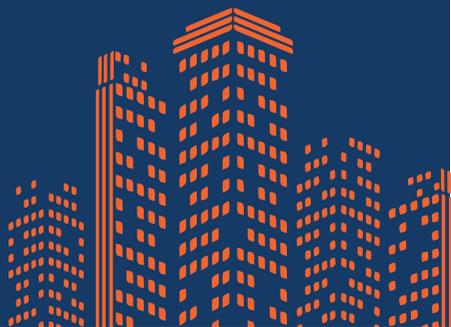


06./07.
März
2024

BAUPHYSIKTAGE IN WEIMAR 2024



Kooperationspartner

R
P **TU** Rheinland-Pfälzische
Technische Universität
Kaiserslautern
Landau

**Bauhaus-
Universität
Weimar**

WBA

WBA | Bauhaus Weiterbildungs-
akademie Weimar e.V.
Institut an der
Bauhaus-Universität Weimar

Stadt Weimar

Weimar ist eine Stadt, die auf eine unglaublich reiche und vielfältige Geschichte zurückblicken kann. Diese umfasst sowohl schöne als auch dunkle Kapitel der deutschen Zeitgeschichte. Besonders während der Weimarer Klassik Ende des 18. und Anfang des 19. Jahrhunderts spielte die Stadt eine wichtige Rolle. Geprägt wurde diese Zeit unter der Regentschaft der Herzogin Anna Amalia und ihres Sohnes Herzog Carl August unter anderem von Goethe, Schiller, Falk oder Herder. Das künstlerische und kulturelle Leben blühte während dieser Zeit in der Stadt und in weiteren Regionen Deutschlands auf.

Einen zusätzlichen Aufschwung in kultureller Hinsicht erlebte die Stadt im 19. Jahrhundert. Franz Liszt, Richard Wagner und Arnold Böcklin trugen maßgeblich zu dieser kulturell vielfältigen Entwicklung bei.

Ein Meilenstein der Weimarer Geschichte ereignete sich im Jahre 1919, als im Deutschen Nationaltheater die verfassungsgebende Versammlung stattfand. Infolge der Nationalversammlung wurden die nachfolgenden Jahre bis zum Jahr 1933 als "Weimarer Republik" bezeichnet.

Doch hatte Weimar, neben der großen kulturellen Bedeutung über die Jahrhunderte, auch dunkle Kapitel in der Stadtgeschichte. In der NS Zeit wurde auf dem Ettersberg bei Weimar das Konzentrationslager Buchenwald errichtet.

Die dunklen und die hellen Kapitel der Stadt sind noch heute durch zahlreiche Museen und die Altstadt erfahrbar und machen Weimar zu einem einzigartigen kulturellen Standort in Deutschland. Denn nicht zuletzt diese kulturellen Blütezeiten und Mannigfaltigkeit führten 1860 zur Gründung einer Kunstschule und schließlich zur Gründung des Bauhauses.

The city of Weimar

Weimar is a city that can look back on an incredibly rich and diverse history. This includes both beautiful and dark chapters of contemporary German history. The city played an important role especially during the Weimar Classic period at the end of the 18th and beginning of the 19th century. This period under the reign of Duchess Anna Amalia and her son Duke Carl August was shaped by Goethe, Schiller, Falk and Herder, among others. During this time, artistic and cultural life flourished in the city and in other regions of Germany.

The city experienced an additional boom in terms of culture in the 19th century. Franz Liszt, Richard Wagner and Arnold Böcklin made significant contributions to this culturally diverse development.

A milestone in Weimar history occurred in 1919 when the constituent assembly took place in the German National Theater. As a result of the National Assembly, the following years up to 1933 were referred to as the "Weimar Republic".

However, in addition to its great cultural importance over the centuries, Weimar also had dark chapters in the city's history. During the Nazi era, the Buchenwald concentration camp was built on the Ettersberg near Weimar.

The dark and the bright chapters of the city can still be experienced today through numerous museums and the old town and make Weimar a unique cultural location in Germany. Last but not least, these cultural heydays and diversity led to the founding of an art school in 1860 and finally to the founding of the Bauhaus.



Goethe-Schiller-Denkmal vor dem Nationaltheater (Foto: Shutterstock)

Die Bauhaus-Universität

Das Staatliche Bauhaus, die einflussreichste Gestaltungsschule des 20. Jahrhunderts, wurde 1919 im heutigen Universitäts-Hauptgebäude von Walter Gropius gegründet. Hervorragende Fachleute aus unterschiedlichen Disziplinen und Ländern haben mit neuartiger Kunst, Technik und Wissenschaft die Gestaltung der Lebenswelt nachhaltig geprägt. Was sie hervorbrachten, war eine Antwort auf die brennenden Fragen der Kunst, Kultur und Gesellschaft ihrer Zeit – der Moderne. Gemeinsam mit ihren Studentinnen und Studenten haben sie auch die Ausbildung revolutioniert.

An diese Geschichte knüpft der Name Bauhaus-Universität Weimar an. Die Universität ist eine lebendige Institution, kein Museum. Mit neuen Methoden werden Antworten auf zentrale Fragen der heutigen Kunst und Kultur, der Technik, Wissenschaft und Gesellschaft gesucht.



Hauptgebäude der Bauhaus-Universität Weimar mit Van-de-Velde Bau
(Picture: Bauhaus-Universität Weimar, Thomas Müller)

The Bauhaus-University

The State Bauhaus, the most influential design school of the 20th century, was founded by Walter Gropius in 1919 in what is now the main university building. Outstanding specialists from different disciplines and countries have had a lasting impact on the design of the living environment with new types of art, technology and science. What they produced was an answer to the burning questions of the art, culture and society of their time - modernity. Together with their students, they have also revolutionized education.

