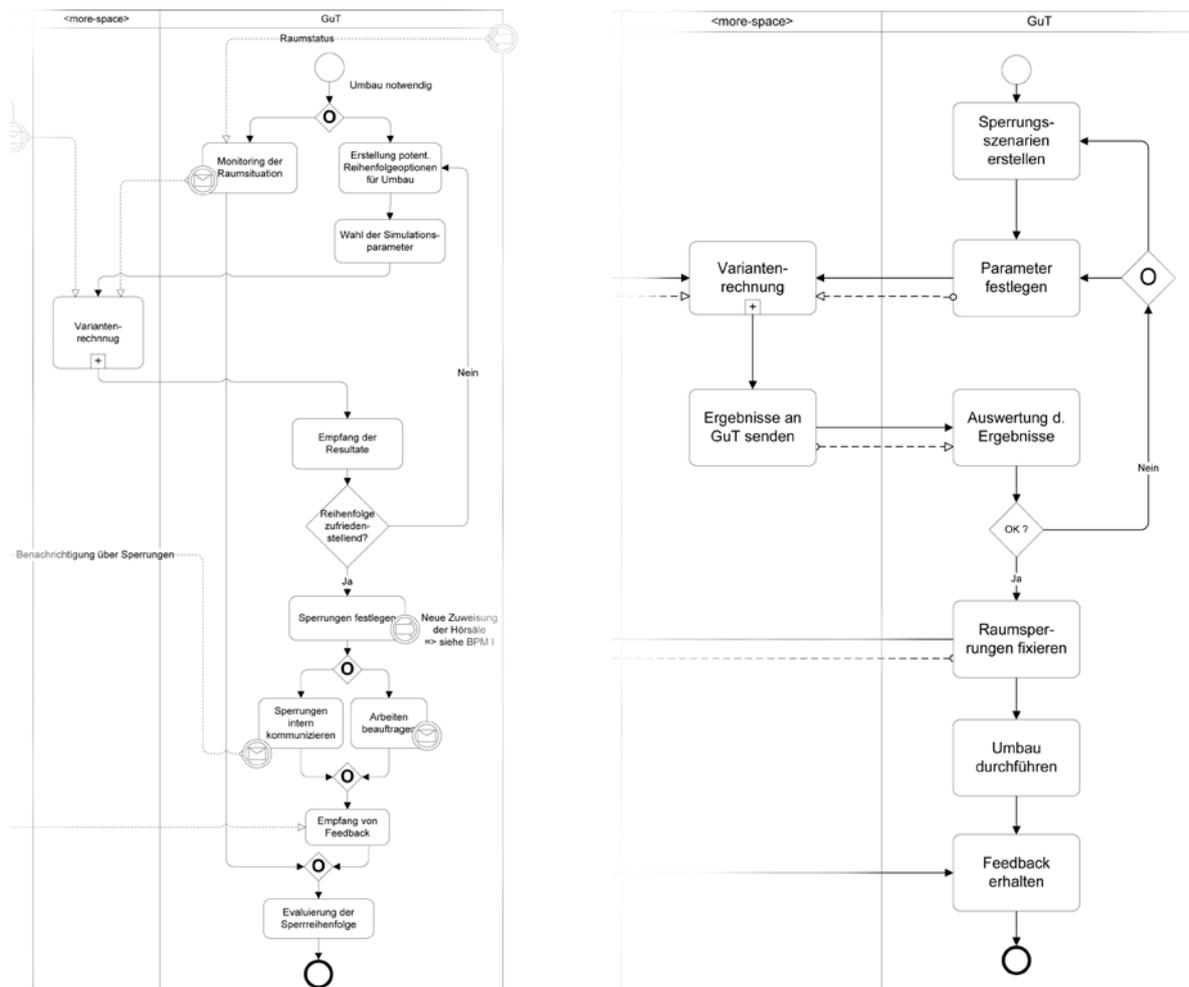


Abbildung 3: Vergleich zwischen original BPMN (links) und modifizierter Notation (rechts) anhand des selben Ausschnittes aus einem Geschäftsprozess.

Im Projektverlauf zeigte sich jedoch, dass die BPMN mit ihrem strengem Regelwerk und den zahlreichen Spezifikationen die Komplexität der abgebildeten Systeme über das notwendige Maß steigert. Deshalb wurde eine Modifikation der Notation vorgenommen um diese an die projektspezifischen Bedürfnisse anzupassen. Daher handelt es sich formal nicht mehr um die (von IBM entwickelte) BPMN-Spezifikation.

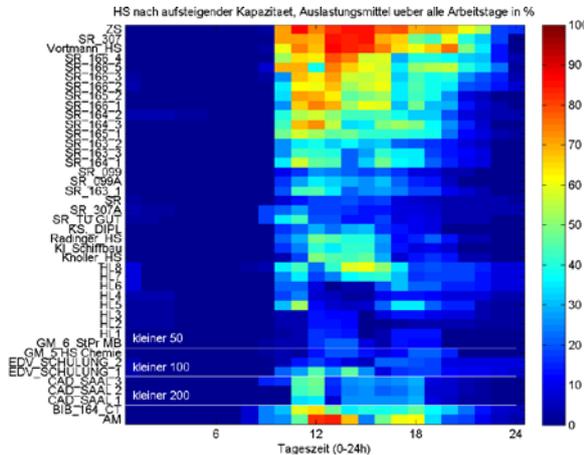


Abbildung 4: Visualisierung der Raumausnutzung im Tagesverlauf (x-Achse) aller Hörsäle (y-Achse) eines Gebäudes, Hörsäle von oben nach unten nach aufsteigender Kapazität sortiert.

Der Vorteil der modifizierten Notation wird jedoch deutlich, wenn man sich die daraus resultierende, drastische Komplexitätsreduktion vor Augen hält. Die Abbildung 3 stellt denselben Ausschnitt (aus demselben Geschäftsprozess) in originaler, sowie modifizierter Notation dar. In der klassischen BPM Notation ist für jede Aktion beziehungsweise Entscheidung eine Kennzeichnung durch spezielle Symbole notwendig (u.a. Gabelungen, Aufspaltungen der Prozess- & Datenflüsse). Die BPM Notation wurde durch eine Entschärfung der Regeln vereinfacht, so dass einfacher lesbare Flussdiagramme entstehen: für das Verständnis nicht zwingend notwendige Objekte wurden entfernt; separate Flows für die Datenübergabe wurden eingeführt.

Durch den Einsatz von BPM war es erstmals möglich die an der TU Wien für die Event-Raumvergabe (Zuordnung Lehrveranstaltungen zu Lehrräumen) etablierten Geschäftsprozesse abzubilden. Basierend auf dieser Systemanalyse wurden für ein effizienteres Flächenmanagement neue Geschäftsprozesse und dazugehörige Preconditions vorgeschlagen.

INPUTDATEN FÜR DIE SIMULATION

Eine wesentliche Hürde stellen – wie für beinahe alle Simulationsmodelle – die notwendigen Inputdaten da. Wie bereits aus dem Entity-Relationship Diagramm in Abbildung 1 ersichtlich, ist eine hohe Vernetzung

der Entitäten gegeben, ohne deren Berücksichtigung keine aussagekräftigen Schlüsse gezogen werden können.

Um das Simulationswerkzeug erfolgreich einsetzen zu können sind Daten, welche die Nutzung des abzubildenden Gebäudes bzw. Gebäudekomplexes beschrieben, zwingend notwendig. Für den Praxiseinsatz an der TU Wien ist dazu eine Schnittstelle zu den vorhandenen Datenbanken (TUWIS++, TISS, Raumdatenbank der Abteilung „Gebäude und Technik“) in Entwicklung.

Für den regulären Kundeneinsatz stellt diese Voraussetzung allerdings eine zusätzliche Herausforderung dar, da nicht angenommen werden kann, dass alle notwendigen Informationen bereits gesammelt vorliegen, nachdem dies selbst an der TU Wien nicht der Fall ist.

ERGEBNISSE

Für eine objektive Bewertung der Ergebnisse mussten Maßeinheiten neu definiert werden. Die drei wichtigsten dabei waren die „Raumauslastung“, „Raumausnutzung“ sowie die „Anzahl der Fehlbuchungen“.

Die Raumauslastung beschreibt den Anteil der Zeit in welcher ein Raum in Verwendung ist (im Vergleich etwa zur Kernzeit), während die Raumausnutzung das Verhältnis zwischen Raumkapazität und tatsächlich im Raum befindlicher Personen beschreibt. Als Fehlbuchung werden all jene Raumanfragen gewertet, welche nicht befriedigt werden können, also keinen adäquaten Raum zugewiesen bekommen (auf Einzelterminbasis).

Aufgrund der anfallenden Datenmengen (ca. 20.000 zu koordinierende Einzeltermine pro Semester im Praxiseinsatz an der TU Wien) ist eine teil-automatisierte Aufbereitung der Simulationsergebnisse unumgänglich. Diese wird in mehreren Schritten durchgeführt.

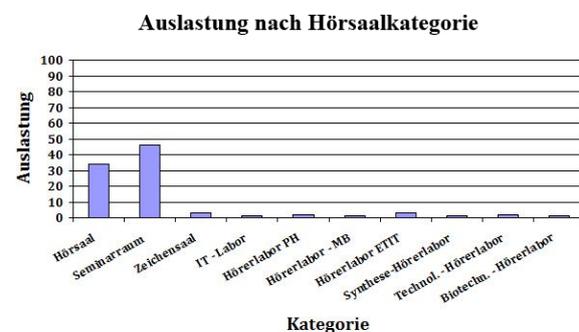


Abbildung 5: Durchschnittliche Auslastung der Hörsäle nach Kategorien (typisches Simulationsergebnis).

Automatisiert werden per GUI angesteuerte Datenbank-interne Aufbereitungen (basierend auf Access-Reports) durchgeführt, welche rudimentäre Diagramme liefern. Als zweiter Schritt erfolgt die Auswertung mittels visuell anspruchsvollerer Darstellung der Simulationsergebnisse, wofür externer Tools (z.Z. MATLAB) zum Einsatz kommen. Diese visualisieren u.a. die Auslastung und Ausnutzung der Hörsäle (siehe Abbildung 4).

Abschließend werden darauf aufbauend gezielte manuelle Analysen und Untersuchungen durchgeführt.

Die gegenwärtig implementierten Flächenmanagementstrategien erlauben es – basierend auf historischen Inputdaten – erste Schlüsse zu ziehen. So wird aus Abbildung 5 ersichtlich, dass die Leistungsgrenzen des Systems bei weitem noch nicht ausgereizt sind: die bisherige Erfahrung zeigt, dass in der Praxis eine maximal erreichbare Auslastung von 60% bis 80% angenommen werden kann. Aktuell auftretende, temporäre Engpässe können demnach durch ein verändertes Management bzw. einen koordinierenden Eingriff desselben behoben werden.

Gleichzeitig zeichnet sich jedoch ab, dass die bisher definierten 25 möglichen Flächenmanagement-Kombinationen noch nicht genügend differenziert sind und einer Verfeinerung bedürfen, was unter anderem aus der Grafik in Abb. 6 ersichtlich wird.

Die Grafik zeigt die Anzahl an nicht befriedigten Raumanfragen (auf Basis von Einzelterminen der Lehrveranstaltungen) für 15 gerechnete Szenarien. Ein Einfluss, vor allem des Regelsatzes L123 (blau), L23 (grün) bzw. L3 (orange) ist zwar erkennbar.

Dieser Regelsatz definiert welche Räume priorisiert vergeben werden (optimal passende Raumkapazität, räumlich Nähe zum Institut welches Lehrveranstaltung anbietet bzw. bloße Suche nach Raum dessen Kapazität die der Teilnehmer übersteigt). Die Unterschiede sind jedoch nicht dramatisch, eine weitere Verfeinerung der Flächenmanagementregeln also notwendig.

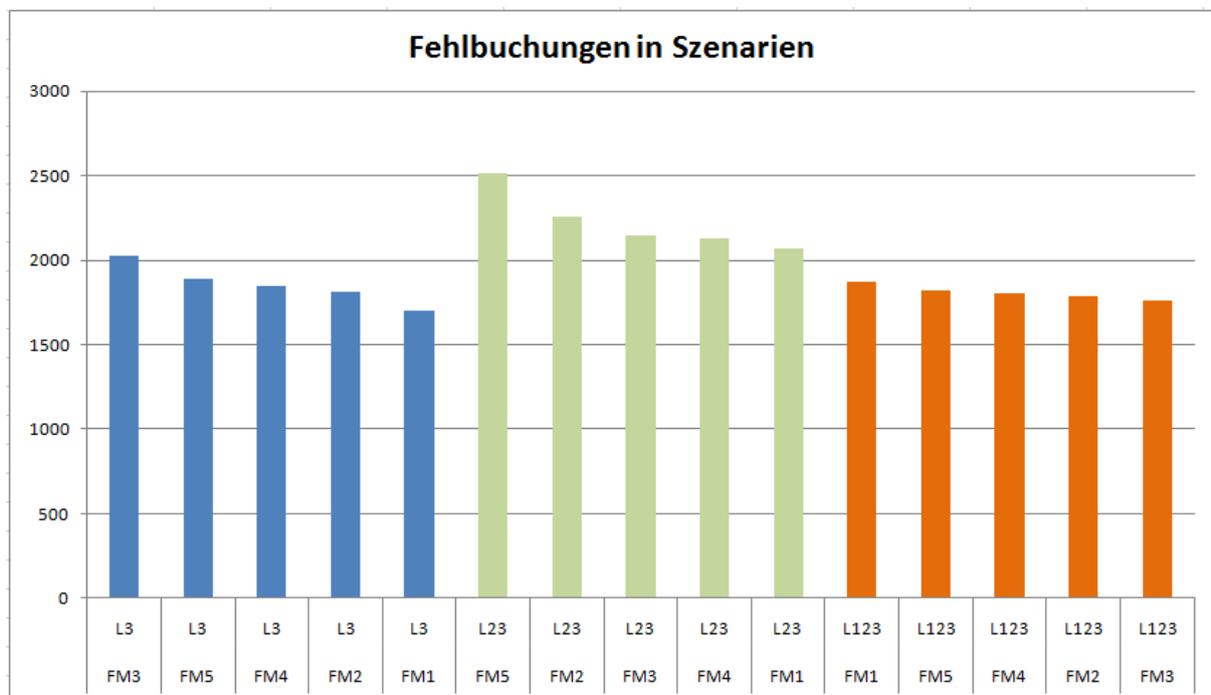


Abbildung 6: Anzahl der Fehlbuchung für 15 gerechneten Szenarien.

AUSBLICK

Aufgrund der bisherigen Ergebnisse darf ein positiver Verlauf des Praxiseinsatzes an der TU Wien erwartet werden. Dieser ist jedoch auf die Evaluierung und subsequeute Verbesserung des Flächenmanagements (der vorhandenen Gebäude) beschränkt.

In weiterer Folge bleibt daher zu untersuchen, welches Potential das Simulationsmodell als Planungswerkzeug hat, indem es bereits in der Planungsphase für die Evaluierung von Gebäudeplänen und dem geplanten Nutzen herangezogen wird.

Dadurch ließe sich das Gebäudedesign wesentlich gezielter und effizienter auf die geplante Nutzung zuschneiden. Und durch den Einsatz des Werkzeugs im laufenden Betrieb eines solchen Gebäudes könnten noch weiter greifende Effizienzsteigerungen erzielt werden.

Das Ergebnis wären mehr Nutzungseinheiten auf weniger beziehungsweise bei gleichbleibender Fläche und gleichem oder verbessertem Komfort für die Nutzer. Als Konsequenz würde der ökologische Fußabdruck pro Nutzungseinheit gesenkt werden.

Eine andere mögliche Weiterentwicklung des Modells wäre der Ausbau des Wegzeitenmodells (CA-Modell mit agentenbasierten Features) für die Simulation von Räumungszeiten. Dadurch könnten bereits im Planungsstadium Gebäude sicherer gestaltet werden und hohe Kosten für Evakuierungstests vermieden bzw. reduziert werden.

Ein Forschungsgebiet für sich stellt die Frage nach für Simulationszwecke verwertbaren Daten und deren Normierung dar.

LITERATUR

- Emrich Š. 2010. Comparison of Mathematical Models and Development of a Hybrid Approach for the Simulation and Forecast of Influenza Epidemics with Heterogeneous Populations. Betreuer: Breiteneker, F. TU Wien, Austria.
- Nance, R.E. 1993. A History of Discrete Event Simulation Programming Languages. In: ACM SIGPLAN Notices, Volume 28, No. 3, 149-175.
- Tauböck, S.M. 2010. Integration of Agent Based Modelling in DEVS for Utilisation Analysis: The MoreSpace Project at TU Vienna. Betreuer: Breiteneker, F. TU Wien, Austria.
- White S.A. 2004. Introduction to BPMN. IBM.
- Wiegand D., Mebes P., Pichler V. 2007. Event based simulations: enabling improved development planning and partnerships. In: Proceedings of Real Corp 007, CORP, 17-23. Wien, Austria.
- Wolf Gladrow, D. 2000. Lattice-Gas Cellular Automata and Lattice Boltzmann Models. Springer, Berlin, Deutschland.
- Wolter C., Schaad A. 2007. Modelling of Task-Based Authorization Constraints in BPMN. In: Proceedings of 5th Intl. Conference, BPM Brisbane, 64-79. Springer, Berlin Heidelberg, Deutschland.

VISUALISATION OF THERMODYNAMICS AND ENERGY PERFORMANCE FOR COMPLEX BUILDING AND HVAC SYSTEM SIMULATION

Stephan Ledinger¹, Marcus Jones²

¹Austrian Institute of Technology, Vienna, Austria

²Vienna University of Technology, Vienna, Austria

ABSTRACT

Complex building and HVAC system simulation is usually carried out incrementally. The process of generating the results of interest from a simulation can be defined by the cycle in figure 1. Slowly adding new information to the already working model and checking whether these additions work as intended is important. During this procedure and for the final generation of results, the modeller wants to check the new results for plausibility and correctness as quickly as possible before proceeding to the next adaptation. The use of automation reduces the effort of visualising the new results. This allows the modeller to concentrate on the analysis and modeling phase and hence speed up the work flow.

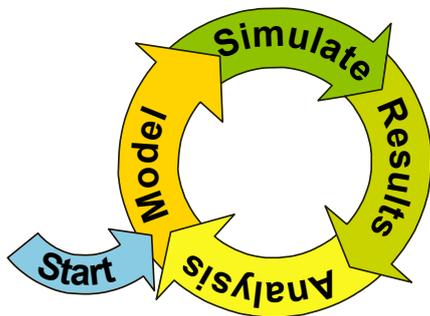


Figure 1: An approach to simulation

During the energy modelling and analysis of a complex buildings, new methods for visualising system and building energy performance were developed and employed to manage the complexity of the system. A key feature of the improved methods was the standardisation of simulation results (outputs) and the automation of post-processing these results. Automation should be applicable for not only one specific but as many building and system simulation tools as possible. This requires the standardisation conventions for naming and structuring the simulations results to be intuitive and clear. Additionally, the automation concept includes the possibility to predefine typical forms of diagrams, figures, charts, etc., and dynamically link them to the new simulation results after each simulation.

This paper provides an overview of the new prospects for building and system simulation, emerging out of this visualisation concept. The possible forms of displaying energy performance of a building and its HVAC system are automatically generated;

- time series of various variables like temperatures, flow rates, control signals, capacities, etc.
- three dimensional bar charts for energy balances systems over definable periods,
- animated psychrometric charts, showing all relevant states of a system for a definable time frame
- system overview diagrams that include dynamically linked state point information for an instant in time

The presented concept also has the intention to be applicable to other sources such as monitoring data. This allows, in addition to the streamlined simulation process, a fast validation of the modelled system.

MOTIVATION

The motivation for visualising results from building performance simulations is to bundle the diversified information of a complex simulation model and bring this to a point where questions of interest can be answered also by persons not familiar with the simulation tool itself. The benefit of streamlining the visualisation process and incorporating definitions from the simulation data post-processing into the modelling process are:

- Increasing the traceability of the simulation from the beginning to the end, also for persons not related to the project
- Allowing to apply post-processing to other simulation models with a similar approach
- Decreasing the effort for debugging the simulation model
- Enabling to distribute work packages like the plausibility check of simulation results to persons familiar with the specific field of investigation but not with the simulation tool

NAMING CONVENTIONS

The post-processing of simulation or monitoring data requires a certain standardisation of how this data looks like, meaning how the values are stored in which file type and how the post-processing routine recognises them. For the particular example simulation project the simulation environment TRNSYS (Solar Energy Laboratory, Univ. of Wisconsin-Madison 2009) version 17 was used. TRNSYS offers various options of formatting output data. This software structures the simulation model into so-called Types. In this particular case Type 25b with user-supplied units and scientific notation (16 decimals) was used to generate a data file for each state point of the simulation model. Figure 2 shows an example of these state point definitions in the simulation model. The naming convention defines which kinds of state points are available and how they have to be structured, see table 1 and 2. As an example, state point 'MoA1' in figure 2 has to have a printer, Type25b, connected, which generates a result file containing 3 columns:

- simulation time [hr]
- first parameter; Air temperature [$^{\circ}\text{C}$]
- second parameter; Humidity ratio [kg/kg]
- third parameter; Mass flow of air [kg/hr]

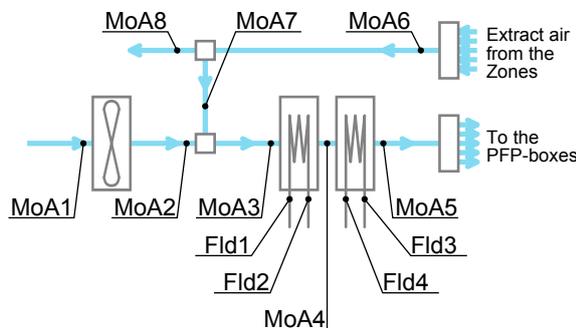


Figure 2: State point naming for a typical air handling unit scheme (VAV)

Table 1: State point types

Abbreviation	Description	Variables
MoA	Moist air flow	T, W, mf
Fld	Fluid flow	T, mf
Tnk	Stratified tank	Ef, T
ENel	El. energy consumption	Ef
ENth	Th. energy consumption	Ef
Irr	Irradiation on surface	Gb, Gd, Gg, Slp, Azm

Accordingly, the simulation of the displayed system in figure 2 generates twelve output text files of which

Table 2: State point variables

State Variable	Description	Unit
T	Temperature	[$^{\circ}\text{C}$]
W	Humidity ratio	[kg/kg]
mf	Mass flow rate	[kg/hr]
Ef	Energy flow rate	[kJ/hr]
G	Irradiation	[kJ/hrm ²]
hf	Enthalpy flow rate	[kJ/hr]

eight are moist air and four are fluid specific. Each file has a corresponding file name, which consists of the system name, the state point type, and the state point number in this system. Table 3 shows the header and the first data lines of such a file for the state point 'Fld1' in figure 2.

These naming conventions are intended to be applicable to any similar project, but were chosen in regard of the related project and therefore are subject to continuous improvement. The purpose of standardised names for state points and their containing variables is to provide consistent data to the post-processing routine. The data reading subroutine of the post-processing application will then be able to identify and structure each of the simulation result files according to its file name and the variables according to the header.

The file header contains information about the kind of state point variable and unit, which is read in by the post-processing routine. Based on this information, one of the first procedures in the post-processing is the conversion of units. An example is the convention for the units of power generated by TRNSYS. Types in TRNSYS usually calculate power as [kJ/hr]. For a person, not familiar with TRNSYS, simulation results with that specific unit might cause confusion. Therefore, the post-processing routine converts all affected columns by dividing them by 3.6 to the equivalent average capacity over the time step in [kW].

Another useful immediate operation is the calculation of the enthalpy for each fluid and moist air state point. Based on the enthalpy flow at the state points around a component, the first law of thermodynamics, conservation of energy, can be automatically applied. In example, the enthalpy difference between 'MoA4' and 'MoA3' in 2 must be equal to the enthalpy difference between 'Fld2' and 'Fld1' and represents the capacity with which the first cooling coil is lowering the temperature and humidity of the air and vice versa the chilled water flow is heated by the warm air stream (equation 1).

$$hf_{MoA3} - hf_{MoA4} = hf_{Fld1} - hf_{Fld2} = P_{Cooling1} \quad (1)$$

POST-PROCESSING

The post-processing routine was programmed in Matlab (The MathWorks Inc. 2007). After a simu-

Table 3: Example - Fluid state point 1 'CentralAHU_Fld_1.out'

TIME HOURS	T [°C]	mf [kg/hr]
+0.0000000000000000E+00	+1.0000000000000000E+01	+1.0000000000000000E+02
+2.5000000000000000E-01	+6.7334390135907300E+00	+1.6400000000000000E+05
+5.0000000000000000E-01	+6.7082159898454785E+00	+1.6400000000000000E+05
+7.5000000000000000E-01	+6.7082159898454776E+00	+1.6400000000000000E+05
+1.0000000000000000E+00	+6.7082159898454776E+00	+1.6400000000000000E+05
+1.2500000000000000E+00	+6.7082159898454776E+00	+1.6400000000000000E+05
+1.5000000000000000E+00	+6.7082159898454776E+00	+1.6400000000000000E+05

Table 4: Example - Custom point calculation for balances

Name	State type	Unit	Calculation
Bal_Power_1,	hf,	[kW],	Cooling = VAV.MoA.4 - VAV.MoA.3
Bal_Power_2,	hf,	[kW],	Dehumidification = VAV.MoA.5 - VAV.MoA.4
Bal_Power_3,	hf,	[kW],	ZoneLoad = VAV.MoA.6 - VAV.MoA.5
Bal_Power_4,	hf,	[kW],	Fan = VAV.MoA.2 - VAV.MoA.1

lation run, the modeller starts this Matlab-script and, once defined correctly, all the necessary procedures to finally generate readable plots are done automatically. These definitions require locating the simulation results and description files. Description files in this case are simple text files with strings that are read in and interpreted by the Matlab-script as commands. Two of these files were used in the example simulation project. The first, table 5, was used to add descriptive text to the state points in the Matlab data structure. This information is used to identify the stored data in the structure and automatically label graphs et cetera. The second, table 4, was used to automatically execute calculations on the "raw" values like shown in equation 1 and adding the results as new points to the Matlab data structure. These, so called "custom points", can be easily used to calculate energy balances and other analytical operations. The resulting data is automatically stored and can be accessed by the analysis- and plotting script like any other state point from the simulation.

The read, processed and calculated data is structured according to the system names. Having this standardised structure, information for following analyses and generating graphs can be accessed easily. At this development stage of the post-processing routine, monitoring data has to be provided in the same kind of text files and header information. Future extensions of the script aim towards including a conversion routine for typical monitoring data. For more details of the post-processing programming see (Jones and Ledinger 2010).

TYPES OF FIGURES

Having a standardised structure for all simulation data in Matlab, which allows addressing any of the defined state points in the model over the whole sim-

Table 5: Example - Descriptive text for state points

State point	Descriptive text
VAV_MoA_1	- Fresh air supply
VAV_MoA_2	- Fresh air after fan
VAV_MoA_7	- Recirculated air
VAV_MoA_3	- Mixed air
VAV_MoA_4	- Cooled air
VAV_MoA_5	- Dehumidified air

ulation time frame, is beneficial for creating various diagrams quickly. This applies especially to the analysis phase of a simulation project, when complications, errors or new points of interest arise and would, without the standardised state point printers, require a new simulation run with specially added printers at the specific system. The Matlab post-processing routine allows to include an analysis script for any specific project. Every time the simulation model is re-simulated, the whole extended post-processing routine is executed and automatically generates the previously defined diagrams with the new simulation results.

The wide spread usage of Matlab results in a community with solutions to numerous programming challenges. Examples for very different graphs can be found online and adapted to the own purpose. The process of writing a script for plotting diagrams with simulation and also monitoring data can be seen as picking and combining adequate modules of code which already exist. Some examples of different types of graphs that can be generated with this procedure follow.

Time series

In the analysis of a simulated system, mainly time series of several specific variables are used. The evolu-

tion of temperature, humidity, mass flows, energy consumption, et cetera. over time often is the adequate and important tool to analyse and illustrate the simulated performance of a system.

Energy balances and bar charts

For further investigations on the simulated model, energy balances are useful. Time series of the calculated energy rates can be integrated for any period of time and displayed in a bar chart (figure 3).

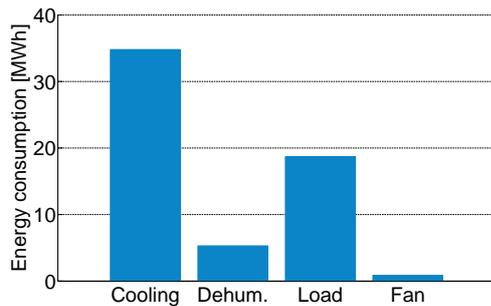


Figure 3: Example bar chart

Three-dimensional bar charts

Annual simulations often arise the need to split up bar charts into smaller time periods to display seasonal characteristics of systems in an overview. Therefore, three-dimensional bar charts can be used. As an example, figure 4 shows the cumulated energy consumption for several systems for the whole year broken down to months.

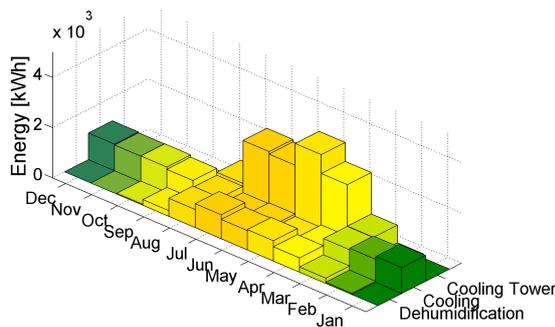


Figure 4: Example three-dimensional bar chart

Peak analysis

In HVAC system simulations the electrical energy consumption of the main system components are of interest. Other than the annual energy balance of the system, a peak analysis can give information about the maximum electrical capacity that a single or a sum of components consume within the duration of the simulation. As a possible example, figure 5 shows the average electrical power consumption of a vapor compression chiller in a histogram.

age electrical power consumption of a vapor compression chiller in a histogram.

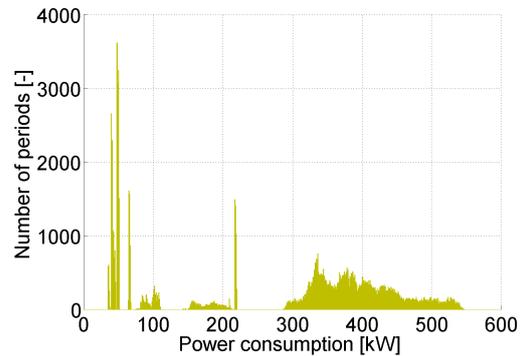


Figure 5: Example Histogram

Psychrometric charts and animations

Analysing ventilation systems requires psychrometric charts. The post-processing script allows to automatically plot such graphs for a specific system at any instant in the simulation time, once the state points of the system that should be contained are defined. An example of such a graph is given in figure 6. Additionally, an animation, showing this psychrometric chart for a specific time frame can be generated. Interactively displaying all the important state points over several days allows new ways of assessing system performance.

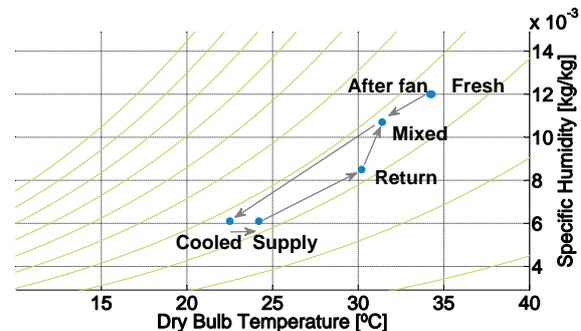


Figure 6: Example psychrometric chart

Scheme visualisation

Psychrometric charts are useful to evaluate the performance of air based systems. For a more general view, it is helpful to have the actual values of state points next to each of them in a scheme of the system at an instant of the simulation time. Once a scheme of the system is drawn and the desired text boxes are added to the correct location, the post-processing script can parse the relevant information into the text boxes and update the whole graph. An example of

such an automatically updated scheme is shown in figure 7.

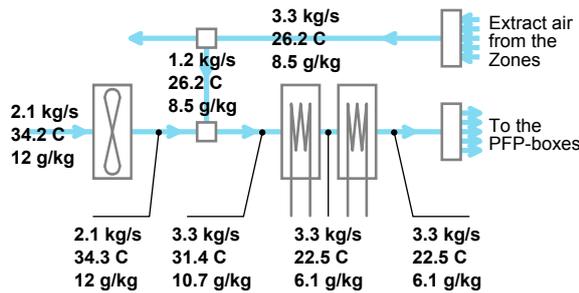


Figure 7: Example scheme visualisation

CONCLUSION

The visualisation of thermodynamics and energy performance for complex building and HVAC simulations requires advanced usage of data post-processing routines. A standardisation of simulation output files was applied to enable the programmed scripts to be used for other simulations as well as for monitoring data. New methods in post-processing and scripting using Matlab allow the modeller to access and visualise the vast amount of of generated simulation data. The applied routines allow automation of post-processing and visualisation, creating, for example, time series, bar charts, psychrometric analysis quickly and reliably.

These methods enable improved debugging and a higher quality of statistical analysis of the data. This results in a smoother simulation process, see figure 1, and a more detailed understanding of complex systems modellers are tasked to evaluate.

REFERENCES

- Jones, Marcus, and Stephan Ledinger. 2010. "Pushing the limits of simulation complexity - a building energy performance simulation of an exhibition centre in the U.A.E." *Proceedings of Simbuild 2010 - 4th national conference of IBPSA-USA (Pending final acceptance)*.
- Solar Energy Laboratory, Univ. of Wisconsin-Madison. 2009. *TRNSYS 17 - a TRaNsient SYstem Simulation program*.
- The MathWorks Inc. 2007. *MATLAB version 7.5.0.342 (R2007b)*.

THERMAL INERTIA FOR SMALL SCALE RESIDENTIAL BUILDING

Stijn Verbeke

University of Antwerp/ Artesis College of Architectural Sciences, Antwerp, Belgium

Stijn.verbeke@ua.ac.be

ABSTRACT

A virtual experiment is set up in order to assess the impact of building thermal mass in small scale residential architecture. Yearly energy demand for space heating and appreciation of occupant thermal comfort are simulated using whole building simulation tool EnergyPlus in conjunction with Matlab. In order to mimic real life occupant behavior accurately, a stochastic occupant behavior schedule is generated, including a window opening algorithm to reduce overheating. The results for Belgian climatic conditions indicate that on average, a lightweight building demands 4.5% more heating energy compared to a heavyweight equivalent, and has a level of discomfort which is 20.5% higher. Overall, the impact of thermal inertia is secondary to other design parameters such as insulation level and glazing properties.

INTRODUCTION

Improving the thermal performance of buildings has become a major issue the last decade due to economical, political and ecological motives. In order to estimate the energy consumption of a building during the design phase, simplified calculation methods have been developed. Most of these algorithms focus on the steady state thermal transmittance of the building components, denoted by the U-value [W/m^2K]. This is notably the case for most of the national implementations of the European Energy Performance of Buildings Directive.

A steady state calculation allows for a quick and easy application, by neglecting the transient nature of heat transfer phenomena. Due to changing outside temperatures, sun irradiation, internal heat gains, etc., there is an ever changing heat exchange between the building and the environment, as well as between different rooms within a building. Building materials can store and release heat, depending on the temperature difference with their surroundings. The amount of energy stored depends on the mass of the component and the specific heat capacity of the material. A building with a great amount of thermal mass is able to time-shift and flatten out temperature peaks; this is referred to as the thermal inertia of a

building. In a steady state calculation, this effect is neglected.

Most research on thermal inertia focuses on offices, for which a high amount of thermal mass can restrict temperature excess, and consequently improve thermal comfort and reduce cooling loads. This is further exploited in low energy concepts such as intensified night ventilation or thermally activated building systems.

Unlike offices, houses are characterized by low internal heat gains and a great spread in comfort demands depending on occupant activities. Furthermore houses are seldom equipped with active cooling equipment, instead people rely on operating windows to avoid overheating. Because of these distinct properties, design rules for offices are not applicable to residential architecture.

In houses a high level of thermal mass can help reducing summer overheating, and thus enhance thermal comfort. During heating season, thermal inertia has two opposite effects on the energy demand. With intermittent heating a less inert building will cool down faster. The reduced temperature leads to lower ventilation and transmission losses. The

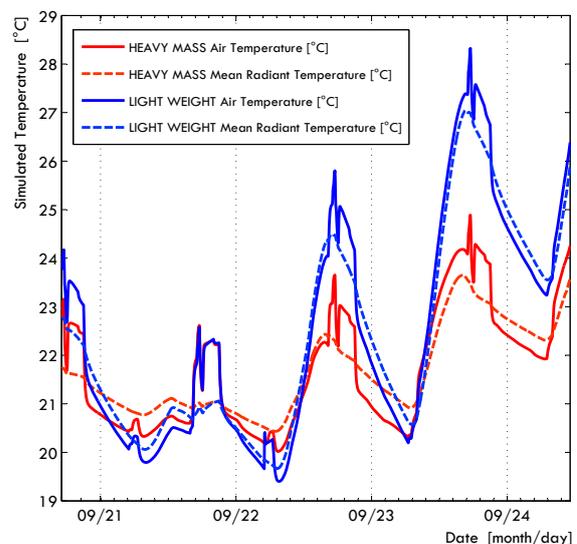


Figure 1 Comparison time series temperature: heavy mass versus lightweight building

building will react faster to changing thermostat setpoints; thus a lightweight building could increase occupant satisfaction and reduce energy demand. Conversely, a higher level of accessible thermal mass helps to capture and store heat gains, e.g. from solar radiation during the day, thus reducing the need for additional heat during evening hours.

Scientific literature shows conflicting opinions on the net impact of the level of thermal inertia in residential buildings in the temperate north European climate, where active cooling is generally not needed. Finney (2004) states that overall, a high inertia house will use at least 10% more energy, dependent on the level of insulation. CIBSE Guide F (CIBSE, 2004) suggests that less thermally massive buildings have shorter preheat periods, and use less heating energy. A UK study concludes that the effect of thermal mass varies with insulation standard, climate and occupancy/gains scenario (Tuohy et al., 2005). Hauser concludes that for a German house, the level of thermal inertia has a negligible influence, with a maximum difference of 1.6% on heating energy demand (Hauser, 1997). Conversely, according to a Swedish study, a heavy mass house requires 20% less heating energy compared to a lightweight alternative (Norén et al., 1999).

This objective of this study is to assess the impact of building thermal mass in Belgian temperate climatic conditions, concerning both energy use and thermal comfort throughout the year. Extra attention has been given to the behaviour of the occupants in order to faithfully mimic real life behaviour.

METHODOLOGY

Dynamic Building Simulation

As stated before, the effect of thermal inertia can not be revealed by a steady state analysis, which solely assesses the thermal transmittances (U-values). Calculating the dynamic behaviour of heat conduction, storage and release processes, requires solving the differential algebraic equations for time dependent heat transport. Literature describes many attempts of analytically or semi-numerically solving these equations, using simplified boundary conditions such as step functions or sinusoidal fluctuating external temperatures. (e.g. Guglielmini et al., 1981 and Tsilingiris, 2006).

These methods become obsolete as several software codes are now capable of simulating a virtual building accurately and swiftly. Unlike the simplified methods, whole building simulation tools are capable of simulating the complex interactions between form and fabric, outside climate, HVAC systems and occupant behaviour. In this study, the freeware EnergyPlus simulation package is deployed (EERE, 2010). Instead of the default conduction transfer functions, the conduction finite difference algorithm is used to

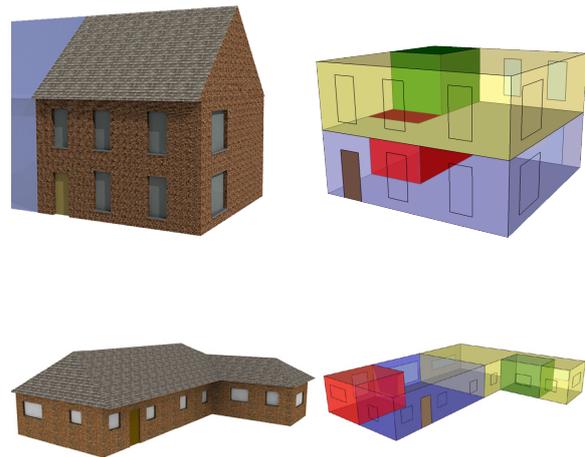


Figure 2 Impression of building typologies and corresponding thermal zones model

have a more accurate calculation of the heat absorb and release processes. All simulations are executed with a 3 minute time step, and span a whole year, for which the weather data are derived from IWEC data set for Brussels, Belgium.

Building geometry

Two different building typologies are considered : a two story semi detached dwelling and a free standing bungalow, each comprising 162 m² floor space. The dwellings are subdivided into 4 thermal zones: cooking zone, living zone, sleeping zone, and bathroom zone. Within one thermal zone the air is supposed to be perfectly mixed and thus uniform in temperature. The HVAC system consists of electric baseboard heaters; there is no active cooling system installed.

Throughout the study different variants of the two basic typologies are generated to explore the impact of glazing percentage, building orientation and level of thermal insulation.

The glazed surface can have major impact on energy demand and thermal comfort. Therefore three distinct glazing configurations are considered (see table 1). Apart from the amount of glazing, the orientation of the building can take four values: 0, 90, 180, 270; for which the front of the house is facing respectively North, East, South and West. It is assumed that the houses are not influenced by external shadows.

Table2 Glazing Configurations

	Glazed Area Semi-detached [m ²]	Glazed Area Free standing [m ²]
Glass 1	49.75	51
Glass 2	34	30.5
Glass 3	21.5	20.5

Different construction systems are considered, to represent different levels of building thermal inertia: a heavy mass building with brick cavity walls, masonry internal partitions and concrete floor plates versus a lightweight building with wood stud walls and wooden floors. Additionally a medium weight structure is considered, consisting of external wood stud walls and internal brick and concrete partitions. The thermal behaviour of the wood stud walls is modelled according to the equivalent wall method (Kossecka et al., 1997). The thermal mass from furnishing is neglected.

Different levels of thermal insulation are considered: K70, K45, K35 and K20. The names refer to K-level, a concept in Belgian energy standards, which is a measure of global insulation level of a building. K45 is the present legal maximum. The U-values corresponding to a specific K-level are identical for heavy weight and low weight constructions (see table 2). A steady state analysis would thus yield identical heating energy demands.

Occupant behaviour

While software tools have made great progress in the simulation of physical processes and HVAC systems, less attention has been given to the behaviour of building occupants. For the latter they have generally relied on fixed profiles of typical occupant presence and associated implications of their presence (Page J., 2007). This may be sufficient for most cases with fairly predictable usage patterns, such as encountered in most offices and schools. House occupants on the contrary show a highly unpredictable behaviour. They change activities throughout the day: sleeping, cooking, go out to work, etc. With these different activities corresponds a different level of internal heat gain, different room occupancy, etc. Furthermore, house inhabitants have many ways to react to unfavorable thermal conditions. Unlike most office workers, they can operate room thermostat control, change their clothing, open or close a window, etc.

In order to represent this real life conditions most faithfully, Matlab scripting language has been used to create a dedicated stochastic model of occupant behavior for this study. This model creates unique occupant behavior schedules for each day of the year with a resolution of 1 minute. The schedules represent the behavior of a family of two working parents and

two school children. The activities depend on the type of day (working day, vacation leave, weekend, etc.) and the type of person (e.g. kids may go out to play, father may be preparing dinner). Poisson distributions are used to define duration of activities, and the starting time is distributed normally around its mean value.

The level of internal heat gains has an important effect on the heating demand. Therefore, the energy use associated with some of the activities (e.g. food preparation) is set based on statistical data representing the annual energy use of household equipment in Belgium (Couder et al., 2008).

For each of the 4 thermal zones a heating thermostat schedule with setback during night and working hours has been defined. This setting can be overruled if a person wakes up or comes home earlier, or if all occupants leave the house for a period of more than two hours. Additionally, the room thermostat of the bedrooms can be raised temporarily when someone does schoolwork in this room. In order to estimate the power consumption of artificial light, the time of sunrise and sunset is calculated. Lights are assumed to be on if the azimuth of the sun is lower than 10 degrees and people are present and awake in one of the rooms composing the zone.

The ventilation rate is set to 50% of the installed capacity according to Belgian standard NBN D50-001. The low energy variants K35 and K20 are assumed to be equipped with mechanical ventilation heat recovery. The ventilation rates are divided by 5 to simulate the heat recovery efficiency of 80%. The air exchange between the zones is modeled by a fixed cross ventilation rate.

Window opening

The dwelling has no air cooling equipment installed. To prevent overheating, people can increase ventilation by opening windows. If present, heat recovery is automatically switched off if the indoor air temperature exceeds 25°C. EnergyPlus requires a rigid schedule of hvac and occupant behavior before starting the calculation. To simulate the opening of windows and heat recovery bypass, the simulation is executed in an iterative way. The occupants decide to open the windows manually if the indoor temperature is too high. When everybody leaves the house, the windows remain closed. Before going to bed, the occupant can decide to tilt the window. If so, it

Table2 U-values corresponding to global insulation levels

Level of thermal insulation	Wall U-with film [W/m ² K]	Floor U-with film [W/m ² K]	Roof U-with film [W/m ² K]	Glas U-with film [W/m ² K]	Glas SHGC [-]
K70	0.484	0.822	0.490	2.67	0.703
K45	0.373	0.482	0.345	1.40	0.568
K35	0.203	0.341	0.217	1.16	0.488
K20	0.152	0.203	0.139	0.81	0.461

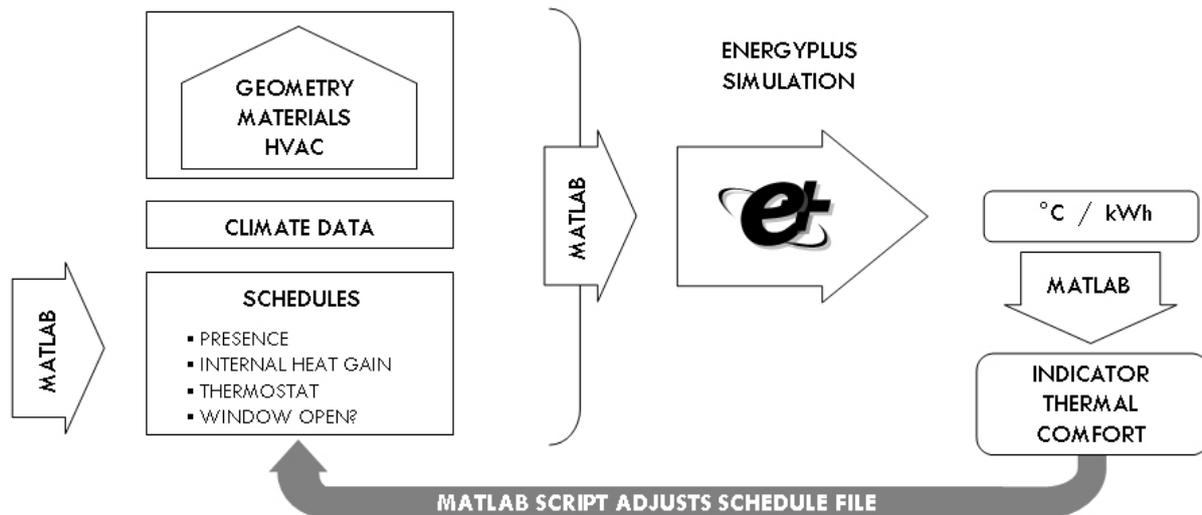


Figure 3 Workflow iterative simulation process

remains in the same position till the next morning. The indoor air temperatures are obtained by executing an intermediate simulation of the building. This leads to an adapted schedule file, in which an open window is mimicked by an increased ventilation rate.

Discomfort Indicator

Energy demand cannot be the only criterion to evaluate a building variant, as the first and foremost function of a dwelling is the creation of a comfortable indoor environment. We are concerned about the human thermal comfort, which depends on characteristics of the person (clothing, metabolism,...) and characteristics of the environment, whereof air temperature and radiant temperature of the surroundings are the most important. As stated before, occupant behavior is far from steady state in dwellings. The desired temperatures depend on the room and the activities, and occupant can react to the thermal environment by changing clothes, operating the thermostat controller, etc. Therefore it is neither feasible nor realistic to evaluate thermal comfort in these simulations by detailed methods like the Fanger PPD/PMV model. Instead, the thermostat temperatures which the occupant has defined are assumed to be sufficient conditions to create a comfortable indoor environment. The level of thermal inertia influences indirectly surface temperature of walls and floors, which in turn affects thermal comfort. In order not to bias the simulation results, the zone heating is controlled by an operative temperature setpoint. The air temperature setpoint fluctuates so that the minimum operative temperature - the average of the zone mean air temperature and the surface weighted mean radiant temperature- is the same in all building variants.

The thermal comfort of the building variants examined in the study is evaluated by a custom created discomfort indicator. A higher number

represents less favourable thermal conditions. The discomfort indicator consists of a part which measures overheating burden, and a part which measures cold discomfort because of temperatures below the heating setpoint of a zone. It is assumed that only zones which are occupied contribute to the discomfort indicator, and the severity of discomfort depends on the number of people subject to it.

The indicator of discomfort (1) counts the number of hours a zone is overheated or too cold (t_s is the number of simulation timesteps per hour), times the number of people present in the zone $n_{\text{people},z}$, times the temperature excess of the zone operative temperature $T_{\text{OP},z}$ above the limit of 26°C , respectively under the heating thermostat setpoint.

Discomfort indicator =

$$\sum_{\text{timesteps}} \sum_{\text{zones}} \max(0, (T_{\text{OP},z} - 26^\circ\text{C})) \cdot n_{\text{people},z} \cdot t_s^{-1} + \sum_{\text{timesteps}} \sum_{\text{zones}} \max(0, (T_{\text{SETPOINT}} - T_{\text{OP},z})) \cdot n_{\text{people},z} \cdot t_s^{-1} \quad (1)$$

Simulation Workflow

The input for the EnergyPlus simulation engine consists of .idf files which describe the geometry, schedules, HVAC installations, etc. These .idf files of the numerous dwelling variants are automatically generated using Matlab scripts which select all possible combinations of the parameters.

Native EnergyPlus only uses one processor. In order to speed up the simulation process, the Matlab Parallel Computing Toolbox is used to create multiple instances of the EnergyPlus simulator, and run up to eight simulations in parallel.

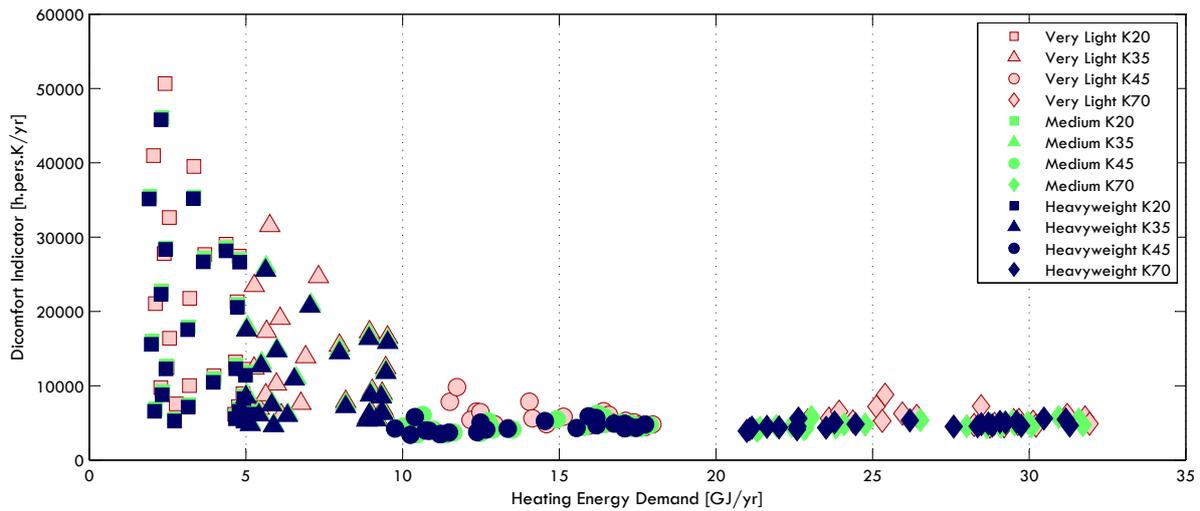


Figure 4 Heating energy demand and discomfort indicator of dwellings with detailed stochastic user behaviour model and window opening algorithm

RESULTS

Insulation versus thermal inertia

Figure 4 presents the simulation results of the 288 house variants, both semi-detached and free standing. It is clear that the annual heating energy demand is mainly governed by the level of thermal insulation of a building variant. The small energy demand of K35 and K20 variants is partly due to the heat recovery system. The average level of discomfort is higher for the lightweight buildings than for heavy weight constructions. However, thermal inertia on its own does not define the level of discomfort. Many lightweight buildings have a lower level of discomfort compared to heavyweight dwellings with less favorable glazing or orientation.

Behaviour models

Figure 5 shows the performance of the same building variants, but with a less detailed model of user behaviour. The user behaviour in figure 5 consists

of a deterministic schedule which describes a typical workday and a typical weekend day. Energy use of lights, appliances, etc. is based on the average of the detailed stochastic schedule. A window opening algorithm is not included. The discomfort levels are twice as high compared to the simulation results in figure 4. This stresses the importance of the level of detail applied when modelling reliable user behaviour.

Although the discomfort indicator had dropped by more than 50% by operating windows and heat recovery bypass, the level of discomfort remains high. Figure 6 shows the potential of using sun screens to diminish the summer overheating risk. Every window is equipped with a sun screen, and these are lowered automatically if the indoor air temperature in a zone raises too high. The overheating risk is reduced dramatically, and the energy demand raises a little bit. The correlation between discomfort indicator and level of thermal insulation is much smaller compared to figure 4 and figure 5.

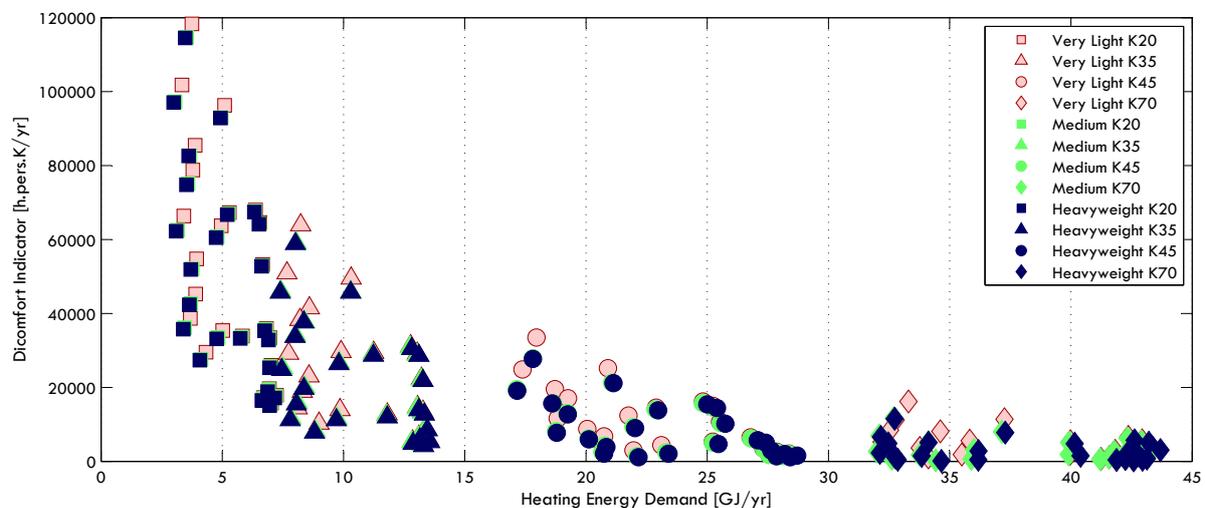


Figure 5 Heating energy demand and discomfort indicator of dwellings with deterministic user behaviour

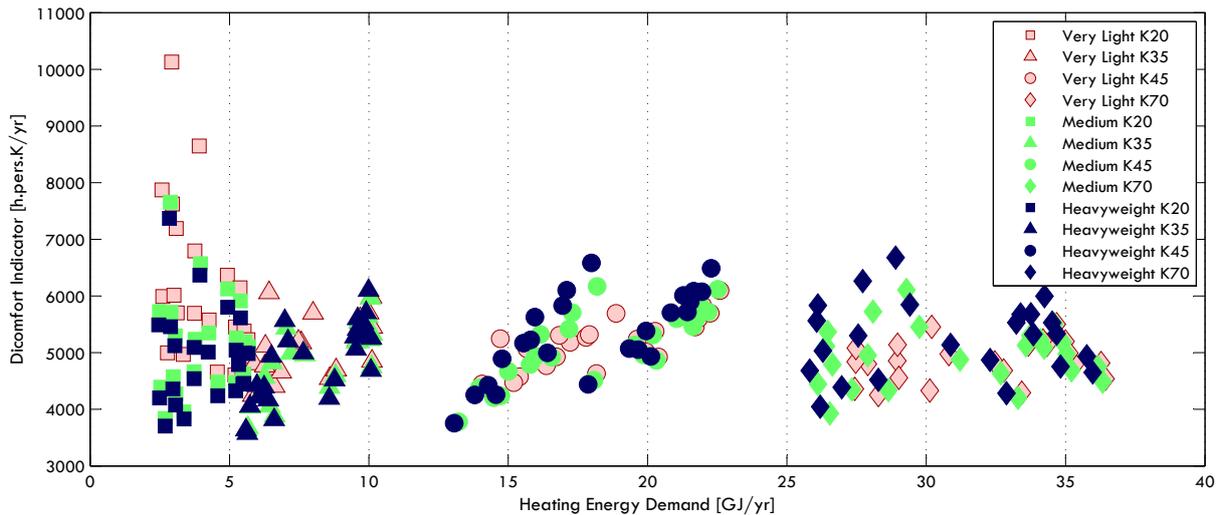


Figure 6 Heating energy demand and discomfort indicator of dwellings with stochastic user behaviour and automatic sun shading devices

Finally a very basic schedule reduces all user behavior and hvac setpoints to one average value, steady throughout the year, and describes the house as one thermal zone instead of four.

The values in table 3 denote the change in heating energy demand and discomfort indicator of lightweight buildings relative to their identical massive counterpart. The values in *italic* denote the change of medium weight versus massive constructions. The values represent the average augmentation for both typologies, the four main building orientations and three glazing configurations.

On average, the heating energy use rises with 4.5% if a massive building is replaced by its lightweight counterpart, and the discomfort augments with 20.4%, both assuming the most realistic stochastic schedule with window opening capabilities. Contrary to the simplified basic and deterministic schedules, the detailed stochastic schedule indicates that the performance of houses with lightweight outer skin and heavy internal partitions does not differ greatly from the performance of heavy weight houses. This shows that a moderate amount of thermal mass suffices to

make the building profit from the ‘thermal flywheel effect’.

The rise in energy use when applying lighter constructions is consistent for all four considered occupancy schedules, except for the simplified deterministic schedule with K45 and K70 insulation. The rise in discomfort is more pronounced than the augmentation of the energy use, with the exception of the less insulated K45 and K70 variants with solar shading.

Overall, the deterministic schedule is not able to make reliable predictions on energy demand and discomfort, compared to the results of the more realistic stochastic schedule.

Glass and orientation

Figure 7 and 8 show the simulation results of 72 variants of the K45 dwellings. Overall, the spread in discomfort values is far greater than the spread in energy demand. Every heavy weight variant performs better on both criteria than its lightweight counterpart. Again, the results of the medium heavy buildings don’t differ much from the heavy weight buildings. For this

Table 3 The impact of thermal mass for different occupancy models

	Detailed stochastic schedule with window opening		Detailed stochastic schedule with sun shading		Deterministic schedule		Basic schedule, 1 zone	
	Energy [GJ/yr]	Discomfort [h.pers.K./yr]	Energy [GJ/yr]	Discomfort [h.pers.K./yr]	Energy [GJ/yr]	Discomfort [h.pers.K./yr]	Energy [GJ/yr]	Discomfort [h.pers.K./yr]
K20	2.3%	18.0%	0.8%	22.4%	4.1%	4.0%	2.2%	1.2%
	<i>0.5%</i>	<i>3.3%</i>	<i>0.3%</i>	<i>4.1%</i>	<i>1.0%</i>	<i>1.0%</i>	<i>1.7%</i>	<i>0.9%</i>
K35	2.2%	19.9%	2.7%	7.3%	1.1%	12.3%	1.0%	4.8%
	<i>0.3%</i>	<i>3.0%</i>	<i>0.5%</i>	<i>0.0%</i>	<i>-0.1%</i>	<i>3.3%</i>	<i>0.7%</i>	<i>3.9%</i>
K45	7.8%	26.2%	3.6%	-0.9%	-0.6%	40.0%	0.6%	17.6%
	<i>1.5%</i>	<i>1.9%</i>	<i>1.1%</i>	<i>-3.3%</i>	<i>-0.5%</i>	<i>9.8%</i>	<i>0.2%</i>	<i>15.2%</i>
K70	5.7%	17.5%	3.6%	-6.3%	-0.6%	114.8%	1.0%	60.6%
	<i>1.3%</i>	<i>-0.2%</i>	<i>1.2%</i>	<i>-5.5%</i>	<i>-0.8%</i>	<i>27.6%</i>	<i>0.6%</i>	<i>54.4%</i>

note: Positive values denote an increase in energy demand or discomfort if a heavy weight building is changed to a light weight timber structure. The values in *italic* refer to a change from heavy weight to medium weight constructions.

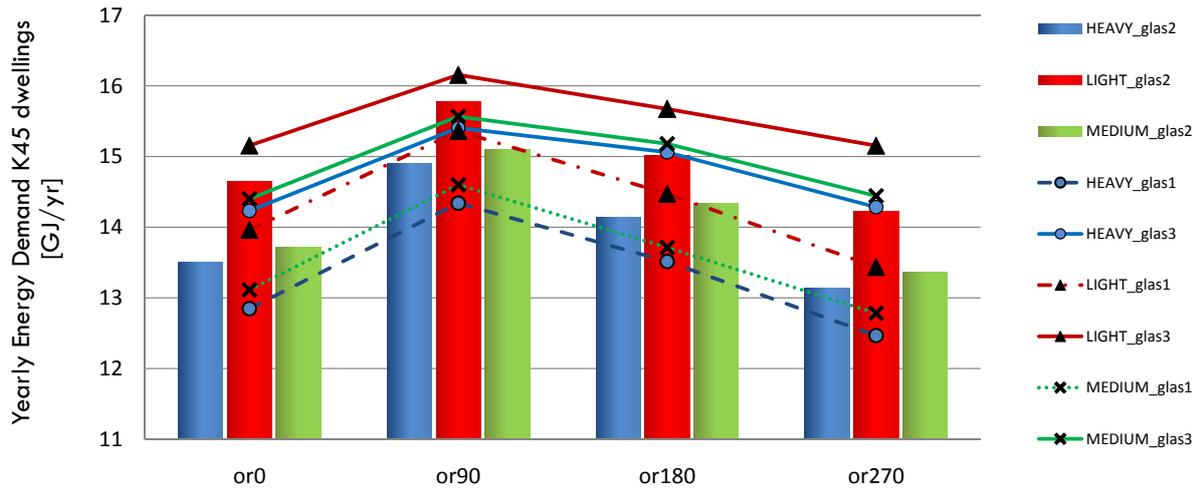


Figure 7 Heating energy demand of K45 dwelling for different orientations and glazing configurations

particular building, orientation 270 yields the best results. A higher glazing percentage yields to lower energy demand: the extra solar heatgains outweigh the increased transmission losses. As expected, the higher gains lead to a higher discomfort indicator due to summer overheating. The decision on the optimal amount of glazing will thus depend on the relative importance of the energy and comfort criteria.

When optimizing the performance of a building design, the amount of glazing can not be treated separate from the building orientation. For instance, increased glazing (glass 1) generally yields a lower heating energy demand, but buildings with low glazing amount and orientation 0 perform better on both criteria compared to buildings with increased glazing and orientation 90. The relative impact of changing thermal mass is fairly constant for the 3 glazing configurations. Comparing nominal change

of the discomfort indicator indicates that thermal mass is most needed for variants with higher glazing percentages.

CONCLUSION

Dynamic simulations of different dwelling variants in Belgian climatic conditions show the influence of building thermal mass on heating energy demand and thermal comfort. On average, a woodframe house demands 4.5% more heating energy compared to a heavy weight brick and concrete structure. This effect is very small compared to the impact of the level of thermal insulation.

The impact of thermal mass on discomfort is more pronounced, with an average 20.4% increase for lightweight buildings. A combination of lightweight outer skin, and heavy weight internal partitions performs much like a heavy weight building.

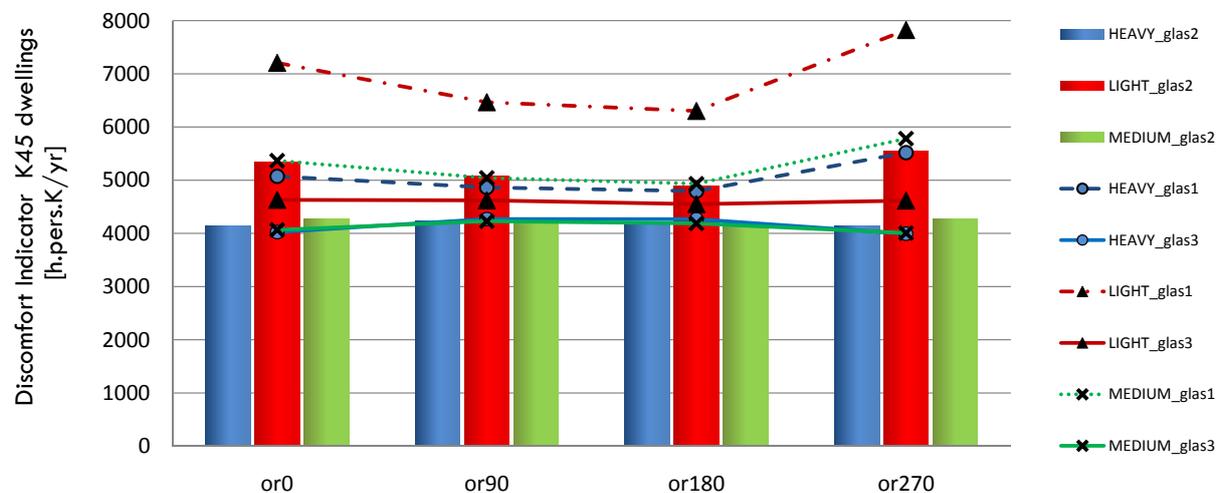


Figure 8 Discomfort indicator of K45 dwelling for different orientations and glazing configurations

Thermal inertia on its own does not define the level of discomfort. Many heavy weight design alternatives have a higher level of discomfort compared to light weight buildings with less glazing or a more favorable building orientation.

In order to obtain more reliable simulation results, the quality of the model of occupant behaviour proved to be very important. User interactions such as opening windows or operating sun shading have a greater effect on thermal comfort than the level of thermal inertia.

Further research will focus on the incorporation of sun shading devices and a more detailed model to incorporate inertia of the heating equipment.

ACKNOWLEDGEMENT

The financial support provided by the University of Antwerp RIOFI fund is gratefully acknowledged.

REFERENCES

- CIBSE. 2004. Guide F. Section 4.2.2
- Couder, J, and Verbruggen, A. 2008. Uitbreiding van de tool SAVER-LEAP voor scenario-analyses voor de huishoudens (in Dutch), Onderzoeksrapport Mira Vlaanderen
- EERE, US Department of Energy Efficiency and Renewable Energy. 2010. Release Notes EnergyPlus v5.0.0,build 31, www.energyplus.gov
- Finney, D. 2004. Buildings for a Future, Green Building Press, Vol. 13 no. 4.
- Guglielmini, G, Magrini, U and Nannei, E. 1981. The Influence of the Thermal Inertia of Building Structures on Comfort and Energy Consumption, Journal of building physics, 5(2), pp.59-72.
- Hauser, G, and Otto, F. 1997. Wärmespeicherfähigkeit und Jahresheizwärmebedarf. Mikado 4, pp18-22
- Kossecka, E. and Kosny, J. 1997. Equivalent Wall as a Dynamic Model of a Complex Thermal Structure, Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes, vol. 20
- Norén, A, Akander, J, Isfält, E, and Söderström, O. 1999. The Effect of Thermal Inertia on Energy Requirement in a Swedish Building - Results Obtained with Three Calculation Models, International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings, Vol. 1.
- Page, J. 2007. Simulating Occupant Presence and Behaviour in Buildings, phd thesis, Lausanne
- Tsilingiris, P.T. 2006. Parametric space distribution effects of wall heat capacity and thermal resistance on the dynamic thermal behavior of walls and structures, Energy and Buildings, 38(10), pp 1200-1211

Tuohy, P, McElroy, L and Johnstone, C. 2005. Thermal Mass, Insulation and Ventilation in Sustainable Housing - an Investigation across Climate and Occupancy, Proceedings of the 9th IBPSA conference, Montreal, pp.1253-1260.

SIMULATIONS ON SOLAR-ASSISTED HEAT PUMP HEATING SYSTEMS

Jörn Ruschenburg, Sebastian Herkel, Hans-Martin Henning
 Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg, Germany

Contact: joern.ruschenburg@ise.fraunhofer.de

ABSTRACT

Seit einigen Jahren finden sich verstärkt Heizungssysteme auf dem europäischen Markt, die sich durch die Kombination von Solarthermie und Wärmepumpe auszeichnen. Um wichtige Erkenntnisse bezüglich dieser Systeme zu gewinnen, wurden bereits öfters Simulationsstudien durchgeführt und veröffentlicht. Der vorliegende Beitrag behandelt hauptsächlich Fragestellungen zur Simulationsmethodik. Es wird insbesondere untersucht, welchen Einfluss das Ignorieren bzw. die Berücksichtigung von Direktverdampfung oder von Hilfsenergie hat. Dazu werden ein nicht-solares Referenz- und drei solar-unterstützte Wärmepumpensysteme simuliert, die ein Einfamilienhaus mit Raumwärme und Warmwasser versorgen. Die Ergebnisse werden stets vergleichend dargestellt und interpretiert.

During the last years, more and more heating systems can be found on the European market that are characterised by the combination of heat pumps and solar-thermal collectors. To analyse and to assess these systems, simulation studies have frequently been carried out. This paper focusses mainly on questions regarding the simulation methodology. In particular, it is examined how much influence can be expected from ignoring or respecting the influence of direct evaporation or auxiliary energy, respectively. This analysis is done by simulating a non-solar reference system and three solar-assisted heat pump systems, all meant to provide domestic hot water and space heating for a single-family house. The results are presented and interpreted comparatively.

INTRODUCTION

Background and Objective

In modern domestic heat pump systems, solar collectors are frequently incorporated for contributing to *domestic hot water* (DHW) generation or space heating. Beyond this well-established approach, today's market also features alternative systems in which a genuine interaction between solar collector and heat pump is intended.

Because renewable energies are integrated more intensely in this way, these systems are meant to achieve higher economical and ecological system efficiencies.

First approaches regarding such systems were carried out during the late 70s of the last century. At that time, the high complexity regarding hydraulics and control strategies inhibited any breakthrough, and the idea of solar-thermally assisted heat pumps vanished soon as did heat pump heating systems in general. During the last years, the idea was revitalised and heating systems combining heat pumps with solar-thermal technology entered the market in growing numbers. Approaches to classify manifold systems were conducted for example by [Henning, Miara 2009] and [Frank 2010].

Because combined solar heat pump systems have just recently passed the verge of being introduced to the market, no widely-accepted indicator has been developed yet to quantify the benefits of this combination. While there are standards to assess single heat pumps or collectors, no standards apply to systems whose performances depend strongly on the interaction and the implemented control strategy.

Simulations are frequently applied to analyse solar-assisted heat pumps or to carry out parameter variations, e.g. by [Citherlet et al. 2008], [Trinkl et al. 2009] or within the on-going Task 44 of the IEA Solar Heating and Cooling Programme, cf. [Hadorn 2010].

This paper focusses on methodology-oriented topics. The first objective refers to direct evaporation of heat pumps. Generally, direct-evaporating air-source heat pumps cannot be incorporated in systems using solar collectors as additional source. A brine that allows to transport energy from either the collector or the air source to the evaporator is used instead. However, this extra loop – or the additional heat exchanger, respectively – worsen the temperature level of the source and thus the efficiency of the heat pump. Therefore, an objective of this paper is to find out whether this effect is crucial to the overall

efficiency or whether it can safely be ignored in simulations and planning.

The second objective is to set the benefits of solar-assisted heat pumps in relation to the auxiliary energy. As auxiliary energy we define the electricity consumed by components of the heating system apart from the heat pump itself, i.e. mainly circulation pumps. The question is whether the consumption, which depends on the system configuration, has an influence when several solar-assisted systems are compared.

Thirdly and finally, the DHW generation will be simulated in two different tank storage configurations. Again, the objective is to find out how much the results are influenced when systems are simulated whose efficiencies strongly depend on temperature levels.

Regarding the source of the heat pump, this paper is restricted to air. The reason is that, on the one hand, such systems are gaining higher and higher market share in Germany, while on the other hand, such sources are in most cases colder and thus less efficient than for instance ground sources. So, regarding the interaction with solar-thermal collectors, the highest potential is expected here.

Examined Systems

The systems analysed in this paper were labelled from I till IV. The first one does not incorporate any solar collectors and acts as a reference system, see Figure 1.

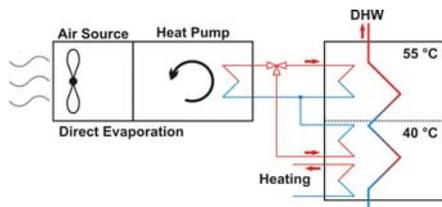


Figure 1: System type I

The remaining three systems are shown with growing complexity, starting with Figure 2, a configuration that is offered by many established companies on the German market.

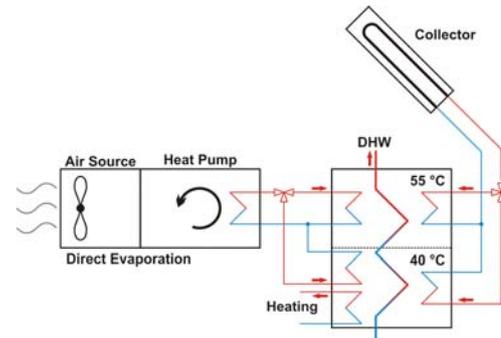


Figure 2: System type II

System type III is designed similarly, but an important difference is the introduction of a low-temperature buffer storage that acts as an alternative source for the heat pump, see Figure 3. Unfortunately, the necessary brine loop prevents direct evaporation as it was explained above. It is not disputed that such a system could theoretically be built with direct evaporation, i.e. the refrigerant flowing both through the air source and the buffer storage, but technical reasons are expected to avert this.

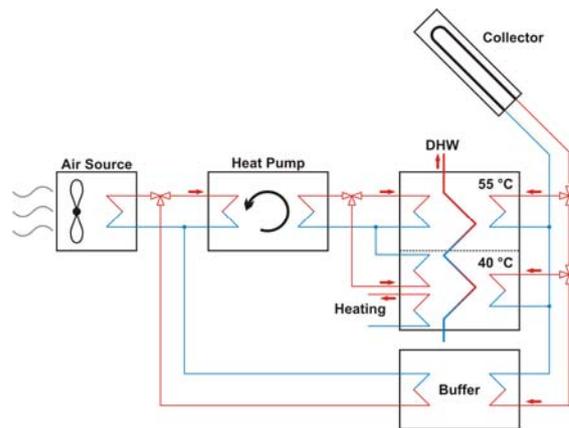


Figure 3: System type III

Figure 4 shows the last system, which is identical to type III regarding control and design except that the low-temperature does not contain water but a *phase-change material* (PCM), which is specified below.

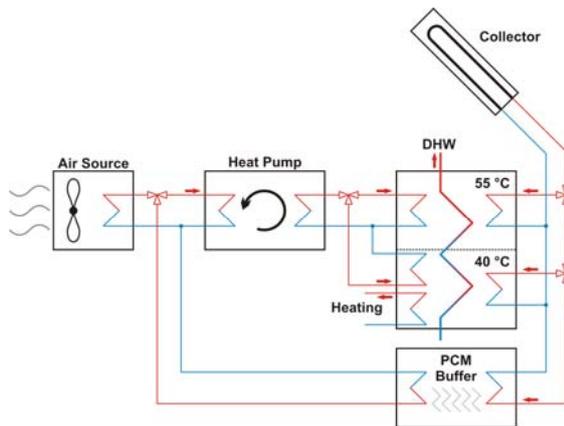


Figure 4: System type IV

Methodology

For all systems, results will first be presented for idealised boundary conditions, i.e. without storage heat losses, with ideal heat transfer and without any auxiliary electricity consumption.

As the figures above show, no direct evaporation is applied in systems III and IV so that the low-temperature buffer storage can be linked to the evaporator of the heat pump. The additional heat exchanger required for this configuration is modelled with a constant efficiency of 85 %, which lowers the source temperature about 1 K. Afterwards, there will be a comparison with these systems resimulated as if direct evaporation was applied, i.e. with the heat exchanger's efficiency set to 100 %.

To quantify the relation between solar gains and additional auxiliary energy required for these gains, all systems are resimulated. This time, a 60 W pump for the solar circuit is taken into account as well as pumps for the source-side circuit and the building-side circuit of the heat pump, each 40 W. Finally, the air-source fan is modelled to consume 80 W while operating.

The main indicator used for comparing the different systems is the *seasonal performance factor* (SPF) on a yearly basis. It is defined as the ratio between the heat delivered for space heating plus DHW during one year and the electrical energy consumed for heat pump operation (SPF_{HP}). If solar-thermal assistance is applied, it is taken into account by the system efficiency SPF_{System} . The $SPF_{System,aux}$ is used to include the auxiliary electricity consumption as defined above.

Within the scope of this paper, no cost analyses were carried out, neither for installations nor for operation. The reason is – as it was explained above – that this paper is intended mainly to provide helpful data regarding methodology, i.e. to discuss the importance of some simulation details.

The control algorithm for the solar collector is designed that its priority lies on DHW preparation. Contributing to space heating is the second priority. For system III and IV, the third priority is to heat the low-temperature buffer storage which acts as alternative source for the heat pump. This order of the priorities is derived from exergetic reasons. The theoretical background of heat pumps proves that they are inefficient when providing high-temperature energy, especially DHW. So, as long as the collector is capable, it is most sensible to use it for DHW preparation, while the low-temperature buffer is wisely chosen as last priority. Conditions to switch the collector's operational mode are based on the irradiation on the collector and the temperature difference between the respective storage and ambient air.

SIMULATIONS

Software

Within this paper, all simulations are carried out by using *IDA Indoor Climate and Energy* (IDA ICE) Version 4.0 Build 3.02 [Sahlin et al. 2004], and its equation-based modelling language NMF [Sahlin 1996]. Its similarity towards Modelica allows an easy exchange of models and know how. Furthermore, IDA ICE features a well-proven building model [Crawley et al. 2005] including a climate processor that can be linked to both buildings and collectors.

Unlike most simulation softwares, the length of each time step in IDA ICE is event-controlled, i.e. any time the solver registers a larger change in any variable, a new time step begins. During night times, this can take up to one hour or, during dynamic processes like a storage giving a step response, up to a few seconds. The minimum and maximum time step length can be adjusted in the software settings.

Building and Boundary Conditions

The virtual building depicted for these simulations is a single-family house located in Würzburg, Germany. Its architectural design including sizes, materials and thicknesses of walls and roof, size and properties of windows, air change rate and control of shading devices were taken from [Heimrath 2007]. From this report, which contains a detailed description of reference buildings, data referring to a building named SFH 60 – a single-family house with 60 kWh/m² heating demand – was selected. A similar approach was also chosen by [Citherlet et al. 2008]. Figure 5 shows the three-dimensional appearance and orientation.

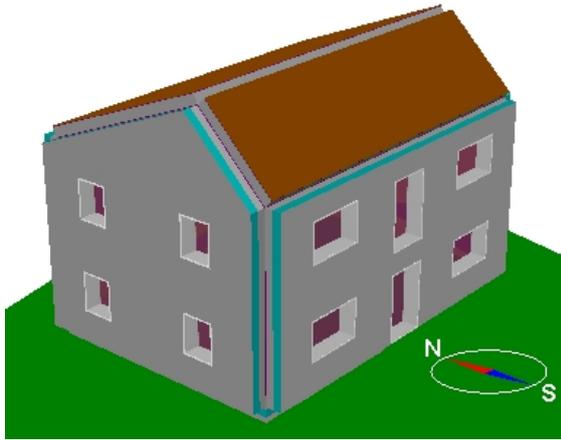


Figure 5: Appearance of SFH 60 in IDA ICE

In the following, the most important parameters of the simulated building are compiled.

- Location: Würzburg, Germany
- Weather data: Test Reference Year 13
- Living space: 140 m²
- Minimum room temperature: 20±0.5 °C, unreduced during night
- Heating demand: 8400 kWh/a, equivalent to 60 kWh/m²a
- DHW consumption: 2480 kWh/a at, equivalent to 17.7 kWh/m²a
- DHW storage temperature: 55±0.5 °C¹
- Average occupancy: 2.4 persons, 100 W each, whereof 40 W as latent heat
- Average internal electricity loads: 200 W, equivalent to 12.5 kWh/m²a
- Air change rate: 0.4 1/h without heat recovery

Figure 6 shows variations of occupancy, internal loads and DHW consumption, which are modelled identically for every day of the year. The average values are identical to the definitions of [Heimrath 2007], whereas the variation was simplified.

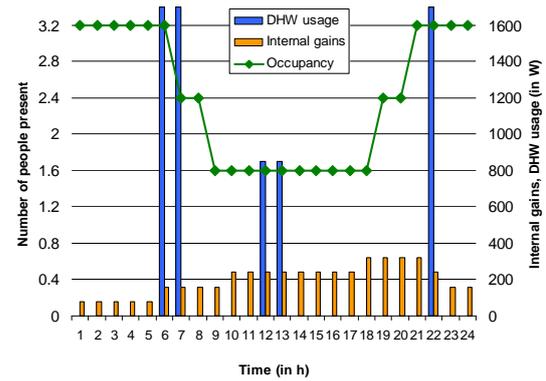


Figure 6: Daily profile of occupancy, internal electricity gains and DHW usage

The two floors of the building are simulated as one zone, whose IDA ICE plan is finally presented in Figure 7.

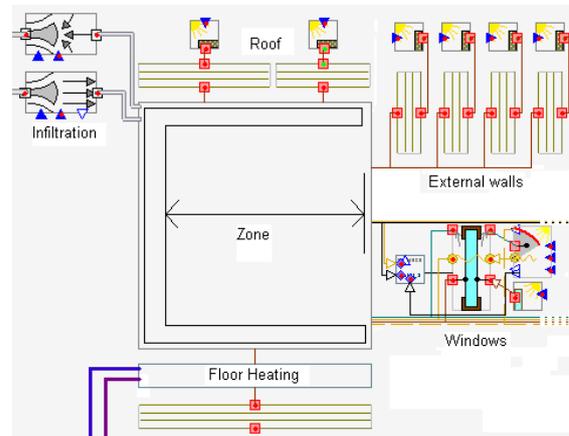


Figure 7: Plan of SFH 60 in IDA ICE

Heating System Modelling

The main components of the heating system to be modelled, namely solar collector, heat pump and storage, are described in the following.

The used collector is modelled according to [Isakson, Eriksson 1993], a model originally developed for TRNSYS and later adapted for IDA ICE. Its parameters are: 6 m² aperture area, tilted 40°, oriented towards south, $\eta_0 = 0.8$, $a_1 = 3.5 \text{ W/m}^2\text{K}$, $a_2 = 0.02 \text{ W/m}^2\text{K}^2$.

The fictive air-source heat pump is modelled according to two characteristic lines that are depicted in Figure 8. It is designed for monovalent operation and thus features a heating power of $P_{\text{Heating}} = 8 \text{ kW}$ at A7/W35, while the respective COP is 4.2.

¹ The legionella topic is ignored for simplicity's sake.

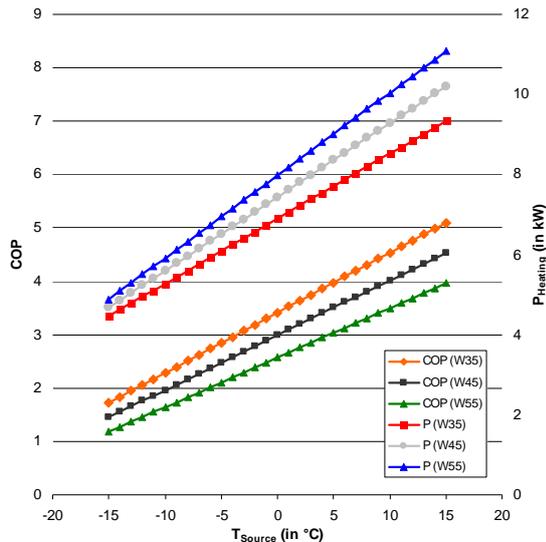


Figure 8: Heat pump characteristics

The storage provides DHW and space heating while it is fed by the heat pump and, if applicable, the solar collector as shown in Figure 2. In system III, it comprises three nodes, namely 300 l for DHW, 400 l for heating, and 300 l for low-temperature buffering.

The PCM buffer storage used in system IV is modelled with the phase change enthalpy of water, distributed by means of a differentiable function within a range of 5 K. The fusion temperature is defined as 7.5 °C and the heat transfer is modelled to be ideal under all conditions.

RESULTS AND DISCUSSION

Without Auxiliary Energy

For the simulations ignoring auxiliary energy consumed by circulation pumps, Table 1 shows the results. All values are given with three digits. Considering the variety of estimated and sensitive boundary conditions, this should not be misunderstood. Such an accuracy can of course not exist in absolute measures, but the values to be compared are partly so similar to each other that an accuracy in relative terms is indispensable to see the effects.

Table 1: Results ignoring auxiliary energy

SYSTEM	I	II	III	IV
SPF _{HP}	2.73	2.66	2.61	2.64
SPF _{System}	2.73	3.15	3.09	3.12

For system I, the two values are identical because there is no collector and the heat pump is the only component of the system taken into account here.

In comparison, the system efficiency of system II is significantly higher because about 1800 kWh come

as solar contribution, which is equivalent to a solar fraction of 16.3 %.

The direct solar contribution exists as well for system III, illustrated in Figure 9 as an orange bar. The figure shows the energy balance of the heating system. First divided into the useful energies, second according to the plants that supplied the energy, and third the energy balance of the heat pump in detail. It can be seen as yellow bar that the collector feeds 522 kWh to the low-temperature buffer tank. Nevertheless, the system efficiency remains unchanged.

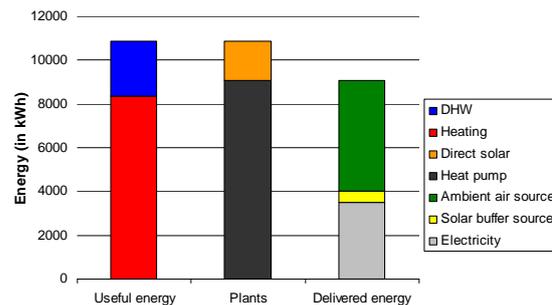


Figure 9: Annual energy balance of system type III

Detailed Analysis

The reason is that direct evaporation is no longer applied. The details can be explained by interpreting Figure 10 where some results from an April day can be seen. No DHW is prepared here, which makes the explanation and interpretation easier while it has no influence on the key message.

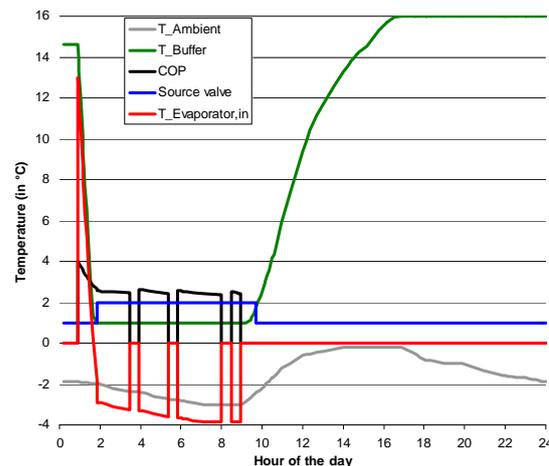


Figure 10: Dynamic effects for system type III

The ambient air temperature is below 0 °C for the whole day. At the beginning of the day, the buffer storage contains solar energy from the previous day. The selected source is therefore the buffer storage, which is indicated by position 1 of the valve that selects the source. The heat pump

operation starts about 1 a.m. as the design room temperature has to be maintained day and night. Because the evaporator inlet temperature is close to the rather high buffer temperature, the *coefficient of performance* (COP) reaches a value of 4. When not operating, the COP is shown as 0.

Within less than one hour, the buffer storage temperature drops close to the freezing point, so the air source is selected instead – valve position 2. Immediately, the evaporator inlet temperature is lower than the ambient air temperature, and as a result the COP does not even reach 3. During the next hours, we see the heat pump in intermitting operation.

Around noon the buffer storage is heated up again. Though it was defined above that the collector priority is on direct heating, the specific irradiation on the collector is below 300 W/m^2 – unshown in the figure – which is considered too low for this purpose. No heat pump operation is required for the rest of the day due to irradiation and internal loads. As the buffer storage is heated up again by the end of the day, solar energy is shifted from this day to the next, again to serve as source.

All in all, it can be seen that the usage of the buffer storage has the potential to increase the average efficiency a lot. Unfortunately, it is designed so small that it is “emptied” far too soon. That fact that the air source is used predominantly is already evident from Figure 9. While the advantage of the system is obviously not fully utilised due to an insufficiently dimensioned collector, the disadvantage comes in heavily. Going without direct evaporation means that the evaporator inlet temperature is about 1 K lower than it could be and has been for system I and II. The caused drop in efficiency is small, but accumulated over the year it is no wonder that the $\text{SPF}_{\text{System}}$ of system III is lower compared to system II.

Direct Evaporation

For all systems are designed as if direct evaporation (index DE) is used, Table 2 shows the results. As no auxiliary energy is included, the values are to be compared with those of Table 1. The values of system I and II remain unchanged because direct evaporation is applied anyhow.

Table 2: Simulating direct evaporation

SYSTEM	I	II	III	IV
$\text{SPF}_{\text{HP,DE}}$	2.73	2.66	2.69	2.71
$\text{SPF}_{\text{System,DE}}$	2.73	3.15	3.19	3.21

Regarding system III and IV, some benefits can now be seen. They are marginal when compared to system II, but when compared to Table 1, the $\text{SPF}_{\text{System}}$ of system III increases by exactly 0.1.

These results are insofar important as they clearly show that simulating a system that is sensitive even to a small drop of the source temperature about 1 K can be easily and systematically misleading. In other words, as the complexity of such a system grows, the advantages have to be measured against the disadvantages that are brought.

Phase Change Material

For system IV, 613 kWh are delivered to the PCM buffer tank. This is more compared to system III, but the effects are basically the same. Therefore, no significant increase in the efficiency can be seen.

Auxiliary Energy

As we include the auxiliary energy consumed by pumps and air-source fan, the $\text{SPF}_{\text{System,aux}}$ are lower than the $\text{SPF}_{\text{System}}$ shown in Table 1. This could only be expected. Of greater interest is the fact that the relations between the efficiencies of each specific system type remains the same. So on the whole, the comparisons between the systems efficiencies remain unchanged.

Table 3: Results including auxiliary energy

SYSTEM	I	II	III	IV
$\text{SPF}_{\text{System,aux}}$	2.58	2.96	2.92	2.94

By definition, the SPF_{HP} is not affected by auxiliary energies and thus not shown here.

Tank Storage Configurations

Figure 11 shows two possible configurations of the tank storage. As it was shown before, all simulations presented in this paper so far are carried out in configuration A.

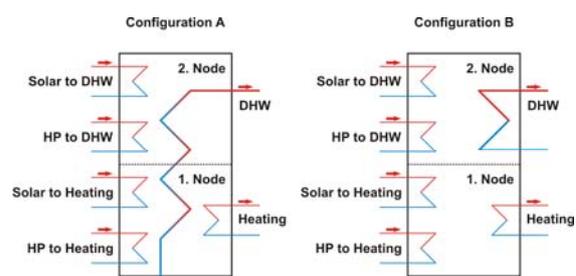


Figure 11: Tank storage configurations

For system II in configuration A, we get an $\text{SPF}_{\text{System}}$ of 3.15, as it is shown in Table 1. The corresponding value for configuration B is 2.92.

This can be explained by means of exergetic reasons, or more descriptively by the fact that a heat pump is always less efficient when the demanded supply-temperature is high. In configuration B, the DHW is completely prepared by means of such high-temperature heat, whereas in

configuration A, it is pre-heated by less “valuable” heat.

Again, it is shown that simulations of systems that are sensitive to temperature levels depend on certain details. Moreover, in simulations of today’s building projects, the heating demand is mostly lower than the 60 kWh/m²a that were applied in this paper, especially when the passive house standard is applied. The comparison between configuration A and B would then be even more extreme due to the fact that the DHW production would dominate.

CONCLUSION

In this paper, four solar-thermally assisted heat pump systems were defined and simulated. The focus of the simulations laid on 3 specific questions regarding the methodology. The results were analysed according to these questions.

The most important finding is that the introduction of a second source might reduce the system efficiency, whereas the opposite is intended. In this case, the second source was a solar-fed buffer storage, and its integration impeded the usage of direct evaporation. So, the average source temperature was lower than in the reference system, in which direct evaporation was applied.

This result is not meant to deny the potential of solar-assisted heat pump systems. Quite the contrary, positive effects of the interaction with the solar collector were shown indeed, but only for a small fraction of operation time. The main reason why the advantages were not able to compensate the disadvantages, much less to provide benefits, was that the collector was weakly dimensioned and thus not able to act as the main source of the heat pump.

Regarding the application of PCM, it is obvious that the system efficiency is in principal similar to a system using water as storage medium instead of PCM. If now the collector area is increased as mentioned above, the relation between these systems’ efficiency can be expected to remain constant. Considering the fact that the PCM storage in this study was defined in a rather ideal way, the positive effects of using PCM seem to be low.

In a next step, the question could be answered whether auxiliary energy needed for the system pumps has to be taken into account. The auxiliary energy had no influence when the efficiencies of the systems were compared among each other. This finding is considered as valid as long as no pump dominates by means of its designed power.

Finally, an alternative configuration of the tank storage was modelled. Though it looked similar to the standard configuration at first glance, the second configuration caused the heat pump to

increase its average supply temperature. This in turn resulted in a significantly lower system efficiency. If now the ratio between DHW and space heating is increased, the drop is expected even to be higher. Like the topic of direct evaporation, it was shown again that a system that is clearly sensitive to temperature levels has to be simulated carefully to get reliable results.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thank Dirk Jacob for advice and support regarding simulations of solar systems in IDA ICE.

The research work conducted for this paper is kindly supported by the Evangelisches Studienwerk e.V. Villigst.

REFERENCES

- Citherlet, S.; Bony, J.; Nguyen, B. 2008: SOL-PAC. Analyse des performances du couplage d’une pompe à chaleur avec une installation solaire thermique pour la rénovation. Rapport final. Yverdon-les-Bains, Switzerland.
- Crawley, D.B.; Hand, J.W.; Kummert, M.; Griffith, B.T. 2005: Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. Washington, DC, USA
- Frank, E. 2010: Systematische Gliederung der Systemkombination von solarthermischen Anlagen und Wärmepumpen. 20. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, Germany
- Hadorn, J.-C. 2010: Solar and heat pump systems – IEA SHC Task 44 & HPP. 20. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, Germany
- Heimrath, R.; Haller, M. 2007: The reference heating system, the template solar system of task 32. A report of IEA solar heating and cooling programme – task 32 ‘advanced storage concepts for solar and low energy buildings’. Graz, Austria.
- Henning, H.-M.; Miara, M. 2009: Kombination Solarthermie und Wärmepumpe – Lösungsansätze, Chancen und Grenzen. 19. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, Germany
- Isakson, P.; Eriksson, L. 1993: Matched flow collector model for simulation and testing. Stockholm, Sweden.
- Sahlin, P. 1996: NMF handbook. An introduction to the neutral model format. Stockholm, Sweden.

Sahlin, P.; Eriksson, L.; Grozman, P.; Johnsson, H.; Shapovalov, A.; Vuolle, M. 2004: Whole-building simulation with symbolic DAE equations and general purpose solvers. In: Building and Environment, Vol. 39

Trinkl, C.; Zörner, W.; Hanby, V. 2009: Simulation study on a domestic solar/heat pump heating system incorporating latent and stratified thermal storage. In: Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 131

PREDICTIVE MODEL-BASED CONTROL OF VENTILATION, LIGHTING, AND SHADING SYSTEMS IN AN OFFICE BUILDING

Matthias Schuss¹, Claus Pröglhöf¹, Kristina Orehounig¹, Sokol Dervishi¹, Mario Müller²,
Heinz Wascher², and Ardeshir Mahdavi¹

¹Department of Building Physics and Building Ecology,
Vienna University of Technology, Austria

² Hans Höllwart - Forschungszentrum für integrales Bauwesen AG,
Stallhofen, Austria

ABSTRACT

This paper reports on ongoing work toward implementing a predictive control approach for buildings systems for ventilation, lighting, and shading. The main objective of this method is the optimized control of multiple devices toward usage of passive cooling and natural lighting. Thereby, control options (various opening positions of windows, shades, etc.) are generated and computationally assessed using a combination of option space navigation via genetic algorithms and numeric simulation.

INTRODUCTION

In the last few years system and energy expenditures for space cooling have dramatically increased, even in central-European climatic zones. This has encouraged the efforts to develop and implement smart (energy-efficient) cooling methods. An intelligent control approach involving all relevant systems and endowed with the capacity of proactive (predictive) control is believed to have the potential to significantly reduce buildings' energy demand. Toward this end, passive cooling, advanced shading control, and increased usage of natural light is essential. Possibilities to use natural ventilation and building controls in existing buildings were presented in previous publications (Mahdavi & Pröglhöf 2004, 2005, and 2006; Mahdavi et al. 2008; Orehounig 2010; Pröglhöf 2010).