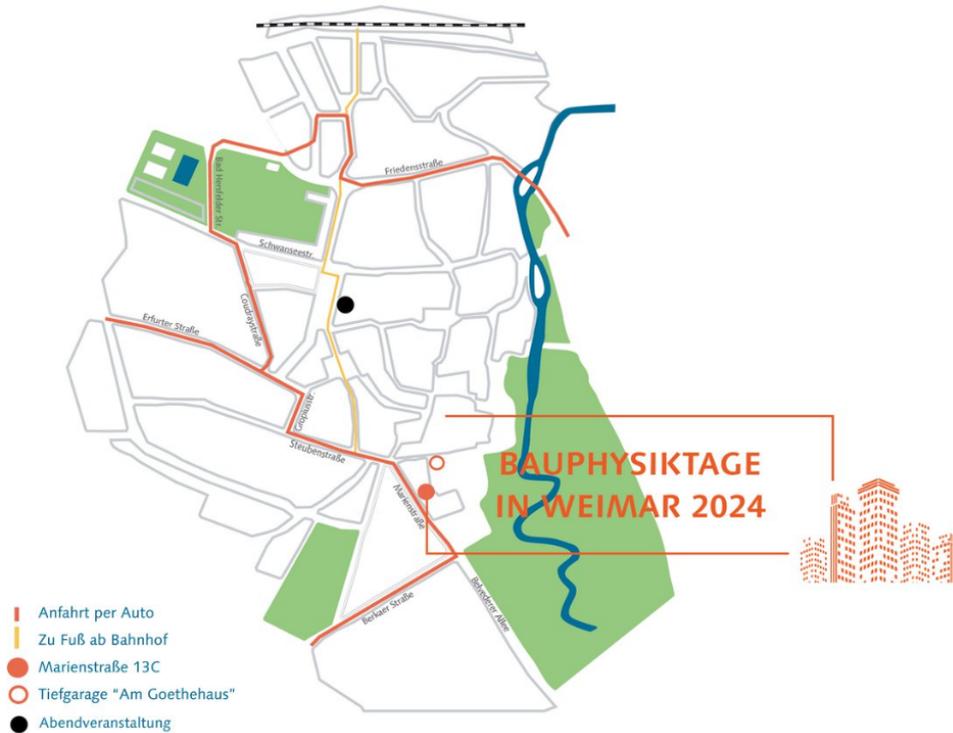
The name Bauhaus-Universität Weimar ties in with this history. The university is a living institution, not a museum. New methods are used to seek answers to central questions of today's art and culture, technology, science and society.



Haus am Horn - First Bauhaus model house by Georg Muche, part of the world heritage
(Picture: Roland Dreßler)

Tagungsort

Bauhaus-Universität Weimar
Marienstraße 13C, Hörsaalgebäude
99423 Weimar



Hörsaalgebäude (Picture: Bauhaus-Universität Weimar)

Prof. Dr. Philip Leistner - Fraunhofer IBP, Universität Stuttgart

Akustik-Forschung befasst sich heute mit Lärm und Sound-Design gleichermaßen. Ausgehend von der Wahrnehmung und Wirkung von Schall werden Intensität, Dosis und Charakteristik der Geräusche untersucht. Daran orientieren sich die Ziele - ob Lärminderung oder Klanggestaltung - für die Entwicklung konkreter technischer Lösungen. So entstehen in einem meist interdisziplinärem Prozess leichte Schallschutzbauteile, leise Arbeitsräume, robuste Schalldämpfer und klangvolle Musikinstrumente.

Von störendem Lärm bis zu feinen Orgelklängen reichen die Interessensgebiete des Akustik-Spezialisten Prof. Philip Leistner, geboren 1964 in Storkow/Brandenburg. Er machte 1990 seinen Abschluss als Diplom-Ingenieur an der TU Dresden und schloss 1994 die Promotion an der TU Berlin an. Seit 1995 ist der Ingenieur am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP Stuttgart beschäftigt, an dem ihm 2005 die Leitung der Abteilung Akustik übertragen und vier Jahre später die stellvertretende Institutsleitung anvertraut wurde. 2011 wurde Leistner zum Professor für Akustik an der Universität Stuttgart ernannt und seit 2016 leitet er das Fraunhofer IBP und das IABP an der Uni Stuttgart.



Prof. Dr. Runa T. Hellwig - Aalborg University

Prof. Dr.-Ing. Runa T. Hellwig, is a full professor at Aalborg University, Denmark. Her interdisciplinary research profile connects carbon neutral building design and operation with how people perceive and interact with indoor environments. In 2003, she introduced the adaptive thermal comfort approach to the German building science university educators. Her PhD on thermal comfort investigated how it is affected by multi-domain indoor environmental factors as well as non-physical factors. Her conceptual model on perceived control in indoor environments (2015) gained recognition by an international audience. She initiated the first German project on how overheating impacts office worker's performance. She contributed to the major revisions of the workplace temperature (2010) and ventilation (2012) rules in Germany. Prof. Hellwig is appointed member of the Committee of Workplaces consulting the German Federal Ministry of Labour and Social Affairs. Recent work focuses on a paradigm shift in indoor environmental conditioning practice towards human - building resilience.



During almost 30 years of career, she has been involved in more than 50 applied research projects and services for the industry and public authorities at several institutions, among others Fraunhofer Institute for Building Physics, University Hospital Jena, TU Munich and Solar Energy Research Institute at the National University of Singapore.

Prof. Dr. Svenja Carrigan - RPTU Kaiserslautern-Landau

Von einem astrophysikalischen Hintergrund kommend, wechselte Prof. Carrigan 2014 ihren Forschungsschwerpunkt zur Bauphysik und wurde 2016 Juniorprofessorin am Fachgebiet für Bauphysik / Energetische Gebäudeoptimierung an der Technischen Universität Kaiserslautern-Landau (RPTU), wo sie sich auf bauphysikalische Modellierungen und Simulationen insbesondere im Bereich der thermischen Bauphysik und der Behaglichkeit in Gebäuden spezialisiert hat. Im Jahr 2019 erhielt sie einen Ruf auf die Universitätsprofessur "Bauphysik" an der Technischen Universität Graz, Österreich, den sie jedoch ablehnte. Seit 2020 ist Prof. Carrigan außerordentliche Professorin an der RPTU.



Prof. Dr. Christoph van Treeck - RWTH Aachen

Christoph Alban van Treeck (Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil.) is full professor for energy efficiency and sustainable building at RWTH Aachen University. Before he joined RWTH in 2012, he was head of the Simulation Group of the Department Indoor Environment at the Fraunhofer Institute for Building Physics in Germany and Associate Professor (Privatdozent) at the Technische Universität München. He has a Ph.D. in computational civil engineering, and is specialized in the fields of computational fluid mechanics, thermal comfort related issues, building performance simulation, and building information modelling. He served as director at large within the board of directors of the International Building Performance Simulation Association (IBPSA) and on the editorial board of the Journal of Building Performance Simulation. He is the author of more than 100 peer-reviewed scientific publications. Since 2017 he is CEO an Engineering Company dedicated to consultancy work in Building Information Modeling and Integral Planning. He is founding member and Director of the BIM Center Aachen, a joint industry initiative at RWTH Aachen campus.