This paper further develops a new simulation-based predictive control approach (Mahdavi 2008; Mahdavi et al. 2009) with the capability to facilitate the application of the aforementioned sustainable indoor climate control systems. The core idea behind this approach is the use of numeric building performance simulation applications to predict – ahead of an actual control action – the consequences of multiple control options. Once the options are generated and virtually realized via simulation, they can be evaluated and ranked, thus providing a basis for optimal control decision making.

METHOD

To implement the proposed model-based control strategy a realistic setting is essential. Therefore, we selected two buildings for implementation. This paper focuses on one of these buildings, namely a modern office building ("Fibag") in Stallhofen, Styria, Austria (see Figure 1 to Figure 3). The building has a typical glass and aluminium façade (Figure 1). The primary structure is massive (concrete skeleton, floors, and staircases), but the internal (partition) walls may be described as lightweight.

Two test rooms in this building were selected for experiments. One room was used to test the control approach (see Figure 1 and Figure 3), whereas the second room was used as a reference room. The two test rooms are identical layout-wise and are located in the first and second floor above each other, facing north and east directions. The building is located in a rural, low-density, and low-rise context.



Figure 1. The Fibag Building



Figure 2. The test room

To demonstrate the feasibility of the simulation-based control approach in a multi-system context, sensors and actuators were deployed: The rooms are equipped with programmable room controllers, indoor environmental sensors (Figure 4), as well as actuators for the automated operation of windows (Figure 5) and blinds. Moreover, to monitor local climatic conditions, a weather station (Figure 6) was installed on top of the building.

Table 1 provides a description of all system components. A schema of the test system is illustrated in Figure 4.

Table 1 System components description

SYSTEM COMPONENT	DESCRIPTION
Indoor climate sensors	Compact indoor climate stations measuring air temperature, relative humidity and velocity as well as carbon dioxide and radiance
Outdoor climate sensors	Weather station measuring air temperature, relative humidity, precipitation, global irradiance, wind speed and wind direction.
User action and presence sensor	Presence: PIR - Sensor with settable threshold time Door opening: magnetic contact sensors
Window	Two synchronized sleepless settable drives for each window to control the window opening position continually
Shading device	Single drives with a special gear unit for height and angle positioning
Controllable lighting system	The room controller could set on/off and dimming levels between 10-100% of the total lighting power
Backbone and communication network	IP base communication with access to building data points and data history



Figure 3. Floor plan of the test room



Figure 4. Internal sensor station



Figure 5. Automated Window

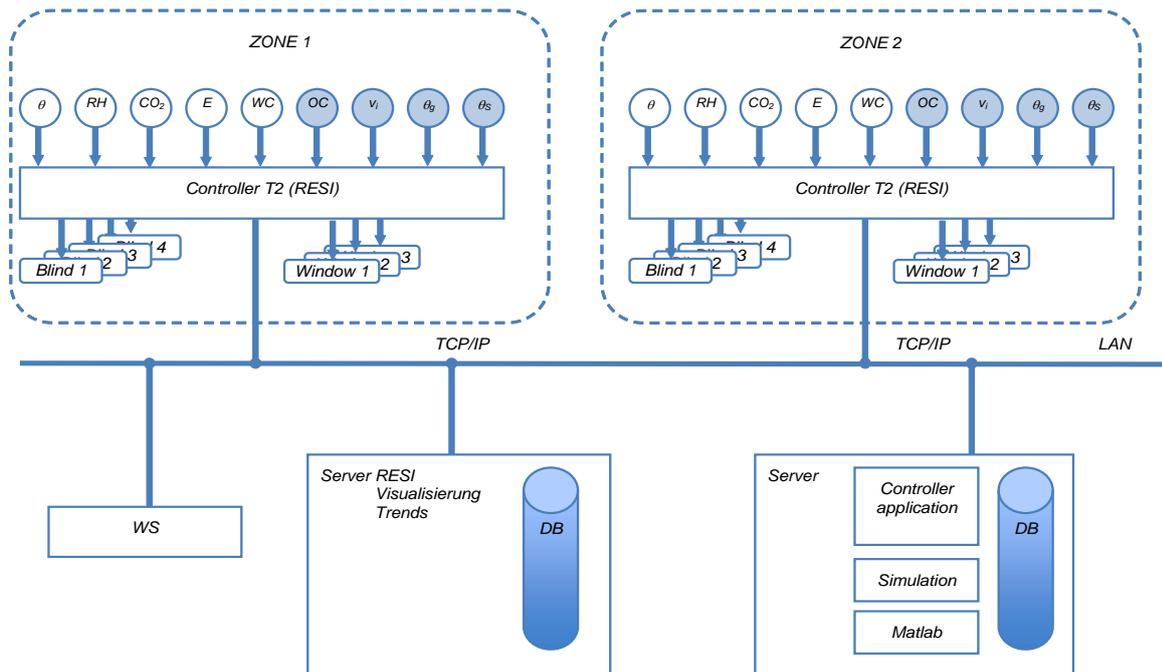


Figure 7. Schema of the test system



Figure 6. Weather station

The aforementioned model-based control approach is being implemented in the test room. Thereby, weather forecast information (Weather.com, 2010) is fed into simulation applications to regularly probe the implications of various control action alternatives in view of desirable indoor-environmental conditions. Thus, the likely optimal course of control action can be identified proactively toward optimization of energy and environmental performance of the building. An essential advantage of the proposed approach is its ability to consider the thermal storage capacity of the building's thermal mass more reliably. In order to better document the performance of the implemented control regime, we will use the second room as a reference room for comparison.

Predictive Control approach

The present paper attempts to further develop the predictive control approach (see Figure 8 and Mahdavi 2008). Instead of the previously applied combination of the greedy search method (combined with stochastic jumps), we now explore the potential of genetic algorithms toward navigation of the control options search space. This modification is necessary, since we would like to be able to generate and evaluate control options on a regular basis (i.e. in short time intervals). Moreover, temporal changes in the position of devices over time (operation schedules) must be considered for each simulation run. This leads to an explosion of the control options (schemes), which could be better tackled via genetic algorithms.

Thereby, weather forecasts (Weather.com 2010) together with expected values required for simulation input (e.g. internal gains) are the starting point for a series of multi-domain simulations (thermal and lighting) based on a genetically produced variation of alternative control states. The control process was implemented in MATLAB (MATLAB 2010) environment. The implementation deploys HAMBBase (van Schijndel 2007) and Radiance (Radiance 2010) as incorporated simulation tools.

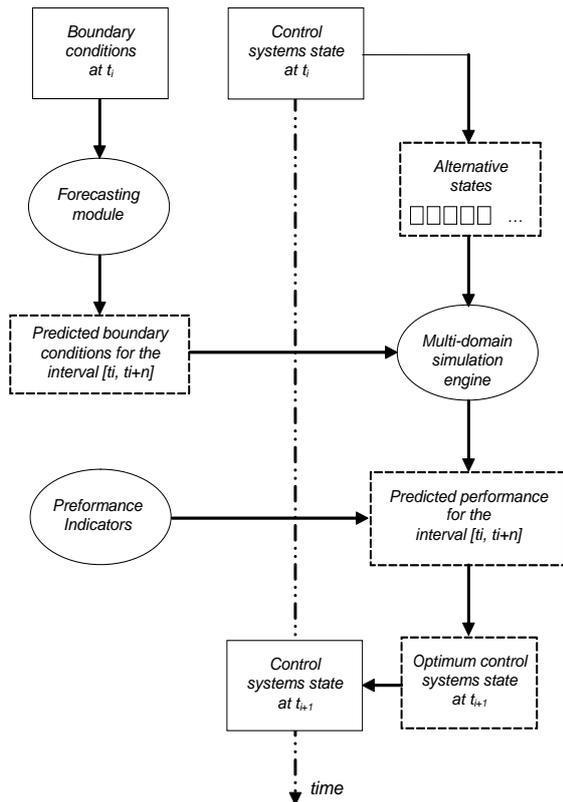


Figure 8. Illustration of the predictive simulation assisted control strategy

These simulation results are the basis for the evaluation process to generate optimum control decisions according to defined performance indicators. This predictive control approach operates in difference to the commonly used reactive feedback based standard control methods used in building systems control. Instead of using differences of the set values and actual values, this approach optimizes the system operation in a holistic way.

Alternative States

To feed the predictive control method with alternative operation states, the relevant device control schedules have to be produced. The generative process of schedules uses genetic algorithms. A number of default operation schedules are used together with randomized schedules as the initial setup. Needed state definitions and device attributes are stored in a predefined data structure (Figure 9) to generate the schedule automatically.

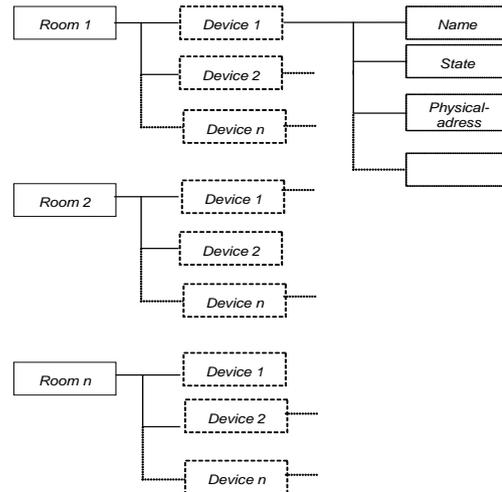


Figure 9. Schema for device attribute definition data structure

Based on the first generation simulation the best-ranked schedules were selected to generate new child schedules in a random multipoint crossover reproduction process (Figure 10). For this purpose, the high-ranked schedules are crossed with themselves as well as with additional randomly selected schedules dealing as parent elements.

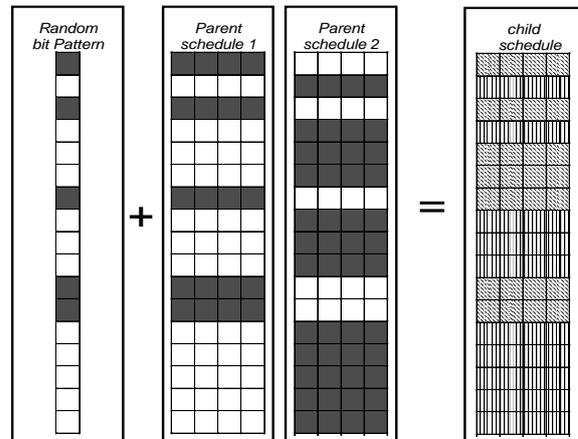


Figure 10. Illustration of the genetic multipoint crossover reproduction

The ranking is done by a number of performance indicators (discussed below) to estimate the fitness of each alternative state. Figure 11 illustrates this genetic approach.

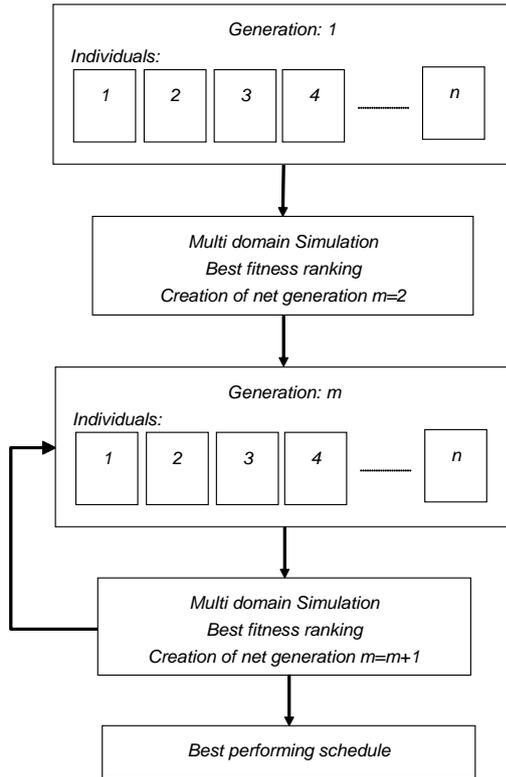


Figure 11. Illustration of the genetic generation of the desired operation schedules

Performance Indicators

A holistic evaluation of alternative system operation scenarios with related control system states is the core component of this control method. A set of building performance indicators weighted with associated weighting factors were used to evaluate the multi-domain simulation results and rank the alternative control state scenarios. The performance indicator i (Equation 1) is the weighted sum of all indicators i_x . The value of each indicator and the sum of the weighting factors w_x is in the range of 0 to 1. Hence i must be in the same range. The ranking of the alternatives is done by maximum to minimum sorting.

$$i = \sum i_x \cdot w_x \quad (1)$$

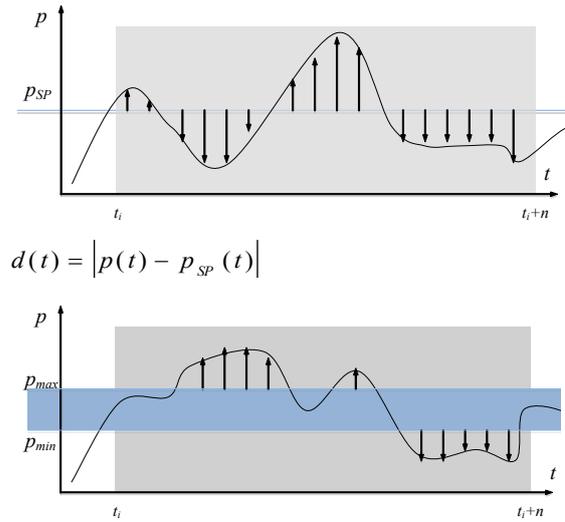
$$i, i_x, w_x \in [0,1] \quad \text{and} \quad \sum_x w_x = 1$$

The calculation of each indicator is based on the simulated predictive trend of the related system parameter (e.g. air temperature of a room). For each specific parameter, the sum of deviations d_{period} is calculated for the future n time steps shown in Equation (2).

$$d_{period} = \sum_{k=t_i}^{t_i+n} d(k) \quad (2)$$

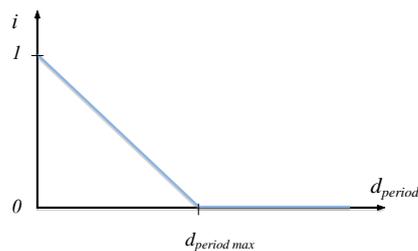
The calculation of each deviation depends on a fixed set point or an acceptable parameter range as shown in Figure 12. The general indicator i_x could be derived either linearly (Figure 13), or exponentially (Figure 14).

The principle calculation procedure for power respectively energy indicators is presented in Figure 15 and expressed for HVAC and lighting power use.



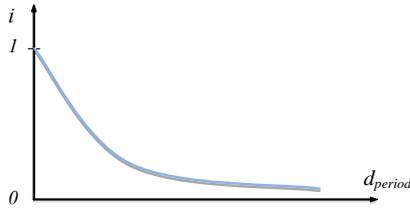
$$d(t) = \begin{cases} p_{min} - p(t) & \text{if } p(t) < p_{min} \\ 0 & \text{if } p_{min} \leq p(t) \leq p_{max} \\ p(t) - p_{max} & \text{if } p(t) > p_{max} \end{cases}$$

Figure 12. Deviation d calculation for a general system parameter p .



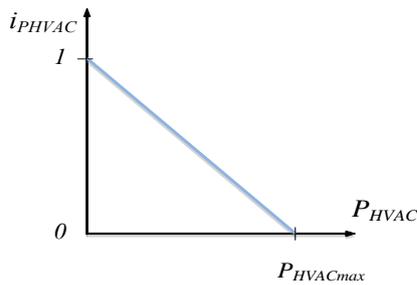
$$i_x = \begin{cases} 1 - \frac{d_{period}}{d_{period\ max}} & \text{if } d_{period} < d_{period\ max} \\ 0 & \text{if } d_{period} \geq d_{period\ max} \end{cases}$$

Figure 13. General linear performance indicator i_x calculation.



$$i_x = 1 - e^{-c \cdot d_{period}}$$

Figure 14. General exponential performance indicator i_x calculation.



$$i_{PHVAC} = \frac{1}{n} \sum_{t=t_i}^{t_i+n} 1 - \frac{P_{HVAC}(t)}{P_{HVAC_{max}}}$$

$$i_{PL} = \frac{1}{n} \sum_{t=t_i}^{t_i+n} 1 - \frac{P_{Lighting}(t)}{P_{Lighting_{max}}}$$

Figure 15. Performance indicator for power or energy related parameters, as expressed for HVAC or Lighting related power use P_{HVAC} and $P_{Lighting}$.

RESULTS

Data is being collected in both test rooms toward an objective documentation of the indoor-environmental conditions. To obtain an initial impression regarding the impact of window ventilation on indoor temperature, measurements of the external temperature θ_e [°C], the test room's air temperature θ_i [°C], and the window opening pos_w [%] are shown in Figure 16 for a typical summer week. Thereby, the influence of two instances of (manual) window operation can be seen. Both rooms have a very strong overheating tendency caused by the limited thermal mass and the oversized windows. The usual summer day temperature is in the range from 20 to 30°C with peaks up to 35°C.

Simulated natural ventilation

Parallel to the monitoring phase, thermal simulations were done to estimate the night cooling effect and virtually test the new control approach. For this purpose, measurements of air change rates were the starting point for different natural ventilation

simulations in EDSL Tas (EDSL 2008). Figure 17 shows the external air temperature θ_e and the simulated indoor air temperatures θ_i for a typical summer week. The simulation was done for an air change of 0.4, 1.4 and 10 h^{-1} over 24 hours a day. A ventilation regime with an air change rate of 0.4 h^{-1} over the day (8am to 7pm) and 10 h^{-1} during the night hours was simulated as well. These simulations indicated the overheating tendency of the rooms, but also showed the potential of natural ventilation.

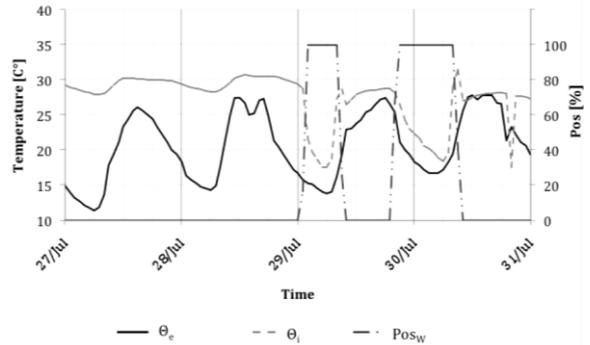


Figure 16. Measurements in first floor test room for period 21. - 31. July

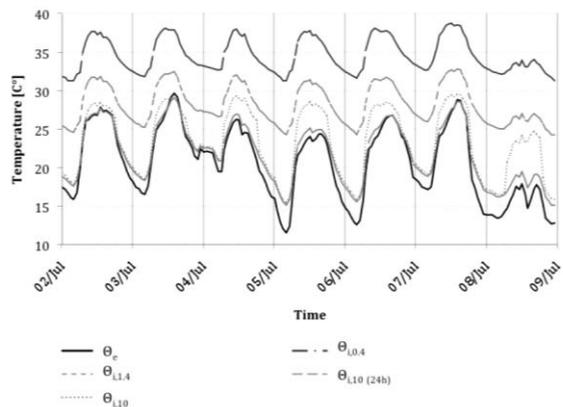


Figure 17. Simulated indoor air temperatures as a function of air change rates

Control approach Implementation

To demonstrate the advantages of the predictive control, a first implementation was done in a virtual setup. Based on the HAMBase simulation package (van Schijndel 2007) for MATLAB a thermal model of the two test rooms was created. Adaptations to HAMBase were carried out for the control of shading and the possibility to run single hour step simulations with stored data. The development and integration of the complete control system was also done in MATLAB. Components for the collection of required data (weather forecast, internal/external sensor data) and their storage into a sqlite database were programmed in C. These could be run independent of the control program as a service.

At this stage only the room air temperature was used as a performance indicator. The comfort zone for the room temperature was assumed to be the range between 20 and 25 °C (Figure 18).

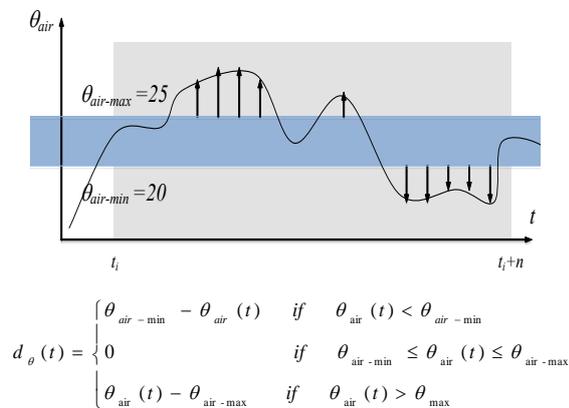


Figure 18. Deviation d calculation for the room air temperature

Result of a test using measured external climatic data and the HAMbase model is presented in Figure 19, Figure 20, and 22. Each plot shows the historical data including the real external air temperatures and the simulated indoor air temperatures on the left half of the plots. Simulated temperatures for all scenarios (generated via the aforementioned genetic approach) are presented in grey color on the right half side together with the status of windows (green) and shades (blue) for the best performing scenario (black). Concerning the status scale, 1 denotes fully open windows and fully closed shades.

These Figures represent 3 consequent days. They illustrate the large difference between weather forecast and actually measured temperatures. However, the performance of the system (i.e. identification of the best performing scenario) does not appear to be adversely affected by such weather forecast errors.

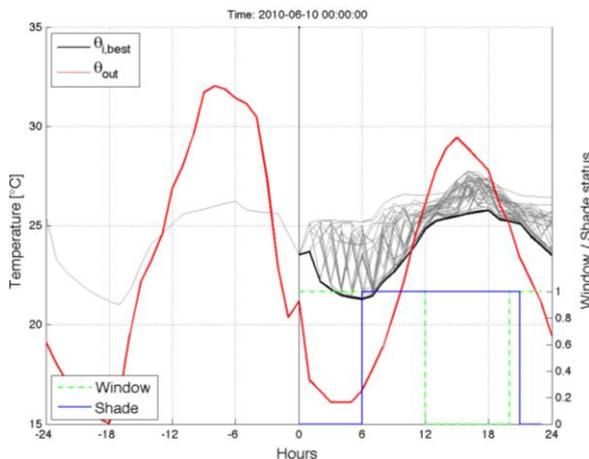


Figure 19. Temperature of the test room ($\theta_{i,sim}$), 2010-6-10 00:00

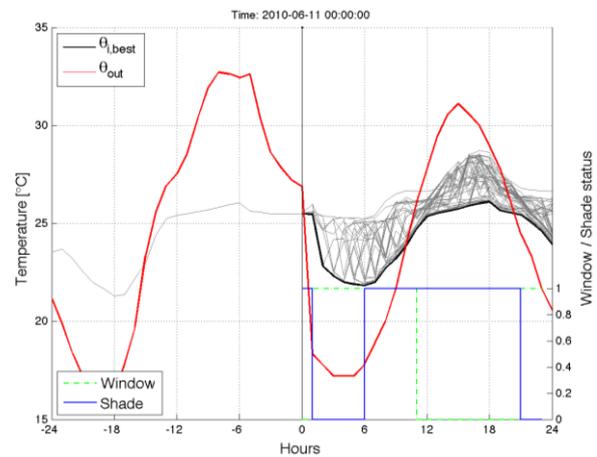


Figure 20. Temperature of the test room ($\theta_{i,sim}$), 2010-6-11 00:00

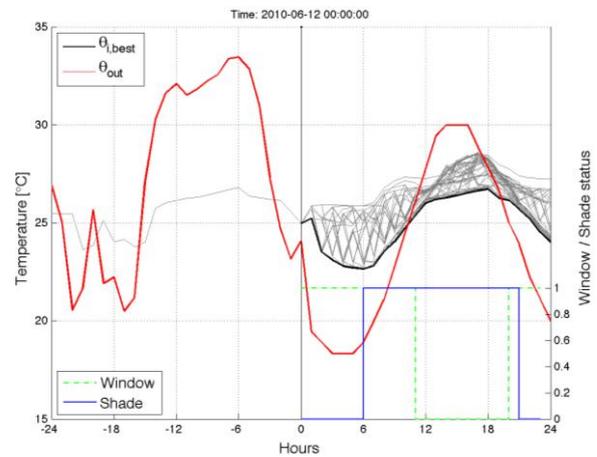


Figure 21. Temperature of the test room ($\theta_{i,sim}$), 2010-6-12 00:00

DISCUSSION

The scope and the initial results of a prototypical implementation of a simulation-assisted predictive control approach for passive cooling were presented in a recently constructed office building in Austria. Thereby, the potential of the method was primarily explored toward harnessing natural ventilation (via window elements equipped with software-controlled actuators) and solar control (via automated shading devices). The results thus far point to the potential of the proposed control method, which involves the dynamic and parametric use of numeric simulation of genetically generated alternative control options to proactively assess, compare, and evaluate control these options toward identification of the control actions that yield appropriate indoor-environmental conditions while minimizing energy use. Future efforts will focus on the long-term test and monitoring phases in occupied settings.

ACKNOWLEDGEMENT

The research presented in this paper is supported in part by funds from FFG "Naturally Cool" (Project-Nr: 817575) as well as the K-project "Multifunctional Plug & Play Façade".

REFERENCES

- EDSL, 2008. A-TAS Version 8.5, Environmental Design Solutions Limited, www.edsl.net.
- Mahdavi, A., Pröglhöf, C. 2004. Natural ventilation in buildings – Toward an integrated control approach, Proceedings of the 35th Congress on Heating, Refrigerating and Air-Conditioning, Belgrade, Serbia, pp. 93 - 102.
- Mahdavi, A., Pröglhöf, C. 2005. A model-based method for the integration of natural ventilation in indoor climate systems operation, Proceedings of the 9th International IBPSA Conference, Building Simulation 2005, Montreal, Canada, pp. 685 - 692.
- Mahdavi, A., Pröglhöf, C. 2006. A model-based approach to natural ventilation, Building and Environment, Elsevier, Volume 43(4), pp. 620 - 627.
- Mahdavi, A. 2008. Predictive simulation-based lighting and shading systems control in buildings, Building Simulation, an International Journal, Springer, Volume 1, Number 1, ISSN 1996-3599, pp. 25 - 35.
- Mahdavi, A., Orehounig, K., Pröglhöf, C. 2009. A simulation-supported control scheme for natural ventilation in buildings, Proceedings of the 11th IBPSA Conference, Building Simulation 2009, Glasgow, Scotland, pp. 783 - 788.
- MATLAB, 2010. MATLAB Release 2010a, The MathWorks, Inc., <http://www.mathworks.com>.
- Orehounig, K., Mahdavi, A., Pröglhöf, C., Schuss, M. 2010. Virtual implementation of a simulation-assisted passive cooling strategy in buildings, Proceedings of the 10th Rehva World Congress, Sahin N. (ed.), Antalya, Turkey.
- Pröglhöf, C., Schuss, M., Orehounig, K., Mahdavi, A. 2010. Incorporation of a novel passive cooling method in an existing building, Proceedings of the 10th Rehva World Congress, Sahin N. (ed.), Antalya, Turkey.
- Radiance, 2010. Radiance Synthetic imaging system Version 4, University of California, <http://radsite.lbl.gov/radiance/>.
- Schuss, M., Pröglhöf, C., Orehounig, K., Mahdavi, A. 2010. A case study of model-based ventilation and shading controls in buildings, Proceedings of the 10th Rehva World Congress, Sahin N. (ed.), Antalya, Turkey.
- van Schijndel, A.W.M. 2007 Integrated heat air and moisture modeling and simulation, PhD thesis, Eindhoven University of Technology, <http://alexandria.tue.nl/extra2/200612401.pdf> or <http://sts.bwk.tue.nl/hamlab> accessed June 2010.
- Weather.com, 2010. National and Local Weather Forecast, Hurricane, Radar and Report, The Weather Channel Interactive, Inc., <http://www.weather.com/>.

HVAC SYSTEM ENERGY OPTIMIZATION IN INDOOR SWIMMING POOLS

E. Ribeiro^{1,4}, H. M. Jorge^{2,4} and D.A. Quintela^{3,5}

¹ School of Technology and Management, Polytechnic Institute of Leiria, Leiria, Portugal

² Department of Electrical Engineering and Computers, University of Coimbra, Coimbra, Portugal

³ Department of Mechanical Engineering, University of Coimbra, Coimbra, Portugal

⁴ Institute for Systems and Computers Engineering of Coimbra (INESCC), Coimbra, Portugal

⁵ Association for the Development of Industrial Aerodynamics (ADAI), Coimbra, Portugal

ABSTRACT

Buildings with indoor swimming pools are recognised as a very high energy consumers, and presents a grate potential for energy savings. The management of indoor ambient conditions must act upon the most sensible parameters that affect the energy consumption. The energy is spent in several ways:

- evaporation heat loss from the pool;
- room temperature very high, typically 28°C to 30°C, to maintain the comfort of users and reduce the risk of condensation;
- high rates of ventilation required, usually 4 to 10 air changes per hour, necessary to remove the excess humidity due to evaporation and indoor air quality guarantee.

Control Strategies adapted to the reality of each building is an important way to reduce energy consumption. This paper presents control strategies, that can be implemented in the building automation system and the HVAC system of an existing indoor swimming pool complex, in order to minimise energy consumption.

In the present case study, an appropriate control strategy, joint with pool cover at night, is a measure for the rational use of energy, that can lead to the reduction of 90 tep/year, which represents about 30.000€ in reduction in energy cost.

INTRODUCTION

In Portugal, the number of sport complexes with Indoor Swimming Pools (ISP), with an intensive use, has increased significantly during the last decade. The growing of such facilities has shown the necessity to promote the evaluation and control of the indoor environment in order to minimise the energy consumption, according to the measures proposed by the European Union Directive 2006/32/EC (EC, 2006) and national law 79/2006 (RSECE, 2006). In

these directive, all buildings must be classified from an energy point of view, using de Energy Efficiency Index (EEI), and have to implement measures leading to the Rational Use of Energy (RUE).

Based on a case study analysis of energy consumption during the year 2006, the EEI obtained is 95.7 kgep/m².year (Rodrigues, 2007). In this case the reference value for EEI corresponds to 35 kgep/m².year (RSECE, 2006). It is obvious that something has to be done in order to bring the actual EEI close to de reference value, a task that normally requires building thermal simulation techniques and further investments in equipment and control systems. A first approach is to implement optimised control strategies in conjunction with RUE measures such as cogeneration, renewable energy systems, recovery of energy in the rejected air and pool cover, in particular.

Figure 1 illustrates the primary energy distribution for the present case study.

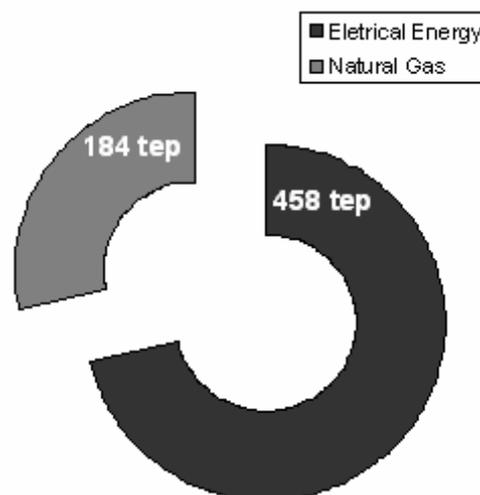


Figure 1 Primary energy distribution

We can identify five main energy topics in ISP that are responsible for 95% of the overall energy consumption:

- HVAC system,
- Pumping system,
- Pool water treatment,
- Water heating for baths,
- Lighting.

In this work, we present an approach to control strategies of an HVAC system, coupled with a RUE measure that consists in covering the pool at night, which reduce significantly the energy consumption and the EEI.

PRINCIPLES, METHODS AN RESULTS

A. Case study

The building under analysis is a sports complex with 15.200 m², which incorporates an olympic pool of 50x25 m²; a children pool of 25x12.5 m² and a multi-sports pavilion of 30x50 m².

In the olympic pool, the water temperature varies between 27°C and 28°C, and the room conditions have the following values: air temperature between 28°C and 29°C, relative humidity between 50% and 55%. In the children pool the water temperature varies between 29°C and 30°C, and the room conditions have the following values: air temperature between 30°C and 31°C, relative humidity between 60% and 65%.

An Air Handling Unit (AHU) ensures the HVAC system, at pool level, with dehumidifying and heating capacities.

A building automation system, using a network of direct digital controllers, controls all main process: HVAC system, pumping system, lighting and energy management.

B. Building Performance Simulation

Taking into account the complexity of the parameters involved in a feasibility study of measures to reduce the energy consumption of the building, the choice of energy simulation programs is actually the better way, either from both economical and time perspectives, to quantify the benefits that can be achieved by different control strategies (Pedrini et al., 2002.).

The energy simulation programs work with three main groups of variables, with a set of parameters that influence the building thermal performance (Clarke, 1997, 2001):

- Climatic variables such as temperature, relative humidity, solar radiation, wind speed an direction, etc..

- Design variables: internal geometry, thermo-physic properties, material properties, HVAC systems, passive and active solar systems, etc..
- Use and occupancy variables: routines, internal thermal loads, equipment gains, etc..

There are several building energy simulation programs, used in research centres around the world, including in Portugal, such as ESP-r; ENERGYPLUS; TRNSYS and DOE, among others

ESP-r is an integrated modelling tool for the simulation of the thermal, visual and acoustic performance of buildings and the assessment of the energy use and gas emissions associated with the environmental control systems and constructional materials (ESRU., 2002 and 2009). The ESP-r program was used throughout the present work.

The building of the present case study is represented within ESP-r according to the following figure (Lacerda, 2007).

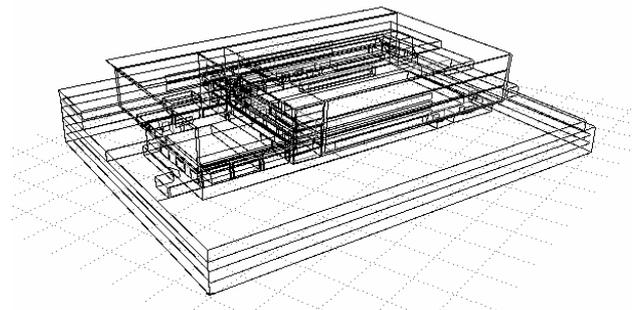


Figure 2 Model of the building case study

C. HVAC System Control Strategy

The use of AHU is necessary because the high evaporation in ISP complex, there are the largest source of energy losses, as can be observed in the Figure 3.

The environmental variables associated to AHU control, used in ESP-r Model, are in particular:

- *Tap* - Pool water temperature (°C),
- *Tamb* - Ambient air temperature (°C),
- ϕ - Relative humidity (%),
- *Qe* - Latent load associated with the evaporation from the pool (W).

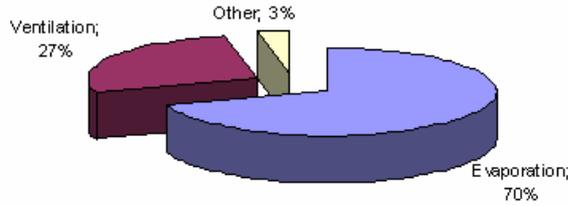


Figure 3 ISP energy balance (Department of Energy, 2009)

The latent load associated to pool evaporation is the most important variable of the process, therefore its estimation should be as rigorous as possible. The process of water evaporation occurs because of heat absorption by pool water, producing a reduction of the temperature of the water. Thus, if more vapour exists, more the water is cooled and more heating is required to maintain the comfort conditions.

The fundamental variable to quantify is the mass of evaporated water (m_e). Recent studies (Shah, 2003, 2004) identify an empirical formula that correlates the environmental variables and the influence of users. This influence is exerted at the free surface of the water, increasing the area of water in the pool by the movements of the users and the exposed wetted bodies.

$$m_e = A_{pool} \left[0,113 - \frac{0,0000175 \times A_{pool}}{N} + 0,000059(P_s - P_a) \right] \quad (1)$$

Where:

- A_{pool} - Pool area [m^2],
- N - Number of users.
- P_s - Saturation pressure of water vapour, at pool temperature [kPa],
- P_a - Partial pressure of water vapour, at ambient temperature [kPa].

The correlation shall be valid only when:

$$\frac{A_{pool}}{N} < 45 \quad (2)$$

Heat losses by water evaporation may be calculated knowing the mass of evaporated water (m_e) and the latent heat of vaporisation (L_v), at ambient temperature.

$$Q_e = m_e \times L_v \quad (3)$$

The latent heat of vaporisation (L_v) can be calculated, in the range of temperatures between 0 and 200°C with an accuracy of 0.02%, by the empirical formula of *Regnault* (Donald & Gatley, 2004):

$$L_v = 705,62 - 0,81t \quad (4)$$

Thus, heat losses by water evaporation may be calculated according to the expression:

$$Q_e = A_{pool} \left[0,113 - \frac{0,0000175 \times A_{pool}}{N} + 0,000059(P_s - P_a) \right] \times (705,62 - 0,81 \times (T_{amb} - 273,15)) \quad (5)$$

The saturation pressure of water vapour, at pool water temperature, is a function of absolute temperature and is given by (Ren, 2004) (Hyland et al., 1983):

$$P_s = e^{\left(\begin{array}{l} -5,8002206 \times 10^3 \times T_{ap}^{-1} + \\ +1,3914993 - \\ -4,8640239 \times 10^{-2} \times T_{ap}^1 + \\ +4,1764768 \times 10^{-5} \times T_{ap}^2 - \\ -1,4452093 \times 10^{-8} \times T_{ap}^3 + \\ +6,5459673 \ln(T_{ap}) \end{array} \right)} \quad (6)$$

The partial pressure of water vapour at ambient temperature, is given by (Ren, 2004) (Hyland et al., 1983):

$$P_a = \frac{P_s |_{T_{amb}} \times \phi}{100} = \phi \times e^{\left(\begin{array}{l} -5,8002206 \times 10^3 \times T_{amb}^{-1} + \\ +1,3914993 - \\ -4,8640239 \times 10^{-2} \times T_{amb}^1 + \\ +4,1764768 \times 10^{-5} \times T_{amb}^2 - \\ -1,4452093 \times 10^{-8} \times T_{amb}^3 + \\ +6,5459673 \ln(T_{amb}) \end{array} \right)} \quad (7)$$

In order to obtain reference values, to be compared later with the results of building energy simulations, a first run took place with the real environmental variables that were registered during 2006. The annual average values (daily means) are shown in Tables 1 and 2.

Table 1- Olympic pool: environmental variables

Variable	Value
T_{ap}	27,5°C
T_{amb}	28,3°C
ϕ	52,3%
Q_e	180.009W

Table 2- Children pool: environmental variables

Variable	Value
T_{ap}	28,9°C
T_{amb}	30,5°C
ϕ	52,7%
Q_e	45.168W

In these work we have considered an approach to control strategies based on the variation of the environmental variables at night (8PM to 8AM), which meets two distinct criteria:

- wet-bulb temperature,
- dew point temperature.

For the 1st criteria two simulations were made, taking into account different relative humidities, providing two control strategies (CS-1 and CS-3). In this case the environmental variables at night are:

Table 3- Olympic pool – 1st criteria

Variable \ CS	CS-1	CS-3
Tap	27,5°C	27,5 °C
Tamb	26,0 °C	24,5 °C
ϕ	65,0%	75,0%
Qe	171.765W	165.458W

Table 4- Children pool - 1st criteria

Variable \ CS	CS-1	CS-3
Tap	28,9°C	28,9 °C
Tamb	28,0 °C	26,5 °C
ϕ	65,0%	75,0%
Qe	43.341W	41.660W

The same methodology was adopted for the 2nd criteria, resulting two control strategies (CS-2 and CS-4). In this case the environmental variables at night are:

Table 5- Olympic pool – 2nd criteria

Variable \ CS	CS-2	CS-4
Tap	27,5°C	27,5 °C
Tamb	25,0 °C	22,5 °C
ϕ	65,0%	75,0%
Qe	178.336W	179.632W

Table 6- TABLE 1 – Children pool - 2nd criteria

Variable \ CS	CS-2	CS-4
Tap	28,9°C	28,9 °C
Tamb	27,0 °C	24,5 °C
ϕ	65,0%	75,0%
Qe	45.152W	45.435W

D. Pool Cover simulation

The effects of a possible RUE measure, the use of pool covers for both pools, were analysed next. In this situation, two simulations took place considering two different control strategies:

- CS-5 – normal HVAC control at night.
- CS-6 – without HVAC control at night.

In this case the environmental variables at night are:

Table 7- Olympic pool with RUE measure

Variable \ CS	CS-5	CS-6
Tap	27,5°C	27,5 °C
Tamb	28,3 °C	Free float
ϕ	52,3%	Free float
Qe	18.001W	18.001W

Table 8- Children pool with RUE measure

Variable \ CS	CS-5	CS-6
Tap	28,9°C	28,9 °C
Tamb	30,5 °C	Free float
ϕ	52,7%	Free float
Qe	4.517W	4.517W

D. Results

Analysis of the results provided by the building thermal simulations highlights the three major losses in process:

- Building envelope losses to environment quantified by simulation, energy supplied by the HVAC system using thermal energy produced by natural gas boiler (Sensible Energy).
- Energy spent associated with the reduction of building latent load, quantified by simulation, which is to be ensured by the HVAC system using electricity (Latent Energy).
- Losses associated with energy heating water that is necessary to compensate evaporation, and calculated according to the amount of water evaporated in each simulation.

The total annual hourly sensible and latent energy is presented in the Figure 4 and Figure 5, respectively.

The quantification of the EEI and the energy used to heat restored water pool, for each control strategy, is presented in Table 9. The first line represents the real consumption during 2006.

Table 9- Consumption of Energy and EEI

	Electrical Energy (tep)	Natural Gas (tep)	EEI
Real	427,0	203,0	95,7
CS-1	420,3	195,5	93,5
CS-2	427,0	177,0	91,7
CS-3	414,2	174,6	89,4
CS-4	423,9	169,1	90,0
CS-5	392,5	202,2	90,3
CS-6	391,1	148,3	81,9

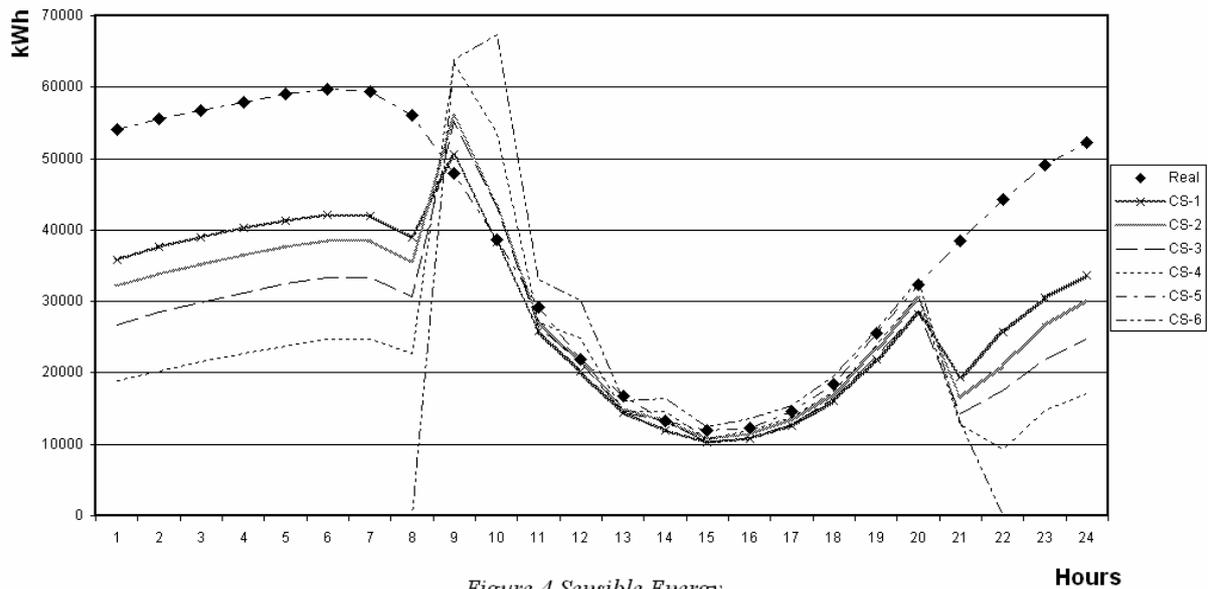


Figure 4 Sensible Energy

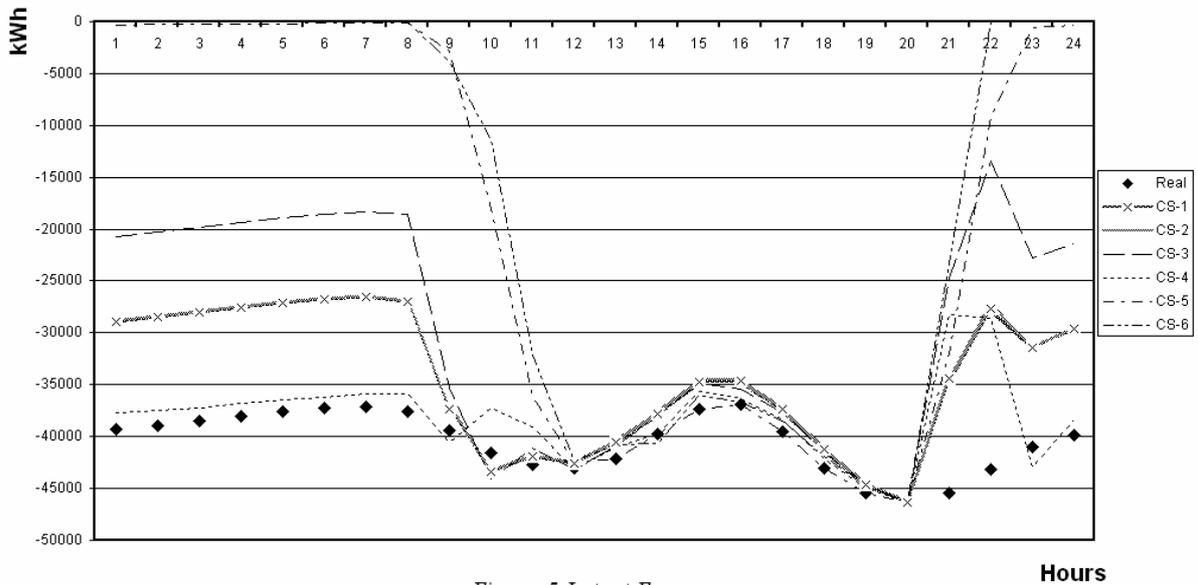


Figure 5 Latent Energy

CONCLUSION

The considerable reduction of sensible energy, obtained with control strategy CS-1, CS-2, CS-3 and CS-4, linked to the natural gas consumption, is due to lower room temperatures that reduce the building envelope losses to the environment.

Some reduction in latent energy, in control strategy CS-1, CS-2, CS-3 and CS-4, associated to the decrease of water evaporation, is caused by the increase of room relative humidity.

Significant reduction in latent energy, in control strategy CS-5, is to be related to the electrical energy consumption. This is a direct consequence of covering the pools and such measure of rational use

of energy is seen to reduce significantly the water evaporation. In this case, the total reduction is 35,3tep that represents 5,6%.

Using the control strategy CS-6, in conjunction with pool cover at night, a reduction of 90,6 tep/year (14,4%) can be obtained, which represents 29.727€ in 2006 energy price (DGEG, 2010^{A&B}) savings, with a four month of payback for pool cover.

Otherwise, the best control strategy with the minimum investment is the CS-3, with a reduction of 41,2 tep/year (6,5%), which represents 13.565€ in 2006 energy price (DGEG, 2010^{A&B}) savings.

The authors believe that the present contribution underlines the importance of control strategies in the

design of building automation and HVAC systems for energy savings in indoor swimming pools.

REFERENCES

- Clarke, J.A. 1997. Environmental systems performance. PhD thesis, Universidad de Strathclyde, Glasgow, UK.
- Clarke, J.A. 2001. Energy simulation in building design (2nd Edition). Butterworth-Heinemann. ISBN 0-750-65082-6. Oxford, UK, 2001.
- DoE, 2009. Swimming Pool Cover. U.S.A. [http://www.energysavers.gov/your_home/water_heating/index.cfm/mytopic=13140, access in 26/04/2009].
- DGEG, 2010A, Direcção Geral de Energia e Geologia. Preços Médios do Gás Natural no Sector Indústria. [<http://www.dgge.pt?cr=8637>, access in 13/5/2010]
- DGEG, 2010B, Direcção Geral de Energia e Geologia. Preços Médios de Energia Eléctrica no sector indústria. [<http://www.dgge.pt?cr=8810>, access in 13/5/2010]
- Donald, P. Gatley, P.E. 2004. Psychrometric Chart Celebrates 100th Anniversary. ASHRAE Journal. [<http://bookstore.ashrae.biz/journal/download.php?file=22915gatley.pdf>, access in 21/4/2010]
- EC, 2006. Directive 2006/32/EC on energy end-use efficiency and energy services, Directive 2006/32/EC of the European Parliament.
- Energy efficiency in sports and recreation buildings: swimming pool covers; Case Study 76; Building Research Energy Conservation Support Unit; 2007.
- ESRU, 2002. The ESP-r System for Building Energy Simulation: User Guide Version 10 Series. ESRU manual U02/1., University of Strathclyde, Glasgow, Scotland.
- ESRU, 2009. *ESP-r Overview*. University of Strathclyde, Glasgow, Scotland. [<http://www.esru.strath.ac.uk>, access in 3/04/2009].
- He-Sheng Ren, "Construction of a generalized psychrometric chart for different pressures", Journal of Mechanical Engineering Education, 2004.
- Hyland, R.W. Wexler, J. 1983. Formulations for the thermodynamic properties of the saturated phases of H₂O from 173.15 K to 473.15 K., ASHRAE Transactions.
- Lacerda, H. 2007. Previsão do Comportamento Térmico de um Complexo de Piscinas Interiores, Technical report.
- RSECE, 2006. Ministry of Public Works, Transport and Communications. 2006. Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE), Decreto-lei N° 79/06.
- Pedrini, F.S. Lamberts, R. 2002. A methodology for building energy modeling and calibration in warm climates. Building and Environment, Vol. 37, pp 903 – 912.
- Ren, H.S. 2004. Construction of a generalized psychrometric chart for different pressures. Journal of Mechanical Engineering Education.
- Rodrigues, P. 2007. Climatização de Recintos com Piscinas Interiores – Eficiência Energética”, Technical report.
- Shah, M.M. 2003. Prediction of evaporation from occupied indoor swimming pools. Energy and Buildings.
- Shah, M.M. 2004. Calculating Evaporation From Indoor Water Pools. HPAC Engineering.

COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS MIT OPEN-SOURCE-SOFTWARE REIF FÜR DIE HOCHSCHULE? – REIF FÜR DIE PRAXIS?

Dipl.-Ing. Philip Herrmann¹ und Prof. Dr.-Ing. Wolfram Haupt²
¹WSP CBP Technische Ausrüstung GmbH, München, Deutschland
²Hochschule Coburg, Coburg, Deutschland

KURZFASSUNG

Durch Simulationsrechnungen mit CFD-Software (Computational Fluid Dynamics) lassen sich diverse Probleme aus dem Baubereich sehr detailliert analysieren.

Einem breiten Einsatz steht aber der hohe Schulungsaufwand, bis der Bediener der Software hinreichende Expertise für verlässliche Berechnungen hat, aber auch der nennenswerte finanzielle Aufwand bei Einsatz der derzeit marktführenden Produkte entgegen.

Ein Ausweg zumindest für den letzten Punkt könnte sich über eine CFD-Software bieten, die bereits seit etwa einem halben Jahrzehnt als Open-Source quelloffen und kostenfrei erhältlich ist.

Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde untersucht, inwieweit sich dieses Simulationswerkzeug bereits heute für einen praktischen Einsatz eignet. Dazu wurden Vergleichsrechnungen mit einem validierten und mit einer kommerziellen Software berechneten Fall durchgeführt und anschließend ein praktisches Anwendungsbeispiel aus der Innenraumströmung von der Geometrierstellung über die Vernetzung und Berechnung bis zur Ergebnisdarstellung durch-exerziert.

Es konnte eine grundsätzliche Eignung der Software für die praktische Anwendung gefunden werden, und Nachteile, aber auch Vorteile gegenüber kommerziell erhältlicher CFD-Software eruiert werden.

ABSTRACT

CFD-software (Computational Fluid Dynamics) is well-suited to analyze a lot of questions concerning buildings.

The main obstacle for a broader use of this method is the high training effort until a user has sufficient expertise for reliable simulations as well as the high price of the leading CFD-products.

A solution for at least the last topic could be provided by an open source and free of charge available CFD software, which has been around for half a decade.

In a diploma-thesis it had been investigated whether this simulation-tool is already suitable for practical application today. Calculations were compared with a validated case that had been simulated with commercial software. Additionally a practical application example had been carried out from geometry creation over grid-generation and computation to the presentation of results.

The fundamental suitability of the software for practical application could be found, and disadvantages, as well as advantages over commercially available CFD software had been investigated.

EINLEITUNG

Simulationssoftware aus der Klasse der Computational Fluid Dynamics (CFD) ist grundsätzlich für vielfältige Fragestellungen im Baubereich anwendbar – etwa im Bereich der Innenraumströmung und thermischen Behaglichkeit, der Gebäudeumströmung oder auch zur detaillierten Analyse von Hohlräumen in Konstruktionen und Bauteilen.

Stand vor wenigen Jahren noch die Leistungsfähigkeit von erschwinglichen Rechnern einer weiteren Verbreitung dieses Werkzeugs im Weg, sind es für viele Ingenieurbüros, kleine und mittelständische Betriebe, aber auch für Hochschulen heute vor allem die hohen Kosten der kommerziellen CFD-Software, die einem häufigeren Einsatz dieser Technik entgegenstehen, was für Letztere dazu führt, dass an CFD ausgebildete Ingenieure zum "knappen Gut" werden und sich das Problem weiter verschärft.

Mit der CFD-Software "OpenFOAM" existiert – in seinen Ursprüngen bereits seit einem halben Jahrzehnt – ein quelloffenes und frei verfügbares Simulationsprogramm – genauer gesagt ein Simulations-Framework, das allerdings gegenüber den marktführenden Programmen in Umfang und insbesondere Bedienerfreundlichkeit eingeschränkt ist.

Zu untersuchen, inwieweit diese Einschränkungen in Praxis und Hochschul-Ausbildung relevant sind, war Ziel einer Diplomarbeit am Lehrstuhl Bauphysik der TU München.

SIMULATIONSUMGEBUNG

OpenFOAM ist im Gegensatz zu den marktführenden CFD-Programmen wie CFX, FLUENT oder Star-CD kein dezidiertes Programm zur CFD-Berechnung, sondern eher ein "Framework" aus verschiedenen ineinandergreifenden und auf einzelne Aufgaben spezialisierten Software-Komponenten.

Bei allen CFD-Programmen werden zumindest die drei Schritte Preprocessing (die Erstellung des Berechnungsfalls mit Geometrieerzeugung, Gittergenerierung und Angabe der Randbedingungen), Solving (die eigentliche numerische Lösung nach Angabe von Startbedingungen und Abbruchkriterien) und Postprocessing (die Ergebnisauswertung und Visualisierung) unterschieden.

Das eigentliche OpenFOAM besteht dabei lediglich aus mehreren Solvern, Bibliotheken sowie einigen Konvertierungs- und Transformationsprogrammen, deren Benutzerschnittstelle darin besteht, Eingaben aus Textdateien in einer festgelegten Verzeichnisstruktur zu verarbeiten und die Berechnungsergebnisse wiederum in Form von Textdateien auszugeben.

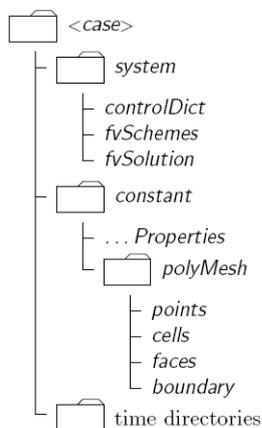


Abbildung 1: OpenFOAM-Verzeichnisstruktur

Für das Postprocessing stützt sich OpenFOAM standardmäßig auf das Visualisierungsprogramm "Paraview" der Sandia National Labs.

Beim Preprocessing gibt es einige freie sowie auch kommerzielle Programme, die Schnittstellen zu OpenFOAM besitzen mit jeweils spezifischen Vor- und Nachteilen.

Im Rahmen der Untersuchung kristallisierte sich für die kostenlose und für die kommerzielle Variante mit den Programmen Netgen bzw. CastNet jeweils eine Software(-kombination) in Verbindung mit einem

weit verbreiteten CAD-Programm (SketchUp bzw. AutoCAD) als brauchbarste Vorgehensweise heraus.

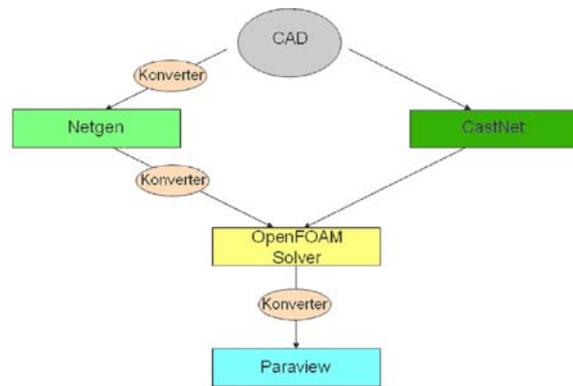


Abbildung 2: Flussdiagramm der CFD-Berechnung mit OpenFOAM

VALIDATION

Untersucht wurde ein Fall einer Auftriebsströmung, der durch eine Messung mit der PIV-Methode (Haupt, W. 2001) sowie vielfältige Berechnungen (Zimmermann, F. 2005; Haupt, W., van Treeck, C. 2006) als hinreichend validiert angesehen werden kann.

Es handelt sich um eine Auftriebsströmung in einer Versuchsbox, die durch eine zentral unten eingebaute Heizfläche und eine oben gegenüberliegende Kühlfläche erzeugt wird und bei der im Anlauf ein "Kippen" von zunächst zwei sich ausbildenden Walzen in eine große Walze stattfindet und daher berechnet werden muss.

Bevor mit der Simulation begonnen werden konnte, musste ein geeigneter Solver ausgewählt werden. Die Anforderungen an diesen stellten sich wie folgt dar:

- dreidimensionaler Berechnungsfall
- instationäre Berechnung
- inkompressibles Fluidverhalten
- turbulente Strömung
- Boussinesq-Auftriebsmodell

Bei den Solvern, die sich im Standard-Umfang von OpenFOAM befinden, gibt es keinen, der alle oben genannten Punkte beinhaltet. Daher wurde ein bestehender Solver, der um eine Bibliothek des Boussinesq-Modells ergänzt wurde, verwendet.

Sowohl die Bibliothek als auch ein entsprechend programmierter Solver ließen sich durch Recherche im Internet auffinden. Dieser arbeitet mit dem Standard-k-ε Turbulenzmodell und greift auf bereits in OpenFOAM definierte Wandfunktionen zu.

Unter Verwendung eines derart angepassten Solvers konnten die Referenzwerte (Geschwindigkeitsfelder, Temperatur- und Druckverteilungen) des Falles gut reproduziert werden.

Im Rahmen der viermonatigen Bearbeitungszeit konnte sich der im Umgang mit CAD-Programmen erfahrene Diplomand mit leichten Hilfestellungen weitgehend selbständig in die erfolgreiche Simulation von Auftriebsströmungen in Innenräumen einarbeiten.

Die größten Anfangsschwierigkeiten stellten sich bereits in den ersten Schritten des Preprocessing – bestanden also vor allem darin, eigene dreidimensionale Modelle zu erstellen, zu vernetzen und parametrieren um sie anschließend zu simulieren. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass OpenFOAM selbst keine benutzerfreundlichen integrierten Werkzeuge zur Geometrie- und Gittererzeugung sowie zur Eingabe der nötigen Modellparameter und Kontrolle der Modellierung zur Verfügung stellt. Wollte man allein mit OpenFOAM ein dreidimensionales Objekt simulieren, geschähe die Modellierung mittels Erzeugung einer Textdatei, in der sich die Knoten und Kanten des Objekts wiederfinden würden.

So mussten als einer der ersten Schritte der Arbeit Programme identifiziert werden, die im Bereich des Preprocessing möglichst einfach und effizient miteinander zusammenspielen oder deren Ergebnisse zumindest nach Einsatz von Konvertern harmonisieren – wenn möglich unter der Prämisse einer kostenfreien Variante.

Durch Recherche im Internet und in der Literatur ließen sich geeignete Tools finden, die die Formate der Dateien konvertieren und verarbeiten konnten. Konkret wurde wie oben angeführt das Geometrieformat STL mit dem Preprocessor Netgen in der Version 4 verwendet, welches nach der Gittererzeugung wiederum für OpenFOAM konvertiert werden konnte. Deutlich einfacher und effizienter war der Umgang mit CastNet, welches sowohl eine direkte CAD-Schnittstelle als auch einen für OpenFOAM kompatiblen Export für die Gittererzeugung mit sich bringt.

Während der Simulation brach zudem das Programm ab, da die Ergebnisse zum Zeitpunkt des „Kippens der Walze“ zu stark divergierten. Abhilfe konnte hier durch die eine kurzzeitige Anhebung der Toleranzgrenze der k-Werte geschaffen werden, die danach wieder herabgesetzt wurde.

Aus der Warte des CFD-erfahrenen Betreuers kann die Einarbeitungszeit des Diplomanden als ähnlich lange angesehen werden, wie sie für die Einarbeitung in die kommerziellen CFD-Lösungen zu erwarten gewesen wäre. Der Verlauf der Diplomarbeit und die brauchbaren Resultate der Validationsrechnungen durch einen relativ unerfahrenen Benutzer sprechen durchaus für einen Einsatz von OpenFOAM in der Lehre.

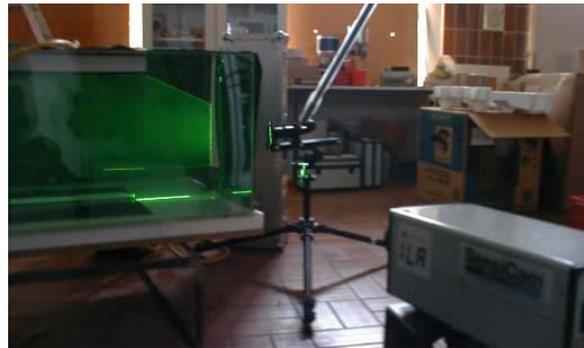


Abbildung 3: Durchführung der PIV-Messung

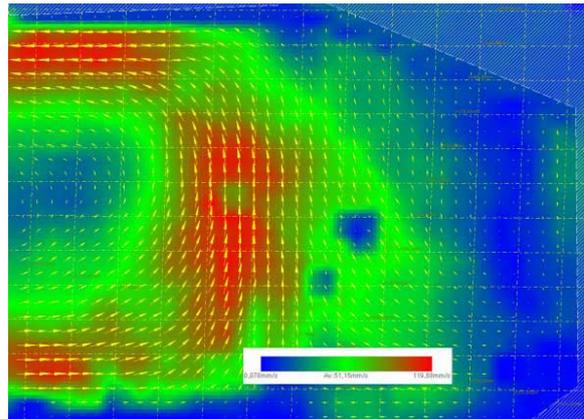


Abbildung 4: Geschwindigkeitsvektoren rechte Hälfte des Versuchsaufbaus – PIV-Messung

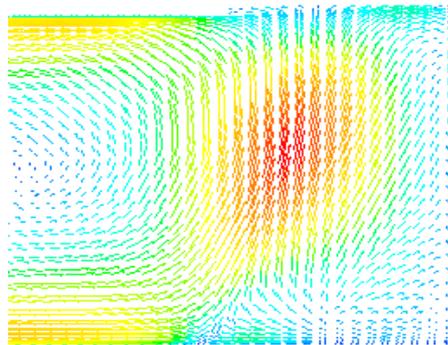


Abbildung 5: Geschwindigkeitsvektoren rechte Hälfte des Versuchsaufbaus – FLUENT-Berechnung

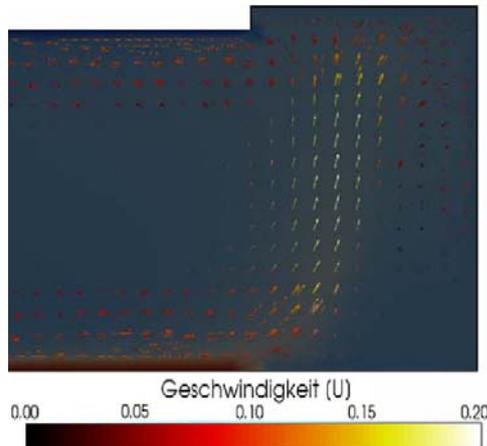


Abbildung 6: Geschwindigkeitsvektoren rechte Hälfte des Versuchsaufbaus – OpenFOAM-Berechnung

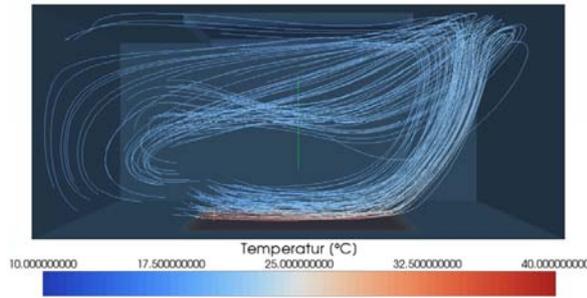


Abbildung 7: Stromlinien Open-FOAM-Berechnung

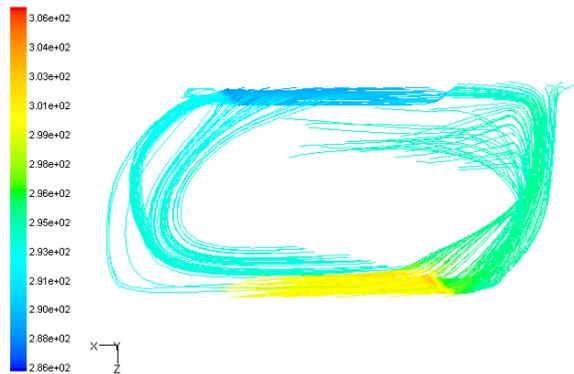


Abbildung 8: Stromlinien FLUENT-Berechnung

ANWENDUNGSFALL PRAXIS

Nach erfolgreicher Validation wurde der modifizierte Solver mit Boussinesq-Auftriebsströmungsmodell auf einen realistischen Fall aus der Praxis angewendet – ein verglastes Atrium mit einer Höhe von ca. 21 Metern und einer zentral angeordneten Eingangstür ohne Windfang, einem nach rechts versetzten Empfangstresen sowie zwei an den beiden Seiten angeordneten Fahrstuhlschächten für den Winterfall. Da bei dem gewählten Fall Zugluft bemängelt und punktuell Luftgeschwindigkeiten deutlich über 1 m/s gemessen wurden, wurde durch Ansatz der berechneten Lufttemperaturen und -geschwindigkeiten ein „Draught Rating“ nach DIN EN ISO 7730 (2006) durchgeführt.

Die dafür anzusetzende Gleichung lautet wie folgt:

$$DR = (34 - t_{a,l}) \cdot (\bar{v}_{a,l} - 0,05)^{0,62} (0,37 \cdot \bar{v}_{a,l} \cdot Tu + 3,14)$$

Für $\bar{v}_{a,l} < 0,05 \text{ ms}^{-1}$ ist $\bar{v}_{a,l} = 0,05 \text{ ms}^{-1}$

Für $DR > 100 \%$ ist $DR = 100 \%$.

Dabei ist

- $t_{a,l}$ die lokale Lufttemperatur in Grad Celsius, 20 °C bis 26 °C;
- $\bar{v}_{a,l}$ die lokale mittlere Luftgeschwindigkeit in Meter je Sekunde, $< 0,5 \text{ ms}^{-1}$;
- Tu der lokale Turbulenzgrad (%), in Prozent, 10 % bis 60 %, falls der Wert nicht bekannt ist, darf 40 % verwendet werden.

Da die bemängelten Verhältnisse nur in der Winterzeit auftreten, sind die Rahmenbedingungen

der Simulation auf diese Periode angepasst worden, was sich auf die Oberflächentemperaturen der Umfassungsflächen und die Temperatur der einströmenden Luft auswirkte.

Die Berechnung wurde anhand zweier Modelle mit unterschiedlichen Abstraktionsgraden durchgeführt, wobei diesen jeweils eine periodische Öffnung mit anschließender Schließung der Eingangstür unterstellt wurde, und alternativ die Tür geschlossen blieb. Somit ergaben sich für beide Modelle und Varianten vier Ergebnisse, die jedoch alle die gleiche Aussage zuließen: Durch die Undichtheiten in der Nähe der Fahrstuhlschächte stellen sich in dem Atrium unbehagliche Luftgeschwindigkeiten in Höhe von 1,50 m über dem Fußboden ein. Insbesondere für die am Empfangstresen sitzenden Angestellten stellt dies eine Beeinträchtigung der Behaglichkeit dar.

Als Lösungsansatz wurde eine Abschottung der Flächen in der Umgebung der Fahrstuhlschächte simuliert. Das Ergebnis zeigt erwartungsgemäß einen gravierenden Rückgang der Luftgeschwindigkeiten und damit verbunden weniger prozentuale Unzufriedene bezüglich des „draught rating“.

Die Wirkung der vorgeschlagenen Lösung konnte durch Messungen bei geschlossenen Türen und heruntergelassenen Brandschutztoren zumindest punktuell verifiziert werden.

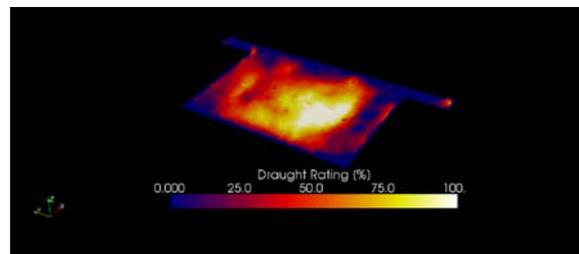


Abbildung 9 Draught Rating, Ausgangsfall

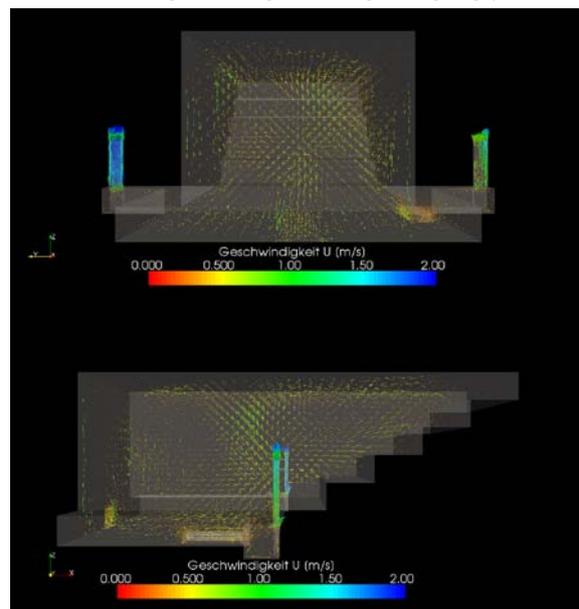


Abbildung 10 Geschwindigkeitsvektoren Ausgangsfall

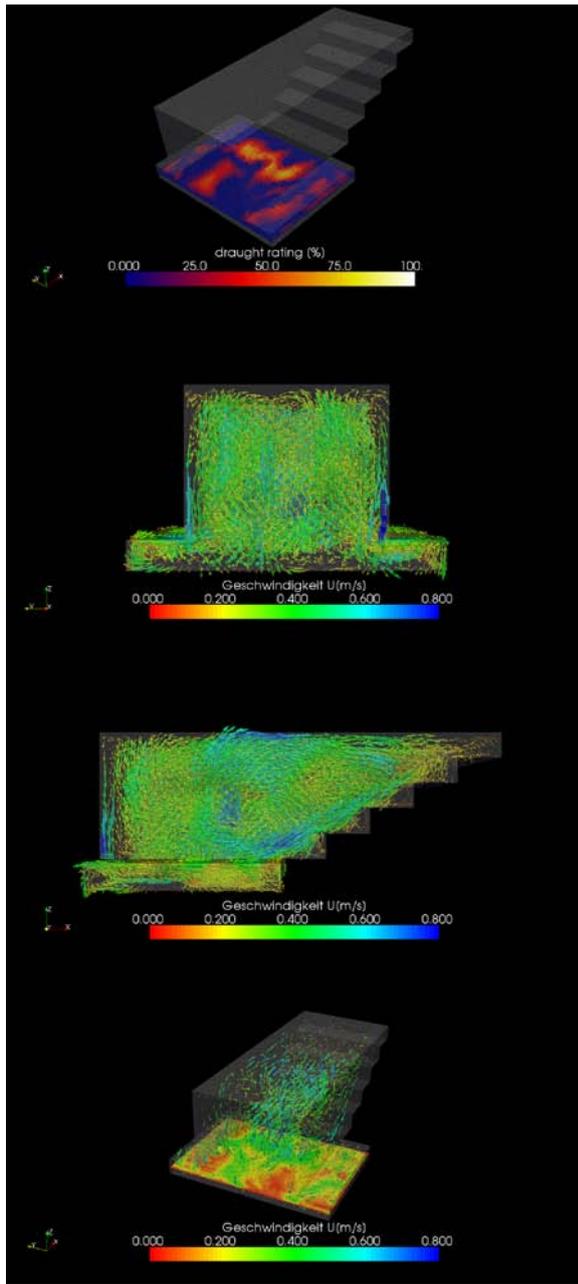


Abbildung 11 Lösungsvorschlag (Abschottung)

EINSATZ IN DER LEHRE

Ausgehend von den relativ guten gemachten Erfahrungen wird überlegt, OpenFOAM zukünftig in Veranstaltungen für fortgeschrittene Studierende der Physikalischen Technik einzusetzen. Da diese über relativ gute C- bzw. C++-Kenntnisse verfügen, scheint für diese sogar ein vertiefter Einstieg in das eigentliche Framework möglich und zumutbar.

Dass sich Spezifika des Löser durch Studium des Quellcodes erschließen lassen, ist dabei ein durchaus nicht zu unterschätzender Vorteil des Einsatzes von OpenFOAM gegenüber kommerziellen CFD-Tools.

CAD zur Geometrie-Erzeugung als der erste Schritt des Preprocessing ist in diesem Studiengang hingegen nicht im Pflichtprogramm, so dass im Rahmen des erstellten Curriculums in den entsprechenden Übungen von vorgegebenen Geometriemodellen ausgegangen wird und zur Erzeugung derselben auf CAD-Programme, die in Wahlveranstaltungen vorgestellt und eingeübt werden, lediglich verwiesen wird. Für die Gittergenerierung und Festlegung von Randbedingungen und Parametern laufen derzeit Verhandlungen mit dem Hersteller des o.g. kommerziellen Tools, mit dem sich die restlichen Schritte des Preprocessing und die Solver-Steuerung über eine grafische Benutzerschnittstelle realisieren lassen. Für den Einsatz in größeren Gruppen wird dies als Voraussetzung angesehen, um eine Betreuung bei Übungen zu gewährleisten.

Sollten die Verhandlungen nicht zum Ziel kommen, wird weiterhin der Einsatz von OpenFOAM bei Diplom- und Bachelorarbeiten unter Benutzung der kostenfreien Tools angestrebt.

FAZIT

OpenFOAM hat nicht nur im Rahmen des beschriebenen Projekts seine Tauglichkeit als ernsthaftes CFD-Tool bewiesen und stellt bereits mit den kostenfreien Zusatzprogrammen für Pre- und Postprocessing ein halbwegs komfortabel nutzbares CFD-Werkzeug sowohl für die Hochschulausbildung als auch zur Anwendung in der Praxis dar.

Durch verhältnismäßig preisgünstige kommerzielle Zusatzprogramme kann die Benutzerschnittstelle so gestaltet werden, dass sie vom Bedienkomfort vergleichbar zu kommerziellen CFD-Programmen wird.

Spätestens damit steht dem Einsatz an Hochschulen und in der Praxis nichts mehr entgegen.

LITERATUR

- Haupt, W. 2001: Zur Simulation von auftriebsinduzierten Innenraumströmungen. Dissertation Universität Kassel, 2001
- Zimmermann, F. 2005: CFD - nützliches Planungswerkzeug oder bunte Bilder? HLH 56 (2005), H. 10, S. 54-57
- Haupt, W., van Treeck, C. 2006: Experimentelle und numerische Untersuchungen von Auftriebsströmungen im Übergangsbereich. Proceedings BauSIM, 2006
- Herrmann, P. 2009: Raumströmungssimulation mit OpenFOAM. Diplomarbeit Lehrstuhl für Bauphysik, TU München, 2009

TRNSYS 17: NEUERUNGEN UND ANWENDUNG DER IEA BESTEST MULTI-ZONE NON-AIRFLOW IN-DEPTH DIAGNOSTIC CASES MZ320 – MZ360

Christian Frenzel, Marion Hiller
 TRANSSOLAR Energietechnik GmbH, Stuttgart, Germany

KURZFASSUNG

In der neuen Version TRNSYS 17 wurde das bestehende Mehrzonengebäudemodell durch die detaillierte Modellierung von 3-dimensionalem Energietransport durch Strahlung und thermische Schichtung erweitert (Aschaber, J. et al., 2009). Dabei werden die Genauigkeit, der Benutzeraufwand und die Fehlerquellenanfälligkeit hinsichtlich der Einbindung externer Verschattung und der Solarstrahlungsverteilung innerhalb des Gebäude-modells wesentlich verbessert.

Zur Validierung werden standardisierte qualitativ hochwertige Testfälle angewendet. Die Validierungsverfahren dienen dazu verschiedene Probleme in der Simulationssoftware zu identifizieren, wie zum Beispiel: Modell- und Programmierungsfehler, fehlende Features und Unklarheiten für den Anwender. Gleichzeitig dienen frühere Untersuchungen und Nutzerberichte als Basiswertungsgrundlage um den aktuellen Stand der Entwicklung zu überprüfen und zu vergleichen.

In dem folgenden Beitrag wird das neue detaillierte Strahlungsmodell in TRNSYS 17 kurz beschrieben. Zur Überprüfung von TRNSYS 17 wenden die Autoren die Validierungsprozeduren der IEA BESTEST Multi-Zone Non-Airflow In-Depth Diagnostic Cases: MZ320-MZ360 (Neymark, J. et al., 2008) an. Die Testfälle konzentrieren sich auf interzonale Wärmeleitung, Mehrzonenverschattung inkl. der Gebäudeeingangverschattung und interne Fenster. Die ermittelten Ergebnisse werden mit den Ergebnissen der ursprünglich getesteten Simulationsprogramme verglichen, unter anderem der vorherigen Version TRNSYS 16. Die Modellierungsunterschiede in Bezug auf TRNSYS 16, die Erfahrungen mit dem neuen Release und ausgewählte Ergebnisse werden in diesem Beitrag vorgestellt.

Die Ergebnisse von TRNSYS 17 zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der anderen Programme. Berichtete Fehler sowie die meisten Modellierungsschwierigkeiten bei vorherigen Programmversionen wurden durch die neuen detaillierten Modelle gelöst.

ABSTRACT

In the new release of TRNSYS 17, the existing multi-zone building model has been extended to include the detailed modeling of 3-dimensional energy transport by radiation and thermal stratification (Aschaber, J. et al., 2009). Thereby, the accuracy to model external shading and solar radiation distribution within zones is significantly improved while errors and user effort are notably reduced.

Particularly, the new release of TRNSYS 17 has been validated with a high quality test suite. These published validation procedures can serve to identify different problems in simulation software: modeling and coding errors, missing features and frequent sources of user confusion. Comparative reviews of previous tests serve as the basis to assess the current state of development.

This paper briefly describes the new detailed radiation model of TRNSYS 17. The authors applied the test suite of IEA BESTEST multi-zone non-airflow in-depth diagnostic cases (Neymark, J. et al., 2008) to TRNSYS 17. The tests focus on interzonal conduction heat transfer, multi-zone shading including building self shading and internal windows. The results are compared to the originally tested simulation programs, including the previous version TRNSYS 16.

The modeling differences with respect to TRNSYS 16, the experiences with the new release, and selected results are presented in this paper.

The results of TRNSYS 17 simulations agree very well to results of other participants. Reported modelling errors and most modelling difficulties of previous versions are solved by the new detailed models.

INTRODUCTION

In the new release of TRNSYS 17, the multi-zone building model so-called Type 56 has been extended to a detailed modeling of 3-dimensional energy transport by radiation and thermal stratification. Figure 1 provides an overview of the newly integrated features. These new features are optional

such that the user can adapt the level of detail according to the needs of the project. A detailed description of the models is given by Aschaber (Aschaber, J. et al., 2009) and the TRNSYS 17 manual (Klein et al., 2009).

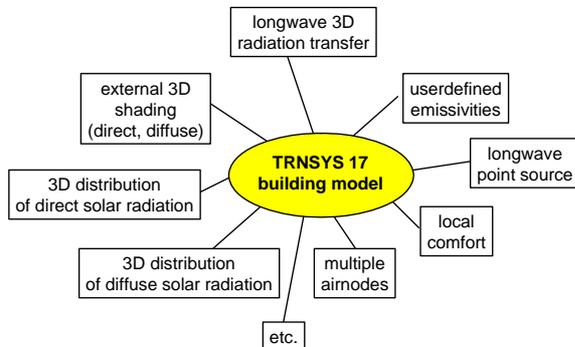


Figure 1: New features of the multi-zone building model

For validating the detailed radiation models implemented in TRNSYS 17 the multi-zone non-airflow test cases developed in IEA SHC Task 34/ECBCS Annex43 are conducted by the authors.

METHODOLOGY

The multi-zone non-airflow test cases are developed in IEA SHC Task 34/ECBCS Annex43 and represent an extension to the original IEA BESTEST (Judkoff, R. et al., 1995). The suite consists of five in-depth diagnostic cases M Z320 - M Z360 covering modeling of (Judkoff, R. et al., 2008):

- Interzonal conduction heat transfer, assuming one-dimensional conduction
- Multi-zone shading, including building selfshading
- Internal windows between zones

For each case specific output reporting requirements are given. The key figures in assessing tool capability are: annual and peak cooling load for the whole building and the specific zones, annual average air temperature for each zone, annual peak air temperature for each zone and its first time of occurrence, annual incident un-shaded total solar radiation on the exterior façade, disaggregated solar radiation on the exterior façade into beam and diffuse radiation, total and disaggregated radiation through each window and for specific zones a daily analysis of radiation and sensible cooling for the 14th of august and the 15th of march.

There are no formal criteria given when results of a program agree or disagree. However, the test suite allows software developers to compare their programs with the simulation tools originally tested, as well as with more recent results if they are publicly available. TRNSYS Version 16.01.0002 as

well as TRNSYS-TUD (a modified version based on TRNSYS 14.2 created by the university of Dresden) are two of the originally tested programs.

Case MZ320: 3-Zone Steady-State Conduction Analytical Verification Test

The multi-zone non-airflow test cases start with MZ 320 a relatively simple steady state analytical verification test for multi-zone conduction (see Figure 2).

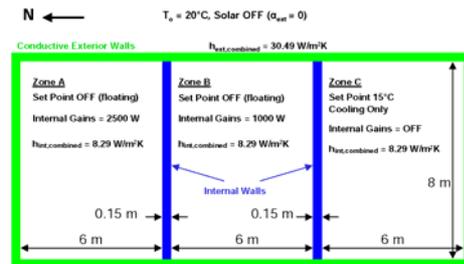


Figure 2: Case MZ320 3-Zone Steady-State Conduction Analytical Verification Test

Case MZ340–MZ355: In-Depth Multi-Zone Shading Test Cases

Cases M Z340-MZ355 are based upon the same geometry while the type of shading geometry is changing from no shading, to fin shading, and finally to automated building self-shading (see Figure 3). The building geometry is composed by 6 rectangular zones. The external windows are west orientated and there are no internal windows between the zones. The idealized window has solar transmittance of 1 and a thermal conductance of 0.

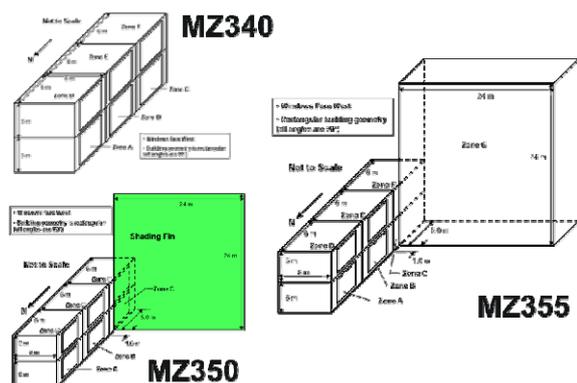


Figure 3: Case MZ340–MZ355 In-Depth Multi-Zone Shading Test Cases

MZ355 differs to the test cases M Z340 and M Z350 by an additional Zone G that is attached to two existing zones and replaces their glazing plus a certain part of wall by adjacent opaque wall elements. The new Zone G has no windows.

Infiltration, ventilation, and internal gains are set to 0. The solar absorptance of the interior wall surfaces, the exterior wall surface of zone G, and the shading fin is 100% such that no reflection is considered.

In addition to standard results, the differences between the results of the non-shaded case MZ340 (base case) and the shaded cases are evaluated.

Case MZ360: In-Depth Internal Window Calorimeter

In contrast to the previous test cases the three zones of test case MZ360 are placed in series (see Figure 4). Besides one external window, two internal windows are defined. The building orientation is set to 45° west of south. This test offers the ability to track transmitted beam and diffuse radiation and its distribution through multiple zones.

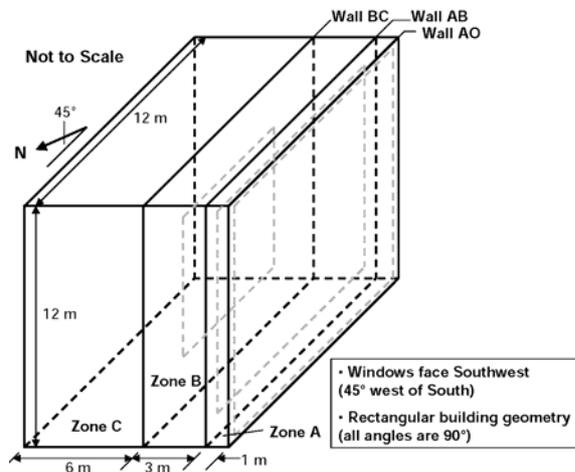


Figure 4: Case MZ360 In-Depth Internal Window Calorimeter

MODELLING ASSUMPTIONS DIFFERING TO TRNSYS 16

Since a previous version of TRNSYS is one of the originally tested simulation programs, this paper focuses on the differing modelling assumption applying the new TRNSYS 17 features.

Geometry input

For TRNSYS 17, the standard building description file is extended by the addition of 3D geometric information required by the new detailed radiation modes. For all test cases MZ340, MZ350, MZ355, and MZ360 the geometry of the building as well as the shading devices have been created by using the GoogleSketchup™ plugin Trnsys3d (Transsolar, 2010). Afterwards the model is imported to TRNBuild for adding further data like properties, materials, and outputs.

In TRNSYS 16, no 3D geometric information of the thermal model was included in the building description file.

Weather data reader and radiation processor

In TRNSYS 17 Type 109 is replaced by Type 15 and Type 99 as the standard weather data reader and radiation processor. For these Types including Type 16 the curving algorithm of the direct normal radiation is improved. Radiation spikes as reported by Type 109 (L'Hoest et al., 2008) on March 15th, hour 19 where the sun is partially down during the time step are avoided. Therefore, Type 15 is applied.

Exterior combined surface coefficients

Compared to TRNSYS 16.x the exterior surface infrared emittance is a direct user input. According to the test specification it is set to 0 and the convective surface coefficient is set to the combined value of 30.4872 W/(m² K).

In the previous TRNSYS versions, it wasn't possible to turn off the automatic long-wave radiation exchange of exterior surfaces. Setting the view factor to the sky of an exterior surface to 0 only avoids long-wave radiation exchange with the specified sky temperature. However, the long-wave radiation exchange with the ambient temperature of the surroundings, except the sky, is still calculated.

Interior combined surface coefficients

For defining the given interior combined surface coefficients the simple long-wave radiation mode of the building model is selected. In addition the convective surface coefficient is set to the combined value of 8.29 W/(m² K).

The simple long-wave radiation mode already existed in previous versions, but it was much more complicated for the user to activate.

Exterior shading model

For modelling shading effects by fixed external shading devices and building self-shading the new detailed external shading model integrated in to the multi-zone building model is applied. The geometry of the shading fin and the building itself is defined once, and the model checks automatically which windows are effected by the shading. The integrated model accounts for beam and isotropic diffuse sky radiation shading. Although TRNSYS offers more sophisticated sky models like the Perez model (Klein et al., 2009) an isotropic diffuse sky model is applied in order to obtain consistent results. The shading matrix is generated with a high resolution (2305 patches).

In TRNSYS 16.x the shading fin was modeled by Type34 (wingwall and overhang shading). The geometry of this component has to be defined for

each window separately and is limited to perpendicular external shading of a vertical window. In addition TRNSYS 16.x doesn't include building self-shading due to the lack of 3D geometric building description.

Direct radiation distribution model

The new detailed direct radiation distribution mode of the building model is activated during these tests. The insulation matrix is generated with high resolution. For each external window the sunlit fraction of the window that strikes each inside surface of a zone is calculated. Due to the fact that the automatic direct radiation distribution is restricted to external windows, user-defined distribution factors, so-called Geosurf's, are applied for zones with internal windows.

For determining the time-dependent Geosurf values of zone B the new detailed direct radiation model is applied. As shown in Figure 5 two additional zones B2 and C2 are simulated. The zone B2 is similar to Zone B, but the internal window AB is now an external window. The geometry of Zone A is defined as a shading for Zone B2. The resulting distribution factors of the external window of Zone B2 are used as the Geosurf values for Zone B.

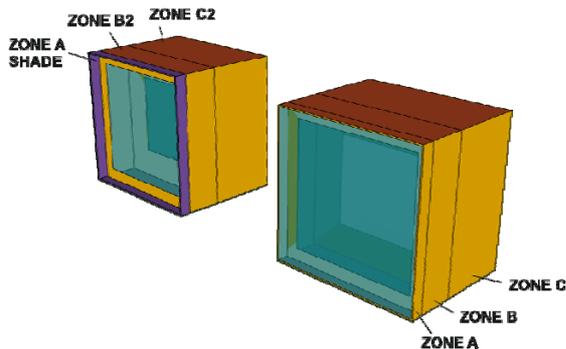


Figure 5: Case MZ360 – additional zones B2 and C2

For determining the internal radiation distribution after window BC constant Geosurf values were calculated according to the ratio between each surface and the total of the surfaces of the zone, excluding the window by which the solar radiation entered a zone.

For TRNSYS 16.x Geosurf values for all zones have been calculated according to the ratio between each surface and the total of the surfaces of the zone, excluding the window by which the solar radiation entered a zone. (L'Hoest et al., 2008)

Diffuse radiation distribution model

The new detailed diffuse radiation distribution mode of the building model is activated during these tests. Thereby, so-called Gebhart factors are applied, which are based on view factors. The short-wave diffuse radiation exchange between all surfaces of a

thermal zone is calculated explicitly, including all possible paths.

In TRNSYS 16.x a simple non-geometric method is implemented which may cause significant deviations for shallow zones with large unshaded windows in combination with high absorptive interior walls (see MZ 360). The incoming diffuse and reflected solar radiation is distributed according to absorptance-weighted area ratios. Thereby, an amount of the incoming diffuse radiation through a window is distributed back to that window and falling out of the zone even if there is no reflected solar radiation (walls solar absorptance = 1; window solar transmittance = 1). To avoid this problem the modelers of the university of Liège decided to add the diffuse radiation to the direct radiation and then distribute it by userdefined distribution factors (L'Hoest et al., 2008).

RESULTS AND ANALYSIS

The intent of this paper is not to present the complete results of applying IEA BESTEST Diagnostic Cases of TRNSYS 17. Rather it is to show the effects of the new detailed modelling approach compared to previous TRNSYS versions and to other simulation software. Based on the different capabilities and calculation methods of the several programs it is expected that there are differences in results throughout the case.

Case MZ320: 3-Zone Steady-State Conduction Analytical Verification Test

As result a the air temperature of each zone and the sensible cooling load for Zone C is obtained. The results show a good agreement with maximum deviation of 0.09 %

Case MZ340–MZ355: In-Depth Multi-Zone Shading Test Cases

In general, the results of TRNSYS 17 simulations agree very well to the results of other participants.

Figure 6 shows the annual transmitted total solar radiation of the different zones for the programs originally tested, as well as TRNSYS 17. The annual hourly integrated peak cooling load is shown in Figure 7.

The results show that the new modelling approach of external shading based on a discretisation of the half hemisphere in combination with bilinear interpolation for direct shading and integration for sky diffuse shading gives correct results. If instead of a high resolution of the discretisation (2305 patches) a medium resolution (577 patches) is selected, the annual transmitted total solar radiation of the different zones is reduced by a maximum of 0.6 %.

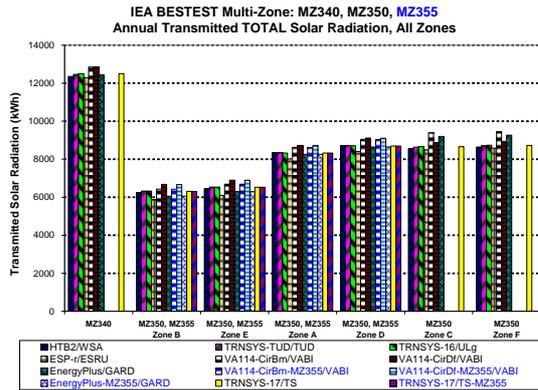


Figure 6: Multi-Zone Shading - Annual Transmitted Solar Radiation

In contrast to previous versions, TRNSYS 17 is able to run test case MZ 355 (automated building self shading). Since the effective shading geometry with respect to zones A, B, E and D of test case MZ350 and MZ355 are the same the results are equivalent too. For zone C and F the results differ due to the fact that these zones have no window in test case MZ355.

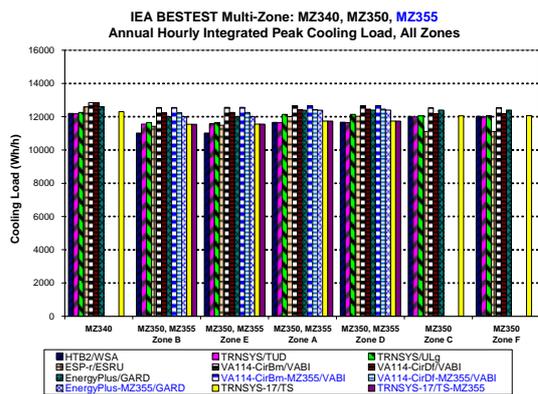


Figure 7: Multi-Zone Shading - Annual Hourly Integrated Peak Cooling Load

Case MZ360: In-Depth Internal Window Calorimeter

This case tests the ability to track transmitted beam and diffuse solar radiation through multiple zones.

The following Figure 8 - 10 show the hourly transmitted solar radiation on March, 15th of the external window OA, the first internal window AB and the second internal window BC, respectively.

The differences for external window OA are very small (see Figure 8). It can be seen that after 11 am the solar radiation is dominated by direct radiation.

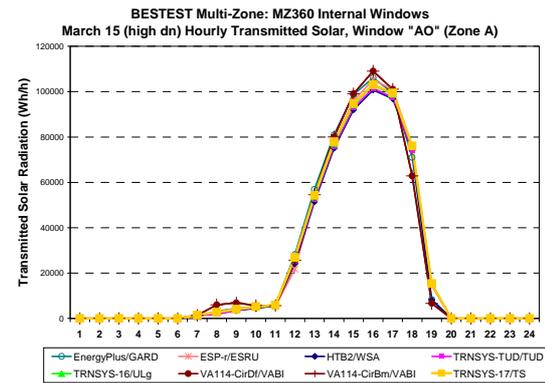


Figure 8: MZ360 Transmitted Solar, March 15th, WINDOW OA

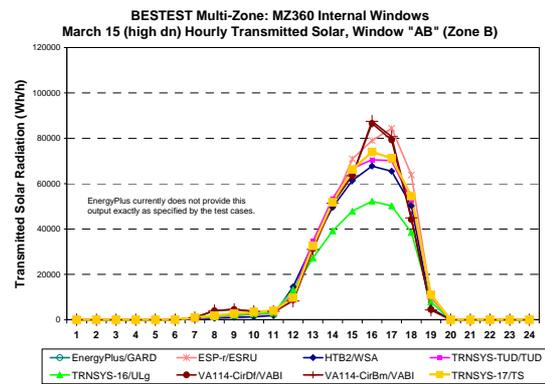


Figure 9: MZ360 Transmitted Solar, March 15th, WINDOW AB

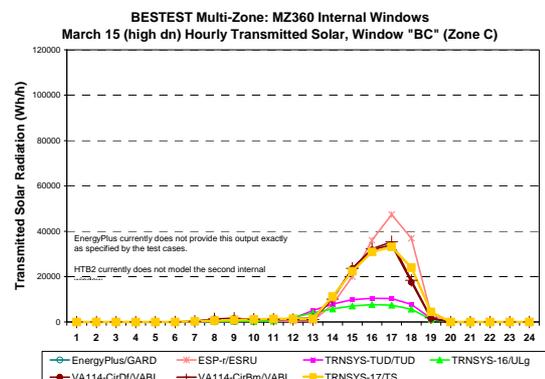


Figure 10: MZ360 Transmitted Solar, March 15th, WINDOW BC

For the first internal window AB, significant differences exist compared to the previously performed TRNSYS 16 calculations by the University of Liège (TRNSYS-16). These differences may be caused by the assumption of constant distribution factors for beam radiation where as TRNSYS17 and TRNSYS-TUD used factors depending on the sun's position. TRNSYS-TUD (Felsmann, 2008) applied a ray-tracing method and TRNSYS17 an insolation matrix combined with bilinear interpolation. Both methods lead to similar results.