06./07.
März
2024

BAUPHYSIKTAGE IN WEIMAR 2024

Tagungsprogramm

www.bauphysiktage2024.de

1. KONFERENZTAG · 06.03.2024

Die Bauhaus-Universität Weimar und die Bauhaus Weiterbildungsakademie Weimar e.V. begrüßen Sie zu den 13. Bauphysiktagen am 06. und 07. März 2024 in Weimar.

Informationen zur Veranstaltung finden Sie unter www.bauphysiktage2024.de

Veranstaltungsort

Bauhaus-Universität Weimar
Marienstraße 13C
Hörsaalgebäude
99423 Weimar



Tagungsprogramm

- 10:00 Begrüßung**
Plenum (Hörsaal A)
Prof. Dr. Conrad Völker
- 10:15 Grußworte**
Prof. Peter Benz
Präsident der Bauhaus-Universität Weimar
- 10:30 Plenarvortrag:**
Indoor temperature trends and their unintended effects
Prof. Dr. Runa T. Hellwig
Aalborg University
- 11:20 Plenarvortrag:**
Research for user-centric buildings
Prof. Dr. Christoph van Treeck
RWTH Aachen
- 12:10 Mittagspause**
- 13:30 bis 17:30 Uhr ▶ Session A - C**
- 17:30 Ende erster Konferenztag**
- 18:30 Beginn Abendveranstaltung im mon ami**
Goetheplatz 11, 99423 Weimar

SESSION A · 06.03.2024 · HÖRSAAL A

- 13:30 **Thema: Energieversorgung**
Moderation: *Prof. Dr. Oliver Steffens*
Klimaneutral Easy – Planungstool für die klimaneutrale Energieversorgung von Wohnquartieren
Stegmaier, Daniel; Schrader, Johannes; Erhorn-Kluttig, Heike · Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
- Die Rolle der technischen Verteilverluste auf dem Weg zur klimaneutralen Wärmeversorgung von Gebäuden – Ein Zwischenruf**
Grafe, Michael · IWU Darmstadt
- Experimentelle Untersuchung des Potentials eines neuartigen Wärmespeicher- und Energieerzeugungssystems**
Schröter, Birke; Spiegel, Jonas; Carrigan, Svenja; Kornadt, Oliver · RPTU Kaiserslautern-Landau
- Auswirkungen des Nutzungsverhaltens auf den Energieverbrauch im Mietwohnungsbau**
Lehmann, Bettina; Schirmer, Matthias · Ernst-Abbe-Hochschule Jena

14:50 Kaffeepause

- 15:20 **Thema: Sanierung**
Moderation: *Prof. Dr. Christoph Nytsch-Geusen*
Verwendung mathematischer Optimierungsmethoden für eine optimierte Sanierungsplanung
Medgenberg, Justus; Makowski, Andreas · Technische Hochschule Würzburg Schweinfurt
- Sanierung von PCP-, DDT- und Lindan-belasteter Gebäude im Spannungsfeld zwischen Denkmal- und Gesundheitsschutz**
Schaudienst, Falk · TU Berlin, WMS Ingenieure
- Sustainable development in listed districts: the research project CO₂-neutral World Heritage Site Speicherstadt Hamburg**
Teichmann, Lena; Hein, Helen; Resta, Laura; Dinga, Güren Tan; Bögle, Annette; Mondino, Daniel; Garrecht, Harald · Universität Stuttgart; HafenCity Universität Hamburg
- Energy savings potential of socio-technical interventions in secondary schools**
Delmonte, Branca; Doherty, Edelle; Maas, Stefan · University of Luxembourg
- Rebound-Effekte nach energetischer Modernisierung? – KOSMA-Forschungsergebnisse aus ingenieur- und sozialwissenschaftlicher Sicht**
Grafe, Michael; Hacke, Ulrike · IWU Darmstadt

SESSION B · 06.03.2024 · HÖRSAAL B

- 13:30 **Thema: Wärmeschutz**
Moderation: *Prof. Dr. Svenja Carrigan*
Sommerlicher Wärmeschutz der Zukunft
Hartner, Marco; Kornadt, Oliver; Carrigan, Svenja; Beecken, Christoph · RPTU Kaiserslautern-Landau; bow ingenieure gmbh
- Sommerlicher Wärmeschutz und Holzbau - Vorurteile, Tatsachen, Ausblicke**
Klatte, Elisa · PIRMIN JUNG GmbH
- Hindernisse im Mineralwollrecycling – Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt Remelting Miwo**
Broszies, Tanja; Paul, Andrea; Vogdt, Frank U. · TU Berlin; BAM
- 10 years of Research toward Vacuum Glass Integreation into new and existing window constructions: A review**
Pont, Ulrich; Wölzl, Magdalena; Schober, Peter; Schuss, Matthias · TU Wien; Holzforschung Austria

14:50 Kaffeepause

- 15:20 **Thema: Raumklima**
Moderation: *Dr. Hayder Alsaad*
Smart and Urban Trees: Tackling Summer Overheating and Urban Heat Islands by large scale urban structures
Pont, Ulrich; Woelzl, Magdalena; Schober, Peter; Swoboda, Sigrun; Bauer, Peter; Stiegler, Vera; Wolffhardt, Rupert; Neudeck, Felix · TU Wien; Holzforschung Austria
- Simulative Untersuchungen des Einflusses der Strahlungsasymmetrie auf die thermische Behaglichkeit**
Blum, Tobias; Schröter, Birke; Carrigan, Svenja; Kornadt, Oliver · RPTU Kaiserslautern-Landau
- Untersuchung des raumseitigen Wärmeübergangs von Bauteilen: Ein Vergleich der Ergebnisse von CFD- und Wärmetransport-Simulationen**
Peng, Zhenming; Carrigan, Svenja; Kornadt, Oliver · RPTU Kaiserslautern-Landau
- Tomographisches Background-Oriented Schlieren (BOS) zur Visualisierung von Luftströmungen**
Benetas, Lia; Alsaad, Hayder; Völker, Conrad · Bauhaus-Universität Weimar
- New opportunities of a multiple measurement technologies developed test room for the indoor parameters and users' interaction in different types of comfort and digital technologies (IOT).**
Günzel, Maximilian; Stinglhammer, Simom; Jensch, Werner · Hochschule München

SESSION C · 06.03.2024 · HÖRSAAL D

- 13:30 **Thema: U-Wert-Bestimmung**
Moderation: *Dr. Stefan Helbig*
Remote measurements of thermal transmittance without approximating a steady state
Estevam Schmiedt, Jacob; Patel, Dhruvkumar; Röger, Marc · Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
- Anwendung künstlicher neuronaler Netze zur Bestimmung von U-Werten**
Benz, Alexander; Völker, Conrad; Smarsly, Kay · Bauhaus-Universität Weimar; Technische Universität Hamburg