For the transmitted solar radiation of the second internal window BC a significant deviation of the TRNSYS 17 calculation compared to both other program versions exists (see Figure 10). Both, TRNSYS-16 and TRNSYS-TUD use constant distribution factors. In contrast TRNSYS 17 applied factors depending on the sun's position. The results are similar to other programs using a detailed approach like VA114.

The resulting annual incident and transmitted solar radiation including the direct (I_{trb}) and the diffuse (I_{trd}) parts is presented in Figure 11. Besides the previously discussed differences in direct radiation distribution, the impact of the different diffuse radiation models of TRNSYS 17 and TRNSYS 16 is shown. The detailed model TRNSYS 17 is based on Gebhart-factors which are equivalent to view factors due to the absence of reflection. The improved approach used in TRNSYS 16 still yields to considerable deviation for shallow zones with large unshaded windows in combination with high absorption of interior wall surfaces.

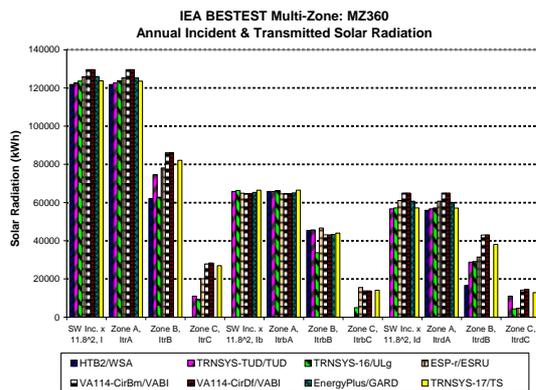


Figure 11: MZ360 Annual Incident and Transmitted Solar Radiation

The influence of the chosen resolution for generating the insulation matrices is rather small. If instead of a high resolution of the discretisation (2305 patches) a medium resolution (577 patches) is selected, the annual transmitted total solar radiation of the window AB is increased by 0.18 %.

The resulting annual sensible cooling load of the building and disaggregated zones are shown in Figure 12. Whereas the results for the whole building show a good agreement for all programs, significant differences occur for each zone. As discussed previously these differences are mainly due to different modelling approaches of radiation distribution. Programs with a detailed approach have a higher cooling load in zone C and lower cooling load in zone A.

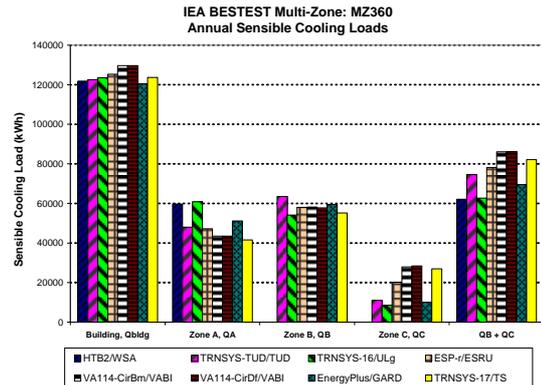


Figure 12: MZ360 Annual Sensible Cooling Loads

The tests show that the results of the new detailed distribution models are in good agreement with other simulation tools using a detailed approach like VA114.

Case MZ360: In-Depth Internal Window Calorimeter – additional results

Since the effort for determining time-dependent distribution factors for internal windows is relatively high the impact compared to a simplified approach is investigated. Therefore, additional runs are conducted where in zone B the distribution factor for direct radiation (Geosurf) are set according to the window area ratio. Thus, for window BC it is set to 0.49 and the remaining 51% area distributed to the wall surfaces.

The results are shown in Figure 13 – 16. Due to the simplified assumption the transmitted solar radiation of window BC is higher. The increase of the total annual transmitted solar radiation into zone C is increased by 29 %. Consequently, the annual cooling load of zone B is reduced by 14 % and the one of zone C increased by 29 %. Compared to the annual load the influence of the peak load is smaller. For zone B the hourly integrated peak cooling load is reduced by 10 % whereas for zone C it is increased by 3 %.

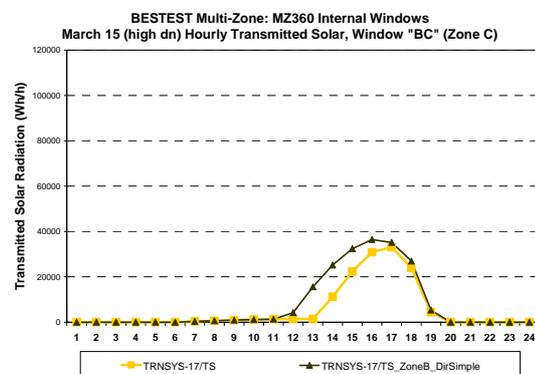


Figure 13: MZ360 Transmitted Solar, March 15th, WINDOW BC

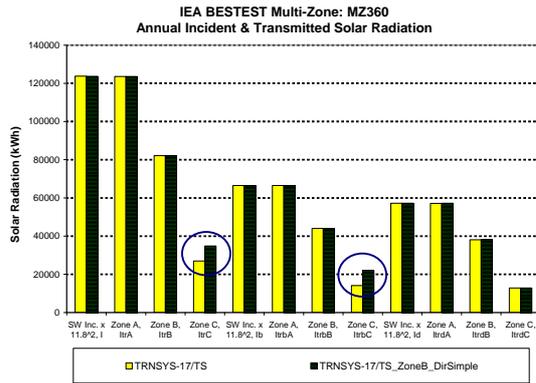


Figure 14: MZ360 Annual Incident and Transmitted Solar Radiation

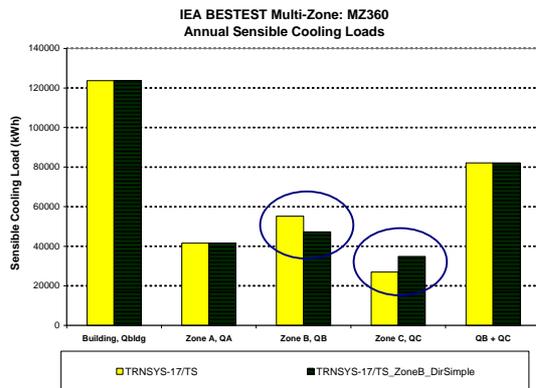


Figure 15: MZ360 Annual Sensible Cooling Loads

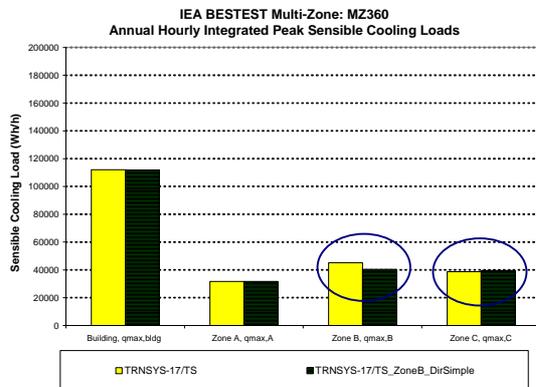


Figure 16: MZ 360 - Annual Hourly Integrated Peak Cooling Load

CONCLUSIONS AND OUTLOOK

The multi-zone non-airflow test cases developed in IEA SHC Task 34/ ECBCS Annex43 offer a very useful procedure to validate the detailed radiation models implemented in TRNSYS 17. The accomplishment of the test suite demonstrate that the new features are an improvement with respect to accuracy, user effort and error-proneness.

The results of TRNSYS 17 simulations agree very well to results of other participants. Reported

modelling errors and some modelling difficulties of previous versions are fixed.

The automatic external shading calculation reduces the input effort for the user significantly compared to previous versions. In addition, test case MZ355, automated self-shading, can now be conducted successfully.

The results of test case MZ 360 demonstrate the need of detailed direct and diffuse radiation distribution models for shallow zones with large windows.

The influence of the resolution (high or medium) for generating the shading and insolation matrices is very small.

Further work of TRNSYS development should include an extension of the automatic detailed solar radiation distribution to internal windows. Also, the shading model should be extended to more sophisticated diffuse sky models like the Perez model. In addition, the standard diffuse distribution model should be improved.

LITERATURE

Aschaber, J et al. 2009. TRNSYS17: New Features of Multi-zone Building Model, 11th International Building Performance Simulation Association Conference, Glasgow Scotland

Felsmann 2008. Appendix II-D, Modeler Report for BESTEST Cases MZ320 – MZ360 TRNSYS-TUD, Dresden University of Technology, Germany.

Klein, S.A. et al. 2009. TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program, SEL, University of Wisconsin, Madison USA.

Judkoff R., Neymark, J. 1995. International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, USA. NREL/TP-472-6231.

Judkoff R., Neymark, J. 2008. International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method, Multi-Zone Non-Airflow In-Depth Diagnostic Cases: MZ320-MZ360, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, USA. NREL/TP-550-43827.

L'Hoest J., Adam C., Rogiest C., André P. 2008. Appendix II-E, Modeler Report for BESTEST Cases MZ320 – MZ360 TRNSYS16, University of Liège, Belgium.

Transsolar 2010, Trnsys3d Plugin for Google SketchUp™, Available on http://www.trnsys.de/docs/userservice/userservice_updates_de.htm

ERSTELLUNG EINES ISOTHERMEN, ZONALEN MODELLS MIT IMPULSERHALTUNG

Victor Norrefeldt, Thierry Noudui, Christoph van Treeck, Gunnar Grün
Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Valley, Deutschland

KURZFASSUNG

Zonale Modelle unterteilen einen Raum in mehrere Unterzonen, die über Strömungspfade verbunden sind. Es wird eine neue Formulierung des zonalen Ansatzes vorgestellt, in der neben der Massen- auch die Impulserhaltung integriert ist. Das Modell besteht aus zwei Hauptkomponenten: den Volumina (Massenerhaltung) und den Strömungspfaden (Impulserhaltung). Ausgehend von den Eintrittsgeschwindigkeiten der Strömung in die Volumina und von der Druck- und Höhendifferenz zweier Volumina wird die Beschleunigung des Luftmassenstroms im Strömungspfad berechnet. Erste Versuche zeigen, dass das neue Modell sich gut eignet die globale Strömungsform vorherzusagen.

ABSTRACT

Zonal models subdivide an air volume (e.g. a room) into several subzones linked by flow paths. In this paper a new formulation of the zonal model is presented. Additionally to the mass conservation the impulse conservation is implemented. The model consists of two main components, the volumes (mass conservation) and the flow paths (momentum conservation). Based on the speed of the entering air flows into the volumes and the pressure- and height difference of two adjacent volumes, the acceleration of the air mass flow rate through the flow path is calculated. First tests show a good prediction of the global air flow pattern.

EINLEITUNG

Zonale Modelle verwenden üblicherweise ein sogenanntes Druckknotennetzwerk zur vereinfachten Modellierung von Luftmassenströmen zwischen Zonen. Im Gegensatz zu multizonalen Modellierungen wie beispielsweise Contam (2010) oder das Modell nach Wetter (2006), bei denen ein Gebäude unterteilt wird (zum Beispiel jeder Raum eine Zone), unterteilt ein zonales Modell ein Luftvolumen weiterhin in mehrere Unterzonen, die nicht durch Wände getrennt sind, sondern direkt an andere Luftvolumina angrenzen (ähnlich zur Finite-Volumen-Formulierung, Clarke (2001)). Somit wird die Möglichkeit geschaffen, lokale Betrachtungen in

einem Raum durchzuführen. Daoud et al. (2008b) haben beispielsweise ein zonales Modell für die energetische Berechnung eines Eisstadions genutzt. Gerade in diesem Anwendungsfall liegen in der Halle in den warmen Monaten Temperaturunterschiede von über 25 K vor, was die Annahme einer perfekten Durchmischung des Raumes nicht mehr zulässt.

Typischerweise liegt die Anzahl der Zonen zwischen zehn und hundert (Boukhris et al., 2009). Zonale Modelle stellen einen Kompromiss zwischen der hohen Genauigkeit von CFD-Simulationen und der niedrigen Rechenzeit eines dimensionsreduzierten Modells dar (vgl. Megri und Haghghat, 2007).

Generell zeichnet sich ein zonales Luftströmungsmodell durch die Abfolge von Volumenmodellen (Massenerhaltung) und Strömungspfaden (Druckverluste) in zwei- oder drei-dimensionaler Richtung aus. Strömungspfade verbinden benachbarte Volumina, womit abhängig vom Druck- und Höhenunterschied der Volumenmittelpunkte der Massenfluss und dessen Richtung berechnet werden kann.

In den Volumenmodellen ist im stationären Zustand die Summe der zu- und abfließenden Massenströme gleich:

$$\sum \dot{m}_{cu} = \sum \dot{m}_{ab} \quad (1)$$

In bisherigen Formulierungen wird die Strömung zwischen Volumina in den Strömungsmodellen über das Prinzip kommunizierender Röhren modelliert (zum Beispiel in Inard et al., 1996, Wurtz et al., 1999 und Boukhris et al., 2009). Die Geschwindigkeiten in den Volumina werden zu Null angenommen und die Geschwindigkeit im Rohr wird über die Bernoulli-Gleichung berechnet,

$$\dot{m} = \pm C_d \cdot A \cdot \rho \cdot \sqrt{2 \cdot \left| \frac{\Delta p}{\rho} + g \cdot \Delta h \right|}, \quad (2)$$

wobei C_d ein Verlustbeiwert, A die durchströmte Fläche, ρ die Dichte des Fluids, Δp und Δh der

Druck- beziehungsweise Höhenunterschied zweier Volumina und g die Erdbeschleunigung sind.

Wie viel Luft bei gegebenem Druckunterschied von einem Volumen ins andere strömt wird durch den Verlustbeiwert bestimmt. (Wurtz et al, 1999) geben an, dass der Wert $C_d=0,83$ üblich ist. Daoud und Galanis (2008a) hingegen haben festgestellt, dass der C_d -Wert auf die Strömung keinen Einfluss hat wenn die Quelle ein vorgegebener Massenfluss ist und allen Strömungspfaden der selbe C_d -Wert zugewiesen wird. Lediglich die Drücke in den einzelnen Zonen ändern sich. Daher empfehlen sie, Stoffwerte wie zum Beispiel die Dichte der Luft vorzugeben und nicht in den Zonen zu berechnen. Zudem ist der gesamte Druckverlust abhängig von der Anzahl der durchlaufenen Strömungspfade und somit von der Diskretisierung des Raumes.

Um nicht-uniforme C_d -Werte zu erhalten, schlagen Jiru und Hagighat (2005, 2006) vor, diese so anzupassen, dass das mit dem zonalen Modell errechnete Strömungsbild mit dem aus CFD-Simulationen erhaltenen übereinstimmt. Der Nachteil hierbei ist, dass jeder Strömungspfad einen anderen Verlustbeiwert besitzt und vorab CFD-Simulationen nötig sind. Ein weiterer Vorschlag stammt von Axley (2001). Bei diesem Ansatz wird anstatt des Verlustbeiwertes der Druckverlust infolge der Schubspannung an den Grenzen der Zonen berechnet. Je näher eine Zone an einer Wand ist, desto größer ist die Schubspannung in der Ebene, die parallel zur Wand ist.

Dadurch, dass die Strömung in den Volumenmodellen rechnerisch vollständig dissipiert wird, ist theoretisch jede beliebige Richtungsänderung möglich. Dies führt insbesondere bei antreibenden Strömungen, wie beispielsweise durch Luftauslässe oder Konvektoren verursacht, zu falschen Ergebnissen. Um dem Abhilfe zu schaffen, schlagen Inard et al. (1996) vor, zwei Zonentypen zu definieren: normale Zonen und Jet- bzw. Plume-Zonen. Während die Strömung in den normalen Zonen durch das zonale Modell beschrieben wird, wird die Strömung in den Jet- oder Plume-Zonen durch entsprechende Korrelationen beschrieben. Für diese antreibenden Zonen wird nicht die Massenerhaltung implementiert, sondern es wird ihnen erlaubt, Luft aus benachbarten „normalen“ Zonen mit anzutreiben.

Ein weiterer Ansatz die Luft in einem Raum zu zonieren stammt von Glück (2004). Hierbei wird der Raum in horizontale Scheiben unterteilt. Für jede dieser Zonen wird anhand des Wärme- und Luftaustausches eine Temperatur errechnet. Wärmequellen und -senken, wie zum Beispiel Wände, thermische Lasten, etc., sowie Lufteinlässe verursachen Strömungen, die je nach Temperatur auf- oder abwärts gerichtet sind. Diese Strömungen

saugen auf ihrem Ausbreitungsweg weiter Umgebungsluft in sich ein und verändern dabei ihre Temperatur. Die Ausbreitung wird durch empirische Modelle abgebildet. An den Zonengrenzen wird die Temperatur der Strömung errechnet. Ist diese bei aufsteigender Strömung höher als die Temperatur der darüberliegenden Zone wird die Strömung weiter aufsteigen. Ist dies nicht der Fall, endet die Strömung in der aktuellen Zone. Für absteigende Strömungen gilt dies entsprechend umgekehrt. Die Differenz an einer Zonengrenze zwischen auf- und absteigender Luft wird ausgeglichen, indem ein weiterer, nicht durch Korrelationen abgebildeter Luftaustausch zwischen den Zonen hinzugerechnet wird. Als Ergebnis erhält man somit die zu erwartende Schichtung der Lufttemperaturen im Raum. Glück (2004) gibt an, dass das Modell nur bei impulsarmer Einbringung der Luft in den Raum gültig ist.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bisherige Modelle bereits weit entwickelt wurden und mit entsprechenden Hilfestellungen auch zufriedenstellende Ergebnisse liefern. Jedoch haben sie auch inherente Nachteile, die die hier vorgestellte neue Formulierung behebt. Sie verhindert, dass die Strömung rechnerisch in den Volumina dissipiert wird. Für antreibende Strömungen muss nicht mehr ein eigener Zonentyp definiert werden, in dem die Strömung beispielsweise durch Jet-Korrelationen beschrieben wird, sondern der Weitertransport der Strömung in den Raum hinein wird schon durch das Modell sicher gestellt.

NEUE FORMULIERUNG DES ZONALEN MODELLS

Der hier vorgeschlagene Ansatz implementiert neben der Massen- auch die Impulserhaltung. Anstatt die Strömung beim Eintritt in ein Volumen rechnerisch zu dissipieren, wird deren Geschwindigkeit als richtungsabhängige Eigenschaft an das Volumen übergeben. Somit gehen nicht nur der Druck- und Höhenunterschied zweier Volumina in das Strömungsmodell ein, sondern auch die Geschwindigkeit, die die Strömung beim Eintritt in das Volumen hat. Geschwindigkeitsverluste werden durch die Viskosität der Strömung beschrieben.

Das hier vorgestellte zonale Modell unterscheidet sich von den Navier-Stokes-Gleichungen. Bei deren Lösung wird die Massen- und Impulserhaltung für jeden Knoten des Rechengitters erfüllt. In dem hier vorgestellten zonalen Modell hingegen wird nur die Massenerhaltung in den Volumina erfüllt. Die Strömungsgeschwindigkeit wird zwar als Eigenschaft an die Volumina übergeben, es wird hier allerdings nicht verlangt, dass sie die Impulserhaltung erfüllen muss. Die Impulserhaltung hingegen wird zwischen den Volumina in den

Strömungselementen implementiert. Den Strömungselementen werden die Geschwindigkeiten der verbundenen Volumina mitgeteilt und auf deren Basis wird die Impulserhaltung errechnet. Es kann aber durchaus sein, dass die somit erhaltene tatsächliche Strömungsgeschwindigkeit von den Eingangsgeschwindigkeiten differiert. Da die durchströmten Flächen aber gleich sind, ist die Massenerhaltung somit nicht gegeben.

Die gesamte Massen- und Impulserhaltung stellt sich erst durch das Zusammenspiel von Volumen- und Strömungselementen ein.

Strömungsmodell

Die formelmäßige Implementierung des zonalen Modells basiert auf der der Impulserhaltung (siehe Abbildung 1). Zudem wird der Strömung nur erlaubt sich entlang der drei festen Raumkoordinaten zu bewegen und nicht in anderen Richtungen. Dadurch werden Koppelterme in der vollständigen Impulsbilanz, wie zum Beispiel $u \cdot v$ oder $u \cdot w$ immer zu null. Bedingt hierdurch ist die Massenerhaltung in den Strömungselementen nicht gewährleistet.

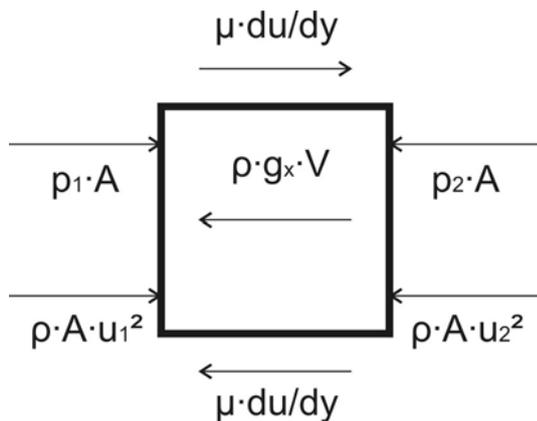


Abbildung 1 Impulsbilanz

Nimmt man an, dass obiges Volumen infinitesimal klein sei und bilanziert die Kräfte, so erhält man Gleichung (3). Beim viskosen Term wird die Annahme getroffen, dass die zweite Ableitung der Strömungsgeschwindigkeit in den Querrichtungen zur Strömung größer ist als längs der Strömung. Zudem wird angenommen, dass die Dichte in dieser Gleichung quasi-konstant ist. Deren Veränderung über der Zeit wird hier also vernachlässigt.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \cdot \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + g_x \quad (3)$$

Die Gleichungen für die v/y - bzw. w/z -Richtungen werden analog gebildet.

Basierend auf der Zonierung des Raumes wird Gleichung (3) diskretisiert. Diese Diskretisierung ist im Vergleich zu CFD-Simulationen grob.

Im Folgenden wird die Umsetzung der obigen Gleichung in einem Strömungsmodell gezeigt, das die Volumina i,j,k und $i+1,j,k$ verbindet. Ziel ist es, die Geschwindigkeit u der Strömung zwischen den beiden Volumina zu errechnen.

Für den Druckgradienten ergibt sich durch eine Diskretisierung erster Ordnung:

$$\frac{\partial p}{\partial x} \approx \frac{p_{i+1,j,k} - p_{i,j,k}}{x_{i+1} - x_i} \quad (4)$$

Der Impulsterm wird analog zu:

$$\frac{\partial u^2}{\partial x} \approx \frac{(u_{i+1,j,k}^2 - u_{i,j,k}^2)}{x_{i+1} - x_i} \quad (5)$$

Die viskosen Terme errechnen sich aus dem Mittelwert der zweiten Ableitungen der Geschwindigkeiten in den Volumina i,j,k und $i+1,j,k$. Die zweite Ableitung ist durch drei Größen determiniert. Diese sind jeweils die Geschwindigkeiten im aktuellen sowie in den zwei benachbarten Volumina, also i,j,k , $i,j-1,k$ und $i,j+1,k$ beziehungsweise $i+1,j,k$, $i+1,j-1,k$ und $i+1,j+1,k$. Am Beispiel der zweiten Ableitung von u nach y wird dies in Formel (6) gezeigt. Δy_j ist die Größe des Volumens in y -Richtung. Die Ableitung in z -Richtung wird analog gebildet.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \approx \frac{1}{2} \cdot \left\{ \frac{\left[\left(\frac{u_{i,j+1,k} - u_{i,j,k}}{y_{j+1} - y_j} \right) - \left(\frac{u_{i,j,k} - u_{i,j-1,k}}{y_j - y_{j-1}} \right) \right]}{\Delta y_j} + \frac{\left[\left(\frac{u_{i+1,j+1,k} - u_{i+1,j,k}}{y_{j+1} - y_j} \right) - \left(\frac{u_{i+1,j,k} - u_{i+1,j-1,k}}{y_j - y_{j-1}} \right) \right]}{\Delta y_j} \right\} \quad (6)$$

Grenzen die Volumina an eine Wand, so wird die Haftbedingung angenommen. Dies wird in Gleichung (7) gezeigt für den Fall, dass statt der Volumina $i,j-1,k$ und $i+1,j-1,k$ eine Wand angrenzt.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \approx \frac{1}{2} \cdot \left\{ \frac{\left[\left(\frac{u_{i,j+1,k} - u_{i,j,k}}{y_{j+1} - y_j} \right) - 2 \cdot \left(\frac{u_{i,j,k} - 0}{\Delta y_j} \right) \right]}{\Delta y_j} + \frac{\left[\left(\frac{u_{i+1,j+1,k} - u_{i+1,j,k}}{y_{j+1} - y_j} \right) - 2 \cdot \left(\frac{u_{i+1,j,k} - 0}{\Delta y_j} \right) \right]}{\Delta y_j} \right\} \quad (7)$$

Die Dichte in Gleichung (3) wird aus dem Mittelwert der Dichten in den verbundenen Volumina gebildet. Die Viskosität wird als Parameter vorgegeben. Hierdurch ist es möglich eine Viskosität einzuführen,

die ähnlich der turbulenten Viskosität Verluste in der Strömung gut repräsentiert und es dabei erlaubt den vereinfachten Gleichungssatz zu nutzen.

Durch lösen der Gleichung (3) erhält man mit Hilfe von Gleichung (8) den Massenstrom, der zwischen den beiden Volumina i,j,k und $i+1,j,k$ ausgetauscht wird.

$$\dot{m}_{i \rightarrow i+1, j, k} = u \cdot \rho \cdot A \quad (8)$$

Volumenmodell

Im Volumenmodell ist die Massenerhaltung in Form einer Differenzialgleichung implementiert, die die zeitliche Änderung der Dichte der enthaltenen Luft beschreibt. Im stationären Zustand ist diese Dichteänderung gleich Null und die zu- und abgeflossenen Luftmengen sind identisch.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\sum \dot{m}_{zu} + \sum \dot{m}_{ab}}{V} \quad (9)$$

Die Eigenschaft der Strömungsgeschwindigkeit im Volumen wird nach folgender Regel vergeben:

Fluid strömt links ein und rechts aus:

$$u_{i,j,k} = u_{links} \quad (10)$$

Fluid strömt rechts ein und links aus:

$$u_{i,j,k} = u_{rechts} \quad (11)$$

Fluid strömt links und rechts aus:

$$u_{i,j,k} = 0 \quad (12)$$

Fluid strömt links und rechts ein:

$$u_{i,j,k} = u_{links} - u_{rechts} \quad (13)$$

Entsprechend werden auch die Geschwindigkeiten v vor- und rückwärts und w in den vertikalen Richtungen gebildet.

ANWENDUNGSBEISPIEL

Die Ergebnisse des erstellten zonalen Modells werden den Messungen von (Nielsen 1990) gegenübergestellt. Nielsen hat einen Testraum (siehe Abbildung 2, $L \times H = 9 \times 3 \text{ m}^2$) vermessen, in dem sich oben links ein spaltförmiger Lufteinlass (0,168 m hoch, $u_0 = 0,455 \text{ m/s}$) und unten rechts ein Auslass (0,48 m hoch) befindet. Der Raum ist so konzipiert, dass in der Messebene eine zweidimensionale Strömung vorliegt.

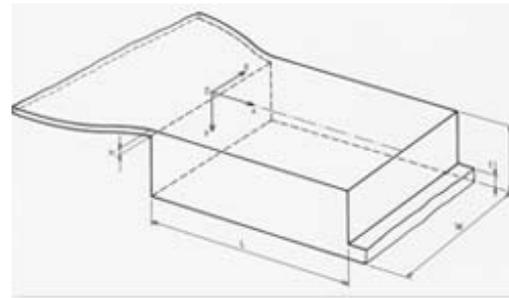


Abbildung 2 Raum nach Nielsen (1990)

Das Modell unterteilt den Raum in $6 \times 3 \times 6$ (Länge x Tiefe x Höhe) Zonen. Die Tiefe ist mit 3 m angenommen. Die Größe der Zonen ist in Längs- und Tiefenrichtung gleichmäßig gewählt. In der Höhe werden die untersten und die obersten Zonen entsprechend den Ein- und Austrittsöffnungen modelliert (also 0,48 m und 0,168 m Höhe). Dazwischen sind die Höhen gleich verteilt. Für die Viskosität wird der Wert 0,001 Pa·s verwendet. An der Eintrittsöffnung wird die konstante Geschwindigkeit 0,168 m/s vorgegeben. An der Austrittsöffnung wird ein konstanter Druck von 1013 hPa angesetzt.

Die Ergebnisse sind jeweils 3 m beziehungsweise 6 m vom Einlass entfernt bei halber Raumtiefe ausgewertet. In Abbildung 3 und Abbildung 4 wird ein Geschwindigkeitsprofil über der Höhe gezeigt. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse zeigt die Fähigkeit des zonalen Modells ($6 \times 3 \times 6$ Volumina) trotz grober Auflösung die globale Strömungsform gut zu erfassen, wengleich Abweichungen der Strömungsgeschwindigkeiten deutlich sind. Insbesondere die Rezirkulation wird zu schwach vorhergesagt. Hingegen die Höhe, bei die Rezirkulation endet, wird für beide Positionen gut vorhergesagt.

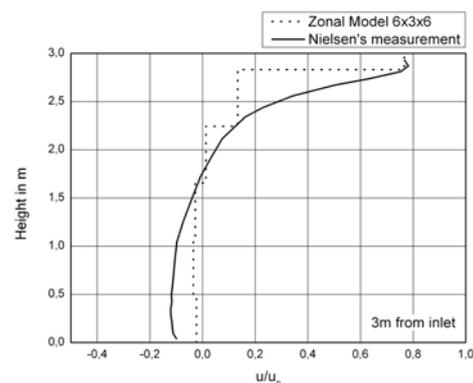


Abbildung 3 Vergleich des zonalen Modells mit Messungen, 3m vom Einlass

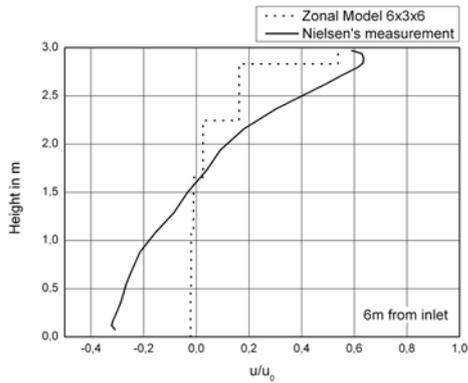


Abbildung 4 Vergleich des zonalen Modells mit Messungen, 6m vom Einlass

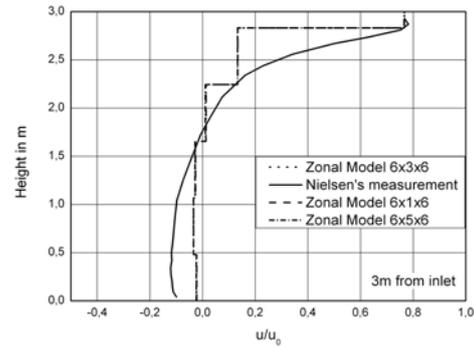


Abbildung 6 Gittereinfluss in Tiefenrichtung

Gitterabhängigkeit des zonalen Modells

Um die Gitterabhängigkeit zu prüfen, wird ausgehend von der 6x3x6-Zonierung die Anzahl der Elemente in jeweils einer Richtung verändert. Die Gesamtgröße des Raumes wird beibehalten. In Längs- und Tiefenrichtung zeigt sich nur eine sehr geringe Abhängigkeit der Ergebnisse von der Zonenzahl. Bei der Veränderung der Zonenzahl entlang der Höhe zeigt sich, dass die Strömung bei Erhöhung (6x3x8) feiner- bzw. bei Senkung (6x3x4) gröber dargestellt wird. Zudem wird die Rezirkulation bei dem Modell mit 8 Zonen entlang der Höhe zu weit oben vorhergesagt. Insgesamt zeigt sich das Modell aber robust gegenüber der Veränderung der Zonenzahl. Eine Auswertung der insgesamt im Raum zu- und abgeflossenen Luftmenge ergibt, dass diese unabhängig von der Zonierung gleich ist. Es wird also keine Luft im Raum akkumuliert.

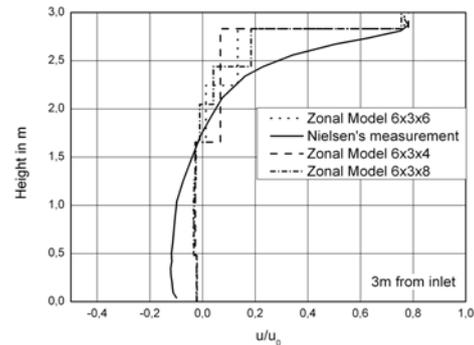


Abbildung 7 Gittereinfluss in Höhenrichtung

Wahl der Zonengrößen

Die optimale Wahl der Zonengrößen wurde bisher nicht eingehend untersucht. In dem hier gezeigten Beispiel wurden Zonen mit einer Größe von 0,15 bis 2,6 m³ verwendet.

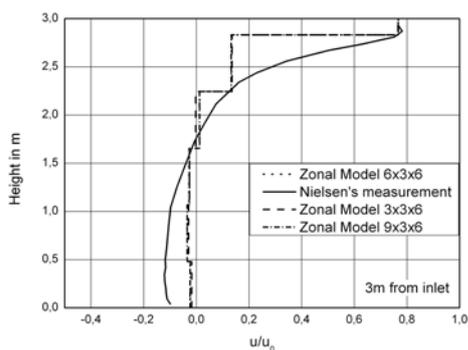


Abbildung 5 Gittereinfluss in Längsrichtung

ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Arbeit wird ein zonales Modell vorgestellt, in dem die Impulserhaltung implementiert ist. Durch Vereinfachungen entsteht an Stelle der Navier-Stokes-Gleichungen ein Gleichungssystem, das die Massenerhaltung in den Volumenelementen berechnet und die Impulserhaltung in den Strömungselementen. Somit sind die zwei Erhaltungsgleichungen räumlich um jeweils ein halbes Volumen versetzt.

Druck- und Höhenunterschiede treiben die Strömung an, die Viskosität bzw. eine effektive Viskosität bremsen sie. Um die Information der Strömungsgeschwindigkeit in den Raum hinein zu tragen, wird die Strömungsgeschwindigkeit am Eintritt des Volumens dem Volumen als Eigenschaft übergeben.

Ergebnisse des zonalen Modells sind zwar im Allgemeinen ungenauer als CFD-Simulationen, allerdings müssen weniger Gleichungen gelöst werden, was eine deutlich schnellere Abschätzung der Raumluftströmung zulässt.

AUSBLICK

Ziel des zonalen Modells ist es, schnell Rechenergebnisse zu produzieren unter der Wahrung einer gewissen räumlichen Auflösung. Gerade bei energetischen Betrachtungen mittels dynamischer Simulationen ist dies wichtig.

Für die Zukunft ist geplant, das zonale Modell auf nicht-isotherme Verhältnisse zu erweitern. Zudem sollten Ergebnisse des zonalen Modells mit CFD-Rechnungen verglichen werden, um die Stärken und die Grenzen der Formulierung besser abschätzen zu können. Eine Erhöhung der Genauigkeit des zonalen Modells könnte beispielsweise durch eine verbesserte Modellierung der Strömung im wandnahen Bereich erreicht werden.

Durch die räumliche Auflösung und durch die schnelle Rechengeschwindigkeit könnte ein zonales Modell, das auch Temperaturverteilungen im Raum berechnen kann, für Optimierungszwecke genutzt werden. Insbesondere wenn die Optimierung eine hohe Anzahl von Auswertungen erfordert zeigt sich die Stärke der zonalen Formulierung gegenüber CFD-Rechnungen. Ein Anwendungsbeispiel könnte die möglichst gute Platzierung von Wärmequellen im Raum sein, wie beispielsweise in einem Rechenzentrum.

DANKSAGUNG

This research is benefiting from the work that is being done in the European Community's Clean Sky JTI under grant agreement n° CSJU-GAM-ED-2008-001

LITERATUR

- Axley, J.W. 2001. Surface-drag flow relations for zonal modeling. *Building and Environment*, Vol. 36, pp. 843-850
- Boukhris, Y., Gharbi, L., Ghrab-Morcos, N. 2009. Modeling coupled heat transfer and air flow in a partitioned building with a zonal model: Application to the winter thermal comfort. *Building Simulation*, Vol. 2, pp. 67-74
- Clarke J.A., 2001, *Energy Simulation in Building Design*, Butterworth-Heinemann, 2nd Edition
- Contam, 2010,
<http://www.bfrl.nist.gov/IAQanalysis/>,
 eingesehen am 28.05.2010

- Daoud, A., Galanis, N. 2008a. Prediction of airflow patterns in a ventilated enclosure with zonal methods. *Applied Energy*, Vol. 85, pp. 439-448
- Daoud, A., Galanis, N., Bellache, O. 2008b. Calculation of refrigeration loads by convection, radiation and condensation in ice rinks using a transient 3D zonal model. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, pp. 1782-1790
- Glück, B. 2004. Dynamisches Raummodell zur wärmetechnischen und wärmephysiologischen Bewertung.
- Inard, C., Bouia, H., Dalcieux, P. 1996. Prediction of air temperature distribution in buildings with a zonal model. *Energy and Buildings*, Vol. 24, pp. 125-132
- Jiru, T.E., Haghghat, F. 2005. Macroscopic and microscopic analysis of zonal models. *Proceedings of the 9th IBPSA Conference*, pp. 1213-1220
- Jiru, T.E., Haghghat, F. 2006. A new generation of zonal models, *ASHRAE Transactions*, Vol. 112, pp. 163-174
- Megri, A.C., Haghghat, F., 2007. Zonal Modeling for Simulating Indoor Environment of Buildings: Review, Recent Developments, and Applications, *HVAC&R Research*, Vol. 13, pp. 887-905
- Wetter, M. 2006. Multizone Airflow Model in Modelica, *Modelica Conference*, Wien, 4.-5. September 2006
- Wurtz, E., Nataf, J.-M., Winkelmann, F. 1999. Two and three dimensional natural and mixed convection simulation using modular zonal models in buildings. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 923-940

DYNAMISCHE EXERGETISCHE ANALYSE VON GEBÄUDEN ANHAND DER GESAMTSYSTEMSIMULATION IN DER OBJEKT-ORIENTIERTEN PROGRAMMIERSPRACHE MODELICA

Azadeh Badakhshani und Dirk Müller
RWTH Aachen, E.ON Energy Research Center
Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik
Email: abadakhshani@eonerc.rwth-aachen.de

KURZFASSUNG

Exergie bezeichnet den Anteil an der Gesamtenergie eines Systems oder Stoffstroms, der bei einer Überführung in das thermodynamische Gleichgewicht mit der Umgebung Arbeit verrichten kann. In einer exergetischen Analyse wird nicht nur das System selbst, sondern auch seine Umgebung betrachtet. Das bedeutet beispielsweise, dass eine Wärmemenge, die bei einem hohen Temperaturniveau vorliegt, wertvoller ist als die gleiche Wärmemenge bei einem niedrigeren Temperaturniveau. Normalerweise wird, um den Exergiebedarf eines Gebäudes zu bestimmen, eine konstante Referenztemperatur angenommen. Allerdings zeigt dieser Ansatz Abweichungen zu dem tatsächlichen Exergiebedarf des Gebäudes, den man erhält, wenn der zeitliche und örtliche Verlauf der Temperaturen für die Exergieberechnung verwendet wird (Seifert et al, 2009).

In dieser Studie wurden Gebäude mit verschiedenen Übergabesystemen (Radiator und Fußbodenheizung) und verschiedenen Versorgungssystemen (Kessel und Wärmepumpe) simuliert.

Durch die Simulation wurde der Exergiebedarf dynamisch bestimmt. Die exergetischen Verluste in der Wärmeerzeugung, Wärmeverteilung und Wärmeübergabe wurden jeweils miteinander verglichen. Der benötigte Exergieeintrag, die Exergieverluste und der Exergiebedarf wurden für die Berechnung der Exergiekennzahlen verwendet, um die verschiedenen Systeme exergetisch zu evaluieren.

Die Simulation wurde in der Objekt-orientierten Programmiersprache Modelica durchgeführt. Die für die Simulation benutzten HVAC- und Gebäude-Modelicabibliotheken wurden in unserem Institut entwickelt.

ABSTRACT

In an exergy analysis not only the system itself but also its surroundings are considered. It is common to determine the exergy demand of a building using a constant reference temperature. However, the mean value of outside temperature as a constant reference temperature can lead to wrong exergy demand estimates because of transient effects in buildings with changing room temperatures (Seifert et al., 2009).

In this work a building with a certain exergy demand has been simulated for different cases with different supply and heat delivery systems. Our simulation considers two different supply systems: a normal boiler and a heat pump and two heat delivery systems: a radiator and floor heating. Based on the simulated exergy losses due to transmission and ventilation, the exergy demand of a building can be determined and compared to the transferred exergy of the heat delivery system and installation. The exergy losses in distribution, generation and delivery have been determined and compared with each other. Finally, the exergy demand, and the exergy of generation and distribution have been used to define the characteristic figures of the entire system. This simulation approach can be used as an evaluation measure for exergy efficiency in buildings and their installation. The hydraulic and thermal behaviour of the building is simulated via the object oriented programming language Modelica. The HVAC and building components used in the models were developed in our institute.

EINLEITUNG

Der Begriff „Exergie“ stammt aus dem zweiten thermodynamischen Hauptsatz. Nach dem ersten thermodynamischen Hauptsatz ist Energie eine Erhaltungsgröße, die in verschiedenen Formen vorkommt und von einer Form zu einer anderen konvertierbar ist.

Der zweite thermodynamische Hauptsatz besagt, dass es eine Unsymmetrie bezüglich der Umkehrbarkeit der Energieumwandlungsprozesse gibt (Baehr et al, 2009). Während mechanische Arbeit oder elektrische Energie vollständig in Wärme umgewandelt werden kann, ist die Umwandlung von Wärme in Arbeit jedoch irreversibel. Exergie ist die maximale Arbeit, die erzeugt werden kann, wenn das System ins thermodynamische Gleichgewicht mit der Umgebung kommt.

Exergie bezeichnet die Qualität der Energie. In einer exergetischen Analyse wird die Umgebung berücksichtigt. Von daher ergänzt eine exergetische Analyse die energetische Bewertung von Systemen und stellt die Optimierungsmöglichkeiten dar, die durch eine reine Betrachtung der Energiebilanz im System nicht zu erfassen sind. Der Qualitätscharakter

der Exergie hilft die Energieressourcen effizienter auszunutzen.

Im Bereich der Gebäude- und Anlagentechnik wird das Konzept der Exergie zur Bewertung der Systeme immer mehr benutzt (Dincer, 2002 und Schmidt, D. 2004). In diesem Bereich hat sich seit einigen Jahren der Begriff „LowEx“ für exergieeffiziente Gebäude- und Anlagentechnik etabliert (LowEx.net und LowEx.info).

Für die Bewertung eines Gebäudes und dessen Versorgungssystems werden einerseits der Exergiebedarf und andererseits die Aufwandsexergie der Anlagentechnik betrachtet. Dabei wird jede Komponente in Hinsicht auf die exergetischen Verluste analysiert. In dieser Studie wurde anhand der exergetischen Kennzahlen sowohl eine komponentenbasierte Analyse als auch eine Gesamtsystemanalyse durchgeführt. Das heißt, es wurde die eingesetzte Exergie mit dem Exergiebedarf des Gebäudes verglichen, um das Gesamtsystem zu bewerten.

Die Simulationen wurden in der Objekt-orientierten Programmiersprache Modelica durchgeführt. Für die Erstellung der Modelle wurden zwei von der Modelica Association entwickelte Komponenten-Bibliotheken benutzt: die Modelica Standard Bibliothek und Modelica-Fluid. Die restlichen Komponenten für die Modellierung des Gebäudes und der Anlagentechnik wurden in unserem Institut, Lehrstuhl für Gebäude und Raumklimatetechnik der RWTH Aachen entwickelt.

BERECHNUNG DES EXERGIEBEDARFS

Der Heizwärmebedarf eines Gebäudes ist wie folgt definiert:

$$\dot{Q}_H = (\dot{Q}_T + \dot{Q}_V) - (\dot{Q}_S + \dot{Q}_i) \quad (1)$$

wobei \dot{Q}_H der Heizwärmebedarf ist, \dot{Q}_T und \dot{Q}_V jeweils die Transmission- und Ventilationsverluste sind. \dot{Q}_S ist der solare Wärmegewinn und \dot{Q}_i kennzeichnet die internen Lasten, die durch interne Wärmequellen wie Menschen, Beleuchtung und technische Geräte entstehen.

Der Exergiegehalt eines Wärmestroms kann durch die Multiplikation des Wärmestroms mit dem Carnot-Faktor errechnet werden, wobei der Carnot Faktor mit der Umgebungstemperatur und der Temperatur zu bilden ist, bei der der Wärmestrom die Systemgrenze verlässt (Baehr et al, 2009). Von daher ist der Exergiebedarf eines Gebäudes durch folgende Formel gegeben:

$$E\dot{x}_H = \eta_{Carnot} \cdot \dot{Q}_H = \left(1 - \frac{T_u}{T_R}\right) \cdot \dot{Q}_H \quad (3)$$

T_u ist die Referenztemperatur und T_R steht für die Raumtemperatur.

Die Auswahl der richtigen Referenztemperatur spielt hierbei eine wesentliche Rolle. Abbildung 1 zeigt für die Wetterzone Berlin und Potsdam (Vierte Wetterzone von Deutschlands Testreferenzdaten TRY04) den dynamischen Verlauf der Temperatur, den Jahresmittelwert und den Mittelwert der Temperatur in jedem Monat.

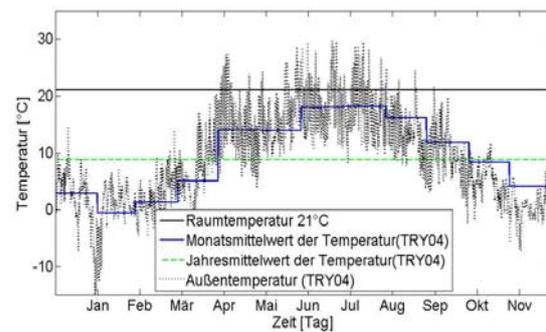


Abbildung 1 Verlauf der Außentemperatur in TRY04

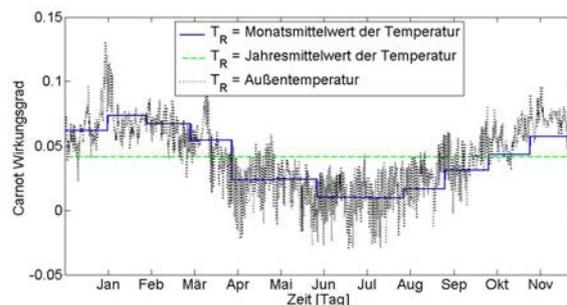


Abbildung 2 Carnot Wirkungsgrad (T_R ist 21°C)

Abbildung 2 stellt den berechneten Carnot-Wirkungsgrad für eine Raumtemperatur von 21°C dar, wobei drei verschiedene Referenztemperaturen benutzt wurden:

- die Außentemperatur
- der Mittelwert der Außentemperatur im Jahr
- der Mittelwert der Außentemperatur in jedem Monat.

Je nachdem wie groß die Abweichung zwischen Raum- und Referenztemperatur ist, ist der Carnot Faktor entsprechend größer oder kleiner. Die Wahl der Referenztemperatur ist daher von großer Bedeutung und beeinflusst den berechneten Exergiebedarf.

Abbildung 3 zeigt die Simulationsergebnisse für den Exergiebedarf eines Gebäudes in einer Heizperiode. Es handelt sich um die Simulation eines gut gedämmten Gebäudes (ca. 80 m^2 Grundfläche). Die Außenwände haben eine Dämmschicht aus Polystyrolschaum (XPS) mit einer Dicke von $0,14\text{ m}$

und einer Wärmeleitfähigkeit von 0,03 W/mK. Die Fenster haben eine 2-fache Verglasung. Der U-Wert des Fensterrahmens ist 0,157 W/m²K und die Fensterscheiben haben einen U-Wert von 0,8 W/m²K.

Für die Berechnung des Energiebedarfs wurde das Modell eines idealen Wärmeübertragers benutzt. Der Wärmefluss über den Wärmeübertrager wird so eingestellt, dass die Raumtemperatur auf einer konstanten Temperatur von 21°C gehalten wird.

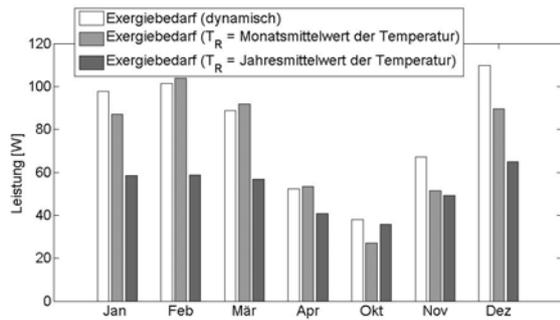


Abbildung 3 Exergiebedarf eines Gebäudes

In Abbildung 3 wird die Abhängigkeit des Exergiebedarfs von der Referenztemperatur deutlich. Bei der Verwendung der Jahresmittelwerttemperatur als Referenztemperatur (schwarzer Balken in der Abbildung) bleibt der Exergiebedarf für die Monate Dezember bis März fast konstant. Dies läßt die Schwächen des Ansatzes erkennen. Die Abbildung zeigt ebenfalls, dass die beiden alternativen Ansätze (Monatsmittelwert bzw. dynamische Außentemperatur) zu ähnlicheren Werten führen. Allerdings ist die Differenz der berechneten Werte auch für diese beiden Ansätze im Dezember relativ groß.

In den folgenden Simulationen und Überlegungen wird als Referenztemperatur die dynamische Außentemperatur benutzt.

EXERGETISCHE KENNZAHLEN

Die folgende Relation beschreibt die exergetische Bilanz für eine dynamische Berechnung (Seifert et al, 2009).

$$\dot{E} = \dot{E}_{\text{Bedarf}} + \dot{E}_{V,\text{Verteilung}} + \dot{E}_{V,\text{Übergabe}} + \dot{E}_{V,\text{Erzeugung}} \quad (5)$$

Hierbei entsprechen die Verteilungsverluste den Wärmeverlusten durch die Rohre und der Hilfsenergie der Pumpen. Übergabeverluste bezeichnen die Differenz zwischen der Übergabeexergie der Wärmeübergabesysteme und dem Exergiebedarf des Gebäudes. Exergetische Verluste der Erzeugung stellen die Exergievernichtigungen (Irreversibilitäten bei den

Verbrennungsprozessen) und die Exergieverluste während der Wärmeerzeugung dar.

Somit sind die exergetischen Aufwandszahlen definiert (Seifert et al, 2009) als:

$$\kappa_{\text{Wärmetransport}} = \frac{\dot{E}_{V,\text{Verteilung}} + \dot{E}_{V,\text{Übergabe}}}{\dot{E}_{\text{Bedarf}}} \quad (6)$$

$$\kappa_{\text{Erzeugung}} = \frac{\dot{E}_{V,\text{Erzeugung}}}{\dot{E}_{\text{Bedarf}}} \quad (7)$$

Eine Aufwandzahl wurde definiert um eine Gesamtsystembewertung zu ermöglichen. Dabei wird die insgesamt eingesetzte Exergie, die Summe von Hilfsexergie und Erzeugungsexergie, mit dem Bedarf verglichen:

$$\kappa_{\text{gesamt}} = \frac{\dot{E}_{\text{eingesetzt}}}{\dot{E}_{\text{Bedarf}}} \quad (8)$$

Im Folgenden werden auf Basis dieser Kennzahlen eine dynamische exergetische Analyse vorgestellt. Beispielhaft wurden Gebäude und Versorgungssysteme in Modelica abgebildet und simuliert. Die Simulationen wurden für den Monat Januar durchgeführt. In den Modellen wurden die Wetterdaten von TRY04 eingesetzt.

Die bauphysikalischen Eigenschaften der simulierten Gebäude sind identisch mit dem Gebäude, das im letzten Abschnitt vorgestellt wurde.

Beispiel 1: Vergleich der Übergabesysteme

In dem ersten Beispiel werden zwei identische Gebäude mit identischem Versorgungssystem miteinander verglichen. Der einzige Unterschied besteht darin, dass ein Gebäude als Wärmeübertrager einen Radiator besitzt und das zweite Gebäude stattdessen mit einer Fußbodenheizung (FBH) ausgestattet ist. Als Versorgungssystem wurde das Modell eines Brennwertkessels eingesetzt. Ein Thermostatventil sorgt für die Temperaturregelung in dem Gebäude. Für die Wärmeverteilung wurde ein Modell einer Pumpe benutzt, die nach drei verschiedenen Regelungsstrategien funktionieren kann: konstanter Druckabfall, konstante Drehzahl oder konstanter Volumenstrom.

Die Simulationsergebnisse sind in Abbildung 4 dargestellt. Die eingesetzte Exergie für die Versorgung ist die Exergie des Brennstoffes. Abbildung 5 vergleicht den Exergiebedarf des Gebäudes mit der Übergabeexergie der einzelnen Wärmeüberträger. Wie in der Abbildung zu sehen ist, ist im Falle des Radiators die Übergabeexergie mehr als dreimal so hoch wie der Exergiebedarf. Im Gegensatz dazu ist im Falle einer Fußbodenheizung die Übergabeexergie nur ungefähr zweimal so hoch wie der Exergiebedarf. Damit sind die Exergieverluste im Falle des Radiators wesentlich höher.

Die exergetischen Kennzahlen sind in Tabelle 1 dargestellt. Wie aus der Tabelle ersichtlich ist, sind die oben besprochenen Exergieverluste relativ klein im Verhältnis zu den Erzeugungsverlusten und dem Pumpenbedarf (Verteilungsverluste), der für den hydraulischen Ausgleich in Fußbodenheizungssystemen erforderlich ist.

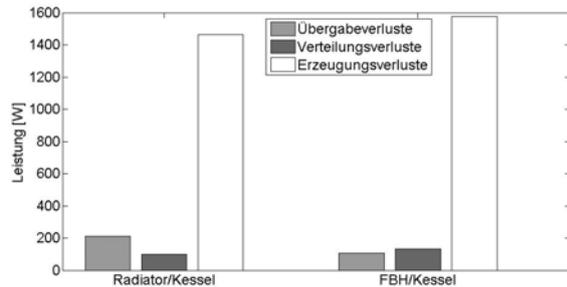


Abbildung 4 Exergetische Verluste

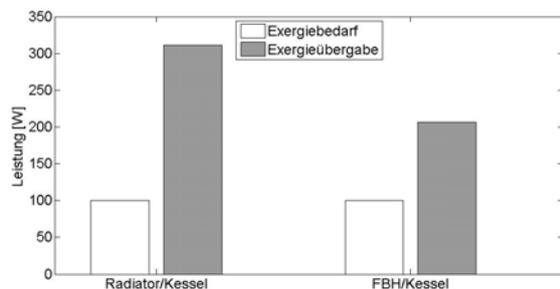


Abbildung 5 Ein Vergleich zwischen Übergabeexergie eines Radiators und einer Fußbodenheizung

Tabelle 1

Berechnete Aufwandszahlen für das erste Beispiel

	Erzeugung	Wärmetransport	Gesamt
Radiator	14	2	17,4
FBH	12,8	1,8	15,4

Beispiel 2: Vergleich der Erzeugungssysteme

In diesem Beispiel werden zwei Erzeugungssysteme exergetisch betrachtet. Ein Gebäude wird mit einem konventionellen Brennwertkessel beheizt und das andere Gebäude besitzt ein erdgekoppeltes Wärmepumpensystem. Die Vorlauftemperatur und der Volumenstrom der Erdsonden wurden konstant angenommen. Beide Gebäude sind mit einer Fußbodenheizung ausgestattet. Die Kapazität der simulierten Wärmepumpe ist so angepasst, dass es für die Beheizung eines Gebäudes mit einer Fläche von ca. 80 m² ausreicht. Die bauphysikalischen Eigenschaften der beiden Gebäude sind identisch. Die Simulation wurde für den Monat Januar durchgeführt. Abbildung 6 zeigt die graphische Darstellung des Modells mit der Erdwärmepumpe.

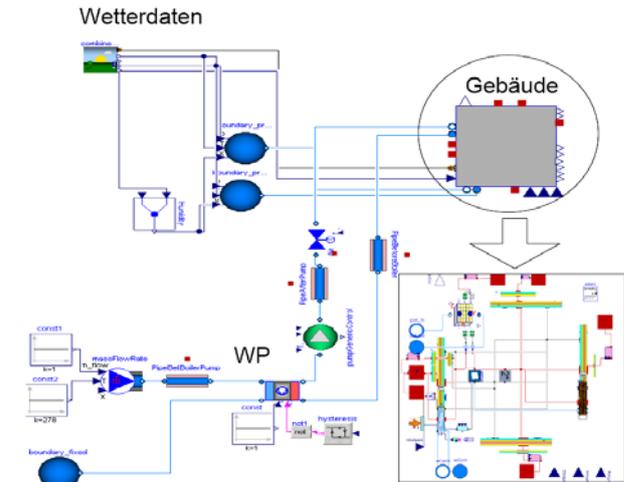


Abbildung 6 Graphische Darstellung des Wärmepumpensystems in Modelica/Dymola

Die Simulationsergebnisse sind in Abbildung 7 zusammengefasst. Tabelle 2 zeigt die berechneten exergetischen Kennzahlen. Die relativ hohen Verteilungsverluste in dem System mit Kessel (im Vergleich zum Wärmepumpensystem) kommen dadurch zustande, dass die Vorlauftemperatur im ersten Modell (mit dem Kessel) höher ist. Die Randbedingungen für die Rohre sind in beiden Modellen identisch, so dass höhere Wärmeverluste über die Rohre ergeben. Wie im letzten Abschnitt erwähnt, ist die eingesetzte Exergie für den Brennwertkessel die Exergie des Brennstoffs. Für die Erdwärmepumpe ist die eingesetzte Exergie der Strombedarf des Kompressors.

Wie Abbildung 7 zeigt, sind für das Modell mit Kessel, die Erzeugungsverluste ungefähr dreimal so hoch wie im Modell mit der Wärmepumpe. Allerdings soll erwähnt sein, dass die hydraulischen Verluste der Erdsonde in dieser Analyse nicht berücksichtigt wurden und sich die Ergebnisse für die Wärmepumpe somit besser darstellen.

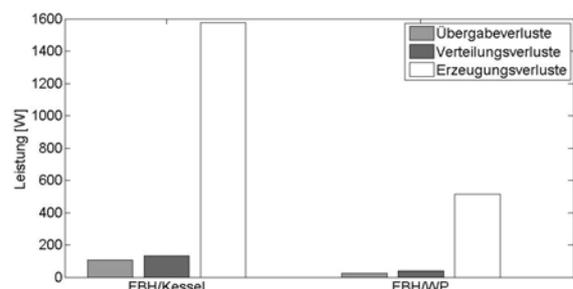


Abbildung 7 Simulationsergebnisse für das zweite Beispiel

Tabelle 2

Berechnete Aufwandzahlen für Wärmepumpen- und Kesselsystem

	Erzeugung	Wärmetransport	Gesamt
WP	3,9	1,3	5,1
Kessel	12,8	1,8	15,4

DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Die Modelle, die in dieser Studie exergetisch betrachtet wurden, sind nicht validiert. Anhand der Ergebnisse der vorliegenden Simulationsstudie ist aber zu erkennen, dass die exergetische Bilanzierung ein thermodynamisch gesichertes Verfahren zur Bewertung und zum Vergleich von Anlagensystemen und Gebäuden darstellt.

Der Exergiebedarf berücksichtigt nicht nur das System, sondern auch seine Umgebung. Dies ist ein Vorteil, weil der Ansatz damit erlaubt, den lokalen Umgebungszustand mit in den Vergleich verschiedener Systeme einzubeziehen. Um aussagekräftige Vergleiche von verschiedenen Systemen möglich zu machen, ist es notwendig, einen global gültigen Ansatz für die Berechnung der Referenztemperatur oder -allgemeiner gesagt-, des Referenzzustandes anzusetzen. Wie bei der Berechnung des Exergiebedarfs ersichtlich, liefern die verschiedenen Ansätze (Tages- oder Monatsdurchschnittstemperatur, etc.) sehr unterschiedliche Exergiebedarfswerte. Daher ist der Vergleich von Werten, die mit verschiedenen Ansätzen berechnet wurden, nicht aussagekräftig.

Die Exergiekennzahlen vergleichen Bedarf mit tatsächlichem Exergieaufwand. Die Exergiekennzahl des Wärmetransports und der Erzeugung liefern eine komponentenbasierte Evaluierung und die dritte Kennzahl, wo die insgesamt eingesetzte Exergie mit Exergiebedarf verglichen wird, dient als Bewertung des Gesamtsystems. Um eine umfassende exergetische Analyse zu machen, müssen alle Kennzahlen berücksichtigt werden.

Es ist zu beachten, dass, in der dargestellten exergetischen Analyse Strom als reine Exergie betrachtet wurde. Um eine umfassende Analyse zu präsentieren, sollten auch die Verluste während der Stromerzeugung betrachtet werden. In Beispiel 2 wurde gezeigt, dass die Exergie der Erzeugung bei der Wärmepumpe relativ gering ist. Wären die Exergieverluste bei der Stromproduktion mit einbezogen worden, dann könnte es sein, dass das System mit dem Brennwertkessel exergetisch bessere Ergebnisse bekommt. Ähnliches gilt für die Hilfsenergie der Pumpen – auch dort muss der Strombedarf genauer exergetisch bewertet werden.

AUSBLICK

In den nächsten Schritten dieses Projektes werden die Modelle validiert. Dabei ist geplant, eine Gesamtsystemsimulation durchzuführen und ein Monitorgebäude und seine Anlagentechnik in Modelica abzubilden.

Die exergetischen Kennzahlen werden weiter bearbeitet. Insbesondere der Exergiebedarf soll noch detaillierter betrachtet werden. In dieser Studie wurde nur der thermische Teil des Bedarfs berücksichtigt, aber um den Komfortzustand eines Gebäudes zu erfassen, soll in der Berechnung der Exergiebedarf für die Feuchte miteinbezogen werden.

DANKSAGUNG

Dieses Projekt wurde durch den Projektträger PtJ im Forschungszentrum Jülich unter dem Förderkennzeichen 0327466A betreut und durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie finanziert, wofür wir uns herzlich bedanken.

LITERATUR

- Baehr, H. D., Kabelac, S., 2009, Thermodynamik, Grundlagen und Technische Anwendungen, 14. Auflage, Springer, Berlin
- Dincer, I., 2002, On thermal energy storage systems and applications in buildings, Energy and Buildings, Vol. 34, p. 377-388
- LowEx.net, Network of International Society for Low Exergy Systems in Buildings, <http://www.lowex.net/>, Aufruf: 05.06.2010
- LowEx.info, Verbundvorhaben LowEx, Heizen und Kühlen mit Niedrig-Exergie <http://www.lowex.info/> Aufruf: 05.06.2010
- Schmidt, D. 2004. Design of Low Exergy Buildings - Method and a Pre-Design Tool. The International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings, Vol. 3, p. 1-47
- Seifert, J., Richter, W., Hoh, A., Müller, D. 2009. Dynamische, exergetische Bewertung von Anlagensystemen in der Gebäudeenergie-technik, LowEx Symposium, Kassel Deutschland.

ENTWICKLUNG UND VALIDIERUNG EINES MODELLS ZUR ENERGETISCHEN MODERNISIERUNG DES DEUTSCHEN MUSEUMS

Simon Schmidt, Roland Göttig, Silke Dieterich, Michaela Hoppe

Lehrstuhl für Bauphysik, Technische Universität München, Germany

Schlüsselwörter: Mehrzonenmodell, Validierung, Langzeitmessung, energetische
Modernisierung

KURZFASSUNG

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Nachhaltige Sanierung von Museumsbauten“ werden in ganz Deutschland bedeutende Museumsbauten auf ihren Sanierungsbedarf und Sanierungsmöglichkeiten hin untersucht.

Innerhalb dieses Projektes wurde am Deutschen Museum in München die Abteilung Informatik und Mikroelektronik sowohl messtechnisch, als auch simulatorisch untersucht, in dessen Rahmen ein Modell, als Grundlage für die Empfehlungen zur energetischen Sanierung entwickelt wurde.

Im Beitrag sind sowohl die verwendeten Methoden als auch die aus der Validierung gewonnen Erkenntnisse und vorgeschlagenen Modernisierungsvarianten dargestellt.

ABSTRACT

As part of the research project „Nachhaltige Sanierung von Museumsbauten“ significant museum buildings in Germany are examined on their needs and opportunities of retrofitting.

Within this project both measurement and simulation have been carried out for the informatics and microelectronics department at the „Deutsches Museum“ in Munich. A model was build in order to become a basis for the retrofitting recommendations developed out of the simulation results.

The paper shows both the methods used and the knowledge gained from the validation and proposes retrofitting options.

EINLEITUNG

Die Abteilung der Informatik und Mikroelektronik ist direkt unter dem Dach im 3. OG des Süd-Ost-Traktes

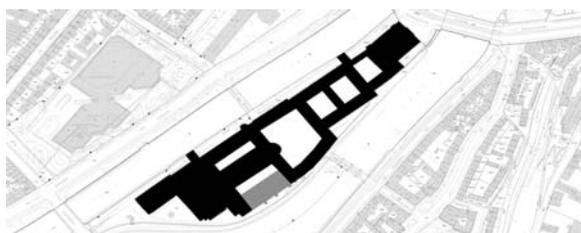


Abbildung 1: Lageplan des Museums mit Hervorhebung der untersuchten Abteilung

des Deutschen Museums gelegen und stellt sowohl durch die Lage, als auch durch die baulichen Gegebenheiten eine kritisches Gebäudeteil bezüglich der sich einstellenden raumklimatischen Parameter im gesamten Gebäudekomplex dar. Als Grundlage für die Entwicklung des Modells wurden sowohl im Außen-, als auch im Innenraum umfangreiche Messungen durchgeführt. Unter Verwendung des Programms IDA ICE 4 wurde, aus den bekannten Abmessungen und Aufbauten des Gebäudeteils, ein 3D-Modell der Räumlichkeiten erstellt. Anhand der gemessenen Größen konnte das Modell nach geeigneter Anpassung validiert werden. Die Hauptschwierigkeit bestand hierbei in der Implementierung der Nutzung, sowie des Nutzerverhaltens in den Räumen. Aufgrund des öffentlichen Charakters des Gebäudes waren die resultierenden, unterschiedlichen Besucherströme in den Räumen sowie das bedarfsweise Öffnen der Fenster durch das Personal nur mit Einschränkungen nachzuvollziehen.

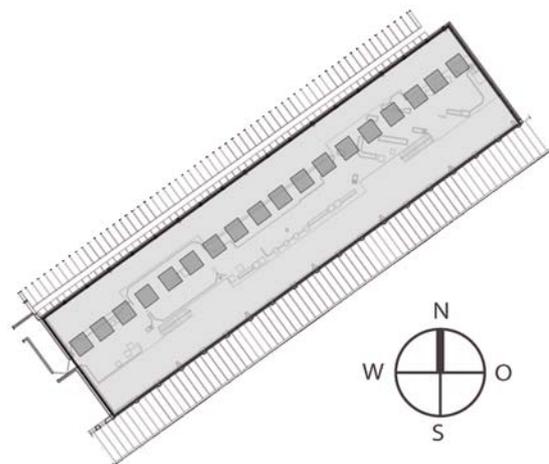


Abbildung 2: Grundriss des untersuchten Bereichs (Galerieebene mit Lichtkuppeln)

OBJEKTDESCHEIBUNG

Die nachfolgend aufgeführten Angaben zu den einzelnen Bauteilen wurden aus Literaturquellen, sowie aus Bestandsunterlagen entnommen und soweit möglich durch Messungen präzisiert.

Die Süd-Ost Fassade ist als Lochfassade mit einem Fensterflächenanteil von 33 % ausgebildet. Der

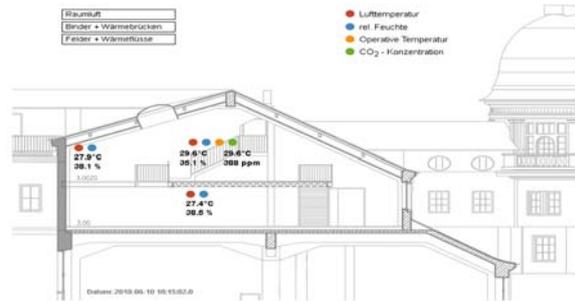


Abbildung 5: Visualisierung der gemessenen Raumluftparameter

Sämtliche Größen werden in einminütigen Abständen als gleitendes Mittel über 5 Minuten erfasst. Die Daten werden über ein PC-basiertes Messdatensystem vor Ort gespeichert und gleichzeitig via Internet an einen Server im Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen übertragen. Das dem zugrunde liegende Internet Messdatenerfassungssystem (IMEDAS) erlaubt eine Online-Visualisierung und die Auswertung beliebiger Messkanäle [IMEDAS].

Tabelle 2: Messgenauigkeit der Messfühler

Größe	Messgenauigkeit	
	absolut	relativ
Oberflächentemperatur	$\pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$	
Lufttemperatur	$\pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$	
Globaltemperatur	$\pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$	
rel. Feuchte	$\pm 1,0 \text{ } \%$	
Wärmestromdichte [W/m ²]		$\pm 5 \text{ } \%$
CO ₂ -Gehalt [ppm]		$\pm 2 \text{ } \%$

In Abbildung 6 sind typische Verläufe relevanter Messgrößen für jeweils einen Sommer- und Wintertag wiedergegeben. Die gemessenen CO₂-Konzentrationen im Winter lassen sich gut mit dem Nutzerverhalten erklären.

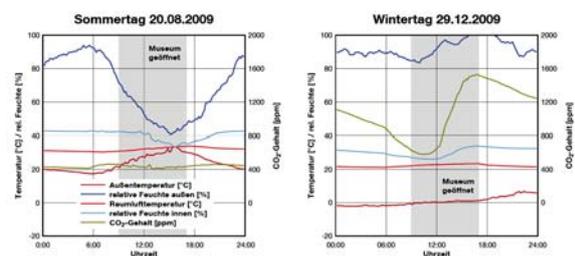


Abbildung 6: Typische Verläufe wesentlicher Messgrößen an einem Sommer- und einem Wintertag

Im dargestellten Beispiel ist davon auszugehen, dass das Personal gegen 6:00 Uhr morgens die Fenster geöffnet hat. Ab 9:00 Uhr wird das Museum geöffnet, aber erst gegen 11:00 Uhr gelangt eine größere Zahl von Besuchern in die Abteilung Informatik und Mikroelektronik - die CO₂-Konzentration steigt entsprechend. Mit abnehmender Besucherzahl und gegen Ende der Öffnungszeiten um 17:00 Uhr sinkt die CO₂-Konzentration wieder. Im Sommer wird

wesentlich intensiver gelüftet als im Winter, dadurch gibt es keine ausgeprägten Änderungen der CO₂ Konzentration. Außen- und Innenklima nähern sich nach längerer Lüftungszeit mit geöffneten Fenstern und Oberlichtern stark aneinander an.

In Abbildung 7 werden Monatsverläufe für August 2009 und Dezember 2009 dargestellt. Auch hier ist besonders im Wintermonat auffallend, wie stark der CO₂-Gehalt von der Anzahl der Besucher abhängt. An den wenigen Tagen, an denen das Museum geschlossen ist (9.12.2009 nachmittags, 24.12.2009 und 25.12.2009) sinkt die CO₂-Konzentration deutlich.

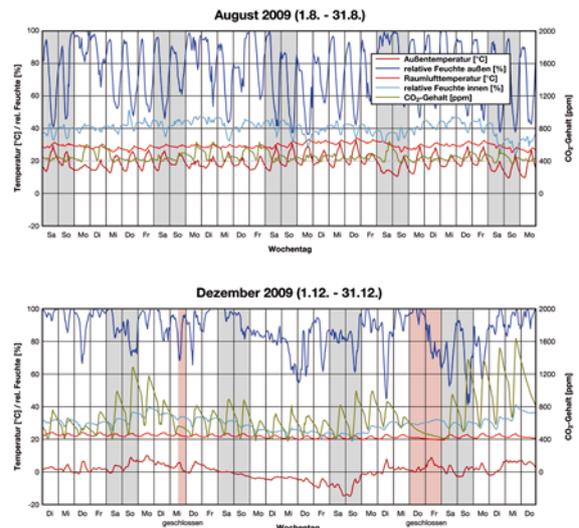


Abbildung 7: Typische Verläufe wesentlicher Messgrößen im August und Dezember

MODELLENTWICKLUNG

Randbedingungen

Außer einer herkömmlichen Ölheizung mit Radiatoren steht keine Anlagentechnik für die Lüftung, Kühlung oder Klimatisierung der Ausstellungsbereiche Informatik und Mikroelektronik zur Verfügung. Die Räume werden natürlich über die Fenster und die beiden offenbaren Lichtkuppeln gelüftet. Das Öffnen und Schließen der Fenster und Lichtkuppeln erfolgt manuell während der Öffnungszeiten durch das Aufsichtspersonal bzw. in den Morgenstunden durch die Reinigungskräfte. Eine aus Befragung und Beobachtung abgeleitete Öffnungsstrategie ist in Abbildung 8 dargestellt. Diese wird temperaturgesteuert im Programm verwendet.



Abbildung 8: Fensteröffnungsstrategie

Neben den Personen werden als weitere interne Lasten lediglich die Leuchten zum Ansatz

gebracht, da ansonsten keine el. Verbraucher mit hoher Anschlussleistung betrieben werden. Das Licht wird täglich um 5:00 Uhr vom Reinigungspersonal eingeschaltet, eine Anpassung an die Tageslichtverhältnisse erfolgt im Betrieb nur sehr selten. Erst gegen 17:00 Uhr, nach Schließung des Museums für den Publikumsverkehr, wird das Licht, bis auf eine Notbeleuchtung ausgeschaltet. Das verwendete Beleuchtungsschema ist in Abbildung 9 aufgezeigt.

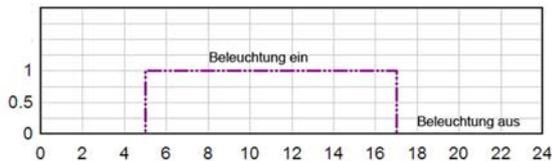


Abbildung 9: Belichtungszeiten

Während der Öffnungszeiten besuchen jährlich knapp 1 Million Personen das Museum auf der Museumsinsel, in den Sommermonaten sind es über 100.000 Personen im Monat. Einige besuchen nur das im gleichen Stockwerk gelegene Cafe' und nutzen die Abteilung als Durchgang. Täglich um 14:00 Uhr beginnt eine Führung durch die beiden Abteilungen. Im Jahr 2008 fanden 261 Führungen mit insgesamt 3.881 Teilnehmern statt. Im Durchschnitt nahmen 15 Personen an einer Führung teil. Nach 16:00 Uhr nimmt die Besucherzahl in der Abteilung wieder ab. Die aus den oben genannten Angaben abgeleitete Personendichte ist in Abbildung 10 wiedergegeben.

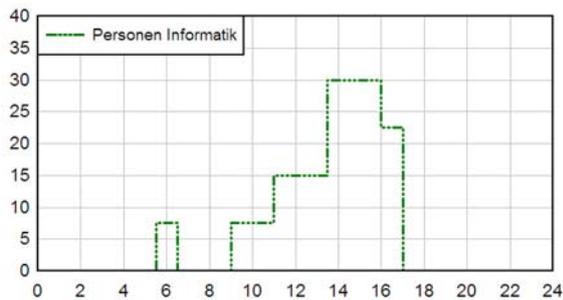


Abbildung 10: Schema der Besucherdichte

Simulation

Die Abteilungen Informatik und Mikroelektronik befinden sich in einem gemeinsamen Raum, wobei die Abteilung Mikroelektronik auf einer Galerie untergebracht wurde. Für die Berechnungen der Raumtemperaturen wurden zwei Zonen jeweils für die Informatik (gelb) und Mikroelektronik (rot) gebildet. Da beide Zonen über einen gemeinsamen Luftraum verbunden sind, wird auch die Temperaturschichtung berücksichtigt.

Mit der Simulation wurden die zeitlichen Verläufe der Raumtemperaturen in den Zonen Informatik und Mikroelektronik errechnet und mit den gemessenen Lufttemperaturen verglichen. Da den Berechnungen

die tatsächlichen Wetterdaten, zugrunde liegen, ist ein Vergleich der nachgebildeten dynamischen Prozesse mit der Realität möglich. Spezielle Anpassungen des Modells wurden in folgenden Punkten getätigt:

1. Die Speichermassen durch Innenwände, Möbel und Ausstellungsstücken wurde erhöht, um den Temperaturabfall in der Nacht realistisch abzubilden.
2. Das Nutzerprofil zum Öffnen der Fenster und Lichtkuppeln wurde, von einer Abhängigkeit der Zeit auf eine Abhängigkeit von der Außentemperatur und der Zeit geändert.

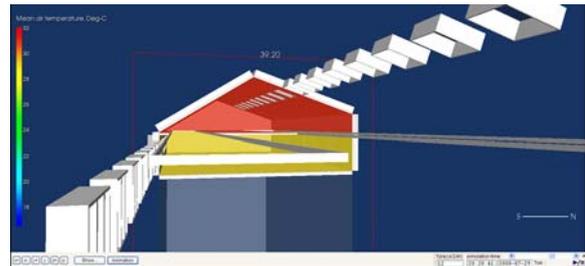


Abbildung 11: Screenshot aus der Simulationssoftware

VALIDIERUNG

Übereinstimmung

Um die Abweichung der gemessenen von den simulierten Ergebnissen bestimmen zu können wurde die Methode der mittleren quadratischen Abweichung herangezogen. Hierbei wird jeweils die Differenz aus Mess- und Berechnungswert pro Zeitschritt gebildet und anschließend ein quadratischer Mittelwert gebildet (Varianz). Zusammen mit den Maximalwerten der Messwerte und Medianen der Abweichung kann eine Entscheidung über die Qualität der Simulationsergebnisse getroffen werden. Die gefunden Ergebnisse sind in Tabelle 3 dargestellt und können für die Temperatur und rel. Feuchte als sehr gut eingestuft werden. Die absoluten, sowie die quadratischen Abweichungen für die Monate August und Dezember sind in Abbildung 12 dargestellt. Für den Wintermonat ergibt sich aus der Simulation ein nahezu konstanter Verlauf der Raumlufttemperatur, der durch die Modellierung einer idealen Heizung zu begründen ist.

Tabelle 3: Ergebnis der statistischen Fehlerabschätzung

Betrachtete Größe	Minimum Messwert	Maximum Messwert	Median Abw.
Temperaturen	19,92	34,11	-1,00
rel. Feuchten	18,87	54,44	1,04
	Varianz		
Temperaturen	1,91		
rel. Feuchten	13,83		

Ursachen für die, auch nach den genannten Anpassungen, noch vorhanden Abweichungen liegen

an verschiedenen Unsicherheiten. Beispielhaft sei hier auf die Modellierung der Personen, als auch auf die Umsetzung der Fenster- und Interzonalen Lüftung eingegangen.

Die Modellierung der Personen birgt zum einen die Problematik, dass nur schwer abgeschätzt werden kann, wie viele Personen zu welcher Zeit sich in den Abteilungen befinden und zum anderen, wie lange sie dort verweilen. Die Abteilung wird von den Besuchern neben dem Besuch der Dauerausstellung auch als Durchgang zum sich im gleichen Stockwerk befindlichen Café benutzt. Um eine grobe Abschätzung der Besucherzahlen zu erhalten, wurden die gemessenen CO₂-Werte ausgewertet und mit den, durch eine Zählung ermittelten Besucherzahlen verglichen. Hieraus konnte dann eine Abschätzung der Personendichte aufgrund der sich einstellenden Konzentration getroffen werden, die sich im Schema der Besucherichte (Abbildung 10) widerspiegelt. Eine weitere Anpassung der Besucherströme in Abhängigkeit von Witterungseinflüssen kann angenommen, jedoch noch nicht belegt werden.

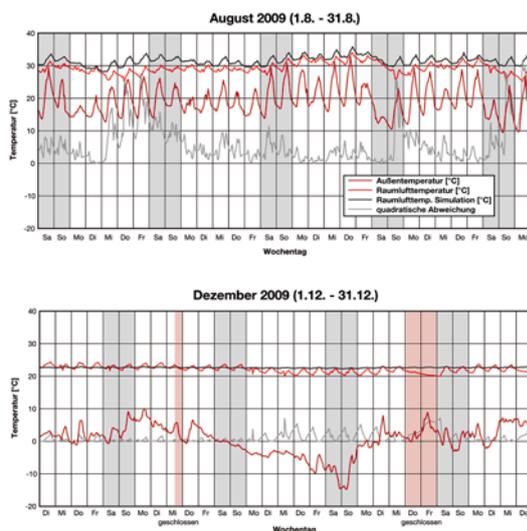


Abbildung 12: Vergleich von Messung und Simulation der Temperaturen im August und Dezember

Die Strategie zur Öffnung der Fenster (Abbildung 8) wurde lediglich auf Aussagen des Personals und eigenen Beobachtungen entwickelt. Jedoch birgt auch die Berechnung der freien Lüftung im Programm IDA-ICE 4 Fehlerquellen. Die Implementierung der freien Lüftung im verwendeten Programm erfolgt dichte- und druckinduziert. Für jede an die Öffnung angrenzende Zone werden Dichte und Druck bestimmt und daraus ein Gefälle errechnet. Die Berechnung des Durchflusses erfolgt dann über die Öffnungsfläche, den Dichte- und Druckunterschied, sowie einen Durchflusskoeffizienten, der die Beschränkung des Durchflusses im Vergleich zum idealen Durchfluss angibt. Hierbei wird in IDA ICE 4 sowohl für Öffnungen in horizontalen als auch in vertikalen

Ebenen gleichermaßen vorgegangen. Die verwendeten Modelle unterscheiden sich lediglich in der Berechnung der Dichte und Druckverteilungen, sowie in der Anzahl der Durchflussvarianten.

Die vorhandenen Differenzen zwischen den Mess- und den Simulationsergebnissen liegen hauptsächlich an folgenden Einflüssen:

- „Ein-Knoten-Modell“ des Simulationsprogramms
- Nur teilweise repräsentative Wahl der Messorte, da die Messfühler so angebracht werden mussten, dass sie im täglichen Museumsbetrieb nicht stören.
- Ungenauigkeit der Messfühler
- Ungenauigkeiten in der Modellierung der internen Speichermassen

Sanierungsvorschläge

Ausgehend von dem vorgestellten Modell wurden acht Sanierungsvarianten untersucht (Abbildung 13). Aus konservatorischer Sicht wurde das Hauptaugenmerk hierbei auf die Einhaltung von Grenztemperaturen und maximalen Temperaturschwankungen gelegt. Es wurde somit hauptsächlich versucht, die internen Lasten und Energieeinträge zu minimieren. Da von der Museumsleitung bauliche Maßnahmen an der Fassade und am Dach aus Denkmalschutzgründen bisher nicht geplant waren, wurden diese Varianten als untergeordnet betrachtet und zurückgestellt.

V1						
V2						
V3						
V4						
V5						
V6						
V7						
V8						
	Beleuchtung	Lichtkuppeln	Fenster	Belüftung	Speichermasse (PCM)	Flächenkühlung

Abbildung 13: Vorgeschlagene Sanierungsvarianten

Die Variantenuntersuchungen zeigen, dass der Austausch der Halogen-Strahler gegen LED Strahler in den Abteilungen Informatik und Mikroelektronik und eine zeit- und helligkeitsabhängige Schaltung der Beleuchtung in Kombination mit einer Nachtlüftung

zu effektiven Verbesserungen des sommerlichen Wärmeschutzes führen. Da im Museum bereits sehr gute Erfahrungen mit LED-Strahlern gemacht wurden, wird empfohlen, diese Maßnahme zuerst umzusetzen. Allein diese Maßnahme ergäbe eine rechnerische Verringerung der sich einstellenden Temperaturen um 2-5 K. In Anbetracht der hohen internen Speichermassen, könnte so auch eine geringere Schwankungsbreite der Raumlufttemperatur erreicht werden.

AUSBLICK

Derzeit werden im Deutschen Museum Sanierungsmaßnahmen durchgeführt. Diese Maßnahmen umfassen die außenseitige Dämmung des Daches, den Austausch der Lichtkuppeln und die Erneuerung der Beleuchtung durch die vorgeschlagenen LED-Systeme. Die während und nach den Maßnahmen gesammelten Messdaten sollen anschließend mit den Berechnungen verglichen

werden und so die Qualität des Modells überprüft werden.

LITERATUR

- Hilbert, G.S.: Sammlungsgut in Sicherheit. 3. vollst. überarb. u. erw.Aufl. Berlin (2002)
- Poeverlein, R.: Der Wiederaufbau des Deutschen Museums in München. Deutsches Museum (1953).
- Haas, V.: Energetische Sanierungsempfehlung für das Deutsche Museum am Beispiel des Sammlungsbau Osttrakts. Diplomarbeit TUM, Lehrstuhl für Bauphysik (2009).
- VDI 3786 Blatt 13, Meteorologische Messungen Messstation, August 2006.
- IMEDAS, Internet Messwerterfassungs- und DatenauswertungsSystem, <http://www.ibp.fraunhofer.de/software/imedas.html>, 11.6.2010

URBAN STREETSCAPES RESPONDING TO CHANGING CLIMATE CONDITIONS - EFFECTS OF STREET LAYOUT ON THERMAL EXPOSURE

Wolfgang Loibl, Andreas Jäger, Markus Knoflacher, Mario Köstl, Johann Züger
 Austrian Institute of Technology GmbH - AIT,
 Foresight and Policy Development Department, Vienna, Austria

ABSTRACT

This contribution explores the effects of climate change on open spaces and street canyons in urban environments, using the “Aspern” New Town development in Vienna as a principal case study. Specifically, the effects of alterations in the urban fabric are analysed with regard to sun exposure and ventilation. Results of future regional climate scenarios are incorporated in a second series of microclimate simulations. Future climate conditions are based on regional climate simulations for the years 1960-2050, carried out by the authors in previous studies.

Microclimate conditions are simulated with the ENVI-met tool, simulating climate dynamics within a daily cycle reproducing the major microscale atmospheric processes, based on the laws of fluid dynamics and thermodynamics. 3D-block models of the planned Aspern development with 5m cell resolution are introduced to consider effects of different spatial characteristics due to block layout and tree distribution at a local level.

INTRODUCTION

Urban climates differ distinctly from those of rural areas. In urban environments climate change is expected to have a significant impact upon levels of thermal comfort in open spaces and in buildings themselves. This is the case not only in traditionally hot countries, but also in regions of mid- and northern latitudes that presently have a moderate climate. Within these, urban environments will be exposed in particular: air ventilation can be restricted by structures; thermal stress is likely to increase, due to the entrapment of radiation via reflection; local heat fluxes and higher heat storage capacity will increase through block layout and volume of buildings.

To cope with future urban climate conditions, urban planners, architects, and property developers need reliable information concerning changing microclimate conditions in order to make the right decisions regarding building design, block layout and shading facilities so that the built environment will be properly adapted to future climate change.

TEST CASE “SEESTADT ASPERN”

The “Seestadt Aspern”, due to be built in the north-eastern, currently more rural, part of Vienna, is expected to grow into an attractive new sub-centre with a mix of residential, commercial and recreational space for 20,000 inhabitants and 26,000 employees (Hageneder and Hinterkörner, 2010). The development is located on a former airfield, surrounded by arable land, single family housing, a car engine production site and the Lobau forest, along the Danube (both in the south).

Sustainability criteria will be a key consideration throughout the planning and development process. Ensuring high levels of energy efficiency for buildings, as well as the general adaptability of buildings and open space to a changing climate to achieve sufficient thermal comfort, is a major task.



*Fig. 1: Aspern development, viewing north
 (Rendering: AIT)*

The master plan encompasses a gross floor area of over 2 million square meters. This area is subdivided into the following land-uses: 0,8 mill. m² for housing; 0,8 mill. m² for services; 0,15 mill. m² for manufacturing; 0,1 mill. m² for social infrastructure.

A main ring road will delineate the central area. Radial streets – partly following the predominant (NE) wind direction – will provide access to the centre and outlying areas. Streets and selected plazas will be ‘greened’ with trees. The U2 underground line, planned as an elevated light-rail, will connect this part of Vienna’s 22nd district to the Vienna city centre, whilst buses will provide local accessibility.

In the northern part of the site a cluster of high-rise buildings will be concentrated near the railway station, a lightrail station and the bus-hub. In the

eastern section manufacturing businesses are to be located and to the south a research and education quarter is envisaged (served by a 2nd lightrail station).

The Aspern development will be divided by a W-E directed blue-green corridor with a large scenic lake dominating the centre of the development (Fig. 3). Besides its recreational and aesthetic value, the lake also functions as a fresh air reservoir and cooling facility. The expansive open space encourages the movement of air, the low specific heat capacity of the water lowers air temperatures. The entire area will be surrounded by a green belt.



Fig. 2: Layout concept (from top to bottom): (a) northern high rise quarters, (b) blue-green corridor, (c) ring road, (d) manufacturing quarters, (e) science / education quarters (Source: City of Vienna, 2008b)



Fig. 3: Aspern lake area, viewing north;
(Rendering: AIT)

URBAN CLIMATE SIMULATION FRAMEWORK

The simulation has been carried out using ENVI-met, a 3D-microclimate modelling software, to analyse the small scale interactions between urban design and the immediate climatic surrounds, with resolutions ranging from 0.5 to 10 m (www.envi-met.com). The model calculates fluid dynamics parameters such as wind flow and thermodynamic processes (temperature, humidity) taking place at walls, roofs, ground surface interacting with soil, plants and the atmospheric boundary conditions (Bruste et al. 1998).

The model simulates the atmospheric processes for grid cells – the appropriate way to model continuous transition processes over space and time. The software can handle a model domain of up to 250 x 250 cells, thus providing results for an area of up to 2,5 x 2.5 km². Such a simulation area would be sufficient to simulate the entire Aspern cityscape. To provide more detailed results and to consider non-rectangular block layouts better, however, the grid spacing has been reduced to 5x5 m and the grid was twisted 15° towards the east to reduce diagonal block orientation, avoiding staged shapes.

To conduct the simulation, the study area with its 3D- and 2D conditions has to be defined by several input data sets using identical grid spacing: building shapes and heights, as well as properties of these structures such as heat storage capacity and irradiance reflection; plant sizes and characteristics relating to shading/wind protection; surface conditions of roads and open space including tree locations, surface roughness, moisture content etc.

Initial simulation framework conditions are integrated at the beginning of the model runs, requiring inputs such as geographical positioning, date and time (to calculate the solar altitude), wind speed and direction at ground level, the initial temperature at ground level, the specific humidity at 2500m and the relative humidity at ground level. Meteorological information comes from a nearby monitoring site or is derived from climate model-outputs for the respective grid-cells covering the

study area. The microclimate model needs at least 6 hours simulation time to deliver plausible results. ENVI-met has been used by various authors for a range of applications for several years. It can therefore be seen as a validated method for climate simulations.

ENVI-met 3.1 runs on MS-Windows-based computers. Testing this version has revealed a number of constraints regarding model performance and output: the simulation for a daily cycle takes several hours. Whilst simulating the entire Aspern site at a high spatial resolution the software crashed several times. Consequently, further model runs were carried out, focusing on progressively smaller areas of the Aspern development. The final area, selected for full 24 hour-cycle simulations with 2 hour measurement intervals, concentrates on a section of the original area with 130 x 130 grids in direction x-y, spanning 650 x 650 m² (and 20 cells in direction z). It covers the northeastern, high-rise building cluster and immediate surrounds, but little blue-green open space. Figure 4 shows all tested model extents, with the final model domain marked in white.



Fig. 4: Tested model domains

CITY LAYOUT OF ASPERN AND MICROCLIMATE CONDITIONS

The overall urban structure is defined by the master plan of Tovar Architects & Planners. Its elements – the general block layout, ring road, boulevards, axes, public and open spaces – determine the visual readability and identity of space. The main elements of this overarching plan will not be further analysed or altered in the context of this research work, as the master plan is likely to have been chosen precisely on the grounds of principle features. Proposing fundamental changes, therefore, seems unrealistic. These main features include: the general elevation pattern; the position of the green corridor; the ring road and the general radial axis layout (City of Vienna, 2008a).

The radial axis layout seems to be a useful adaptation to climate change. Fig. 5 depicts the streets' shading

fraction resulting from different street orientation and block-height/street-width (H/W) ratio. Here we follow the calculation of Bourbia et al. (2004) for the latitude 33°N in Algeria but consider higher shade fractions due to a more shallow sun-angle for Aspern's latitude 48°N. It turns out that most roads are oriented NE-SW or NW-SE, which reduces solar exposure of block fronts and increases the street shading capability of block walls. It is also noteworthy that the relationship between buildings and streets frequently exceeds an H/W ratio of 1:1. This design approach ensures sufficient natural lighting for building users on the one hand, but on the other hand it is too wide to provide full shade for the entire street canyons or opposite block walls.

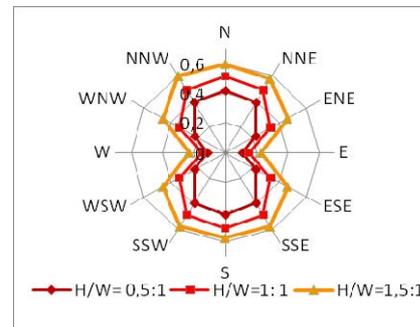


Fig. 5: Average monthly street shading fraction depending on street orientation and front height/street width (H/W) ratio (for latitude 48°N)

The green belt is an important element able to reduce urban heat island effects and provide ventilation, although the location is not ideal with respect to the prevailing (NE to SW) winds. Fig. 6 depicts the usual wind direction and velocity pattern: the higher speed of the SE-directed wind (dark blue) declines inside street canyons (light blue).

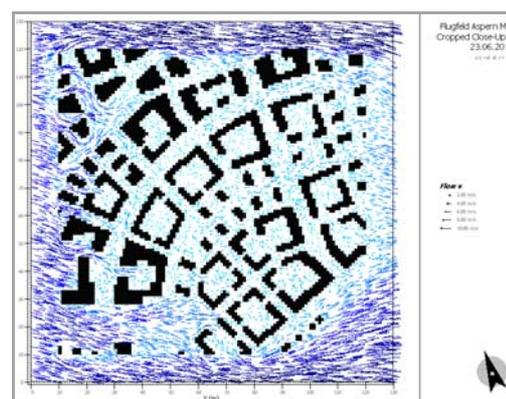


Fig. 6: Typical wind speed/direction in 2m

Thus adaptations in block layout refer to a new ventilation corridor through removal of building blocks (red blocks in Fig. 4) and integration of additional green spaces.

CURRENT CLIMATE SIMULATIONS

The microclimate simulations refer to a sunny reference day (June 21) under current climate conditions. The images below show increase of air and surface temperature during the day. The left maps show the original block layout, the right ones

effects of an additional NW - SE corridor with slightly higher temperatures. This observation refers to less shading due to the wider streets, and higher surface temperature resulting from the reflection of heat. More distinct changes are noticeable with regard to surface temperatures (and thus irradiance reflection), as well as wind pattern.

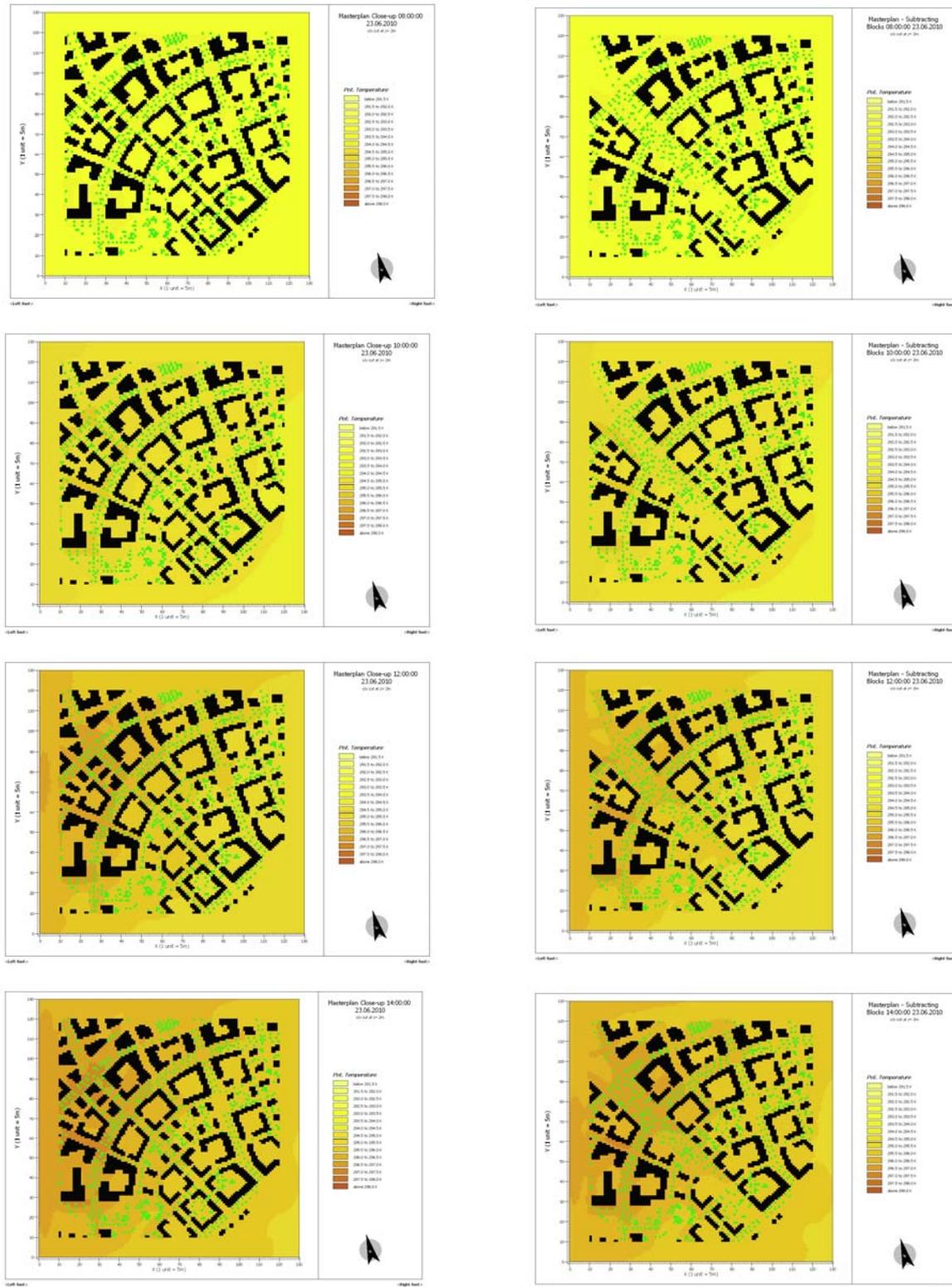


Fig.7: Potential temperature (°K)
left: standard block layout

(June 21, 8:00, 10:00, 12:00, 14:00h)
right: additional NW-SE corridor

Fig 8. depicts surface temperature (top) and wind speed (bottom) for morning and noon hours. The local temperature differences are much higher (up to 35°K) then for air temperature, because of differences in heat storage capacity and the ability of the surfaces/soils to cool actively- e.g. through water content and evaporation.

The wind pattern images show higher wind speeds along the new corridor: At the northwestern edge 2m/sec, further south 1m/sec. Without the corridor the wind speed is calculated to be 0,5m/sec or less. Despite temperatures being nearly the same, the increased air movement may induce higher thermal comfort levels, as a result of wind chill.

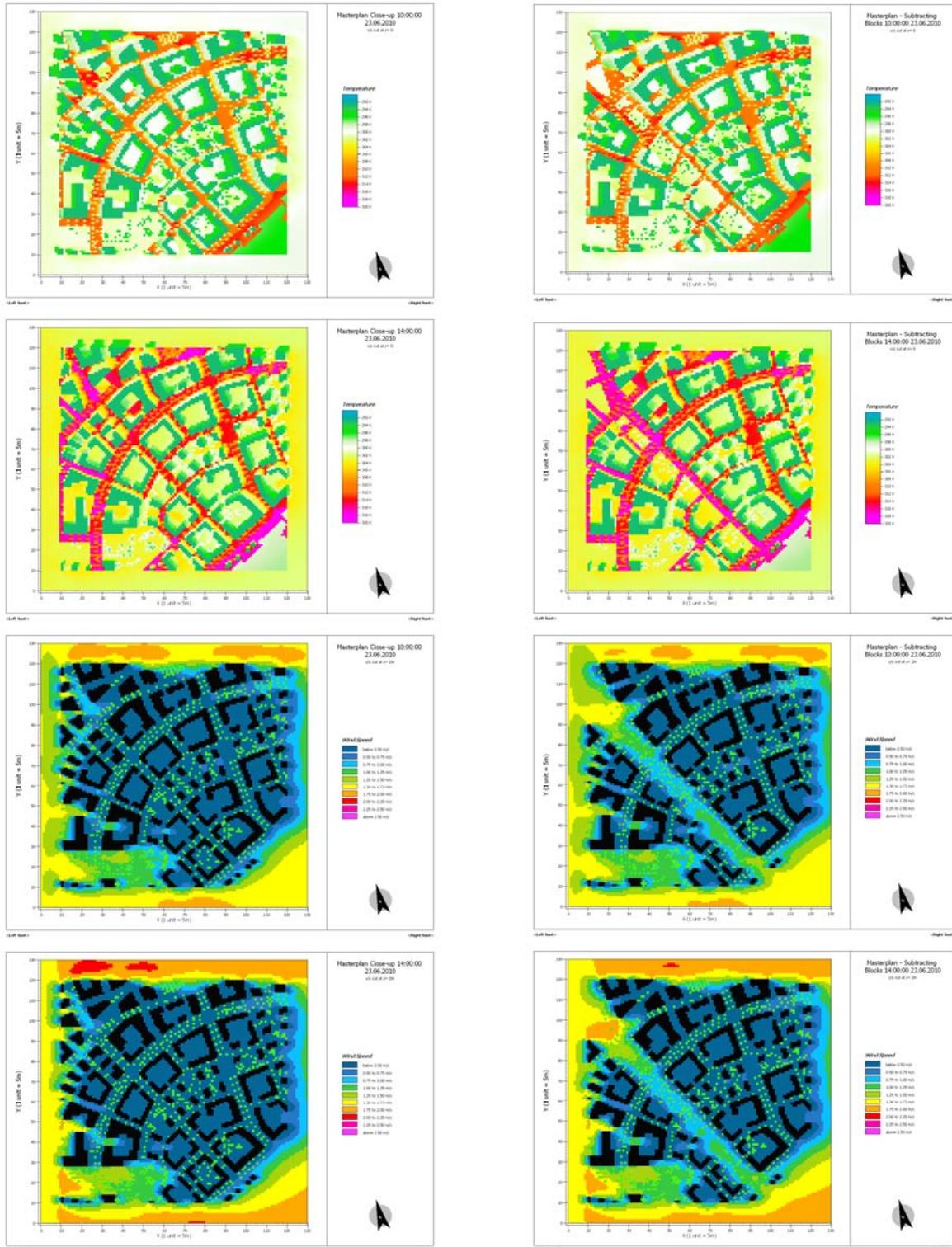


Fig.8: Surface temperature (°K, top) wind speed - left: standard block layout

(m/sec, bottom), (June 21, 10:00h, 14:00h) right : additional NW-SE corridor

FUTURE CLIMATE SIMULATIONS

To examine effects of a changing climate, on urban microclimate results of regional climate simulations have been applied to simulate the microclimate of a similar day.

The data applied for the microscale simulations have been generated in the course of previous projects, providing regional climate simulation results until 2050, delivering a large set of hourly data on temperature, radiation, cloud cover, humidity, precipitation, wind parameters, etc. for various atmospheric layers (c.f. Loibl W. et al, 2009, 2010).

Simulation results of a typical summer solstice day of the century 2041-2050 has been selected to serve as input for the Aspern microscale simulations.

The further images show some expected effects.

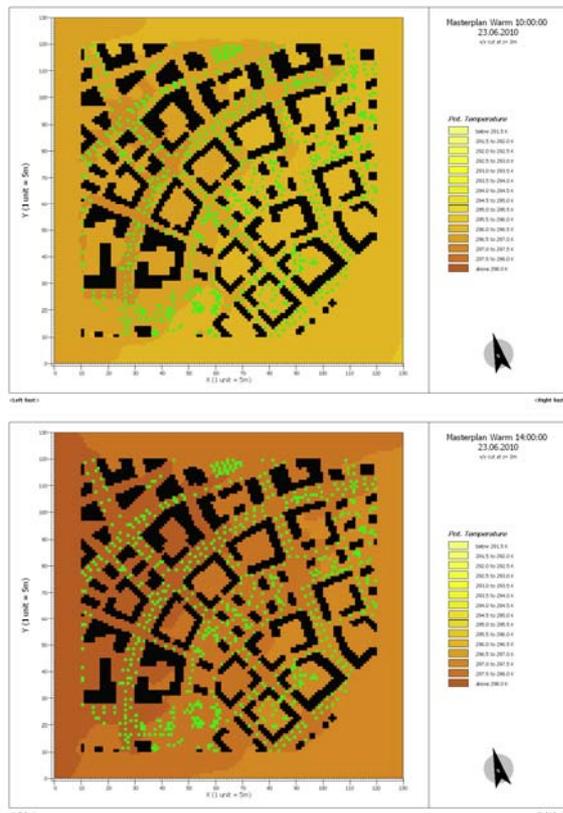


Fig.9: Potential temperature (°K) for 10h and 14h under future climate conditions (June 21, between 2040-2050, sunny)

Fig. 9 illustrates distinct changes: while the temperature pattern at 10:00h for the future scenario shows only minor differences, when compared to the current climate simulations (Fig. 7), the 14:00h temperature distribution reveals clear increases.

Fig. 10 depicts the changes in temperature in more detail: The 10:00h image shows that within the outer parts of the analysed quarter in the north and the west the temperature increase is calculated to be around 1,25 °K, while in the more central south-eastern parts

of the area the changes reach 1,5 to 1,7°K. The bottom figure shows higher differences: 1,7°K in >50% of the area for 14:00h.

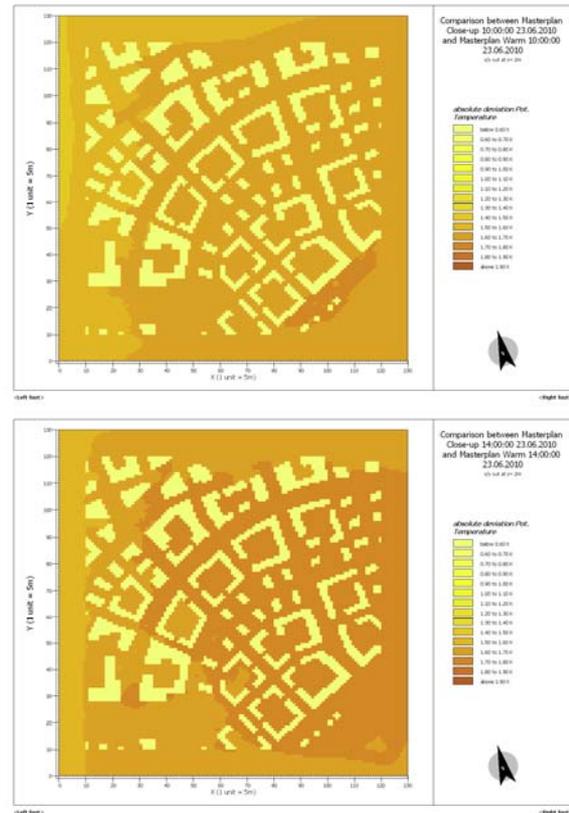


Fig10: Differences in potential temperature (°K) between current and future climate of a similar sunny day (June 21, 2010 and between 2040-2050)

Some courtyards show lower temperature increases (in parts 1/10 °K), which might be a valuable finding in terms of climate-sensitive block layout.

The wind fields under current and future climate conditions for a typical summer solstice day look nearly identical. Future regional climate simulations let not expect general changes regarding wind. However, both the frequency and intensity of extreme weather events (including high wind speeds) may increase in future.

SIMULATION RESULTS AT SPECIFIC RECEPTOR POINTS

To investigate the effects of block layout on the local climate in more detail, the results have been extracted for certain receptor points that are positioned with respect to sun exposure and ventilation.

The receptors were placed either south or north of building blocks, exposed to the sun or shaded by block fronts or trees to varying degrees. Locations were also selected to measure varying wind conditions, at exposed or sheltered parts of the site.

The following figure shows the locations of the receptors in the model domain.

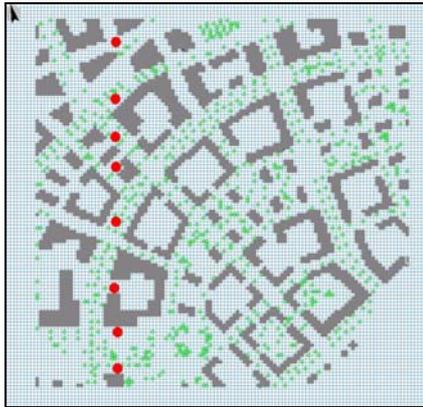


Fig. 11: Receptor locations in the model domain

Fig. 12 shows in detail the differences in local thermal exposure between the locations (at 2,5m above ground), resulting from varying degrees of sun and ventilation exposure. Differences between the locations remain nearly the same for the 3 simulation runs. Only receptor R5, located in the new corridor, records slightly higher temperatures than for standard block layout (centre figure). The temperature increase during the day was highest for the future scenario.

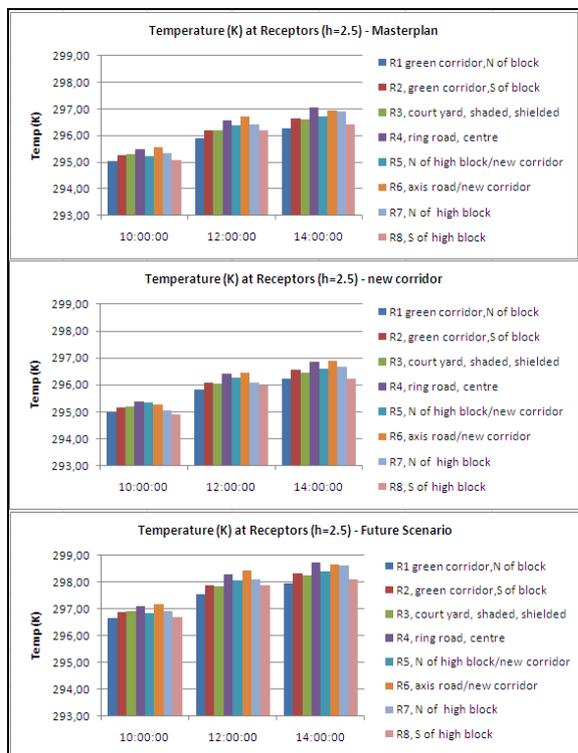


Fig. 12: Air temperature ($^{\circ}\text{K}$) for defined receptor points, June 21, sunny, 10, 12, 14h for current climate, with additional corridor and for future climate

Data on wind speeds, resulting from the simulations as depicted in Figure 13 show more pronounced

differences, although the range of variance is smaller: The highest wind speeds are observed at the receptor points in the green belt to the south. Along the new corridor (centre figure) air movement is significantly stronger, as documented by receptor points R5 and R6 - wind speeds increase from 0,1 and 0,4m/sec to around 1m/sec, due to better ventilation. During the day a slight acceleration in speed can be observed, which could help to improve the thermal comfort. Between current and future simulations no distinct differences in wind speed can be observed.



Fig. 13: Wind speed (m/sec) for defined receptor points, June 21, sunny, 10, 12, 14h for current climate, with additional corridor and for future climate

CONCLUSIONS

Analysis of the simulation results reaffirms the current understanding that a climate- sensitive block layout and open space allocation has a distinct influence on thermal comfort in open spaces (as well as indoors!). Street canyon orientation and front-height-to-road-width ratio were found to be important factors influencing surface temperature, heat flux and finally air temperature in relation to urban microclimatic changes.

The Aspern block layout turns out to be well suited for temperature increase. The radial street layout with few N-E directed streets results in lower building

front heating and allows higher surface shading fractions in streets and courtyards during warmer summer days.

Corridors following the prevailing wind direction would support ventilation at a local scale (not noticeably affecting adjacent streets). Even when wind speeds are low, a cooling effect would increase thermal comfort in open spaces. However, a wider street layout has to be considered carefully regarding sun orientation as it can on the other hand reduce shading capability, leading to temperature increases. Certain courtyard layouts appear to lend themselves to local passive cooling, thus creating pockets of lower temperatures for inhabitants.

Heat island effects can be reduced through limiting the share of sealed surface, influencing the heat storage capacity, by additional tree shading and high soil humidity supporting cooling through evapotranspiration. The planned large central lake will also contribute to reduce temperature and will encourage higher localised wind speeds, improving ventilation.

In general, exploration of, and improvement to, climate comfort can effectively increase the urban quality of life in light of future climate conditions. Conducting urban climate simulation studies in collaboration with urban planners and architects, to test effects of block layout alternatives, would improve climate sensitive block design.

Further research in this context is set to strengthen a framework for forward-looking building design and construction that could have positive economic impacts, such as energy saving measures related to building maintenance under future climate conditions, as well as bringing environmental and social benefits.

REFERENCES

Bourbia F., Awbi H.B. (2004) Building Cluster and shading in urban canyon for hot climate Part 2, Shading simulations. *Renewable Energy* 29 (2004) pp. 291-301

Bruste M, Feer H. (1998) Simulating surface-air-plant interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Env. Modelling and Software* 1998, 13, pp 383-384.

City of Vienna (2008a) Aspern Airfield Masterplan, by Tovard Architects & Planners AB. Magistrat der Stadt Wien, 1082 Wien.

City of Vienna (2008b) Aspern Airfield Masterplan-short version (English, German), by Tovard Architects & Planners AB; Magistrat der Stadt Wien, 1082 Wien.

Hageneder C., Hinterkörner P. (2010) Aspern, Die Seestadt Wiens – nachhaltige Stadtentwicklung, Conference proceedings, CORP 2010. Wien, pp. 989-994

Loibl, W., Züger J., Köstl, M. 2009, Reclip:more - kleinräumige Klimaszenarien für Österreich. Standort - Zeitschrift für angewandte Geographie, Vol 33, Number 3, pp. 94-100. Springer Verlag.

Loibl W. et al. (2010) Reclip:century - a project conducting 21st century regional climate simulation runs focussing on the Greater Alpine Region. EGU General Assembly, Vienna 2010. Geophysical Research Abstracts Vol 12

PASSIVHAUS AND PHPP – DO CONTINENTAL DESIGN CRITERIA WORK IN A UK CLIMATIC CONTEXT?

Robert S. McLeod¹, Christina J. Hopfe², and Yacine Rezgui²

¹Cardiff University, School of Engineering, Cardiff, and BRE Wales and SW

²Cardiff University, School of Engineering, Cardiff, Wales UK

ABSTRACT

The Welsh Assembly Government has implemented an ‘aspirational’ target that from 2011 all new buildings in Wales must be ‘zero carbon,’ five years ahead of the 2016 deadline originally set for homes in England. The PassivHaus concept developed in Germany has grown steadily in Europe demonstrating a reliable methodology for the design of ultra low energy buildings, therefore providing the possibility of an established method of meeting the zero carbon targets in Wales.

Social housing projects currently being designed in Wales and Ireland using the PassivHaus Planning Package (PHPP) have highlighted challenges that may have strong implications for the design of future ‘zero carbon’ dwellings in the UK and Irish maritime climates.

This paper will discuss the above in more detail by showing the implications of applying the PassivHaus standard in Wales and examining the standard for its appropriateness in the supposedly milder Welsh climate. The research conducted will demonstrate that the PassivHaus concept offers a useful template but that it also implies uncertainty due to its thermal performance in the middle European maritime climatic zones with corresponding implications for design sensitivity.

INTRODUCTION

The need to limit CO₂ emissions resulting from the construction and operation of the built environment is well established (Boardman et al, 2005). In support of overarching European emission targets the European Parliament’s Industry Committee declared, that by 2019 the ‘Zero Net Energy’ target must be achieved i.e., all newly constructed buildings must produce as much energy as they consume on-site (ECEEE, 2009).

Against this backdrop, the Welsh Assembly Government (WAG) has set its own ambitious target that all new buildings should be ‘zero carbon’ by 2011 (Jones, 2007). This is five years ahead of the 2016 deadline set for England by the UK Government (Weaver, 2006) (HM Treasury, 2006).

These targets will require huge changes to current design and construction practices impinging on all sectors of the industry; including material component manufacture, on-site operations and all aspects of their operations, skills, financing and transport (NHBC, 2008).

The purpose of this short paper is to examine the impact of adopting the PassivHaus standard in a UK maritime design climate that differs significantly from that of continental Europe where the PassivHaus standard originated.

The German Passivhaus standard appears to be a well established route to achieve the UK’s zero carbon targets, although it is not zero carbon in its own right as it still requires some heating and power for ventilation, (unless these can be supplied by a zero carbon means), and so could provide a useful starting point for developing zero carbon buildings.

This paper will investigate its possible role in the delivery of zero carbon housing to meet the 2011 target for Wales.

The paper begins by describing the background to the aspiration set out by WAG. This is followed by a brief description of the Passivhaus standard before describing some research carried out on the first prototype social Passivhaus dwellings in Wales. The results of the research are discussed before widening the scope of the discussion to consider how the Passivhaus standards might be more robustly adapted to the Welsh context. The paper concludes by identifying the main technical issues that face the implementation of the PassivHaus standard as a template for low and zero carbon housing in the UK.

BACKGROUND

PHPP and the *Passivhaus* standard

Dr Wolfgang Feist founded the Passivhaus Institut (PHI) in Germany to oversee the development and certification of this concept and to act as the guarantor for the strict criteria and requirements for Passivhaus certification.

Arguably from an operational perspective the most important of these requirements is that the peak space

heating load does not exceed 10W/m^2 so that a comfortable indoor climate can be maintained without using a conventional heating system in a central European climate (Schnieders and Hermelink, 2006). Secondly, and most often quoted in relation to the Passivhaus standard, namely that the specific annual heat requirement must not exceed 15kWh/m^2 per annum. Additional criteria include an air tightness standard not exceeding 0.6 ach-1 and a Primary Energy Demand not exceeding $120\text{kWh/m}^2\cdot\text{yr}$ which must also be met in order to obtain Passivhaus certification (Feist, 2007).

In practical terms, the ultra low heating demand in a Passivhaus makes it feasible to do away with a conventional heating system completely and use low energy alternatives, such as post-heated supply air to supplement the 'free' heat gains provided by the sun, the building's occupants and appliances. A variety of supplementary heating systems have been successfully used in Passivhaus buildings, including electrical and solar hot water powered post-air heating, compact services units and district heating.

As a result of focusing on reducing space heating demand the Passivhaus standard is defined by an energy performance specification rather than a CO₂ emissions rating (as used by the UK Building Regulations). Unfortunately, for the current study, this energy-based approach in Passivhaus creates a risk of there being significant variability in the actual CO₂ emissions depending on the fuel used in the heating system. For this reason the Association for Environment Conscious Building (AECB), one of the early adopters of the Passivhaus standards in the UK, has imposed an additional carbon limit on the Passivhaus projects they certify (AECB, 2008).

In summary, the Passivhaus concept is characterised by the use of a highly insulated thermal envelope, incorporating construction detailing that virtually eliminates thermal bridging. This is combined with a highly efficient Mechanical Ventilation with Heat Recovery (MVHR) system which operates at relatively low flow rates, providing continuous ventilation rates in the region of $0.2\text{-}0.4\text{ ach}^{-1}$ during the heating season. Dwellings are orientated to maximise passive solar gains in winter where possible, however this is not seen as a prerequisite of Passivhaus design and the standard has been demonstrated in a number of northern European urban contexts where south facing solar orientation was not feasible due to site constraints (Feist et al, 2005) (Schnieders and Hermelink, 2006).

With nearly twenty years of research and development in Central Europe the Passivhaus standard represents an established method of delivering very low energy buildings.

One of the key tasks of current projects in the UK has been to assess the suitability of adopting the Passivhaus standard as a template for the widespread economic role out of low and zero carbon housing.

However, the problems in adapting this template due to the maritime climate conditions in the UK and Ireland, which differ significantly from the typical European continental climate, are obvious. This study seeks to investigate any important climatic influences on the implementation of the Passivhaus standard in these regions.

Applying PassivHaus standards in Wales

Earlier research in to Passivhaus design hypothesised that because the climate in the UK and Wales is milder than that of central Europe, it may be slightly easier to meet the Passivhaus standard (Schnieders, 2003) (Tweed and McLeod, 2008); thereby allowing the construction a degree of tolerance in its adaptation to the UK context.

The ability to reduce the peak supplementary heating load to 10W/m^2 or less is a key characteristic of the Passivhaus concept; since reducing the peak load to this level allows a small ventilation supply air post heater to meet the entire specific heat requirement. In terms of applying the Passivhaus standard to the Welsh context this raises a fundamental question: The Post Heated Supply Air maximum load (PHSA) is a product of the rate of supply air changes (V) the maximum winter design temperature difference ($\Delta\theta$) and the volumetric specific heat capacity of air ($\rho\cdot c_p$)

$$\text{PHSA} = V \cdot \Delta\theta \cdot \rho \cdot c_p$$

Inserting typical values for the rate of ventilation air change, the central European climate, and the properties of the air results in (after Brans, 2008):

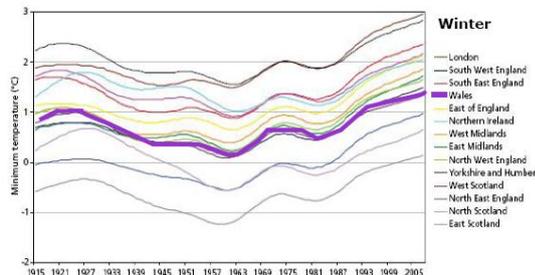
$$\begin{aligned} \text{PHSA} &= 1\text{m}^3/(\text{hm-2}) \cdot 30\text{K} \cdot 0.33\text{Wh}/(\text{m}^3\text{K}) \\ &= 10\text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

The relatively low upper limit to the peak heating load of 10W/m^2 is therefore a consequence of these three boundary conditions. The upper limit of the temperature that the supply air can be raised by (ΔT) is limited by the 'toasting' phenomena of dust circa particles on the post heating coil which is reported to occur at circa 52°C (Feist et al, 2005).

Whilst external design temperatures of -10°C exist in central and northern continental Europe, winter daily minimum temperatures for Wales have (on average) exceeded 1°C over the past 50 years (UKCIP08, 2008). For the past decade average winter minimum temperatures have been consistently above 2°C across Wales (UKCIP08, 2008). Global air temperature

records also illustrate a pronounced upward trend towards warmer than average design years reflecting both increasing minimum design temperature's and a reduction in the absolute number of heating degree days.

Figure 1. UK Minimum daily mean temperatures in winter since 1915 (UKCIP08, 2008)



Despite climate data for Wales suggesting a more appropriate winter design temperature in the region of 2°C as opposed to -10°C it must be acknowledged that these figures do not illustrate the most extreme design temperatures possible, nor do they show sub-regional temperature variations, irradiation or wind exposure implications. Even accounting for regional variations in the minimum winter design temperature, it is likely that a slight relaxing of some aspects of the Passivhaus performance standard as applied in Wales is appropriate where peak loads well within the 10W/m² requirement can be demonstrated (Schneiders, 2003)

Satisfying the PassivHaus standard in different climatic zones across Europe

Research on UK Passivhaus heating load sizing was carried out by Schneiders under a European funded PEP project in 2003. Schneiders' parametric study illustrated that with an end of terrace dwelling and with opaque U values of 0.17 W/(m²K) and glazed U values of 0.85 W/(m²K) it is possible to comfortably meet the Passivhaus heating load and peak demand criteria using the Manchester climate provided that a south facing glazed area of between 10 and 30 m² is used in the reference dwelling. This glazing range can be considered reasonable since the reference dwelling used in the study is based upon an end of terrace dwelling with an exterior façade area of 74m², total glazed area of 30.4m² and a south facing glazed area of 19.9m² (Schneiders, 2003).

The derivation methodology for the heating load sizing assessment in PHPP07 is based upon the use of two different extreme weather data sets Weather 1 (W1) and Weather 2 (W2). These two data sets consist of directional radiation occurring during cold clear (W1) conditions and cloudy (W2) conditions (Feist, 2007). The datasets in PHPP07 were derived from Test Reference Years (TRYs) and reflect conditions which are likely to occur once every two

years, to which an additional safety margin of approximately 1.5 W/m² is added (Schneiders, 2003).

The use of MeteoNorm software allows another approach to generating this peak load irradiation data by allowing the interpolation of site specific extreme 10 year periods for the purpose of sizing peak loads. In theory this method should provide more robust data, although there is uncertainty with micro climatic influences when interpolations are carried out from measured data that is taken some distance from the site (Oberrauch, 2008).

Schneiders' research illustrates that there is a clear correlation between increased glazing area and increased peak heating loads, as might be anticipated. However in more temperate climates such as Amsterdam, Birr (Ireland) and Manchester an inverse correlation also exists between annual space heating demand and glazing area. This finding has also been demonstrated in colder climates where more advanced glazing standards were specified (Schneiders, 2003). It is clear from this research that an optimum relationship between heating load, heating demand and glazing area needs to be determined on a location specific and glazing dependent basis for each Passivhaus project.

Further research investigating the effect on peak heating loads and space heating demand of slightly relaxing Passivhaus thermal standards has also been carried out by researchers at Lund University, Sweden. Thermal modelling carried out on an apartment building at Värnamo, Sweden demonstrated that the difference between using windows with an installed U-value of 1.0 W/m²K instead of the PHI recommended installed value of 0.85 W/m²K resulted in only a small increase in the peak heating load from approximately 8.8 W/m² to 9.8 W/m² while the annual space heating demand remained well within PHI criteria (Janson and Wall, 2007). Considering that the winter design temperatures in this study (Värnamo, Southern Sweden, with monthly low averages in January and February of approximately -6°C) are significantly colder than in Wales, this finding has particular relevance to the adaptation of the Passivhaus thermal performance criteria to the Welsh context.

CASE STUDY

The case chosen is Hywlus Haus a 3bdm (87m²) detached Passivhaus project in Ebbw Vale, Wales. This is one of the first social Passivhaus projects in Wales and is due for completion in July 2010. Ebbw Vale is situated in a location where the affects of a maritime proximity combined with a mountain valley situation dominate the climate. This situation is common to many of the old mining towns situated

in the ‘Valleys’ region north of Cardiff. Much of this area suffers from severe social and economic deprivation and is receiving significant regeneration funding from the Welsh Assembly Government (WAG). As a result this area has become a focal point for the construction of social housing in the Passivhaus format.

Consideration of the annual (space heating) energy demand and peak load are of considerable importance in the design of Passivhaus dwellings particularly where post air heating is used as the primary source of supplementary heat input.

Results

In the absence of PHPP or Test Reference Year data for the Ebbw Vale site a bespoke climate data set was generated for this location using the MeteoNorm (MN) software (version 6). The methodology and limitations of this approach with respect to generating climate data for use in conjunction with PHPP are reasonably well documented (Oberauch, 2008). The unique feature of MeteoNorm is that it is able to interpolate between measured data sets to generate data for almost any given location. As with any software the outputs are a function of the source data and for this reason MeteoNorm requires a degree of judgement in the interpretation of the results.

The outputs for the annual heating energy prediction and peak load calculation can be compared for Hwylus Haus in Ebbw Vale by using the PHPP07 default data set for Manchester and the MeteoNorm data generated specifically for the site (Figure 2).

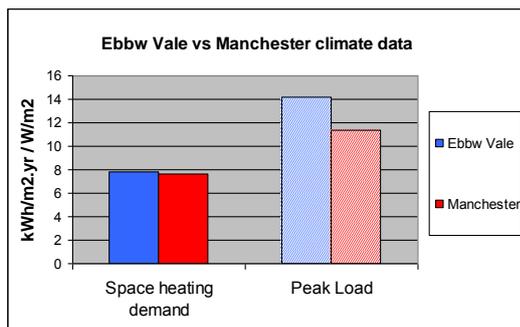


Figure 2. Heating and Peak Load using Manchester (PHPP) and Ebbw Vale (MN)

Despite Manchester being further north than Ebbw Vale and therefore theoretically receiving less annual irradiation (fig3) the PHPP07 results show a slightly higher space heating demand and a significantly increased peak load requirement for the dwelling if constructed in Ebbw Vale.

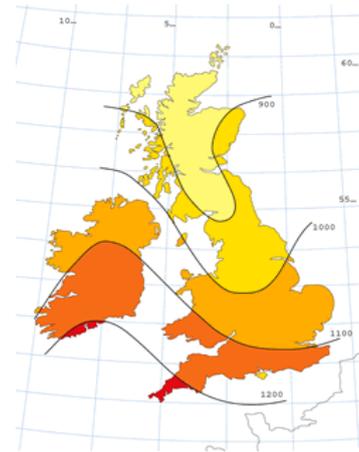


Figure 3. Irradiation map UK(ref)

During overcast conditions in winter (W2) radiation levels are significantly lower than during cold clear anticyclonic conditions (W1) and this results in the peak load often occurring after prolonged periods of cloudy weather despite the typically milder ambient temperatures during this time.

Comparing the W1 and W2 data for Manchester and Ebbw Vale illustrates the reason for the differences in peak loads. Interpolated data shows that Ebbw Vale receives far less incident irradiance during the critical winter peak load period than Manchester, despite average irradiation levels across the year being somewhat higher in Ebbw Vale as might be anticipated by the more southerly location.

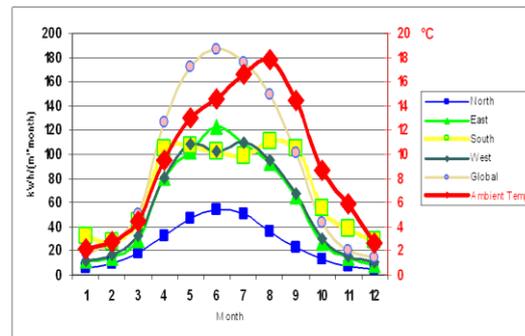


Figure 4a Monthly irradiance - Ebbw Vale

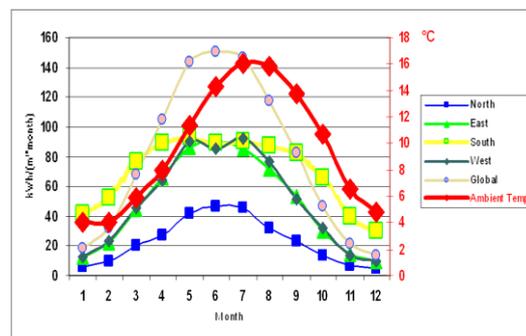


Figure 4b Monthly irradiance - Manchester

Most significant differences between the two Peak load predictions occur as a result of the differences between predictions occurring under the influence of the prolonged cold cloudy weather (W2) which dominates during the heating season in Ebbw Vale.

DISCUSSION

The findings of this study broadly confirm that the Passivhaus standard can be more easily achieved in a Welsh climatic context than in continental Europe as it would be expected from the milder winter design temperatures experienced in Wales. However recent research in to the implications of regional micro climates has also shown that there are significant concerns associated with the reliance on post air heating in regions dominated by low levels of irradiance due to prolonged cloud cover during the heating season. This situation is further exacerbated in exposed coastal and mountainous areas and additional verification of the climate data used in sizing the peak load is advisable if dispensing with a conventional heating system.

Previous research (Tweed and McLeod, 2008) using the PHPP model in the context of a terraced passivhaus in St Athan, a coastal location near Cardiff, provides an indication of the likely design tolerances that could be permissible for a Passivhaus in a coastal location with higher irradiance levels. Significantly, air infiltration rates of over 2 ach-1 @ 50 Pa and glazing U-values of up to 1.1 W/m²K did not (in isolation) prevent the dwelling from meeting either of the Passivhaus key performance criteria.

The research findings of Schneiders (2003) for Manchester and Ireland suggest similar findings with the Passivhaus standards being met using opaque U-values of 0.17 W/m²K and glazing U-values of 0.85 W/m²K. Similarly a study carried out on an apartment building in Värnamo, Sweden (Janson and Wall, 2007) indicated that it was possible to meet the Passivhaus peak heating load requirement in Southern Sweden using installed glazing U-values of 1.0 W/m²K.

Collectively these finding indicate that the passivhaus model is highly sensitive to localised climatic conditions in particular irradiance levels during peak load. It may well be possible to achieve the Passivhaus standard in Wales with a significant degree of tolerance in the opaque and glazed U-values where larger terraced row and multi-residential developments are built in areas of higher winter irradiance. Caution is needed in exposed cloudy micro climates particularly where small detached dwellings are concerned due to the relatively poor SA/V ratio. If confirmed through wider research studies, these findings could have implications for the design of passivhaus' where the local micro climate

has a strong influence on the optimisation of the glazing ratio, built form and need for a supplementary heating system.

Procurement of locally sourced Passivhaus components is an important objective for regional economic regeneration based on a low carbon economy and the concept of a 'Welsh Passivhaus'. This research demonstrates however that the overall rate of heat loss from a PassivHaus dwelling is highly context dependent and as a result general design guidance should not be inferred from these preliminary findings.

ISSUES ARISING FROM ADOPTING THE PASSIVHAUS STANDARD IN WALES

We have established that in principle the Passivhaus standard is a viable starting point from which to develop zero carbon housing solutions. There are, however, other issues to consider in promoting this standard. These may be addressed by asking three broad questions. Firstly, can the construction industry in Wales build to this standard? Our initial exploration of appropriate construction technologies suggested the standard might be achieved best through modern methods of construction (MMC), relying primarily on timber framing skills and techniques. This was the method used on the first three passivhaus dwellings at Ebbw Vale, and despite the relative inexperience of the construction teams very high standards of air tightness were achieved. Wales is gradually beginning to develop an MMC capability but it unlikely to be able to deliver sufficient quantity of buildings for several years. However, the database of Passivhaus projects in Austria (IG Passivhaus Oberösterreich, 2008) shows that a significant number (30%) use masonry construction, suggesting that it should be possible to adapt and continue to use these traditional construction methods in Wales.

A second key question is: can we afford to build to this standard? Cost reviews carried out by Cyril Sweett (Cyril Sweett, 2007)] and the Gentoo Housing Association (Thompson and Morrison, 2009) suggests there are significant costs associated with building to low carbon and Passivhaus standards in the UK. Notably these vary according to the dwelling type—detached, terraced, or apartments. Cost will remain a major factor in delivering a high volume of new zero carbon housing, and design optimisation must therefore also be addressed from an economic perspective..

Finally, it is important to ask if people will be willing and able to adapt to living in Passivhaus dwellings? Thermal conditions in a Passivhaus building that is

only heated by the ventilation system are finely balanced because the thermal capacity of the heated air is so low. Higher ventilation rates or higher internal heat gains are likely to destabilise the internal environment and so the occupants need to be able to 'fine tune' the building appropriately. There are also issues related to building maintenance. Comments in the Sullivan Report (Scottish Building Standards (2008) for example from Austrian contributors, who have direct experience of Passivhaus buildings; highlight the need for occupants, for to maintain the filters on MVHR systems to ensure adequate ventilation. Studies into the health implications of low ventilation rates are also being conducted and this in turn has implications for the specification of internal finishes and the need to monitor indoor air quality in air tight dwellings.

These questions and the research carried out here underline the need to conduct more detailed context specific research to discover the most practicable models for the wide spread role out of Passivhaus and zero carbon housing in Wales and the UK.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank Bere Architects and United Welsh Housing Association for sharing the findings of their experience in designing the first social PassivHaus dwellings in Wales. We would also like to thank our colleagues in the Welsh School of Architecture, Professor Chris Tweed and the Design Research Unit who provided details of their designs for the St Athan house and the Ty Unnos Passivhaus project in Ebbw Vale.

References:

- Boardman, B et al (2005). 40% House, Environmental Change Institute. University of Oxford, Oxford
- ECEEE (2009) Net zero energy buildings: definitions, issues and experience. *Steering through the maze #2*. (European Council for an Energy Efficient Economy).
- Jones, C. (2007). Programme of action to tackle climate change. Available: <http://wales.gov.uk/news/archivepress/environmentpress/2007/1420889/?lang=en>
- Weaver, W., (2006). "Brown pledges to build zero carbon homes." Guardian Unlimited Dec 6. Available: <http://www.politics.guardian.co.uk/> [June 07].
- HM Treasury. Pre Budget Report 2006. Chapter 7, Section 7.46 p168 Available: http://www.hm-treasury.gov.uk/media/2/2/pbr06_chapter7.pdf
- NHBC, 2008. Zero Carbon, What does it mean to home owners and householders. NF9 Available <http://www.nhbcfoundation.org>
- DCLG (2008). The Code for Sustainable Homes: setting the standard in sustainability for new homes, Department of Communities and Local Government. Available: www.communities.gov.uk [April 2008].
- UK Government, (2007). The Stamp Duty Land Tax (Zero-Carbon Homes Relief) Regulations 2007. Statutory Instrument No. 3437. The Stationery Office Limited, London.
- UK Government, (2007). Explanatory Memorandum To The Stamp Duty Land Tax (Zero-Carbon Homes Relief) Regulations 2007. Available: www.opsi.gov.uk/si/si2007/ [June 2008].
- Oberrauch, B (2008). How to generate Climate Data outside Germany in Simplified and Automatic Mode with Meteororm. Conference proceedings of 12th International Conference on Passive House 2008, Nuremberg
- Schnieders, J. and Hermelink, A., (2006). CEPHEUS results: measurements and occupants' satisfaction provide evidence for Passive Houses being an option for sustainable building, Energy Policy, 34.
- Feist, W., (2007). Passive House Planning Package 2007. PHI-2007/1(E).
- Feist, W., (2004). Passive House Planning Package 2004. PHI-2004/1(E).
- AECB 2008, CarbonLite Programme, Volume 3: The Energy Standards [available] <http://www.carbonlite.org.uk/carbonlite/>
- AECB (2006) Gold and Silver Energy performance Standards for Buildings. Available: <http://www.aecb.net/energyinbuildings.php> [31 Aug 06].
- Feist, W., Schneiders, J., Dorer, V. and Haas, A., (2005). Re-inventing air heating: Convenient and comfortable within the frame of the Passive House concept. Energy and Buildings, 37, 2005.
- International Energy Agency. Demonstration Houses in Germany. IEA-SCH Task 28/ ECBSC Annex 38: Sustainable Solar Housing pdf
- Brans J., (2008). Passiefhuis-Platform vzw. PHPP Course Feb 21, 2008 Milton Keynes, UK.
- UKCIP. The climate of the UK and recent trends: Maps.
- Schneiders, J., (2008). In conversation, 11 April. 12th International Conference on Passive Houses, Nuremberg.

- Schneiders, J., (2003). Climate Data for the determination of Passive House Heat Loads in North Western Europe. PEP Project Information, EIE-2003-030
- Janson, U. and Wall, M., (2007). Experiences from apartment buildings as passive houses in Sweden. 11th International Conference on Passive Houses 2007. p118 PHI, Darmstadt.
- IG Passivhaus Oberösterreich. Available: <http://www.igpassivhaus.at/ooe/> [June 2008].
- Scottish Building Standards (2008). A Low Carbon Building Standards Strategy for Scotland (The Sullivan Report). Available: <http://www.sbsa.gov.uk/sullivanreport.htm> [June 2008].
- Cyril Sweett, (2007). A Cost Review of the Code for Sustainable Homes, February. Available: www.greenspec.co.uk/documents/drivers/CodeCostReview.pdf [June 2008].
- Tweed, C. and McLeod, R (2008). Meeting the 2011 zero carbon buildings target for Wales using the Passivhaus standard. PLEA 2008, 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Dublin 2008.
- Thompson, A and Morrison, I (2009) A review of Passivhaus and traditional building designs against the Code for Sustainable Homes, Gentoo Housing Association 2009

THE IMPACT OF USER AND SYSTEM ASSUMPTIONS ON ENERGY SIMULATION RESULTS

Kristina Kiesel, Kristina Orehounig, Ardeshir Mahdavi
 Department of Building Physics and Building Ecology
 Vienna University of Technology
 Vienna, Austria

ABSTRACT

Using the example of an existing office building, the present paper explores the influence of different simulation input assumptions such as set point temperatures and ventilation behavior on the heating load of a building. Moreover, heating load simulation results with empirically-based input assumptions are compared with simulation that use standardized input assumptions.

INTRODUCTION

The heating load of a building is influenced by several factors, the building itself (geometry, construction, layout, mechanical equipment), the climate, the location, and the users. It is important to know the influence these assumptions have on the predicted heating load of a building, if a building's thermal performance is to be optimized through a simulation-supported building design process.

In this context, the first objective of this paper is to explore the influence of different simulation input assumptions such as set point temperatures and ventilation behavior on the heating load of a building. The second objective is to compare the extent to which observation-based and code-based simulation assumptions lead to different results in terms of predicted heating load magnitudes.

METHOD

To pursue the above objectives, the following approach was taken:

First, an existing typical office building in Hartberg, Austria was selected as the case in point (Mahdavi 2008). We focused on the thermal performance of six office spaces in this office building (R1 to R6). Figure 1 shows the northeast facing façade with the location of the observed offices. Figure 2 shows a schematic floor plan. The offices were located on the first and second floor of the building. They were either single or double occupancy with two to three manually operated windows, manually operated radiators and four to six luminaries. No ventilation or air conditioning system was installed. The

workstations were equipped with desktop computers and in some cases printers.

Subsequently, the indoor conditions in these offices (air temperature and relative humidity, illuminance) were monitored together with user presence and actions (opening and closing of windows, deployment of shades, switching the lights on and off) (Mahdavi 2007). In addition, a weather station was mounted on top of the building collecting information about outdoor temperature and relative humidity, as well as global horizontal irradiance and illuminance. The data was measured and stored every five minutes. Window opening and shading was monitored via time-lapse digital photography: the degree of shade deployment for each office was derived based on regularly taken digital photographs of the façade. The observation period was from mid November 2005 to July 2006.



Figure 1 Façade of the building and location of observed offices

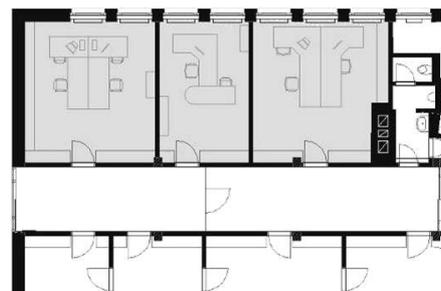


Figure 2 Schematic floor plan of sample offices in Hartberg

To perform parametric simulations, a thermal simulation tool (EDSL 2009) was selected. The simulation model of the six offices was generated based on available data and additional assumptions pertaining to the existing building. An initial model was simulated based on the monitored local weather data as well as observed user presence and control actions. Through the comparison of this model's results (predicted indoor temperatures) with the corresponding measured data, a calibrated version of the initial simulation model could be generated. The process of generating and applying of a calibrated simulation model is illustrated in figure 3. To exemplify the performance of the calibrated model, Figure 4 shows the measured and the simulated indoor air temperature, as well as the outdoor temperature for three days in may 2006. By using this calibrated model, alternative scenarios for the thermal improvement of the building could be assessed and evaluated (Mahdavi 2007).

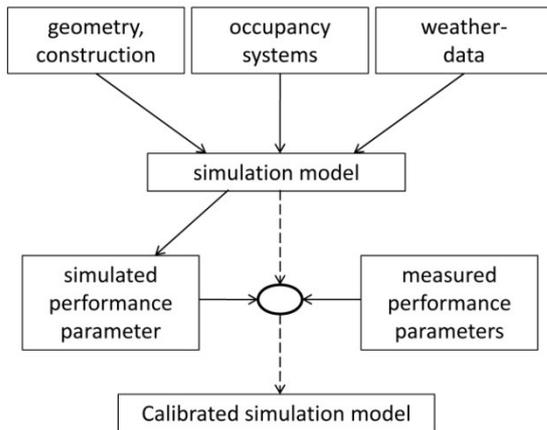


Figure 3 Illustrative depiction of the process of simulation model generation, calibration, and application (Mahdavi 2007)

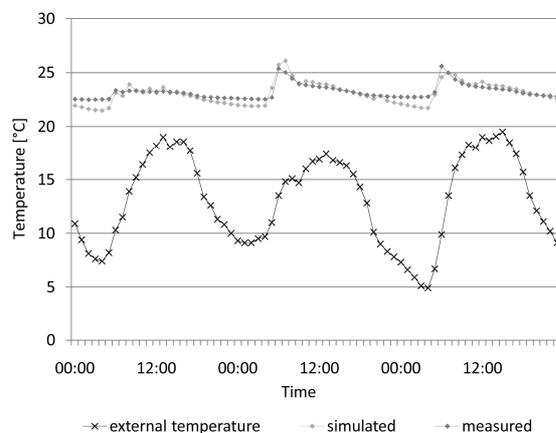


Figure 4 Comparison of the predicted results with corresponding measurements (indoor temperature in an office over the course of 3 days)

Given the calibrated simulation, a base-case (S-1) for the first set of parametric simulation studies was defined as follows: Geometry, materials, and weather conditions as well as the prevailing indoor air temperatures, occupancy, state of windows, shades, and luminaries were all based on observations.

To explore the implications of deviations from this base case, eight additional scenarios (M-1 to M-8) were constructed (see Table 1). The simulation model S-1 and the scenarios M-1 to M-8 are limited to five months (December to April). This period is referred to as observation period. Both a code-based set point temperature of 20°C (M-1, M-2, M-6) and 22.9°C (measured mean indoor temperature in the observation period) were considered for occupied office hours (M-3, M-4). Window operation (duration, position) was defined in scenarios M-5 and M-8 in a manner such that a code-based hourly air change rate (ACH) of approximately 1.22 h⁻¹ could be maintained during the occupancy hours. To consider night and holiday temperature setback (unoccupied hours), an indoor air setback temperature of 13°C was selected (M-2, M-4, M-6, M-7, M-8).

Table 1
Scenarios M-1 to M-8

	MODIFICATIONS TO S1
M-1	Set point temperature 20°C
M-2	Set point temperature 20°C ; night and holiday setback to 13°C
M-3	Set point temperature 22.9°C (mean value of the measured indoor temperature during occupied hours)
M-4	Similar to M-3, but with night and holiday setback to 13°C
M-5	Effective prevailing air change rate about 1.2 h ⁻¹
M-6	Combined M-2 and M-5
M-7	Night and holiday setback to 13°C
M-8	Combined M-5 und M-7

As mentioned before, simulated heating loads would be different, if, instead of actual observations, code-based simulation assumptions are used. To address this problem, a second set of parametric simulations were run. Thereby, the base case (C-1) represents fully code-based simulation input assumptions as per the relevant Austrian standard (OENorm 2007). Scenarios C-2 to C-8 (Table 2) have been modified in one or the other way to explore the influence of the altered input assumptions on the simulation results. These modifications refer to heating load, calendar, weather data, indoor air temperature, and internal gains (occupancy, lighting, equipment).

The standardized calendar (OENorm 2007) was exchanged with the actual calendar relevant for the observation period (2005/06) (C-2, C-4, C-5, C-8).

Instead of the standardized weather file -generated using Meteonorm (Meteotest 2008) - the actually collected weather data was applied (C-3, C-4, C-5, C-8). Temperature set point was changed to 22.9°C (C-5). The internal gains were also modified. In OENorm B 8110-5 a single value is given for all internal gains. In scenario C-6, C-7 and C-8 the internal gains were separated into light, equipment and occupancy. Toward this end, the hourly lighting loads for a reference day (representing the observation period) was derived based on measured data (see Figure 5 for the lighting load assumptions expressed in percentage of the respective maximal installed lighting power).

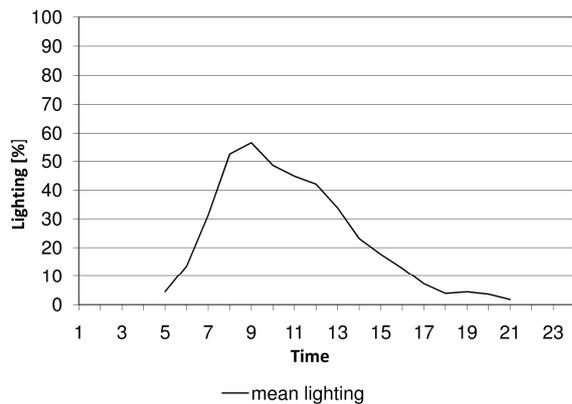


Figure 5 Mean lighting level over the course of a reference day (Mahdavi 2009)

The generic model of occupancy (see Figure 6) represents an average pattern derived from observations in 6 buildings in Austria (Mahdavi 2009) (C-6). The specific occupancy pattern for Hartberg was specifically derived for this building (see Figure 6) (C-7 and C-8).

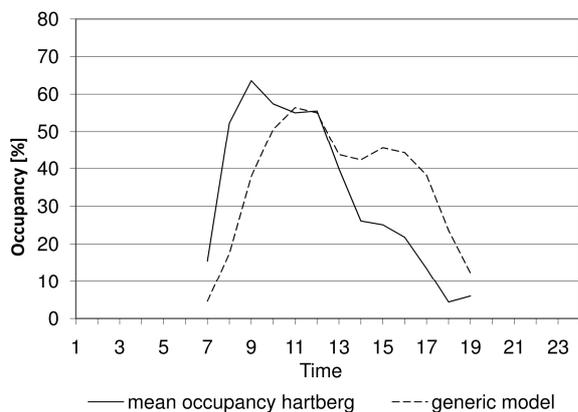


Figure 6 Mean occupancy Hartberg and generic model of occupancy over the course of a reference day

The input assumption for equipment has been linked to occupancy, assuming that the office equipment was used, whenever the office was occupied. This

assumption was used in connection with the generic model of occupancy or mean occupancy HB.

Table 2
Scenarios C-2 to C-8

MODIFICATIONS TO C1	
C-2	Calendar 2005/06
C-3	Local (measured) weather information
C-4	Combination C-2 and C-3
C-5	C-4; set point temperature 22.9°C
C-6	Observation-based lighting load; generic occupancy model
C-7	Observation-based lighting load; building-specific mean occupancy
C-8	Combination of C-4 and C-7

RESULTS

Figure 7 shows the simulated heating load results for S-1 for each room over the observation period. The corresponding results for scenarios M-1 to M-8 over the observation period are shown in Figure 8. Heating load results for scenarios C-1 to C-8 are shown in Figure 9 (whole year) and figure 10 (observation period).

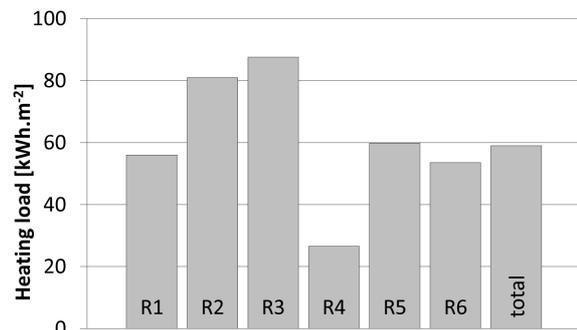


Figure 7 Simulated heating loads for S-1 (for rooms R1 to R6 as well as the total) over the observation period

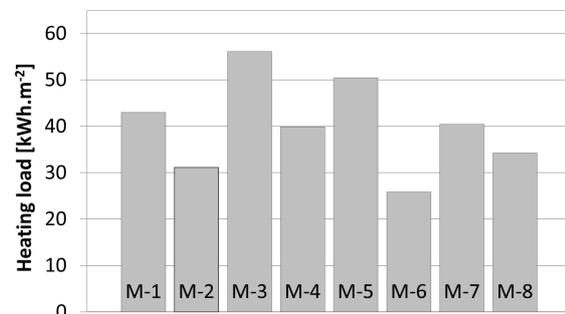


Figure 8 Simulated heating loads for scenarios M-1 to M-8 over the observation period

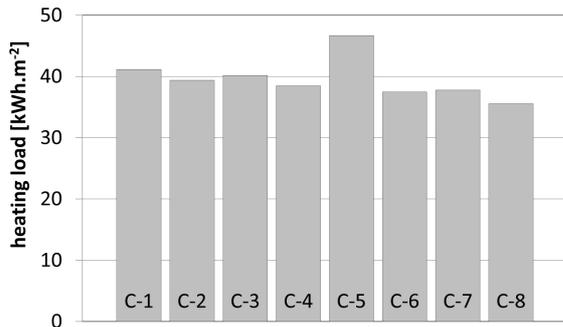


Figure 9 Simulated heating loads for scenarios C-1 to C-8 over the observation period

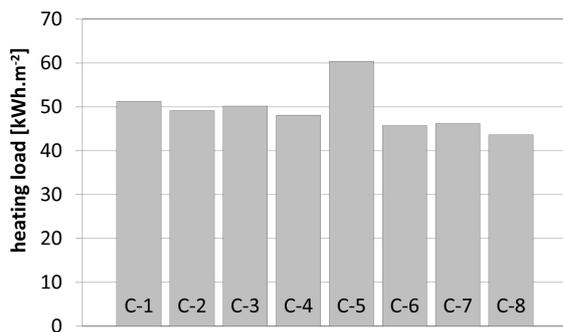


Figure 10 Simulated heating loads for scenarios C-1 to C-8 over the entire year

DISCUSSION

Variance of heating loads in different rooms

Figure 7 suggests a significant difference in the simulated heating loads of the selected offices. To obtain a better understanding of the contributing factors, a more detailed analysis was performed (see Figure 11). Thereby, simulated heating loads for the observation period are shown for the individual rooms together with empirically-based input assumptions concerning window opening (ratio of open window area to the room's floor area), indoor air temperature (mean value of the occupied office hours), and internal gains (mean value). Note that in Figure 11 the input information is not given in absolute terms. For internal gains and window areas, they were expressed as the percentage of the highest value in each category. For indoor temperature, 100% denotes the highest observed mean temperature (24.3 °C) and 0% a reference mean temperature of 20 °C.

As Figure 11 implies, higher indoor air temperatures generally translate into higher heating loads. Room 6 seems to contradict this conclusion. However, the internal gains are, in this case, the lowest of all rooms, thus contributing to higher heating loads. As to the window opening, higher values generally correlate with higher heating loads. The exception in this case, namely R3, has the highest indoor air temperature. Apparently, the associated heating

requirement was not compensated either with the high internal gains or the lower window opening level.

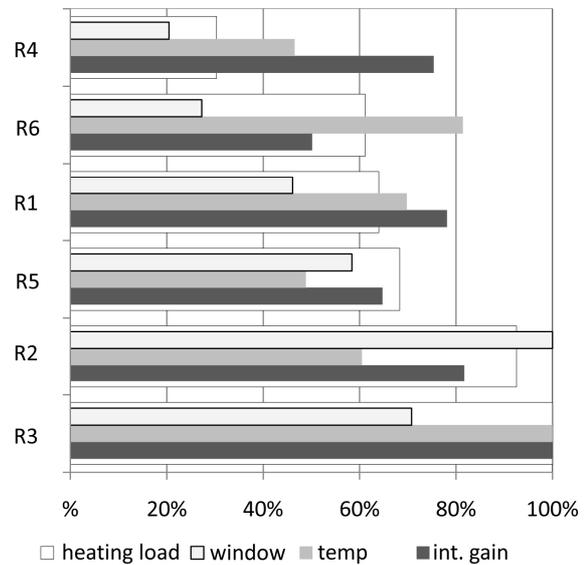


Figure 11 Simulated heating load (heat), as well as observed values of mean window opening area (window), mean indoor air temperature (temp), and internal gains (int.gain) expressed in percentage of the highest (reference) value for each item.

Impact of input assumptions (scenarios M-1 to M-8)

Figure 12 shows simulated heating load reduction to scenario M-1 to M-8 compared to S-1. None of the scenarios increased the heating load. The scenario with the lowest heating load is M-6. (56.9% lower than S1). This implies that a combination of several measures is necessary to achieve the largest effect. If we consider single measures (single changes to S1), scenarios M-1, M-3, M-5, and M-7 would be relevant. The most effective scenario (31.4% load reduction) with only one modification to S1 is M-7 (temperature setback for the non-occupied hours). Moreover, lowering the temperature set point for heating (M-1) also reduced heating load significantly (27.1%). Realizing an equivalent air change rate of 1.2 h⁻¹ would also lead to heating load reduction (14.5%; scenario M-5).

It can thus be concluded, that in the present case lowering the average indoor temperature (e.g. through setback schedule for non-occupied hours) is the most important factor toward heating load reduction. Priority should of course be first given to heating schedules that involve temperature setbacks in the non-occupied hours, as these do not affect users' freedom in setting their preferred room temperatures.

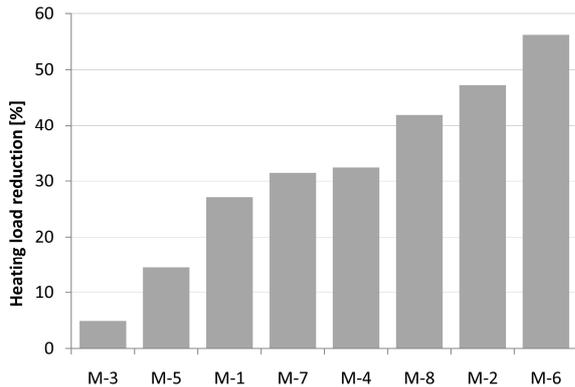


Figure 12 Heating load reduction [%] for scenarios M-1 to M-8 compared to S-1

Most efficient measure (M-1 to M-8)

Obviously, the choice between multiple alternative measures toward energy conservation must consider "practical" issues, such as the ease and cost of implementation. We define here this "cost" or "expenditure" factor in terms of three variables: financial investment require to realize the measure, effort (required behavioral change), and frequency (of required actions on the user side). To address this issue in a simplified (and qualitative) way, we rate these expenditure criteria in terms of the attributes: low (1), medium (2), and high (3). The corresponding values are simply added up to provide an aggregated indicator value. Figure 13 shows, for three measures: heating schedule for non-occupied hours, global fixed set point temperature, directed user-based window operation). These measures correspond to scenarios M-7, M-1, and M-5 respectively (see Table 1).

The financial cost of directed user-based ventilation is obviously low (M-5), but the effort required from the users and the frequency are considerably high. The installation of thermostats for temperature control (M-1) requires some financial investment but little in terms of effort and intervention frequency. Reducing the heating at night and on weekends (M-7) can be done automatically or manually. In the present discussion, we make the assumption that it is done automatically and therefore the respective financial expenditure is medium. The required effort is low, as no work needs to be done and the frequency is medium, as the system has to be maintained and adjusted regularly.

Interestingly, those measures that can be done easily, also have a high impact on heating loads. Proper adjustment of user-based ventilation is rather difficult to achieve. Moreover, in the present instance, it does not display a significant impact on heating load. Adjusting the set point temperatures and scheduled temperature setbacks (during the night hours), on the other hand, do have a high impact and are easy to implement (see Figure 13).

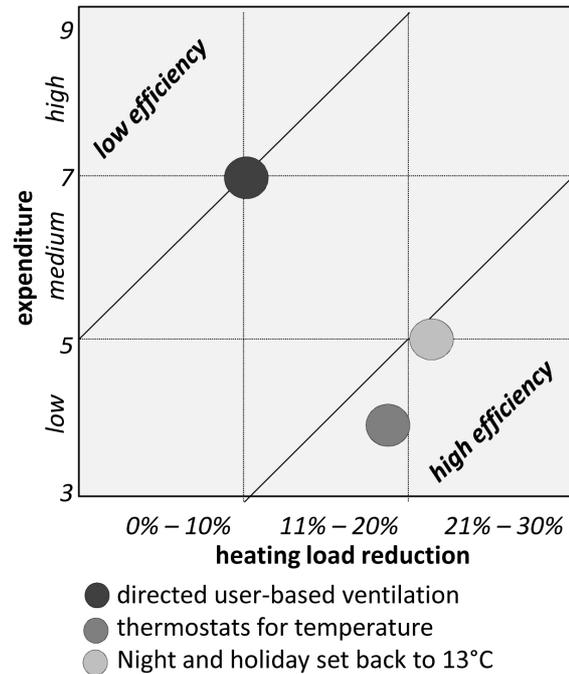


Figure 13 A simplified comparison of the thermal effectiveness (heating load reduction) of three measures (see text) in terms of the expected expenditures

Comparison of simulation results obtained by observation-based input data (S-1) with those obtained by code based input data (C-1)

Computed heating demand as per the code based scenario C-1 is 30% lower than the respective results of the S-1 simulation model. To account for possible reasons for this difference, Figure 14 shows S-1 and C-1 results along a number of "intermediate" scenarios.

Looking at the input assumptions in both models, the following can be noted:

Contrary to the code based scenario there was no temperature setback for the non-occupied hours and no set point temperature in the actual building. And the observed ventilation behavior differs from the one assumed by the code. Figure 14 shows the deviation in heating load [$\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$] between observation based simulation model S-1 and code based simulation model C-1 and the impact of the different input assumptions on the heating load.

Adding temperature setback for the non-occupied hours to the S-1 scenario (a step that would bring this model closer to the code based assumptions) translates into a heating load reduction of $18.6 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ (M-7). Implementing a code based fixed set point temperature (M-8) would further reduce heating load another $6.2 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$. If ventilation behavior is changed, such that it would correspond to the code based minimum air change rates (M-6), a further

decrease in heating demand would result (8.4 kWh.m⁻²).

On the other hand, input assumptions for C-1 could also be modified so as to better relate to observed information as the basis for simulation model input. C-2 uses the actual calendar of the applicable year, which has fewer working days than the standardized calendar (applied in C-1). This is due to the fewer working days in the actual year. Likewise, C-4 uses the actually monitored weather data instead of the reference year weather file used for C-1. Moreover, C-8 uses observation-based internal gains assumptions as opposed to code based assumptions.

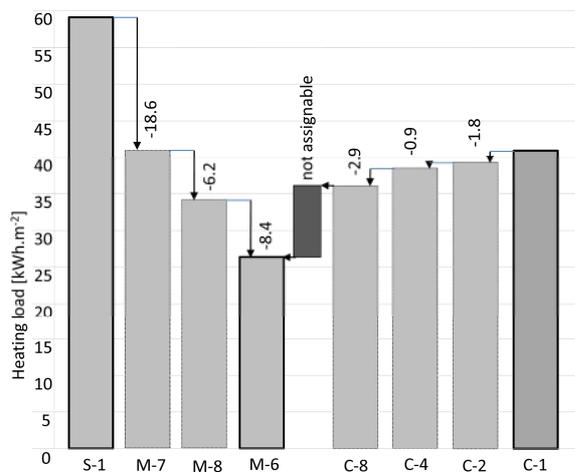


Figure 14

Exploring the contributing factors to the difference between observation-based and code-based simulation results (heating load in kWh.m⁻²)

CONCLUSION

Importance of human behavior

Next to the necessity of effective central control of buildings environmental systems (e.g. night-time temperature setback) the study points to the critical importance of human behavior. The prevailing temperatures in the observed offices were mostly too high. Very high set point temperatures for indoor air combined with excessive ventilation lead to unjustifiably high heating demands (see, for example R2 in Figure 11). On the hand, appropriate set points for indoor temperature together with proper ventilation behavior lead to relatively reasonable heating requirements (see R1 and R5 in Figure 11). Of course the human factor is hard to predict, and therefore difficult to calculate. But the impact the user behavior has on the heating load is significant. By informing the users about the influence of their behavior on buildings' energy use, a change in behavior may result, leading to a better building performance.

Benefits and limitations of standards

Standards typically use highly simplified calculation methods (OENorm ...). Specifically, models of human behavior are rather crude. Reliable approximations of actual energy performance cannot be expected from code-based procedures, unless much more realistic (empirically-based) input information (concerning internal gains, occupancy, ventilation behavior) become available.

Effectiveness and efficiency of measures

An attempt was made to put the energy conservation objective in a broader context including the human dimension and the expenditures for realization of improvement measures. The initial results of this effort indicate that the most effective measures to reduce heating loads do not have to be either expensive or difficult to implement.

REFERENCES

- EDSL 2010. A-TAS Version 9.1.4. Environmental Design Solutions Limited. www.edsl.net
- Mahdavi, A. 2007. People, Systems, Environment: Exploring the patterns and impact of control-oriented occupant actions in buildings. (Keynote) PLEA 2007. Wittkopf, S. & B. Tan, B. (Editors)
- Mahdavi A., Orehoung K., Mikats N., Lambeva L., El Habashi A. 2007. Analyzing Traditional Buildings Via Empirically Calibrated Building Performance Models, Proceedings of the 10th International Building Performance Simulation Association Conference and Exhibition, Beijing, China.
- Mahdavi A., Mohammadi A., Kabir E., Lambeva L. 2008. Occupants' operation of lighting and shading systems in office buildings. Journal of Building Performance Simulation, 1 (1), p. 57-65.
- Mahdavi A., Pröglhöf C. 2009. Towards empirically based models of people's presence and actions in buildings, Proceedings of the 11th IBPSA Conference, Building Simulation 2009, Glasgow, Scotland, pp. 537 - 544
- Meteotest 2008, Meteonorm Version 6.1, www.meteonorm.com
- OENorm 2007, B 8110-5: Thermal insulation in building construction - Part 5: Model of climate and user profiles, Austrian Standards Institute, Vienna

WINDOW AREA IN OFFICE BUILDINGS FROM THE VIEWPOINT OF ENERGY EFFICIENCY

Farshad Nasrollahi
 Research Associate

Berlin University of Technology, Building Technology and Design, Young Cities, Germany

E-Mail: farshad.nasrollahi@tu-berlin.de

ABSTRACT

Windows play a major role in the amount of energy consumption of buildings. This paper studies the effect of window area and shading devices on the energy consumption of office buildings in the climatic condition of Tehran region. Simulation is used for calculating the heating, cooling and lighting energy consumption of office buildings with different window area. The simulated buildings have the same constructional and architectural characteristics and differ only in the window area and the type of shading devices. Comparison of the amount of energy consumption of buildings shows the behaviour of energy consumption of office buildings regarding the window area and shading devices.

INTRODUCTION

Building energy simulation plays a decisive role in research on energy efficiency in buildings. Building energy simulation is a powerful analytical method for building energy research and evaluation of architectural design (Hensen et al. 1993, pp.17- 23, Seth 1989, pp.240-247) and it is also a cost and time saving device. It aims to imitate the real physical conditions in a building by creating a mathematical model that represents all energy flow paths in a building as well as their interactions (Rizos 2007, p.16).

Simulation can be used for evaluation of buildings from the viewpoint of energy efficiency as well as optimization of energy performance of buildings.

This paper uses simulation for calculating the energy consumption of buildings in order to optimize their energy performance. One of the most important methods for optimization of energy performance of buildings is an analytical evaluative process, which deals separately with different architectural factors including orientation, opening orientation and ratio, sun shading etc. and also with constructional factors and elements such as arichange rate, thermal mass, insulation material, etc.

Because windows and shading devices are the key factors in building energy performance, among all architectural factors, this paper deals with window area and the type of shading devices. It studied the effect of window area in different orientations on the energy consumption of office buildings. It searches for the optimal window area and the most appropriate application of this building element under different conditions. An analysis of the simulations shows the behavior of energy efficiency of office buildings in relation to window area. Simulation with a developed dynamic simulation software tools is used in this research to accurately calculate the energy consumption of office buildings. Hourly weather data of Hashtgerd New Town, as research area, is also used to define external conditions during simulations.

Hashtgerd New Town is a small city in Tehran province, which is located 60km west of Tehran, north of the Tehran-Qazvin highway.

This new town is located in the “warm and dry” climatic region of Iran and has a cold winter and a warm and dry summer. The following graph shows the monthly average dry-bulb temperature of Hashtgerd in comparison with that of the coldest and warmest cities of Iran.

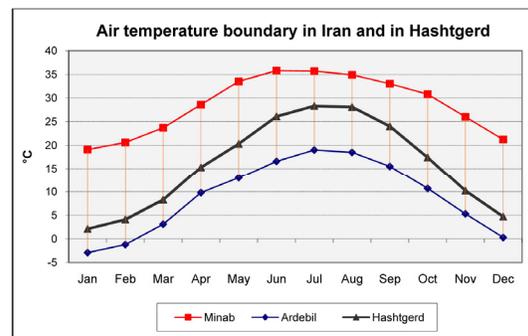


Figure 1, Source: Based on data from Iran Meteorological Organization, 2009

To do that, different office buildings differing in window area are simulated with different variants for the given factor. Comparison of the amount of energy consumption of the building and also analyzing of the results leads to the optimal measures for windows for office buildings in the climatic condition of Hashtgerd. A 3-floor cell office building was designed to be used as reference for simulations and analysis.

DesignBuilder is used for simulation of buildings. DesignBuilder is the first comprehensive user interface to the EnergyPlus dynamic thermal simulation engine. It combines rapid building modeling and ease of use with state of the art dynamic energy simulation. This program analyses the effects of design alternatives on key design parameters such as: annual energy consumption, overheating hours, and CO₂ emissions (DesignBuilder Software Ltd 10.05.2008)

WINDOW

Window area in different orientations excessively affects the energy consumption of buildings and is one of the most important factors for architectural energy efficiency.

In order to find the optimum window ratio from the viewpoint of energy efficiency, different office buildings are simulated. These buildings, which oriented to south and elongated in the east-west axis, have the same window/wall ratio in all orientations. These buildings are simulated under the same (climatic, constructional and architectural) conditions and all characteristics of these buildings except window area are the same. For minimizing the effects of the characteristics of thermal envelop on the results, the U-values of the components of thermal envelope of all buildings are the same¹.

The hot water radiator is used for heating of these buildings and chiller for cooling of these buildings. All characteristics of heating and cooling systems are the same in all buildings. In these buildings, the amount of energy consumed for heating, cooling and lighting is considered.

Windows without Shading Devices

In order to find the optimum window area for office buildings, 11 buildings with different window/wall ratio are simulated. The window/wall ratio is the

¹ - The U-value of the components of the thermal envelope of all simulated office buildings are as following:

Exterior Wall: 1.02 W/m²K - Roof: 0.44 W/ m²K - Floor (adjacent to earth): 2.12 W/ m²K - Windows: 3.94 W/ m²K - Exterior Door: 5.11 W/ m²K - Interior Wall (adjacent to uncontrolled Space): 0.8W/ m²K.

same in all orientations. The windows have no shading devices.

The following graph shows the heating, cooling, lighting and total energy consumption of this office building with different window ration.

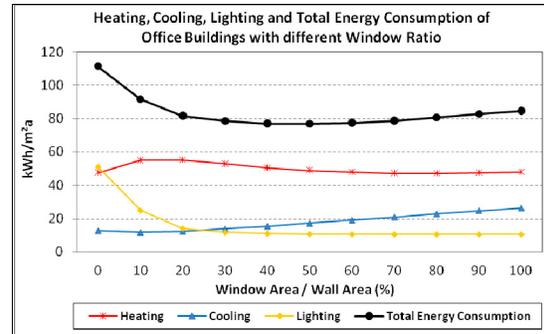


Figure 2

The following results can be derived from the above graph regarding heating, cooling, lighting and total energy consumption of office buildings:

Heating Energy Consumption

The heating energy consumption of office buildings decrease by increasing the window area from 10 to 80% window/wall ratio.

Increasing the window to wall ration from 80 to 100% will increase a bit the heating energy consumption.

Cooling Energy Consumption

The cooling energy consumption of office buildings increase by increasing the window area from 10 to 100% window/wall ratio.

Lighting Energy Consumption

Increasing the window area of the office building from 0 to 100% window/wall will reduce the energy demand for lighting. But reduction of lighting energy consumption is very high from 0% to 30% window/wall area. After 30% the lighting energy consumption will be decreased very slowly. Especially after 40% window ration the reduction of lighting energy consumption is very little, which can be renounceable (connived). That means from the viewpoint of energy efficiency, 30% window/wall ratio is the optimal ration when only lighting is concerned.

Total Energy Consumption

Increasing the window area from 0 to 50% window/wall ratio will decrease the total energy consumption of office buildings. But increasing the window area in all orientations from 50% to 100% window to wall area increases the total energy

consumption. It shows that, if the windows have no shading devices, the optimum window ratio for office buildings, which have the same window to wall ratio, is 50%.

Windows with External Blind

The following graph shows the heating, cooling, lighting and total energy consumption of an office building with different window ratio. The window/wall ratio is the same in all orientations. The windows of these buildings have external blinds.

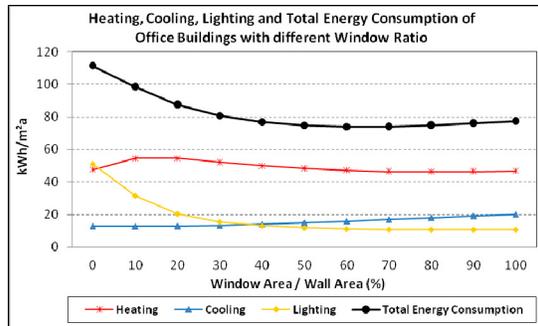


Figure 3

The following results can be derived from the above graph regarding heating, cooling, lighting and total energy consumption:

Heating Energy Consumption

Increasing the window area from 0 to 20% window/wall ratio will increase the heating energy consumption of office buildings.

Increasing the window to wall ratio from 20 to 80% decreases the heating energy demand of office buildings.

Increasing the window to wall ratio from 80 to 100% will increase a bit the heating energy consumption.

Cooling Energy Consumption

The cooling energy consumption of office buildings increase by increasing the window area from 10 to 100% window/wall ratio.

Lighting Energy Consumption

Increasing the window area of the office building from 0 to 100% window/wall will reduce the lighting energy consumption. But reduction of lighting energy consumption is very high from 0% to 30% window/wall area. After 30% the lighting energy consumption will be decreased very slowly.

Total Energy Consumption

Increasing the window area from 0 to 50% window/wall ratio in all orientations will decrease

the total energy consumption of office buildings in Hashtgerd. But increasing the window area from 50% to 100% window to wall area increases the total energy consumption. Therefore, the optimum window ratio for office buildings with the same window to wall ratio in all orientation is 50%.

North-Facing Windows

Last simulations has shown that, 60% window ratio in all orientations is the optimum window area for total energy consumption of buildings. But to find the optimum window ratio separately for every of four orientations, different office buildings with 60% south, east and west-facing window ratio and various north-facing window ratio are simulated.

This graph presents the energy consumption of this office building with different north-facing window area and 60% south, east and west-facing window area.

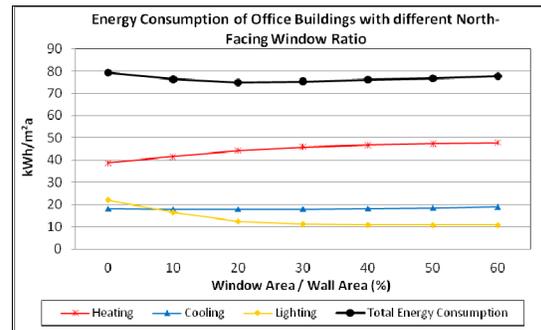


Figure 4

These results can be derived from the above graph regarding heating, cooling, lighting and total energy consumption of office buildings.

Heating Energy Consumption

The heating energy consumption of office building increases with the increasing the north-facing window area.

Cooling Energy Consumption

The cooling energy demand of the office building will decrease from 0 to 20% window/wall ratio. But increasing the window area over 20% will increase the cooling energy demand. The effect of the north-facing window area on cooling energy consumption of office buildings is very low.

Lighting Energy Consumption

Increasing the north-facing windows decreases the lighting energy consumption of office buildings. But decreasing the lighting energy consumption after 20 and 30% is very low.

Total Energy Consumption

The sum of heating, cooling and lighting energy consumption of office buildings will decrease with increasing the north-facing window ratio from 0 to 20% window area to wall area. Increasing the north-facing window area over 20% increases the total energy consumption of office buildings. That shows that the optimum window area for north-facing façade is 20% and can be increased up to 30%.

East and West-Facing Windows

Last simulations has shown that, 60% window ratio in south-facing façade and 20% window in north-facing one are the optimum window area regarding total energy consumption of buildings. In order to find the optimum window ratio for east and west orientations, different office buildings with 60% south-facing windows and 20% north-facing windows and various east and west-facing window ratio are simulated.

The following graph presents the results of these simulations.

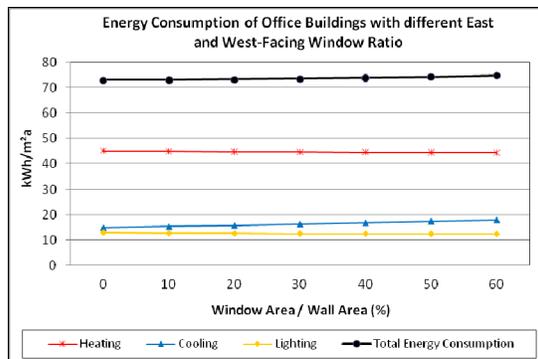


Figure 5

This graph proves that the behavior of office buildings regarding the area of east/west-facing windows is as follow:

Heating Energy Consumption

The heating energy consumption of office building decreases with the increasing the east and west-facing window area. That is because the building can have solar gain from both east and west-facing windows in winter.

Cooling Energy Consumption

The cooling energy demand of the office building increases by increasing the east and west facing windows. The east and west-facing windows have very high solar gain in summer. Solar gain of east and west-facing windows in summer is also much more than of that in winter. Therefore east and west-facing windows are weakness of buildings from the

viewpoint of energy efficiency and especially for cooling.

Lighting Energy Consumption

Increasing the east and west-facing windows decreases the lighting energy consumption of office buildings. The effect of east and west-facing windows on lighting energy is very low.

Total Energy Consumption

The sum of heating, cooling and lighting energy consumption of office buildings increases by increasing the north-facing window ratio, however the building with 10% east and west-facing window is very little more than the building with no east and west-facing windows. For this reason and because of importance of daylighting, the optimum window ratio for east and west-facing facades is 10%.

SHADING DEVICES

Overhang

In order to find the effect of overhangs and their projection size on energy consumption of office buildings in Hashtgerd, an office building with different overhang projection size are simulated. The windows in all orientations have similar overhangs with the same projection size.

This graph shows the heating, cooling, lighting and total energy consumption of an office building with overhangs with different projection size.

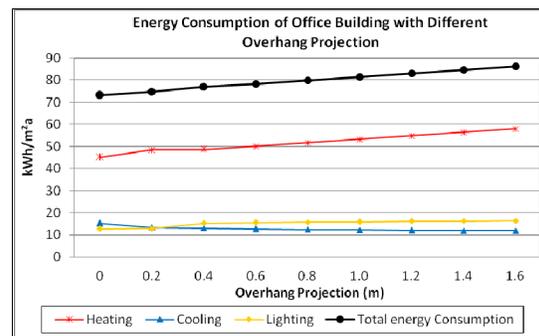


Figure 6

Comparison of the energy consumption of these buildings shows that:

Having overhang and increasing the projection size of overhangs will increase the heating energy demand of office buildings in Hashtgerd.

Having and increasing the projection size of overhangs will reduce the cooling energy consumption of office buildings.

Overhangs increase the lighting energy consumption of office buildings in Hashtgerd.

The increase of heating energy consumption by overhangs with different projection sizes is more than reducing the cooling energy demand of the building. The decrease of cooling energy demand is approximately equal with the increase of lighting energy demand.

Therefore, using overhang for windows of office buildings in all orientations and also increase of the projection size of overhangs will increase their total energy consumption.

High solar altitude in Hashtgerd especially in summer and short work time of office buildings in Iran (and Hashtgerd) and situation of a big part of work time before noon, are the most reasons for little effect of shading devices on energy consumption of office buildings in Hashtgerd.

External Blind

In order to study the effect of external blinds and the type of controlling them on energy consumption of office buildings in Hashtgerd, an office building without any shading devices and with external blind with different type of controlling the blinds are simulated. Comparison of the heating, cooling, lighting and total energy consumption of this office building with and without external blinds shows that the external blinds and type of controlling them will affect heating, cooling, lighting and total energy consumption of office buildings.

This graph presents the energy consumption of the simulated buildings.

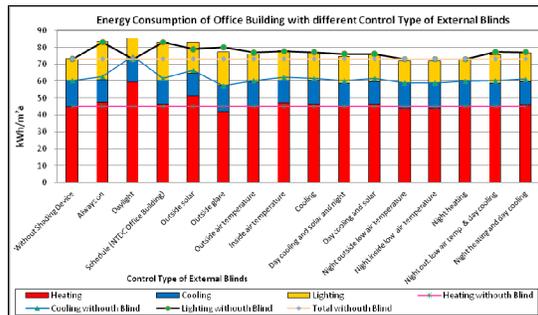


Figure 7

The following results can be derived from this graph.

Heating Energy Consumption

The heating energy consumption of office buildings will change according to the control type of external blind. External blinds will reduce the heating energy consumption of building in comparison with not having any blind, if they are controlled controlling to: "outside air temperature", "day cooling and solar and night", "night outside low air temperature", "night inside low air temperature", "night heating"

and "night outside low air temperature and day cooling".

Because closing the blinds in the winter nights will reduce the heat loss through long wave radiations, the controlling types reducing the heating energy demand, relates to night controlling.

Cooling Energy Consumption

External blinds decrease the cooling energy consumption of office building with most types of controlling. They increase very low the cooling energy consumption, if they are controlled according to "Outside air temperature", "Night outside low air temperature", "Night heating" and "Night inside low air temperature".

Lighting Energy Consumption

External blinds increase the lighting energy consumption of office buildings except when they are controlled according to "Daylight", "Night outside low air temperature", "Night heating" and "Night inside low air temperature".

Total Energy Consumption

The external blinds reduce the sum of heating, cooling and lighting energy consumption of office buildings, only if they are controlled according to "Night outside low air temperature", "Night heating" and "Night inside low air temperature".

If the external blinds are controlled according these control types, both heating and lighting energy consumption of office building will be decreased. However, the cooling energy consumption will increase a little

The effect of external blind on decreasing the total energy consumption of office building is generally very little. High solar altitude in Hashtgerd especially in summer and short work time of office buildings in Iran (and Hashtgerd) and situation of a big part of work time before noon, are the most reasons for little effect of shading devices on energy consumption of office buildings in Hashtgerd.

CONCLUSION

This paper has shown that, the window area in different orientations and also the type of shading devices effectively influence the heating, cooling, lighting and total energy consumption of office buildings. The results show the thermal behavior of office buildings regarding window area and shading devices. A short summary of the results are as following:

- For buildings with the same window ratio without shading devices in all orientation, the optimum

window ratio for heating, cooling and lighting is respectively 80%, 10% and 40%. For reduction of total energy consumption the optimum window to wall ratio is 50%.

- The behavior of buildings with external blinds is a bit different in comparison with buildings without shading devices. For buildings with external blinds, the optimum window ratio for heating, cooling and lighting is respectively 80%, 10% and 50%. For reduction of total energy consumption the optimum window to wall ratio is 60%.
- For buildings with different window ratio in different orientations, the optimum window ratio for south-facing, north-facing and east/west-facing facade is respectively 60%, 20-30% and 10%.
- Using overhang for windows of office buildings in all orientations and also increase of the projection size of overhangs will increase their total energy consumption. However, it decreases a bit the cooling energy consumption of office buildings.
- The type of controlling the external blinds is the key factor for the effect of this type of shading devices on energy consumption of office buildings in Hashtgerd.

REFERENCES

- Hensen, J. L. M., Clarke, J. A., Hand, J. W. and Strachan, P. 1993. Joining forces in building energy simulation, Building Simulation 93 Conference, International Building Performance Simulation Association, pp. 17-23. Adelaide Australia.
- Iran Meteorological Organization. 2009. Synoptic Stations Statistics, <http://www.weather.ir/>.
- Nasrollahi, F. 2009. Climate and Energy Responsive Housing in Continental Climates, Universitätsverlag der TU Berlin, ISBN: 978-3-7983-2144-1. Berlin Germany.
- Rizos, I. 2007. Next generation energy simulation tools: Coupling 3D sketching with energy simulation tools, unpublished thesis University of Strathclyde.
- Seth, D. 1989. Advances in building simulation, Building Simulation 89 Conference, International Building Performance Simulation Association, pp 240-247, Vancouver Canada.
- DesignBuilder Software Ltd. 2008. DesignBuilder Software, www.designbuildersoftware.co.uk/ [accessed 10.05.2008].

PERFORMANCE BASED RATING AND ENERGY PERFORMANCE BENCHMARKING FOR COMMERCIAL BUILDINGS IN INDIA

Satish Kumar¹, Saket Sarraf², Sanjay Seth³, Sameer Pandita³, Archana Walia⁴, Madhav Kamath¹ and Aalok Deshmukh¹

¹International Resources Group, New Delhi, India

²ps Collective, Ahmedabad, India

³Bureau of Energy Efficiency, New Delhi, India

⁴United States Agency for International Development, New Delhi, India

ABSTRACT

Performance based rating systems serve as an excellent baseline “report card”. They are useful for evaluating performance of existing buildings and to set meaningful targets for new buildings. This method replaces guesswork with a scientific methodology to establish targets, evaluate and reward innovations. Over time, it helps to consistently improve the standards through healthy competition by shifting markets to better performing levels. In the US, the LEED for Existing Buildings (LEED EB), ASHRAE’s BuildingEQ, Green Globes Existing Buildings rating system reference actual building performance benchmarked against ENERGY STAR Target Finder. On similar lines, this research could help improve current rating systems in India by providing contextual benchmarks and targets across building types.

A database of existing buildings along with their energy consumption and related parameters is a prerequisite for any performance based ratings. USA has been collecting such data in form of the Commercial Building Energy Consumption Survey (CBECS) for many years and has used it to develop ENERGY STAR and green building rating systems. This paper describes the first national level initiative in India to collect and rigorously analyze standardized energy use data for 760 commercial buildings. This initiative uses statistical procedures to arrive at a performance based rating methodology and energy consumption benchmarks for India.

Specifically, this study (a) Elucidates the need for performance based rating and benchmarking in the Indian context, (b) Discusses the framework for national level data collection, (c) Performs exploratory analysis of whole building energy use across different groups such as use types, climate, operating hours, size, etc. (d) Proposes a methodology for performance rating and benchmarking using regression and distribution analysis, (e) Establishes performance benchmarks for building types, namely – offices, hospitals and hotels, and (f) Concludes with benefits, limitations and extensions for further work in the Indian context.

INTRODUCTION

The Indian building sector has witnessed huge interest in the field of energy performance in the last decade. The national Energy Conservation Building Code (ECBC) and green building rating systems such as Leadership in Energy and Environment Design (LEED-India) and Green Rating for Integrated Habitat Assessment (GRIHA) have further fueled this surge in interest. These codes and rating systems are based on design intent rather than actual performance during building occupancy. They are not designed primarily to rate energy performance of existing buildings and to reward their performance through a systematic evaluation and award scheme. Further, they do not provide defensible energy consumption targets for new buildings - this has serious performance, market and policy implications.

Buildings, along with other consumers must continuously monitor and improve their performance in order to transit to an energy efficient economy. It is important to measure this performance against established benchmarks. The primary aim of such an initiative is to improve the design, construction, maintenance and operation of buildings by measuring energy performance against these benchmarks, and recognizing and rewarding exemplary performing buildings through an established and credible certification system (Hicks and Von Neida, 2005).

CONTEXT

Commercial buildings in India account for nearly 8% of the total electricity supplied by utilities. Electricity use in this sector has been growing at about 11-12% annually, which is much faster than the average electricity growth rate of about 5-6% in the economy (Bureau of Energy Efficiency). According to the 17th Electrical Power Survey of the Central Electricity Authority, electricity demand is likely to increase by 39.7% in 2011-12 as compared to 2006-07 and by approx. 175% in 2021-22 as compared to 2006-07. Electricity use in the building sector has increased from 14% in the 1970s to nearly 33% in 2004-05.

In spite of the fast-paced growth of the commercial building sector, energy consumption data for the sector is largely unavailable in the Indian public domain. Absence of macro-level data is a barrier for the government to formulate effective, market-oriented policies and for the private sector to invest sufficient resources to make the buildings more energy-efficient. Also, the creation of these benchmarks will help in identifying exemplary buildings as well as poorly performing buildings that can be excellent targets for implementing energy efficiency measures. In some cases, benchmarking can replace energy audits that have been largely ineffective in turning potential into reality. With this in mind, the Bureau of Energy Efficiency (BEE), with technical assistance from USAID ECO-III project, embarked on an initiative to provide sector-specific energy consumption data and undertook the preliminary benchmarking initiative. To begin with, the team, with inputs from the BEE's technical committee members, designed a standardized format for collection of building energy data. With the standard format in place, the data collection process began in December 2008.

BENCHMARKING AND RATING

Energy benchmarking is a process of creating a whole building energy consumption profile of a group of buildings characterized by their primary use and their construction, physical, geographic and operating characteristics. It helps compare the energy consumption of a particular building to a range of values of similar buildings and arrive at a performance based rating. The rating is derived by assigning a score to the performance differential between the building under consideration and a benchmarked building in relation to all other buildings in the stock.

The word 'efficient buildings' can have very different and often conflicting meanings (Soebarto and Williamson, 2001). The key components of various definitions include low energy consumption, energy efficiency, adherence to thermal comfort and internal air quality standards, provision of sufficient amenities, low life cycle costs of construction, operation, maintenance and demolition. This study evaluates performance based on the total energy consumption by the building, given a particular level of amenities and building related characteristics. Adhering to standards for thermal comfort, indoor air quality or provision of basic amenities, etc is currently not a prerequisite. This is a serious limitation mainly due to poorly enforced standards and lack of data.

The relevant issue is to compare the building under consideration to a population of similar buildings and attribute a score to the performance differential. A very important critique of this approach is that the entire population may be inefficient and would

eventually lead to inefficient buildings being rated as efficient (Federspiel, Zhang and Arens, 2002). However, with this initiative, the idea is to identify and reward relatively efficient buildings in the population to gradually pull the entire building stock to a higher energy performance level.

Benefits

Energy Benchmarking and Performance Based Rating replaces guesswork with scientific methodology to establish targets and evaluate and reward innovations. Over time, it helps to consistently improve the standards through healthy competition by shifting markets to better performing levels. The potential beneficiaries for Energy Benchmarking and Performance Based Rating System includes:

Designers, Owners and Users: Designers will have feasible targets for new and existing buildings to choose appropriate technology, products and retrofit measures; clients and auditors will have a yardstick to measure the performance of their buildings; multi-facility operators like corporate entities, schools, hospitals and government agencies can compare performance of individual facilities to others, reward good performers, retrofit poor facilities, and estimate total feasible savings possible across entire operations.

Building Developer: The benchmarks and ratings provide a means to record energy efficiency achievements and help chart future direction. It helps assess the total potential savings and allows stakeholders in the sector to focus their efforts on development and use of appropriate products and technologies.

Policy Makers: The rating system can be used to reward highly rated buildings through various monetary and non-monetary rewards. Poorly rated buildings can either be penalized or assisted to explore various energy conservation mechanisms or both. It can also help policy makers to ascertain the total national savings potential and expected impact of potential policy initiatives and shifts to alternative technologies.

Existing Point Based Rating Systems: In the absence of energy benchmarking data in India, LEED India and GRIHA lack the ability to incorporate real world statistics to set targets and evaluate performance. This initiative can help improve these rating systems in India by providing contextual benchmarks and targets across building types.

APPROACH AND PRINCIPLES

There are numerous approaches to Energy Benchmarking and Performance Based Ratings, each more suited to a particular situation. Widely used methods can be categorized into Point based rating,

Raw data visualization method (Kinney and Piette, 2002), Regression based statistical method (Sharp, 1996, 1998), Simulation and Model based approaches (Federspiel et al., 2002), Hierarchical end use metrics (Sartor, Piette, Tschudi and Fok, 2000). Other methods include energy audits, experts' knowledge approach and self learning systems based on neural networks. For detailed review of these methods, see Kinney and Piette (2002), Matson and Piette (2005), and Olofsson, Meier and Lamberts (2004) and Sartor et al (2000).

In this study, a regression based statistical method has been used. This method is transparent, widely accepted and easy to adopt at policy level. Similar method is used by countries like USA, that administers the Commercial Building Energy Consumption Survey (CBECS) since 1978 through the Energy Information Administration Division of the Department of Energy. The US EPA uses the CBECS database and linear regression techniques developed by Sharp (1996, 1998) to compute the ENERGY STAR labels for commercial buildings. Hicks and Von Neida (2000) provides an overview of the US national energy performance rating system and the ENERGY STAR Building Certification Program. Based on various benchmarking systems around the world, the Indian commercial building benchmarking and performance based rating should (a) Evaluate energy performance for whole building, (b) Reflect actual billed energy data, (c) Provide comparison mechanism among peer groups, (d) Account for operational characteristics of the building and should not penalize for higher levels of service and amenities provided in the building (US EPA 2009), (e). Provide a simple metric to evaluate and communicate building energy performance between owners, occupants, lenders, appraisers and energy product and service community (Hicks and Von Neida, 2005).

DATA

The Commercial Building Energy Benchmarking exercise started with designing of a standardized questionnaire for collection of whole building energy data. This included information such as connected load, electricity generated on site, electricity purchased from the utilities, built up area, conditioned area, number of people working, number of floors, type of air-conditioning and the load, climatic condition, operating hours, etc. The survey gathered complete information for 760 buildings which primarily included offices, hotels, hospitals and retail malls. India is divided into five major climatic zones., viz. warm and humid, composite, hot and dry, temperate, and cold. Data collected is fairly representative as it covered all the five climatic zones. Emphasis was also placed on covering both public and private sector buildings. The survey

covered the buildings in metropolitan cities, Tier II and Tier III cities, as well as few smaller towns.

Comparing buildings based on annual energy consumption (kWh/sq. m.) is advisable so as to avoid any distortions that may arise from varying fuel prices and energy rate systems. Normalizing the energy consumption of buildings by their floor area provides an energy intensity measure that allows the comparison of buildings of different sizes. That said, floor area is also a source of error as it is often reported incorrectly. There are different ways of defining floor area and there are inconsistencies in the way it is calculated. We realized early on in the data collection process that it is important that our definition of floor area is consistent within the comparison (benchmark) data.

It is important that benchmarks are created for a similar period of time. The time period considered in this exercise is typically one year.

There were some exercises in the past to collect energy data for commercial buildings. However, there were not very successful because of several reasons such as:

- Failure in standardizing the terms used in the questionnaire as compared to the myriad terms that are part of the Facilities and O&M team's vocabulary;
- Lack of success in ensuring quality assurance during the data collection process;
- Inability to safeguard the identity of individual buildings and organizations contributing data;
- Inability to strike a balance between the ease and the depth of the data that needs to be collected.

METHODOLOGY AND RESULTS

This approach used in this study compares the whole building energy consumption of the building under consideration with a benchmark building of similar characteristics, and derive a score based on its performance. A three step statistical methodology described below is used as a way around this problem.

1. Estimate the energy consumption of a benchmark building: The benchmark building is a hypothetical building with similar use type, physical and operating characteristics and located in same climatic zone as the candidate building. The estimate is derived using regression techniques to a large dataset of surveyed buildings.

2. Compute Building Performance Index (BPI): It is calculated as the ratio of actual electricity consumed by the candidate building to estimated electricity use by the benchmarked building. Buildings that consume more energy than the benchmarked

building have $BPI > 1$, and are poorly rated. Buildings that consume less energy than the benchmark building have $BPI < 1$ and are highly rated. This establishes the relative efficiency of buildings.