14:50 Kaffeepause

- 15:20 **Thema: Radon in Gebäuden**
Moderation: *Dr. Stephanie Hurst*
Radonschutz im Baubestand – Stand des WTA-Merkblatts
Reuther, Iris M.¹; Uhlig, Reinhold · ¹Jade Hochschule
- Irrwege im Radonschutz**
Leicht, Karin · Leicht Sachverständige
- Diskussionsbeitrag: Radon als Pandemieverstärker?**
Reuther, Iris M. · Jade Hochschule
- Abschätzung der Radon-Konzentrationsverteilung im Innenraum in Deutschland**
Petermann, Eric; Hoffmann, Bernd · Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)
- 16:40 Diskussion (ca. 20 Minuten)

2. KONFERENZTAG · 07.03.2024

SESSION A · 07.03.2024 · HÖRSAAL A

SESSION B · 07.03.2024 · HÖRSAAL B

SESSION C · 07.03.2024 · HÖRSAAL D

09:00 bis 12:00 Uhr ▶ Session A - C

12:10 Mittagspause

13:00 **Plenarvortrag:** Sommerlicher Wärmeschutz im Zeichen des Klimawandels
Prof. Dr. Svenja Carrigan
RPTU Kaiserslautern-Landau

13:50 **Plenarvortrag:** Schallschutz und Akustik – Bezahlbar und klimaneutral
Prof. Dr. Philip Leistner
Fraunhofer IBP, Universität Stuttgart

14:40 **Schlussworte der Kongressleitung**

15:00 **Ende der Bauphysiktage 2024**

ab 15:30 **Laborführungen**

09:00 **Thema: Feuchteschutz**
Moderation: Prof. Dr. Claudia Fülle
Schlagregensicherheit von Unterspann- und Unterdeckbahnen auf dem Prüfstand
Baumbach, Anne · TU Berlin

Grundlagenuntersuchungen zum hygrothermischen Verhalten hygrysch aktiver und nicht aktiver Schichtverbände als Grundlage für kostengünstige und energieeffiziente Innendämmungen
Burchard, Helena; Nytsch-Geusen, Christoph; Kaul-Gothe, Werner · Universität der Künste Berlin

Das physikalisch-chemische Wirkungsspektrum von Grünfassaden: Interdisziplinäres Monitoring von Mikroklima, Hygrothermik und Grauwasseraufbereitung
Hartmann, Maria; Kohlhepp, Gloria; Alsaad, Hayder; Beier, Silvio; Völker, Conrad · Bauhaus-Universität Weimar

10:00 Kaffeepause

10:30 **Thema: Building Performance Simulation**
Moderation: Prof. Dr. Christoph van Treeck
Einflüsse unterschiedlicher Eingangsdaten auf die Quartierssimulation: Untersuchung der Interaktionseffekte
Geske, Mara; Völker, Conrad · Bauhaus-Universität Weimar

Untersuchungen zum Einfluss des Mikroklimas auf den Heiz- und Kühlenergiebedarf im Gebäude
Regel, Rebekka; Landrock, Steffen · Graner Ingenieure GmbH

Analytical comparison and optimization studies of building-performance simulations on the basis of the finite-element method
Schoplocher, Paul; Steffens, Oliver · OTH Regensburg

A report from the practice: How state-of-the-art simulation tools support the generation of high class architecture
Sommer, Bernhard; Pont, Ulrich; Sommer-Nawara, Malgorzata; Moncayo Asan, Galo · University of Applied Arts Vienna; TU Wien

Can AI act as a qualified and pertinent consultant on Building Physics related topics?
Pont, Ulrich · TU Wien

09:00 **Thema: Raumakustik**
Moderation: Prof. Dr. Philip Leistner
Acoustic Travel Time Tomography for Simultaneous Room Air Temperature and Air Flow Measurements
Dokanchi, Najmeh; Vogel, Albert; Arnold, Jörg; Völker, Conrad · Bauhaus-Universität Weimar

Raumakustik und Beschallungskonzepte in runden Kirchen
Krumbiegel, Mathias; Türk, Andreas; Schnitzler, Thomas · Graner Ingenieure GmbH; PROAID Ingenieure

Leistungsfähiger Schallabsorber für Flachdecken mit Bauteilaktivierung
Friedrich, Thomas · Innogration GmbH

10:00 Kaffeepause

10:30 **Thema: Bauakustik**
Moderation: Dr. Albert Vogel
Schallschutz im Holzbau – Vorurteile & Herausforderungen: Beispiele aus der Praxis
Silberbauer, Veronika · PIRMIN JUNG GmbH

Entwicklungen bei der Prognose von Geräuschen aus gebäudetechnischen Anlagen
Schöpfer, Fabian; Mayr, Andreas; Schanda, Ulrich; Nusser, Bernd; Arnold, Jörg; Vogel, Albert; Völker, Conrad · Technische Hochschule Rosenheim; Holzforschung Austria; Bauhaus-Universität Weimar

Schallschutz: Flankenübertragung im Holz- und Hybridbau
Silberbauer, Veronika · PIRMIN JUNG GmbH; Technische Hochschule Rosenheim

Deckenkonstruktionen in Holzbauweise
Flieger, Michael; Kornadt, Oliver; Götz, Tobias; Silberbauer, Veronika · RPTU Kaiserslautern-Landau; PIRMIN JUNG GmbH

Berücksichtigung des Maximalpegels in den Regelwerken zum Schallschutz gegen Außenlärm
Weinzierl, Jan · Wolfgang Sorge Ingenieurbüro für Bauphysik

09:00 **Thema: Brandschutz**
Moderation: Prof. Dr. Oliver Kornadt
Grundlagen zur brandschutztechnischen Anwendbarkeit von begrünten Fassaden an mehrgeschossigen Gebäuden
Engel, Thomas; Winter, Stefan · Technische Universität München

Best Performance Ratio im Brandschutz
Hammann, Claudius; Herzog, Daniel · Technische Universität München; BC Ingenieure Blankenhagen + Cohrs

Brandverhalten von brennbaren Dämmstoffen durch Zumischung natürlicher Flammschutzmittel – erste Ergebnisanalyse der Vorversuche
Scheidel, Sabine; Kornadt, Oliver · RPTU Kaiserslautern-Landau

10:00 Kaffeepause

10:30 **Thema: Energieversorgung**
Moderation: Prof. Dr. Manuela Walsdorf-Maul
Modellierung eines neuartigen Solarthermiekollektors mit integriertem Latentwärmespeicher in TRNSYS
Spiegel, Jonas; Carrigan, Svenja; Schröter, Birke; Kornadt, Oliver · RPTU Kaiserslautern-Landau