3. Convert BPI into scores based on the performance distribution: The BPI of all buildings in the sample set are arranged in ascending order to create a distribution profile of relative performance. Distribution based approach is used as it is robust to the presence of outliers and extreme observations (Sharp, 1998). Extreme observations can occur due to error in data, use of highly efficient or inefficient technology by some buildings in the sample, or structure of model used. The distribution provides performance percentiles which can either directly be transformed into a 1-100 rating scale or be further grouped into star based rating method.

Here we would like to emphasize that a building that consumes low level of energy is not necessarily more efficient. The possible reasons for an inefficient building to consume less energy include smaller occupancy schedules, low intensity use compared to designed levels and poor level of amenities.

Energy Consumption of a Benchmark Building

A simple way to estimate the energy consumption of a benchmarked building is to have a priori table of benchmarked energy consumption for every possible candidate building that wants to be rated. This table can be created from a very large database of buildings with all possible variations in their use type, physical, operational and location characteristics. However, this approach is not only logistically challenging but infeasible, as the possible number of variations is infinite. A practical approach is to use the statistical technique of regression which allows us to estimate the average consumption of buildings similar to a candidate building, using data from different buildings. This method focuses on the key drivers of energy consumption across different buildings and estimates their individual contribution to the total energy. In its most conventional form, the regression equation resembles equation 1 below

Energy use of a benchmarked building = function (building type, construction, physical, operational and location characteristics). Equation 1

The above equation estimates the energy consumption of a benchmarked building as a function of building type, and its construction, and physical, operational and location characteristics.

Building type includes the primary function namely offices, hospitals and retail malls. It can be extended to other use types like educational, retail, etc and also to sub-types like BPO offices, luxury hotels and multi specialty hospitals. Construction and physical characteristics refer to the design and construction

aspects (e.g. size, orientation, shading, % glazing on the façade, and material and system properties that can make an impact on the energy use of the building). Operating characteristics refers to the total operating hours in a year, Number of employees working in an office, percentage of floor space that is mechanically conditioned. Location characteristics are the factors external to the building that affect its energy consumption like climatic zone of the location. Climate plays an important role in influencing energy consumption through heat exchange through the building envelope. Some of the climate metrics that can effect energy consumption in a building include solar radiation, air temperature, humidity, cloud cover and wind speed and direction.

The function that estimates the energy consumption in equation is not known a priori. Various parametric, semi parametric and non parametric functional forms were explored. Non-parametric methods that do not make any assumptions about functional form are technically better but there are limitations in the current study due to small sample size and the need for simplicity of adoption at policy level. At the same time, the most conventional linear formulations were rejected because a) scatter plots shown in figure 1 hint at non linear relationship between the dependent and independent variables, b) the effect of one independent variable depends on levels of other variables signifying presence of strong interaction as evident from conditional scatter plots. Thus, a log-linear functional form is used which allows for non-linear relationships and interaction effects among variables. This was then estimated using generalized least square estimator that gives a more robust estimate than the ordinary least squares estimators. Various regression diagnostic tests were done to ensure that the regression results were statistically acceptable.

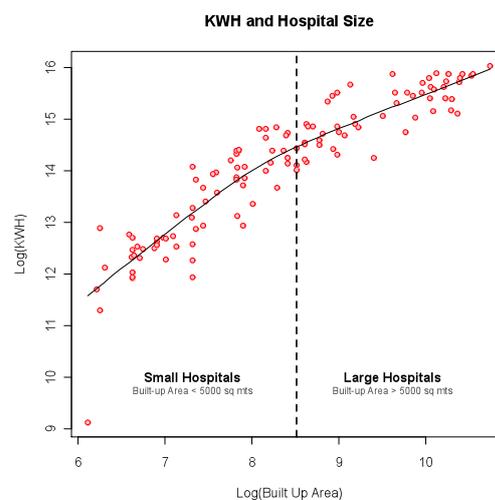


Figure 1: Scatter plot showing non linear relationship between energy consumption and built up area in Hospitals

All analysis were performed using the R language and environment for statistical computing and graphics (R Development Core Team, 2005). Natural logarithm of all variables is used in regression equation..

On account of shortage of space, we are presenting detailed analysis for office buildings only. Information was available for 320 office buildings across the country, out of which there were 91 buildings in the BPO category. An average office building had EPI of 175 kW/m²/year and occupied 7,432 m² of space, of which 75 % was conditioned. It employed 540 people and operated for 10 hours a day, 6 days a week.

197 office buildings had information about all the key variables that are likely to affect energy consumption in a building. This smaller set was used to conduct the multi-variate regression analysis. Their relationship between variables is presented in figure 2 and the basic summary is presented in table 1. As a result of this analysis, total built-up area, percent conditioned space, total annual hours of operation, number of people employed were the key determinants; the climatic zone was not a significant factor affecting buildings' energy consumption.

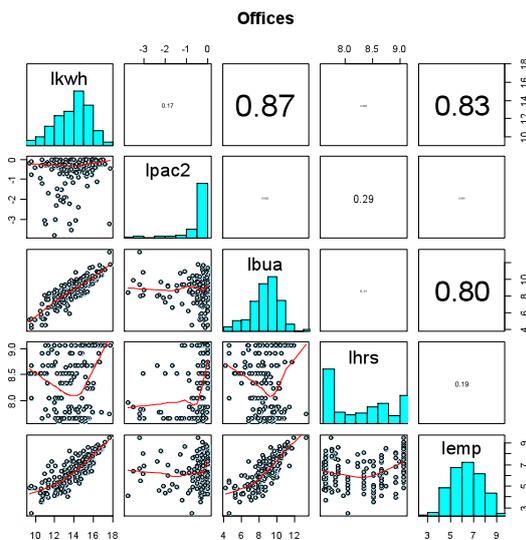


Figure 2: The scatter plot showing bivariate relationship among logarithm of key variables along with correlation coefficients

Table 1
Summary of key variables for office buildings

Var.	obs.	mean	median	s.d.	min.	max.
kwh	197	3457034	1421000	6274194	12321	48493801
pac2	197	0.69	0.75	0.25	0.02	1
bua	197	17110.38	7060	45015.55	70	578600
hrs	197	4575	4171	2521	2008	8760
emp	197	1286.12	550	1897.59	12	13000
epi	197	241	193	210	17	1800

Table 2
Regression for Office building

Equation: lkwh = climate + (lpac2 + lbua + lhrs + lemp)				
Coefficients:				
	Estimate	Std.Err	t value	Pr(> t)
(Intercept)	3.25	0.93	3.47	0.00 ***
Climate:Hot & Dry	-0.34	0.20	-1.66	0.098 .
Climate:Temperate	0.05	0.15	0.33	0.74
Climate:Warm & Humid	0.14	0.12	1.20	0.23
lpac2	0.44	0.07	6.09	0.00 ***
lbua	0.78	0.06	12.75	0.00 ***
lhrs	0.26	0.10	2.50	0.01 *
lemp	0.29	0.072	4.11	0.00 ***
Signif code: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1				
Residual standard error: 0.6869 on 189 degrees of freedom				
Multiple R-squared: 0.8516, Adjusted R-squared: 0.8461				
F-statistic: 155 on 7 and 189 DF, p-value: < 2.2e-16				

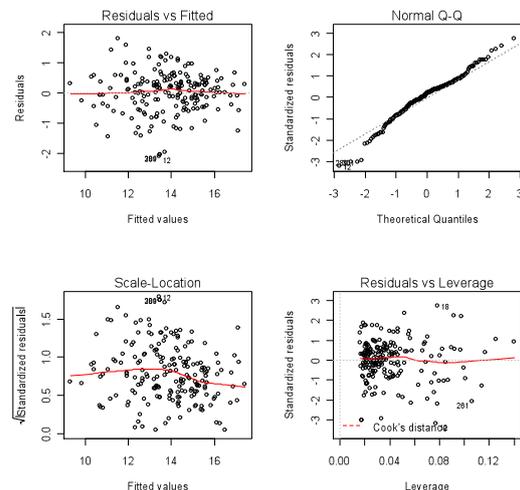


Figure 3: Graphs showing the statistical performance of the regression equation

Performance Rating Through Peer Group Comparison

The regressions presented in the previous section helps to estimate how much energy a building should consume given its primary use, construction, physical, operation, and location characteristics and our knowledge about existing building stock through the survey. The next step is to:

- Compare the actual energy consumed to that of a benchmark building and
- Translate the results of the comparison into a rating scale.

A statistic called Building Performance Index (BPI) is constructed to quantify the relative performance of the candidate building compared to the benchmark. BPI is defined as the ratio of actual energy consumed to the estimated consumption of a similar benchmarked building using the regression equation

1. This is calculated for all buildings in the survey sample. BPI = 1 represents building with consumption levels equal to the benchmark building after normalizing for all operating and location characteristics. Buildings with BPI > 1 are relatively poor performing and vice versa. e.g. BPI of three means that the building consumes three times more energy than a comparable benchmark building.

Score Card

The BPIs for all surveyed buildings are first sorted and plotted on a graph to arrive at a cumulative distribution function (gray points in figure 4). This gives the distribution of the energy performance for the entire sample of similar primary function buildings. The X-Axis represents the BPIs while the Y-Axis represents the performance quantiles of all the buildings in the sample.

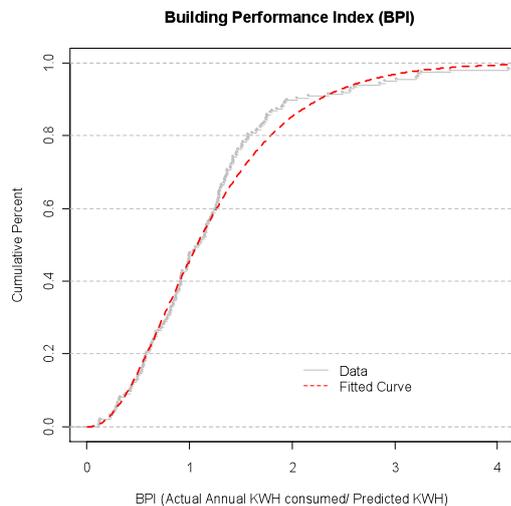


Figure 4: BPI calculated for all buildings in the survey is shown by grey dots. The red dashed line shows estimated performance percentile curve for rating. Estimated Gamma parameters for office building:

A smooth curve (red line in figure 4) is estimated to fit the cumulative distribution function using one of the many standard distribution functions such as gamma, normal, etc. depending of the shape of the curve. Statistical methods are used to determine the best fit. Based on our data, we have used a two parameter standard gamma function to estimate the curve through the data points.

The performance percentiles (F) calculated from BPIs using equation 2 is presented in table 3 for the office sector. This table converts BPIs into performance ratings on the scale of 1-100 with 1 being the best and 100 representing the worst performer. Each additional point on this rating scale means an additional 1% of the buildings perform better than the candidate building. For example, a building with a rating of 23 percentile means that 23% of the buildings in the sample perform better on

energy consumption. A building with performance rating of 2 means that the building lies in top 2% of the buildings in terms of energy consumption after normalizing for all differences.

Table 3

A look up table for office buildings to determine percentile score based on BPI. This table is estimated from the gamma distribution given in equation 2. e.g. If the BPI for a building is 0.4, it ranks in top 10 percentile amongst its peers.

BPI	Percentile (F)						
0.14	1	0.6	21	0.92	41	1.29	61
0.19	2	0.62	22	0.94	42	1.31	62
0.23	3	0.63	23	0.95	43	1.33	63
0.26	4	0.65	24	0.97	44	1.35	64
0.29	5	0.67	25	0.99	45	1.37	65
0.31	6	0.68	26	1.01	46	1.4	66
0.34	7	0.7	27	1.02	47	1.42	67
0.36	8	0.71	28	1.04	48	1.44	68
0.38	9	0.73	29	1.06	49	1.47	69
0.4	10	0.74	30	1.08	50	1.49	70
0.42	11	0.76	31	1.09	51	1.52	71
0.44	12	0.78	32	1.11	52	1.54	72
0.46	13	0.79	33	1.13	53	1.57	73
0.48	14	0.81	34	1.15	54	1.6	74
0.5	15	0.82	35	1.17	55	1.63	75
0.52	16	0.84	36	1.19	56	1.66	76
0.53	17	0.86	37	1.21	57	1.69	77
0.55	18	0.87	38	1.23	58	1.72	78
0.57	19	0.89	39	1.25	59	1.76	79
0.58	20	0.91	40	1.27	60	1.79	80
							Inf
							100

Limitations of Analysis

Given that this is the first attempt of its kind in the Indian context, the study has many limitations. We do not claim that the current data are perfectly representative of commercial buildings in India or that the predictions are perfect. We have performed rigorous data scrutiny to remove inconsistencies and errors and have attempted to capture the most important contributors to whole building energy consumption at a macro level. Key limitations of the data collection and analysis effort are listed below.

The current survey informs us about the percent of space that is conditioned in a building. However, it does not tell us about the operation schedule of HVAC system, the thermal comfort levels, and indoor air quality that is maintained. It is possible for a fully conditioned building to consume less energy and attain a higher score by not maintaining required comfort level throughout the year. This is a serious limitation.

The impact of climate is not satisfactorily apparent from the regression equations. Standard climate metrics like heating and cooling degree days were not found to be significant determinants of energy consumption in any of the building types. Possible reasons include presence in the dataset, of building with large floor to surface area, variation in quality of indoor environment levels, and presence of significant proportion of non-conditioned space within the building.

Most of the buildings in the database are from predominantly urban areas. Impact of urban heat island effect, level of service, building schedule and equipment load are very different in semi-urban and

rural settings. The cold climatic zone is poorly represented in the survey. Application of the results from these areas should be treated with caution.

The model is designed to perform best when the input parameters are within the support range provided by the sample dataset. If values of input data are very different from sample buildings, there will be a lower degree of confidence in the results.

Next Steps

The study provides adequate information through equations and tables to implement a performance based rating scheme. It is mature enough to be taken to the next level of web-based administration and implementation with proper design of database to interact, update, store and retrieve information and results. The following improvements will help to further improve the efforts:

- It is important to define the characteristic of buildings that will be considered eligible for the rating scheme. This would require establishing lower and upper bounds on building size, operating hours, percent conditioned space, etc. The sample should then be balanced and appropriately distributed over this range across cities, climatic zones and urban and rural settings.
- The survey can further be improved by including more information, enhancing data reliability, ensuring balanced coverage, and increasing sample size. The questionnaire should be expanded to include information on year of construction, envelope characteristics, building orientation, occupancy schedule by shifts, and system and equipment load. Data reliability can be improved by use of electronic means to administer survey including geo-coded images. The survey may also include a copy of utility bill to certify energy consumption, property tax filing to ensure correct floor area, system and energy audit reports for building loads. Ideally, adhering to thermal comfort standards, maintaining indoor air quality standards and energy audits should be made prerequisites. Larger and balanced datasets would help derive ranking based on a large set of parameters that we believe are important but are not reflected in the current analysis for lack of sufficient data.
- We have used Generalized Least Squares Estimator to estimate the regression equation. It is more robust to presence outliers and heterogeneous samples than the Ordinary Least Square Estimator. Better analytical methods needs to be explored to address the effect of climate, problems of multicollinearity between key parameters, imbalanced sample, etc. The

analysis may also be extended to the use of quantile regression estimator which is more robust in ranking performance as it is based on the principle of median rather than averages.

- A dedicated team of professionals needs to work together to design and administer the survey and conduct analysis. The proposed model can be continuously revised with every new round of surveys. Addition of further buildings to the database will change the current model parameters and hence the rating levels. It will require strong database management system, updating of models and policy related to different versions of rating systems. This is needed to have a robust and current data set to keep up with the growth in the commercial building sector leading to more effective policy setting.
- Buildings are rated based on the total energy consumed during the year. However, variation in weather conditions can affect consumption levels by up to 15% based on some rough estimates. Once the database is established, the benchmarking should be performed based on some average values of last few years. This implies that the survey needs to be repeated periodically. CBECS is repeated every three years. It is recommended that organizations such as the Bureau of Energy Efficiency should take the initiative to administer the survey every two years and request two years of data in the beginning before transitioning to three years.

Potential Methodological Advancements

This section lists methodological improvement in long term horizon which are currently not possible due to data unavailability and complexity of interpretation and implementation. However, in the long term, they may help us to switch to a holistic and sustainable approach. These include the transiting to source energy from site energy, using self learning models and hierarchical benchmarking.

We are using net electricity consumed (or site energy) as a metric for energy consumed. Many buildings use onsite diesel or gas generators to produce energy. By ignoring fuel mix in the current study, we are omitting transmission and distribution losses, and hence, underscoring the total energy savings potential at a societal level. Use of source energy may be a better metric for future extensions.

The current analysis focuses on the whole building energy use. It becomes difficult to differentiate between the impact of equipment, building operation and design on overall performance. It may be possible that the worst building gets best rating because it uses the most efficient equipment. Hicks

and Von Neida (2005) observes that most of the ENERGY STAR rated buildings under US EPA “understandably use highly efficient equipment, they are most similar to the poorest performing buildings from a technology perspective”. Mathew, Sartor, Geet and Reilly (2004) propose hierarchical benchmarking mechanism as a solution to this problem, where increasing level of details are addressed at each stage enabling identification of the factors contributing to good and worse performance within the same building.

CONCLUSION

Performance based benchmarking creates a unique database that helps establish nationwide energy savings potential. The database can be easily updated with development of building design and technology to constantly push new frontiers and aim for higher benchmarks. It encourages aggressive energy reduction policy goals by providing measurable efficiency gains across use types and regions.

This study is the first systematic attempt to understand energy consumption in commercial building in India using real data from 760 buildings. It evaluates energy performance for the whole building incorporating actual energy consumed. Variations in use, type, physical and operational characteristics are accounted using statistical procedures and real data. The proposed method is transparent, rigorous, extensible and versatile. The rating method is transparent in clearly elaborating the process to arrive at the benchmarks. The knowledge of the process does not encourage gamesmanship. The process is rigorous to account for all possible variations and factors permitted by data in a scientific manner. It can be easily extended to include more building parameters (e.g. shape, orientation, equipment load). It is versatile to be applied to more use types (retail, institutional, etc) and rural buildings without bringing about any fundamental change in methodology. Finally, the scoring system can be translated into any desired grading scheme – continuous (percentile based) or segmented (quartile or star based).

A side benefit of the study originates from the regression equations. They provide a quick way to assess the expected energy consumption prior to design. This provides a first approximation of the buildings’ energy use and set feasible targets for the designer. It is not to be confused as a substitute for whole building simulation but a prefeasibility level energy analysis and goal setting.

REFERENCES

Federspiel, C., Q. Zhang and E. Arens. (2002). Model-based benchmarking with applications to laboratory buildings, *Energy and Buildings*, Vol. 34(3), pp. 203–214.

Hicks, T. and B Von Neida. (2005). US National Energy Performance Rating System and ENERGY STAR Building Certification Program.

Kinney, S. and M.A. Piette. (2002). Development of a California commercial building benchmarking database, Lawrence Berkeley National Laboratory: Lawrence Berkeley National Laboratory. LBNL Paper LBNL-50676..

Mathew, P., D. Sartor, O van Geet and S. Reilly. (2004). Rating energy efficiency and sustainability in laboratories: Results and lessons from the Labs21 program, Lawrence Berkeley National Laboratory: Lawrence Berkeley National Laboratory. LBNL Paper LBNL-55502.

Matson, N., M.A. Piett. (2005). Review of California and national methods for energy-performance benchmarking for commercial buildings, California Energy Commission, Public Interest Energy Research Program, LBNL No. 57364.

Olofsson, T., A. Meier and R. Lamberts. (2004). Rating the energy performance of buildings, Lawrence Berkeley National Laboratory: Lawrence Berkeley National Laboratory. LBNL Paper LBNL-58717.

Sartor, D., M.A. Piette, W. Tschudi, and S. Fok. (2000). Strategies for Energy Benchmarking in Cleanrooms and Laboratory-Type Facilities, Proceedings of the ACEEE 2000 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, Vol 10, pp. 191-203.

Sharp, T. (1996). Energy benchmarking in commercial office buildings, Proceedings of the ACEEE 1996 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, Vol. 4, pp. 321–329.

Sharp, T. (1998). Benchmarking energy use in schools, Proceedings of the ACEEE 1998 Summer Study on Energy Efficiency in Building, Vol. 3, pp. 305–316.

Soebarto, V.I. and T.J. Williamson, (2001), Multi-criteria assessment of building performance: theory and implementation, *Building and Environment*, Vol. 36, pp. 681-690.

R Development Core Team (2005). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.

US EPA (2009). ENERGY STAR Performance Ratings: Technical Methodology, United States Environment Protection Agency.

TECHNISCHE BESTANDSBEWERTUNG MIT DER FAKTORENMETHODE NACH ISO 15686 UNTER VERWENDUNG VON SIMULATION

Martin Bauer, Matthias Brandmair
 Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen,
 Hochschule Augsburg, Deutschland

KURZFASSUNG

Für die systematische technische Bestandsbewertung von Baukonstruktionen wird ein Modell vorgestellt, das die Faktorenmethode der ISO 15686 nutzt und mit Monte-Carlo-Simulation kombiniert. Mit dieser Vorgehensweise werden Unsicherheiten in der Bestandsbewertung reduziert. Das Verfahren wird an einem Bestandsbau angewendet und mit etablierten Bewertungsverfahren verglichen.

ABSTRACT

This work presents an approach to service life estimation of building components. It uses the factor method described in the ISO 15686 standard. The method is combined with Monte-Carlo-Simulation to face uncertainty of components degradation. Results of the model are used for service life estimation on a non-residential building and compared to established method results.

EINLEITUNG

Ziel eines umfassenden Gebäudemanagements im Unterhalt muss es sein, wirtschaftliche Entscheidungen in Bezug auf kommende Ein- und Auszahlungsströme treffen zu können. In Bezug auf Reparatur, Pflege und Instandhaltung eines Baubestandes müssen das genaue Alterungsverhalten und die damit einhergehende Wertminderung eines Bauelementes zu jedem Zeitpunkt bekannt sein.

Eine verbreitete Methode [IPBAU], beschränkt sich auf die stichprobenartige Bestandsbewertung von Bauteilen verschiedenen Alters.

Auswertungen der Lebensdauer von Bauwerkskomponenten aus dem Wohnungsbau bilden die Bewertungsbasis für Bauteilkomponenten.

Diese Datenbasis, erweitert um Umfrageergebnisse und Literaturauswertung, bildet die Grundlage für die Anhaltswerte der Lebensdauer von Bauteilen, die allgemein zur Verfügung gestellt werden [BMVBS].

Mangels systematischer Datenerhebung über die vollständige Lebenszeit von Bauteilen bleiben bisherige Ansätze mit großer Unschärfe behaftet. Die Ansätze sind daher keine adäquate Lösung in der

systematischen Lebensdauerplanung bzw. zur Vorhersage von genauen Ausfallzeitpunkten.

BEWERTUNGSSVERFAHREN DER BAUTEILLEBENSDAUER

Wert-Alter Ermittlung

Mittels vorgeschlagener Bewertungsintervalle und einer zugehörigen Entwertungskurve wird auf den relativen Wert einer Konstruktion durch Vor-Ort-Bewertung geschlossen. Unter Annahme eines funktional beschreibbaren Verlaufs der Entwertung der Bestandteile des Bauwerks kann auf einen Zeitwert und daraus auf die zu erwartende Lebensdauer geschlossen werden.

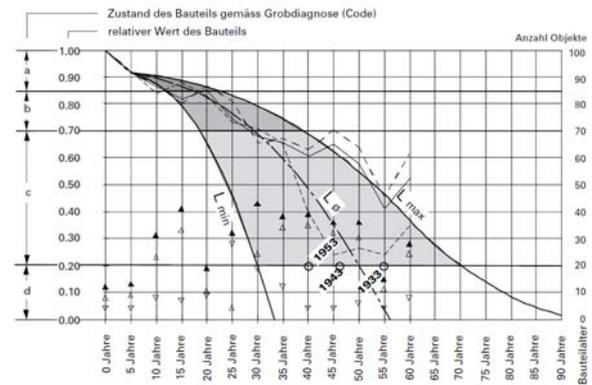


Abb. 1: Wert-Alter-Diagramm mit Objektauswertung für Fenster [IPBAU]

Planung der Lebensdauer nach ISO 15686

Der Normenverbund ISO 15686 und Projekte wie [BELCAM] und definieren ein Gebäude als ein Gesamtsystem mit verschiedenen Komponenten, welches mehreren Einflussfaktoren unterliegt. Dabei ist der Alterungsprozess von Bauelementen als ein komplexes System zu betrachten. In dessen Kontext erfolgt eine Risikoanalyse einer Bauteilstruktur in seiner Entwertung anhand einer Wertung von Einflussfaktoren und bildet so eine annähernd genaue Abbildung der Lebensdauer im Lebenszyklus einer Konstruktion.

Auf Basis einer Referenzlebensdauer (R_{SL} - reference service life of components) beschreibt die Methode eine eigenen Weg. Mittels Abschätzung

und Bewertung objektspezifischer Bedingungen wird auf eine zu errechnende Lebensdauer geschlossen.

Die ISO 15866 schlägt hierzu eine Faktorenmethode zur Bestimmung der Lebensdauer von Bauteilkomponenten (ESLC - estimated service life of components) vor.

Die Bestimmung erfolgt nach der Gleichung

$$ESCL = RSLC \cdot A \cdot B \cdot C \cdot D \cdot E \cdot F \cdot G$$

Hierbei beschreiben die einzelnen Faktoren Klassen von Objektbedingungen: Qualitätsmerkmale (A, B, C) Umgebungsbedingungen (D, E) und Nutzungsbedingungen (F, G)

- A – Qualität der Bauteilkomponente
- B – Baukonstruktionsdesign
- C – Ausführungsqualität
- D – Umwelteinflüsse von innen
- E – Umwelteinflüsse von außen
- F – Beanspruchungsgrad
- G – Unterhaltsniveau

Die Faktoren schätzen die objektspezifische Situation einer Referenzlebensdauer (reference service life of components) ab und sollen nach Vorschlag zwischen 0,8 und 1,2, bevorzugt jedoch zwischen 0,9-1,1, angenommen werden.

Die Faktorenmethode wird für den Praxisbetrieb in drei Anwendungsarten und unterschiedlichen Detaillierungsgraden vorgeschlagen:

- Checklisten-Ebene
- Multiplikationsebene
- Funktionsebene

Abhängig von der Genauigkeit der Daten und Aufwand spannt sich die Ermittlungsgenauigkeit der Lebensdauer von einer auf Erfahrung beruhenden Schätzung bis hin zur Verteilungsfunktionen der Lebensdauer aufgrund der Auswertung von Datenerhebungen.

Schließlich wird eine Kombination aus Multiplikationsebene und Funktionsebene als Bestimmungsart der Lebensdauer erlaubt.

Die Restlebensdauer eines Bauteils ergibt sich aus

$$RLD = ESCL - \text{Alter des Bauteils}$$

VORSCHLAG EINES SYSTEMS ZUR BESTIMMUNG DER RESTLEBENSDAUER MITTELS MONTE-CARLO-SIMULATION

Für Bauteile liegen systematische Datenerhebungen in unzureichender Form über die vollständige Lebenszeit und vor allem in nicht normierten Datenerhebungen vor. Daher bleibt die konkrete

Ermittlung der Lebensdauer von Bauteilen mit unscharf.

Grundgedanke

Der Unscharfe mangels Datenerhebung soll im vorgestellten Ansatz mit einer Wahrscheinlichkeitsermittlung begegnet werden. Die Bestimmung der Lebensdauer soll weiter aus einem Intervall von Minimal- und Maximalwert von Referenzlebensdauer und der Faktoren in maximalen Intervallen vereinfacht werden.

Die ESLC wird dann mittels Monte-Carlo-Simulation bestimmt. Das Verfahren soll für den Praxiseinsatz im Nichtwohnungsbau vorgesehen sein. Daher ist weiter zu prüfen, mit welcher Anzahl von Rechenschritten annehmbare Ergebnisse erzielt werden können.

Implementation und Validierung

Die Simulationsumgebung wird in der Tabellenkalkulationsumgebung Excel entwickelt [Brandmair]. Es implementiert als Rechenkern VBA-Skripten der Freeware-Software Montecarlo [Montecarlo]. Die Zufallszahlen greifen in einer Vereinfachung der unterschiedlichen Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Faktoren [CIB] auf die Zufallszahlen von Excel zurück, die gleichverteilt angenommen werden müssen.

Zur Validierung werden die Beispiele nach ISO 15686, dokumentiert in [Moser1], [Moser2], herangezogen. Für die Ermittlung von Wahrscheinlichkeiten wurden Durchläufe der Simulation von n = 100 bis 1.000.000 herangezogen. Abb. 1 zeigt die Ergebnisse von n=10.000 im Vergleich zu [Moser1]. Simulation mit dieser Anzahl von Durchläufen wird die für die spätere Bestandsbewertung zunächst als befriedigend angenommen.

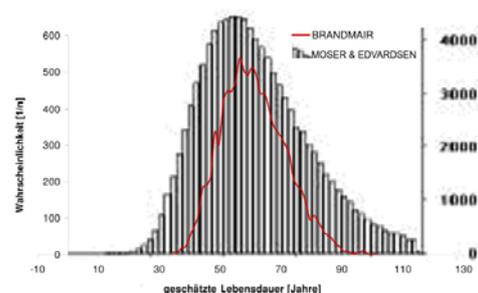


Abb. 2: Vergleichsrechnung mit n=10.000

ANWENDUNG IN DER BEWERTUNG EINES GEBÄUDEBESTANDES



Abb. 3: Bewertetes Bestandsgebäude

Für Fassadenelemente eines Bestandsgebäudes Abb. 3 wurden Vergleichsrechnungen mit der Faktorenmethode, den simulierten Werten der Faktorenmethode und der Restlebensdauer nach IP Bau durchgeführt und deren Ergebnisse verglichen. Die dazu betrachteten Bauteile waren Fenster, Anstrich und Fassadenkonstruktion. Die Ergebnisse sind in Abb. 4 für die Simulation angegeben.

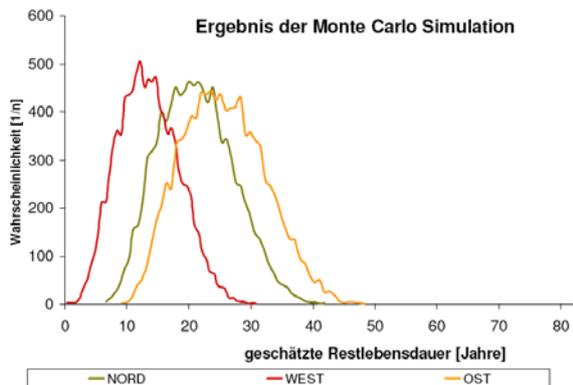


Abb. 4.: objektspezifische Simulationsergebnisse für die Fensterelemente nach Einbausituation.

Tabelle 1 zeigt die Vergleichswerte für die standardisierten Verfahren.

Tabelle 1:
Vergleichsrechnungen Faktorenmethode und IP Bau-Methode

	ISO 15686			IP Bau	
	RLD min	RLD med	RLD max	RLD min	RLD max
Fenster West	7,24	13,80	20,37	8,00	25,00
Fenster Ost	17,00	26,00	35,00	8,00	25,00
Fenster Nord	13,50	21,50	29,60	8,00	25,00

ZUSAMMENFASSUNG

Es kann vermutet werden, dass mittels Monte-Carlo-Simulation die Unsicherheiten bei der Anwendung der Faktorenmethode eingeschränkt werden können. Dies stützt sich auf die Annahme, dass veröffentlichte Ergebnisse trotz der Vereinfachung der angenommenen Gleichverteilung näherungsweise nachvollzogen werden können. Mittels dieser Methode wird die technische Bewertung des Bestandes innerhalb von Szenarios möglich.

Weiterer Klärungsbedarf liegt in der genauen Nachvollziehbarkeit der Rechenergebnisse bezüglich der Wahrscheinlichkeitsverteilungen in den Einflussfaktoren für die Bauteilkomponenten bei objektspezifischen Daten und besonders deren Referenzlebensdauer.

Einzelne Verteilung sind z.B. für Fenster bekannt. Die Daten lassen sich jedoch für eine befriedigende Bewertung auf mehrere Bauteile ausgeweitet werden. Exemplarisch sind hierfür systematische Arbeiten [Khuncumchoo] oder die Datengewinnung nach ISO 15686 genannt.

Kritisch muss dabei auch der Ansatz der Faktorenintervalle bei Anwendung der Faktorenmethode hinterfragt werden. Der Hinweis, Intervalle in einer Spanne zwischen 0,8 und 1,2 oder geringer anzusetzen, wird durch ausführliche Arbeiten [CIB] teilweise korrigiert.

LITERATUR

[BELCAM I] BELCAM I: "The BELCAM Project: A Multiobjective and stochastic system for building maintenance management", Dana J. Vanier, Zoubir Lounis, Public Works and Government Services Canada, National Research Council, 2000.

[BMVBS] www.nachhaltigesbauen.de/bericht_zum_zwischenstand_bf.pdf, Letzter Aufruf 2010-03-27.

[Brandmair] M. Brandmair: Systematische Bestandsbewertung und Kostenverknüpfung in der Lebenszyklusplanung. Master Thesis. Hochschule Augsburg, 2010.

[CIB] CIB W80 / RILEM TC 140 – TSL: Committee on Service Life of Building Materials and Components, "Guide and Bibliography to Service Life and Durability Research for Building Materials and Components", Per Jernberg, Michael A. Lacasse, Svein E. Haagenrud, Christer Sjöström, March 2004.

[IPBAU] Bundesamt für Konjunkturfragen, Impulsprogramm BAU: "Alterungsverhalten von Bauteilen und Unterhaltskosten", Schweiz, Dezember 1994.

ISO 15686-1 2000-09-01 Buildings and constructed assets – Service life planning Part 1: General Principles.

ISO 15686-2 2001-03-01 Buildings and constructed assets – Service life planning Part 2: Service life prediction procedures.

ISO 15686-7 2006-03-01 Buildings and constructed assets – Service life planning Part 7: Performance evaluation for feedback of service life data from practice.

ISO 15686-8 2008-06-15 Buildings and constructed assets – Service life planning Part 8: Reference service life and service-life estimation.

[Khuncumchoo] N., Khuncumchoo: „Proof of Maintenance Record Analysis Towards Proactive Maintenance Policies”, A Dissertation presented to the Academic Faculty, Georgia Institute of Technology, May 2007.

[Montecarlito] <http://www.montecarlito.com/> letzter Aufruf: 2010-03-26

[Moser1] K. Moser, C. Edvardsen: Engineering design methods for service life prediction, in Proceedings of 9th DBMC, Brisbane, 2002.

[Moser2] K. Moser & C. Edvardsen: Engineering design methods for service life prediction, EMPA Research & Testing Switzerland, COWI Consulting Engineers and Planners Denmark, 2002.

ANFORDERUNGEN AN DEN ÖKOBILANZIELLEN VERGLEICH VERSCHIEDENER BAUWEISEN AM BEISPIEL 1-2 FAMILIENHAUS

Katrin Loewe¹, Stefan Albrecht², Bastian Wittstock², Matthias Fischer¹, Klaus Sedlbauer^{1,2}

¹Fraunhofer Institut für Bauphysik, Ganzheitliche Bilanzierung, Stuttgart, Deutschland

²Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Bauphysik, Ganzheitliche Bilanzierung, Stuttgart, Deutschland

KURZFASSUNG

Im Kontext nachhaltiger ökologischer Wohngebäude ist die Datengrundlage bei neutralen Vergleichen unterschiedlicher Bauweisen derselben bisher sehr gering. Damit verbunden existieren derzeit nur wenige wissenschaftlich fundierte Erkenntnisse. Soll die Möglichkeit bestehen, eine ökologisch vorteilhafte Bauweise für den Wohnbau auswählen zu können, muss ein objektiver ökologischer Vergleich der gewählten Bauweise mit anderen alternativen Bauweisen durchgeführt werden. Die Grundlagen für einen solchen Vergleich und die Festlegung von Anforderungen an diesen, liefert das hier vorgestellte Vorgehen. Des Weiteren wird ein Gebäudemodell für die vergleichende Ökobilanzierung zur Verwendung in spezieller Ökobilanz-Software vorgestellt sowie dessen Anwendbarkeit anhand zweier Beispielgebäude praktisch aufgezeigt.

ABSTRACT

Within the context of environmental friendly residential buildings, the data basis for neutral comparisons of different construction types is rather rare. Combined with this fact only few scientific-based findings exist. If the possibility shall persist to choose an environmentally advantageous method of construction, an objective comparison of the chosen construction type with alternative types has to be carried out. The basic principles for such a comparison and the specification of adjunctive requirements are outlined within this paper. Furthermore a building model, compiled for a comparative Life Cycle Assessment (LCA) for the application in specific LCA software will be presented, as well as its practical applicability with the help of two building examples shown.

EINLEITUNG

Im Kontext der Ökobilanzierung im Bauwesen sowie deren gegenwärtiger Anwendung im „Deutschen Gütesiegel Nachhaltiges Bauen“ (DGNB) und nachhaltiger ökologischer Wohngebäude sehen sich sowohl Nutzer als auch Planer häufig vor ein Auswahlproblem gestellt. Der Nutzer muss sich für

eine Bauweise entscheiden, der Planer wird im Allgemeinen eine Bauweise vorschlagen müssen. Doch welches ist die ökologisch vorteilhaftere Variante für das entsprechende Eigenheim?

Eine Antwort auf diese Frage kann eine vergleichende Ökobilanz liefern. Bisher sind zum Thema „Vergleichende Ökobilanzen von Wohngebäuden“ allerdings nur wenige Studien öffentlich zu finden, deren Untersuchungsrahmen und die damit verbundene Qualität der Ergebnisse dementsprechend jedoch variieren. Um objektive Ergebnisse aus einer vergleichenden Ökobilanz gewinnen zu können, sind allerdings

- spezifische Festlegungen an vergleichende Ökobilanzen gemäß DIN EN ISO 14040 und 14044 zu beachten,
- insbesondere Wert auf die Formulierung der Zielstellung der Ökobilanz und des Untersuchungsrahmens zu legen,
- sowie darauf aufbauend die Erstellung eines geeigneten Gebäudemodells zur Nutzung in spezieller Ökobilanz-Software nötig.

STAND DER TECHNIK

Anforderungen an vergleichende Ökobilanzen nach DIN EN ISO 14040 und 14044

Vergleichende Ökobilanzen stellen vergleichende Betrachtungen der potenziellen Umweltwirkungen verschiedener Produktsysteme (beispielsweise eines Einfamilienhauses in verschiedenen Bauweisen) über deren Lebenszyklus an. Das zu untersuchende Produkt wird einem Konkurrenzprodukt mit gleichem Verwendungszweck gegenüber gestellt. Das Ergebnis der Untersuchung ist eine vergleichende Aussage, zur ökologischen Überlegenheit eines Produktes oder zur Gleichwertigkeit beider Produkte.

Voraussetzung dafür ist, dass für die untersuchten Systeme dabei gleiche Funktionen, die mit denselben funktionellen Einheiten in Form ihrer Referenzflüsse quantifiziert werden können, im Untersuchungsrahmen festgelegt werden. Der Referenzfluss drückt die Menge an Produkten aus,

welche nötig ist, um eine vorgegebene Funktion zu erfüllen. Werden zusätzliche Funktionen nicht berücksichtigt, müssen diese dokumentiert und erläutert werden. Alternativ kann aber auch ein System an die Grenze des zu untersuchenden Systems angefügt werden, das mit der Bereitstellung von zusätzlichen Funktionen verbunden ist. Weiterhin im Untersuchungsrahmen zu spezifizieren sind die Leistung der zu untersuchenden Produktsysteme, die Systemgrenze, die Anforderungen an die Datenqualität und die Allokationsverfahren. Sie müssen in den zu vergleichenden Produktsystemen äquivalent festgelegt werden. Die inhaltlichen Zielstellungen müssen sich also entsprechen damit die Systeme unter gleichen Annahmen untersucht werden können.

Die Wirkungsabschätzung ist bei einer zur Veröffentlichung vorgesehenen vergleichenden Aussage zwingend vorzunehmen. Dabei ist ein ausreichend umfassender Satz an Wirkungsindikatoren respektive an Wirkungskategorien zu verwenden. Der Vergleich zwischen den Systemen ist für jeden Wirkungsindikator einzeln durchzuführen. An die Wirkungsindikatoren sind Mindestanforderungen zu stellen. Sie müssen wissenschaftlich begründet und technisch gültig sein sowie Umweltrelevanz, d.h. eine ausreichend eindeutige Verbindung zu Wirkungsendpunkten, aufweisen. Die Anwendung der Gewichtung ist nicht erlaubt. Des Weiteren muss eine Analyse der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung auf Sensitivität und Unsicherheit zwingend vorgenommen werden.

Als Grundlage für die Auswertung ist die Vergleichbarkeit der Produktsysteme nach den erwähnten Voraussetzungen zu beurteilen. Sind Unterschiede hinsichtlich der Vergleichbarkeit zwischen den Systemen vorhanden, müssen diese angeführt und erläutert werden. Zu beurteilen sind ebenfalls die Punkte Vollständigkeit, Konsistenz und Sensitivität der Ergebnisse.

Die Hauptanforderung an die Berichterstattung für eine vergleichende Aussage ist die uneingeschränkte Transparenz. Im Falle einer Veröffentlichung der vergleichenden Ökobilanz muss ein kritische Prüfung durch einen externen unabhängigen Kreis von Sachverständigen durchgeführt werden, in der insbesondere auf die Voraussetzungen für die Vergleichbarkeit der untersuchten Produktsysteme eingegangen werden muss. Im Speziellen ist die äquivalente Festlegung der Funktionen und der funktionellen Einheit zwingend zu überprüfen.

Vergleichende Ökobilanzstudien von Wohngebäuden

Aufbauend auf den Anforderungen an vergleichende Ökobilanzen nach DIN EN ISO 14040/14044 wird ein Kriterienkatalog erarbeitet um ausgewählte öffentlich zugängliche Studien im Themenbereich

„Vergleichende Ökobilanz von Wohngebäuden“ untersuchen zu können. Das Augenmerk liegt hierbei auf der Überprüfung bzw. Einordnung der Studien im Hinblick auf die Erfüllung der Anforderungen nach Norm. Im Speziellen werden die Kriterien:

- Art der Studie,
- Zielfestlegung,
- Untersuchungsrahmen,
- Sachbilanz,
- Wirkungsabschätzung,
- Auswertung,
- Berichterstattung und
- und kritische Prüfung

sowohl quantitativ wie auch qualitativ für einzelne ausgewählte Studien betrachtet.

Insbesondere soll auf die Frage nach den Annahmen bzw. Werthaltungen, die den vergleichenden Ökobilanzstudien zugrunde gelegt werden, Auskunft gegeben werden als auch inwieweit den Anforderungen an die Normen bei der Durchführung tatsächlich entsprochen wird.

Als maßgebliche Studien wurden identifiziert:

- „Comparison of the Life Cycle Assessments of a Concrete Masonry House and a Wood Frame House“: Ökobilanzstudie, Portland Cement Association, USA (2008)0.
- „Comparison of the Life Cycle Assessments of an Insulating Concrete Form House and a Wood Frame House“: Ökobilanzstudie, Portland Cement Association, USA (2008).
- „Gegenüberstellung Massivhaus / Holzelementbauweise an einem KfW Energiesparhaus 40“: Ökobilanzstudie, Technische Universität Darmstadt, Deutschland (2008)0.
- „ÖkoPot“: Ökologische Potenziale durch Holznutzung gezielt fördern, Endbericht des Bundesministeriums für Forschung und Bildung, Deutschland (2008)0.
- „Einfluss von Energiestandard und konstruktiven Faktoren auf die Umweltauswirkungen von Wohngebäuden – eine Ökobilanz“: Ökobilanzstudie anhand verschiedener Niedrigenergiehäuser, Dietlinde Quack, Deutschland (2001).

Die aufgeführten Studien setzen sich vorwiegend mit dem ökologischen Vergleich von Wohngebäuden in Massivbauweise und in Holzelementbauweise auseinander.

Die Ergebnisse der Analyse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Unterschiedliche Berücksichtigung der Anforderungen an die Normen DIN EN ISO 14040/4044, mit dem Ergebnis das häufig die kritische Prüfung bei Veröffentlichung der Studie vernachlässigt wurde,
- Festlegung der Systemgrenzen häufig ohne Betrachtung der Lebenszyklusphase Lebensende,
- Unterschiedliche Detailtiefe bezüglich der Transparenz der Berichterstattung,
- Nicht hinreichend genaue Festlegung von Funktionen, sinnvollen funktionellen Einheiten und Systemgrenzen,
- Sehr grobe Festlegung der Anforderungen an die Datenqualität, die Abschneidekriterien und eine eventuelle Allokation,
- Probleme bei der Beschreibung von Charakterisierungsmodellen, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsfaktoren für die Wirkungsabschätzung,
- Sowie eine nicht ausreichende Darstellung von Vollständigkeitsprüfungen, Sensitivitätsprüfungen und Konsistenzprüfungen.

Anforderungen an Ökobilanzen im „Deutschen Gütesiegel Nachhaltiges Bauen“

Im Zertifizierungssystem des „Deutschen Gütesiegel Nachhaltiges Bauen“ zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden, werden explizit die Ergebnisse einer Ökobilanz gefordert um diese in die Bewertung mit einfließen zu lassen. Für Bürogebäude werden dabei bereits konkrete objektive Anforderungen für die ökobilanzielle Untersuchung definiert. Diese sollen im Folgenden kurz umrissen werden, um für die Definition der Zielstellung und des Untersuchungsrahmens für einen ökologischen Vergleich zweier Beispielgebäude herangezogen werden zu können.

Das Gütesiegel betrachtet die Lebenszyklusphasen:

- Herstellung und Errichtung inklusive zugehöriger Vorstufen,
- die Nutzung (Instandhaltung der Baukonstruktion und Technischer Anlagen),
- den Betrieb (Versorgung des Gebäudes beispielsweise mit Strom und Wärme),
- die Verwertung/Entsorgung am Lebensende.

Als Bezugsgröße, gleichbedeutend mit der funktionellen Einheit nach den Normen DIN EN ISO 14040/14044, wird die Nettogrund-

fläche in m² je Jahr festgelegt. Die Systemgrenze bezieht das Gebäude ohne Außenanlagen ein.

Für die Herstellung nach vollständigem Rechenverfahren müssen der Rohbau und der Ausbau wie gebaut einbezogen werden. Die Bauteile sind gemäß DIN 276 zu gliedern. Insbesondere müssen die Hüllflächen (beispielsweise Außenwände, Dach, Bodenplatten) sowie Innenwände und Geschossdecken des Gebäudes mit einbezogen werden. Für die Mengenermittlung, die prüffähig und vollständig dargelegt werden muss, sind die Kostengruppen 300 (Baukonstruktion) und 400 (Technische Anlagen) maßgeblich. Der Baustellenbetrieb sowie der Transport können vorerst vernachlässigt werden.

Für die Nutzung sind die Anlagen zur Ver- und Entsorgung sowie die Instandsetzung einzubeziehen. Als Betrachtungszeitraum werden 50 Jahre angesetzt. Die Ergebnisse sind gemäß DIN 18960 zu gliedern und die Gruppen Ver- und Entsorgung (Betrieb, Kostengruppe 310) und Instandsetzung (Kostengruppen 410 und 420) zu unterscheiden. Insbesondere müssen für den Betrieb die Werte für den Endenergiebedarf für Strom und Wärme einbezogen sowie die Wärmeerzeugungsanlage benannt werden. Für die Instandsetzung müssen alle Materialien, Bauteile bzw. Oberflächen einbezogen werden für die eine Nutzungsdauer angesetzt wird, die unter dem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren liegt. Es muss hierbei beachtet werden, dass die Bauteile unter technisch realistischen Randbedingungen ausgetauscht werden. Gegebenenfalls sind dazu aufgrund der Zugänglichkeit einer Schicht, mehrere Schichten auszutauschen. Die Entsorgung der ausgetauschten Bauteile ist ebenfalls zu berücksichtigen. Transporte können vernachlässigt werden.

Für die Betrachtung des Lebensendes (End-of-Life) müssen alle Verwertungs- und Entsorgungswege für alle Materialien und Baustoffe einbezogen werden, die sich zum Ende des Betrachtungszeitraums noch im Bauwerk befinden. Die Verwertung oder Entsorgung erfolgt baustoff- bzw. materialspezifisch. Beispielsweise werden Metalle dem Recycling und Materialien mit einem Heizwert der thermischen Verwertung zugeführt. Der Aufwand für den Rückbau des Gebäudes wird vorerst nicht betrachtet. Für den Transport der Baumaterialien am Lebensende sind keine spezifischen Festlegungen getroffen worden.

Datengrundlagen und Literaturquellen, die im Rahmen der Ökobilanzierung im „Deutschen Gütesiegel“ Verwendung finden sind beispielsweise die „Ökobau.dat“ für Baustoff- und Gebäudedaten, der „Leitfaden Nachhaltiges Bauen“ beziehungsweise die VDI 2067 für die Nutzungsdauern von Bauteilen, die EnEV und die

DIN V 18599 Berechnungen für den Ausweis des Endenergiebedarfs für Strom und Wärme, sowie die Materiallisten und Ausführungspläne des Gebäudes zur Ermittlung von Flächen und Schichtaufbauten.

Übergeordnet wird zwischen dem Ausweis der Ergebnisse der Ökobilanzierung für die Baukonstruktion (Herstellung, Nutzung, End-of-Life) und dem Betrieb des Gebäudes unterschieden, wobei die Ergebnisse der einzelnen Lebenszyklusphasen separat anzugeben sind.

ZIELSTELLUNG UND UNTERSUCHUNGSRAHMEN FÜR DIE VERGLEICHENDE ÖKOBILANZ DER BEISPIELGEBÄUDE

Die Anforderungen an vergleichende Ökobilanzen aus den Normen DIN EN ISO 14040/14044, die Erkenntnisse der Literaturanalyse und die Anforderungen an Ökobilanzen aus dem „Deutschen Gütesiegel Nachhaltiges Bauen“ werden im Folgenden benutzt, um die Zielstellung und den Untersuchungsrahmen für ein Modell zur vergleichenden Ökobilanzierung von Wohngebäuden unterschiedlicher Bauweisen abzuleiten. Des Weiteren werden das Ziel und der Untersuchungsrahmen anhand zweier betrachteter Beispielgebäude konkretisiert.

Vorstellung der Beispielgebäude

Die untersuchten Beispielgebäude wurden auf nebeneinander liegenden Baufeldern errichtet und sind den gleichen klimatischen Beanspruchungen ausgesetzt. Für beide Gebäude liegen Grundrisse, Pläne und Schnitte sowie vorläufige Materiallisten und Berechnungen nach EnEV vor. Es handelt sich um äußerlich identische, freistehende Einfamilienhäuser in Massivbauweise und Leicht- bzw. Holzbauweise (Abbildung 1).

Als Material der tragenden Konstruktion der Massivbauweise wird ein Hochlochziegel eingesetzt. Die tragende Konstruktion der Holzbauweise ist vorrangig durch den Einsatz von Baumaterialien des Trockenbaus (Holzständerkonstruktion, Gipsbauplatten, Holzwohle-Leichtbauplatten) geprägt. Beide Beispielhäuser zeichnen sich durch gleiche Außenabmessungen, d.h. einen gleichen Gebäudegrundriss, gleiche Gebäudehöhen, gleiche Grundflächen sowie durch eine gleiche innere Raumaufteilung und ein gleiches A/V-Verhältnis in Höhe von $0,82\text{m}^{-1}$ aus.

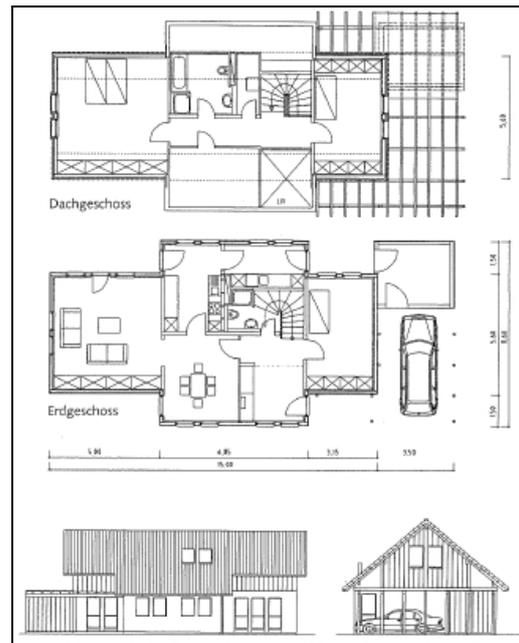


Abbildung 1 Ansicht und Grundriss für die betrachteten Beispielgebäude

Bedingt durch die unterschiedliche Bauweise und die gleichen Außenabmessungen variiert die Gesamtwohnfläche der Gebäude. Sie beträgt für das Einfamilienhaus in Holzbauweise $140,29\text{m}^2$ und für die Massivbauweise $131,66\text{m}^2$. Durch eine schlankere Außenbauteilkonstruktion bei vergleichbaren statischen und bauphysikalischen Eigenschaften entspricht das einem vermehrten Wohnraum für die Holzbauweise in Höhe von ca. 6,5% (9m^2). Der Luftschallschutz der Außenwände beträgt für das Massivhauses ca. 50 dB sowie 48 dB für das Holzhaus. Ebenfalls vergleichbar in ihrer Größe sind die Wärmedurchgangskoeffizienten der Gebäude mit Werten von $0,398\text{ W/m}^2\text{K}$ für die massive und $0,394\text{ W/m}^2\text{K}$ für die leichte Konstruktion.

Zielstellung und Untersuchungsrahmen

Die vergleichende Ökobilanz richtet sich an Bauherren und Investitionsentscheider, an Planer (Architekten), Berater und Meinungsbildner, an politische Entscheidungsträger und kann in der Ausbildung sowie der Lehre Verwendung finden. Die Ergebnisse der Studie sind bislang nicht zur Veröffentlichung vorgesehen.

Die Zielstellung für die vergleichenden Ökobilanz wird durch die „ökologische Betrachtung eines Einfamilienhaus in konventioneller Mauerwerksbauweise und in Holzrahmenbauweise (Trockenbau mit hohem Vorfertigungsgrad der Bauelemente)“ festgelegt. Die betrachteten Gebäude werden über den Gebäudetyp, die Bauweise, die Materialien der tragenden Gebäudekonstruktion und den geometrischen Abmessungen sowie dem Standort (klimatische Bedingungen) beschrieben.

Die Gebäude erfüllen die Funktion die Bewohner vor der Umwelt zu schützen (beispielsweise vor Wärme, Feuchte und Kälte) sowie Wohnraum zur Nutzung bereit zu stellen. Als funktionelle Einheit wird das Bewohnen bzw. Bereitstellen von jeweils 1m² beheizter Wohnfläche für den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren über den gesamten Gebäudelebenszyklus definiert.

Es werden die Wirkungskategorien Treibhauspotenzial (GWP), Versauerungspotenzial (AP), Eutrophierungspotenzial (EP), Ozonschichtabbau-potenzial (ODP), und Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP) nach dem Charakterisierungsmodell CML 2001 (Leiden) für die Wirkungsabschätzung betrachtet werden. Des Weiteren sollen die Indikatoren fossiler Primärenergiebedarf und erneuerbarer Primärenergiebedarf in die Auswertung eingeschlossen werden.

AUFBAU DES GEBÄUDEMODELLS FÜR DIE VERGLEICHENDE ÖKOBIANZIERUNG VON WOHN- GEBÄUDEN

Allgemeiner Aufbau und Struktur

Mit Hilfe der Ökobilanz-Software GaBi wird basierend auf der Zielstellung und dem Untersuchungsrahmen ein hierarchisch strukturiertes Gebäudemodell aufgebaut, mit dem es möglich ist, beide Gebäude unter gleichen Voraussetzungen ökobilanziell zu betrachten.

Für den übergeordneten Aufbau des Modells werden die Lebenszyklusphasen, wie in Abbildung 2 dargestellt, durch die Baukonstruktion (d.h. die Herstellung, die Nutzung, das Lebensende) und den Betrieb (d.h. die Versorgung des Gebäudes) abgebildet.

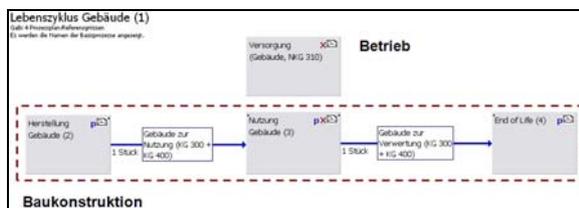


Abbildung 2 Modell des Gebäudelebenszyklus in GaBi 4

Das Modell wird vollkommen generisch und vollständig parametrisiert erstellt. Dabei werden beispielsweise variable:

- Volumina für Materialien (bspw. Beton),
- Flächen in m² für flächenintensive Materialien (Teppichboden, Anstriche,

- Massen in kg für einzelne Bauteile (bspw. Fenster und Türen) und einzelne Baustoffe (bspw. Bewehrungsstahl)

sowie fixe Rohdichten in kg/m³ für Baustoffe oder fixe Flächengewichte für Bauteile als Parameter im Modell festgelegt.

Herstellung

Die Herstellung wird anhand der Vorgaben für die Kostenstruktur im Hochbau nach DIN 276 gegliedert. Auf der übergeordneten Ebene wird hierbei in die Kostengruppe (KG) 300 „Baukonstruktion“ und KG 400 „Technische Anlagen“ unterschieden. Beispielhaft ist die weitere Untergliederung des Modells für die KG 300 aus Abbildung 3 und Abbildung 4 ersichtlich.

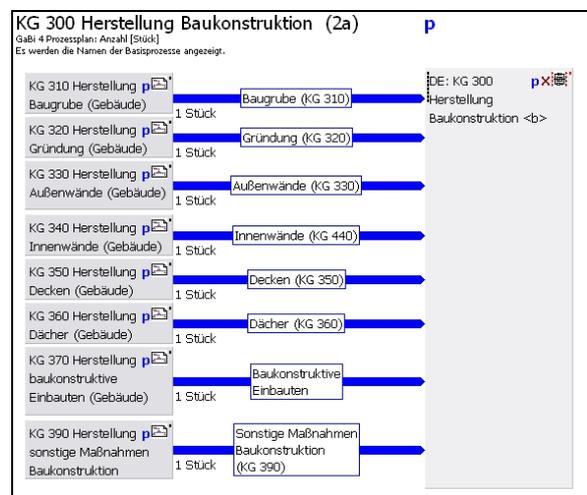


Abbildung 3 Gliederung der Kostengruppe 300 gemäß DIN 276 im Gebäudemodell in GaBi 4

Das Gebäudemodell auf der untersten Ebene aller Kostengruppen verdeutlicht Abbildung 4.

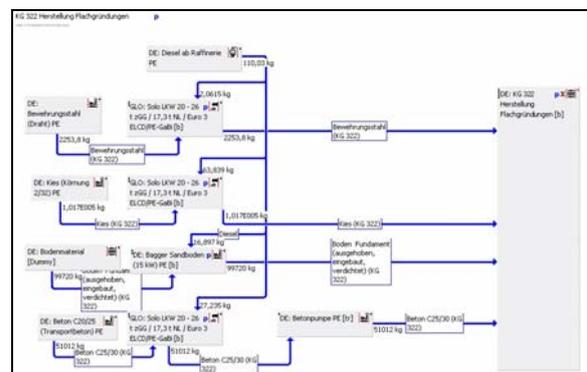


Abbildung 4 Herstellung der Flachgründung (KG 322 gemäß DIN 276) in GaBi 4

Die Prozesse auf der untersten Ebene werden als Basisprozesse modelliert. Die Input- und Outputflüsse der Prozesse repräsentieren die eingehenden Material- und Energieströme für die

Herstellung des entsprechenden Bauteils. Für die Herstellung der Flachgründung sind das beispielsweise der Bodenaushub, Kies, Beton und der Bewehrungsstahl für die Fundamente.

Transportprozesse vom Bauteilhersteller zur Baustelle werden mit berücksichtigt und über die Parameter Auslast der Transportfahrzeuge und die Entfernung zur Baustelle variiert.

Nutzung

Die Nutzung des Gebäudes wird im Modell durch die Instandsetzung der Baukonstruktion (KG 300), die Instandsetzung der technischen Anlagen (KG 400) und die Verwertung/Entsorgung der entsprechenden ausgetauschten Materialien abgebildet (Abbildung 5).

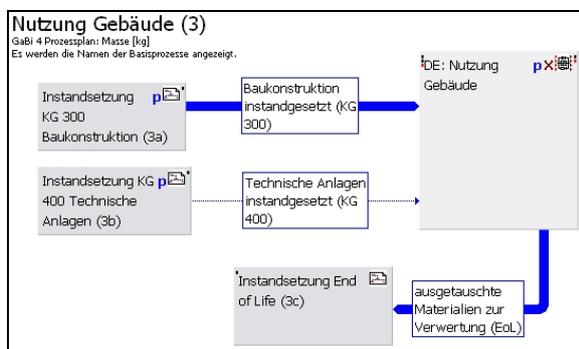


Abbildung 5 Modellierung der Nutzungsphase in GaBi 4

Für die Baustoffe/Bauteile, die im Rahmen der Instandsetzung auszutauschen sind und für den Betrachtungszeitraum für die Nutzung des Gebäudes werden variable Parameter definiert. Die Modellierung der Instandsetzung erfolgt analog der Modellierung der Herstellung der entsprechenden Bauteile getrennt nach Kostengruppen.

Es wird allgemein von einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren und mittleren Nutzungsdauern für Bauteile ausgegangen. Es werden vorerst Baustoffe/Bauteile aufgenommen, deren mittlere Lebensdauern unter der Zeitspanne des Betrachtungszeitraums liegen. Zusätzlich werden Baustoffe/ Baumaterialien abgebildet, die aus konstruktiven Gründen mit den zuvor beschriebenen Baustoffen/Baumaterialien verbunden und dadurch unabhängig von ihrer mittleren Nutzungsdauer auszutauschen sind. Über einen Nutzungsdauer-Faktor, wird die Menge an instand zu setzenden Materialien/Bauteilen bestimmt. Ausgetauschte Materialien werden einem Lebensende zugeführt, welches analog dem Lebensende des Gebäudes strukturiert wird.

Lebensende (End-of-Life)

Die Massen der Gebäudekonstruktion und der technischen Anlagen, die sich am Ende des Betrachtungszeitraums noch im Gebäude befinden, werden zum Lebensende berücksichtigt. Sie werden in Gruppen zusammen gefasst, wenn davon ausgegangen werden kann, dass sie mit anderen verbundenen Materialien in gleicher Art und Weise entsorgt bzw. verwertet werden können. Als Verwertungs- bzw. Entsorgungswege werden festgelegt (Abbildung 6):

- thermische Verwertung für Materialien mit Heizwert (beispielweise Polyvinylchlorid (PVC), textile Materialien, Polystyrol (PS) und Holz),
- Bauschuttzubereitung für mineralische Baumaterialien (beispielweise Kies und Beton),
- Recycling für Metalle mit einem Recyclingpotenzial (beispielweise Edelstahl, Aluminium, Titanzink)
- Deponierung für sonstige Materialien, die auf einer Deponie gelagert werden dürfen (beispielweise Steinwolle und bituminöse Materialien).

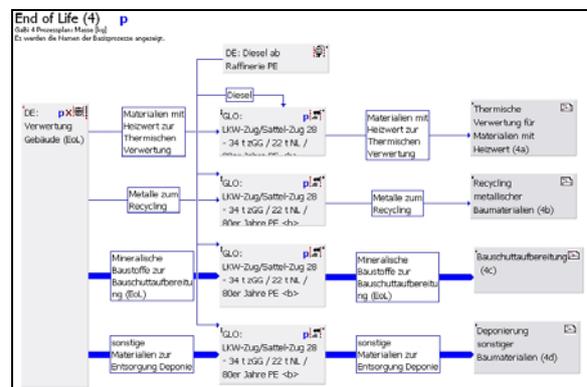


Abbildung 6 Modellierung des End-of-Life in GaBi 4

Es werden ebenfalls die Transportprozesse der Materialien zum Entsorger bzw. Verwerter eingeschlossen. Als Parameter werden die Auslast der Transportfahrzeuge und die Entfernung analog der Herstellung definiert.

Versorgung

Für die Modellierung der Versorgung (Gebäudebetrieb) werden der vom Gebäude benötigte Wärmebedarf für Heizung und Warmwasser sowie der Strombedarf eingeschlossen. Als Parameter werden der Endenergiebedarf für Heizung, Warmwasser und Strom in kWh/m²a hinterlegt. Diese Angaben werden den EnEV-Berechnungen entnommen. Zusätzlich werden der

Betrachtungs-zeitraum und die Wohnfläche als variable Parameter definiert.

ANWENDUNG DES GENERISCHEN GEBÄUDEMODELLS

Im Folgenden wird die Anwendung des Gebäude-modells für die Ökobilanzierung der Massivkonstruktion, basierend auf vorläufigen Materiallisten, exemplarisch aufgezeigt.

Umweltwirkungen für den Gebäudelebenszyklus der Massivkonstruktion nach Lebenszyklusphasen

Abbildung 7 zeigt die Anteile der einzelnen Lebenszyklusphasen am gesamten Treibhauspotenzial sowie aufgeteilt nach Versorgung (Betrieb) und Konstruktion (KG 300 und 400) für das Massivhaus.

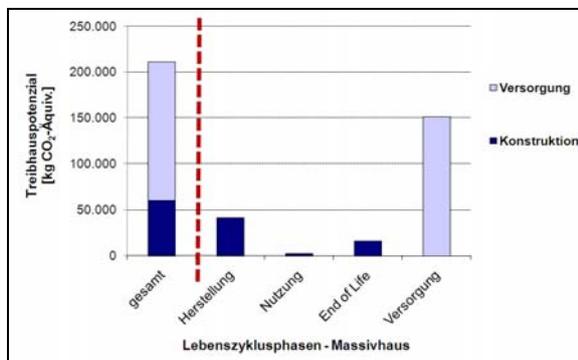


Abbildung 7 Anteile der einzelnen Lebenszyklusphasen in der Wirkungskategorie Treibhauspotential für das Massivhaus

Ersichtlich wird daraus insbesondere, dass die Auswirkungen des Gebäudebetriebs die Auswirkungen der Baukonstruktion überwiegen. Es wird ein Verhältnis des Anteils der Versorgung zur Konstruktion von etwa 70:30 ersichtlich.

Umweltwirkungen für den Gebäudelebenszyklus der Massivkonstruktion unterteilt nach Kostengruppen

Aus Abbildung 8 können Ergebnisse für die Herstellung der Baukonstruktion, gegliedert nach Kostengruppen, für die Wirkungskategorie Treibhauspotenzial für das Massivhaus abgeleitet werden.

Hauptanteil am Treibhauspotenzial haben dabei die Kostengruppe 320 (Gründung) und Kostengruppe 350 (Decken), verursacht durch den Einsatz von Stahlbeton sowie die Kostengruppe 330 (Außenwände), verursacht durch den Einsatz von Hochlochziegeln. Die Kostengruppe 340 (Innenwände) weist einen geringeren Anteil auf, der ebenfalls durch den Einsatz von Hochlochziegeln sowie zusätzlich durch den Einsatz von Putz hervorgerufen wird.

In den Kostengruppe 360 (Dächer) und 370 (Baukonstruktive Einbauten) wird der erneuerbare Baustoff Holz eingesetzt (beispielsweise in der Dachstuhlkonstruktion), welcher zu einem negativen Beitrag zum Treibhauspotenzial führt.

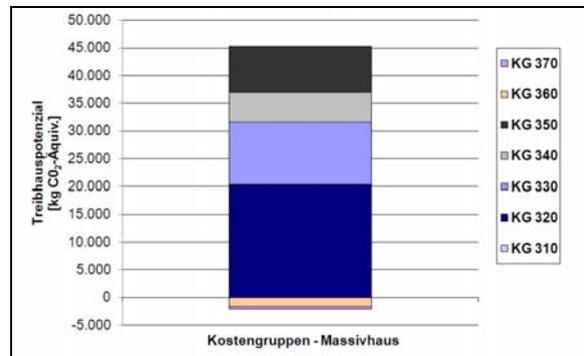


Abbildung 8 Ergebnisse der Herstellung der Baukonstruktion in der Wirkungskategorie Treibhauspotenzial gegliedert nach Kostengruppen für das Massivhaus

ZUSAMMENFASSUNG

Die vorgestellten Anforderungen an vergleichende Ökobilanzen von Wohngebäuden am Beispiel 1-2 Familienhaus wurden aus den allgemeinen Anforderungen nach DIN EN ISO 1040/14044 in Grundzügen abgeleitet. Für die spezifische Anwendung im Wohnbau wurden sie durch Anforderungen aus dem „Deutschen Gütesiegel Nachhaltiges Bauen“ ergänzt. Erkenntnisse aus der Literaturanalyse von vergleichenden Ökobilanzstudien von Wohngebäuden flossen ebenfalls ein. Als wichtigste Voraussetzung für den ökobilanziellen Vergleich hat sich ergeben, dass zwingend gleiche Funktionen, gleiche funktionelle Einheiten und gleiche Systemgrenzen für die zu untersuchenden Produktsysteme (Gebäude) festgelegt werden müssen. Im Fall einer Veröffentlichung hat zwingend eine kritische Prüfung zu erfolgen. Damit können objektive und qualitative Ergebnisse erzielt und Vertrauen in die gewonnenen Aussagen geschaffen werden.

Am Beispiel zweier Einfamilienhäuser wurde entsprechend den definierten Anforderungen die Zielstellung sowie der Untersuchungsrahmen für eine vergleichende Ökobilanz spezifiziert. Dies ist insbesondere wichtig, da sowohl die Festlegung der Zielstellung als auch die des Untersuchungsrahmens maßgeblich die Durchführung der Ökobilanz bestimmen. Darauf aufbauend wurde ein generisches Gebäudemodell entwickelt, welches sich durch seine klare Struktur (gegliedert nach Kostengruppen der DIN 276), seine vollständige Parametrisierung und die Möglichkeit der Abbildung unterschiedlicher Gebäude auszeichnet. Es berücksichtigt im Sinne eines vollständigen Gebäudelebenszyklus die

Herstellung, die Nutzung sowie die Versorgung und schließt ebenfalls das Lebensende ein. Zusätzlich wird auch der Transport bedacht. Damit können die Beispielgebäude unter denselben Voraussetzungen und unter Berücksichtigung der Anforderungen der Norm ökologisch vergleichend betrachtet werden. Die Anwendbarkeit des Modells konnte durch beispielhafte Auswertungen für das Massivhaus aufgezeigt werden. Analog können die Auswertungen für die Konstruktion in Holzelementbauweise im gleichen Modell durch Variation der Eingangsparameter (Materialien, Massen, etc.) vorgenommen werden.

AUSBLICK

Da die Anforderungen an vergleichende Ökobilanzen für Gebäude im Bauwesen bisher nicht verbindlich festgeschrieben wurden, könnte dies eine zukünftige Aufgabe, beispielsweise für den Gesetzgeber, darstellen. Ebenfalls sollten Charakterisierungsmodelle zur Abschätzung der potenziellen Umweltwirkung Anwendung finden können, die verbindliche und international akzeptierte Wirkungskategorien und Wirkungsindikatoren beschreiben.

Das vorgestellte Gebäudemodell, welches auf den erarbeiteten Anforderungen für vergleichende Ökobilanzen von Wohngebäuden basiert, ist in seinem Grundgedanken generisch, parametrisiert und flexibel. Sofern es die Anwendung verlangt, ist es beliebig erweiterbar, beispielsweise um zusätzliche Baustoffe, Kostengruppen oder Bauprozesse. Szenario-Analysen werden durch die Veränderung der Modellparameter möglich (beispielsweise Veränderung der Baustoffmassen oder des Betrachtungszeitraums). Zukünftig kann es nicht nur für den Vergleich von Wohnbauten, sondern auch für den Vergleich im Nichtwohnungsbau heran gezogen werden. Im entsprechenden Fall sollte dann allerdings darauf geachtet werden, die Zielstellung und den Untersuchungsrahmen der Ökobilanz entsprechend festzulegen. In Verbindung mit einem wirtschaftlichen und technischen Vergleich der zu untersuchenden Gebäude ist mit dem Modell ein Werkzeug geschaffen, dass in der Lage ist, Aussagen zur ökologischen Überlegenheit oder Gleichwertigkeit von Wohngebäuden zu treffen und das „ökologische Häuschen im Grünen“ zukünftig unter objektiven Gesichtspunkten identifizieren zu können.

LITERATUR

Albrecht, S.; et al..2008. ÖkoPot - Ökologische Potenziale durch Holznutzung gezielt fördern. Verbundprojekt: ÖkoPot – Abschlussbericht zum BMBF-Projekt FKZ 0330545. Herausgegeben vom Lehrstuhl für Bauphysik Abteilung Ganzheitliche Bilanzierung Universität Stuttgart, Zentrum Holzwirtschaft Universität Hamburg, PE International GmbH

und Knauf Consulting GbR. Stuttgart, Hamburg, Germany.

DGNB - Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V. 2010. Stuttgart, Deutschland. Online: URL: www.dgnb.de.

DIN 276-1:2008. Kosten im Bauwesen. Teil 1: Hochbau. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin (2008).

Graubner, C.-A.; Knauff, A.. 2008. Ökobilanzstudie - Gegenüberstellung Massivhaus / Holzbauweise. Gegenüberstellung Massivhaus / Holzelementbauweise an einem KfW Energiesparhaus 40. Forschungsbericht F04-8-2008. Herausgegeben von Institut für Massivbau Fachbereich 13 Bauingenieurwesen und Geodäsie Technische Universität Darmstadt. Darmstadt, Deutschland.

Guinée, J. et. al.. 2001. Handbook on Life Cycle Assessment - Operational Guide to the ISO Standards. Centre of Environmental Science, Leiden University (CML). Leiden, Niederlande. ISBN: 978-1-4020-0557-2.

Heijungs, R. et al.. 1992. Environmental Life Cycle Assessment – Guide & Background. Centrum voor Milieukunde (CML), Leiden, Niederlande.

ISO 14040:2006: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen. 2006. Berlin, Deutschland.

ISO 14044:2006: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen. 2006. Berlin, Deutschland.

Marceau, Medgar L. et al.. 2008. Comparison of the Life Cycle Assessments of a Concrete Masonry House and a Wood Frame House. Herausgegeben von Portland Cement Association. Skokie, Illinois, USA.

Marceau, Medgar L. et al..2008. Comparison of the Life Cycle Assessments of an Insulating Concrete Form House and a Wood Frame House. Herausgegeben von Portland Cement Association. Skokie, Illinois, USA.

PE, LBP. 2009. GaBi 4, Software-System und Datenbanken zur Ganzheitlichen Bilanzierung. Copyright, TM. Stuttgart, Echterdingen, Deutschland.

Quack, D.: Einfluss von Energiestandard und konstruktiven Faktoren auf die Umweltauswirkungen von Wohngebäuden - eine Ökobilanz. Demonstrationsprojekt: Niedrigenergiehäuser Heidenheim. Herausgegeben von Öko-Institut e.V., Freiburg (2001).

SIMULIERTE TAGESLICHTWIRKUNG IM RAHMEN VIRTUELLER SYNAGOGENREKONSTRUKTIONEN

Bob Martens¹ und Herbert Peter²

¹Technische Universität Wien, Wien, Österreich
²Akademie der bildenden Künste, Wien, Österreich

KURZFASSUNG

Die Simulation von Tageslicht im Rahmen einer virtuellen Rekonstruktion von nicht mehr existenten Innenräumen steht in diesem Beitrag im Mittelpunkt der Betrachtung. Es handelt sich dabei um zerstörte Synagogen in Wien, welche 1938 nicht nur devastiert wurden, sondern in weiterer Folge aus dem Wiener Stadtbild verschwanden. Obgleich in vielen Fällen nicht mal ein einziges Innenraumbild vorhanden ist, kann mittels der computergestützten Darstellung ein Eindruck vom Interieur gewonnen werden. Die Auseinandersetzung mit fehlenden (Teil-) Information wird ebenso behandelt, wie der Umgang mit der dreidimensionalen Modellerstellung und die darauf folgende Visualisierung. Abschließend werden Beispiele hinsichtlich der erzielbaren Qualität von Raumeindrücken mitsamt dem Tageslichteinfall aufgezeigt.

ABSTRACT

This contribution focuses on the simulation of daylight within the context of the virtual reconstruction of the interiors of synagogues in Vienna that were destroyed in 1938 and have disappeared without leaving a trace. Although in many cases there is not a single picture of the interiors available, computer-assisted simulations can convey an impression of what they must have looked like. The paper discusses the handling of minor and major information gaps, as well as the approach to three-dimensional modelling and subsequent visualisation. It concludes with examples of the achievable level of quality of interior impressions including the incidence of daylight.

EINLEITUNG

In diesem Beitrag stellt die bereits über ein Jahrzehnt laufende virtuelle Rekonstruktionsarbeit von mehr als zwanzig Wiener Synagogen den Ausgangspunkt für den Umgang mit Tageslichtsimulation dar. Das nicht mehr Existieren dieser Sakralbauten definiert naturgemäß eine wichtige Rahmenbedingung.

Nachdem der Fundus an recherchierten Materialien (Planunterlagen, Fotografien, künstlerische Darstellungen, etc.) sich ständig erweitert und auch der

Erkenntnisstand sich dementsprechend verändert, wurde für eine nachvollziehbare CAD-Modellstruktur optiert. Über die gewählte Systematik wurde bereits ausführlich berichtet (Martens/Peter, 2002). Ebenso wurde der Darstellung der spezifischen Lage der Standorte im stadträumlichen Umfeld besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Heutzutage stehen 3D-Modellierungen mit einem hohen Detaillierungsgrad zur Verfügung (Martens/Peter, 2010).

Nachdem die Durchführung der laufenden Rekonstruktionsarbeit einen längeren Zeitraum in Anspruch nahm, konnte auch eine signifikante Entwicklung im Bereich der eingesetzten Softwarepakete geortet werden, welche sich vordergründig der getreuen Darstellung von Lichtverhältnissen widmet. Dies ist insofern von Bedeutung, als das von so manchen Synagogen im Normalfall nur das eine oder andere Außenraumbild überliefert wurde. Des Öfteren ist nicht eine einzige Innenraumaufnahme vorhanden. Es handelt sich überdies vorwiegend um Schwarz-Weiß-Aufnahmen, da die Farbfotografie in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts noch weitgehend in den Kinderschuhen steckte.



Abb. 1 Synagoge und städtebauliches Umfeld: Lage und Orientierung als wichtige Parameter („Hinterhof“-Synagoge Schopenhauerstrasse, Wien).

Bestenfalls lässt sich an Hand von monochromen Bildern ein Hauch von Farblichkeit erahnen. Das Nichtvorhandensein von fotografischen Darstellungen lässt die Visualisierung des Innenraumes umso wichtiger erscheinen.

VORGANGSWEISE

Im Jahre 1998 wurde am ehemaligen Standort „Neudeggasse 8“ zu allererst eine computergestützte Modellierung der ehemaligen Synagoge modelliert. Seitdem wurde nicht nur eine umfassende Recherche von über 20 weiteren Standorten in Wien durchgeführt, sondern wurden diese ebenso virtuell rekonstruiert (Martens/Peter, 2009). Der Umstand, dass ausreichende Basisinformationen über das bauliche Gefüge für die Rekonstruktion vorhanden sind, führt dazu, dass im Zuge der erstmaligen Modellierung eines bestimmten Standortes als Ergebnis für gewöhnlich eine passable Ausgangslage entstehen kann. Auf Grund der Gegebenheit, dass baubehördlich genehmigte Plandokumente dabei vordergründig die Arbeitsgrundlage darstellen, fehlen dennoch Informationen, welche im Stadium der Ausführungsplanung generiert worden sind. Solche Plandokumente konnten bislang nicht aufgefunden werden, obgleich erst in etwa ein Jahrhundert seit deren Erstellung vergangen ist. Dennoch kann die fotografische Aufnahme die fehlende bauliche Information ein Stück weit ausgleichen. Ebenso kommen diesbezüglich Vergleichsbauten in Betracht, auch wenn hier das Instrument der Interpretation eine erhebliche Rolle spielt.

Die computergestützten Modellierungen werden periodisch in nachkommenden Softwareversionen portiert und überdies in gängigen Formaten exportiert. Grundsätzlich sind Entwicklungen in den softwareseitig benutzten Modellierungswerkzeugen an der Tagesordnung, doch hat sich der Umgang mit neuen Funktionen und Werkzeugen im Laufe der Zeit (1998 bis dato) als bewältigbar herausgestellt. Vielmehr hingegen ist auf die enorme Evolution im Bereich der Visualisierung hinzuweisen, wobei das digitale Modell jeweils die Grundlage bildet (Abb. 9a-b).

Die Einschränkung auf Tageslichtsimulation in diesem Beitrag lässt sich dadurch begründen, dass dies als eine erste Stufe einer weiterführenden Auseinandersetzung mit dem sakralen Innenraum zu betrachten ist. Im konkreten Fall sind jeweils die spezifische Lage des Standortes und dessen Orientierung bekannt. Ebenso sind verhältnismäßig genaue Angaben betreffend der angrenzenden Bebauung bekannt und somit das Ausmaß einer Verschattung berechenbar.

Die künstliche Beleuchtung wäre bei den ggst. Sakralbauten von Bedeutung. Es fehlen jedoch hier umfassende Informationen, zumal die Kunstlichtplanung kein Gegenstand eines baubehördlichen Genehmigungsverfahrens ist. In

Einzelfällen sind dennoch Angaben betreffend eingesetzter Lichtquellen bekannt (z.B. eigens angefertigte Leuchtkörper) oder kann diese Information an Hand einer historischen Innenraumaufnahme hergeleitet werden. Die Zahl solcher Fotografien hält sich jedoch in Grenzen. Darüber hinaus könnten Vergleichsbauten aus Österreich und angrenzenden Regionen (z.B. Slowakei, Ungarn, Tschechien, etc.) herangezogen werden. Bemerkenswerterweise wurden außerhalb Wiens viele Synagogenbauten „nur“ devastiert, jedoch nicht vollständig baulich zerstört. So wird manch erhaltenes Gebäude heute anders genutzt, wobei die Lichtsituation eine untergeordnete Rolle spielt.

MODELLIERUNG

Das dreidimensionale ArchiCAD-Modell zeichnet sich durch eine hohe Detailgenauigkeit aus. Zwecks Nachvollziehbarkeit der Modellstruktur zu einem späteren Zeitpunkt von Seiten anderer Nutzer als der ursprüngliche Bearbeiter, werden Konventionen betreffend der Definition von Ebenen- und Geschossstrukturen eingehalten. Die Nutzung von angesammelten Erfahrungswerten und sich daraus ergebenden standardisierten Einstellungen erwies sich als unumgänglich (Martens/Peter, 2002).

Es wird nicht ausschließlich das Gebäude auf seinem Grundstück modelliert, sondern weiterführend auch die angrenzenden Bauten. Im generierten (abstrahierten) Umgebungsmodell wird somit der Kontext nachgestellt.



Abb. 2 Grundstück und Synagoge: Typische Lage im einer geschlossenen Straßenfront (hofseitige Ansicht – Müllnergasse 21 - Wien).

Grundsätzlich betrachtet lässt sich festhalten, dass manche Grundstücke zur Nutzung als Synagogenstandort eher ungeeignet waren und die jüdische Sakralbauten faktisch und gezwungenermaßen in den Hintergrund treten ließen. So sind z.B. „freistehende“ Synagogen im urbanen Umfeld eher selten anzutreffen, während die „Einreihung“ in einer geschlossenen Straßenfront die Regelsituation

darstellt. So unterschied sich der Tempel in vielen Fällen höhenmäßig kaum von den benachbarten Gebäuden. Dies alles hat seine Auswirkung auf die natürliche Belichtung innerhalb der Tempel selbst (Abb. 1). So mancher Architekt optiert aus diesem Grund für eine Basilika-ähnliche Gebäudeform, welche auf Grund ihrer Verjüngung im oberen Bauvolumen den Lichtzutritt unterstützt. Hinzu kommt die Notwendigkeit, eine Synagoge gegen Osten zu orientieren. Im geschlossenen Baublock ist daher nicht jedes Grundstück gleichermaßen geeignet und es musste deshalb gelegentlich in die „Trickkiste“ gegriffen werden.

Die Abbildung der Gebäudegeometrie ist zunächst von wesentlicher Bedeutung, doch ist diese in weiterer Folge mit Informationen zu erweitern. Im Zuge der Texturierung werden die für den Betrachter sichtbaren Oberflächen mit Materialeigenschaften „belegt“. Zu diesem Zweck werden (umfassende) Angaben betreffend der verwendeten Materialien und deren Oberflächen benötigt.

VISUALISIERUNG

Auch wenn die in den jeweiligen Modellierungsprogrammen bereits vorhandenen „Render-engines“ durchaus die Möglichkeit einer passablen Darstellung anbieten (Abb. 3), ist es für anspruchsvollere Visualisierungen – wie z.B. die Tageslichtsimulation – unabdingbar, das Datenmaterial in eine speziell dafür konzipierte Softwareumgebung zu importieren und weiterzubearbeiten. Im Übrigen kann durch diese Auslagerung, das CAD-Programm für andere Zwecke genutzt werden, während im Hintergrund gerendert wird.

Im ggst. Fall ist auf Grund der erfolgten Nutzung von „ArchiCAD“ für die Modellierung die direkte Schnittstelle zu „ArtlantisRender“ insofern zu favorisieren, als das die Datenübernahme problemlos funktioniert und keine Informationsverluste gegeben sind. Hinzu kommt das Faktum des verhältnismäßig unkomplizierten Einstiegs sowie die anschließenden Erfolge (Abb. 4).

Die in weiterer Folge gezeigten Beispiele stellen den Hauptraum der „Kaschgasse 4“ in Wien dar (Architekt Franz Katlein, 1931/32). Es wurde in unterschiedlichen Software-Umgebungen der selbe Standort eingenommen, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten (Abb. 3, 7-9, 11-12).

Grundsätzlich muss dazu festgehalten werden, dass Softwarepakete mit einem vergleichbaren Leistungsangebot (Lightworks-Render, Cinema4D, MaxwellRender, 3D Studio VIZ, etc.) hinsichtlich der Bedienbarkeit einen deutlich höheren Lernaufwand verursachen. Es sind demnach nutzerseitige Anstrengungen vorzuweisen, um die Komplexitätsfrage in den Griff zu bekommen.



Abb. 3 Innenraumdarstellung mittels der internen Render-engine (ArchiCAD).

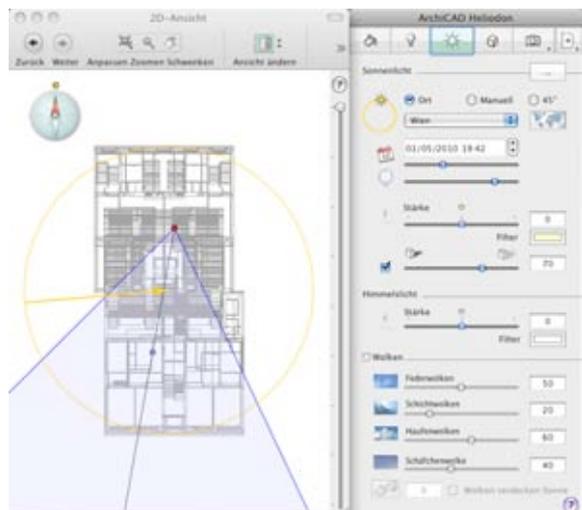


Abb. 4 Artlantis Render: Übersichtliche Arbeitsumgebung.

Wie sehen die konkret zu setzenden Schritte aus und welche Optionen sind für gewöhnlich gegeben? Was gilt es bei der Datenübernahme zu beachten? Zu allererst steht die Übernahme von Geometrie, Sonnenstand und Materialeigenschaften im Vordergrund, wobei die Devise gilt, je mehr übernommen werden kann – desto besser. In weiterer Folge kann die Auseinandersetzung mit den Oberflächen und deren Farbigkeit bzw. Texturierung unter Berücksichtigung von Plastizität und Verhalten unter Lichteinfluss erfolgen. Gerade in der Vermittlung der jeweiligen Materialbeschaffenheit (Materialoptionen) und deren Simulation unter Lichteinfluss liegt letztlich die Qualität einer Visualisierung.

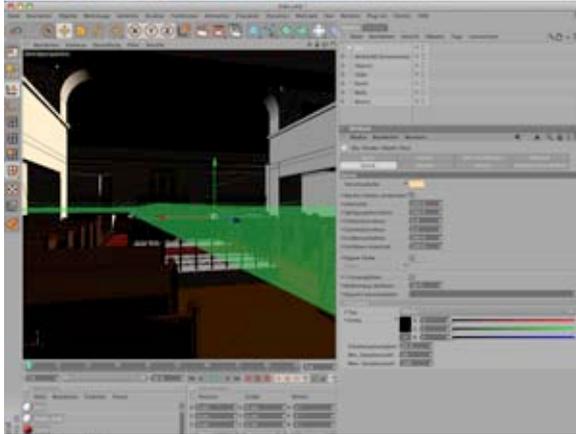


Abb. 5 Cinema4D Interface: Sowohl „global illumination“ als auch voreingestellte Lichtszenen können genutzt werden.



Abb. 6 Maxwell Render Studio: Interface mit vielen Optionen in Bezug auf Licht- und Materialeigenschaften.

Die Erprobung von alternativen Belegungen spielt eine wesentliche Rolle und kann sinnvollerweise via Teilrenderings vorab überprüft werden. Je nach verwendeter Software-Applikation bietet diese im Vorfeld eine Preview-Funktionalität, welche die Bearbeitungsdauer unabhängig vom anschließenden Berechnungszeitraum deutlich reduziert und etwaige Redundanzen aufzeigt. Für die Berechnung selbst sind in weiterer Folge auch die Berechnungsmethoden (*flat-shading*, *ray-tracing* oder *radiosity*) zu berücksichtigen.

Die sich ergebende Berechnungszeit ist in Abhängigkeit von der Anzahl der Lichtstrahlen und ihrem Auftreffen auf einer Materialoberfläche (Reflexionseigenschaften) zu sehen. Speziell bei transparenten Materialien kommt die Anzahl der sog. *refractions* (Lichtbeugung; Reflexion in Glas) zum Tragen. Bei der Berechnung des Lichtmodells ist naturgemäß auch der Sonnenstand, die geografische Lage, wie auch die jeweilige Tages- und Jahreszeit zu berücksichtigen. Eine Grundbeleuchtung im Hintergrund wird über die sog. „global illumination“ erzeugt, welche den berechneten Darstellungen letztlich eine deutliche Steigerung der Realitätsnähe verleiht.



Abb. 7 Cinema 4D: Ergebnis einer Tageslichtsimulation über „global illumination“.



Abb. 8 Maxwell Render 2: Status einer „weichen“ Darstellung.



Abb. 9 Mangelhafter Umgang mit Texturierungen und Materialdarstellungen.

ERGEBNIS

Während im Jahre 2001 noch die Summe der Einzellichtquellen – Sonne (paralleles Licht), Leuchten (kugelförmiges Licht), sowie Spots (zielgerichtetes Licht) das Modell ausleuchten, reicht bei aktuellen Simulationsversuchen lediglich die Sonneneinwirkung in Kombination mit einer globalen Hintergrundbeleuchtung aus, um den Raum im identischen Computermodell wesentlich realistischer auszuleuchten (Abb. 10-14).



*Abb. 10a Innenraumsimulation im Jahr 2001
(Turnergasse 22).*

Die realitätsnahe Wiedergabe von globaler Hintergrundbeleuchtung im Zusammenspiel mit simulierter Sonneneinwirkung erlaubt eine realistische Studie jahreszeitlicher Lichtwechsel und deren Auswirkung auf den Innenraum.



Abb. 10b „State of the Art“ Darstellung anno 2010.



*Abb. 11a Annäherung an eine Raumsimulation über
Materialfestlegungen und Tageslicht (Weißglas).*



*Abb. 11b Erweiterung der Lichtsimulation um die
Verwendung von Farbglass in den Oberlichtern.*



Abb. 12a Lichtsituation: 21. Juni – 12.00 Uhr.



Abb. 12b Lichtsituation: 21. Dezember – 12.00 Uhr.



Abb. 13 Simulation der „Polnischen Schul“ in realitätsnaher Darstellung (maximale Tageslichtanteile).



Abb. 14a Historische Schwarz-Weiß-Abbildung in aufgehelltem Darstellungsmodus.



Abb. 14b Simulierte Schwarz-Weiß-Visualisierung zur vergleichweisen Überprüfung des tatsächlichen Tageslichteinfalls.

SCHLUßFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Im Mittelpunkt der Betrachtung stand einerseits der Umgang mit zu rekonstruierenden Innenräumen von Wiener Synagogen und andererseits die diesbezüglich erzielbare „state-of-the-art“ Darstellung simulierter Tageslichtwirkung.

Es sei darauf hingewiesen, dass in der Konversion von der digitalen zur gedruckten Abbildung deutlich ablesbare Abweichungen gegeben sind. Ein Faktum, welches im Rahmen dieser Conference Proceedings nur dann eine Rolle spielt, wenn diese Seiten an einen Drucker gesendet werden.

Es ist davon auszugehen, dass Softwareentwicklungen in den diversen Visualisierungs-Applikationen unaufhaltsam weitergeführt und deren Funktionalität in Hinblick auf die Berechnungsergebnisse verbessert werden. Die virtuelle Rekonstruktion von Wiener Synagogen wird weitergeführt werden und weitere modellbezogene Iterationen (Stichwort: „Verfeinerung“) werden folgen. Davon ausgehend, dass die Informationsdichte betreffend der Lichtgestaltung sich verbessern wird, ist ebenfalls die Kunstlichtsimulation ins Auge zu fassen.

LITERATUR

- Martens, B., Peter, H. 2002. Developing Systematics Regarding Virtual Reconstruction of Synagogues, *ACADIA 2002 Conference Proceedings*, Pomona (USA), pp. 349-356.
- Martens, B., Peter, H. 2009. *Die zerstörten Synagogen Wiens*, Wien: Mandelbaum Verlag.
- Martens, B., Peter, H. 2010. Displacing the Frontiers of Reconstructed Cultural Heritage – Representation of the Non-existing within an Urban Context. *CAADRIA 2010 Conference Proceedings*, Hong Kong (China), pp. 63-72.

EINE FALLSTUDIE ZUR GENAUIGKEIT RAUMAKUSTISCHER SIMULATIONSERGEBNISSE

Josef Lechleitner, Alexandros Andralis, Ardeshir Mahdavi

Abteilung für Bauphysik und Bauökologie; Technische Universität Wien
A1040 Wien, Karlsplatz 13

ABSTRACT

This paper deals with the accuracy of simulation models in room acoustics. Acoustical measurements were conducted in five existing lecture halls in a university. The measured parameters included reverberation time, sound level distribution, and STI (sound transmission index). Parallel to the measurements, the same parameters were computed using a detailed room acoustics simulation program. Measurements and simulation results were compared toward an objective evaluation of the simulation model's accuracy. Comparison results showed a good agreement between measured and simulated reverberation times and sound pressure levels.

KURZFASSUNG

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Genauigkeit raumakustischer Simulation. Zu diesem Zweck wurden in 5 bestehenden Räumen (Hörsälen) raumakustische Messungen durchgeführt. Dabei wurden Parameter wie Nachhallzeit, Schallpegelverteilung und STI gemessen. Parallel wurden dieselben Parameter mittels eines detaillierten raumakustischen Simulationsprogrammes ermittelt. Durch den Vergleich der gemessenen und berechneten Werte der raumakustischen Indikatoren, war es möglich, die Genauigkeit der Simulationsergebnisse zu beurteilen. Die Gegenübereinstimmung von Messung und Simulation zeigte eine gute Übereinstimmung der gemessenen und simulierten Nachhallzeiten und Schallpegelverteilungen.

EINLEITUNG

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Genauigkeit raumakustischer Simulation. Dabei wird der Frage nachgegangen, inwieweit die Genauigkeit der Eingangsparameter die Brauchbarkeit der Simulationsergebnisse beeinflusst. Zu diesem Zweck wurden in 5 bestehenden Räumen (Hörsälen) raumakustische Messungen durchgeführt. Dabei wurden Parameter wie Nachhallzeit, Schallpegelverteilung und STI gemessen.

METHODE

Zum Vergleich wurden 5 Hörsäle (siehe Abbildungen 1 bis 5, sowie Tabelle 1) aus zwei verschiedenen Gebäuden der Technischen Universität Wien raumakustisch mit einer detaillierten Simulationsapplikation (ODEON 2008) simuliert. Parallel wurden in denselben Hörsälen raumakustische Messungen durchgeführt. Dabei wurden die Messungen und die Simulationen an denselben Mikrofonpositionen durchgeführt. Je nach Größe des Hörsaales wurde an unterschiedlich vielen Mikrofonpositionen, entlang eines Rasters, gemessen und simuliert.

Es ist oft nicht möglich, für bestehende Räume detaillierte Schallabsorptionsgradinformationen zu erhalten. In dem vorliegenden Fall wurden die entsprechenden Annahmen aufgrund der Inspektion der Raumbooberflächen und Gegenstände getroffen. Tabelle 2 fasst die Schallabsorptionsgradannahmen bezüglich der in den 5 Hörsälen vorkommenden Materialien zusammen. Tabelle 3 zeigt die Flächenanteile der Materialien in Prozent der jeweiligen gesamten Raumbooberflächen.

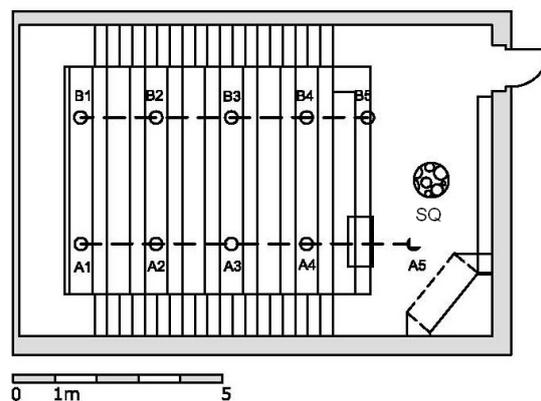


Abbildung 1 Grundriss Hörsaal HS5 mit Mikrofonpositionen und Schallquellenpositon SQ

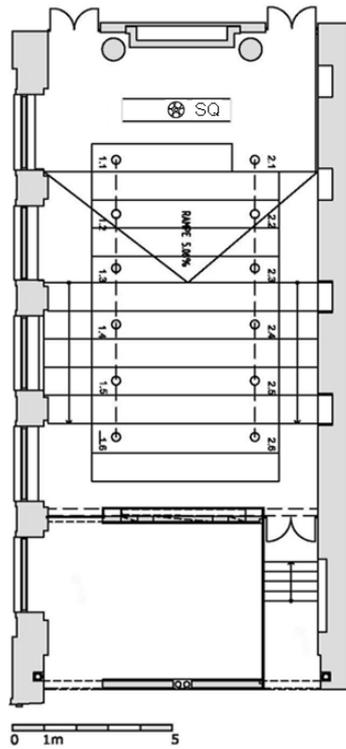


Abbildung 2 Grundriss Hörsaal HS1 mit Mikrofonpositionen und Schallquellenposition SQ

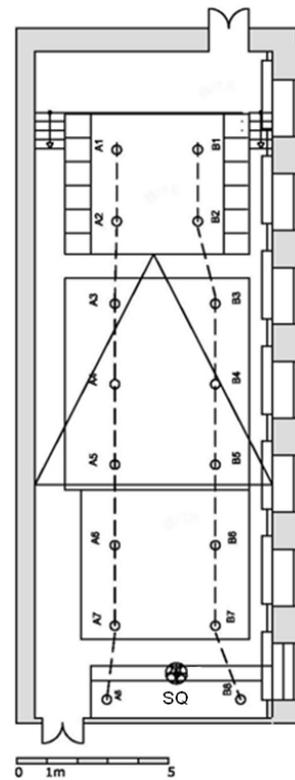


Abbildung 4 Grundriss Hörsaal HS3 mit Mikrofonpositionen und Schallquellenposition SQ

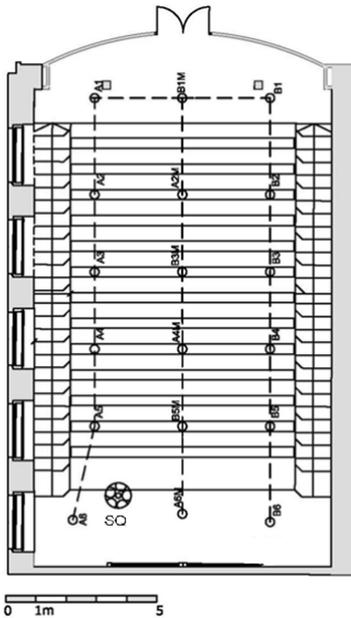


Abbildung 3 Grundriss von Hörsaal HS2 mit Mikrofonpositionen und Schallquellenposition SQ

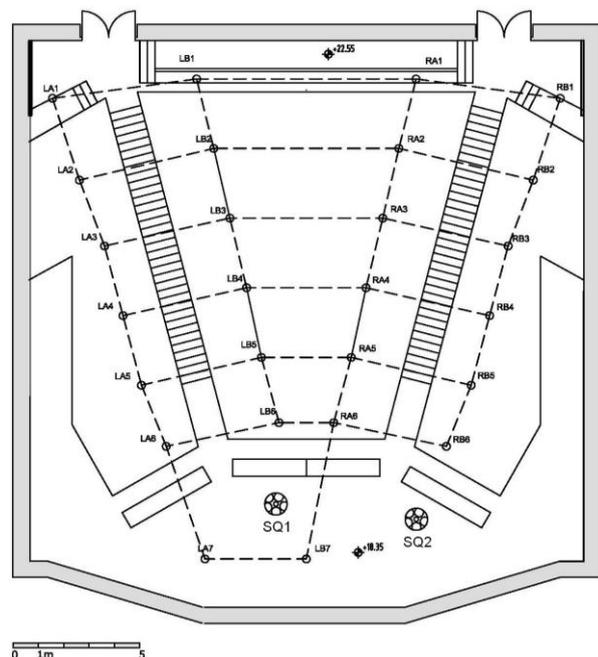


Abbildung 5 Grundriss Hörsaal HS4 mit Mikrofonpositionen und Schallquellenpositionen SQ1 und SQ2

Tabelle 1 allgemeine Daten der Hörsäle

	HS1	HS2	HS3	HS4	HS5
Anzahl der Sitzplätze	143	200	196	412	69
Raumvolumen [m ³]	1013	1230	676	3000	400
Gesamtinnenoberfläche [m ²]	954	985	870	1665	374

Tabelle 2 Schallabsorptionsgrade der vorkommenden Bauteile

Nr.	Bauteil	Oktavbandmittenfrequenz [Hz]							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	Ziegelmauerwerk verputzt	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03
2	Schallwand, Nutplatte	0.2	0.3	0.85	1.0	0.85	0.7	0.65	0.4
3	Gipskartonplatte 100mm Luftabstand	0.3	0.28	0.14	0.09	0.06	0.05	0.01	0.01
4	Metallpaneeldecke	0.23	0.56	0.60	0.60	0.63	0.40	0.35	0.35
5	Ceiling plasterboard	0.20	0.20	0.15	0.10	0.08	0.04	0.02	0.02
6	Akustikdecke Metalllochkassette	0.25	0.55	0.90	0.85	0.85	0.80	0.60	0.30
7	Gipskartonplatte	0.30	0.20	0.10	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05
8	Gipskartonlochplatte	0.39	0.39	0.81	0.68	0.44	0.25	0.20	0.20
9	Zellwollstoff	0.02	0.02	0.03	0.03	0.1	0.15	0.15	0.15
10	Sperrholzplatten	0.18	0.18	0.28	0.12	0.07	0.04	0.04	0.04
11	Türe Holz	0.14	0.14	0.1	0.06	0.08	0.10	0.10	0.10
12	Zweifachverglasung, 30 mm Abstand	0.15	0.15	0.05	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
13	Doppelfenster geschlossen	0.10	0.10	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
14	Fensterglas	0.35	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04	0.04
15	Einfachverglasung	0.08	0.08	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
16	Kastenfenster	0.5	0.25	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
17	Linoleum	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
18	Klappstühle Holz	0.03	0.05	0.09	0.20	0.21	0.20	0.10	0.06

Tabelle 3 Vorkommende Bauteile in den untersuchten Hörsälen in Prozent der gesamten Innenoberfläche

Bauteil Nr.	HS1	HS2	HS3	HS4	HS5
1	48.7	25.9	27.1	7.9	13.3
2				7.1	5.0
3		15.3			
4	12.3		20.1		
5		13.8			
6		10.9			
7				31.0	23.7
8		1.1			
9				7.7	12.5
10				4.5	11.7
11	1.9	1.5	8.0	3.3	1.2
12	2.8	0.6			
13			4.3		
14		4.0		0.3	
15			1.6		
16	4.2				
17	17.9	10.7	23.6	18.2	14.7
18	12.1	16.2	15.3	20.1	18.0

Raumakustische Simulationen

Die Simulationen wurden sowohl für die leeren als auch in die besetzten Hörsäle durchgeführt. Der Ablauf der Simulationen gestaltet sich folgendermaßen:

- 1) Das geometrische Gebäudemodell wurde mit einem CAD-Programm erstellt (Form-Z 2009). Das so konstruierte DXF File wurde in

das akustische Simulationsprogramm importiert.

- 2) Den Oberflächen werden (in Odeon) Materialien zugewiesen. Die Materialdaten bestehen aus Name, Schallabsorptionsgrade (in Oktavbändern zwischen 63 Hz und 8000 Hz) und dem Schallstreuungsgrad.
- 3) Die Schallquelle und die Empfänger (Zuhörerpositionen) wurden an denselben

Positionen eingegeben, wie sie bei der Messung verwendet wurden. Die simulierte Schallquelle erhielt dieselben Schalleistungseinstellungen, wie sie bei der Messung verwendet wurden.

- 4) Die meisten Simulationsparameter wurden automatisch, nach Auswahl einer Genauigkeitsstufe, gesetzt. Nur die „Impulse Response Length“ (Simulationslänge) wurde eingegeben.
- 5) Nach Ausführung von Simulationsläufen wurden die Resultate numerisch und graphisch dargestellt.

Raumakustische Messungen

Die Messungen erfolgten im leeren Zustand. Nur im Hörsaal HS2 wurde sowohl im leeren als auch im besetzten Zustand gemessen. Im Hörsaal HS4 wurden die Messungen mit 2 verschiedenen Schallquellenpositionen (SQ1 und SQ2) durchgeführt. In den anderen Hörsälen wurde eine Schallquellenposition verwendet. Für die Nachhallzeitmessung wurden die Schallpegelabfälle (rosa Rauschen) mit dem "Time data recorder" aufgezeichnet. Die Auswertungen der Nachhallzeiten (in den Oktavbändern zwischen 63 Hz und 8000 Hz) erfolgten nachher. Zur Messung der Schallpegelverteilung wurde von einem Kugellautsprecher ein rosa Rauschen mit einer definierte Schalleistung abgestrahlt. Bei gleichbleibender Schalleistung wurden die Schallspektren (in den Oktavbändern zwischen 63 Hz und 8000 Hz) gemessen. Die Messung und Auswertung der STI-Werte wurde mit einem Sinus-sweep Signal über einen omnidirektionalen Kugellautsprecher durchgeführt.

RESULTATE

Gemessene und simulierte Nachhallzeiten

Die Abbildungen 6 bis 11 zeigen den Vergleich von gemessenen und simulierten Nachhallzeiten der Hörsäle im leeren Zustand (im HS2 wurden die Nachhallzeiten auch bei einem Besetzungsgrad von 75% gemessen). Dabei wurden die Messwerte aller Mikrofonpositionen (Empfänger) eines Hörsaales gemittelt. Im Hörsaal HS4 wurden die Nachhallzeitmessungen für beide Schallquellenpositionen (SQ1 und SQ2) gemittelt. Weiters sind Simulationen von 3 Besetzungszuständen dargestellt.

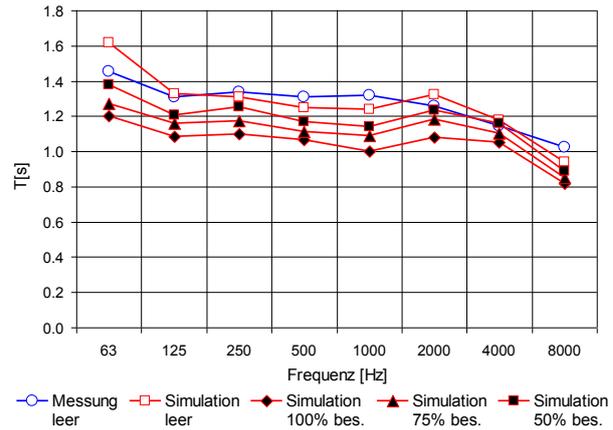


Abbildung 6 HS1, gemessene und simulierte Nachhallzeiten im leeren und besetzten Zustand

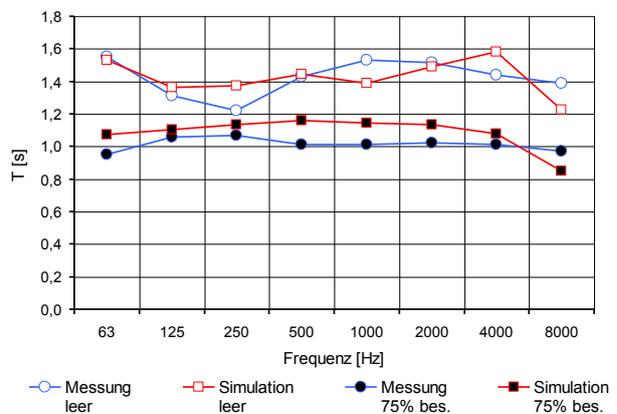


Abbildung 7 HS2, gemessene und simulierte Nachhallzeiten im leeren und bestzten Zustand (75%, entspricht 150 Personen)

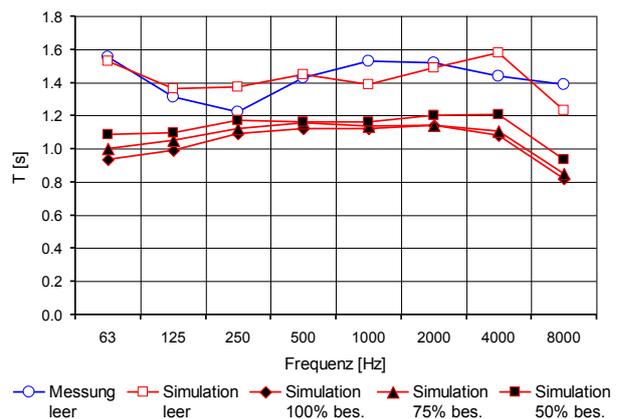


Abbildung 8 HS2, Simulierte Nachhallzeiten für unterschiedliche Besetzungsdichten (zusammen mit Messresultaten für den leeren Zustand)

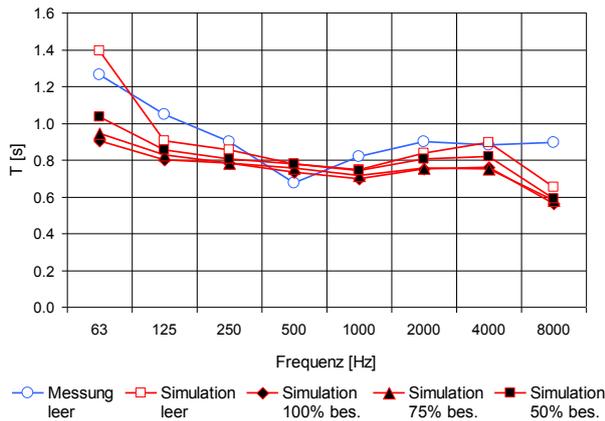


Abbildung 9 HS3, gemessene und simulierte Nachhallzeiten im leeren und besetzten Zustand

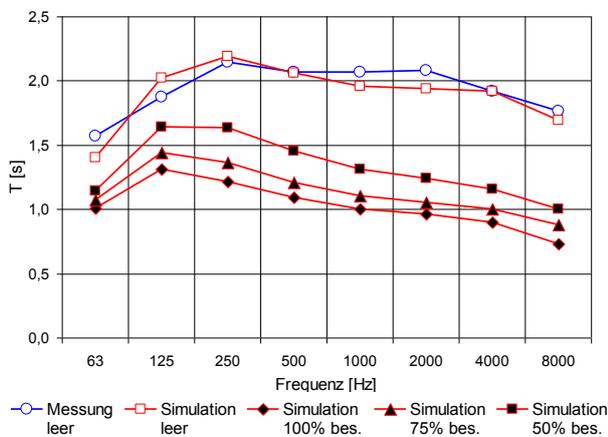


Abbildung 10 HS4, gemessene und simulierte Nachhallzeiten im leeren und besetzten Zustand (SQ1 und SQ2)

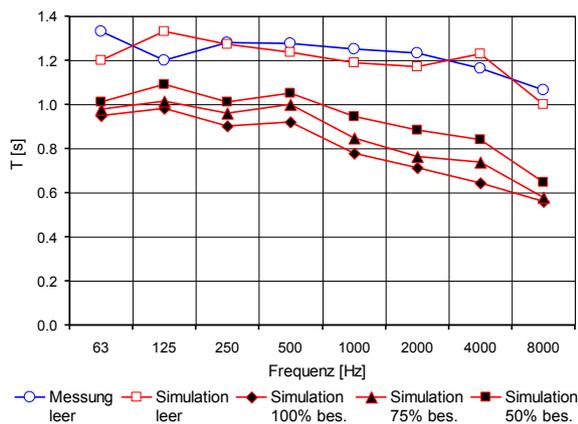


Abbildung 11 HS5, gemessene und simulierte Nachhallzeiten im leeren und besetzten Zustand

Gemessene und simulierte Schallpegelverteilungen

Die Abbildungen 12 bis 17 zeigen den Vergleich von gemessenen und simulierten Schallpegeln in Abhängigkeit von der Distanz zur Schallquelle. Die

Messungen und Simulationen erfolgten für die leeren Hörsäle.

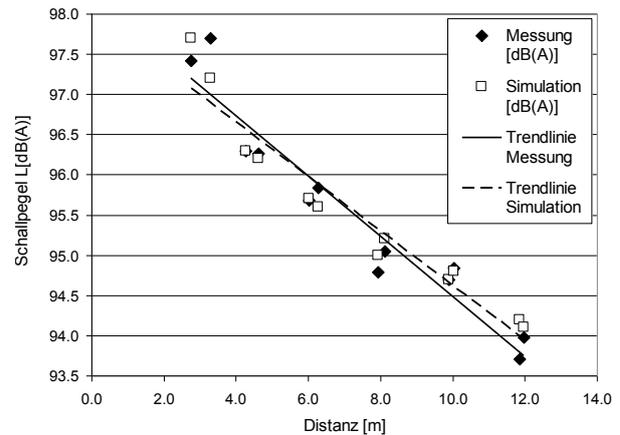


Abbildung 12 HS1, gemessene und simulierte A-bewertete Schallpegelverteilung

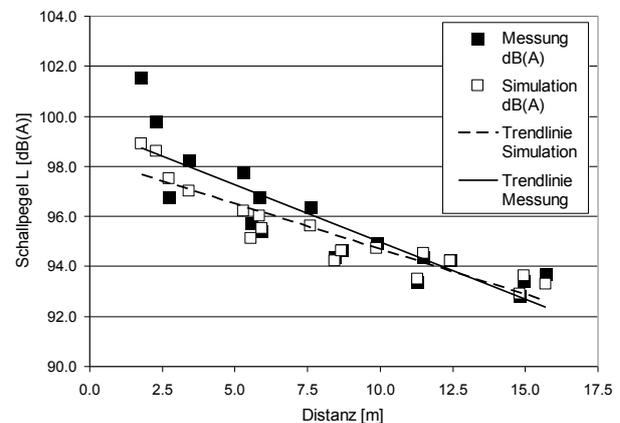


Abbildung 13 HS2, gemessene und simulierte A-bewertete Schallpegelverteilung

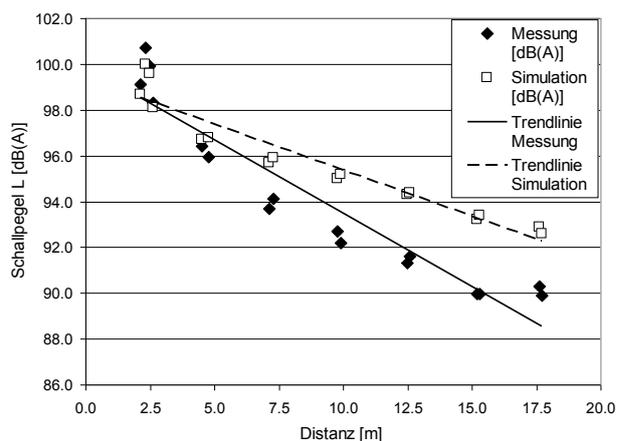


Abbildung 14 HS3, gemessene und simulierte A-bewertete Schallpegelverteilung

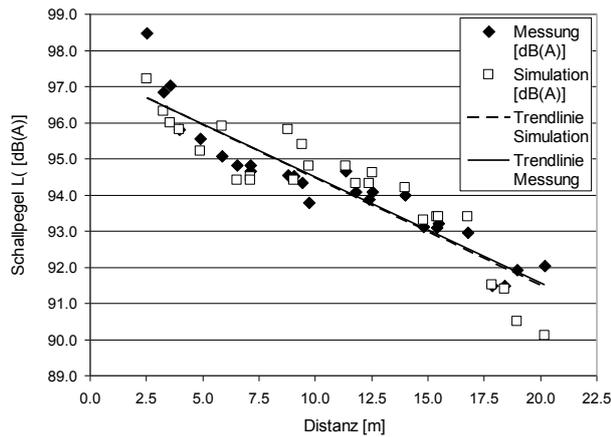


Abbildung 15 HS4, gemessene und simulierte A-bewertete Schallpegelverteilung (SQ1)

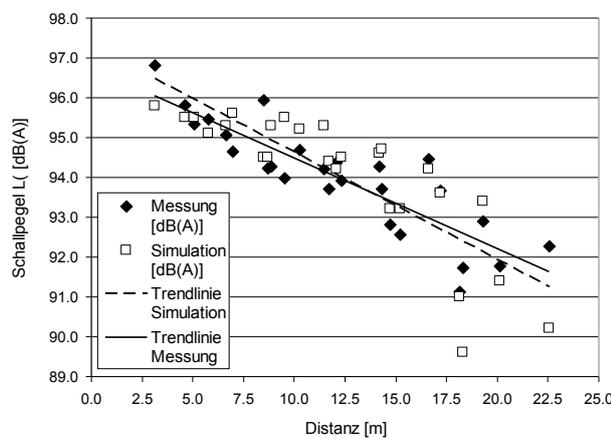


Abbildung 16 HS4, gemessene und simulierte A-bewertete Schallpegelverteilung (SQ2)

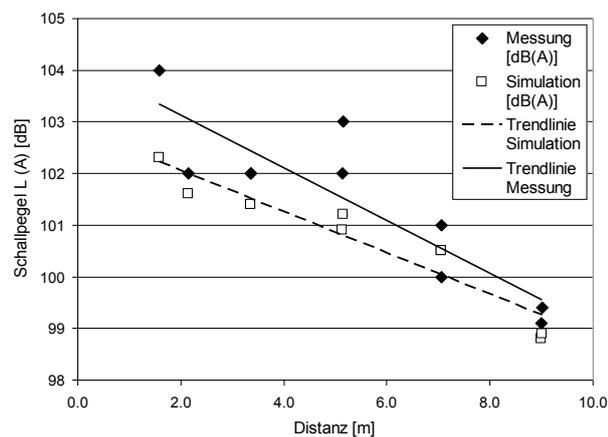


Abbildung 17 HS5, gemessene und simulierte A-bewertete Schallpegelverteilung

Gemessene und simulierte Sprachverständlichkeiten (STI-Werte)

In den Abbildungen 18 bis 23 sind die Sprachverständlichkeiten in Abhängigkeit von der Entfernung von der Schallquelle dargestellt. Die Messungen wurden in den leeren Hörsälen durchgeführt. Die Simulationen erfolgten sowohl im

leeren Zustand als auch in 3 verschiedenen Besetzungszuständen. Die in diesen Abbildungen enthaltenen qualitativen Attribute beruhen auf den Angaben der Tabelle 4.

Tabelle 4 Richtwerte für die Sprachverständlichkeit (Fasold und Veres 2003)

STI	Verständlichkeit
0-0.3	unverständlich
0.3-0.45	schlecht
0.45-0.6	genügend
0.6-0.75	gut
0.75-1.0	ausgezeichnet

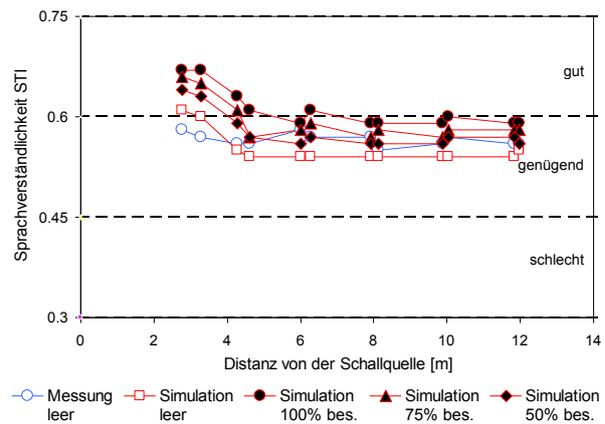


Abbildung 18 HS1, gemessene und simulierte Sprachverständlichkeit

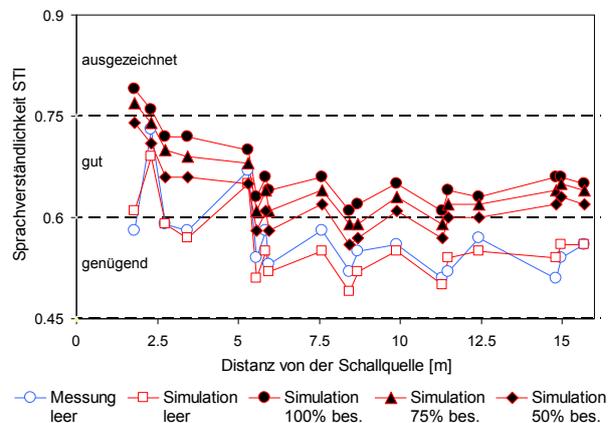


Abbildung 19 HS2, gemessene und simulierte Sprachverständlichkeit

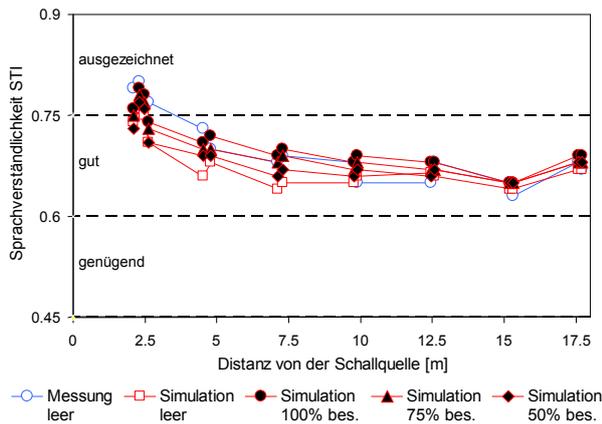


Abbildung 20 HS3, gemessene und simulierte Sprachverständlichkeit

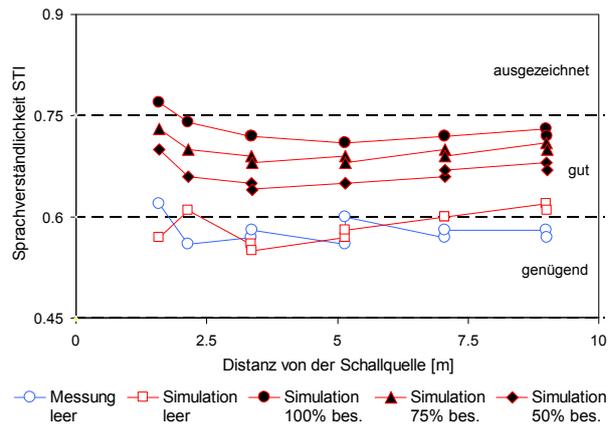


Abbildung 23 HS5, gemessene und simulierte Sprachverständlichkeit

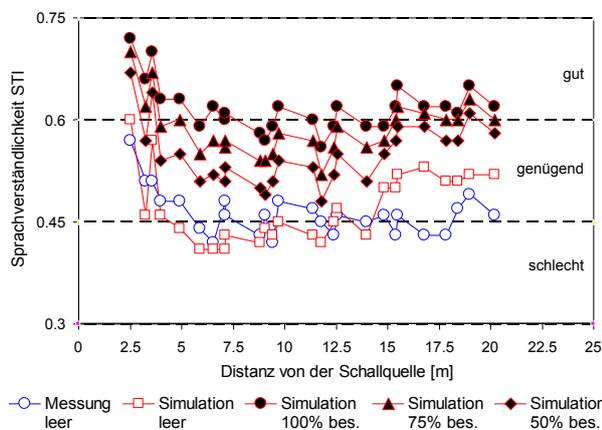


Abbildung 21 HS4, gemessene und simulierte Sprachverständlichkeit mit (SQ1)

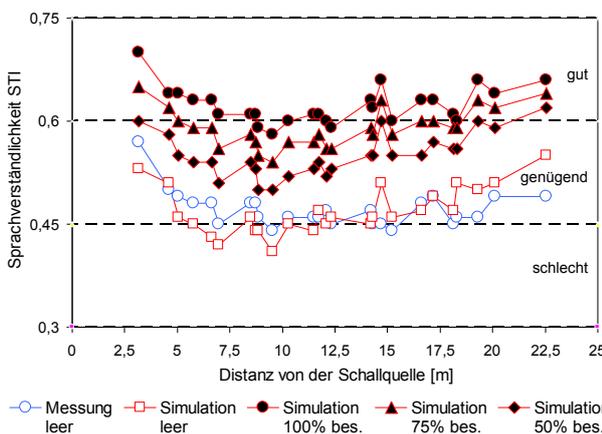


Abbildung 22 HS4, gemessene und simulierte Sprachverständlichkeit (SQ2)

DISKUSSION

Wie das Ergebnis der Gegenübereinstellung von Messung und Simulation (siehe Abbildung 24) deutlich zeigt, gibt es eine gute Übereinstimmung der gemessenen und simulierten Nachhallzeiten der Hörsäle. Die frequenzabhängigen mittleren relativen Fehler der Simulation von allen Hörsälen übersteigen nicht 20%. Tabelle 5 zeigt, dass die größten Abweichungen bei 63Hz, 125Hz und 8000Hz sind.

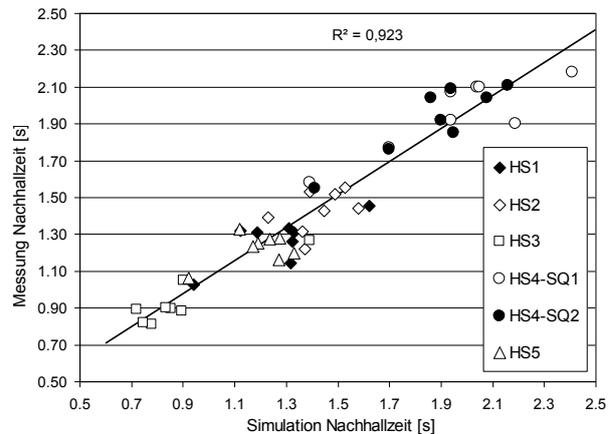


Abbildung 24 gemessene versus simulierte Nachhallzeiten aller Mikrofonpositionen in allen 5 Hörsälen

Tabelle 5 relativer Fehler (in %) der simulierten Nachhallzeiten im Vergleich zu den Messungen

Hörsaal	Oktavbandmittenfrequenz [Hz]							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
HS1	11.0	1.5	-2.2	-9.2	-15.0	4.8	15.4	-8.7
HS2	-1.5	3.6	12.3	1.3	-9.2	-2.0	9.7	-11.5
HS3	10.3	-18.2	-9.0	-4.9	-10.2	12.2	-9.1	-19.1
HS4	-11.7	7.4	2.0	-0.5	-5.7	-7.4	0.03	-4.1
HS5	-15.0	10.8	-0.5	-3.1	-4.8	-4.9	9.4	-13.6

Der Vergleich zwischen gemessener und simulierter Schallpegelverteilung zeigt ebenfalls eine gute Übereinstimmung (siehe Abbildung 26). Die größte Abweichung zwischen simulierter und gemessener A-bewerteter Schallpegelverteilung von allen Hörsälen und allen Mikrofonpositionen liegt zwischen 1 bis 3dB. Beim Hörsaal HS3 wurden die Reflexionen überschätzt und die Absorptionen unterschätzt. Anders sieht es im Hörsaal HS5 aus. Da wurden die Absorptionen überschätzt und die Reflexionen unterschätzt. Die Fehler der Simulationen sind wahrscheinlich auf Ungenauigkeiten in der Abschätzung der Materialeigenschaften zurückzuführen.

Betrachtet man die gemessenen und simulierten Sprachverständlichkeitswerte aller Räume (siehe Abbildung 25), so findet man ebenfalls eine gute Übereinstimmung.

Die Resultate legen generell den Schluss nahe, dass raumakustische Simulation mit detaillierten Modellen relativ gute Annäherungen an die Messwerte erlaubt. Sollten allerdings (im Falle der bestehenden Räume), keine genauen Informationen zu den raumakustischen Eigenschaften der Raumbooberflächen und Gegenständen vorliegen, wäre es unbedingt notwendig, die Simulationsmodelle zunächst mit Hilfe von gemessenen Werten zu kalibrieren.

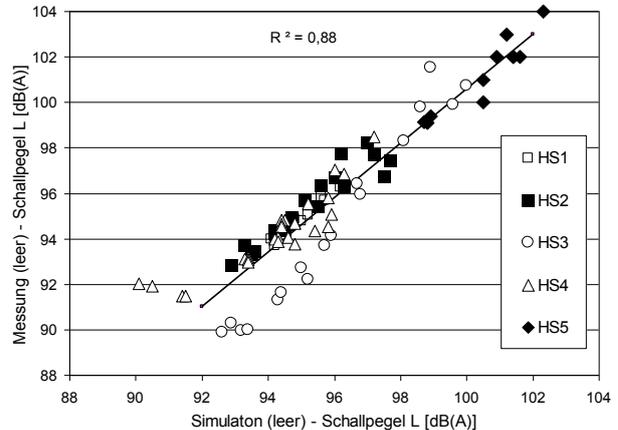


Abbildung 26 Messung versus Simulation der Schallpegelverteilung aller 5 Hörsäle

LITERATUR

- Fasold, W. und Veres, E. 2003. Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen. 2. Auflage. Huss-Medien GmbH Berlin.
- FORM-Z, 2009. Form-Z v4.0.1, (<http://form Z.com>).
- ODEON, 2008. Odeon v.9.10, A/S Dänemark. (<http://www.odeon.dk>).

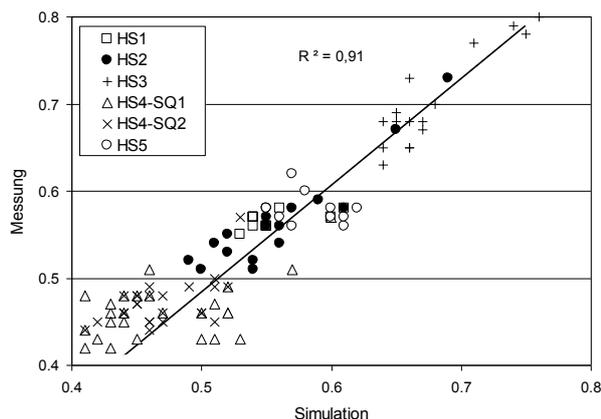


Abbildung 25 gemessene versus simulierte Sprachverständlichkeit aller 5 Hörsäle

AN INVESTIGATION INTO THE ACHIEVABLE ENERGY SAVINGS PROVIDED BY LOW ENERGY LIGHTING SYSTEMS

Alexander K. Price¹, Christina J. Hopfe¹, and Robert S. McLeod²

¹ Cardiff University, School of Engineering, Cardiff, Wales UK,

² Building Research Establishment Wales, Port Talbot, UK

ABSTRACT

The energy consumption of buildings accounts for a significant amount of the total energy consumed by society. In the UK, domestic operational emissions currently accounts for over a quarter of the UK's total CO₂ emissions (ONS, 2008). Despite increasingly tougher legislation for building fabric performance unregulated appliance and lighting emissions have continued to rise in the UK (Boardman et al, 2005). Low energy lighting systems have the potential to provide significant energy savings in the building sector, yet realistic values for these energy savings are rarely defined.

This paper investigates the current low energy lighting systems within use in the industry with special attention to control systems and also the occupant evaluation of light frequency and temperature spectrums in low energy systems. A review of recent academic research and studies that have used both simulation and real models was undertaken in order to quantify typical energy savings relevant to the system type. Visual comfort factors in terms of levels of light frequency and the temperature spectrums were then assessed and determined relative to the corresponding low energy lighting system and the findings of the systems compared.

INTRODUCTION

Research undertaken by the Building Research Establishment (BRE) has shown that within the energy consumed by buildings, that which is required for electrical lighting and appliances accounts for 13% of the energy consumption of an average UK dwelling (Ni Riain et al., 2000). Previous research upon current low energy lighting systems has shown that considerable energy savings are possible when the correct system is matched to the required application and building environment (e.g. Li and Lam, 2003), however values of energy savings were found to vary significantly between studies.

Many forms of low energy lighting systems are available within the marketplace. However for any given application where a lighting system is required the choice of suitable system will be limited to only a few choices due to variable factors such as building occupancy, building orientation and available

daylight illuminance for potential integration within the system. Furthermore the level of visual comfort provided to the occupants is paramount. Inferior visual comfort provided by an inappropriate lighting system may have many detrimental effects. The safety and productivity of the building occupants as well as the future widespread adoption of low energy lighting systems are all dependent upon the correct implementation and optimization of the current systems and hence the positive experiences of occupants combined with the energy savings provided.

The body of previous research into the area particularly when coupled with visual comfort considerations is limited and considerable inconsistencies exist within the calculated energy savings of each study. Evidently differing variables between these studies will result in different energy saving values being calculated however the magnitude of the differences is generally larger than would be expected. The rate of adoption of low energy lighting control systems by design teams is low and this can be attributed primarily to uncertainty in the achievable energy savings such systems provide. It is for this reason that this paper attempts to investigate the achievable energy savings of low energy lighting systems and the reasons for the inconsistencies in previous research. The method for such a study is concerned with a literature review of the applicable body of previous research, with the outcome of the paper considering the two building performance aspects of visual comfort and energy consumption due to lighting.

LIGHTING CONTROL SYSTEM VARIANTS

Lighting control systems come in many various forms and when utilised correctly have the potential to offer significant energy savings. However the success of an applied lighting control system is determined not only by the quantity of energy saved, but also the occupant's evaluation of the level of visual comfort provided by the system. Therefore a completely automatic system is not always the most suitable option, as control over ones own environment is considered an important psychological factor in the feeling of comfort. The following section describes

some typical forms of lighting control systems that are available and commonly used with the possible advantages and disadvantages of each in terms of user control and potential energy savings being considered.

Movement detection switching (MDS)

Through the use of infra red movement sensors lights are switched on or off dependent upon occupant movement. With such a system it is possible for the length of the time delay between switching off when no movement is detected to be adjusted. This adjustment is the only real level of control afforded to the occupants; even this is likely to be only accessible to certain individuals. In theory, this basic control system is capable of providing considerable energy savings; however, it would not be suitable for all environments. An example of an unsuitable environment would include areas where little movement of the present occupants takes place. The result of use in such an environment would be the annoyance of the lights being periodically turned off automatically. The likely result in such a situation would be the increasing of the time delay between on/off cycles or, potentially the complete bypassing of the system in favour of manual on/off controls. Both such measures would obviously greatly affect the energy savings achieved.

Movement detection dimming (MDD)

This type of system works on entirely the same principle as a MDS system, however as opposed to simply switching off when no movement is detected, the lamps will dim to a set percentage of the maximum flux capacity. Due to the dimming as opposed to simple on/off operation the energy saving potential is not as great as MDS systems, with the exact savings being highly dependent upon the chosen flux for dimmed operation.

Integrated daylight dimming systems (IDDS)

Such systems work on the principal of utilising the available daylight and only providing the “extra” required electrical lighting in order to obtain a set level of illuminance. In theory this principle results in zero wasted light due to the fact that only the required amount of electrical lighting is used, and therefore the potential energy savings are maximised. The system works through the use of photometric sensors that measure the “reflected illuminance of the plane located under them” (Roisin et al 2008). Direct occupant control in such a system is limited to adjusting the values of illuminance that the system is set to deliver, again this is likely to only be possible for occupants with access to the system controls. A secondary method of control is the possibility of occupants blocking daylight through the use of internal window blinds. This would result in an increase in the lamp light flux due to a decrease in the

provided daylight illuminance. Such a measure is an unlikely occurrence due to the fact that research has shown an overwhelming preference for natural daylight when compared to electrical lighting” (Boyce, 2003). One such situation where the use of blinds is likely however is in the case of high levels of glare being caused by direct sunlight. The frequency of which such levels of glare would occur would be dependent upon the time of day, time of year, geographical location and the building orientation. Another factor that requires consideration in order for successful implementation is the likely reflection factor of the surfaces below the sensors. As these sensors measure the reflected illuminance, any surface with an extreme reflection factor is likely to result in distortion between the actual illuminance and the sensor reading. The outcome of such a situation would be either too great or too little lamp flux being provided. Hence the potential for both energy savings and occupant satisfaction would be significantly altered. When designing and implementing a low energy lighting control system that utilises motion or photometric sensors two further factors are of importance. These factors are the quantity and distribution of the sensors. Too few or poorly located sensors will likely result in inaccurate photometric measurements or “blind spots” in the case of motion sensors. Both would cause suboptimal levels of provided electrical lighting resulting in the dissatisfaction of building occupants. Conversely too many sensors will mean a decrease in the energy savings achieved. This is due to the fact that such sensors require power via a ballast or driver. Increasing the amount of sensors therefore increases the energy consumption.

DAYLIGHT DELIVERY SYSTEMS

One method of producing low energy lighting is to integrate the available natural daylight into the control system. Where as if purely daylight was used, the system would use zero energy, this is impractical in nearly all cases as the depth of most buildings would be too great for sufficient light penetration. The use of natural daylight is not purely advantages from an energy perspective. It is widely accepted that building occupants have a preference for natural daylight when compared with electrical lighting. The reason for such a preference has been the subject of significant studies (Galasiu and Veitch, 2006). These studies have considered daylight in the aspects of physics and psychology and how these aspects may differ from that of electrical lighting. As with electrical lighting “daylight is simply electromagnetic radiation in the wavelength range that is absorbed by the human eye” (Boyce, 2003). Where daylight differs from the overwhelming majority of electrical lighting systems is in the range of frequencies present in the light, and the fact that the spectral range will

differ dependent upon environmental conditions and the time of both the day and the year. This is interesting from the point of view that in theory lighting control systems could be created which incorporate a shifting spectral range. This would in effect mimic this aspect of daylight. It is the author's opinion that any attempt to mimic the shifting spectral range of daylight, would either involve a large amount of effort which may not be justified in terms of improved occupant perception of electrical lighting, or would prove inferior due to the complex and random nature of daylight. Furthermore the energy implications could not be fully understood until such a system was created and analysed -either through field testing or the use of building performance simulation (BPS). A further factor that contributes to the preference of daylight is the psychological effect of windows. Windows provide a view out and psychologically enhance and expand a space. This has been shown to be valued highly by building occupants (Galasiu and Veitch 2006). The use of day lighting within a building requires careful planning by design teams, as many variables have the potential to cause discomfort to the occupants. Controlling of daylight will rely heavily upon typical values of available daylight; this factor will generally be linked to the geographical location more specifically the latitudinal location of the building. The aim when designing a daylight delivery system is to "harvest" as much of the available daylight as possible and to distribute it as evenly as possible within the space. On the other hand it is essential that glare and solar heat gains are controlled. Glare will cause visual discomfort and make it difficult for building occupants to effectively perform tasks. High solar thermal gains will not only be likely to cause thermal discomfort, but will also result in an increase of required cooling load during high temperature periods. This will subsequently increase the buildings energy consumption. It is the changing nature of each individual design scenario that means that each solution will be different and specific to each particular case. As such a number of products/solutions exist in the market place to perform the functions of collecting and distributing daylight as well as reducing glare and direct solar heat gains. When considering the distribution and quantity of daylight that a daylight delivery system will provide, the actual quantity will be heavily dependent upon the orientation, size and number of windows or window/wall ratio. The larger the window/wall ratio, the larger is the quantity of daylight that will be distributed within the building. The form of the windows and the depth of the room will effect the penetration and distribution within the space. Ideally rooms will have windows on more than one face; however this is not always possible due to the differing layout and size of buildings and the rooms within. Several techniques exist in order to

maximise the potential light distribution in terms of both the distance from the source (window) and the even spread of the light. These include the position and form of the window in relation to the walls, for instance windows shallow in depth but large in width placed high up on the walls relative to the ground level of the room, will allow the light to reach a greater depth within the room. Such a window would sacrifice a quality view out that is so often desired by the occupants.

The use of light shelves provides one possible solution to the problem of distributing light. Light shelves work by reflecting the daylight upwards onto the ceiling of a room through the use of mirrors. Similarly anidolic concentrator's work on the same principle, reflecting light through the use of a parabolic mirror which concentrates the light and maximises the amount of light collected due to the reflective properties of a parabolic curve. The reflection factor of ceiling and wall coatings, as well as objects such as furniture within a room, can also greatly effect the light distribution -with higher reflective factors generally resulting in a greater distribution of the provided light. In summary, the designing of a suitable daylight delivery system requires the maximising of distributed daylight and the minimising of glare and solar heat gains. These two objectives are seemingly conflicting and as such, careful planning is required in order for a successful trade off between energy savings and visual comfort to be achieved.

SUMMARY LITERATURE REVIEW

A field study undertaken with the purpose of determining energy savings using an automatically controlled system, whilst also obtaining visual comfort in office lighting was performed (Onaygil and Guler 2003). The particular system used was an integrated daylight delivery system with continuous dimming. The room used was a fourth floor office in Istanbul, an area of high solar radiance. A potential flaw with the study was that the three windows each had a roller blind; however the central window was monitored for daylight illuminance by a horizontal photometric sensor. This in effect meant that the roller blind for the central window had to be constantly raised in order for the sensor to perform accurately; this would potentially be a source of glare that would reduce levels of visual comfort. (Atif and Galasiu 2003) performed a field test using an IDDS dimming and IDDS on/off in two separate atrium spaces in Canada. The aim of the test was to calculate energy saving values and to see if the systems were capable of performing in a real world retrofitted application, as opposed to either being designed at the same time as the building itself or ideal condition simulations. This study is unique when compared to the other studies researched during this project. This is due to the scale of the test area and the complex

lighting in terms of lamp types and control. The on/off system consisted of 16, 150W incandescent lamps per floor over a three floor atrium, a total of 48. 8 of these lamps on each floor were continually on to provide adequate emergency lighting.

Additionally 8, 500W incandescent lamps were continually on, on the second floor and 10, 75W incandescent task lighting lamps were also continually on. This fact makes this test perhaps a more accurate assessment of potential energy savings using daylight control systems in existing buildings. Furthermore no attempt to enhance or alter reflective factors of walls, floors or ceilings was made; this enhances the validity of the testing conditions as a retrofit scenario. (Roisin et al 2008) conducted a comprehensive study of potential energy savings using the simulation program DAYSIM to simulate daylight conditions. Occupancy levels were also included within the study. Three low energy systems were assessed, IDDS, MDD and MDS plus the combinations of IDDS/MDD and IDDS/MDS. Each system combination was assessed in the four orientations of North, South, West and East and at three locations Brussels, Athens and Stockholm. These locations were chosen for their varying average levels of daylight illuminance and were intended to represent high, medium and low levels. Simulation of a full year was performed for each location, system and orientation. During the simulation the issue of occupant control was neglected, as was the likely occurrence of glare during operating hours which would alter both energy savings and visual comfort. It is important to be aware that the reference case against which energy savings were calculated assumes that lights are continually on in the case of occupancy, and lights off in the case of occupant absence. This would be unlikely to be the case in a real scenario and would have effected the calculated values of energy consumption and hence energy savings. Even with potential discrepancies taken into account, the annual energy savings are significant, ranging between a minimum of 45% to a maximum of 63% for IDDS based operations. The effects of occupant behaviour on energy savings of lighting control systems have been considered in a limited number of studies. (Bourgeois et al 2006) conducted such a study considering the advanced occupant behavioural modelling within energy simulation programs and how improved behavioural modelling affected the energy savings for both manual and automatic lighting control systems. Most research assumes a reference case where lights are on during occupancy or off during occupant absence. Such simplified reference cases inevitably result in inflated values of energy savings when the reference is compared to an automatic system. The study also included the effect on cooling and heating loads due to occupancy levels and solar heat gains. A sub hourly occupancy based control model (SHOCC)

which was coupled with lightswitch 2002 algorithms for lighting simulation and with ESP'r for whole energy simulation (cooling and heating loads). It is beyond the scope of this project to analyse the SHOCC, however it was shown to provide a more accurate behavioural model than when compared to diversity factors that are more generally used to predict and model occupant behaviour.

Visual comfort

Throughout this paper, comfort is continually considered when investigating previous research, analysing energy saving potential and considering the types of low energy lighting control systems. Quantifying visual comfort for each individual study has not proved to be possible due to a lack of relevant data. Visual comfort is subjective and as such is difficult to measure as different occupants will have differing perceptions of their environment. When design teams consider all aspects of occupant comfort, the aim is to please most of the occupants most of the time, to please all occupants would be an impossible task. This section looks at the factors of visual comfort considered by design teams. The approach adopted by most design teams is to consider visual comfort to simply mean an absence of visual discomfort (Boyce 2003). Glare, uniformity and illuminance are the main aspects considered when attempting to eliminate visual discomfort during the design of a lighting system. Illuminance is defined as the total luminance per unit area. The unit of illuminance is lumens/m² more commonly referred to as lux. When considering illuminance the tasks which are likely to be performed within the room have a considerable impact upon the recommended levels of illuminance, for instance BSRIA rule of thumb guide recommends illuminance levels of 300-500 lux for general offices and 50-100 lux for hotel bedrooms (Pennycook 2003). This difference is considerable but both are justified due to the tasks performed in the relevant rooms. It is such guidelines that design teams will adhere to in order to eliminate the possibility of visual discomfort within a room. Uniformity of light can cause visual discomfort if the light is either too uniform or not uniform enough. Uniformity is required in order for tasks areas to be well lit and to prevent stark differences in illuminance levels, which would cause high levels of distraction to building occupants particularly in peripheral vision. When design teams consider uniformity of illuminance, manufacturer's guidelines are usually followed during design. This is due to the fact that different luminaires will distribute the available luminance differently dependent upon the type of luminaire, and the particular lighting application for which it is required. Glare can be described as an extreme case of non-uniformity (Boyce 2003), or in other words a specific area of high illuminance, this is

liable to cause significant discomfort for building occupants. The potential for glare to occur from electrical lighting is generally considered to be eliminated by the use of a luminaire suitable for the application. A suitable luminaire will distribute the available luminance in a manner that will prevent glare from occurring. Where glare poses a real possibility is from direct sunlight entering a space through windows. Methods adopted by design teams to combat such scenarios include daylight shading systems, the use of glazing with high reflectance, and the inclusion of window blinds. Even when these methods are used the changing nature of the available daylight will mean that the occasional occurrence of glare cannot be completely dismissed. A further factor when considering comfort is the level of control afforded to occupants. This can be in the form of manual lighting control, manual blind control or the ability to adjust illuminance set points within automatic systems.

Analysis of energy savings

It was the original aim of this paper to study a wide range of different low energy lighting systems, however having investigated the area it is clear that the majority of academic research is concerned with day lighting systems. This is understandable when the achievable energy savings of day lighting systems are compared to those systems which do not utilise or integrate daylight. Table 1 shows all the control systems cases investigated during the project in terms of commonly occurring variables and energy savings as well as visual comfort considerations. As can be seen the majority of the systems are IDDS variants, the calculated or measured energy savings vary significantly. From the simulated studies using BPS the energy savings vary from 8.7% (cases 12, 17 and 22) for an MDD system to 90% (case 9) for IDDS with dimming and MDD system. This may be considered an unfair comparison due to the differences of two different system types, however comparison between only the IDDS based systems under simulation shows a minimum annual energy saving value of 50% (case 11), compared to a maximum annual energy saving of 90% (case 9). This 40% difference shows that considerable inconsistencies are present between simulated studies. Even when all the different variables are considered, such a vast difference seems an inflated figure to that which may realistically be expected. From the field studies which consist of entirely IDDS systems, considerable variations in energy savings are still found. The minimum values being 11 -17% (case 8) for an IDDS on/off system compared to a maximum of 69% (case 2) for an IDDS with dimming system. Case 4 shows greater energy saving potential (80%) but this value is for only 80% of the year and due to the lack of available data any estimates concerning annual savings would be likely to be of little

academic worth and have therefore been neglected from consideration. When comparing like for like systems and their calculated energy savings, field studies tend to show similar inconsistency when compared to simulation studies. Minimum energy savings for IDDS with dimming were found to be 20-23% (case 5) with maximum energy savings of 69% (case 2).

DISCUSSION

Although energy saving values between the studies vary significantly the order of the mean values compared to the system type are as would be expected. IDDS with dimming / MDS showed the highest mean energy savings with a value of 67%, where as IDDS dimming / MDD shows a mean energy saving of 54%, and IDDS dimming 48.7%. IDDS on/off is only included in one of the studies considered with a value of 14%, although it would be expected that such a system would provide less energy savings than an IDDS dimming based system the magnitude of the difference is larger than may be expected. This is likely due to the fact that the study from which the value was obtained used incandescent lamps with over half of which being continually switched on to provide emergency lighting. This obviously had a considerable effect upon the energy saving potential of the system. Latitude can be considered a good approximate indication of the available levels of daylight illuminance and as such it would be expected that a distinct correlation between latitude and annual energy savings would exist- with the lower the latitude the higher the energy savings. This proved not to be the case, the reason for which can be attributed to a combination of inconsistency and the inclusion of differing variables between studies. Annual savings dependent upon glazing orientation are of interest in order to establish which orientation is likely to produce the highest energy savings. It was expected that south orientated glazing would produce high energy savings and this is confirmed with a mean value of 56.25%. It is important however to be aware that of the 12 south orientated cases considered 10 were produced during the same study and therefore the consistency of values is improved. A lack of significant quantities of data for all other orientations makes the possibility of comparison limited, as potential anomalies would have a magnified effect upon the comparison due to the limited quantity of data

Quantitative analysis of the qualitative visual comfort aspects of the studies considered is difficult, due to the fact that few of the papers have explicitly considered visual comfort outside of reasonable levels of illuminance and uniformity. With insignificant amounts of quantitative data any analysis of such would be highly speculative

CONCLUSION AND FUTURE WORK

This project has considered the energy savings potential of the common low energy lighting control systems. The majority of the systems considered were IDDS of various forms. Energy savings were found to vary considerably between studies. This can be attributed to the large quantity of differing variables and constraints within each study. Furthermore only one of the cases considered incorporated the energy implications associated with differing heating / cooling loads caused by solar heat gains through the use of daylight integrated lighting. The study in question (Bourgeois et al 2006) showed that in reality the savings potential of day lighting systems is generally less than considered by other studies when cooling / heating load is taken into account, although the available savings are still sufficient to justify the use of day lighting systems. The need for further research is evident as the number of available studies considering energy savings are limited at the present time. This is likely to be due to the level of maturity of the area in question and the long duration of each study, often in excess of a year. If / when a larger body of research is undertaken more meaningful comparisons of energy savings will be possible. In order for accurate comparisons of research future studies would ideally include common and controlled variables and consider the energy implications of annual heating / cooling loads. Such an approach to future research would allow for the different variables to be weighted according to the magnitude by which they affect the final energy savings. This would be with the resulting aim being the ability for design teams to make informed choices during design. This coupled with further development in the simplified method of predicting energy savings in day lighting systems (Ihm et al 2009) would increase the attractiveness of day lighting systems. In turn this would mean improved adoption rates by design teams resulting in energy savings worldwide. Furthermore the continual development of low energy lamps and solid state lighting is liable to further increase energy savings as the technologies are improved and developed in order to be suitable for more traditional lighting application.

REFERENCES

Office of National Statistics. Environmental Accounts: GHG Emissions 2008 [available] www.statistics.gov.uk/statbase/Expodata/Spreadsheets/D5695.xls [accessed May 2010]

Boardman et al. 40% House. Environmental Change Institute University of Oxford. 2005, p11

Ni Riain, C., Fisher, J., MacKenzie F., Littler, J., 2000. BRE's Environmental Building: Energy Performance in Use, CIBSE conference paper.

Roisin, B., Bodart, M., Deneyer, A., D'Herdt, P. 2008. Lighting energy savings in offices using different control systems and their real consumption. *Energy and Buildings* 40(2008), pp. 514-523.

Boyce, P. 2003. *Human factors in lighting*. 2nd ed. London: Taylor & Francis.

Galasiu, A. and Veitch, J. 2006. Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylight offices: a literature review. *Energy and Buildings* 38(2006), pp. 728-742.

Onaygil, S. and Guler, O. 2003. Determination of the energy savings by daylight responsive lighting control systems with an example from Istanbul. *Building and Environment* 38(2003), pp. 973-977.

Atif, M. and Galasiu, A. 2003. Energy performance of daylight-linked automatic lighting control systems in large atrium spaces: report on two field-monitored case studies. *Energy and Buildings* 35(2003), pp. 441-461.

Bourgeois, D., Reinhart, C. and Macdonald, I. 2006. Adding advanced behavioural models in whole building energy simulation: A study on the total energy impact of manual and automated lighting control. *Energy and Buildings* 38(2006), pp. 814-823.

Pennycook, K. 2003. *A BSRIA Guide, Rules of thumb guidelines for building services*. 4th ed. Chameleon press.

Li, D. and Lam, J. 2003. An analysis of lighting energy savings and switching frequency for a daylight corridor under various indoor design illuminance levels. *Applied Energy* 76(2003), pp. 363-373.

Knight, I. 1998. Measured energy savings due to photocell control of individual luminaires. *Renewable Energy* 15(1998), pp. 441-444.

Lee, S. and Selkowitz, S. 2006. The New York Times Headquarters daylighting mockup: Monitored performance of the daylighting control system. *Energy and Buildings* 38(2006), pp. 914-929.

Ihm, P., Nemri, A. and Krarti, M. 2009. Estimation of lighting energy savings from daylighting. *Building and Environment* 44(2009), pp. 509-514.

Table 1
 Energy savings and variables for all cases considered

Page	Date	Author(s)	Case	System type	Mean annual energy savings	Location	Latitude	Longitude	Simulation or Field test	Total Window Area m ²	Window transmittance	Window orientation	Floor area m ²	Perimeter area	Lamp Type	Illuminance (at point)	Control considerations	Sensitive
Determination of the energy savings by daylight responsive lighting control systems with an example from Istanbul	2005	Onyigit S. & Guler D.	1	IBDS with dimming (3-100%)	33.35%	Istanbul	41°58' N	29°16' E	Field	4103	0.57	North-East	71	71	Fluorescent 55W 6 Luminaires 7 Lamps per Luminaires	500 Lux	Manual waste control High Uniformity Manual dimming	10
An analysis of lighting energy savings and switching frequency for a daylit corridor under various indoor illuminance levels	2002	U. D. & Lem J.	2	IDDS with dimming (1-100%)	65%	Hong Kong	22°20' N	114°11' E	Field	48.5	0.23	North-West	52.2	52.2	Fluorescent 36W 12 Luminaires 2 Lamps per Luminaires	450 Lux for four months reduced in 50 Lux increments every week thereafter until 200 Lux	High Brightness High Uniformity	1
Measured energy savings due to photocell control of individual luminaires	1990	Knight L.	3	IDDS stepped (0.75, 100%)	10-15% for 90% of year 30-40% for remaining 10% of year	Cardiff	51°42' N	3°21' W	Field	Unspecified	Unspecified	Unspecified	Unspecified	Unspecified	Fluorescent 36W 12 Luminaires 2 Lamps per Luminaires	600 Lux	High Brightness	6
			4	IDDS with dimming (3-100%)	80% for 80% of the year	Cardiff	51°42' N	3°21' W	Field	Unspecified	Unspecified	Unspecified	Unspecified	Unspecified	Fluorescent 36W 12 Luminaires 2 Lamps per Luminaires	550 Lux	High Brightness	6
The New York Headquarters daylighting makeup. Monitored performance of the daylighting control system	2006	Lee E. & Salowitz S.	5	IDDS with dimming (35-100%)	20-25%	New York (Manhattan)	40°46' N	73°59' W	Field	31.2	0.75	West 118.7° of true South	200.5	200.5	Fluorescent 11W 2 Lamps per Luminaires	400 Lux	Shading High Brightness	7
			6	IDDS with dimming (35-100%)	52-55%	New York (Manhattan)	40°46' N	73°59' W	Field	79.7	0.75	South and West Corner 28.7° and 110.7° of true South respectively	200.5	200.5		400 Lux		7
Energy performance of daylight-linked automatic lighting control systems in large atrium spaces. Report on two full-scaled case studies	2003	AUER & Galassi D.	7	IDDS with dimming (20-100%)	45%	Quebec	46°48' N	71°23' W	Field	Unspecified Large (estimate?)	0.03 - 0.16	West and East	1300 & 2000 surrounding walkways	1300?	Fluorescent 40W 642 Lamps	200 Lux	Reasonable Brightness	20
			8	IBDS on/off	11-17%	Qibwea	45°21' N	75°43' W	Field	Unspecified Large (estimate?)	0.18 - 0.41	All orientations	151	151	Incandescent 150W 16 per floor, 48 total. 16 on each floor are constantly on emergency lighting Incandescent 500W 8 in total Incandescent 15W 10 in total constantly on	200 Lux	Reasonable Brightness	1
Adding advanced behavioral models in whole building energy simulation. A study on the total energy impact of manual and automated lighting control	2007	Bergmeier et al.	9	IDDS with dimming & MDS (3-100%)	93%	Rome	41°54' N	12°30' E	Simulation	1.68 assuming 1m width	0.69	South	5 wide depth not specified	10 plus depth	Fluorescent	600 Lux	High Brightness High Uniformity	Unspecified
Lighting energy savings in offices using different control systems and their real consumption	2008	Rusin et al.	10	IDDS with dimming and MDS (3-100%)	77%	Quebec	46°48' N	71°23' W	Simulation	1.68 assuming 1m width	0.69	South	5 wide depth not specified	10 plus depth	Fluorescent	600 Lux	High Brightness High Uniformity	Unspecified
			11	IDDS with dimming (3-100%)	50%	Stockholm	59°20' N	18°03' E	Simulation	3.1	0.77	South (although all 4 orientations were assessed South is chosen to limit the amount of data from one study)	20	20	Fluorescent	500 Lux	High Brightness High Uniformity	Unspecified
			12	MDS	8.70%	Stockholm	59°20' N	18°03' E	Simulation	3.1	0.77	South	20	20	Fluorescent	600 Lux	High Brightness High Uniformity	Unspecified
			13	MDS on/off	11%	Stockholm	59°20' N	18°03' E	Simulation	3.1	0.77	South	20	20	Fluorescent	600 Lux	High Brightness High Uniformity	Unspecified
			14	IDDS and MDS (3-100%)	51%	Stockholm	59°20' N	18°03' E	Simulation	3.1	0.77	South	20	20	Fluorescent	600 Lux	High Brightness High Uniformity	Unspecified
			15	IDDS and MDS (3-100%)	53%	Stockholm	59°20' N	18°03' E	Simulation	3.1	0.77	South	20	20	Fluorescent	600 Lux	High Brightness High Uniformity	Unspecified
			16	IDDS with dimming (3-100%)	53%	Brussels	50°45' N	4°32' E	Simulation	3.1	0.77	South	20	20	Fluorescent	600 Lux	High Brightness High Uniformity	Unspecified
			17	MDS	8.70%	Brussels	50°45' N	4°32' E	Simulation	3.1	0.77	South	20	20	Fluorescent	600 Lux	High Brightness High Uniformity	Unspecified
			18	MDS on/off	11%	Brussels	50°45' N	4°32' E	Simulation	3.1	0.77	South	20	20	Fluorescent	600 Lux	High Brightness High Uniformity	Unspecified
			19	IDDS and MDS (3-100%)	54%	Brussels	50°45' N	4°32' E	Simulation	3.1	0.77	South	20	20	Fluorescent	600 Lux	High Brightness High Uniformity	Unspecified
			20	IDDS and MDS (3-100%)	56%	Brussels	50°45' N	4°32' E	Simulation	3.1	0.77	South	20	20	Fluorescent	600 Lux	High Brightness High Uniformity	Unspecified
			21	IDDS with dimming (3-100%)	61%	Athens	37°54' N	23°44' E	Simulation	3.1	0.77	South	20	20	Fluorescent	600 Lux	High Brightness High Uniformity	Unspecified
			22	MDS	8.70%	Athens	37°54' N	23°44' E	Simulation	3.1	0.77	South	20	20	Fluorescent	600 Lux	High Brightness High Uniformity	Unspecified
			23	MDS on/off	11%	Athens	37°54' N	23°44' E	Simulation	3.1	0.77	South	20	20	Fluorescent	600 Lux	High Brightness High Uniformity	Unspecified
			24	IDDS and MDS (3-100%)	57%	Athens	37°54' N	23°44' E	Simulation	3.1	0.77	South	20	20	Fluorescent	600 Lux	High Brightness High Uniformity	Unspecified
			25	IDDS and MDS (3-100%)	59%	Athens	37°54' N	23°44' E	Simulation	3.1	0.77	South	20	20	Fluorescent	600 Lux	High Brightness High Uniformity	Unspecified

ASSESSMENT OF THE ENERGY SAVINGS POTENTIAL OF DAYLIGHT UTILIZATION AND ITS IMPACT ON A BUILDING ENERGY PERFORMANCE

Hermano Bernardo^{1,2}, Sérgio Leitão³, Luís Neves^{1,2}, and Paulo Rodrigues^{1,2}

¹Institute for Systems Engineering and Computers at Coimbra, Portugal

²Polytechnic Institute of Leiria, Portugal

³University of Trás-os-Montes and Alto Douro, Portugal

ABSTRACT

This paper aims at determining the energy saving potential that can be obtained by adequate measures and investments through computational simulation, using DesignBuilder/Energyplus software. It presents the simulated values of the impact on the energy consumptions of a building, caused by artificial lighting control systems set to maximize the use of daylight and its effect on the building energy performance labelling, according to recent European and Portuguese legislation changes on this matter.

The work developed was based on a real case-study of a services building located in central Portugal. The basis for the work was a computational model of the building, adequately calibrated and validated using field measurements.

INTRODUCTION

Buildings are responsible for over 40% of the total final energy consumed in European Union (EU) countries. In Portugal, residential and service buildings represents about 60% of electricity produced, and about 30% of the total primary energy (Bernardo, 2009).

The use of daylight in buildings can provide a great energy saving, but it cannot generally meet all of buildings daytime lighting requirements, it will be necessary to install artificial lighting systems to be used whenever the amount of daylight is not enough. In order to save energy it is necessary to install control systems which make it possible to adjust the artificial lighting levels according to daylight levels and the utilization of the building.

Building energy simulation tools provide accurate predictions of the energetic performance of buildings and thermal comfort of its occupants, allowing an evaluation of the impact of improvement measures, in order to support the choice of the most effective measures (Maile et al., 2007).

The prediction of energy consumption in buildings, through computational simulation, is rarely very precise. The accuracy of any simulation result always depends on the accuracy of input data. Normally, it is necessary to validate the results obtained by simulation through the comparison with measured data of energy consumption, achieved through energy

audits to the building, calibrating the models with the present measured values.

BUILDING ENERGY CERTIFICATION IN PORTUGAL

The present work follows the adoption of a number of EU directives on the evaluation of energetic performance of buildings and consequent certification. As a consequence of EU Directive 2002/91/CE, published on the 16th December, and also “Decreto-Lei n.º 78/2006” (SCE, 2006), the certification system “Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios” (SCE) was created, in Portugal.

SCE sets a certification model for small services buildings, or fractions of buildings dedicated to services, with net surface equal or under 1.000 m², and a HVAC system which thermal power, corresponding to the larger of heating or cooling power, exceeds 25 kW. SCE is also applicable to service buildings with a net surface of over 1.000 m² (or 500 m², in the case of shopping centres and heated swimming pools) whether there is a HVAC system or not. The energy class of a building will be determined by its typology (or weighing of a number of typologies), in contrast with the Energy Efficiency Index (IEEnom), determined by dynamic simulation based on the reference profiles defined by the “Anexo XV” appendix of (RSECE, 2006). The Reference Energy Efficiency Index (IEEref) is the value set by “Anexo XI” appendix of (RSECE, 2006), also according to typology, or weighing of typologies.

The energy class of a building follows a 7+2 class system (A+, A, B, B-, C, D, E, F and G), where the A+ class is given to the buildings with the best energy performances, and G to the worst energy performances.

On new buildings, admitted energy classes are only A+ to B-, whereas existing buildings may naturally present any of the defined energy efficiency classes.

METHODOLOGY

The basis for this work were the blueprints of the building, the building’s energy bills over the time window considered (June 2007 to May 2008), and the energy consumptions characterization obtained

through measurements, which were also used to calibrate the computational model developed at this instance.

Due to the high potential of natural lighting usage during sunlight hours, it was simulated the use of lighting sensors associated with dimmers, in order to adjust artificial lighting according to the natural lighting available at each moment.

The conversion factors to primary energy used are the following, according to Portuguese norm (RCCTE, 2006): 0,290 kgoe/kWh for electricity and 0,086 kgoe/kWh for natural gas, parameters defined due to the energy mix of the country.

CASE-STUDY

The building selected as the case study for this work is the Canteen 3, Campus 2 of the Polytechnic Institute of Leiria. It was built in 2005.

The building has a total surface of approximately 1487 m². It has a rectangular geometry, and is composed of two floors (ground floor and first floor), each 3,2 metres high. The meals hall, the kitchen and logistic support areas are located on the ground floor. On the first floor there is a restaurant a la carte, a cafeteria and other logistic areas.

The main façade of the building faces, predominantly, South-East.

In order to characterize the building's lighting system, a survey of the number of luminaries and lamps, their control systems, the technology used and the lighting level of each room was performed. The survey was performed as an energy audit, also aiming to evaluate existing lighting systems efficiency and detect possible improvements, both towards lower energy consumption and improvement on visual comfort to the users.

An approximate total of 14,3 kW of electric power for lighting is installed in the building, mainly divided by four types of lamp. Tubular fluorescent T5-type lamps are predominant, representing 47,5% of installed power. Also tubular fluorescent lamps, T8-type, represent 23,9%; compact fluorescent lamps amount to 19%; and high-pressure sodium vapor lamps amount to 9,1%.

Building envelope

Table 1 shows the characteristics of building envelope and the value of heat transfer coefficient, U, based on ITE50 publication (Santos et al, 2006).

Table 1
Building construction specification

ELEMENT	U [W/m ² .°C]
External wall	0,50
Ground floor	2,50
Flat roof	1,60
Pitched roof	0,85

The roof is constituted by metallic sandwich panels, with thermal insulation (XPS).

Glazing

The heat transfer coefficient of glazing is shown on Table 2. This value was calculated through ITE50, supported by software CALUMEN, which is distributed by glazing manufacturer Saint-Gobain.

Table 2
Building glazing specification

GLAZING DESCRIPTION	U [W/m ² .°C]
Double glazed aluminum window (6+10+4) mm	3,74

COMPUTATIONAL MODEL

The building energy simulation for the case study building was performed using the DesignBuilder graphical interface to the EnergyPlus software.

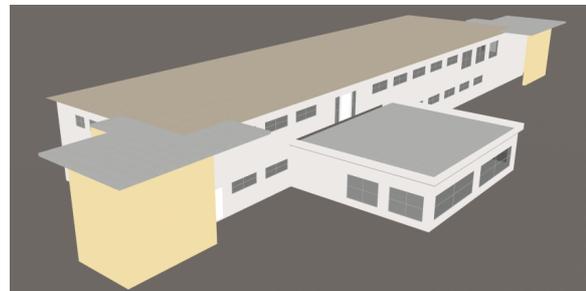


Figure 3 A view of building 3D Model (South).

For the construction of the building model, which was used as the base model representing the existing building, a set of parameters had to be defined. Amongst these, highlights are on the utilization and working hours diagrams, 24 hours a day, for lighting, occupation, equipments, air renewals, ventilation equipments, heating and cooling temperatures (Roriz, 2006).

Weather data

In Portugal, the climate can have three types of influences: Atlantic influence, Mediterranean influence and Continental influence. The climate zone determination was based on weather information of the country and the existing legislation, which defines a division of portuguese territory into three Winter climatic zones (I1, I2 e I3) and three Summer climatic zones (V1, V2 e V3).

The climate file used to the work was the Coimbra's climate file, in International Weather for Energy Calculations (IWEC) format, which is, at the moment, the most similar and near to Leiria. The file is needed so that the simulation software generates the weather dependences in building energy consumption.

Geometry definition

The beginning of the model construction consists in the definition of the building geometry. At this stage the building typology is defined with the required simplifications in order to preserve the essential of characteristics of the building.

In the present case-study, it was necessary to do a set of simplifications in geometry definition, grouping some physical divisions in a single equivalent thermal zone. For that, it was considered areas with the same internal loads, similar sunlight and the same nominal usage patterns. So, the studied building was splitted into 16 different thermal zones (Figure 1 and Figure 2).

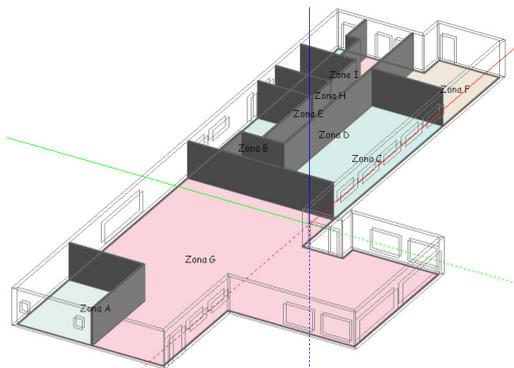


Figure 1 Zones of the Floor 0

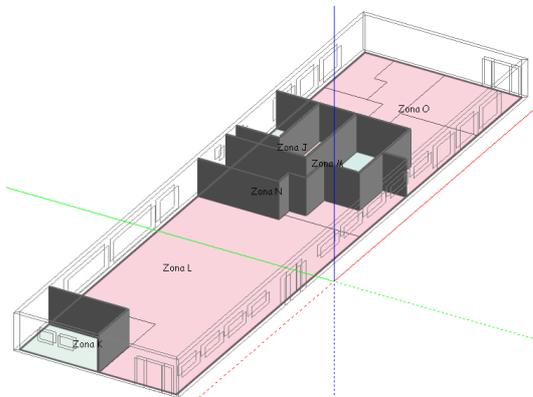


Figure 2 Zones of the Floor 1

Other definitions

The indoor comfort conditions have been set by (RCCTE, 2006), considering an air temperature of 20°C for the heating season, and an air temperature of 25°C with 50% relative humidity for the cooling season.

Infiltration rate and/or fresh-air requirements were defined to ensure the minimum fresh-air requirements listed in “Anexo VI” appendix of (RSECE, 2006).

RESULTS

At an initial stage, it was necessary to calibrate the model through a dynamic simulation of the total energy consumption (by energy form) and the disaggregation of such consumptions by final use,

comparing these values to data collected from the energy audit measurements of real energy consumption.

To perform this simulation it was considered that the building has a natural gas fueled boiler, with an efficiency of 92% for heating. The distribution of HVAC system is made by 2 pipes until Air Handler Units (AHU), where the heated air is after distributed by ducts through a system of variable air volume (VAV).

In the process of creating and adjusting such a model, the building envelope, the climatization system, the distribution of internal loads and the utilization patterns were the input data to software DesignBuilder.

After computational model calibration by comparison with data gathered through energy audit, were obtained the values shown on Table 3.

Table 3
Comparison between annual energy consumptions

ENERGY	MEASURED [kgoe]	SIMULATED [kgoe]	DEVIATION [%]
Electricity	57.982	52.942	-8,7
Natural gas	23.205	24.455	5,4
Total	81.187	77.397	-4,7

Comparing the values obtained through computational simulation with real measurements, it is patent that, in terms of electricity consumption, the simulated values are lower than the measured values in 8,7% and, in what concerns to natural gas consumption, it is shown that simulated values are higher than the measured values in 5,4%. Globally, there is a deviation of 4,7% on total anual simulated energy consumptions comparing to total anual measured energy consumptions.

According to Portuguese Energy Agency (ADENE) recommendations, in what concerns to energy certification regulations, the difference between the dynamic simulation energy consumptions shouldn't have a deviation higher than 10% comparing to those obtained through energy audit. So, the obtained results were considered satisfactory, validating the computational model to the real situation.

Base case simulation

The annual energy consumptions, as obtained through simulation of the building model, applying real occupation and utilization patterns, are presented in Table 4.

Table 4
Energy consumption – base case

ENERGY USAGE	ELECTRICITY [kWh]	THERMAL ENERGY [kWh]	TOTAL [kgoe]
Lighting	31.355	0	9.093
Equipments	144.314	54.177	46.510
Heating	0	55.587	4.780
Others	6.888	174.599	17.013
TOTAL	182.557	284.363	77.397

Looking at Table 4, it is patent that, under these conditions, the building has a total primary energy consumption of 77.397 kgoe.

The chart in Figure 4 shows the disaggregation of annual total primary energy consumptions by final use.

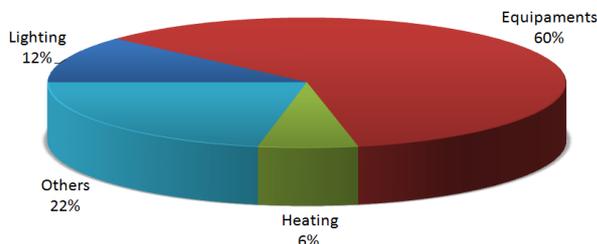


Figure 4 Energy consumptions disaggregation

Simulation of the case-study with lighting systems control

The annual energy consumptions, as obtained through simulation of the building model with lighting systems control, applying real occupation and utilization patterns, are presented in Table 5:

Table 5
Energy consumption – base case with lighting systems optimization

ENERGY USAGE	ELECTRICITY [kWh]	THERMAL ENERGY [kWh]	TOTAL [kgoe]
Lighting	23.494	0	6.813
Equipments	144.314	54.177	46.510
Heating	0	57.851	4.975
Others	6.888	174.599	17.013
TOTAL	174.696	286.627	75.312

Looking at Table 5, it is patent that, under these conditions, the building has a total primary energy consumption of 75.312 kgoe.

The chart in Figure 5 shows the disaggregation of annual total primary energy consumptions by final use.

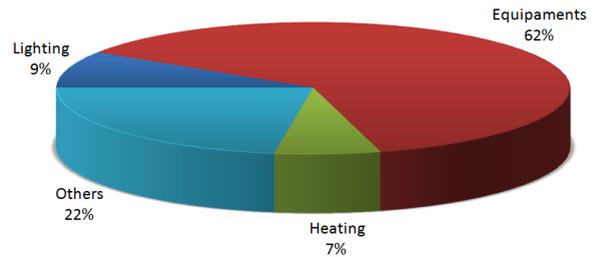


Figure 5 Energy consumptions disaggregation

Comparative analysis of results

Comparing the results of both simulations performed, using the real utilization and occupation patterns, there are visible differences in the obtained results.

Table 6 presents a comparison between the base case, with no optimization system, and the optimized case, with illuminance sensors associated with dimmers.

Table 6
Comparison of results – electricity

ENERGY USAGE	BASE CASE [kWh]	BASE CASE OPTIMIZED [kWh]	REDUCTION [%]
Lighting	31.355	23.494	25,1
Equipments	144.314	144.314	0,0
Others	6.888	6.888	0,0
TOTAL	182.557	174.696	4,3

It can be seen that there is a reduction of electric energy consumption, mainly due to the reduction of lighting consumptions, which is associated with a reduction of the energy bill.

The savings on electricity amount to 4,3% of total electricity consumption. However, the reduction on artificial lighting systems is quite significant (25,1%).

In terms of total primary energy, results obtained are presented on Table 7:

Table 7
Comparison of results – primary energy

ENERGY USAGE	BASE CASE [kgoe]	BASE CASE OPTIMIZED [kgoe]	REDUCTION [%]
Lighting	9.093	6.813	25,1
Equipments	46.510	46.510	0,0
Heating	4.780	4.975	-4,1
Others	17.013	17.013	0,0
TOTAL	77.396	75.311	2,7

The energy consumption of the heating systems has a slight increase (4,1%) due to the reduction of the thermal load inside the building but, globally, the energy consumption shows a decrease.

It is patent that, despite the significant reduction of energy consumptions of artificial lighting (25,1%),

this represents a sole saving of 2,7% on the total energy (electrical and thermal) consumption of the building.

Energy savings potential

From the results stated previously, the energy savings resulting of the optimization of artificial lighting systems, thus maximizing the resource to natural lighting, is presented on Table 7:

*Table 7
Annual savings potential*

	ENERGY SAVING [kgoe]	COST REDUCTION [€]
Repercussion on electricity consumption	2.280	708
Repercussion on natural gas consumption	-195	-121
TOTAL	2.085	587

Based on obtained results, it is visible that, although there is a reduction of electricity costs of 708€, the yearly cost of natural gas actually increases by 195€, due to the decrease of the thermal load of the building in the heating season.

Globally, there is an energy saving potential of 2.085kgoe, which means a total cost reduction of 587€.

Considering the investment cost of approximately 3.000€ associated with the installation of the control and optimization system, and the cost reduction calculated, the return period of the investment is approximately 5 years.

Implementing this simple yet effective optimization measure would cause a reduction of CO₂ emissions of 3.172 kgCO₂e, due only to energy savings.

BUILDING ENERGY LABELLING

The method used to determine the IEE_{nom} of a large existing building followed several approaches and stages, in order to ensure the reliability of the results obtained.

The simulation of nominal consumptions followed, where the characteristics of the building, the power density for artificial lighting and HVAC systems are kept, replacing the actual use profiles (for occupation, equipments and lighting) with the reference profiles and densities, according to the "Anexo XV" appendix of [8]. For this simulation, a climate data file, with the available standard climate information, should also be used. The nominal energy needs also have to be computed, contemplating the different energy forms, according to nominal profiles, for the various end uses.

In order to evaluate the energy performance and determine the efficiency class, several simulations were performed under different conditions.

Base case

Results of a thorough dynamic simulation, with nominal profiles, after converting final to primary energy, are summarily presented on Table 8:

*Table 8
Energy consumption – reference case*

	HEATING	COOLING	OTHERS
Energy consumption [kgoe/m ²]	35.217	20.078	113.001

The IEE_{nom} index for this building is 104,89 kgoe/m², which means the building has Class B efficiency, under these circumstances.

Maximization of the use of daylight

If the building is equipped with systems leading to the maximization of the use of natural lighting, such devices should influence the simulation results for nominal conditions (Bernardo, 2010).

Therefore, a new simulation was performed, using the reference usage patterns set in the "Anexo XV" appendix of portuguese norm (RSECE, 2006), but using lighting sensors associated to dimmers, responding to the variations of natural lighting. This sort of management and automatic control systems often represents an interesting solution to a more rational use of energy for lighting and should therefore be accounted for in the calculations of specific global consumptions of a building under nominal conditions.

The results of a dynamic simulation including this system are presented on Table 9:

*Table 9
Energy consumption – maximizing the use of daylight*

	HEATING	COOLING	OTHERS
Energy consumption [kgoe/m ²]	36.049	19.737	106.411

The IEE_{nom} is then 100,59 kgoe/m², which is lower both than the reference case and the building is no longer a Class B building, but an Energy Efficiency Class A building.

A lighting control system that maximizes the use of natural lighting causes such a reduction of the IEE_{nom} index as to clearly change the building to a higher efficiency energy class, the building becoming a Class A building.

CONCLUSION

The use of computational simulation tools proves to be a big contribution to the evaluation of energy performance of buildings and the prospect study of the impact that possible efficiency improvements may have on it.

During the winter, and assuming thermal loads are lower than the losses, artificial lighting systems can be beneficial and should always be taken into account when performing simulations and dimensioning climatization systems, as they represent a thermal load which contributes to the building's heating. During the summer, lighting systems should also be considered, this time because they represent an extra load that must be removed by the cooling system, in case of its existence.

Results show that the maximization of daylight utilization in buildings due to the implementation of artificial lighting management and control actions is a very interesting option to promote a more efficient use of energy and to improve the energy performance of a building of these characteristics.

REFERENCES

- Bernardo, H. 2009. Improving the Energy Performance of Buildings, MSc. dissertation, University of Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal.
- Maile, T., Fischer M., Bazjanac V. 2007. Building Energy Performance Simulation Tools - a Life-Cycle and Interoperable Perspective, Working Paper WP107, Stanford University.
- Roriz, L. 2006. Climatização – Conceção, Instalação e Condução de Sistemas, Edições Orion – Portugal. (in Portuguese)
- RCCTE 2006. Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, Decreto-Lei n.º80, de 4 de Abril de 2006.(in Portuguese)
- RSECE 2006. Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios, Decreto-Lei n.º79, de 4 de Abril de 2006.(in Portuguese)
- SCE 2006. Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios, Decreto-Lei n.º 78, de 4 de Abril de 2006.(in Portuguese)
- Santos, C. P., Matias, L. 2006. Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios; Informação Técnica – ITE50, LNEC – Portugal. (in Portuguese)

A SIMPLE METHOD FOR THE DERIVATION OF ILLUMINANCE VALUES FROM RADIANCE DATA

Sokol Dervishi, Ardeshir Mahdavi
 Department of Building Physics and Building Ecology,
 Vienna University of Technology, Vienna, Austria

ABSTRACT

Daylight simulation applications require information on sky luminance distribution. Sky distribution maps can be generated synthetically, but the process requires external illuminance information for calibration purposes. As measured external illuminance levels are not available for many locations, the more widely available irradiance measurements can be translated, using proper luminance efficacy functions, into illuminance values. In this context, the present paper compares five alternative luminous efficacy models for the prediction of external illuminance based on irradiance. The first option is based on a fixed global luminous efficacy assumptions. The other options consider potential dependencies of luminous efficacy on outdoor temperature and humidity ratio. The models are first derived based on a first set of measured data and then test against a second set of empirical observations.

Keywords: luminous efficacy, irradiance, illuminance, temperature, humidity ratio

INTRODUCTION

Simulation-based architectural daylight analysis and design support requires information regarding external conditions. Specifically, prediction of daylight availability in indoor environments via computational simulation requires external illuminance data.

In previous research (Mahdavi et al. 2006), we illustrated the use of calibrated digital photography toward determination of the luminance distribution of the sky dome. Thereby, we demonstrated how a low-cost digital camera with a fish-eye lens coupled with a illuminance meter can provide such detailed luminance distribution data reliably. As comprehensive measured external illuminance data is not available for most locations, approaches are needed to estimate external illuminance based on more widely available global irradiance data. A well-known approach for this purpose involves the use of luminous efficacy, which denotes the relationship between illuminance and irradiance in lumens per Watt.

In the past decades, several authors have studied the luminous efficacy of the solar radiation using algorithms for the different sky conditions. Littlefair (1988) suggested different luminous efficacy values for different sky conditions (overcast sky, clear sky, intermediate sky). Perez et al. (1990) developed luminous efficacy models as a function of the sun position, the brightness of the sky, and the sky's clearness variables. The parameters were divided in intervals and the changes of luminous efficacy were studied. Wright et al. (1989) besides the three parameters used a fourth parameter in the study of luminous efficacy: the total perceptible water W , calculated as a function of dew point temperature ($^{\circ}\text{C}$). Chung (1992) and Robledo et al. (2000) develop local luminous efficacy models for overcast and intermediate skies based on Littlefair's model. Muneer and Kinghorn (1997) developed global and diffuse luminous efficacy models as a regression function of clearness index k .

The present work evaluates five options regarding luminous efficacy models using data obtained for Vienna, Austria. This evaluation, besides the fixed luminous efficacy assumption, also presents polynomial models obtained when plotting the global luminous efficacy against the temperature and humidity ratio for different global horizontal irradiance ranges.

APPROACH

To obtain the input data needed to derive luminous efficacy values (η), we established a first set of measured global horizontal illuminance and irradiance data, as well as external temperature and relative humidity over a period of three years using the microclimatic monitoring station of the Department of Building Physics and Building Ecology at the Vienna University of Technology, Vienna, Austria. The measurements were organized in terms of a data base containing information collected every fifteen minutes during the three-year observation period (from 1st of January 2005 to 31 of December 2007), resulting in measured values for 34.992 discrete intervals. Only intervals with daylight were taken into account. The measurement period included a variety of sky conditions, from sunny, to partly cloudy, to overcast.

We tested five options to derive illuminance levels from irradiance levels using luminous efficacy values. The first option (A) involves the use of a fixed luminous efficacy value. The second option (B) assumes that luminous efficacy value depends on the outdoor air temperature. Thereby, a linear relationship between luminous efficacy and outdoor air temperature (θ) is established for the entire range of external global horizontal irradiance (from 50 to 1100 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$). The third option (C) assumes that luminous efficacy value depends on the humidity ratio (HR) of the outdoor air. Again, a linear relationship between luminous efficacy and humidity ratio is established for the entire range of external global horizontal irradiance. The fourth option (D) is similar to the second option (B), other than in this case, three ranges of horizontal irradiance data are considered. The fifth option (E) is similar to the third option (C), other than also in this case, three ranges of measured irradiance data are considered. These options are shown in table 1. The above mentioned three irradiance ranges are given in table 2.

Table 1. Overview of the five options

Option	Method of derivation of luminous efficacy (η)
A	One η value based to the mean of all data
B	η corrected as a linear function of the temperature (for the entire irradiance range)
C	η corrected as a linear function of the humidity ratio (HR) (for the entire irradiance range)
D	η corrected as a function of the temperature for 3 ranges
E	η corrected as a function of the humidity ratio for 3 ranges

To compare these options, the respective luminous efficacy functions (derived based on the above mentioned 3-year data set) were used to derive external global horizontal illuminance values based a second set of measured irradiance data (collected using the same monitoring station for the period of January first 2008 to 31. of July 2009). The derived illuminance data were then compared with corresponding measurements for this second monitoring period.

To compare the options statistically, Relative Error (RE) was used. For a pair of values (such as derived and measured illuminance levels), RE can be expressed as per equation 1.

$$RE_i = \frac{M_i - C_i}{M_i} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

In this equation, M_i and C_i denote the measured and derived illuminance at interval i respectively.

RESULTS AND DISCUSSION

Figures 1 and 2 show empirically derived luminous efficacy values (for all intervals of the first data set) as a function of outdoor air temperature and outdoor humidity ratio respectively. The associated regression functions provided the basis of the aforementioned options B and C (see Table 1). Figures 3 to 5 show empirically derived luminous efficacy values (for all intervals of the first data set) as a function of outdoor air temperature for three different irradiance ranges. The associated regression functions provided the basis of the aforementioned option D (see Table 1). Figures 6 to 8 show empirically derived luminous efficacy values (for all intervals of the first data set) as a function of outdoor humidity ratio for three different irradiance ranges. The associated regression functions provided the basis of the aforementioned option E (Table 1). An overview of these regression functions is provided in Table 2.

To compare the performance of the five options (Table 1), Figure 9 shows the percentage of the results (pairs of measured and derived illuminance levels) with associated maximum relative errors for the five above-mentioned options. Note that, for this comparison only data from the second measurement period was used. Moreover, data captures in Figure 9 was used to generate the numerical data in Table 3. Thereby, for discrete values of relative error ($\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 15\%$, $\pm 20\%$), the associated percentage of results are given.

Figures 1 to 8 suggest higher correlation coefficient values for higher irradiance ranges.

Figure 9 implies that options C and E (which work with humidity ratio) display slightly lower relative errors than the other options. Likewise, Table 3 suggest that option E performs generally better than the other options.

Overall, the differences between the options in view of relative error are not highly pronounced. However, option A (which uses a fixed value for luminous efficacy) does display the highest relative error.

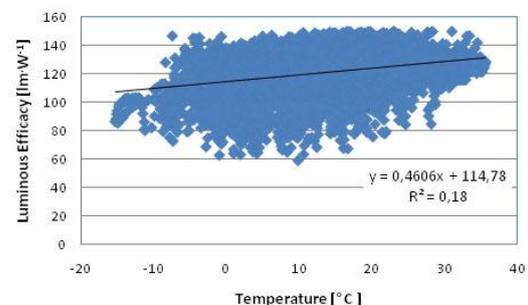


Figure 1 Luminous efficacy as a function of outdoor air temperature (irradiance range: 50 to 1100 W/m^2)

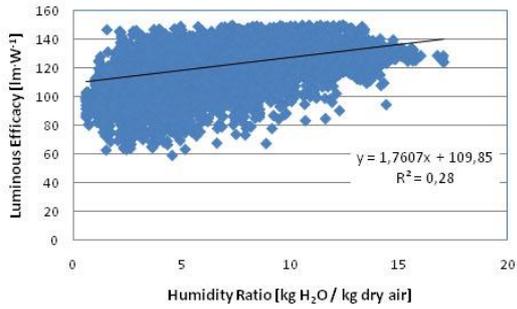


Figure 2 Luminous efficacy as a function of humidity ratio (irradiance range: 50 to 1100 W/m²)

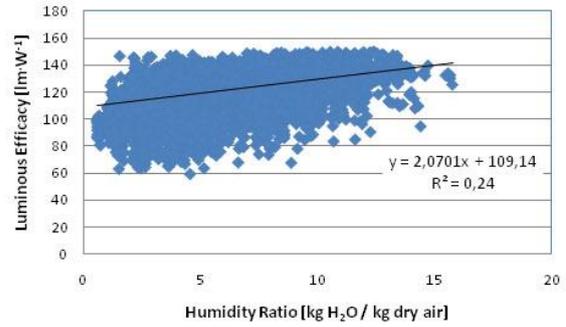


Figure 6 Luminous efficacy as a function of humidity ratio (irradiance range 50 to 300 W/m²)

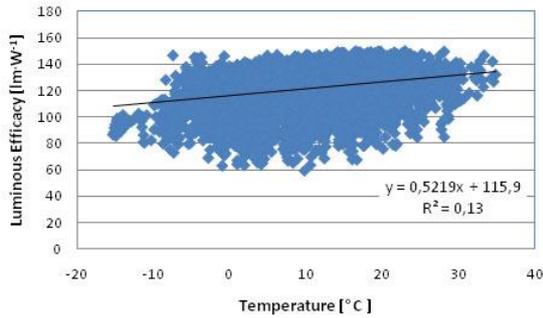


Figure 3. Luminous efficacy as a function of outdoor air temperature (irradiance range: 50 to 300 W/m²)

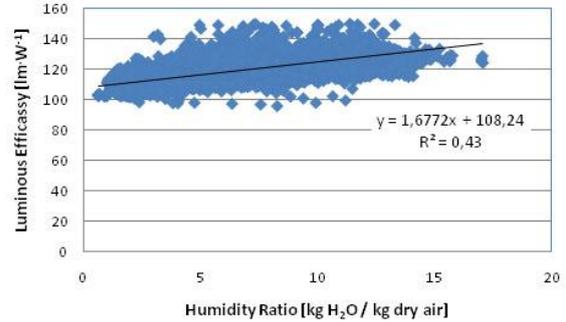


Figure 7 Luminous efficacy as a function of humidity ratio (irradiance range: 300 to 600 W/m²)

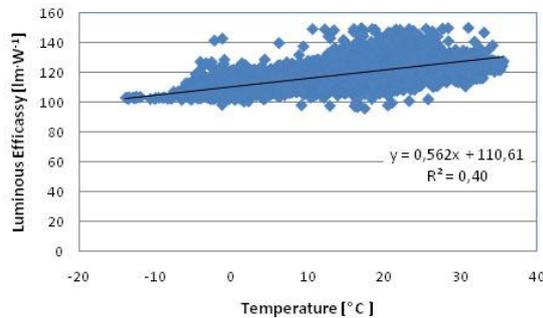


Figure 4. Luminous efficacy as a function of outdoor air temperature (irradiance range: 300 to 600 W/m²)

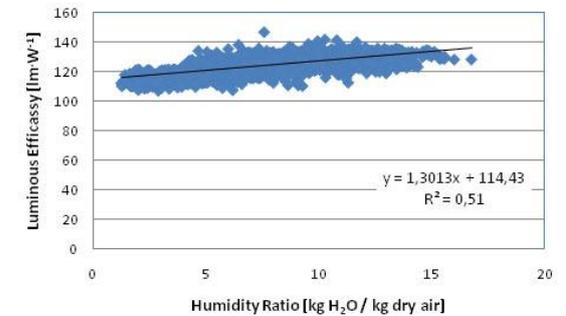


Figure 8 Luminous efficacy as a function of humidity ratio (irradiance range: 600 to 1100 W/m²)

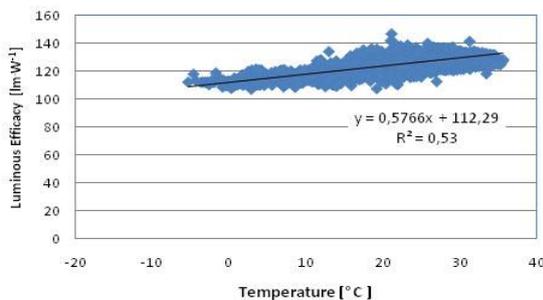


Figure 5 Luminous efficacy as a function of outdoor temperature (irradiance range: 600 to 1100 W/m²)

Table 2 Overview of the regression functions expressing the dependency of luminous efficacy on outdoor air temperature and humidity ration for different ranges of global horizontal irradiance

Radiance range [W.m ⁻²]	50 to 300	$\eta = 0,5219 \theta + 115,9$	$\eta = 2,0701 HR + 109,14$
	300 to 600	$\eta = 0,562 \theta + 110,61$	$\eta = 1,6772 HR + 108,24$
	600 to 1100	$\eta = 0,5766 \theta + 112,29$	$\eta = 1,3013 HR + 114,43$
	50 to 1100	$\eta = 0,4275 \theta + 115,48$	$\eta = 1,7607 HR + 109,85$

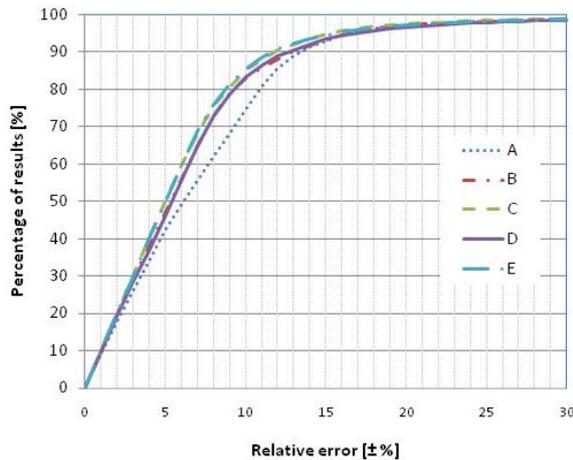


Figure 9 Percentage of the results (pairs of measured and derived illuminance values) with respective maximum Relative Error for the five options

Table 3 Percentage of results with different maximum Relative errors

Option	± 5 %	± 10 %	± 15 %	± 20 %
A	42.3	74.8	93.1	97.3
B	47.1	83.2	93.2	97.0
C	50.2	85.1	94.6	97.6
D	46.1	83.2	93.4	96.6
E	49.8	85.5	94.8	97.9

CONCLUSION

We compared a number of different options to derive illuminance values from the more widely available measured global horizontal irradiance data using alternative luminous efficacy functions. These functions can be incorporated in simulation applications for the daylight analysis and design support. The results suggest that two options (C and E), which use humidity ratio information to formulate luminous efficacy functions delivered somewhat better results. However, the range of errors was rather low for all options. Even for the worst-ranked option (A), the relative errors were in 75% of the cases less than $\pm 10\%$.