Life cycle assessment of the prototype of a novel energy generation and heat storage system
Khawaja, Mahnoor; Carrigan, Svenja; Kornadt, Oliver · RPTU Kaiserslautern-Landau

Optimierungsstrategien zum Einsatz von Wärmepumpen im Gebäudebestand im Rahmen von Potenzialanalysen der Sektorkopplung
He, Miaomiao; Hüdepohl, Niklas; Nemeth, Isabell · Technische Hochschule Rosenheim

Der neu entwickelte Energiepfahl im praktischen Einsatz
Friedrich, Thomas; Groh, Sebastian · Innogration GmbH

CO₂-freie Wärmeversorgung einer Stadt
Störlein, Eric; Selzer, Kathrin · iph selzer ingenieure gmbh

Tagungsleitung

Prof. Dr.-Ing. Conrad Völker
Professur Bauphysik
Bauhaus-Universität Weimar

Prof. Dr. Oliver Kornadt
Fachgebiet Bauphysik / Energetische Gebäudeoptimierung, RPTU Kaiserslautern-Landau

Dr.-Ing. Albert Vogel
Professur Bauphysik
Bauhaus-Universität Weimar

Organisation

Bauhaus-Universität Weimar
Dr.-Ing. Albert Vogel
Coudraystraße 11A, 99423 Weimar
Telefon: +49 (0) 36 43 / 58 47 06
E-Mail: albert.vogel@uni-weimar.de

Bauhaus Weiterbildungsakademie Weimar e.V.
Carolin Rollnik
Coudraystraße 13A, 99423 Weimar
Telefon: +49 (0) 36 43 / 58 42 29
E-Mail: tagung@wba-weimar.de
www.wba-weimar.de

Kooperationspartner



BAUPHYSIK

IN FORSCHUNG UND PRAXIS



SESSION A · 06.03.2024

Thema: Energieversorgung

Kooperationspartner

R
P **TU** Rheinland-Pfälzische
Technische Universität
Kaiserslautern
Landau

Bauhaus-
Universität
Weimar

WBA

WBA | Bauhaus Weiterbildungs-
akademie Weimar e.V.
Institut an der
Bauhaus-Universität Weimar

KLIMANEUTRAL EASY – PLANUNGSTOOL FÜR DIE KLIMANEUTRALE ENERGIEVERSORGUNG VON WOHNQUARTIEREN

Daniel Stegmaier, Johannes Schrade, Heike Erhorn-Kluttig

Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart, Deutschland,

E-Mail: Daniel.Stegmaier@ibp.fraunhofer.de

Kurzfassung

Um das Klimaschutzziel der Bundesregierung (Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045) zu erreichen, muss eine effektive Transformation des Gebäudesektors erfolgen. Im Rahmen des Forschungsprojekts „STADTQUARTIER 2050“ wurde hierfür eine standardisierte Methodik zur Modellierung und Bewertung von Wohnquartieren entwickelt, mit der Entscheidungsträger in der frühen Planungsphase unterstützt werden. Hierbei werden verschiedene Versorgungskonzepte unter Berücksichtigung der Siedlungsstruktur und standortspezifischer Rahmenbedingungen miteinander verglichen. Berücksichtigt werden monetäre Bewertungskriterien wie Investitionskosten, Energiekosten, Erträge aus erneuerbaren Energien und Kompensationskosten sowie ‚weiche‘ Faktoren wie Zukunftsfähigkeit, Umsetzbarkeit und Übertragbarkeit der Versorgungskonzepte. Die Methodik wurde in die Webanwendung „Klimaneutral Easy“ überführt, die sich durch benutzerfreundliche Eingabemasken und eine übersichtliche Ergebnisdarstellung auszeichnet.

Abstract

To achieve the German government's climate protection goal (greenhouse gas neutrality by 2045), an effective transformation of the building sector is necessary. As part of the research project “STADTQUARTIER 2050”, a standardized methodology for modelling and evaluating residential districts has been developed to support decision-makers in the early planning phase. This methodology compares different supply concepts, considering the settlement structure and site-specific conditions. It considers monetary evaluation criteria such as investment costs, energy costs, revenues from renewable energies, and compensation costs, as well as ‘soft’ factors such as future viability, feasibility, and transferability of the supply concepts. The methodology has been implemented in the web application “Klimaneutral Easy”, which stands out for its user-friendly input masks and clear presentation of results.

Einleitung

Die Wahl geeigneter Versorgungskonzepte für Quartiere ist für handelnde Personen und Entscheidungsträger in Kommunen eine große Herausforderung. Sie müssen sich mit vielschichtigen, teils gegensätzlichen Interessen auseinandersetzen. Neben wichtigen Themen wie Klimaschutz, bezahlbarem Wohnraum, Versorgungssicherheit und Anpassung an den Klimawandel müssen auch individuelle Interessen von Eigentümern, Investoren und Betreibern berücksichtigt werden. Abbildung 1 zeigt einen Ausschnitt der Vielfalt potenziell vielversprechender Technologien zur Deckung des Energiebedarfs verschiedener Siedlungstypen. Darüber hinaus können siedlungsspezifische Rahmenbedingungen sowie politische Zielsetzungen die Entwicklung von guten Lösungen erschweren (Schrade et al., 2023).

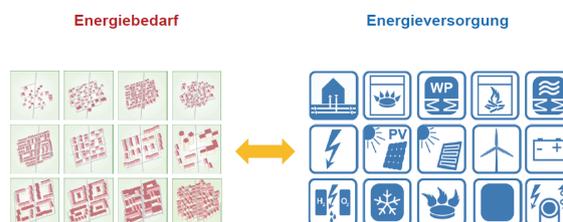


Abbildung 1: Gegenüberstellung von Energiebedarfskennwerten verschiedener Quartierstypen mit einer Auswahl potenzieller Komponenten einer klimaneutralen Energieversorgung

Das Gelingen der Transformation von Wohnquartieren und die Eignung hierfür erstellter Konzepte hängt stark von der Qualifikation und Erfahrung der beteiligten Akteure in den Bereichen Bauen und Energie ab (dena, 2023). Den Gebäudesektor zu dekarbonisieren und in diesem Zusammenhang die nationalen Klimaschutzziele zu erreichen, erfordert die Mitwirkung aller, auch kleiner Kommunen. Gemäß der Aufwandschätzung des Entwurfs zum Wärmeplanungsgesetz, gibt es deutschlandweit über 9.000 Gemeindegebiete, die bis 2028 zu einer kommunalen Wärmeplanung verpflichtet werden (WPG, 2023). Diese Gemeindegebiete setzen sich wiederum aus mehreren Quartieren

zusammen. Ein Quartier bezeichnet eine kleinräumige Einheit innerhalb einer Stadt oder Gemeinde mit einer bestimmten räumlichen, sozialen und funktionalen Struktur (Breuer, 2013).