Additional experimental studies need to be carried out to further explore the statistical validity and significance of the results. In addition, the above-mentioned luminous efficacy models need to be further evaluated against existing luminous efficacy models such as those suggested by Littlefair (1998), Perez et al. (1990), Chung (1992), and Muneer and Kinghorn (1997). Moreover, the applicability of the derived functions to other local and regional circumstances must be further explored. Likewise, a comparison of the derived functions with alternative methods proposed in past research efforts must be carried out.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors were supported by Mr. Joseph Leichleitner toward the provision of the weather data used in this paper.

REFERENCES

- Mahdavi, A. 2008. Predictive simulation-based lighting and shading systems control in buildings. *Building Simulation*, an international Journal, Springer. Volume 1, Number 1 ISSN 1996-3599, pp. 25-35.
- Mahdavi, A., Tsiopoulou, C., Spasojević, B. (2006). Generation of detailed sky luminance maps via calibrated digital imaging. In: Koenigsdorff R, van Treeck C (eds), *Energieeffizienz von Gebäuden und Behaglichkeit in Räumen*, BauSIM2006 (IBPSA), Eigenverlag TU München, München, pp. 135 – 137.
- Mahdavi, A., Dervishi, S., Spasojevic, B. 2006. Computational derivation of incident irradiance on building facades based on measured global horizontal irradiance data. In: Koenigsdorff R, van Treeck C (eds), *Energieeffizienz Gebäuden und Behaglichkeit in Räumen*, BauSIM2006 (IBPSA), Eigenverlag TU München, München, pp. 135 – 137.
- Littlefair, P.J., Measurements of the luminous efficacy of daylight, *Lighting Research and Technology* 20 (1988), pp. 177–188.
- Robledo, L. and Soler A., Luminous efficacy of global solar radiation for clear skies, *Energy Conversion and Management* 41 (2000), p. 1769.
- Robledo, L., Soler A. and Ruiz E., Luminous efficacy of global solar radiation on a horizontal surface for overcast and intermediate skies, *Theoretical and Applied Climatology* 69 (2001), pp. 123–134.
- Perez, R. Ineichen P., Seals R., Michalsky J. and Stewart R., Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance, *Solar Energy* 44 (1990), pp. 271-289.
- Chung, T.M., A study of luminous efficacy of daylight in Hong Kong, *Energy and Buildings* 19 (1992), pp. 45–50.
- Munier, T and Kinghorn, D., Luminous efficacy of solar irradiance: improved models, *Lighting Research and Technology* 29 (1997), p. 185.
- Wright, J., Perez R. and Michalsky J.J., Luminous efficacy of direct irradiance: variations with insolation and moisture conditions. *Solar Energy* 42 (1989), pp. 387–394.
- Olseth, J.A. and Skartveit A., Observed and modelled hourly luminous efficacies under arbitrary cloudiness. *Solar Energy* 42 (1989), pp. 221–2

EXPLORING THE POTENTIAL OF GAME ENGINES FOR REAL-TIME LIGHT SIMULATION

Peter Ferschin¹, Monika Di Angelo², Georg Suter¹

¹Vienna University of Technology, Institute for Architectural Sciences,
Digital Architecture and Planning

²Vienna University of Technology, Institute for Computer Aided Automation,
Automation Systems Group

ABSTRACT

We explore the potential of game engines in the area of real-time light simulation as a feasibility study. We especially consider needs of architects, light planners, and clients like enhanced workflow, tighter integration of software packages, and real-time rendering of scenes. Furthermore, we investigate the publishing possibilities for client side interactive exploration of lighting scenarios. As a proof of concepts we tested the workflow on a chosen scenario suitable for diverse lighting situations, the ProjectSpace Kunsthalle.

Keywords: Real-Time Simulation, Light Simulation, Game Engines

INTRODUCTION

Light simulation is often incorporated in standard 3D modeling software. Even though this is done at a very advanced level in some of them (e.g. Maya), they are not specifically geared towards real-time simulation. Nevertheless, they support advanced features of *qualitative* light simulations like reflection, transparency, shadow, indirect lighting, etc. *Quantitative* aspects are usually handled by dedicated lighting planning software (e.g. DIALux), some of them even in real-time. They incorporate calculations for luminance, contrast, glare, etc. to meet recommended standards like "Lighting of indoor workplaces" EN12464-1. Real-time rendering engines (like LinceoVR) on the other hand deliver qualitative light simulations in real time, but do not consider quantitative aspects and come without a 3D modeler.

When it comes to publishing a model for client presentations, one is left with a collection of powerful software packages that are rarely easily combined, even though most of them support import from and export to other common tools.

There is a definite need for a tighter workflow. A workflow for light planning basically consists of three parts: 1) design of the building including the design of the lighting concept, 2) simulation of the lighting situations and 3) visualization of the building with lighting (see Figure 1).

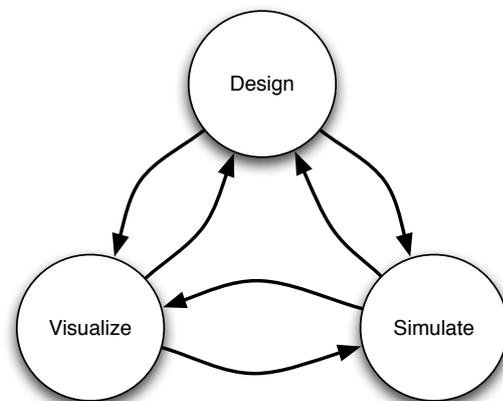


Figure 1: Basic workflow for light planning

This workflow is dramatically enhanced when it is iterative, easily coupled and iterations are done fast. "Performing visual-based analysis in the early stage of the design process" (Indraprashta et al., 2008) is essential. In a very tight coupling, the goal would be real-time visualization of light simulation.

Real-time digital techniques for design, simulation and representation (especially visualization) in architecture are available. To take advantage of state-of-the-art technology, a feasible workflow is needed. "The complexity of fully engaging with these opportunities rises alongside the laymen's experiences and expectations. If Architects do not want a filtering VR-expert between them and their clients, they need to rise to the challenge. The current generation of Architecture students is doing just that" (Lowe, 2009).

Recent technical developments of game engines, which contain increasing support for physical simulation in real time, make an investigation of their

application for scientific research interesting. Beside mechanical forces like gravity or even dynamic forces, light and sound are often calculated in real time in a dynamically changing three-dimensional space. Natural phenomena like wind, rain and snow are also integrated into the environment. Additionally, day light simulation can be handled interactively, for example letting the client set specific daytimes or the speed of the sun. Artificial light sources can be operated by the client as well.

Game engines provide many advantages. They allow for a “design in context”, where a user explores the design as an interaction between himself, the 3D model and the environment. It so places “context over object”, thus enabling interactive and participatory design (Moloney, 2002). Furthermore, in the interactive exploration “movement is not forcefully prescribed”, but invites the user to walk along his own ways, adding “tactical solidity” and “integrated audio” (Hoon et al., 2003). With its real-time visualization “this form of presentation makes sense to every spectator very quickly and in a definite way, thus it makes collaboration easy especially in interdisciplinary teams.” It is so “helping to make decisions in the process of panning” (Zeile et al., 2007).

There are also limitations to the employment of game engines (Hoon et al., 2003) as an interactive real-time renderer with tight workflow: not only the 3D geometry, but also the entire environment must be modeled, thereby increasing the complexity furthermore. Because of the necessity for real-time calculations, limitations have to be put on the geometry. Rather the overall implementation should always keep the requirements for real-time applications in mind. Last but not least, at present there is a definite lack of standardization. Nevertheless, the many advantages are worth the effort.

The choice between several existing 3D real-time game engines depends on the selection criteria. In a university environment, free software is always a preferred choice, as to not burden students with additional costs. For our purpose ease of workflow is an essential criterion, which basically means, straight-forward import of so-called assets (like 3D geometry, textures, animations, sounds). Also the possibility for an “import of external lights” is desirable (Koehler et al., 2008).

LIGHT SIMULATION

Resorting to computer-aided light simulation especially because of its 3D visualization

possibilities becomes more and more common for planning and presenting lighting and luminaires in architecture. It allows for faster evaluation of lighting concepts while inspecting the building from various viewpoints. Two basic approaches to light simulation have been established: qualitative and quantitative light simulation, which are not very well integrated yet.

In quantitative light simulation, emphasis is laid on physically correct calculations of light distribution and intensity, thus enabling tests for compliance with existing standards. Typically, there is an extensive database of luminaires with technical data for each, provided by the manufacturer, that is available on-line. The software tools use this data for their calculation, combine it with the individual 3D geometry of the building; add in effecting materials (e.g. reflection) and deliver (a more or less time consuming) calculation result. Free software, which falls into that category, includes RADIANCE, RELUX and DIALux, to name the most prominent ones. RELUX only allows for very simple geometry, comes with a command line interface, and employs backwards ray tracing. RADIANCE also lacks a user-friendly free GUI, which is a major drawback, especially because of its complexity. But it is still interesting since it serves as a base for several other (mostly not for free) applications. DIALux on the contrary comes with a handy GUI and is considered standard among the existing light planning software. It is well suited for educational purposes as well.

Qualitative simulation on the other hand puts emphasis on (physically correct) photo realistic rendering quality without providing quantitative information that can be checked against standards. Well known examples oft software tools in this category are e.g. Maxwell, Fry, and VRAY.

REAL-TIME VISUALISATION

The significant advance in computing power due to faster processors, multi-core processing and high speed calculations on graphics cards by using GPU computations have led to the availability of software packages which allow a real-time simulation of lighting effects or at least perform the same task at much higher speeds. As many of the performance increases were also motivated by the increasing visual quality of video games we will give a brief comparison between dedicated real-time visualization software and game engines that allow the modification of its contents for architectural visualization.

Real-time Rendering Software

Real-time visualization software tries to minimize the time between design changes and the light simulation as qualitative output. Mostly the design changes consist in parameter changes of the light sources or the material parameters. Sometimes simple modifications on the geometry of the scenes are also allowed. Integration to 3D modeling software is done either by file format exchange or by even tighter integration using plug-ins for the modeling environment.

Presentation is mostly possible with interactive walkthroughs, often also for customer presentations on large projection environments. Examples for such applications are LinceoVR and Octanerender.

Game Engines

Recently, a trend towards employing game engines for dynamic and interactive visualizations in architecture can be noticed. One of the reasons might be, that they represent a *comprehensive framework* for real-time visualization. The advantage of a framework lies in its *ease of workflow*, where the specialized tools blend in together, digital content can be assembled, enriched with high *interactivity* and fine-tuned with purpose-tailored *programming*. As game engines can also be seen as software development environments with already existing frameworks for three-dimensional simulation, their scripting possibilities and integration of programming languages allow the extension, customization and behavior of the pre-defined scene (objects, cameras, lighting, etc.).

Finally, the customized presentation can be *published* for a variety of platforms (PC, mobile phone, game consoles, web, etc.) and distributed to the clients.

Among others the following game engines have been used in architectural visualizations: Unreal, Cryengine, Unity, Quest3D, Silex3d, Blender.

In our project we have chosen the Unity game engine for the following reasons:

- simple user interface
- easy workflow for design changes
- tight integration to 3d modeling
- workflow enhancement by scripting
- free entry version available
- artist friendly

Although some of the software packages mentioned above might provide better visual results or allow the real-time simulation of very complex scenes, Unity seemed to be the best choice for our needs. The

overall advantage of Unity lies in its ease of use and its flexibility of extending the workflow. Unity seems also very appropriate for the use in an academic environment as it supports Windows and Macintosh platforms and has a student friendly license policy.

TEST ENVIRONMENT

As a reference and test model an exhibition space, the ProjectSpace of the Kunsthalle in Vienna, was chosen. Besides of the convenient location on the Karlsplatz, near the Vienna University of Technology, it is one of the landmarks at this area, well observed by local inhabitants, students, tourists and the passing traffic. The design was done by the architect Krischanitz as a glass box that allows the view of the historic surrounding from inside as well as the exhibited objects from the outside.

As the exhibition space might be used at day and night time, a variation in the light design is always an interesting challenge for each exhibition. Furthermore the exhibition “ArchDiploma”, that shows an overview of the best Master Projects in Architecture over a period of two years is taking place, with always changing exhibition concepts. Despite the simplicity of the geometry of the building, the challenge of light simulation lies in the interplay between inner lighting and daylight simulation.



Figure 2: Photo Kunsthalle Day



Figure 3: Photo Kunsthalle Night

LIGHT SIMULATION WITH DIALux AND UNITY

Our main intention of this project was to establish a tight integration between design, simulation and visualization. For the geometric design and basic material definitions Cinema4D was used. Its ability to export 3DS files allowed to import the 3D model into DIALux. The next step was to define the luminaires that should be used for the exhibition. In our case we used the integrated plug-in from Zumtobel to obtain suitable light sources. Then the light simulation is performed in DIALux with various settings, where at the end of the calculation the result of the calculated light distribution can be viewed interactively in a 3D view window.

After viewing the light distribution in its qualitative state (Figure 5 and 6) images or videos can be saved to show the result of the light calculation to the customer. Our intention in this project was to enhance the presentation methods that can be shown to a client by allowing interactive walkthroughs of pre-calculated light settings as well as enhancing the visual display of using photographic representations of the surrounding historic environment.

Unfortunately, DIALux does not allow the saving of the content of the 3D view as textured 3D model, which would be very suitable for our purposes. Therefore we had to overcome this limitation by using the 3D capture functionality of Adobe Acrobat Extended. Hereby it is possible to perform a kind of 3D „screenshot“ as so-called 3D capture of objects in another application by saving the display list of OpenGL objects, which requires to use DIALux settings that use OpenGL as display driver.

After capturing the 3D model, Acrobat allows to save it as a 3D-PDF file, from which the content can be

extracted as U3D file, which later can be converted to a FBX file, the preferred file format to integrate textured 3D models into the Unity environment.

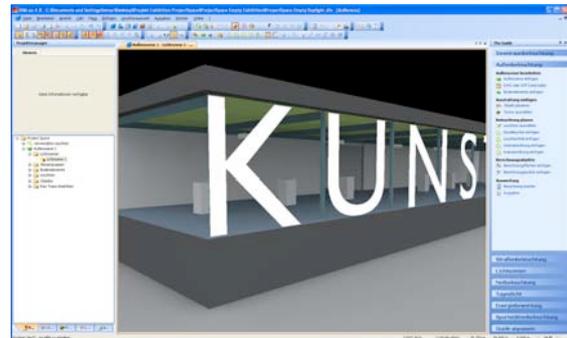


Figure 4: Daylight Simulation in DIALux

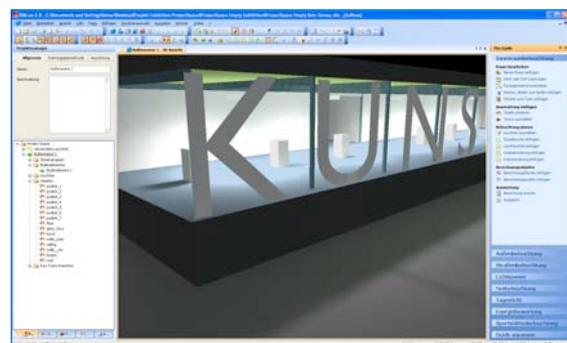


Figure 5: Simulation of Exhibition Lights

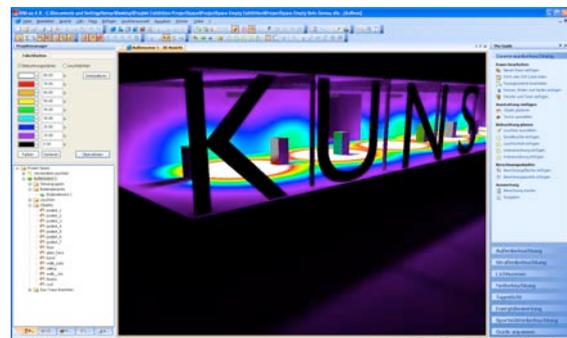


Figure 6: False Color Visualization of Light Distribution

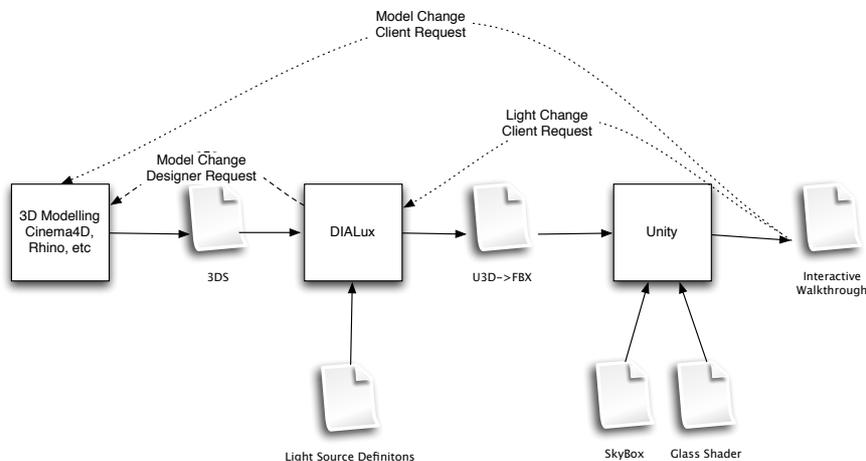


Figure 7: Workflow for Simulating Light with DIALux and Unity

The diagram in figure 7 describes the workflow between the chosen design software (e.g. Cinema4D), DIALux as light simulation program and Unity as visualization environment, with the possibility to transfer the data in the most appropriate file formats, and how the client's (dotted line) or designer's (dashed line) feedback might alter parameters of the entire setting.

At importing the converted FBX file into Unity some post-processing needed to be done, to assign the correct shaders to objects with light distribution as textures on the mesh surface. As the light distribution was pre-calculated – which is also called light-baking in real-time visualization – a lightmapped-diffuse shader was assigned to meshes with diffuse materials where the pre-calculated textures were copied into the light map channel. The materials of the glass façade were manually tagged as glass, so the import process could assign a special glass shader that also allows reflection mapping.

To enhance the visual display in Unity a panoramic image was generated of photos of the surrounding environment of the exhibition space. The panoramic image was then converted into 6 quadratic images covering the 6 faces of a cube. This so-called cube map could later be used to enable the reflections in the glass façade and further more to generate an image based environment as a skybox.



Figure 8: Environment with Cube Maps

Although panoramic photography is an established technology, usual panoramic images are shot with a fixed view center. In our case the images outside the exhibition building had to be combined with different view points which caused problems for objects near the camera. Despite these problems it was possible to generate a usable cube map as most of the environmental buildings were at a distance without too much perspective distortion.



Figure 9: Walkthrough in Unity with Light Distribution Inside, Reflections on the Façade, and Skybox.

In figure 9 the combined 3D scene is shown: the background shows a section of the skybox, and in the facing façade the mirror reflection can be seen, which is generated in real-time from the photographed cube map. The inside shows the light mapped calculations that have been imported from DIALux.

Additionally a terrain, enhanced with grass textures, was generated so that an interactive walkthrough is possible inside the exhibition space as well as in the immediate surrounding to allow a view from outside into the building.

DISCUSSION

In our work we showed how the processes of design, simulation and visualization could be integrated in the context of light simulation. From our experience this integration can be achieved with three strategies:

- 1) a fully integrated application
- 2) a central application with plug-in modules
- 3) separate applications with data exchange

In light simulation, qualitative results can be obtained very well with strategies 1) and 2). If quantitative results are necessary, at the present situation strategy 3 seems to be the most practical solution.

Additionally, one should consider the roles of the involved persons as the designer/architect might have a focus on qualitative light design, were the dedicated light planner will possess the necessary knowledge of quantitative parameters and the standards that have to be met at certain use cases. The role of the client should not be neglected and strategies should be provided for solutions that can integrate both qualitative and quantitative considerations into easy accessible and navigable applications.

In our project we have chosen strategy 3 to allow the inclusion of a quantitative analysis and to provide a virtual experience for the client with an interactive walkthrough. Unfortunately, the workflow was not as tight as desired, which was mainly caused by lack of data exchange possibility between DIALux and Unity. Nevertheless, we could demonstrate that accurate light simulation solutions can be integrated into a real time visual framework and the resulting application shows a lot of potential for future extensions.

One possible workflow improvement would be to allow data export from DIALux from the 3D view, that already contains distributed light solutions as light-mapped polygons. Possible export formats would be the COLLADA or the FBX file format. Additionally, improvements to the various material concepts could help for a better integration between each software package. As it is possible to integrate libraries for light parameters from various manufacturers – as in DIALux – a similar concept for materials would improve the workflow to a large extent.

In the area of interactive presentation of simulation results it would be desirable to switch between different lighting concepts or to activate individually each pre-defined light source. This should be possible to implement in Unity, as it contains already the concept of light-mapped shaders. Different light settings could be realized by switching between different light-maps and by using multilayered materials.

Another interesting extension would be to use image-based lighting with high dynamic range images (HDRI), which is currently not possible in DIALux, but could be integrated into Unity by writing special shaders.

The improvement of generating skyboxes from the surrounding environments, maybe even as image-based light-source, seems another interesting research direction.

ACKNOWLEDGEMENTS

Thanks to the Department of Architectural Theory for providing the basic 3D model of the Kunsthalle, and to Marcus Bleckert for his support in processing the panoramic images.

REFERENCES

- Koehler, T. et al. 2008. An Evaluation of Contemporary Game Engines: In: Architecture in 'Computro' (26th eCAADe C. Proc.).
- Hoon, M., Kohoe, M. 2003. Enhancing Architectural Communication with Game Engines. In: Proc. ACADIA 22.
- Moloney, J. 2002. Game Engines and Virtual Design Studios. In: Architecture in 'Computro' (Proc. 23th eCAADe).
- Inanici, M. 2001. Application of the State-of-the-Art Computer Simulation and Visualization in Architectural Lighting Research. In: Proc. 7th IBPSA.
- Indraprashta, A., et al. 2008. Constructing Virtual Urban Environment Using Game Engine Technology. In: Architecture in 'Computro' (Proc. 26th eCAADe).
- Zeile, P., et al. 2007. Illumination of urban space using digital simulation methods, exemplified on the UNESCO World Heritage Site of Bamberg. In: Proc. ASCAAD'07, Egypt.
- Lowe, R. 2009. Computer Game Modding for Architecture. In: Proc. CAADRIA'09, Taiwan.
- Roy, G. 2000. A Comparative Study of Lighting Simulation Packages Suitable for use in Architectural Design. Tech.rep. School of Engineering, Murdoch University.
- [cryengine] mycryengine.com
- [linceo] linceovr.seac02.it
- [octane] www.refractivessoftware.com
- [quest3d] quest3d.com
- [silex3d] Silex3D.com
- [unity] unity3d.com
- [unreal] www.udk.com
- [blender] www.blender.org
- [zumtobel] www.zumtobel.com
- [maxwell] www.maxwellrender.com
- [vray] www.chaosgroup.com
- [fry] www.randomcontrol.com/fryrender
- [radiance] radsite.lbl.gov/radiance/
- [relux] relux.biz
- [dialux] www.dialux.com
- [acrobat] www.adobe.com
- [u3d] www.ecma-international.org
- [fbx] usa.autodesk.com
- [collada] www.khronos.org
- [cinema4D] www.maxon.net

INTERACTIVE VIRTUAL MODEL OF BUILDING MANAGEMENT CONTROL: THE LIGHTING SYSTEM

Alcnia Z. Sampaio, Miguel M. Ferreira, and Daniel P. Rosário

Technical University of Lisbon, Dep. of Civil Engineering and Architecture, Lisbon, Portugal

ABSTRACT

A virtual model to support decision-making in the planning of construction maintenance was developed. It gives the capacity to transmit, visually and interactively, information related to the physical behaviour of materials of the components of a building, defined as a function of the time variable. The model helps to identify needs related to the lighting equipment of a building, namely, the cost involved in lamp replacement and control of stock, warnings of the need for periodic inspections and minimization of times when broken bulbs are left in place.

INTRODUCTION

Virtual Reality (VR) is a technology that allows users to explore and manipulate, in real time, computer-generated 3D interactive environment. This technology offers advantages such as: representational fidelity with a high degree of realism caused by the rendering capacity for objects; the ability to look at objects from different viewpoints, and the ability to pick up, examine and modify components within the virtual world; the feeling of presence or immersion, as a consequence of the realism of the images and a high degree of interaction. It makes the VR environment motivating and engaging by giving the users the possibility to be part of the world, and by allowing them to focus entirely on the task in hand.

VR is also seen today as an integrating technology, with great potential for communication between project participants, and most recently, as a tool for the support of decision-making, made possible by the integration of specific computer applications in the virtual model (Khanzode, Fisher and Reed, 2007).

The main aim of a research project, which is now in progress at the Department of Civil Engineering of the Technical University of Lisbon, is to develop virtual models as tools to support decision-making in the planning of construction management and maintenance (Sampaio and Gomes, 2008). The virtual models give the capacity to transmit, visually and interactively, information related to the physical behaviour of materials, components of given

infrastructures, defined as a function of the time variable.

In this context, the research project presents the development of a VR application, involving knowledge of the physical aspects of materials, particularly those which have a short-term function. This knowledge includes their use and environmental factors, and the application integrates these items into digital spatial representations. In this way, the indisputable advantage of the ease of interpretation and perception of space provided by the visualization of 3D models, and of the technical content underlying the real characteristics of the observed elements are brought together. The interactive application allows decisions to be made on conception options in the definition of plans for maintenance and management.

Until now, several elements have been studied and implemented in the same virtual application. The present model includes exterior closure of walls and façades; now in progress is the implementation of the floor element. The characteristics of different surfaces materials have been implemented as have some strategies of maintenance and rehabilitation for these construction elements of a building. The goal is to generate a model that can analyse, from a management perspective, the most important components of the building, a model which must be interactive.

THE VIRTUAL LIGHTING PROTOTYPE

The first component of the virtual prototype concerns the management of lamps in a lighting system. In addition, the analysis of solutions for substitution and inherent cost are predicted, the results being obtained interactively and shown in the virtual environment itself. A first study was made and reported in (Sampaio, Ferreira and Rosário, 2009). Further developments are described in this paper.

Effective integration of advanced visualization capacities is incorporated into the interactive simulation system. The present project integrates a VR system and a computer application implemented in Visual Basic (VB) language. The scholarship holders involved, in this work, are 5th year students of Civil Engineering, who had, therefore, to learn

advanced software of geometric modelling and visualization and to explore the capacities of a RV technology system, the EON Studio (EON, 2009). They had to devise a research bibliography regarding lamp devices usually applied in a building and they also had to develop their programming skills in order to be able to successfully integrate the elements needed in the creation of a virtual lighting system.

The characteristics of different types of bulbs were collated in order to create a database. An adequate database structure had to be implemented, integrating different types of information, needed to create an efficient and accurate virtual model. The VR model links the 3D objects of the model to this database. The database concerns the lighting system management within a collaborative virtual environment and the respective technical data associated with each component of the model is an integral part of the application, allowing the consultation of required data at any point in time.

The database

The visualization of information related to lamps requires an understanding of the essential characteristics of those elements and of the planning strategy of lighting system maintenance. The lighting VR model must support the following essential aspects:

- The system must include a database containing the characteristics of bulb types, with wattage and the corresponding compatibility. These data are important parameters in the drawing up of management schemes. The data base must also include an image of each type of bulb (Figure 1);

Identificação	Técnica	Voltagem	Potência	Duração Média	Eficiência Energética
STANDART	75W E27 230V A55 CL 2CT	230	75	1000	n.d.
MASTER	TL5 HE 35W/865 1SL	230	35	20000	A
MASTERline	ES 45W GU5.3 12V 80 1CT	12	45	5000	n.d.
HalogenA	100W E27 230V G95 OP 1CT	230	100	2000	D

Figure 1. Details of the database of the model.

- A lamp is a replaceable component in a building. As the light source has a discrete lifestyle the VR system must incorporate the control of bulb stock (Figure 2). The model must include alerts for periodic local inspections of the actual state of each bulb in the building. After inspection, there is an automatic process in which, the compatibility of the socket of each broken bulb can be checked on the database, the element replaced, the installation date and the lighting stock updated;

Company	Compatibility	Stock
---------	---------------	-------

Técnica	Marca	Compatibilidade	Stock
	PHILIPS	Casquilho E27	32
	PHILIPS	Casquilho G5	22
	PHILIPS	Casquilho GU5.3	15

Figure 2. Compatibility and stock of bulbs.

- The database has other characteristics relating to, light power, energy efficiency and lighting intensity of each bulb type. Based on these parameters the model can calculate the luminosity in a room or analyse the energy efficiency of the whole building (Figure 3).

Technical	Light power	Energetic
Identificação Técnica	Voltagem	Potência
STANDART 75W E27 230V A55 CL 2CT	230	75
MASTER TL5 HE 35W/865 1SL	230	35
MASTERline ES 45W GU5.3 12V 80 1CT	12	45
HalogenA 100W E27 230V G95 OP 1CT	230	100
	Duração Média	Eficiência Energética
	1000	n.d.
	20000	A
	5000	n.d.
	2000	D

Figure 3. Some characteristics of bulbs.

- The system must calculate as a function of the time parameter the predicted functional life-time of lamps or the time remaining to the next planned inspection. The database therefore, must include for each bulb the installation date, the statistics for its average lifetime, the average number of hours of its predicted functionality and the next periodic inspection date (Figure 4).

Figure 4. Interface used to specify data values.

The 3D geometric model

A 3D geometric model of a building was created. The building consists of a ground-floor, a 1st floor and an attic allocated as living space. The model was generated based on architectural design drawings: plans, vertical views and vertical sections (Figure 5).

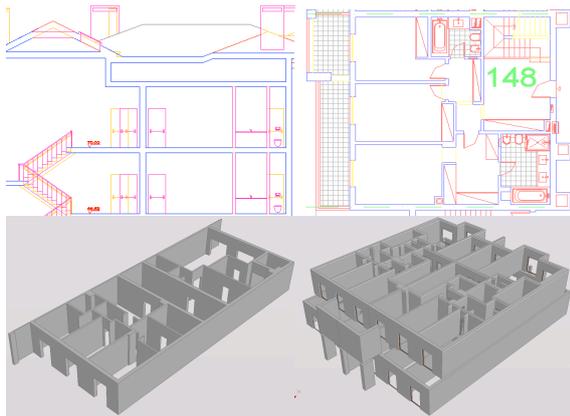


Figure 5. 3D model of the building.

Some lighting equipment considered in the building was also modelled and incorporated into the 3D model (Figure 6). The 3D model was created as 3ds file and exported to EON studio.

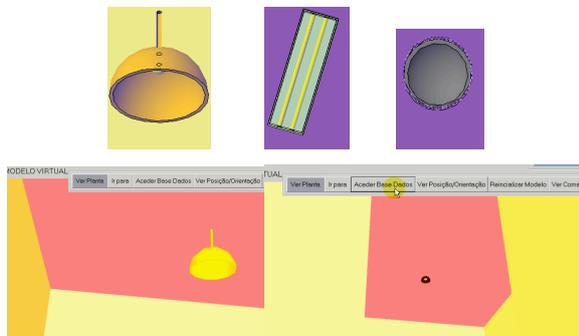


Figure 6. 3D models of lamp devices.

The interface

The process of developing the prototype interface considers the purposes of defining an interactive environment. Human perceptual and cognitive capabilities were taken into account when designing this visualization tool. It uses an interactive 3D visualization system based on the selection of elements directly within the virtual 3D world. The model enables users to pick up lighting elements, associate values to them and modify characteristics within the virtual world, which makes it easy to use.

First, the lamp is identified as a new element and a bulb is associated to it, together with all information on the chosen bulb included in the database. At this point, the lamp is properly identified as a monitored element. For each element the model allows the determination:

- Of the predicted break-time for the bulb based on the installation data and the statistic period of lifetime for that type of bulb;
- Of the temporal data for a specific date of interaction with the model, such as the time remaining to the predicted break-time or the percentage of use (Figure 7).

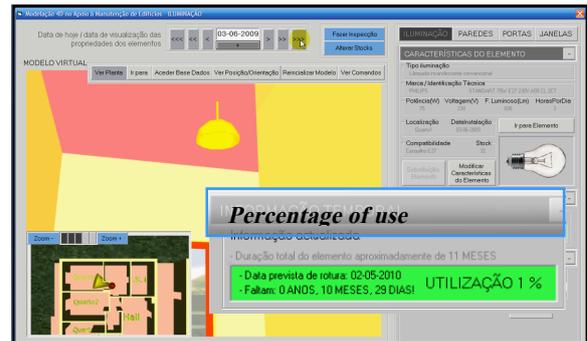


Figure 7. Temporal data.

The percentage of use changes with the date when the model is used. The colour in the interface that shows this information changes accordingly, from green (less than 20%) to red (near 100%). Figure 8 illustrates this capacity of the model. When 100% of use is reached an alert message (in red) is shown on the interface.

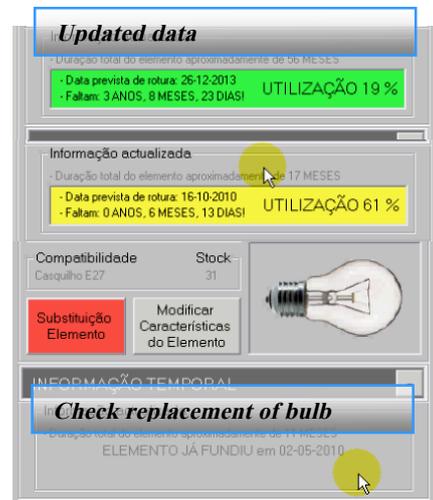


Figure 8. Colours associated to percentage of use

EXPECTED BENEFITS

The virtual model of lighting management can support analyses of preventive maintenance, the application in larger building and the study of the effects of lighting intensity.

Preventive maintenance

All elements of the model must be identified. After that, the model searches by specific characteristics: location within the building (room, kitchen), technical identification (incandescent, halogen), wattage or energetic efficiency.

As a strategy of preventive maintenance the light bulbs could be replaced when the time of useful life is nearing its end. In this way, the non-functional period of the lamp left in place can be minimized. The model can list the elements of the building by predicted break-date order. Figure 9 shows a search by predicted break-date.

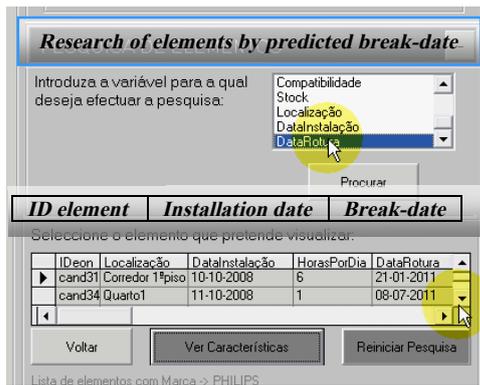


Figure 9. List of elements ordered by break-date.

Variation of lighting intensity

The VR model allows the control of the lighting intensity of each bulb in a room environment. The EON system allows the redefinition of colour obtained by an algorithm of calculation defined as a function of the value of intensity associated with each type of light bulb. A colour is defined as a set of values: R (red), G (green) and B (blue). The algorithm determines a value for each primary colour, defining in this way the colour of the surfaces of the elements in a room. Figure 10 illustrates different colours controlled by RGB values. This capacity allows the luminosity of a room to be analysed.

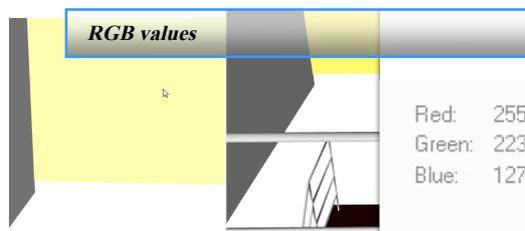


Figure 10. Intensity of the light bulb related to the degree of luminosity

Management support on buildings of great dimensions

The application of the VR prototype in buildings of great dimensions, such as hospitals or schools brings benefits since it can support the control of stocks and the management of periodic inspections. Only the 3D geometric model needs to be defined and then this prototype can be automatically incorporated over it, resulting in a virtual model which allows the management of a great amount of elements concerning the lighting system. The 3D geometric model is usually created by an architect. The link between the 3D model and the management prototype is defined in exactly the same way as the model presented in this paper was.

Because the model has a user-friendly interface it can be used by any manager, who can interact with the model in order to select elements from the building and update the associated information. The system

supports the management of stocks for each type of bulb and alerts to the planning of local visits. Additionally, each lamp can be monitored remotely. For that a sensor must be fixed to each real lamp and connected to the virtual model. In this way any anomaly (deficient functionality or rupture) is transmitted to the virtual model, and the manager is alerted to the occurrence. In a building with large quantity of elements to be monitored the developed prototype is an important support in management.

CONCLUSIONS

A virtual model concerning the management of the lighting system of a building was defined. The presented example concerns only one type of element, the illumination devices, but it was found to be efficient in the identification of elements, in the promotion of alerts of inspection and in the management of stock, all activities related to the maintenance and management of a building. The benefits of using the model are identified as: preventive maintenance, application in large buildings and control of the lighting intensity effect over the wall surface.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors gratefully acknowledge the financial support of the Foundation for Science and Technology, a Governmental Organization for the research project PTDC/ ECM/67748/ 2006, now in progress.

REFERENCES

- Khanzode, A, Fisher, M and Reed, D, 2007, 'Challenges and benefits of implementing virtual design and construction technologies for coordination of mechanical, electrical, and plumbing systems on large healthcare project', Proceedings of CIB 24th W78 Conference, Maribor, Slovenia, pp. 205-212.
- Sampaio, AZ and Gomes, A, 2008, 'Virtual Reality Technology applied as a support tool to the planning of construction maintenance', Project PTDC/ECM/67748/2006, period of application 2008–2010, support FCT.
- Sampaio, AZ, Ferreira, MM and Rosário, DP, 2009, '3D virtual environment used to support lighting system management in a building', Proceedings of CDVE2009, the 6th International Conference on Cooperative Design, Visualization and Engineering, Luxembourg City, Luxembourg, Sept. 20-23, Y. Luo (Ed.): CDVE 2009, LNCS 5738, pp. 177–184.
- EON 2009, 'Introduction to working in EON Studio 5.5', EON Reality Inc. <http://www.eonreality.com/>.

ENERGIEKENNZAHLEN UND ENERGIEAUSWEIS IN ÖSTERREICH RÜCKBLICK – ÜBERBLICK - AUSBLICK

Christian Pöhn und Georg Pommer

MA 39 - Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien, Wien, Österreich

KURZFASSUNG

Der gegenständliche Artikel stellt anlässlich der BauSIM 2010 in Wien eine Zusammenfassung der Ermittlung der Energiekennzahlen für den Energieausweis in Österreich dar. Dies soll dazu dienen, allen TeilnehmerInnen an der Konferenz einen raschen Überblick zu vermitteln und gleichzeitig einen Rückblick auf die bisherige Entwicklung und einen Ausblick auf die zukünftige Entwicklung hinsichtlich Methodik und hinsichtlich Anforderungen zu geben. Diese Entwicklung wird ganz wesentlich durch das Neuerscheinen der Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden im Jahr 2010 und die darin enthaltenen Ergänzungen im Vergleich zu der Fassung aus 2002 geprägt sein.

ABSTRACT

On the occasion of the BauSIM 2010 in Vienna this article gives an overview according the calculation of all energy indicators for the energy certificates in Austria. So, all participants of the conference can get a quick overview and a review of the previous development and a forecast on the methodic solutions and the legal requirements simultaneously. This development has to be seen in accordance to the recast of the energy performance directive for buildings in 2010.

HEIZWÄRMEBEDARF

Grundsätzlich folgt die Ermittlung des Heizwärmebedarfs den existierenden europäischen Regelwerken. Exakt wird der Heizwärmebedarf in Österreich gemäß ÖNORM B 8110-6 ermittelt. Das grundsätzliche Prinzip dabei kann wie folgt dargestellt werden:

Einerseits werden Wärmeverluste ermittelt. Diese Verluste setzen sich aus Verlusten infolge Transmission und infolge Lüftung dar. Die Transmissionsverluste kann man sich einfach als jene Wärmemenge vorstellen, die bei Vorliegen einer Temperaturdifferenz zwischen innen und außen durch Außenbauteile hindurchgeht. Naturgemäß ist dieser Transmissionsverlust umso kleiner, umso größer die vorliegende Wärmedämmung des

betrachteten Bauteils ist. Neben dieser wärmeschutztechnischen Eigenschaft sind die Abmessungen des Bauteils und die vorliegende Temperaturdifferenz Multiplikatoren zur Errechnung des Gesamtwärmestroms. Besonderheiten des Transmissionsverlustes stellen Fälle dar, in denen der Transmissionsverlust indirekt über Pufferräume oder bei erdanliegenden Bauteilen über das Erdreich stattfindet. Darüber hinaus werden in der derzeitigen Ermittlung der Transmissionsverluste auch die Wirkungen von Wärmebrücken berücksichtigt. Allerdings darf hier angemerkt werden, dass die derzeitige Entwicklung Planungen unterstützt, bei denen diese Wärmebrückenverluste minimiert werden. Die Lüftungsverluste kann man sich einfach als jene Wärmemenge vorstellen, die aufzubringen ist, um zugeführte Außenluft mit niedrigerer Temperatur als die Innenluft bei einem notwendigen Luftwechsel zu erwärmen. Vereinfacht wird dies berechnet unter Heranziehung der spezifischen Wärmekapazität der Luft, der Temperaturdifferenz und dem Luftvolumenstrom. Die Annahme eines notwendigen hygienischen Luftwechsels setzt Annahmen über einen typischen Personenbelag voraus.

$$Q_t = Q_T + Q_V$$

Andererseits werden die Wärmegewinne ermittelt. Wärmegewinne bestehen aus inneren Wärmegewinnen infolge der Anwesenheit von Personen und der Wärmeabgabe technischer Geräte und infolge solarer Strahlungsgewinne. Naturgemäß setzen die inneren Gewinne die Annahme typischer Nutzungsbedingungen in Analogie zu dem oben angeführten Luftwechsel voraus. Die solaren Gewinne hängen primär von der wahren Fläche für solaren Strahlungseintrag (vereinfacht: sichtbare Verglasungsflächen) ab. Allerdings sind dabei einerseits die Glasqualität (wie viel Wärmeeintrag durch das Glas zugelassen wird) und mögliche direkte oder indirekte Verschattungen zu berücksichtigen. Hierzu darf angemerkt werden, dass dies in den meisten Fälle idealisierte Annahmen sind.

$$Q_g = Q_i + Q_s$$

Diese Verluste und Gewinne werden unter Berücksichtigung eines Wirkungsgrades, der von der thermischen Trägheit des Gebäudes und vom Gewinn-Verlust-Verhältnis abhängt, monatlich bilanziert. Die Summe dieser monatlichen Beiträge ist der Heizwärmebedarf.

$$Q_h = Q_t + \eta \times Q_g$$

In der Normenfassung 2010 sind ganz wesentliche Punkte ergänzt worden. Grund für diese Ergänzungen ist der unangenehme Umstand, dass bei der Ermittlung des Heizwärmebedarfs im Rahmen von Passivhausplanungen basierend auf dem Passivhausprojektierungspakets (PHPP) des Passivhausinstituts differierende Ergebnisse erzielt werden. Um diese missliche Situation in einem ersten Schritt zu bereinigen, wurden informelle Anmerkungen in die ÖNORM B 8110-6 aufgenommen, die es ermöglichen, ähnliche Ergebnisse, wie gemäß PHPP, zu erhalten. Dazu wurden die Annahmen der inneren Gewinne so reduziert wie im PHPP, als Näherungsmethode anzusehende Temperaturkorrekturfaktoren für indirekte Verluste über Pufferräume oder erdanliegende Bauteile beseitigt, die idealisierten Verschattungsfaktoren „radikal sicher“ gemacht und das Verhältnis zwischen Netto- und Brutto-Grundfläche infolge der unterstellten höheren Dicke der Außenbauteile bei derartigen Bauweisen modifiziert. Erste Vergleichsrechnungen zeigen, dass dadurch ermittelte Ergebnisse sehr gut übereinstimmen oder das PHPP-Ergebnis günstig unterschreiten.

In einer nächsten Überarbeitung wird voraussichtlich das Thema „Verminderung der Lüftungsverluste durch Wärmerückgewinnung“ aus dieser Berechnungsvorschrift entfernt, zumal diese technische Lösung im eigentlichen Sinne eine haustechnische Lösung darstellt und daher bei den haustechnischen Energiekennzahlen zukünftig zu berücksichtigen sein wird. Dazu ist anzumerken, dass dies für den Fall des Vorhandenseins derartiger Lösungen hinkünftig an dieser Stelle – nämlich der des Heizwärmebedarfs – ungünstigere Ergebnisse liefern wird. Es sei allerdings festgehalten, dass dies auf die später folgenden Endergebnisse keinen Einfluss haben wird. Diese Maßnahme ist lediglich eine Folge des Strebens nach sauberer Trennung zwischen bauphysikalischen und anlagentechnischen Lösungen.

Eine Besonderheit der österreichischen Normung zur Ermittlung der Energiekennzahlen drückt sich dadurch aus, dass man frühzeitig erkannt hat, dass zur Validierung von Softwareprogrammen

Validierungsbeispiele angeboten werden müssen, in denen für ausgewählte Beispiele exakt ermittelte Ergebnisse angegeben sind, die durch professionelle Software nachgerechnet und in Übereinstimmung gebracht werden müssen. An dieser Stelle sei erwähnt, dass dieser Prozess einen wichtigen Abstimmungsschritt zwischen Normenschaffenden und NormenanwenderInnen darstellt.

Naturngemäß bedeutet die Überarbeitung auch die Notwendigkeit der Aktualisierung der drei Validierungsbeiblätter. Diese sollen noch im Jahr 2010 erscheinen und um ein viertes Validierungsbeiblatt, das die „Passivhausabschätzung“ beinhaltet, ergänzt werden. Nachdem im Zuge der Berechnung von Energieaufwandszahlen für die Berichterstattung von CO₂-Einsparungen im Rahmen der Vereinbarung gemäß Art. 15a B-VG zwischen dem Bund und den Ländern über Maßnahmen im Gebäudesektor zum Zweck der Reduktion des Ausstoßes an Treibhausgasen durch die MA 39 große Excel-Makros geschrieben wurden, die einerseits eine Variation der Gebäudegeometrie und andererseits eine Variation der Hüllqualität automatisiert für bestimmte Bereiche ermöglichen, sei die folgende Grafik wiedergegeben, welche Heizwärmebedarfswerte von den Bauepochen des 20. Jahrhunderts bis heute darstellt.

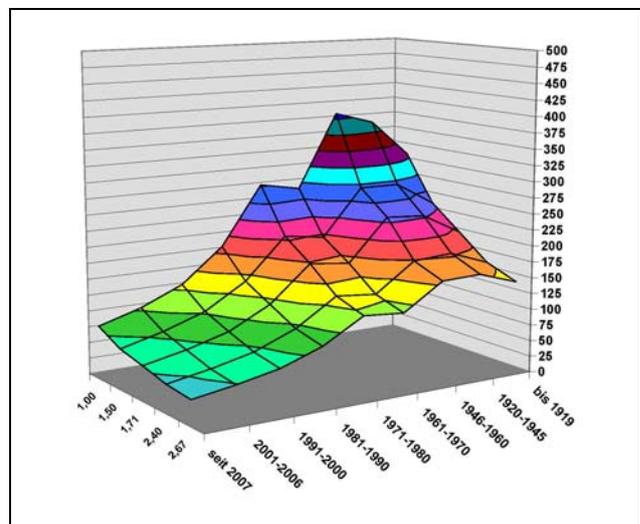


Abbildung 1 Darstellung von Heizwärmebedarfsergebnissen über verschiedenen Bauepochen und über verschiedenen Kompaktheiten.

KÜHLBEDARF

Der Kühlbedarf wird in Österreich gemäß ÖNORM B 8110-6 ermittelt. Das grundsätzliche Prinzip folgt dabei der Ermittlung des Heizwärmebedarfs, wobei nicht der Winterfall, sondern der Sommerfall zur Anwendung kommt. Dabei wird unterstellt, dass keine Verluste mehr vorhanden sind, aber im

Gegenzug möglicherweise „ungewünschte“ Gewinne. Diese ungewünschten Gewinne sind jene Gewinne, die jenen Teil darstellen, der nicht rückgewinnbar ist.

$$Q_c = (1 - \eta) \times Q_g \times f_{\text{corr}}$$

ANFORDERUNGEN AN DEN HEIZWÄRME- UND KÜHLBEDARF

Die Anforderungen an den Heizwärme- und Kühlbedarf aus dem Jahr 2007 waren mit der 26er- und 19er-Linie für den Heizwärmebedarf und 1 kWh/m³a für den Kühlbedarf im Bereich Neubau bzw. mit der 34er- und 25er-Linie für den Heizwärmebedarf und 2 kWh/m³a für den Kühlbedarf im Bereich Sanierung festgelegt worden. Parallel dazu wurde in den Jahren 2007 und 2008 eine neue Vereinbarung gemäß Art. 15a B-VG zwischen dem Bund und den Ländern über Maßnahmen im Gebäudesektor zum Zweck der Reduktion des Ausstoßes an Treibhausgasen beschlossen, die bereits Anforderungen für das Jahr 2012 im Bereich Neubau vorsieht. Daraus entsteht naturgemäß die Notwendigkeit, die OIB-Anforderungen für das Jahr 2012 an die WBF-Anforderungen insofern anzupassen, als der Abstand zwischen diesen beiden Anforderungsniveaus in etwa den bisherigen Abständen entsprechen sollte. Nachdem dies am allerbesten mit der 16er-Linie erreicht werden kann, ist dies auch der derzeit vorliegende Vorschlag.

$$Q_{h,\text{max},2010} = 19 \times (1 + 2,50/\ell_c) \text{ [kWh/m}^2\text{a]}$$

$$Q_{h,\text{max},2012,\text{Vorschlag}} = 16 \times (1 + 2,50/\ell_c) \text{ [kWh/m}^2\text{a]}$$

$$Q_{c,\text{max}}^* = 1 \text{ [kWh/m}^3\text{a]}$$

An dieser Stelle sei der österreichische Sprachgebrauch #-Linie erklärt: Anforderungslinien werden in Österreich immer durch Multiplikation des Terms $(1 + \text{const}/\ell_c)$ mit einem Wert # dargestellt. Der Term berücksichtigt dabei einerseits die Kompaktheit des Gebäudes und andererseits die mittlere thermische Qualität der Gebäudehülle. Die Linie findet somit einen Ausgleich zwischen hoch- und niederkompakten Gebäuden.

WARMWASSERWÄRMEBEDARF

Beim Warmwasserwärmebedarf gab es in der Normenrevision praktisch keine Änderungen. Lediglich ein zusätzliches Nutzungsprofil „Hallenbäder“ wurde in der ÖNORM B 8110-5 ergänzt.

RAUMLUFTTECHNIK-ENERGIEBEDARF

Beim Raumluftechnikenergiebedarf wurde die bisher nur äußerst schwer verständliche Normenfassung in eine gut lesbare und gut verständliche Normenfassung umgewandelt und zahlreiche Ergänzungen vorgenommen. Das Prinzip zur Berechnung des Raumluftechnikenergiebedarfes für das Heizen, Kühlen, Befeuchten und Entfeuchten und den zugehörigen Energiebedarf für die Luftförderung wurde grundsätzlich beibehalten. Dabei wird einerseits in Abhängigkeit vom Nutzungsprofil des Gebäudes und der angenommenen Anlage (KVS- oder VVS-Anlage mit/ohne thermodynamische Funktionen) ein Luftvolumenstrom berechnet und anschließend mit spezifischen Energiekennwerten für den jeweiligen Anlagentyp unter Berücksichtigung von Wärme- und Feuchterückgewinnungsmöglichkeiten multipliziert. Das Prinzip folgt dabei der Lösung in den deutschen Regelwerken. Allerdings ist das österreichische Spezifikum dabei, das Ergebnis in einen hygienisch notwendigen Teil und in einen darüber hinausgehenden Teil – entweder Komfortzwecken dienend oder zu Heiz-, Kühl-, Be- oder Entfeuchtungsmöglichkeiten – aufzuteilen.

Vorgesehen ist in dieser Norm auch bereits die Möglichkeit der standortabhängigen Berechnung der Energiekennwerte, die im derzeitigen Modell für den Heizfall für den Standort Klagenfurt und für den Kühlfall für den Standort Wien angeboten werden. Dies wird ermöglicht durch ein halbsynthetisches Klimadatenmodell für Temperatur und Luftfeuchte, welches in der MA 39 im Rahmen zweier Forschungsprojekte entwickelt wurde und bereits in der ÖNORM B 8110-5:2010 enthalten ist. Dazu befindet sich ein Normenvorschlag in Vorbereitung.

Hier darf ebenfalls im Lauf des Jahres 2010 ein Validierungsbeiblatt erwartet werden.

BELEUCHTUNGSENERGIEBEDARF

Hinsichtlich des Beleuchtungsenergiebedarfs ist man in der ÖNORM H 5059:2010 dazu übergegangen, nur mehr eine Defaultwertetabelle für die Nutzungsprofile anzuführen, um das Hauptaugenmerk auf die europäischen Normen zur Berechnung des Beleuchtungsenergiebedarfs zu lenken. Allerdings werden nationale Anwendungsdokumente und insbesondere Validierungsnormen erwartet.

KLIMADATENMODELL

Die ÖNORM B 8110-5 und das darin enthaltene Klimadatenmodell wurde um ein halbsynthetisches Klimadatenmodell zur stundenweisen Berechnung der Temperatur und Luftfeuchte ergänzt. Darüber

hinaus wurde in zwei Beiblättern einerseits die Normaußentemperatur und andererseits jene Außentemperatur, die statistisch an 13 Tagen pro Jahr überschritten wird, fertiggestellt. Insbesondere letzteres Beiblatt wird hinkünftig einen wesentlichen Inputparameter für den simulationstechnischen Nachweis der Sommertauglichkeit darstellen.

- Temperaturmodell:

Nach der Analyse von 27 Testreferenzjahren aus den 7 Klimaregionen (ausgewählt in Abstimmung mit der ZAMG) konnte folgende Näherung gefunden werden:

Es wird einer Tagesschwingung mit der Tagesamplitude – wie bisher – eine Monatsschwingung mit der Monatsamplitude überlagert. Die Amplituden sind der ÖNORM B 8110-5 zu entnehmen. Dabei ist darauf zu achten, dass der lineare Ausgleich bezüglich der Monatsmitteltemperatur mittelwertstreu bleibt. Dies gilt als erfüllt, wenn lineare Ausgleiche durch die Temperatur des Monatsfünfzehnten derart gelegt werden, dass die Steigung je Monat konstant ist und die Temperatur des Monatsletzten mit der Temperatur des Monatsersten des darauffolgenden Monats ident ist. Sollte die Abweichung vom Mittelwert des Monatsersten bzw. -letzten vom Monatsmittelwert größer sein als die Monatsamplitude, so ist die Monatsamplitude gleich null zu setzen. Für alle anderen Fälle ist die Monatsamplitude um das Maximum der Abweichung des Monatsersten bzw. -letzten zu vermindern.

- Feuchtemodell:

Nach der Analyse von 27 Testreferenzjahren aus den 7 Klimaregionen (ausgewählt in Abstimmung mit der ZAMG) konnte folgende Näherung gefunden werden:

Es wird einem Jahresmittelwert eine Jahresschwingung mit einer Jahresamplitude mit einer Monatsschwingung mit einer Monatsamplitude und einer Tagesschwingung mit einer Tagesamplitude überlagert. Die Amplituden sind der ÖNORM B 8110-5 zu entnehmen.

Zur Bestimmung des Monatsmittelwertes der relativen Luftfeuchte sind die Stundenwerte des Wasserdampfpartialdrucks zu berechnen; aus den Stundenwerten der Wasserdampfpartialdrücke ist der Monatsmittelwert des Wasserdampfpartialdrucks zu errechnen und mit Hilfe des Monatsmittelwertes der Außentemperatur ist der Monatsmittelwert der relativen Luftfeuchte zu bestimmen.

Nachdem in den letzten Jahren mehrmals Diskussionen entstanden sind, warum der „alte“ österreichische Klimadatenkatalog aus den Jahren 1950 bis 1980 nicht weitergeführt wird, haben sich

das Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend und einige Bundesländer dazu entschlossen, Finanzmittel zur Verfügung zu stellen, um diese Arbeit fortzuführen. Dies bedeutet nach Abschluss der Arbeiten die Notwendigkeit der normativen Aufarbeitung.

ENDENERGIEBEDARF

Die in der Folge angeführten beiden Normen zur Ermittlung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs stellen vermutlich die letzte Fassung dieser Normen dar, in denen der Begriff des Endenergiebedarfs den letzten Ermittlungsschritt darstellt.

In Zukunft – und dies muss vor dem Hintergrund des Neuerscheinens der EPBD:2010 bereits heuer geschehen – wird wohl der Primärenergiebedarf und die CO₂-Emissionen kurzfristig zu ergänzen sein. Aber mittelfristig wird die Abfolge „Nutzenergiebedarf – Endenergiebedarf – Primärenergiebedarf – CO₂-Emissionen“ durch die neue Abfolge „Nutzenergiebedarf – Endenergiebedarf – Lieferenergiebedarf – Primärenergiebedarf – CO₂-Emissionen“ ersetzt werden.

HEIZENERGIEBEDARF

Die Ermittlung des Heizenergiebedarfs in der Fassung ÖNORM H 5056:2010 folgt den Grundsätzen der Fassung aus dem Jahr 2007. Die wesentlichste Änderung stellt das Kapitel über Wärmebereitstellung mittels Wärmepumpen dar. Hier wurden einerseits die Berechnungsschritte überarbeitet und andererseits fehlende Wärmepumpentechnologien ergänzt. Dazu darf angemerkt werden, dass im oben zitierten Forschungsprojekt 2009 in der MA 39 dazu ein Schulungstool entwickelt wurde.

Die drei existierenden Validierungsbeispiele sind gemäß der Neufassung zu überarbeiten. Hinzu kommt noch im Jahr 2010 ein viertes Validierungsbeispiel für den Bereich Wärmepumpentechnologie und Solarthermie.

KÜHLENERGIEBEDARF

Die Ermittlung des Kühlenergiebedarfs in der ÖNORM H 5058:2010 wurde gegenüber der Fassung aus dem Jahr 2007 lediglich redaktionell überarbeitet.

Ein Validierungsbeispiel ist zu ergänzen.

PRIMÄRENERGIEBEDARF UND CO₂-EMISSIONEN

Zur Berechnung des Primärenergiebedarfs und der CO₂-Emissionen ist das Vorhandensein von Konversionsfaktoren notwendig. Aus heutiger Sicht darf berichtet werden, dass dies für die Energieträger

Kohle, Öl und Gas kein allzu schwieriges Unterfangen darstellt. Auch für zahlreiche biomassebasierenden Energieträger ist dies ein offensichtlich lösbares Problem. Viel schwieriger stellt sich diese Fragestellung für den Energieträger Strom und den Energieträger Fernwärme dar. Für den Energieträger Strom gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten, wobei insbesondere zwei Möglichkeiten derzeit in Diskussion stehen, nämlich einerseits der Österreich-Mix und andererseits der UCTE-Mix. Aus heutiger Sicht darf vermutet werden, dass dem UCTE-Mix der Vorzug gegeben werden wird. Für den Energieträger Fernwärme muss leider zur Kenntnis genommen werden, dass die in Österreich existierenden Nah- und Fernwärmenetze und deren zugehörige Wärmeeinspeisung nicht unbedingt einfach vergleichbar sind. Daher darf aus heutiger Sicht für den Bereich Fernwärme zumindest ein bundesländerweise, wenn nicht netzweise, verschiedenes Wertepaar für den Primärenergie- und CO₂-Konversionsfaktor erwartet werden.

ENERGIEAUSWEIS

Bisher hat der Energieausweis für Wohngebäude folgendes Aussehen:

Abbildung 2 Erste Seite des Energieausweises für Wohngebäude (Fassung 2007).

Dabei wird auf der ersten Seite das Labeling dargestellt und auf einer Folgeseite sämtliche

Energiekennzahlen. Aus den Abbildungen ist beispielhaft der Energieausweis für Wohngebäude zu erkennen. Selbstverständlich gibt es eine weitere Fassung für Nicht-Wohngebäude, wobei eben dort die zweite Seite wesentlich umfassender ist.

EXCEL-SCHULUNGSTOOL

Durch die MA 39 wurden zahlreiche Excel-Schulungstools erstellt, die zum freien Download auf der OIB-Homepage angeboten werden. Selbstverständlich wurden mit diesen Schulungstools auch die Ergebnisse der Validierungsbeispiele ermittelt. Sie stellen mittlerweile einen unverzichtbaren Teil der Methodenentwicklung dar und werden insbesondere zu Ausbildungszwecken und bei Präsentationen verwendet.

Abbildung 3 Zweite Seite des Energieausweises für Wohngebäude (Fassung 2007).

LITERATUR

- Pech, A. und Pöhn, C., Baukonstruktionen Bd.1 - Bauphysik, Wien, 2004, Springer
- Pöhn, C., Pech, A., Bednar, T. und Streicher, W. Baukonstruktionen Bd.1/1 – Energieeinsparung und Wärmeschutz / Energieausweis - Gesamtenergieeffizienz, Wien, 2007, Springer

- Riccabona, C., Bednar, T., Baukonstruktionslehre 4 – Bauphysik, Wien, 2008, Manz
- OIB-Richtlinie 6 „Energieeinsparung und Wärmeschutz“, Wien, April 2007, OIB
- OIB-Leitfaden „Energietechnisches Verhalten von Gebäuden“, Version 2.6, Wien, April 2007, OIB
- ÖNORM B 8110-1 Wärmeschutz im Hochbau – Teil 1: Anforderungen an den Wärmeschutz und Deklaration des Wärmeschutzes von Gebäuden / Gebäudeteilen – Heizwärmebedarf und Kühlbedarf
- ÖNORM B 8110-5 Wärmeschutz im Hochbau – Teil 5: Klimamodell und Nutzungsprofile
- ÖNORM B 8110-5 Bbl 1 Wärmeschutz im Hochbau - Teil 5: Klimamodell und Nutzungsprofile –
 Beiblatt 1: Normaußentemperaturen
- ÖNORM B 8110-5 Bbl 2 Wärmeschutz im Hochbau - Teil 5: Klimamodell und Nutzungsprofile -
 Beiblatt 2: Außenlufttemperatur mit einer Überschreitungshäufigkeit von 130 Tagen in 10 Jahren
- ÖNORM B 8110-6 Wärmeschutz im Hochbau – Teil 6: Grundlagen und Nachweisverfahren – Heizwärmebedarf und Kühlbedarf
- ÖNORM B 8110-6 Bbl 1 Wärmeschutz im Hochbau – Teil 6: Grundlagen und Nachweisverfahren – Heizwärmebedarf und Kühlbedarf – Beiblatt 1: Einfamilienhaus – Validierungsbeispiele für die Berechnung des Heizwärmebedarfs
- ÖNORM B 8110-6 Bbl 2 Wärmeschutz im Hochbau – Teil 6: Grundlagen und Nachweisverfahren – Heizwärmebedarf und Kühlbedarf – Beiblatt 2: Mehrfamilienhaus – Validierungsbeispiele für die Berechnung des Heizwärmebedarfs
- ÖNORM B 8110-6 Bbl 3 Wärmeschutz im Hochbau – Teil 6: Grundlagen und Nachweisverfahren – Heizwärmebedarf und Kühlbedarf – Beiblatt 3: Nicht-Wohngebäude – Validierungsbeispiele für die Berechnung des Heizwärme- und Kühlbedarfs
- ÖNORM B 8110-6 Bbl 4 Wärmeschutz im Hochbau – Teil 6: Grundlagen und Nachweisverfahren – Heizwärmebedarf und Kühlbedarf – Beiblatt 4: Validierungsbeispiele für die Anwendung der Passivhausabschätzung (in Planung)
- ÖNORM H 5056 Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden - Heiztechnik-Energiebedarf
- ÖNORM H 5056 Bbl 1 Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden – Heiztechnik-Energiebedarf
 Beiblatt 1: Validierungsbeispiel - Einfamilienhaus
- ÖNORM H 5056 Bbl 2 Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden – Heiztechnik-Energiebedarf
 Beiblatt 2: Mehrfamilienhaus
- ÖNORM H 5056 Bbl 3 Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden – Heiztechnik-Energiebedarf
 Beiblatt 3: Nicht-Wohngebäude
- ÖNORM H 5056 Bbl 4 Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden – Heiztechnik-Energiebedarf
 Beiblatt 4: Validierungsbeispiele für die Berechnung des Energiebedarfs unter Verwendung von Wärmepumpen und Solarthermie
- ÖNORM H 5057 Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden - Raumluftechnik-Energiebedarf für Wohn- und Nichtwohngebäuden
- ÖNORM H 5057 Bbl 1 Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden – Raumluftechnik-Energiebedarf für Wohn- und Nicht-Wohngebäude – Beiblatt 1: Bürogebäude - Validierungsbeispiel
- ÖNORM H 5057 Bbl 2 Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden – Raumluftechnik-Energiebedarf für Wohn- und Nicht-Wohngebäude – Beiblatt 2: Standortabhängige Berechnung der spezifischen Energie-Kennwerte
- ÖNORM H 5058 Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden - Kühltechnik-Energiebedarf
- ÖNORM H 5058 Bbl 1 Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden – Kühltechnik-Energiebedarf -
 Beiblatt 1: Bürogebäude – Validierungsbeispiel
- ÖNORM H 5059 Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden – Beleuchtungsenergiebedarf

EIN VERGLEICH DER ERGEBNISSE VON STATIONÄRER UND INSTATIONÄRER BERECHNUNG VON THERMISCHEN ENERGIEKENNZAHLEN ANHAND BESTEHENDER OBJEKTE IN WIEN

Ulrich Pont¹, Bernhard Sommer², und Ardeshir Mahdavi¹
¹Abteilung Bauphysik und Bauökologie, TU Wien, Wien, Österreich
²Energy Design, Universität für angewandte Kunst, Wien, Österreich

KURZFASSUNG

Im vorliegenden Beitrag werden die Resultate eines stationären Berechnungsverfahrens (nach OIB-Richtlinie Energieeinsparung und Wärmeschutz, April 2007 bzw. ÖNORM B 8110) für den Heizwärmebedarf von Gebäuden mit den Ergebnissen eines numerischen dynamischen Berechnungs-Verfahrens verglichen. Die Berechnungen wurden an sieben Objekten in Wien vorgenommen, und wurden unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Auflösung der Eingabedaten miteinander verglichen. Die verschiedenen Eingabedaten werden ebenfalls einander gegenüber gestellt, und es wird gezeigt, wie man dennoch – durch Berechnung bzw. Anpassung der Eingabedaten für das stationäre Verfahren – einen rudimentären Resultatvergleich vornehmen kann.

ABSTRACT

This paper compares the different results of a stationary calculation model and a dynamic simulation for heating demand of buildings on the basis of seven real buildings in Vienna. The simple calculation model of OIB RL 6 is the Austrian Standard for creating energy-certificates for buildings, and has a very low-scaling level of input-data, while the dynamic calculation delivers more accurate results following the higher resolution of its input data. A comparison between the input data of both methods is provided, and possible ways of minimizing the effect of resolution differences on the results.

EINFÜHRUNG

Seit 1.1.2009 sind in Österreich Gebäude mit Wohn- und Arbeitsnutzung mit einem sogenannten Energieausweis für Gebäude zu versehen. Das vorgesehene Verfahren wurde durch das österreichische Institut für Bautechnik (OIB) in einer Richtlinie vorgeschrieben, und basiert auf der ÖNORM B 8110. Es handelt sich um ein stationäres Verfahren, dessen Intention in der Vergleichbarkeit verschiedener Objekte untereinander liegt.

In der Praxis wird dieses Verfahren in Österreich auch zur Planung bei Neubauten und Adaptierung

von Bestandsbauten verwendet, da die Gebietskörperschaften bestimmte Kriterien für Förderungen und Baubewilligungen Nachweise nach dieser Berechnungsmethode verlangen.

Die Ergebnisse eines solchen Verfahrens sind durch die geringe Auflösung der Eingabedaten und das einfache Rechenverfahren von beschränkter Aussagekraft. Genauere Resultate sind durch Einsatz von numerischen dynamischen Simulationsverfahren zu erwarten, da hier detaillierte und umfangreiche Eingabedaten verwendet werden können.

Um abschätzen zu können, wie groß die Unterschiede zwischen den Resultaten des Energieausweisverfahrens und einem dynamischen Berechnungsverfahren sind, wurden für eine Zahl von Bestandsobjekten in Österreich beide Verfahren angewendet und die Resultate (Heizwärmebedarf) verglichen.

Weiters weist der Beitrag auf die unterschiedlichen Qualitätsanforderungen der Eingabedaten bei Bauteilen und Wetterdaten hin, und zeigt, wie diese miteinander verbunden werden können, so dass die Unterschiede in den Ergebnissen vorrangig auf dem Berechnungsverfahren und nicht auf Datenunterschieden beruhen.

HINTERGRÜNDE ZUM ENERGIEAUSWEIS

Rechtliche Hintergründe: Das Energieausweis-Vorlage-Gesetz

Wie im Energieausweis-Vorlagegesetz – der österreichischen Umsetzung der RL 2002/91/EG – ausformuliert (§2,3,7), müssen Hauseigentümer und Vermieter seit dem Inkrafttreten dieses Gesetzes im Jahre 2006 Energieausweise erstellen, bzw. erstellen lassen, um diesem Gesetz zu entsprechen, bzw. im Falle der Veräußerung einer Liegenschaft die entsprechenden Unterlagen vorweisen zu können.

Aktuelle Anforderungen an Energieausweise:

Die aktuellen Anforderungen an einen Energieausweis hat das österreichische Institut für

Bautechnik in der OIB Richtlinie 6 „Energieeinsparung und Wärmeschutz“ vom April 2007 definiert.

Die notwendigen Berechnungen für den Energieausweis können und sollen anhand von EDV-Werkzeugen, wie z.B. Archiphysik durchgeführt werden. Die in diesem Paper beschriebenen Berechnungen wurden mit Archiphysik in der Version 08.100 durchgeführt. Der Großteil dieser Software-Pakete besitzt sowohl eine Schnittstelle für numerische Eingaben, d.h. es ist vorher eine Aufbereitung der Eingabedaten erforderlich, als auch die Möglichkeit, zumindestens rudimentäre Daten aus anderen Softwareapplikationen, wie z.B. von CAD-Paketen zu übernehmen. Im Zuge des zunehmenden Building-Information-Modellings ist das speziell für Neubauten interessant, da bei diesen die Pläne fast immer digital vorliegen und eine einfache und für Architekten attraktive Parallelschaltung von Entwurf und Berechnung möglich ist.

Die österreichischen Gebietskörperschaften koppeln an den Energieausweis Baubewilligungen und Förderungen. Exemplarisch sei auf die Wiener Bauordnung §63 und §118 bzw. auf die Wiener Bautechnikverordnung 2008 betreffend der Baubewilligung, und auf die Förderungsrichtlinie „Niedrigenergiehaus mit verbessertem Wärmeschutz NEH“ (Wiener Gemeinderatsbeschluss vom 10.02.2010) verwiesen. In allen genannten Dokumenten wird ein Energieausweis verlangt, im letztgenannten ist es auch notwendig bestimmte Werte zu erreichen, um Anrecht auf eine Förderung durch die Gebietskörperschaft zu haben.

Abbildung 1: Beispiel für die grafische Darstellung des Heizwärmebedarfs in einem Energieausweis



Da in der genannten Bautechnikverordnung die jeweilig gültige OIB Richtlinie erwähnt wird, und in dieser die Anforderungen an die thermische Gebäudehülle und an das Nachweisverfahren genannt sind, ist es in Wien (und in weiten Teilen

Österreichs) notwendig einen Energieausweis nach dem OIB-Verfahren zu erstellen, um überhaupt einen Neu-, Zu- oder Umbau vornehmen zu können.

Im Energieausweis werden Objekte anhand ihres auf die beheizte Bruttogeschossfläche bezogenen Heizwärmebedarfs in Klassen (A++ für Gebäude mit einem HWB kleiner 10 kWh.m².a⁻¹ bis G für Gebäude mit einem HWB größer 250 kWh.m².a⁻¹.) eingeteilt. Die grafische Darstellung dieser Einteilung – siehe Abbildung 1 –, im Volksmund „Kühlschrankpickerl“ genannt, ist – zumindestens bei öffentlichen Gebäuden – öffentlich zugänglich zu machen.

In der OIB-Richtlinie werden auch verbindlich **zwei Verbesserungsmaßnahmen** gefordert, die für Bestandsobjekte durchzuführen sind:

- Auflistung der notwendigen Bauteilsanierungsmaßnahmen, um das Gebäude in die nächst bessere Klasse zu bringen
- Auflistung der Maßnahmen an den einzelnen Bauteilen des Gebäudes, um die Bauteile auf die in der OIB-Richtlinie aufgelisteten U-Werte für Neubauten zu bringen.

Notwendige Eingabedaten für die Erstellung eines Energieausweises:

Im OIB-Verfahren zur Erstellung eines Energieausweises sind **folgende Eingabedaten notwendig:**

- Jahresbezogene Heizgradtage 12/20 (im folgenden mit HGT_{12/20} bezeichnet), welche die Periode determinieren, in der die Heizung in einem Gebäude läuft.
- Monatliche Wetterdaten, bestehend aus Durchschnittsaußentemperatur und Strahlungssummen für alle Himmelsrichtungen und Horizontalflächen. Diese werden anhand eines Klimadatenkataloges, der alle Ort in Österreich abdeckt, von den meisten Berechnungsprogrammen zur Verfügung gestellt, so auch von Archiphysik.
- Bei den im Gebäude vorhandenen Bauteilen müssen die U-Werte bekannt sein, oder alle Bauteilschichten vorhanden sein, um den resultierenden U-Wert eines Bauteils berechnen zu können. (Auch dies ist in den meisten Programmen möglich, bzw. sogar gewünscht)
- Die Gebäudegeometrie wird numerisch als Flächen eingesetzt, weiters sind beheizte Bruttogeschossfläche und Bruttovolumen als Eingangsparameter erforderlich. Einige Programme beherrschen auch das Übernehmen der Flächen aus CAD-Plänen, dies ist aber für den Bestand, bei dem meist Analoge Pläne vorliegen nicht immer gleich interessant.

Das Ergebnis der Berechnung des Energieausweises

Bei der Berechnung nach dem OIB-Verfahren ist das bedeutsamste Ergebnis der Heizwärmebedarf des Referenzklimas (Das ist das jeweilige für eine Region vorgesehene Klima nach ÖNORM B 8110). Dieser wird kann sowohl als Gesamtwert ($\text{kWh}\cdot\text{a}^{-1}$), wie auch auf die Bruttogeschossfläche bezogen ($\text{kWh}\cdot\text{a}^{-1}$) berechnet werden.

Weitere Ergebnisse können, je nach vorhandenen Eingabedaten, der Endenergiebedarf, der CO₂-Einsatz, der Heiztechnikenergiebedarf und andere sein. Im vorliegenden Beitrag wurden die vor allem die HWB-Ergebnisse herangezogen

DURCHFÜHRUNG DER BERECHNUNG MIT DEM OIB-VERFAHREN

Da für die gewählten Objekte auch kommerziell ein Energieausweis erstellt wurde, wurde folgender bewährter Arbeitsablauf durchgeführt (Berechnung mit Archiphysik):

- Organisation der analogen planlichen Unterlagen der Objekte vom Hausverwalter oder Besitzer (Digitale Pläne sind so gut wie nie vorhanden)
- Gebäudebegehung mit fotografischer Objektdokumentation
- Ermitteln der Bauteilaufbauten bzw. Feststellen des Fehlens der Bauteilaufbauten
- Erstellung einer Tabellenkalkulation mit den Geometrie-Eingabedaten für Archiphysik
- Geometrie-Eingabe in Archiphysik
- Randbedingungeinstellung in Archiphysik
- Auslesen des fertigen Energieausweises.

Der Zwischenschritt über die Tabellenkalkulation zur Geometrie-Ermittlung wurde aus zeitökonomischen Gründen gewählt – die Erstellung eines digitalen Modells aus teilweise sehr unvollständigen Plänen in einem CAD-Paket, um dann erst recht die Fläche im Programm abzumessen, hätte sich mit gleichem Output als größerer Aufwand erwiesen.

Im Falle des Fehlens von akkuraten Bauteilaufbauten bzw. U-Werten stellt das OIB in einem Leitfaden sogenannte Default-Werte zur Verfügung, die anhand des Baualters einen realistischen U-Wert liefern.

Unter Randbedingungen sind Festlegungen zu Lüftungsverhalten, Gebäudenutzung, Heizsystem etc. anhand von vorgegebenen Profilen einzustellen, die von der ÖNORM B 8110 vorgegeben sind, beispielsweise ist für interne Gewinne ein Wert von $3,75 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ vorgesehen

HINTERGRÜNDE ZUM NUMERISCH-DYNAMISCHEN VERFAHREN.

Kurzeinführung:

Die dynamischen Berechnungen in diesem Beitrag wurden mit der Software EDSL A-TAS in der Version 9.1.3 durchgeführt (Im folgenden wird die Software nur mit TAS bezeichnet). Die Schlüsselfunktionen sollen hier kurz - entsprechend dem englischsprachigen TAS-Manual – aufgezeigt werden:

Die Berechnungsmethode von TAS entspricht einer dynamischen Simulation, d.h. es werden nicht wie im stationären OIB-Verfahren für einen längeren Zeitraum (im OIB-Verfahren: 1 Jahr bzw. 1 Monat) bestimmte Werte als dauerhaft angesetzt, sondern es wird ein Jahr aufgelöst in Einzelstunden betrachtet. Es kommen dabei keine Extremwerte, sondern reale bzw. realistische Werte für die Umgebungsbedingungen als Einflussparameter zum Einsatz, die aber dafür für jede Stunde des Jahres eingesetzt werden.

Input-/ Outputdaten:

Unter anderem werden dann **folgende Größen** im Zuge einer solchen Simulation berechnet:

- Transmission / Wärmeleitung
- konvektive Einflüsse auf die Wärmeverteilung
- Strahlungsaustausch gemäß den physikalischen Gesetzen (Stefan-Boltzmann-Gesetz)
- Solare Gewinne
- Innenraumbedingungen (Interne Gewinne durch Geräte, Belegung, Aktivität);
- Ventilation und Infiltration
- Anlagentechnik der HVAC-Anlagen.

Entsprechend dieser Berechnungen sind zumindestens **folgende Eingabeparameter erforderlich:**

Stündliche Wetterdaten des entsprechenden Standortes (definiert durch geographischen Längen- und Breitengrad), bestehend aus:

- Global- und Diffusstrahlung
- Wolkenbedeckung
- Außentemperatur (Trockenkugeltemperatur)
- rel. Luftfeuchtigkeit
- Windgeschwindigkeit
- Windrichtung

Kennwerte der Bauteile, speziell die verwendeten Baumaterialien mit:

- Eingebauter Schichtdicke
- Wärmeleitfähigkeit

- Spezifischer Wärmekapazität
- Dichte
- Diffusionswiderstand
- Solarer Absorption/Reflexions-Eigenschaft
- Thermischer Absorption/Reflexions-Eigenschaft

Geometrische Eingabedaten:

Im Gegensatz zum stationären Verfahren liegt der Berechnung ein im programm-eigenen 3D-Modeller zu erstellendes Eingabemodell zu Grunde, welches dann mit den vorgenannten Parametern betreffend Bauteilen und Wetter bespielt werden muss um Ergebnisse zu erhalten. Ein Import von CAD-Plänen oder Underlays ist bei der verwendeten Software nur als zweidimensionale Unterlage möglich.

Die **Resultate** des dynamischen Verfahrens sind ebenfalls stundenweise skaliert. Um eine Vergleichbarkeit mit dem OIB-Verfahren zu erzielen, können die entsprechenden stundenbezogenen „Heating Loads“ (welche in der Leistungseinheit Watt ausgegeben werden), über eine einfache Berechnung in einen jahresbezogenen bzw. jahres- und flächenbezogenen Heizwärmebedarf in Kilowattstunden pro Jahr (bzw. pro Quadratmeter und Jahr) umgewandelt werden. Diese Umformung wurde in einer Tabellenkalkulation vorgenommen und funktioniert nach Formel [1]:

$$HWB_{year} = \sum_{n=1}^{8760} hourlyload_n \frac{3600}{3600000} \quad [1]$$

UNTERSUCHTE OBJEKTE

Für vorliegenden Beitrag wurden sieben Objekte in Wien ausgewählt, davon fünf mit sehr ähnlicher Gebäude-Struktur und abweichenden Ausrichtungen. (Objekt T1 – T7). Die Objekte T6 und T7 befinden sich in innerstädtischer Verbauung mit unmittelbar anschließenden Nachbarn, während die Objekte T1 bis T5 freistehende Monolithen sind. In Tabelle 1 findet sich eine Aufstellung der verwendeten Gebäude, mit einigen gebäudespezifischen Daten:

Diese Objekte wurden wegen Ihres ähnlichen Baualters und der einfachen geometrischen Formensprache der 1950er bis 1980er Jahre gewählt, um eine einfache Modellierbarkeit in beiden Verfahren zu gewährleisten. Außerdem wurden sie ausgewählt, da eine gute Plandokumentation, aber keine Bauteilaufbauten vorhanden waren (siehe „Durchführung der Simulation“).

Tabelle 1

In diesem Beitrag verwendete Wohnbauten aus Wien

Name	Abbildung	Baualter/Anmerkungen
Objekt T1		1956 Reine Wohnnutzung Freistehend/keine Nachbarn 5 beheizte Geschosse lc = 2,19 m
Objekt T2		1956 Reine Wohnnutzung Freistehend/keine Nachbarn 5 beheizte Geschosse lc = 2,19 m
Objekt T3		1961 Reine Wohnnutzung Freistehend/keine Nachbarn 6 beheizte Geschosse lc = 2,07 m
Objekt T4		1961 Reine Wohnnutzung Freistehend/keine Nachbarn 6 beheizte Geschosse lc = 2,05 m
Objekt T5		1961 Reine Wohnnutzung Freistehend/keine Nachbarn 6 beheizte Geschosse lc = 2,26 m
Objekt T6		1965 Reine Wohnnutzung U-förmiger Blockabschluss 4 beheizte Geschosse lc = 2,68 m
Objekt T7		1973 Wohnnutzung & Geschäftsnutzung Ecklage im innerstädtischen Verbund 7 beheizte Stockwerke lc = 2,11m

RESULTATE DER ENERGIEAUSWEISE NACH DEM OIB-VERFAHREN

Tabelle 2

Resultate der Berechnung mit dem OIB-Verfahren

Objekt	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
OIB							
HWB_{BGF, REF} kWh.m ⁻² .a ⁻¹	171	171	160	162	144	116	120

Bei allen Gebäuden musste mit den Default-Werten nach OIB Leitfadens zum Energietechnischen Verhalten von Gebäuden gerechnet (in weiter Folge OIB LF6 genannt) werden, da in den vorliegenden Gebäudeplänen keine Bauteil-Aufbauten angegeben waren.

Die in der Tabelle abgebildeten Ergebnisse sind auf das Referenzklima für Wien bezogen (d.h. 3400 K.d.a¹), welches von Seiten der ÖNORM B8110 vorgegeben ist.

DURCHFÜHRUNG DER SIMULATION

Die Simulation der Objekte wurde folgendermaßen durchgeführt:

- Eingabe der Geometrie in den TAS 3D-Modeller.
- Verknüpfen der Geometrie mit entsprechenden Bauteilaufbauten
- Verknüpfen des Modells mit entsprechenden internen Gewinnen und einer passenden Wetterdatenfile für den Standort Wien
- Durchführen der Berechnungssimulation
- Auslesen und Umformen der Ergebnisse.

Dieser einfache Ablauf ist in der Praxis mit einigen Problemen verbunden:

- Die **vorhandenen Informationen über Bauteilaufbauten** der meisten Bestandsgebäude sind schon für eine Berechnung nach dem OIB-Verfahren nicht tauglich – dort bietet sich der Ausweg über entsprechende Default-Werte. Für die dynamische Berechnung sind aber erheblich mehr Eingabedaten notwendig.

Für die vorliegenden Modelle wurden daher typische Konstruktionen der entsprechenden Bauwerke entwickelt, die **den gleichen U-Wert** besitzen, die dafür notwendigen Baumaterialien wurden aus der programm-eigenen Materialdatenbank entnommen.

Als Beispiel soll das hier für eine Außenwand von Objekt T7 gezeigt werden:

In den vorliegenden Plänen waren keine Aufbauten angegeben, daher wurde nach dem

OIB LF6 der Defaultwert für Mehrfamilienhäuser nach 1960 verwendet.

Da es sich um einen Massivbau handelt wurde eine entsprechende Konstruktion für die Eingabe im Simulationsprogramm entwickelt:

Der Defaultwert beträgt lt. OIB LF6:
1,2 W.m⁻².K⁻¹

Die Konstruktion entsprechend dieses U-Werts ist in Tabelle 3 zu sehen:

Tabelle 3

Bauteil-Konstruktion für eine Außenwand mit U-Wert 1,2 W.m⁻².K⁻¹

SCHICHT	DICKE	LAMBDA
Außenputz	25 mm	1,22 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Mauerwerk	200 mm	0,33 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Innenputz	25 mm	0,68 W.m ⁻¹ .K ⁻¹

Die weiteren erforderlichen Werte für die Simulation wurden entsprechend der Materialdatenbank des Programms für Putze („Plaster“) und Mauerwerk („Masonry“) entnommen.

- Eine weitere Problematik ist in der Praxis die 3D-Modellierung komplizierter Dachformen und deren Verschneidungen, sowie von Gaupen. Es ist oftmals eine Annäherung des Volumens und der Außenflächen der bessere und einfachere Weg um ein für eine thermische Simulation akkurates und funktionstüchtiges Gebäudemodell zu bekommen, als die 1:1 Modellierung hochkomplizierter Dachformen. Um diesem Problem im Zuge dieses Beitrags aus dem Weg zu gehen, wurden hier nur Objekte mit relativ einfachen Flachdächern und Dachschrägen verwendet.
- Die Zonierung der Bauwerke stellt demgegenüber kein Problem dar, da aus Gründen der Vergleichbarkeit mit dem OIB-Verfahren die gleichen internen Bedingungen angesetzt wurden.

Es ist aber festzuhalten, dass es natürlich sinnvoller ist, in entsprechenden Räumen die realen internen Konditionen einzustellen, statt alle Räume bzw. Wohnungen mit Einheitsbedingungen zu versehen.

Im OIB-Verfahren ist eine Zonierung aufgrund unterschiedlicher interner Bedingungen nur aufgrund unterschiedlicher Gesamtnutzungen vorgesehen, d.h. ein Bürogebäude wird mit anderen internen Gewinnen berechnet als ein Wohngebäude.

Settings im Simulationsprogramm TAS:

Die Innentemperatur wurde für die Berechnungen auf 20°C gesetzt, die internen Gewinne auf die in der ÖNORM B 8110 festgehaltenen 3,75 W.m⁻². Weiters wurde der Luftwechsel auf 0,4 h⁻¹ gesetzt, um den gleichen Wert wie in den OIB-Berechnungen zu verwenden.

Im Zuge der Fragestellung der Vergleichbarkeit bleibt die Frage offen, ob Modelle nur mit der wärmeabgebenden Hülle, oder mit allen für das Modell relevanten Bauelementen konstruiert werden sollen, da diese Bauelemente, z.B. durch Wärmespeicherung einen Einfluss auf die Ergebnisse haben können.

In der verwendeten Software ist es für ein akkurates Modell erforderlich Geschossdecken im Modell einzurichten, so dass zumindest diese Elemente auf jeden Fall enthalten sein mussten.

Bei den angeführten Berechnungen wurden die Modelle so erstellt, dass die Hauptbauelemente ausgeführt und auch mit entsprechenden Bauteilen versehen wurden, d.h. es sind Wohnungstrennwände und Raumbtrennwände vorhanden. Abbildung 2 zeigt einen Vergleich zwischen der tatsächlichen Konfiguration der Bauelemente in eine Regelgeschoss von Objekt S1, die Umsetzung im Simulationsmodell, und den Umriss der wärmeabgebenden Flächen, die im OIB-Verfahren berücksichtigt wurden.

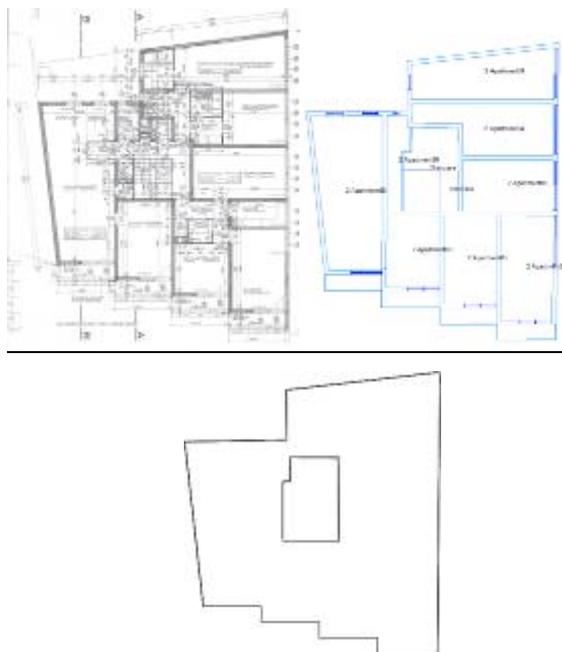


Abbildung 2: links oben Originalplan, rechts oben Simulationsmodell und in der Mitte unten den im OIB-Verfahren berücksichtigten wärmeabgebenden Umriss des Regelgeschosses von Objekt T7.

RESULTATE DER DYNAMISCHEN SIMULATION

Tabelle 3

Resultate der Berechnung mit dem OIB-Verfahren

Objekt	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Simulation							
HWB_{BGF, SIM} kWh.m ⁻² .a ⁻¹	66	66	53	50	58	55	64

Bei allen Gebäuden wurde mit Aufbauten gerechnet, deren U-Werte den U-Werten der in der OIB-Berechnung verwendeten Defaultwerten aus dem OIB LF6 gleich sind. Die Konstruktionen wurden wie weiter oben beschrieben angenähert.

Die in der Tabelle abgebildeten Ergebnisse sind auf die HGT_{12/20} aus der Simulation (d.h. 2846 K.d.a⁻¹) bezogen (siehe Umrechnung und Gegenüberstellung der Resultate).

UMRECHNUNG UND GEGENÜBERSTELLUNG DER RESULTATE

Um die mit den Referenz-HGT ausgerechneten HWB_{BGF, REF} an eine andere HGT-Zahl (HWB_{NEU}) anzupassen gilt folgende Formel:

$$HWB_{NEU} = HWB_{BGF, REF} \frac{HGT_{NEU}}{HGT_{REF}} \quad [2]$$

Aus der in der Simulation verwendeten Wetterdatenfile für Wien – welche mittels der Software Meteororm generiert wurde –, wurden die HGT_{12/20} folgendermaßen herausgerechnet:

- Es wurde für jeden Tag die Summe der 24 vorhandenen Stundendaten ausgerechnet und durch 24 dividiert, d.h. es wurde ein arithmetisches Tagesmittel der Temperatur gebildet.
- War dieses arithmetische Tagesmittel kleiner oder gleich 12°, so wurde es von 20°C abgezogen, und das Resultat zu einer Gesamtsumme hinzugerechnet. Andernfalls wurde der Wert nicht berücksichtigt
- Die nach dem Abarbeiten aller 365 Jahrestage entstandene Gesamtsumme entspricht den HGT_{12/20} für diese stündlichen Wetterdaten.

Für diese Umrechnung wurde ein kleines Programm in der Programmiersprache Java verfasst, das diesen Schritt automatisiert.

Da die Berechnung mittels des numerisch-dynamischen Verfahrens durch die feinere Datenauflösung der Wetterdaten als genauer angenommen wurde, war es naheliegend die Resultate der stationären Berechnung mittels obenstehender Formel an die $HGT_{12/20}$ der dynamischen Kalkulation anzupassen.

Während im stationären Verfahren die $HGT_{12/20}$ mit 3400 Kd angesetzt (Referenzklima für Wien), ergab eine Berechnung aus den Stundendaten lediglich 2846 Kd, was knapp 84 % der Referenzheizgradtage entspricht.

Die Berechnungsergebnisse wurden daher entsprechend auf die neuen HGTs umgerechnet. In der Tabelle 4 und in Abbildung 3 sind die Resultate einander gegenübergestellt.

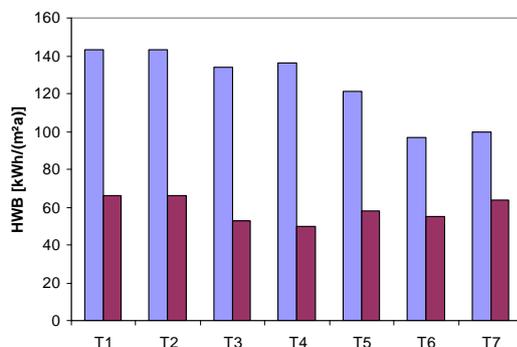
Tabelle 4

Gegenüberstellung der Resultate des OIB-Verfahrens und der Simulation

Objekt	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
OIB							
$HWB_{BGF, REF}$ kWh.m ⁻² .a ⁻¹	171	171	160	162	144	116	120
OIB							
$HWB_{BGF, Sim}$ kWh.m ⁻² .a ⁻¹	143	143	134	136	121	97	100
Simulation							
$HWB_{BGF, Sim}$ kWh.m ⁻² .a ⁻¹	66	66	53	50	58	55	64
Simulation / OIB							
%	46	46	40	37	48	57	64

Abbildung 3

Gegenüberstellung der Resultate des OIB-Verfahrens und der Simulation jeweils bezogen auf $HGT_{12/20}$ 2846 K.d.a⁻¹



ERGEBNISANALYSE & DISKUSSION

Die HWB-Kalkulation im dynamischem Verfahren erzielt durchwegs niedrigere Ergebnisse als die stationäre Berechnung nach dem OIB-Verfahren. Bei fünf der sieben Objekte beträgt das Ergebnis der Simulation zwischen 46 und 64 Prozent der OIB-Berechnung, Bei Objekt T3 und Objekt T4 beträgt dieser Wert jedoch nur 40 bzw. 37 Prozent. Daher wurde untersucht, ob und in welcher Weise sich diese Objekte Gemeinsamkeiten oder Unterschieden zu den anderen Objekten aufweisen.

Da ja die Eingangsparameter Luftwechsel, Wetterdatenfile für alle Objekte gleichgesetzt wurden, bleiben folgende Parameter als Erklärung für die Unterschiede übrig:

- Geometrie der Gebäude, d.h. Verhältnis opake zu transparenten Flächen, Kompaktheit, und Ausrichtung.
- Bauteilkennwerte der Gebäude, z.B. der mittlere U-Wert

Der naheliegende Gedanke, die Berechnung anhand der bekannten Wärmebilanzgleichung in Transmissions- und Lüftungswärmeverluste, sowie interne und solare Gewinne zu zerlegen, ist für das OIB-Modell sehr leicht möglich, macht für das Simulationsmodell aber keinen Sinn, da diese 4 Parameter sich durch die feine Auflösung der Daten laufend gegenseitig beeinflussen, und somit es kaum möglich ist eine scharfe Trennung durchzuführen. Daher wurde von dieser Untersuchung Abstand genommen.

Tabelle 5

Aufstellung des lc-Wertes (in m), der mittleren U-Werte (U_m ; in $W.m^{-2}.K^{-1}$) und des Anteil der Verglasung an den wärmeabgebenden Außenbauteile (A_v , in %) der Objekte T1-T7.

Objekt	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
lc	2,19	2,19	2,07	2,05	2,26	2,68	2,11
U_m	1,397	1,397	1,245	1,245	1,399	1,45	1,363
A_v	9%	9%	10%	10%	9%	10%	18%

In Tabelle 5 sind der lc-Wert als Einflussparameter der Gebäudegeometrie, der mittlere U-Wert als Angabe über die thermische Qualität der Gebäudehülle und der Anteil der Verglasung an der wärmeabgebenden Gebäudehülle aufgeführt.

Bei den Objekten T3 und T4, fällt auf, dass die mittleren U-Werte am niedrigsten sind. Der lc-Wert, der ein Maß für die Kompaktheit ist (Bruttovolumen dividiert durch Summe der wärmeabgebenden Flächen - je größer der lc-Wert ist, desto kompakter ist das Gebäude) ist bei diesen beiden Objekten jedoch am geringsten, wobei er sich nicht signifikant von den anderen Objekten unterscheidet.

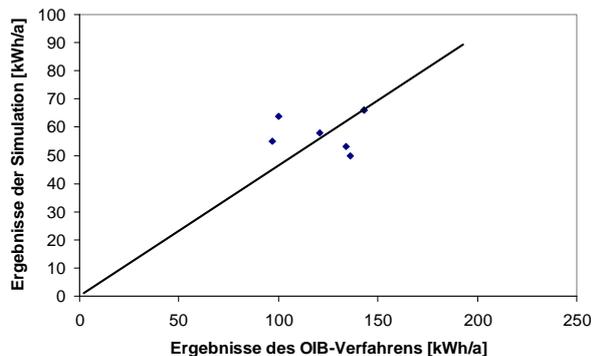
Der Anteil der Verglasung an der Außenhülle bei T3 und T4 ist mit 10% ebenfalls im Rahmen der anderen Objekte, hier ist lediglich Objekt T7 mit 18% Verglasung herausstechend.

A-Null [Hrsg] 2010, Handbuch zu Archiphysik

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Ergebnisse der Simulation im Wesentlichen mit den Ergebnissen des stationären Verfahren in einem relativ konstanten Verhältnis liegen (siehe Abbildung 4).

In zukünftigen Schritten wird das Sample der Bestandsobjekte vergrößert werden, und anhand von parametrischen Studien versucht werden, die Auswirkung bestimmter Parameter auf den Unterschied herauszuarbeiten.

*Abbildung 4
 Punkt-Darstellung der Ergebnisse und
 Näherungsgerade, x-Achse: Ergebnisse des OIB-
 Verfahrens, y-Achse: Simulation.*



DANKSAGUNG

Das Architekturbüro exikon aus Wien stellte freundlicherweise die Pläne und Unterlagen der untersuchten Objekte zur Verfügung.

LITERATUR

Österreichisches Institut für Bautechnik [Hrsg.], 2007. OIB Richtlinie 6 - Energieeinsparung und Wärmeschutz, 26.04.2007

Österreichisches Institut für Bautechnik [Hrsg.], 2007. OIB Leitfaden – Energietechnisches Verhalten von Gebäuden, 26.04.2007

Österreichisches Normungsinstitut [Hrsg.], 1978-2010. ÖNORM B 8110, 1-6

EDSL 2007. A-TAS Theory Manual. EDSL Documentation

Richtlinie 2002/91/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2002 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden

EINFACHES NORM-SIMULATIONSTOOL ZUR BERECHNUNG DER OPERATIVEN TEMPERATUR IN EINEM RAUM

Thomas Bednar¹ und Christian Pöhn²
¹TU Wien, Österreich

²MA 39 - Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien, Wien, Österreich

KURZFASSUNG

Der gegenständliche Artikel stellt die Entwicklung eines einfachen Simulationstools zur Berechnung der operativen raumweisen Temperatur für den Fall bekannter Aufbauten der Begrenzungsbauteile und die Annahme stundenweise bekannter Außentemperaturen, Strahlungsdaten und inneren Lasten. Die Vereinfachung und Annahmen wurden so gewählt, daß das Verfahren in eine Weiterentwicklung der ÖNORM B 8110-3 einfließen kann und eine konsistenter Nachweis der Vermeidung sommerlicher Überwärmung auch für Nichtwohngebäude möglich wird.

ABSTRACT

This article gives an overview about the development of a simple simulation tool for the calculation of the operative temperature in a single room for the case of known layers of the construction elements and also known external temperatures, radiation data and internal loads. The simplifications are chosen in a way that the Austrian standard ÖNORM B 8110-3 "avoidance of summer time overheating" can be improved and used for non-residential buildings.

EINLEITUNG

In Österreich ist seit vielen Jahren für den Sommerfall der Nachweis zu führen, dass sommerliche Überwärmung vermieden wird. Im Rahmen dieses Nachweises wird wie folgt vorgegangen:

PROBLEMSTELLUNG

Der Nachweis der Vermeidung sommerlicher Überwärmung erfolgt gemäß ÖNORM B 8110-3. Diese Norm stammt in ihren Prinzipien aus den 80er-Jahren des letzten Jahrhunderts und verfolgt dabei die Methodik des Nachweises ausreichender Speichermassen in Abhängigkeit vorhandener Immissionsflächen.

LÖSUNGSWEG

In einem ersten Schritt werden dabei raumweise die wirksamen Speichermassen berechnet. Basis dieser

Berechnung ist dabei die Berechnung der Speicherkapazitäten gemäß ÖNORM EN ISO 13786.

Die dort berechneten spezifischen Speicherkapazitäten sind mit den Bauteilflächen in Speicherkapazitäten umzurechnen und anschließend durch Multiplikation mit einem Konversionsfaktor in wirksame Speichermassen umzurechnen. An dieser Stelle darf angemerkt werden, dass die Näherungsmethode, die der 10 cm-Regel aus der EN ISO 13786 folgt, durchaus für erste Abschätzungen angewandt werden kann. Eben dieser leichte Zugang hat es vielen Baupraktikern ermöglicht, diesen Nachweis einfachst zu führen.

Daran anschließend sind die wirksamen Immissionsflächen zu berechnen. Diese wirksamen Immissionsflächen lassen sich unter Berücksichtigung der Verglasungseigenschaften (Gesamtenergiedurchlassgrad) und der Verschattungseigenschaften sowie der Orientierung und Neigung berechnen. In der ÖNORM B 8110-3 sind in zahlreichen Tabellen einerseits die Z_{ON} -Faktoren zur Berücksichtigung von Orientierung und Neigung und Gesamtenergiedurchlassgrade und Verschattungsfaktoren für typische Verschattungseinrichtungen aufgelistet.

Daran anschließend erfolgt die Berechnung eines immissionsflächenbezogenen Luftvolumenstromes unter Berücksichtigung von Fixwerten für einen fiktiven Luftwechsel in Abhängigkeit von der Anzahl von Begrenzungsflächen, die mit Lüftungsöffnungen ausgestattet sind. An dieser Stelle darf angemerkt werden, dass die dort angegebenen Luftwechselzahlen einerseits als Voraussetzung beinhalten, dass ein vollständiges Öffnen der Fenster während der Nacht stattfinden kann und darf. Voraussetzung dafür ist selbstverständlich ein ausreichender Witterungs- und Einbruchschutz und aus schallschutztechnischen Gründen allfällige weitere Einschränkungen. Die Berechnung eines immissionsflächenbezogenen Luftvolumenstromes erfolgt durch Multiplikation dieser fiktiven Luftwechselzahlen mit dem Volumen und Division durch die wirksamen Immissionsflächen.

Ebenso erfolgt die Berechnung von vorhandenen immissionsflächenbezogenen wirksamen Speichermassen durch Division der vorhandenen

wirksamen Speichermassen durch die wirksamen Immissionsflächen.

Wesentlichster Punkt der bisherigen Vorschrift war die Formulierung der Anforderungen, die seit den 80er-Jahren des letzten Jahrhunderts unverändert geblieben sind. Damals wurde durch aufwendige Untersuchungen dieses Anforderungsniveau derart gewählt, dass statistisch gesehen nur an 130 Tagen in 10 Jahren die Behaglichkeitsgrenze in Räumen, für die die Vermeidung sommerlicher Überwärmung positiv nachgewiesen wurde, überschritten wurde. Die Berechnung von erforderlichen immissionsflächenbezogenen wirksamen Speichermassen erfolgt in Abhängigkeit von der Immissionsfläche.

Daran anschließend erfolgt der Vergleich der Ergebnisse und die Beurteilung des positiven bzw. negativen Ausgangs der Berechnungen.

KRITIK

Grundsätzliche Voraussetzung des bisherigen Verfahrens ist – wie bereits erwähnt – eine angenommene Nachtlüftung. Ist diese – aus welchen Gründen auch immer – nicht möglich, so liefert das Verfahren entweder einen nicht realitätskompatiblen Nachweis oder ist gar nicht anwendbar. Insbesondere für Nicht-Wohngebäude hat dies durch nichtkundige Nachweisführung immer wieder zu problematischen Ergebnissen geführt. Ebenso waren bisher für Nicht-Wohngebäude die Personenanzahl und die Leistung technischer Geräte mitzubedenkenden. Dabei führten Annahmen bezüglich der Gleichzeitigkeit immer wieder zu Problemen.

Darüber hinaus darf Folgendes bemerkt werden: Grundsätzliche Annahme der Nachtlüftung mit Außentemperaturen unter 26 °C; ist dies – wie u.U. im innerstädtischen Bereich – nicht gewährleistet, so funktioniert das Verfahren aus leicht einsehbaren Gründen gar nicht. Dass die Anforderungsfestlegung aus den 80er-Jahren des letzten Jahrhunderts stammt und auf damals weit verbreiteten Bauweisen beruht, ergänzt die Kritik.

Als weitere Forderung stellt sich in letzter Zeit immer wieder der Wunsch anstelle des JA/NEIN-Nachweises heute Nachweise mit Angaben einer möglichen Übererfüllung und somit allfälliger – daraus ableitbarer - besserer Tauglichkeit bei Hitzeperioden anzubieten.

BISHERIGER AUSWEG

Für hochprofessionelle Planungen stand und steht naturgemäß die Gebäudesimulation zur Verfügung. Allerdings ist diese natürlich mit der Problematik der Nachweisführung gegenüber der Behörde belegt.

FORDERUNG

Allein daraus ist ableitbar, dass eine Einbindung eines Simulationsverfahrens auf normativer Ebene unter gleichzeitiger Forderung der Einbindung dieser normativen Basis in die gesetzlichen Anforderungen dringend notwendig ist.

Als Randbedingungen sind zu berücksichtigen:

1. Die bisherige Methode, soll – dort, wo tauglich – erhalten bleiben.
2. Die Einbindung von RLT-Anlagen soll geschaffen werden.
3. Die anzunehmenden inneren Lasten sollen kompatibel zu den eingeführten Nutzungsprofilen in der ÖNORM B 8110-5 für den Energieausweis sein.
4. Das Simulationsverfahren soll so einfach sein, dass es einerseits keinen gesteigerten Datenerhebungsaufwand bedeutet und andererseits zu Schulungszwecken als EXCEL-Lösung in Analogie zu EXCEL-Schulungs-Tools für den Energieausweis frei zur Verfügung gestellt werden.

EINSCHUB

In der Diskussion wird immer wieder die Notwendigkeit dieses „Herunterbrechens“ auf derart einfache Ansätze hinterfragt. Dazu sollte man sich vor Augen führen, dass in Österreich derzeit ca. 1,6 Mio. Einfamilienhäuser und ca. 200.000 Mehrfamilienhäuser bestehen. Pro Jahr werden je nach Region 1 bis 2 % davon sowohl neu errichtet als auch umfassend saniert. Aus diesen Zahlen ist leicht ersichtlich, dass nicht jedes Objekt von PlanerInnen begleitet wird, zu deren Werkzeugen Simulationen zählen, sondern vielmehr in erster Linie von BaumeisterInnen und von ZimmermeisterInnen, größtenteils mit hoher baupraktischer Erfahrung. Eben für diese beiden zuletzt genannten Gruppen ist eine saubere, ingenieurmäßig verständliche Nachweisführung auf Normenbasis anzubieten. Seit der Einführung des Energieausweises in Österreich, für den die Ermittlung von Energiekennzahlen ebenso eine entsprechende Komplexität aufweist, hat sich die Darstellung derartiger komplexer Berechnungen in Tabellenkalkulationen wie MS-Excel blendend bewährt und stellt mit einem wesentlichen Erfolgs- und Akzeptanzfaktor dar. Genau dieser Weg sollte auch hier beschritten werden.

LÖSUNG:

Somit stand eine Überarbeitung der ÖNORM B 8110-3 auf der Tagesordnung. Die Einbindung des Simulationsteils sollte durch ein VBA-Makro zur Berechnung der operativen Raumtemperatur im

periodisch eingeschwungenen Zustand bewerkstelligt werden und selbstverständlich nach Abschluss der Entwicklungen einerseits ebenso gratis downloadbar sein wie das Excel-Schulungstool zum Energieausweis und andererseits in professionelle Bauphysiksoftware eingebunden werden.

Grundvoraussetzung sollte dabei sein, dass der bisherige Aufwand, der zum Nachweis mittels ausreichend vorhandener immissionsflächenbezogener wirksamer Speichermassen notwendig war, nicht überschritten wird.

INPUTDATEN

Als Inputdaten dürfen folgende geometrische, bauphysikalische und gebäudetechnische Eigenschaften aufgelistet werden:

- Begrenzungsbauteilflächen, Orientierung und Farbe der Außenoberfläche, Schichtenaufbau
- Fenstergeometrie, mögliche Lüftungsstellungen der Fenster, Sonnenschutz sowie eine etwaige Verschattungen durch die Umgebung, Wärmedurchgangskoeffizient und g-Wert der Verglasung
- hygienisch erforderlicher Volumenstrom, Infiltration, Definition ein optionalen Lüftungsanlage (Volumenstrom, Wärmerückgewinnung)
- Außentemperaturen (Basis der Außentemperaturen sind jene Temperaturen, die dem Beiblatt 2 der ÖNORM B 8110-5 zu entnehmen sind, die für jede Katastralgemeinde Österreichs und für jede Seehöhe jene Temperatur auflistet, die an 130 Tagen in 10 Jahren überschritten wird) Diesen Außentemperaturen wird eine stundenweise Abweichung in Abhängigkeit von der Lage des Ortes zugeordnet. Solare Einstrahlung in Abhängigkeit der Seehöhe
- Zeitabhängige Wärmegewinne durch Geräten und Personen (Vorgabe je nach Nutzung)

BERECHNUNGEN

Um den Programmieraufwand minimal zu halten wurde entsprechend EN ISO 13791 ein vereinfachtes Verfahren zur Lösung der Differentialgleichungen in Excel abgebildet. Die Abbildung der Bauteile erfolgt dabei durch die innere und äußere wirksame Wärmekapazität entsprechend EN ISO 13786.

Die Berechnung des auftriebsinduzierten Luftaustausches über gekippte oder offenen Fenster erfolgt dabei entsprechend EN ISO 13791 mit Formel 1.

$$\dot{V} = C \cdot A \cdot \sqrt{H} \cdot \sqrt{\Delta T} \quad (1)$$

$$C = 0,7 \cdot 100 \frac{\text{m}^{0,5}}{\text{h} \cdot \text{K}^{0,5}}$$

Wobei A die Öffnungsfläche, H die Öffnungshöhe und ΔT die Lufttemperaturdifferenz und der Faktor 0,7 einen Sicherheitsfaktor darstellt. Die Geometrieschen Abmessungen sind entsprechend der Abbildung 2 zu wählen.

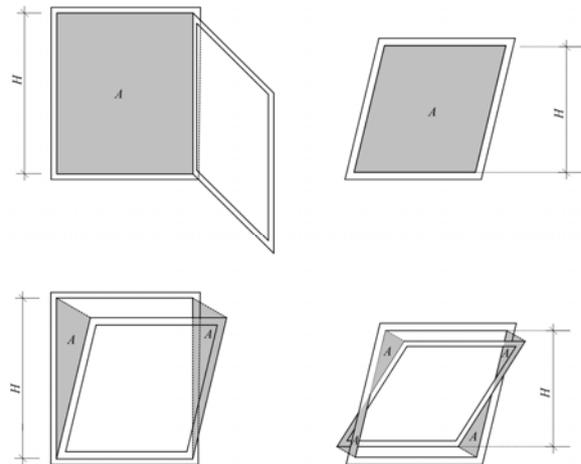


Abbildung 2: Wahl der Öffnungsfläche A und der Öffnungshöhe H für offenen (oben) und gekippte (unten) Fenster

VERFAHRENSVERGLEICH

Anhand einer typischen Wohnung mit 2 Zimmern, einer Wohnküche und Gang, Bad und WC wurden 45 verschiedenen Varianten sowohl durch eine gekoppelte Ganzjahressimulation, einer gekoppelten Simulation mit einem periodischen Auslegungstag und raumweise nach dem alten vereinfachten Verfahren berechnet. Die 45 Varianten ergeben sich aus unterschiedlicher Bauweise, unterschiedlichem Sonnenschutz und unterschiedlicher Orientierung und unterschiedlicher nächtlicher Fensterstellung.

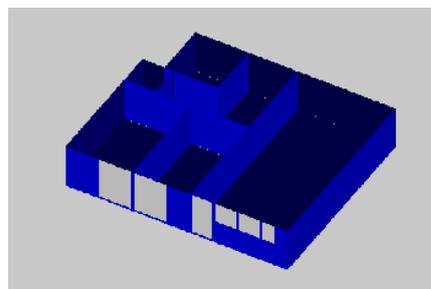
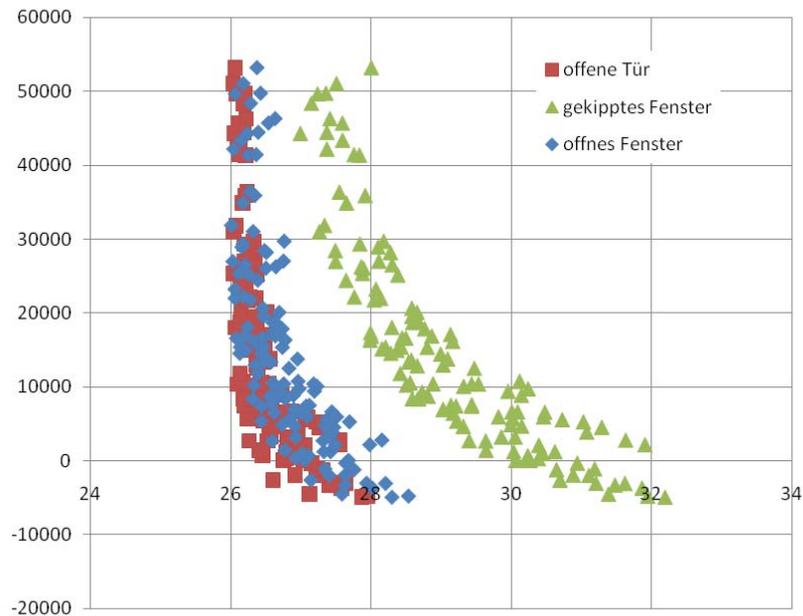


Abbildung 2: Geometrie der Testwohnung

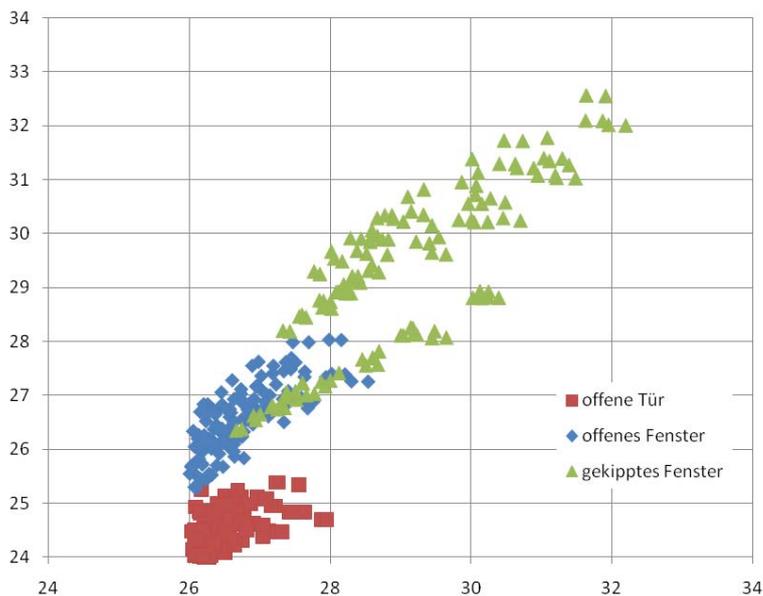
Überschuß an immissionsflächenbezogener speicherwirksamer Masse in kg/m^2



Maximum deropertiven Temperatur für die Ganzjahressimulation in $^{\circ}\text{C}$

Abbildung 3: Vergleich zwischen dem alten Verfahren und der Ganzjahresimulation

Maximum der operativen Temperatur für den periodischen Tag in $^{\circ}\text{C}$



Maximum deropertiven Temperatur für die Ganzjahressimulation in $^{\circ}\text{C}$

Abbildung 4: Vergleich zwischen der Simulation mit einem periodischen Sommertag und der Ganzjahresimulation

Insgesamt ergeben sich 135 Räume, da für jede der 45 Varianten drei Räume mit Fenstern der 6-Raum Wohnung beurteilt werden können. Alle 135 Varianten wurden mit drei verschiedenen nächtliche Lüftungsmöglichkeiten berechnet. Im Rahmen der Simulationen wurde der hygienische Luftwechsel und eine ideale Nachtlüftungsmöglichkeit berücksichtigt. Mit ideal ist ausgedrückt, dass immer wenn die Außentemperatur unter die Innenraumlufttemperatur sinkt, die Lüftungsmöglichkeit aktiviert wird. Die Berechnung erfolgten mit inneren Lasten

Die Klimadaten die für die Berechnungen verwendet wurden sind das für die Ganzjahressimulation das Testreferenzjahr für Wien und für den periodischen Tag (15. Juli) ein Tagesgang der vom Mittelwert und der Tagesschwingung einem durchschnittlichen Sommertag des Testreferenzjahres entspricht.

Aus Abbildung 3 ist erkennbar, dass im vereinfachten Verfahren nach ÖN B 8110-3: 1999 jedenfalls die zwingende Annahme enthalten ist, das Lüftungsöffnungen in der Größe eines typischen Fensters nachts offen sein können. Sobald man Fenster nur kippt ergeben sich in den berechneten Fällen deutlich höhere Raumtemperaturen.

Aus Abbildung 4 ist erkennbar, das eine Beschränkung des zulässigen Maximums für die Simulation eines typischen Sommertages auch eine Beschränkung des Maximums in einer Ganzjahresbetrachtung bedeutet.

Für den Nachweis der Vermeidung sommerlicher Überwärmung ergeben sich daher folgende notwendige Voraussetzungen:

Da die Lüftung über ausreichend große Lüftungsöffnungen eine wesentliche Voraussetzung für das einhalten geringer Raumtemperaturen ist, ist die Abbildung der realen Öffnungsgrößen zwingend notwendig. Der Bauherr muß unter Berücksichtigung der notwendigen Sicherheitsvorkehrung für die Planung festlegen, o für die betrachteten Räume Fenster als nachts offen betrachtet werden können. Diese Überlegung ergibt besonders für Erdgeschoßbereiche die Notwendigkeit Maßnahmen zur Vermeidung von Einbrüchen einzuplanen. Im Falle des Nachweises von Räumen mit hohen Ruheansprüchen (Schlafzimmer, MitarbeiterInnen-Ruheräume, etc.) muß der nächtliche Umgebungslärmpegel klein genug sein, damit Fenster aufgemacht werden.

Für den Fall, das Fenster nachts geöffnet werden können (Einbruch, Lärm), der Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur kleiner gleich 23 °C ist und es sich um eine Wohnungsnutzung handelt, kann der vereinfachte Nachweis mit Hilfe der immissionsflächenbezogenen speicherwirksamen Massen geführt werden.

Der im Nachweis angesetzte Sonnenschutz muß eine für den Standort geeignete Gebrauchstauglichkeitsgeschwindigkeit aufweisen. Dies bedeutet, dass bei den in sommerlichen Perioden auftretenden Windgeschwindigkeiten, die

Verwendung des Sonnenschutzes keine erhöhten Wartungsaufwand erzeugt. Diese Geschwindigkeit ist typischer Weise deutlich kleiner als die Windgeschwindigkeit die der im CE-Begleitdokument angegebenen Windwiderstandsklasse entspricht. Eine entsprechende Planung von äußeren Abschlüssen und eine Übernahme dieser Anforderung in Ausschreibungen ist daher eine Voraussetzung, dass nach Fertigstellung des Bauvorhabens die berechnete thermische Qualität auch erreicht werden kann.

ZUSAMMENFASSUNG

Der Nachweis der Vermeidung sommerlicher Überwärmung, als wesentliche Entscheidung, ob ein Abgabesystem für Kälte in Räumen eingeplant werden muß, kann aufgrund der Zusammenhänge auf die Simulation eines sich periodisch wiederholenden Sommertages umgestellt werden. Damit können alle möglichen Nutzungen und ein standortbezogenes Außenklima konsistent abgebildet werden. Ebenso ist es möglich, die Wirkung einer mechanischen Lüftung mit Wärmerückgewinnung abzubilden. Durch die eindeutige Festlegung der anzunehmenden inneren Lasten, der Berechnung des Luftwechsels über Lüftungsöffnungen und dem anzunehmenden standortabhängigen Außenklima ergibt sich ein normierbares Simulationsmodell zur Festlegung von Anforderungen an das sommerliche Verhalten von Räumen und Raumverbänden.

Die Verknüpfung mit der Umgebungslärsituation ist eine logische Folge der Berücksichtigung der Öffnung der Fassade.

Wesentliche Planungsschritte, die für die Ausschreibung von großer Bedeutung sind, sind die Überlegungen zur Einhaltung der Sicherheitserfordernisse und zur Gebrauchstauglichkeitsgeschwindigkeit der äußeren Abschlüsse.

Im Falle der Wohnungsnutzung, der Möglichkeit über offene (nicht nur gekippte) Fenster nachts zu lüften und einem Standort mit einem Tagesmittelwert der Außentemperatur unter 23°C kann das derzeitige vereinfachte Verfahren weiter verwendet werden.

LITERATUR

- Pech, A. und Pöhn, C., Baukonstruktionen Bd.1 - Bauphysik, Wien, 2004, Springer
 Pöhn, C., Pech, A., Bednar, T. und Streicher, W. Baukonstruktionen Bd.1/1 – Energieeinsparung

und Wärmeschutz / Energieausweis -
Gesamtenergieeffizienz, Wien, 2007, Springer

Riccabona, C., Bednar, T., Baukonstruktionslehre 4 –
Bauphysik, Wien, 2008, Manz

OIB-Richtlinie 6 „Energieeinsparung und
Wärmeschutz“, Wien, April 2007, OIB

OIB-Leitfaden „Energietechnisches Verhalten von
Gebäuden“, Version 2.6, Wien, April 2007, OIB

ÖNORM B 8110-3 Wärmeschutz im Hochbau –
Wärmeschutz im Hochbau – Wärmespeicherung
und Sonneneinflüsse (1999-12-01)

ÖNORM H 7500 Heizungssysteme in Gebäuden –
Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast
(2006-01-01)

ÖNORM H 6040 Lüftungstechnische Anlagen –
Kühllastberechnung (1997-03-01)

VALIDIERUNG ENERGETISCHER GEBÄUDESIMULATIONSMODELLE MIT DER VDI 6020

Teresa Schöpfer¹, Florian Antretter¹, Christoph van Treeck¹, Jérôme Frisch², Andreas Holm¹
¹Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP, Holzkirchen
² Technische Universität München, Lehrstuhl für Computation in Engineering

KURZFASSUNG

Energetische Gebäudesimulationsmodelle müssen vor ihrem produktiven Einsatz getestet werden, um Modellfehler auszuschließen und Aussagen bezüglich der Rechengenauigkeit treffen zu können. Die Richtlinie 6020, Blatt 1 des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI 6020) gibt dazu Benchmarks vor. Diese ermöglichen die Validierung von Software hinsichtlich der Berechnung der Reaktion eines Beispielraums auf innere Belastungen und Sollwertänderungen, für die Berücksichtigung der solaren Einstrahlung, sowie für eine Ganzjahres-simulation. In vorliegendem Beitrag wird die Richtlinie zur Validierung von zwei verschiedenen Berechnungsmodellen zur energetischen Gebäudesimulation verwendet. An einigen Fällen kann gezeigt werden, dass beide Modelle plausible und im Rahmen der Rechengenauigkeit korrekte Ergebnisse liefern. Jedoch weisen andere Fälle Unstimmigkeiten in den Vorgabedaten auf. Diese können nur durch zahlreiche Variantenrechnungen geklärt werden. Die Anwendung der oben genannten Richtlinie ist deshalb nach Meinung der Autoren nur teilweise zur Überprüfung von energetischen Gebäudesimulationsmodellen sinnvoll. Fehlende oder unklare Eingabedaten verhindern eine durchgängig konsistente Anwendung der Norm. Der Beitrag diskutiert die durchgeführten Validierungsrechnungen und setzt sich kritisch mit der Richtlinie auseinander.

ABSTRACT

Building Energy Simulation models must be tested before their productive use to eliminate model errors and to make statements regarding the computation accuracy. Guideline 6020, part 1 of the German Association of Engineers describes a set of such benchmark cases. These benchmarks enable the validation of software by the calculation of reaction of a sample area to internal loads and setpoint changes, for the consideration of solar radiation and for a whole year building performance simulation. In this article, the guideline is used for the validation of two different calculation models for building energy simulation. In some cases it can be shown that both models provide reasonable results in terms of computational accuracy. However, other cases show

discrepancies compared to the benchmark data. This behavior was clarified by conducting a series of different calculations and variations ("try and error"). In the opinion of the authors, the guideline is therefore only partially useful for the validation of building performance simulation models. Missing or unclear input data prevent a continuous consistent application of the standard. The article discusses the performance of validation calculations and critically reviews parts of the guideline.

EINLEITUNG

Um die Genauigkeit und Realitätsnähe eines Gebäudesimulationstools überprüfen und zeigen zu können, bietet sich die Durchführung einer Validierungsrechnung an. So können die Funktionen der Software getestet und die Qualität der Ergebnisse dargelegt werden. Dazu bieten sich verschiedene Möglichkeiten.

Zum Einen kann die Software anhand umfassend dokumentierter, realer Experimente getestet werden. Die Randbedingungen des Experiments dienen als Eingabedaten und die Ergebnisse der Simulation können mit erfassten Messdaten verglichen werden. Zum Anderen bieten nationale und internationale Normen, Richtlinien und Standards Validierungsmöglichkeiten an. Als Beispiele können

- ASHRAE Standard 140
- VDI 6020
- VDI 6007
- DIN EN 15255
- DIN EN 15265

genannt werden. Sie stellen unterschiedliche Beispielfälle zur Überprüfung der implementierten Algorithmen und Modelle zur Verfügung. Zur Bewertung der berechneten Ergebnisse werden Vergleichswerte angegeben.

SOFTWARE

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Validierung der energetischen Gebäudesimulationsmodelle WUFI[®]plus und iZone, die vom Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP und dem Lehrstuhl für

Computation in Engineering der Technischen Universität München entwickelt wurden.

WUFI®plus

Bereits seit vielen Jahren beschäftigt sich das Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP mit der Entwicklung von Softwaretools zur Simulation im Bereich Bauteile und Gebäude. WUFI®plus ist ein Raumklimamodell, das die bewährte hygrothermische Bauteilsimulation der WUFI®-Familie mit energetischer Gebäudesimulation verbindet. Die Energie- und Massetransportprozesse im Bauteil und im Raum werden kombiniert. Bei der Simulation wird eine detaillierte Abbildung der Nutzung des Raumes, der Lüftung und der anlagentechnischen Komponenten sowie der Regelungsparameter berücksichtigt.

Dies ermöglicht realitätsnahe Aussagen zu Raumklima und Behaglichkeit, Schadensfreiheit der Gebäudehülle, sowie Energiebedarf des Gebäudes. Die Gefahr von Schimmelpilzbefall kann abgeschätzt werden. Der Energieaufwand und die benötigte Anlagenkapazität zum Erreichen gewünschter Behaglichkeit werden ermittelt.

iZone

Das iZone Gebäudemodell (van Treeck et al. 2009) ist als Finite-Volumen Ansatz nach Clarke (2001) formuliert, wobei das Modell in einzelne Kontrollvolumen zerlegt wird. Die Forderung nach Energie- und Masseerhaltung liefert Gleichungssysteme, die unter gegebenen Randbedingungen und dem Einfluss eines (in diesem Falle idealisierten) regelungstechnischen Systems für einzelne Zeitschritte einer Ganzjahressimulation sukzessive gelöst werden. Als Datenstruktur dient ein Hexaedermodell, wobei zwischen Luftvolumen (fluid) und Festkörpern (solid) unterschieden wird. Zur Berechnung der kurzwelligen Strahlungsverteilung dient ein vereinfachtes Raytracing Schema in Verbindung mit einem detaillierten Fenstermodell. Der langwellige Strahlungsaustausch zwischen Oberflächen wird mittels eines Radiosity Verfahrens ermittelt. Die Kopplung der Lösungsverfahren geschieht explizit. Das Modell ist in (van Treeck 2010) detailliert beschrieben.

SIMULATION

Für die Validierung von WUFI®plus und iZone wurden die Fallbeispiele der VDI Richtlinie 6020 gewählt.

VDI Richtlinie 6020

Der Verein Deutscher Ingenieure, hat im Mai 2001 eine Richtlinie herausgegeben: VDI 6020 - Anforderungen an Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation. Diese Richtlinie wurde als

Instrument zur grundlegenden Überprüfung von Simulationsprogrammen erstellt. Für die Überprüfung der Programme stellt diese Richtlinie eine Reihe von Testbeispielen zur Verfügung, mit welchen verschiedene Bereiche der Programme getestet werden können. Bei der Validierung der oben genannten Programme kommt Blatt 1 der Richtlinie für thermisch-energetische Gebäudesimulation zum Einsatz.

Für die Berechnungen der Testbeispiele ist in der VDI-Richtlinie ein einfacher Typraum definiert.

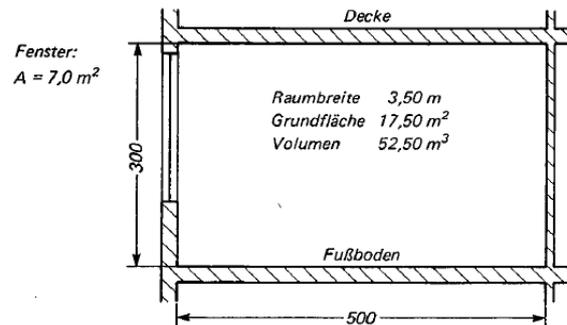


Abbildung 1: Geometrie des Testraums (VDI 6020)

Die Konstruktion des Typraumes ist, je nach Beispielfall, entweder eine leichte oder eine schwere Bauweise. Durch die verschiedenen Bauweisen werden zwei unterschiedliche Mengen an Speichermassen für den Raum bereitgestellt und die entsprechenden Reaktionen betrachtet. Der Testraum ist als Teil eines Gebäudes definiert. Die Außenwand grenzt von Fall zu Fall an jeweils unterschiedlich definierte Außenklimata an. Über die Innenwände findet kein Wärmeaustausch mit den Nachbarräumen statt.

Testbeispiele

Die Testbeispiele sind in drei Gruppen aufgeteilt. So können anhand des Typraumes die Reaktion auf innere Belastungen und Sollwertänderungen (Beispiele eins bis sieben) und auf solare Einstrahlung (Beispiele acht bis elf), sowie Ganzjahressimulationen überprüft werden.

Reaktion auf innere Belastungen und Sollwertänderungen

Die Testbeispiele eins bis sieben testen die Reaktion des Raumes auf innere Lasten und Sollwertänderung. Für diese Gruppe der Testbeispiele sind einheitliche Parameter zur Geometrie des Raumes und zur Position des Fensters gegeben. Der Raum ist mit dem Fenster Richtung Süden ausgerichtet. Es gelten für alle sieben Beispiele dieselben bauphysikalischen Parameter. Als Außenklima werden konstant 22°C angenommen. Es findet kein Wärmestrom über die Innenwände statt.

Alle Fallbeispiele werden ohne kurzweilige Sonnenstrahlung und langwellige Umgebungsstrahlung betrachtet. Auch der Bodenreflexionsgrad wird vernachlässigt. Mit diesen Fällen soll lediglich überprüft werden, welches Verhalten des Raumes aufgrund der unterschiedlichen im Raum auftretenden Lasten durch das Programm errechnet wird.

Diese sieben Beispielfälle werden für einen Zeitraum von 60 Tagen in stündlichen Schritten berechnet. So können der Einschwingvorgang und der dann eingeschwingene Zustand mit den Vergleichswerten der Richtlinie verglichen werden.

Solare Einstrahlung

Die solare Einstrahlung, die in Beispiel eins bis sieben außer Acht gelassen wurde, wird in den Fällen acht bis elf berücksichtigt. In diesen Fällen wird das Strahlungsmodell des Simulationsprogramms, durch die winkelabhängige Berechnung der im Testreferenzjahr bereitgestellten Strahlungsdaten auf die Oberflächen und durch Verglasung auf die Probe gestellt. Durch diese Beispiele können mögliche Fehlerquellen im Strahlungsmodell leicht lokalisiert werden. In den Testbeispielen zur Überprüfung der solaren Einstrahlung wird ein Bauteilaufbau der „schweren“ Art verwendet. Für jedes Beispiel werden fünf Varianten gerechnet, die sich jeweils in der Ausrichtung der Fensterfläche in alle Himmelsrichtungen unterscheiden. Die Fälle werden über den Zeitraum von 365 Tagen berechnet. Für die Beispiele wird das Testreferenzjahr von Würzburg als Außenklima angesetzt und für die unterschiedlichen Anforderungen angepasst.

Ganzjahressimulation

Wie sich die Simulation über den Zeitraum eines gesamten Jahres verhält, wird in den letzten Beispielen getestet. Dabei ist der Raum verschiedenen inneren und äußeren Lasten ausgesetzt und soll durch Beheizung und Klimatisierung eine Sollraumtemperatur halten.

Die Beispiele zur Ganzjahressimulation wurden in vorliegendem Beitrag mit iZone berechnet.

Simulation der Beispielfälle

Die Validierung der Tools WUFI[®]plus und iZone beginnt mit der Modellierung des Typraums. Dazu wird die einfache Geometrie mit den beiden Programmen modelliert. In der Außenwand wird ein Fenster eingefügt. Die Größe dieser Fensterfläche ist in der Richtlinie nicht eindeutig angegeben und variiert zwischen 7,0 m² und 10,5 m². Da für die Innentüre zwar Materialdaten, jedoch keine Dimension angegeben ist, wird bei der Modellierung auf diese verzichtet.

Es wird mit den Beispielen zur Überprüfung der Berechnung von Lasten und Sollwertänderungen begonnen. Der Testraum ist für alle Beispielfälle gleich. Für die unterschiedlichen Testrechnungen werden die jeweils vorgegebenen Randbedingungen definiert, die in den Tabellen A1, A3 und A4 der Richtlinie aufgeführt werden. Darin werden die Materialien der Bauteile für „leichte“ und „schwere“ Bauweise beschrieben. Ebenso werden deren bauphysikalische Parameter angegeben. Die Eigenschaften der Verglasung sind für die ersten Beispiele dabei überflüssig, da diese als opake Fläche ohne Speicherfähigkeit definiert werden soll. Die Wärmeübergangskoeffizienten werden nur für Konvektion angegeben. Die vorgegebenen Koeffizienten an den dem Testraum abgewandten Seiten der Innenwände werden ignoriert und durch eine adiabate Schicht in WUFI[®]plus und iZone ersetzt. Als variable Parameter werden die konvektiven und strahlenden Lasten durch Maschinen und deren Betriebszeit für die Beispiele festgelegt. In Beispiel fünf tritt Solarstrahlung hinter der Verglasung als Last auf. Die Strahlungsdaten werden als stündliche Werte angegeben. Sie werden durch eine Verschattung abgemindert. Es gestaltet sich schwierig, diese Werte zu interpretieren und entsprechend als Randbedingung in der Simulation zu definieren. Die fehlenden oder missverständlichen Angaben in den Tabellen A1-A3 der VDI erschweren die konsistente Durchführung der Validierung. Um die entsprechend richtigen Angaben ermitteln zu können sind zahlreiche Variantenrechnungen nötig.

Für die Simulation der zweiten Beispielgruppe zur Überprüfung der Berechnung der solaren Einstrahlung werden die Bauteile des Typraums mit Material „schwerer“ Bauweise belegt. Die bauphysikalischen Parameter der Komponenten sind sehr vereinfacht. Für die Außenwand werden keine entsprechenden Parameter angegeben. Das Fenster wird für jede Variante eines Beispiels in eine andere Orientierung ausgerichtet und die Verglasung mit den vorgegebenen Eigenschaften definiert. Die Klimatisierung der Raumluft wird mit unbegrenzter Anlagenleistung gewährleistet. Das TRY 05 Würzburg wird für jedes Beispiel entsprechend der Vorgaben verändert.

ERGEBNISSE

Die Ergebnisse der Simulation der Testfälle aus der VDI Richtlinie 6020 können mit vorgegebenen Vergleichswerten ausgewertet werden. Diese Werte sind in der VDI 6020 leider nur als Grafiken vorhanden. Jedoch finden sich für die erste Gruppe der Testbeispiele Vergleichswerte in tabellarischer Form in der VDI Richtlinie 6007 – Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden (VDI 6007 2007). Diese Richtlinie

gibt ebenfalls Fälle zur Validierung von Gebäudesimulationsprogrammen vor. Die ersten sieben Fälle der Richtlinie 6020 sind denen der Richtlinie 6007 sehr ähnlich, weshalb diese Ergebnisse zum Vergleich tabellarisch aufgeführt werden. Diese Werte werden für die Bewertung der Berechnungen mit WUFI[®]plus verwendet.

Der zweite Teil der Testbeispiele kann leider zunächst nur graphisch mit den Vergleichsergebnissen in der VDI 6020 verglichen werden. Aus diesem Grund wurde für die Übertragung der Werte (insbesondere für die Fälle der Ganzjahressimulation, Beispiel 13 der Richtlinie) in eine vom Rechner interpretierbare Form ein spezielles Interpolationsverfahren zum Abgleich der eingescanten Daten unter hohem Zeitaufwand eingesetzt.

Für die Testfälle eins bis fünf werden jeweils der erste, der zehnte und der sechzigste Tag der Simulation hinsichtlich der sich einstellenden Lufttemperatur im Raum verglichen. So können Startwerte, das Einschwingverhalten und die Übereinstimmung im eingeschwungenen Zustand überprüft werden. Für das erste Beispiel wird ebenfalls das Einschwingverhalten über den gesamten Berechnungszeitraum verglichen. Die Beispiele sechs und sieben überprüfen die Wirkung der Klimatisierung. Daher wird für Simulation sechs die Anlagenleistung am zehnten Tag gegenübergestellt. Im siebten Fall ist ein Vergleich der Raumlufttemperatur am zehnten Tag vorgesehen.

Die erste Beispielgruppe wurde nur mit WUFI[®]plus gerechnet. Das Programm erzielte dabei größtenteils gute Ergebnisse. Wie Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen, stimmen die mit WUFI[®]plus berechneten Verläufe der Innenraumtemperatur mit den Vergleichsergebnissen der VDI-Richtlinie überein. Das Einschwingverhalten zeigt sich etwas träger. Jedoch erreicht WUFI[®]plus nach 60 Tagen das gleiche Temperaturniveau, das in der Richtlinie angegeben ist. Die Lasteintritte und -spitzen werden richtig abgebildet und erhöhen die Innentemperatur im richtigen Maß.

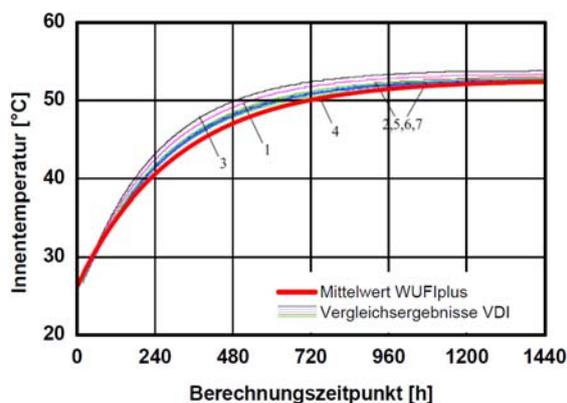


Abbildung 2: Mittelwert des Einschwingvorgangs über 60 Tage

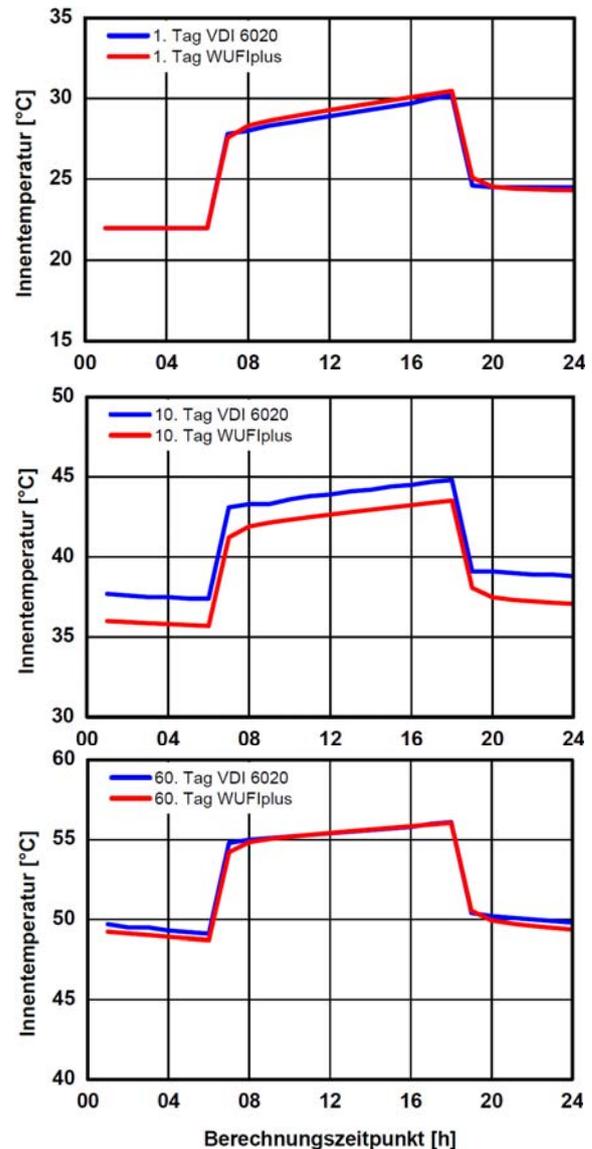


Abbildung 3: Testfall 1 - Vergleich der Innentemperaturen an den Berechnungstagen 1, 10, und 60

Für den Testfall fünf, der eine solare Last hinter der Scheibe als Last angibt, ist auch nach vielen Varianten keine Übereinstimmung zu erreichen. Der verzögerte Lasteintritt bei der Berechnung mit WUFI[®]plus, wie in Abbildung 4 deutlich, lässt sich durch eine falsche Angabe in der Richtlinie erklären. Der Lasteintrittspunkt in den Eingabeparametern stimmt nicht mit dem der Grafik überein. Die Erhöhung der Raumlufttemperatur wird jedoch entsprechend abgebildet.

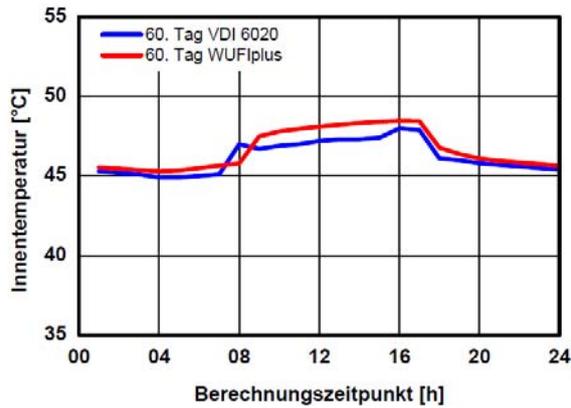


Abbildung 4: Testfall 5 - Vergleich der Innentemperaturen an den Berechnungstagen 1, 10, und 60

Die Vergleiche der Testfälle acht bis elf sind umfangreicher gestaltet. Es werden zwei Tage aus dem simulierten Zeitraum mit Vorgabewerten verglichen. Für jeden der beiden Tage werden die Werte aller fünf Varianten (Fensterorientierungen) gegenübergestellt. Für diese Fälle werden die Strahlungsbilanzen für den Tag und die jeweilige Fensterorientierung bewertet.

Beispiel acht zeigt die Energiebilanz über die Fensterfläche unter Berücksichtigung des langwelligen Strahlungsaustausches. Die zu vergleichenden Tage repräsentieren je einen sonnigen und einen bedeckten Tag. So können die direkte und die diffuse Strahlungsberechnung geprüft werden.

Die Simulationen des Beispielfalls mit beiden Programmen zeigte ein zufriedenstellendes Ergebnis. Die Berechnungen mit den Simulationstools zeigen Verläufe, die sich mit den Vergleichsergebnissen der VDI decken. Abbildung 5 zeigt die Vergleiche der Einstrahlung für unterschiedlich orientierte Fenster.

In Abbildung 5 (oben) ist ersichtlich, dass die von iZone vorhergesagte Anlagenleistung eine lokale Spitze aufweist. Dies ist nach Ansicht der Autoren dadurch zu erklären, dass für die Solarstrahlungsberechnung in iZone ein detailliertes Raytracing-Modell zur Strahlverfolgung zum Einsatz gelangt und in diesem Fall sehr kleine Zeitschritte verwendet worden sind, womit hierbei ein Strahlungseinfall auf der Nordseite zum Tragen kommt. Weiterhin ist, verglichen mit den Vorgaben der Norm, eine andere empirische Formulierung der konvektiven Wärmeübertragung eingesetzt worden.

Die Grafiken der Vergleichswerte zu Beispiel 10 werfen jedoch Fragen auf. Die Verläufe der Simulationsergebnisse und der Vergleichswerte zeigen die gleiche Höhe, jedoch treten Verschiebungen in Zeitrichtung auf. Dabei fällt keine einheitliche Richtung der Verschiebung auf. Innerhalb eines Tages bei unterschiedlicher Fensterorientierung

zeigen die Kurven eine stündliche Verschiebung nach

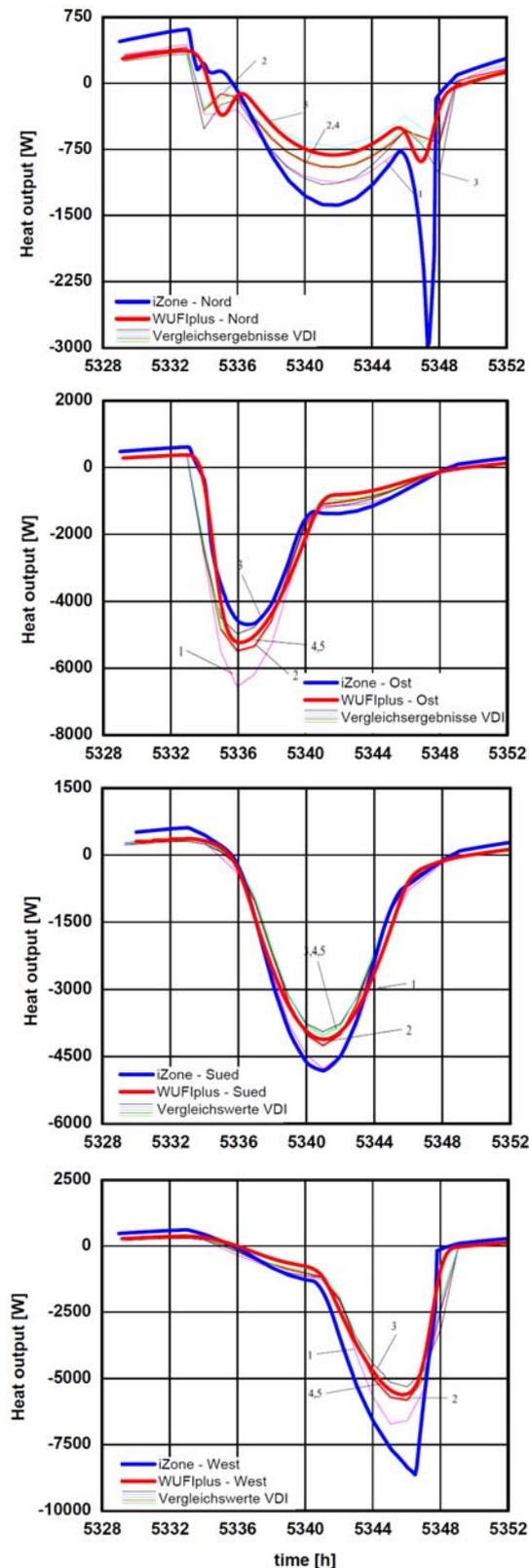


Abbildung 5: Fall 8 - 11. August - Vergleich unterschiedlich orientierter Fenster (von oben nach unten: Nord, Ost, Süd, West)

vorne oder nach hinten. Worauf dies zurück zu führen ist, oder ob dies ein Druckfehler in der Skalierung der Grafiken ist, kann nicht geklärt werden. Die abweichende Skalierung in der VDI im Vergleich zu den anderen Beispielfällen, obwohl der gleiche Tag verglichen wird, könnte aber ein Hinweis dafür sein.

Für den Fall der Ganzjahressimulation (Beispiel 13) ist in Abbildung 6 die Heizleistung für die Periode vom 31. Januar bis 7. Februar dargestellt. iZone kann die zeitliche Dynamik der Spitzenwerte gut voraussagen. Quantitative Unterschiede sind durch die zuvor erwähnten Unterschiede bei der Berechnung des Wärmeübergangs zu erklären.

Abbildung 7 vergleicht die mit iZone berechnete maximale Heizleistung mit den in der Norm definierten Werten. Für das zeitliche Profil des Nutzerverhaltens wurden folgende Belegungszeiten angenommen: werktags Arbeitszeit von 7 bis 17 Uhr, Anlagenbetrieb von 8 bis 18 Uhr; außerhalb dieser Zeiträume wurde eine Grundtemperatur von 18°C gehalten. Weitere Details sind in (van Treeck 2010) dargestellt.

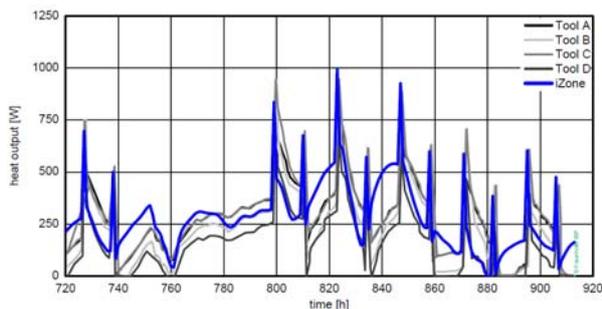


Abbildung 6: Heizleistung [W] für den Monat Januar aus iZone verglichen mit den Werten von Beispiel 13

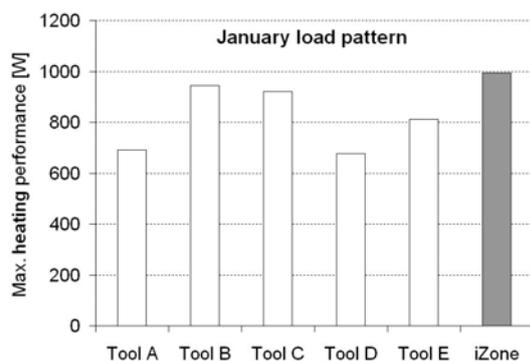


Abbildung 7: Vergleich der berechneten maximalen Heizleistung von iZone für Januar im Beispiel 13

ZUSAMMENFASSUNG

Die Validierung der Gebäudesimulationsprogramme WUFI®plus und iZone mit der VDI Richtlinie 6020 zeigte größtenteils gute Ergebnisse und damit die Qualität der Software. Jedoch gestaltete sich die

Durchführung der Testrechnungen aufgrund zahlreicher Unstimmigkeiten in den Angaben der Richtlinie schwierig und durch die zahlreichen Variantenrechnungen um die richtigen Parameter für die Eingabe herausfiltern zu können, zeitaufwendig. Dies hinterlässt kein abschließend befriedigendes Ergebnis einer Validierung.

Um eine Gebäudesimulationssoftware produktiv einsetzen zu können, muss mit Hilfe von Validierungsrechnungen die Qualität geprüft und gezeigt werden. Um verlässliche und fundierte Ergebnisse zu erhalten, empfiehlt sich die Durchführung von Testrechnungen nach weiteren Richtlinien und Normen. Dies könnte künftig mit VDI 6007 und ASHRAE 140 erfolgen.

LITERATURVERZEICHNIS

- ANSI/ASHRAE Standard 140: Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests. 2007
- DIN EN 15255: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Berechnung der wahrnehmbaren Raumkühllast - Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren; Deutsche Fassung EN 15255:2007
- DIN EN 15265: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Berechnung des Heiz- und Kühlenergieverbrauchs - Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren; Deutsche Fassung EN 15265:2007
- Clarke J. (2001). Energy simulation in building design (2nd). Butterworth-Heinemann.
- VDI 6007: Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden, Raummodell – Blatt 1 Oktober 2007
- VDI 6020: Anforderungen an Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation, Gebäudesimulation - Blatt 1 2001
- van Treeck, C., Frisch, J., Egger, M., and Rank, E. (2009) Model-adaptive analysis of indoor thermal comfort. In Building Simulation 2009, Glasgow, Scotland.
- van Treeck, C. (2010). Habilitationsschrift, Technische Universität München.

EURO-GLASER UNTER BEACHTUNG SOLARER STRAHLUNGS- /ABSORPTIONSBEDINGUNGEN SOWIE DRUCKINDUZIERTER FEUCHTEEINTRÄGE IM VERGLEICH ZU DYNAMISCHEN SIMULATIONEN

Bernd Nusser¹, Thomas Bednar² und Martin Teibinger¹

¹Holzforchung Austria, Fachbereich Bauphysik, Wien, Österreich

²Technische Universität Wien, Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz,
Österreich

Keywords: konvektiver Feuchteintrag, Beschattung, feuchtheadaptive Materialien, Glaser, EN ISO 13788

KURZFASSUNG

Im folgenden Beitrag wird die Notwendigkeit, den konvektiven Feuchteintrag sowie die solaren Strahlungs- und Absorptionsbedingungen bei der stationären Bauteilbewertung nach Euro-Glaser (EN ISO 13788) [1] zu berücksichtigen, aufgezeigt. Hierfür wird eine Volumenstromgleichung zur Berechnung der Luftexfiltration in Abhängigkeit der Luftdichtheitsklasse des Bauteils vorgestellt. Anschließend werden die Wärme- und Feuchtestromgleichungen des Euro-Glaser-Verfahrens um den Leckageluftstrom und den solaren Absorptionskoeffizienten der Außenoberfläche inkl. Beschattungsfaktor erweitert. Die hierdurch gewonnenen Berechnungsergebnisse eines Flachdaches werden denen aus instationären 2-D Simulationen gegenüber gestellt.

ABSTRACT

In this report, the need to consider the convective moisture transport and the solar radiation and absorption conditions for the steady state evaluation of building components according to Euro-Glaser (EN 13788) [1] are shown. Therefor a flow rate equation for calculating the air exfiltration in building components is presented.

Afterwards the heat and moisture flow equations of the Euro-Glaser-Method are extended with leakage air flow and the solar absorption coefficient and shadowing factor of the outer surface.

The results of this calculations for flat roofs are compared with the results of transient 2-D simulations.

EINLEITUNG

Im derzeit gültigen Normverfahren zur Berechnung des wärme- und feuchtechnischen Verhaltens von Bauteilen und Bauelementen EN ISO 13788 (Euro-Glaser) [1] werden weder vorhandene konvektive Feuchteinträge noch das solare Absorptionsverhalten oder eine Beschattung des Bauteils berücksichtigt. Des Weiteren sind im Euro-Glaser-Verfahren erhöhte Einbaufeuchten der Materialien ebenso wenig wie feuchtheadaptive Diffusionswiderstände von Bauteilschichten implementierbar.

Diese Faktoren beeinflussen das hygrothermische Verhalten von Bauteilen jedoch nachhaltig. Vor allem Bauteile mit hohen äußeren Diffusionswiderständen wie z.B. manche Flachdachkonstruktionen reagieren auf die genannten Einflüsse empfindlich [2, 3, 4, 5]. Bereits 1999 wurde auf die fehlende Berücksichtigung einiger dieser Faktoren und ihrer Notwendigkeit im Glaser-Verfahren hingewiesen [6].

Nachfolgend wird ein diesbezüglich modifiziertes Euro-Glaser-Verfahren (Glaser-VIE) präsentiert und den Ergebnissen eines mit Freilandversuchen an der Holzforchung Austria [7] bewerteten numerischem Simulationsprogramms (HAM3D-VIE) [8] gegenübergestellt.

LUFTEXFILTRATION

Eine der typischen Gründe für eine geringe Luftdichtheit von Gebäuden und konvektionsbedingte Feuchteschäden liegt neben ungenügend dichten Bauteilanschlüssen häufig bei Installationen welche die innenseitige Luftdichtheitsschicht durchdringen [9, 10, 11, 12].

Zur Abschätzung des potentiellen konvektiven Feuchteintrags in die Konstruktion aufgrund von Leckagen an der innenseitigen Luftdichtheitsschicht, wurden die Baupläne von 50 Einfamilienhäusern (EFH) mit insgesamt 646 Räumen bezüglich ihrer Elektroinstallationen und anderweitigen Durchdringungen hin ausgewertet. Die Gebäude wurden größtenteils im Jahr 2008 errichtet, was Abbildung 1 entnommen werden kann. Bei den untersuchten Gebäuden handelt es sich durchwegs um Holzrahmenbaukonstruktionen von fünf großen österreichischen Fertighausunternehmen.

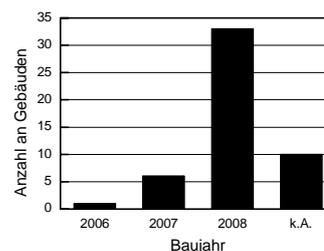


Abbildung 1: Altersprofil der 50 ausgewerteten Einfamilienhäuser.

Aufgrund der u.a. höhenabhängigen Druckdifferenz zwischen Innenraum und Außenbereich gemäß Gleichung (1) entsprechend einem Ansatz aus [13] wirken sich Leckagen in höheren Positionen, d.h. im Bereich des Daches, am kritischsten aus.

$$\Delta P = -0,0215 \cdot (T_{air,ex} - T_{air,in}) \cdot h \quad (1)$$

ΔP Druckdifferenz zwischen Innenraum und Außenbereich in Pa
 $T_{air,ex}$ Lufttemperatur im Außenbereich in K
 $T_{air,in}$ Lufttemperatur im Innenraum in K
 h Höhe des zusammenhängenden Luftraums im Innenraum in m

Zunächst werden deshalb die Decken und Dächern von 531 Räumen auf die Anzahl von Lichtkabelausslässen hin untersucht. Heizungs- und Lüftungsinstallationen, Telekommunikationsleitungen oder auch Steckdosen stellen nur einen geringen Anteil an Durchdringungen in den ausgewerteten Decken und Dächern dar und werden nicht beachtet. Die Anzahl der Lichtkabelausslässe wird in $1/m^2$ Raumgrundfläche angegeben.

Wie Abbildung 2 entnommen werden kann, liegt der Mittelwert an Lichtkabelausslässen in Decken/Dächern pro m^2 Raumgrundfläche bei 0,16, das zugehörige 95%-Quantil liegt bei 0,48 $1/m^2$.

Neben den Lichtkabelausslässen in den Decken und Dächern wurden auch potentielle Durchdringungen der innenseitigen Luftdichtheitsschicht in den Außenwänden erfasst.

Konkret waren dies:

- A. Klima-/Heizung-/Sanitärinstallationen
- B. Stromkabelausslässe
- C. Lichtschalter u.ä.
- D. Steckdosen
- E. Telekommunikationsanschlüssen
- F. Sonstige Elektroinstallationen (z.B. Verteilerdosen, etc.)

Abbildung 2 zeigt auch die Häufigkeiten der einzelnen Leckagen pro m^2 Wandfläche. Es wurden hierfür insgesamt 445 Räume mit durchdringungsbehafteten Außenwänden ausgewertet und eine mittlere Raumhöhe von 2,60 m vorausgesetzt. Räume ohne Durchdringung in der Außenwand flossen nicht in die Auswertung mit ein.

Wie zu erkennen ist, sind bei einer Leckagedichte von 0,48 $1/m^2$ die 95%-Quantile alle erfassten potentiellen Leckagen inbegriffen.

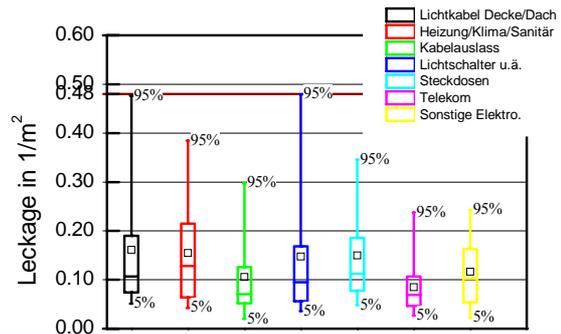


Abbildung 2: Potentielle Leckagen pro m^2 Grund-/Wandfläche in den Decken/Dächern und Außenwänden von 50 Einfamilienhäusern.

In [10] wurde der Luftvolumenstrom durch ein nicht abgeklebtes Elektrokabel entsprechend Abbildung 3 bei 10 Pa als geringste Druckdifferenz ermittelt. Unter der Annahme, dass die in den EFH erfassten Leckagen verallgemeinert durch ein solch nicht abgeklebtes Elektrokabel repräsentiert werden, beschreibt Gleichung (2) den Leakagevolumenstrom bei einer Kabelausslassdichte von 0,48 $1/m^2$. Hierfür wird der für Spalt- und Rissleckagen typische Strömungsexponent von 2/3 verwendet [11, 13, 14].

$$Q = 4 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta P^{2/3} \quad (2)$$

Q Leakagevolumenstrom in $m^3/(m^2 \cdot s)$

Janssen [3] beziffert die zu erreichende Luftdichtheit von Dächern mit Foliendampfbremsen nach europäischem Baustandard der 1990er Jahre mit

$$Q_{Jan} = 1 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta P \quad (3)$$



Abbildung 3: Nicht abgeklebte Durchdringung eines Elektrokabels durch die Dampfbremse [10].

In den letzten Jahren hat sich viel im Bezug auf die Luftdichtheit von Holzbauten getan. So waren Gebäude in Holzbauweise in Deutschland aus den Jahren 2001/02 im Vergleich zu Bauten aus den Jahren 1995/96 um nahezu 50 % luftdichter [15]. Seit den dortigen Untersuchungen dürfte sich die Luftdichtheit im Holzbau nochmals verbessert haben. Janssens Bezugswert bei 4 Pa muss um 75 % reduziert werden, um dem Volumenstrom durch Gleichung (2) zu entsprechen. Dies erscheint aufgrund des deutlich gestärkten Luftdichtheitsbewusstseins und der technischen

Neuerungen im Holzbau in den letzten 15 Jahren als plausibel.

Der durch Gleichung (2) beschriebene Volumenstrom wird nachfolgend als Referenzvolumenstrom F_{100} (Flow 100 %) bezeichnet. Zur Einteilung des Bauteils in verschiedene Luftdichtheitsklassen werden 4 Abstufungen vorgenommen.

- **F100** Gebäudedichtheit nicht nachgewiesen, Luftdichtheitsausführungen gemäß Stand der Technik.
- **F50** Gebäudedichtheit mit Blower-Door nachgewiesen ($n_{50} \leq 3,0$ l/h), Leckageortung wird durchgeführt, Durchdringungen lediglich eingehaust oder mit Manschetten.
- **F25** Gebäudedichtheit mit Blower-Door nachgewiesen ($n_{50} \leq 1,5$ l/h), Leckageortung wird durchgeführt. Durchdringungen lediglich eingehaust oder mit Manschetten.
- **F12** Werkseitig vorgefertigte, beidseitig beplankte Bauteile mit Dampfbremse. Durchdringungen lediglich eingehaust oder mit Manschetten. Bauzeitenabdichtung bereits im Werk aufgebracht.

In [16] werden Bauteile zur Bestimmung des zugehörigen Leckagevolumenstromes in Klassen (A, B, C) nach Reihung des q_{50} -Werts des Gebäudes eingeteilt. Abbildung 4 zeigt den Vergleich der Leckagevolumenströme der unterschiedlichen Luftdichtheitsklassen beider Ansätze. Wie zu erkennen ist, liegen die Volumenströme durch F100, F50 und F25 bei geringeren Drücken welche sich durch den thermischen Auftrieb ergeben (vgl. Abbildung 7) zumeist oberhalb jener der Klasse A, B und C. Der Volumenstrom durch F12 liegt ab 2 Pa hingegen unterhalb der Volumenströme gemäß [16].

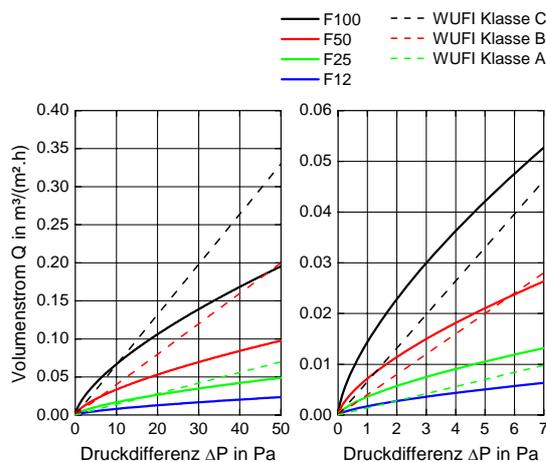


Abbildung 4: Vergleich der hier hergeleiteten Leckagevolumenströme und jener aus [16].

MODIFIZIERTER EURO-GLASER

Abbildung 5 zeigt die modellhafte Abbildung eines Flachdachaufbaus gemäß dem modifizierten Euro-Glaser (Glaser-VIE). Die Quelle des Luftmassenstroms befindet sich am innersten Layer und die Senke am äußersten Layer der Dämmung. Die implizierte Anfangsfeuchte wird dem mittleren Layer des Dämmstoffes zugeordnet.

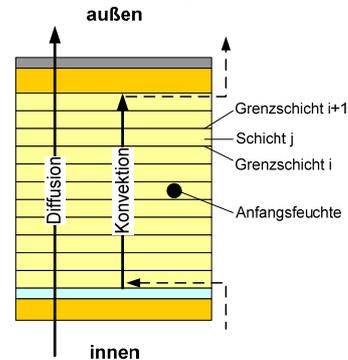


Abbildung 5: Darstellung eines Flachdachaufbaus gemäß Glaser-VIE-Modell.

Zur Berechnung des Luftvolumenstroms für die Luftdichtheitsklasse F100 beträgt der Luftdichtheitsfaktor $F = 1$, für F50 $F = 0,5$ für F25 $F = 0,25$ und für F12 entsprechend $F = 0,12$.

Der resultierende Luftmassenstrom in das Gefach des Bauteils errechnet sich nach Gleichung (4).

$$\dot{m} = \rho_{air} \cdot F \cdot Q \quad (4)$$

\dot{m} Luftmassenstrom in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

ρ_{air} Dichte der Luft = $1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$

F Luftdichtheitsfaktor

Die Wärme- und Feuchteströme werden unter Berücksichtigung des konvektiven Wärme- und Stofftransports durch Gleichung (5) und (6) ermittelt.

$$q_i = c \cdot \dot{m} \cdot \left(T_i + \frac{T_i - T_{i+1}}{e^{P_H} - 1} \right) \quad (5)$$

$$\text{mit } P_H = \frac{c \cdot \dot{m}}{\lambda_j / d_j}$$

q_i Wärmestromdichte über die Schichtgrenze i in W/m^2

c Spezifische Wärmekapazität der Luft = $1006 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

$T_{i,i+1}$ Temperatur an der Schichtgrenze i bzw. $i+1$ in K

λ_j Wärmeleitfähigkeit der Schicht j in $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

d_j Dicke der Schicht j in m

$$j_i = \frac{0,622}{p_0} \cdot \dot{m} \left(p_i + \frac{p_i - p_{i+1}}{e^{P_M} - 1} \right) \quad (6)$$

$$\text{mit } P_M = \frac{\dot{m} \cdot 0,622 / p_0}{\delta_0 / (\mu_j \cdot d_j)}$$

j_i Massenstromdichte über die Schichtgrenze i in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

- p_0 Luftdruck in Pa
 $p_{i,i+1}$ Wasserdampfpartialdruck an Schichtgrenze i bzw. $i+1$ in Pa
 δ_0 Wasserdampfdiffusions-Leitkoeffizient der Luft = $2E-10$ kg/(m.s.Pa)
 μ_j Wasserdampfdiffusion-Widerstandszahl der Schicht j

Anstatt direkt die Monatsmittelwerte der Außenlufttemperatur zur Berechnung des Temperaturfeldes zu verwenden, wird gemäß Gleichung (7) der solare Absorptionskoeffizient der außenseitigen Bauteiloberfläche herangezogen und eine Approximation des konvektiven und radiativen Wärmeaustausches mit der Umgebung durchgeführt. Die Gegenstrahlungstemperatur –für Flachdächer die Himmelstemperatur– kann hierfür um 10 K geringer angesetzt werden als die Außenlufttemperatur.

$$q_{surf,ex} = \alpha_c \cdot (T_{surf,ex} - T_{air,ex}) + \alpha_r \cdot (T_{surf,ex} - T_{sky}) \quad (7)$$

- $-a \cdot (1 - f_s) \cdot I_s$
 $q_{surf,ex}$ Wärmestromdichte über die Außenoberfläche in W/m^2
 $\alpha_{c,r}$ konvektiver bzw. radiativer Wärmeübergangskoeffizient in $W/(m^2 \cdot K)$
 $T_{surf,ex}$ Temperatur der Außenoberfläche in K
 T_{sky} Himmelstemperatur in K
 a solarer Absorptionskoeffizient der Außenoberfläche
 f_s Verschattung der Außenoberfläche (0-0,8)
 I_s mittlere monatliche Solarstrahlung in W/m^2

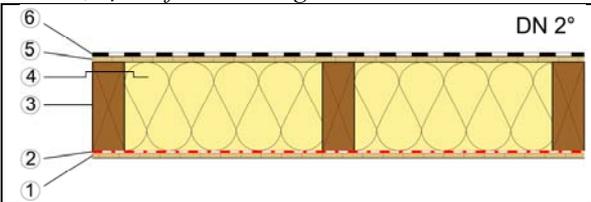
Der feuchteabhängige Diffusionswiderstand der eingesetzten Materialien wird über die Luftfeuchte den anliegenden Schichtgrenzen aus dem letzten Interrationsschritt ermittelt.

INSTATIONÄR VS. STATIONÄR

Zum Vergleich zwischen stationärem Glaser-VIE und instationären Berechnungsergebnissen. wird ein Flachdachaufbau gemäß Tabelle 1 simuliert.

Als Außenklima wird für das relativ kalte Klagenfurter Test-Referenz-Jahr (TRY) und als Innenklima ein Sinus mit $22^\circ C/40\%$ r.Lf. im Winter (15.01) und $26^\circ C/60\%$ r.Lf. im Sommer (15.07) angesetzt. Für die instationären Simulationen werden Stundenwerte und für die stationäre Berechnung jeweils Monatsmittelwerte herangezogen. Die Raumhöhe wird mit 8 m angenommen. Die Berechnungen starten jeweils im Oktober.

Tabelle 1: Berechneter Flachdachaufbau. Schichtenfolge: 6 EPDM, 5 OSB, 4 Mineralwolle, 3 Fichtensparren, 2 Feuchteadaptive Dampfbremse, 1 OSB, k_l = Luftdurchlässigkeit.



	d in mm	λ in W/mK	ρ in kg/m ³	c in J/kgK	μ	k_L in m ⁻²
6	1.5	-	1400	1000	58000	0
5	18	0.130	600	1700	10-165	0
4	280	0.038	14.5	1030	1	1×10^{-8}
3	280	0.130	450	1700	130	0
2	0.2	-	-	2500	150-75000	0
1	15	0.130	600	1700	10-165	0

Der Aufbau wird stationär mit Glaser-VIE und instationär mit HAM3D-VIE jeweils für eine Luftdichtheitsklasse F50 ($F = 0,5$) berechnet. Die instationären Simulationen erfolgen 2-dimensional. Das 2-D Modell und die Zellen mit der Volumstromquelle und -senke sind in Abbildung 6 dargestellt. In den 2-D Simulationen wird für den Fichtensparren die Ausgleichsfeuchte bei 70 % r.Lf. und für die restlichen Materialien jene bei 50 % r.Lf. als Startbedingung angesetzt.

Bei den stationären Berechnungen mit Glaser-VIE wird eine erhöhte Anfangsfeuchte von 0,5 kg vorgegeben.

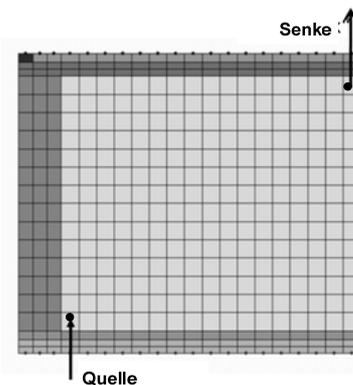


Abbildung 6: 2-D Modell des simulierten Flachdachaufbaus mit Positionsanzeige der Zellen mit Volumenstromquelle und Volumenstromsenke.

Abbildung 7 zeigt die Druckdifferenzen zwischen Innenraum und Außenbereich, welche sich bei einer Berechnung mit den Stundenwerten des Klagenfurter TRY und mit den Monatsmittelwerten aus dem TRY ergeben. Wie zu erkennen ist, herrscht bei der stundenweisen Berechnung eine starke Dynamik um die Druckdifferenzen aus den Monatsmittelwerten.

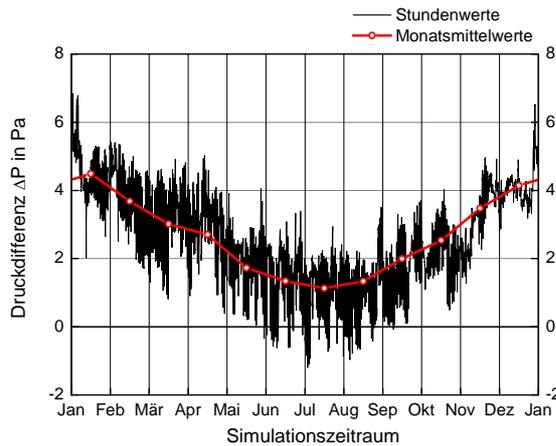


Abbildung 7: Druckdifferenz zwischen Innenraum und Außenbereich bei einer sinusförmigen Innenraumtemperatur von 22 °C im Winter und 26 °C im Sommer und Klagenfurter Test-Referenz-Jahr (TRY) als Außenbedingung. Berechnung mit Stundenwerten und vereinfacht mit Monatsmittelwerten des TRY. Höhe des zusammenhängenden Luftraums 8 m.

Abbildung 8 zeigt für die instationären 2-D Simulationen die Feuchtezunahme des gesamten simulierten Aufbaus, jedoch ohne innenseitige Beplankung. Für die stationären Berechnungen zeigt Abbildung 8 die Gesamtfeuchteänderung. Alle Feuchteänderungen in Abbildung 8 beziehen sich auf die jeweiligen Startfeuchten.

Beide Berechnungsmethoden liefern die gleichen Tendenzen im Bezug auf die Feuchtezu- und Feuchteabnahme. Durch die stationäre Berechnung wird die Feuchteänderung in beide Richtungen jedoch unterschätzt.

Aufgrund des Ausschlusskriteriums „Feuchtezunahme“ und der Unterschätzung der Feuchteabnahme wird die hier diskutierte Konstruktion durch das stationäre Verfahren kritischer beurteilt als durch das instationäre 2-D Verfahren. Glaser-VIE liegt hier somit auf der sicheren Seite.

Weiterführend muss jedoch der Umschlag zwischen Feuchteab- und Feuchtezunahme beider Berechnungsmethoden bei unterschiedlichen Randbedingungen gegenübergestellt werden.

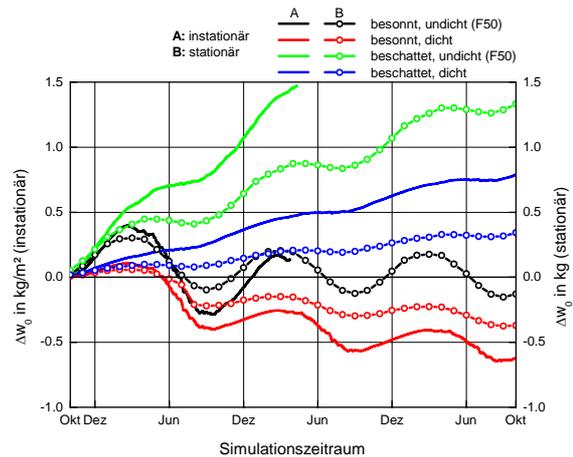


Abbildung 8: Feuchteänderung Δw_0 des Bauteils ohne innenseitige Beplankung (instationär) und Gesamtfeuchteänderung (stationär) im Bezug auf die Ausgangsfeuchte.

EINFLUSSFAKTOREN

Solare Strahlungs- /Absorptionsbedingungen

Abbildung 9 zeigt den Einfluss des gewählten solaren Absorptionskoeffizienten a auf den Gesamtwassergehalt des diskutierten, luftdichten Flachdachaufbaus.

Ohne Berücksichtigung der solaren Absorption und des radiativen Wärmeaustausches d.h. $a=0$ und $\alpha_r=0$ in Gleichung (7), steigt der Gesamtwassergehalt der Konstruktion deutlich an. Erst durch Einbeziehen des solaren Absorptionsgrades von 0,7 (hier mit $\alpha_r=5$) weist die Konstruktion längerfristig keine Auffeuchtung mehr auf und die erhöhte Einbaufeuchte kann austrocknen.

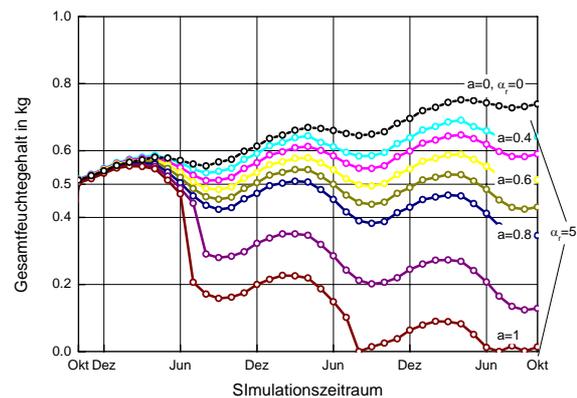


Abbildung 9: Gesamtfeuchtegehalt des untersuchten Flachdachaufbaus in Abhängigkeit des solaren Absorptionskoeffizienten a bei luftdichter und beschattungsfreier Ausführung.

Konvektiver Feuchteeintrag

Abbildung 10 zeigt den Einfluss des konvektiven Feuchteeintrags auf den Gesamtwassergehalt des Flachdachaufbaus. Als solarer Absorptionskoeffizient wurde 0,8 angesetzt, eine Beschattung ist nicht vorhanden. Wie zu erkennen ist, trocknet die

eingeschlossene Einbaufeuchte ab einem gewissen konvektiven Eintrag nicht mehr aus. Bei höheren Einträgen als durch F12 ist die Rücktrocknung nur noch sehr schwach ausgeprägt.

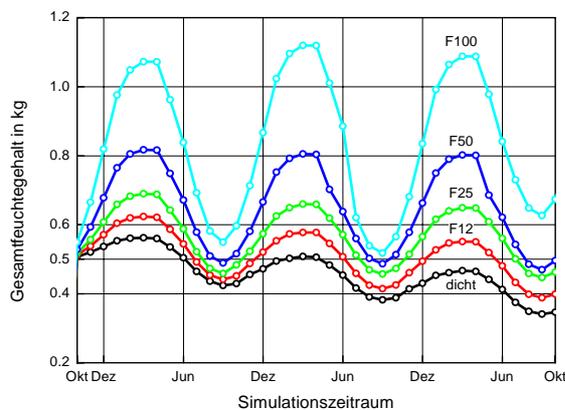


Abbildung 10: Gesamtfeuchtegehalt des untersuchten Flachdachaufbaus ($\alpha = 0,8, f=0$) in Abhängigkeit des konvektiven Feuchteeintrags.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Zuge der Untersuchungen wurden 50 Einfamilienhäuser hinsichtlich der Anzahl ihrer Elektro- und Heizung/Klima/Sanitärinstallationen hin ausgewertet. Mit Hilfe der Verallgemeinerung des Luftvolumenstroms durch diese Leckagen auf den Luftvolumenstrom durch ein nicht abgeklebtes Elektrokabel wird eine Volumenstromgleichung hergeleitet und vier Luftdichtheitsklassen definiert. Die hierbei entstehenden Leckageströme liegen im Bereich der Volumenströme eines bereits bestehenden Ansatzes.

Um diese Volumenströme sowie die solaren Absorptionsbedingungen oder eine Verschattung zu berücksichtigen, wurden die Wärme- und Feuchtestromgleichungen des stationären Euro-Glaser-Verfahrens geeignet erweitert.

Den hierdurch gewonnenen Berechnungsergebnissen wurden Simulationsergebnisse aus einer instationären 2-D Simulation gegenübergestellt. Untersuchungsgegenstand ist ein hölzernes, vollgedämmtes Flachdach mit außen stark diffusionsbremsender Folienabdichtung. Hierbei zeigt sich, dass das stationäre Verfahren die Feuchteänderung des Bauteils im gegebenen Fall unterschätzt, was im Hinblick auf die Feuchteabnahme zu einer konservativen Einschätzung führt. Die Tendenzen der Feuchtezu- und -abnahmen stimmen generell überein.

Um eine konservative Bauteileinschätzung durch das stationäre Glaser-VIE-Verfahren sicher zu stellen, sind weiterführend geeignete Bewertungskriterien auszuarbeiten.

Wie die Variantenstudie zeigt, wirken sich der solare Absorptionsgrad und somit auch eine Beschattung sehr stark auf das hygrische Verhalten des Bauteils aus. Ebenfalls zeigt sich anhand der Variantenstudie

der maßgebende Einfluss der Luftdichtheit des Bauteils auf das hygrische Verhalten dessen. Beide Einflussfaktoren sind bei der Bewertung von Bauteilen zu berücksichtigen.

Inwieweit das hier vorgestellte modifizierte Euro-Glaser-Verfahren - Glaser-VIE - eine auch für andere Bauteile und Baustoffe, allgemeine Gültigkeit besitzt, muss noch untersucht werden.

LITERATUR

- [1] ÖNORM EN ISO 13788, 2002-01-01: *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren.*
- [2] Nusser, B.; Teibinger, M.; Bednar, T. (2010): *Messtechnische Analyse flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen mit Sparrenvollämmung - Teil1: Nicht belüftete Nacktdächer mit Folienabdichtung.* In: *Bauphysik*, Jg. 32, H. 3, S. 132-143.
- [3] Janssens, A. (1998): *Reliable control of interstitial condensation in lightweight roof systems, calculation and assessment methods.* Dissertation. Catholic University Leuven, Belgium.
- [4] Bludau, C.; Zirkelbach, D.; Künzel, H. M. (2008): *Surface Temperatures on Flat Roofs and Hygrothermal Consequences.* In: *Proceedings of the 8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries.* 16-18 June 2008. Copenhagen, Denmark S. 213-220.
- [5] Künzel, H. M.; Großkinsky, T. (1998): *Feuchtesicherheit unbelüfteter Blechdächer; auf die Dampfbremse kommt es an!* In: *WKSB*, Jg. 43, H. 42, S. 22-27.
- [6] Künzel, H. M. (1999): *Dampfdiffusionsberechnung nach Glaser - quo vadis.* Fraunhofer-Institut für Bauphysik (Holzkirchen). IBP-Mitteilung Nr.: 355.
- [7] Teibinger, M.; Nusser, B. (2010): *Flachgeneigte hölzerne Dachkonstruktionen. Teil 1. Ergebnisse experimenteller Untersuchungen.* Herausgegeben von Holzforschung Austria. Wien. Forschungsbericht, HFA-Nr.: P412.
- [8] Bednar, T. (2000): *Beurteilung des feuchte- und wärmetechnischen Verhaltens von Bauteilen und Gebäuden. Weiterentwicklung der Meß- und Rechenverfahren.* Dissertation. TU Wien, Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz.

- [9] Fuhrmann, W. (2003): *Luft- und Winddichtheit von Holzhausbauten. Einfluss der Konstruktionsarten und Ausbaustufen. 2. Aufl.* Herausgegeben von Holzforschung Austria. Wien. Forschungsbericht 357.
- [10] Hall, M.; Hauser, G. (2003): *In situ Quantifizierung von Leckagen bei Gebäuden in Holzbauart.* Universität Kassel, Fachgebiet Bauphysik. Kassel. Forschungsbericht, AIF-Nr. 12611 N.
- [11] Mattsson, B. (2007): *Studies on building air leakage. A transient pressurisation method, measurements and modelling.* Dissertation. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- [12] Kalamees, T.; Korpi, M.; Eskola, L.; Kurnitski, J.; Vinha, J. (2008): *The distribution of the air leakage places and thermal bridges in Finnish detached houses and apartment buildings.* In: Proceedings of the 8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries. 16-18 June 2008. Copenhagen, Denmark, S. 1095–1102.
- [13] Hens, H. S. (2007): *Building Physics - Heat, Air and Moisture. Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises:* Ernst, Wilhelm & Sohn.
- [14] Richter, E.; Fischer, H.-M.; Jenisch, R.; Freymuth, H.; Stohrer, M.; Häupl, P.; Homann, M. (2008): *Lehrbuch der Bauphysik. Schall - Wärme - Feuchte - Licht - Brand - Klima:* Vieweg + Teubner.
- [15] Hall, M. (2004): *Quantifizierung von Luftdichtheits-Leckagen.* In: bauen mit holz, H. 8, S. 30–36.
- [16] Zirkelbach, D.; Künzel, H. M.; Schafczek, B.; Borsch-Laaks, R. (2009): *Dampfkongvektion wird berechenbar – Instationäres Modell zur Berücksichtigung von konvektivem Feuchteintrag bei der Simulation von Leichtbaukonstruktionen.* In: Proceedings 4th Intern. Symposium on Building and Ductwork Airtightness (BUILDAIR). October 1-2, 2009, Berlin, Germany.

KENNZEICHNUNG DER ENERGIEBILANZ VON FASSADEN- UND DACHFLÄCHENFENSTERN

Stephan Schlitzberger¹, Anton Maas¹, Bruno Philipson²
¹Ingenieurbüro Prof. Dr. Hauser GmbH, Deutschland
²VELUX A/S, Denmark

KURZFASSUNG

Als Bewertungsgröße für Bauteile in energetischer Hinsicht ist als Kennwert der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) etabliert und zumindest für opake Bauteile bietet dieser Wert die Möglichkeit, unterschiedliche Bauteile hinsichtlich ihrer energetischen Qualität vergleichend zu bewerten, da die solaren Wärmeeinträge im Verhältnis zu den Transmissionswärmeverlusten vernachlässigbar klein sind. Zur Beschreibung der energetischen Performance von Fenstern und anderen transparenten Bauteilen reicht der U-Wert allein nicht aus, um eine vergleichende Bewertung abzugeben. Zur Berücksichtigung der solaren Wärmeeinträge wird als weitere Größe der Gesamtdurchlassgrad (g-Wert) verwendet. Er beschreibt wie viel der auf der Außenseite des transparenten Bauteils auftreffenden Strahlung wärmewirksam das Innere des Gebäudes erreicht. Da aber die Nutzbarkeit der solaren Wärmeeinträge als heizwärmebedarfsreduzierende Wärmegewinne stark von gebäudespezifischen weiteren Größen wie z.B. Fensterflächenanteil und Wärmespeicherfähigkeit abhängig ist, können aus den Größen U-Wert und g-Wert allein keine Aussagen zu der energetischen Performance von Fenstern abgeleitet werden. Aus diesem Grund soll im Rahmen eines Projekts für Wohngebäude eine Methode zur vereinfachten energetischen Bewertung von Fenstern zu Vergleichszwecken aus korrespondierenden Simulationsrechnungen abgeleitet werden. Hierbei soll sowohl die Heizperiode als auch das Verhalten von Fassaden- und Dachflächenfenstern im Sommer berücksichtigt werden.

ABSTRACT

As a value for rating the energetic behaviour of building components, the coefficient of heat transfer (U-value) is well established, and at least for opaque building parts this value offers a possibility to rate and compare their transmission heat losses. To describe the energetic performance of windows and other transparent building parts, at least one more value is used: the solar heat gain coefficient (SHGC, g-value). This value describes the effective thermal portion of outer solar radiation that enters the

building. Because the usability of the total solar load as a solar gain to reduce heating energy demand is strongly dependant on building specific parameters such as the window-fraction or the thermal capacity, the U-value and the g-value together are not sufficient to derive statements on the energetic performance of windows. A part of this project is the development of a simplified method for rating the energetic behaviour of windows in residential buildings. Herein not only the energy balance during the heating period is considered, but also the behaviour of the facade and roof windows during the summer months are important aspects of the examination.

HINTERGRUND UND ZIELSETZUNG

Der Einfluss von Fenstern auf die Energiebilanz von Gebäuden ist hinreichend bekannt, ein Verfahren zur einheitlichen Kennzeichnung und Bewertung der ganzjährigen Performance von Fenstern und Verglasungen ist jedoch in Deutschland nicht etabliert. Auch auf europäischer Ebene konnte trotz einiger nationaler Bemühungen bislang noch kein einheitliches Fensterlabeling entwickelt und durchgesetzt werden. Um die Ansätze zu unterstützen, finden im Rahmen der internationalen Standardisierung derzeit Aktivitäten statt, ein Berechnungsverfahren durch die ISO 18292 vorzugeben. Dies vor dem Hintergrund, eine einheitliche Bewertungsvorlage anbieten zu können, welche lediglich auf nationale Verhältnisse, wie beispielsweise die anzusetzenden Klimarandbedingungen und für die Berechnungen zu verwendende Referenzgebäude angepasst werden müsste.

Der Wunsch nach einer klassifizierenden Kennzeichnung der Fenster und Fenstersysteme durch eine Größe, welche die Energieperformance beschreibt und sich nicht nur wie bislang durch die U-Werte auf die Transmissionswärmesenke oder den g-Wert auf die solare Wärmequelle bezieht, besteht sowohl von Seiten der Fensterhersteller als auch seitens der Kunden.

Übergeordnetes Ziel der Entwicklung einer sich auf die Gesamtbilanz eines Fensters beziehenden Produkt- bzw. Systemkennzeichnung ist die Darstellung des Reduktionspotenzials des

Energiebedarfs und somit des CO₂-Ausstoßes infolge der Verbreitung und Akzeptanz der Produktdeklaration. Damit dieses Ziel erreicht werden kann, muss das bereitgestellte Verfahren sicherstellen, dass es dem Anwender durch die Kennzeichnung je nach Anforderung eine Hilfestellung bei der Auswahl der „richtigen“ Fenster für sein Gebäude bietet. Wie auch bei vergleichbaren kennzeichnenden und bewertenden Produktdeklarationen hinsichtlich der eines Energiebedarfs bzw. -verbrauchs kann ein derartiges Labeling als „Einzahlenwert“ nur für bestimmte definierte Randbedingungen gelten und sollte nicht als Planungsinstrument verstanden werden.

ANSATZ UND METHODE

Für die kennzeichnende Klassifizierung wird grundsätzlich eine energetische Kenngröße angestrebt. Darüber hinaus wird außerdem eine bereits eingeführte Größe, der äquivalente U-Wert, hinsichtlich der Eignung als Bewertungsgröße untersucht. Hinsichtlich einer energetischen Klassifizierung soll zunächst ein zweistufiges Bewertungsschema bezogen auf Heiz- und Kühlperiode zur Anwendung kommen, wobei folgende Energiebilanzgleichungen gelten sollen.

Heizperiode:

$$E_h = I_h * F_S * g_w - D_h * U_W \quad (1)$$

mit:

E_h	[kWh/m ²]	Energiebilanz Heizperiode
I_h	[kWh/m ²]	nutzbare Solarstrahlung Heizperiode
F_S	[-]	Verschattungsfaktor
g_w	[-]	Gesamtenergiedurchlassgrad Fenster
D_h	[kKh]	Gradstunden Heizperiode
U_W	[W/m ² K]	U-Wert Fenster

Kühlperiode:

$$E_c = I_c * F_S * g_w - D_c * U_W \quad (2)$$

mit:

E_c	[kWh/m ²]	Energiebilanz Kühlperiode
I_h	[kWh/m ²]	nicht nutzbare Solarstrahlung Kühlperiode
D_c	[kKh]	Gradstunden Kühlperiode

Über die in den Gleichungen (1) und (2) hinaus aufgeführten Parameter hinaus werden weitere Einflüsse auf die Energiebilanz, wie z.B. Undichtigkeiten und Sonnenschutzvorrichtungen, mit einbezogen, welche zugunsten einer besseren Übersichtlichkeit nicht in der Formeldarstellung aufgenommen wurden.

Anhand von dynamischen Simulationsrechnungen werden die in den Gleichungen aufgeführten

Gradstunden sowie die nutzbaren und nicht nutzbaren Anteile der solaren Wärmeeinträge für unterschiedliche Gebäudestandards und -ausführungen hinsichtlich der Gebäudeschwere ermittelt. Hierbei werden verschiedene Fenstervarianten berücksichtigt, welche einen Querschnitt der derzeit am Markt verfügbaren Ausführungsformen beschreiben. Die gemäß Gleichungen (1) und (2) ermittelten Energieperformance-Werte für die Fenster lassen schließlich eine Einordnung beispielsweise in zu definierende Energieeffizienzklassen zu. Hieraus ergibt sich für alle untersuchten Fenstervarianten in Abhängigkeit von den jeweils variierten Parametern ein Ranking, aus dem hervorgehen sollte, welches der untersuchten Fenster für den jeweiligen Anwendungsfall die günstigsten Werte liefert. Die Untersuchung wird einerseits zeigen, welche Randbedingungen dieses Ranking beeinflussen und andererseits Aussagen zulassen, welche Parameter dieses Ranking nicht bzw. nur unwesentlich beeinflussen.

Das Projekt wird somit einen Vorschlag für die energetische Kennzeichnung von Fenster einbringen und zur Diskussion stellen.

LITERATUR

- Karsten Duer et al.: *Energy Labeling of glazings and windows in Denmark: Calculated and measured values*. Department of Civil Engineering, DTU. Denmark 2002.
- Jesper Kragh et al.: *Proposal for Energy Rating System of windows in EU*. Department of Civil Engineering, DTU. Denmark 2008.
- Hauser, G.: *Passive Sonnenenergienutzung durch Fenster, Außenwände und temporäre Wärmeschutzmaßnahmen - Eine einfache Methode zur Quantifizierung durch keq-Werte*. HLH 34 (1983).
- DIN EN ISO 13791: 2005-02. *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden- Sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik - Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren*.
- DIN 5034-1: 1999-10. *Tageslicht in Innenräumen - Teil1: Allgemeine Anforderungen*.
- Fraunhofer-Institut für Bauphysik: „*Studie zur Energieeffizienz innovativer Gebäude – Beleuchtungs- und Raumklimakonzepte (EnEFF)*“. Holzkirchen 2009, unveröffentlichter Bericht.
- Maas, A.; Kempkes C.: *Berechnungen zur EnEV 2009. Vorschlag für die Neuformulierung der EnEV-Nebenanforderung an H_T' unter Berücksichtigung der Strahlungsgewinne durch transparente Bauteile*. Kassel 2010, unveröffentlichter Bericht.