Kleine Kommunen verfügen häufig nur über begrenzte personelle und finanzielle Ressourcen für die Durchführung der Konzeptionierung und Umsetzungsplanung. Insbesondere kleinere Kommunen stehen daher vor der großen Herausforderung, innerhalb kürzester Zeit eine strategische Wärmeplanung zu entwickeln, die ohne entsprechend niederschwelliger Hilfestellungen nicht leistbar erscheint.

Ein webbasiertes Planungstool kann diese Hilfestellung ermöglichen. Um eine gute Anwendbarkeit sicherzustellen, sollte besonderer Wert auf Benutzerfreundlichkeit und eine Fokussierung auf Relevantes gelegt werden. Dies ist möglich durch eine geringe Anzahl an benötigten Daten bei der Eingabe, bei gleichzeitig großer Anpassbarkeit der Rahmenbedingungen und umfangreichen Erläuterung zur Unterstützung der Benutzer.

Das Planungstool „Klimaneutral Easy“, das in diesem Beitrag vorgestellt wird, folgt den genannten Prinzipien. Es basiert auf Vorarbeiten aus dem Projekt „STADTQUARTIER 2050“. Im Rahmen dieses Projekts wurde ein Leitfaden zur Entwicklung klimaneutraler Energieversorgungskonzepte für Wohnquartiere erstellt (Schrade et al., 2022). „Klimaneutral Easy“ ist eine Weiterentwicklung dieser Methodik zu einer Webanwendung mit benutzerfreundlicher Oberfläche, einfacher Handhabung, geringen Anforderungen an fachliches Vorwissen, einer hohen Anpassbarkeit der Rahmenbedingungen und guter Nachvollziehbarkeit der Berechnungen.

Parallel zur Entwicklung des Planungstools „Klimaneutral Easy“ sind vergleichbare Tools entstanden, wie das „E4Q-Quartierbewertungstool“ des Instituts für Wohnen und Umwelt (IWU), (Müller & Koert, 2022) und das „nPro-Tool“ der nPro Energy GmbH (nPro Energy GmbH, 2023), die im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Das „nPro-Tool“ ist webbasiert und zeichnet sich durch ein ansprechendes Design aus, das einen besonderen Fokus auf Benutzerfreundlichkeit und intuitive Bedienung legt. Die wichtigsten Funktionen werden durch eine demonstrative Einführung erklärt. Die Nutzung des Tools wird durch eine ausführliche Hilfe und Dokumentation erleichtert. Um ein Projekt anzulegen, wählen die Nutzenden zunächst eine Versorgungslösung (Wärmenetz oder gebäudeweise Versorgung) sowie den Standort aus. Anschließend wird eine erweiterbare Liste von Gebäuden verschiedener Typen erstellt und der Energiebedarf dargestellt. Bei Vorhandensein eines Wärmenetzes können zudem die Netztemperatur und die Netzverluste angepasst werden. In einer Übersicht können verschiedene Varianten von Energieerzeugungstechnologien angelegt werden. Diese können dann mithilfe einer Simulation dimensi-

oniert werden, um eine Systemoptimierung zu ermöglichen.

Das „E4Q-Quartierbewertungstool“ ist ein Excel-basiertes Tool mit Makros. Das Anlegen eines Quartiers erfolgt in wenigen Schritten, bei denen der Quartierstyp ausgewählt und Rahmenbedingungen wie Baualtersklassen, Dämmstandards, Soll-Innentemperaturen und der Standort festgelegt werden. Die Auswahl der Energieversorgung erfolgt im Anschluss. Es besteht die Möglichkeit, bis zu vier verschiedene Sanierungskonzepte zu erstellen, wobei die Nutzenden das energetische Sanierungsniveau der Gebäudehülle, das Wärmeversorgungskonzept und die Nutzung von Solarenergie auf den Gebäudedächern festlegen. Zusätzlich können ökonomische und ökologische Parameter sowie verschiedene Emissions- und Energiepreisszenarien angepasst werden. Als Ergebnis der Quartiersbewertung werden Steckbriefe sowohl für den Status Quo als auch für jede ausgewählte Variante generiert.

Die beiden beschriebenen Tools haben unter anderem die Gemeinsamkeit, dass die Rahmenbedingungen des Quartiers zusammen mit dem Versorgungskonzept detailliert erfasst und angegeben werden müssen. „Klimaneutral Easy“ verfolgt hier einen anderen Ansatz, welcher im Folgenden erläutert wird.

Einführung in „Klimaneutral Easy“

„Klimaneutral Easy“ folgt einem bewusst einfach gehaltenen Aufbau: Auf der linken Seite der Benutzeroberfläche befindet sich eine feste Navigationsleiste, während auf der rechten Seite der Inhalt des jeweils ausgewählten Menüpunktes wiedergegeben wird. Im Kopfbereich werden die Nutzenden mit Hilfe eines erläuternden Textes in das Thema des jeweiligen Menüpunktes eingeführt. Mit Hilfe von „Info-Buttons“ werden viele weitere Erklärungen gegeben. Detailliertere Erklärungen einschließlich Quellenangaben und Darstellungen sämtlicher Funktionen finden sich in einem technischen Benutzerhandbuch.

Die Berechnung innerhalb des Tools wird im Rechenkern der Fraunhofer IBP-Software „District Energy Concept Advisor (D-ECA)“ durchgeführt. Dieser basiert auf dem Rechenkern „ibp18599kernel“, welcher vollumfänglich die Rechenvorschriften der DIN V 18599 umsetzt (IBP, 2018).

Dateneingabe

Um das Tool nutzen zu können, müssen die Nutzenden Angaben zu den Siedlungskennwerten, dem Standort und den limitierenden Faktoren des zu bewertenden Quartiers machen. Abbildung 2 veranschaulicht den Ablauf der Toolnutzung als Prozessdiagramm.

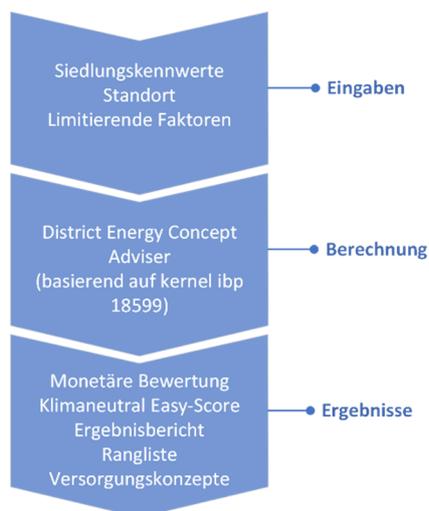


Abbildung 2: Prozessschema zum Ablauf der Toolnutzung

Für die Modellierung des Quartiers stehen basierend auf der Klassifizierung von Blesl et al. (2001) zehn verschiedene Siedlungstypen zur Verfügung, die hauptsächlich für Wohnzwecke genutzt werden:

- ST 1: Lockere offene Bebauung (Streusiedlung)
- ST 2: Einfamilienhaus- und Doppelhaus-siedlung
- ST 3a: Städtischer Dorfkern
- ST 3b: Ländlicher Dorfkern
- ST 4: Reihenhaussiedlung
- ST 5a: Siedlung kleiner Mehrfamilienhäuser
- ST 5b: Zeilenbebauung mit kleinen und großen Mehrfamilienhäusern
- ST 6: Zeilenbebauung mit großen Mehrfamilienhäusern und Hochhäusern
- ST 7a: Blockbebauung niedriger Dichte
- ST 7b: Blockbebauung hoher Dichte

Es ist zudem möglich, eine Kombination aus Bestands- und Neubaulflächen sowie eine Mischung mehrerer verschiedener Siedlungstypen einzugeben.

Für die Anpassung des Quartiers an standortspezifische Gegebenheiten kann entweder eine Postleitzahl oder ein Ortsname eingegeben werden. Dadurch wird das Quartier einer der 15 Klimaregionen zugeordnet, die in Anhang E des Teil 10 der DIN V 18599 aufgeführt sind. Zudem werden regionale Kostenunterschiede berücksichtigt, indem Regionalfaktoren des Baukosteninformationszentrums für Architekten (BKI, 2022) angewendet werden.

Nicht jedes Versorgungskonzept kann an jedem Standort umgesetzt werden. Durch die Abfrage von

Ja/Nein-Fragen kann die Auswahl der zu berücksichtigenden Versorgungskonzepte begrenzt und an standortspezifische technische und rechtliche Restriktionen angepasst werden. So beeinflussen beispielsweise die Verfügbarkeit von nutzbarer Abwasserwärme oder das Vorhandensein eines quartiersübergreifenden Fernwärmenetzes die Energieversorgungsmöglichkeiten.

Energieversorgungsvarianten

Für die Auswertung werden mehr als 30 verschiedene Versorgungskonzepte in Betracht gezogen. Diese umfassen dezentrale, gebäudeweise Lösungen, Lösungen mit Gebäude- und Quartiersnetzen sowie mit quartiersübergreifenden Fernwärmenetzen. Als potenzielle Wärmeerzeuger werden unter anderem Wärmepumpen (WP), Brennwärtekessel, Blockheizkraftwerke (BHKW) und Brennstoffzellen betrachtet. Die verwendeten Energieträger umfassen Solarenergie, Strom, Biomasse, Erdgas und synthetisches Gas, sowie konventionelle und nahezu klimaneutrale Fernwärme. Für die zentralen Versorgungskonzepte werden sowohl kalte Nahwärmenetze als auch konventionelle Wärmenetze in Betracht gezogen.

Es werden vier unterschiedliche Energiestandards für den Zielzustand der thermischen Gebäudehülle in Betracht gezogen. In Anlehnung an den KfW-Effizienzhausstandard (EH) werden die Effizienzniveaus EH 40 und EH 55 betrachtet (KfW, 2022). Das Effizienzniveau EH 100 wird als Referenz für den sanierten Bestand angenommen, während für den unsanierten Bestand ein mittleres Wärmeschutzniveau entsprechend der Baualtersklasse 1969 bis 1978 angesetzt wird. Die Energieversorgungsvarianten setzen sich als Kombination aus den verschiedenen betrachteten Versorgungskonzepten und Energiestandards der thermischen Gebäudehülle im Zielzustand zusammen. Darüber hinaus können unterschiedliche Lüftungskonzepte wie Zuluftanlagen mit Wärmerückgewinnung, Abluftanlagen und Fensterlüftung in den Varianten berücksichtigt werden. Die Lüftungskonzepte sind anpassbar, werden als Voreinstellung jedoch in Abhängigkeit des Energiestandards den verschiedenen Gebäudetypen zugeordnet. Die Vielfalt an Varianten ermöglicht eine umfassende Bewertung und Analyse verschiedener Möglichkeiten zur Energieversorgung im Quartier.

Ergebnisdarstellung

Abhängig von den eingegebenen Daten werden Investitionskosten, Energiekosten, Kompensationskosten und jährliche Gesamtkosten als volkswirtschaftliche Betrachtung für die verschiedenen Varianten berechnet. Diese Kostenwerte können entweder als absolute Beträge oder in Relation zur gesamten Nettoraumfläche der Gebäude im Quartier dargestellt werden. In einem sogenannten „Klimaneutral Easy-Score“ werden die Bewertungen der verschiedenen Kostenkategorien aggregiert.

Die berechneten Ergebnisse werden in tabellarischer Form wiedergegeben. Neben einer kombinierten Bewertungstabelle, in der die verschiedenen ausgewählten Siedlungstypen des Quartiers gemeinsam bewertet dargestellt werden, gibt es auch Reiter zu den Ergebnissen der einzelnen Siedlungstypen.

In Abbildung 3 wird ein Ausschnitt der kombinierten Ergebnistabelle gezeigt, in der die verschiedenen Varianten nach dem „Klimaneutral Easy-Score“ sortiert dargestellt werden. Die Kosten werden spezifisch pro Quadratmeter der Nettoraumfläche angegeben. Auf der rechten Seite, außerhalb des Screenshots, befinden sich die Spalten „Kompensationskosten“ und „volkswirtschaftliche Betrachtung“.

Kombination Bestand Reihenhausiedlung Neubau Zeilenbebauung mit kl. und gr. Mehrfamilienhäus

Bezogen auf Nettoraumfläche der Gebäude (140.179 m²) Absolute Erget

Versorgungs-konzept	Gebäude-Standards	Klimane... Easy-Score	Investitionen [€/m²]	Energie-kosten [€/m²a]
Nahwärme Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Abwasserwärm...	unsaniert, EH55	16	382	21
Nahwärme Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonden	unsaniert, EH55	16	375	22
Nahwärme Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Agrothermie	unsaniert, EH55	16	382	22
Fernwärme (konventionell)	EH55	14	369	21
Wasser-Wasser-Wärmepumpe	EH40, EH55	11	428	21

Abbildung 3: Screenshot mit einem Ausschnitt der Ergebnistabelle des Tools „Klimaneutral Easy“

Es besteht die Möglichkeit, bis zu zehn Varianten aus der Ergebnistabelle in einem Quartiersbericht zusammenzufassen. Dieser Bericht enthält eine Beschreibung des Versorgungskonzepts sowie eine vereinfachte Visualisierung des Anlagenschemas. Die Kosten werden in ihre Bestandteile aufgeschlüsselt und wesentliche Teilergebnisse der energetischen und ökologischen Bewertung werden präsentiert.

Weiterhin enthält der Quartiersbericht eine Bewertung der ‚weichen‘ Faktoren für jedes Versorgungskonzept. Diese Faktoren umfassen die Zukunftsfähigkeit, Umsetzbarkeit, Übertragbarkeit, Erweiterbarkeit, Klimaanpassung, Robustheit und Netzdienlichkeit. Die Bewertung erfolgt qualitativ anhand eines dreistufigen Bewertungssystems. Für jede Bewertung wird eine Erläuterung gegeben. Eine tabellarische Gesamtübersicht ermöglicht den Vergleich mit anderen Versorgungskonzepten. Beispielsweise erhalten Lösungen mit Wärmepumpen eine positive Bewertung für ihre Zukunftsfähigkeit, während Versorgungskonzepte mit fossilen Energieträgern und Biomasse negativ bewertet werden. Diese Einordnung basiert auf der Begrenztheit der Ressourcen und der politischen Bedeutung für die Transformation des Energiesystems. Die Einbeziehung ‚weicher‘ Faktoren trägt dazu bei, eine

umfassendere Bewertung über finanzielle und ökologische Aspekte hinaus vornehmen zu können.

Klimaneutralität und Bilanzrahmen

Das Ziel der Klimaneutralität wird im Tool definiert als das Erreichen einer ausgeglichenen Jahresbilanz der Treibhausgasemissionen, die durch den Betrieb von Gebäuden (Heizung und Stromversorgung einschließlich Nutzerstrom) freigesetzt werden. Hierfür werden die Treibhausgase in eine entsprechende Menge an CO₂-Äquivalenten umgerechnet. Die erstellte Bilanz basiert auf der Methodik der Verursacherbilanz, bei der die Endenergieverbräuche ermittelt und mit spezifischen Emissionsfaktoren verrechnet werden, um die Treibhausgasemissionen zu bestimmen (Hertle et al., 2019). Für den eingespeisten Strom aus PV wird eine Gutschrift gewährt, indem die Menge des eingespeisten PV-Stroms mit dem Emissionsfaktor für Strom multipliziert und von der Gesamtmenge der Treibhausgasemissionen abgezogen wird.

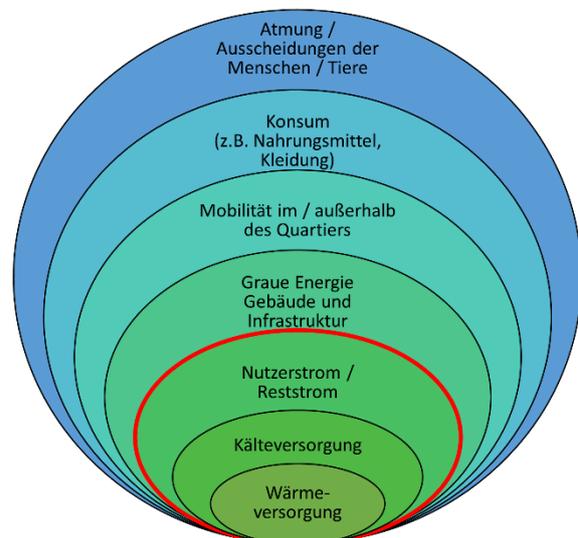


Abbildung 4: Grafische Darstellung verschiedener Bilanzrahmen für die Betrachtung von Treibhausgasemissionen

In Abbildung 4 wird mit einer roten Linie der allgemeine Bilanzrahmen dargestellt, der berücksichtigt wird. Die Treibhausgasemissionen im Zusammenhang mit der grauen Energie, der Mobilität, dem Konsum und der Atmung der Bewohner werden in dieser Bilanzierung nicht berücksichtigt.

Berechnungsmodell

Für die Berechnungen werden die charakteristischen Werte der Siedlungstypen zur Gebäudeanzahl, Länge der Straßen und prozentualen Zusammensetzung der Gebäudetypen verwendet, die in einer Studie zur pluralistischen Wärmeversorgung von Blesl et al. (2001) ermittelt wurden. In „Klimaneutral Easy“ wird diese Siedlungstypologie mit der deutschen Gebäudetypologie kombiniert, die im Rahmen des EU-Projekts

TABULA entwickelt wurde (Loga et al., 2015). Dadurch entsteht ein modellierter Gebäudebestand des Quartiers aufgeteilt in Einfamilienhäuser (EFH), Reihenhäuser (RH), kleinen Mehrfamilienhäuser (MFH), große Mehrfamilienhäuser (GMH) und Hochhäuser (HH) verschiedener Baualtersklassen.

Energetische Bewertung

Die energetische Bewertung der Gebäude erfolgt gemäß der DIN V 18599:2018-09 durch Anwendung des Monatsbilanzverfahrens (DIN, 2018). Dabei werden Standardnutzungsprofile für Wohngebäude verwendet. Die Heizlast der Gebäude wird gemäß Teil 2 der Norm und die thermische Leistung der Trinkwarmwasserbereitstellung gemäß Teil 8 der Norm ermittelt. Die Heizlast wird unter Berücksichtigung der Klimaregion mit einem Korrekturfaktor angepasst, der mithilfe der Normaußentemperaturen der DIN SPEC 12831 (DIN, 2017) wie in Gleichung 1 dargestellt, berechnet wird. Als Referenzklima für Deutschland gilt die Klimaregion Potsdam.

$$f_{\text{Heiz}} = \frac{(\theta_i - \theta_{e,\text{Potsdam}})}{(\theta_i - \theta_{e,\text{Klimaregion}})} \quad (1)$$

f_{Heiz} = Heizkorrekturfaktor; θ_i = Innentemperatur (hier: 20 °C); θ_e = Normaußentemperatur

Die erforderlichen Vorlauftemperaturen für die Gebäudeheizung werden in Abhängigkeit von der Heizlast und der Art der Wärmeübergabe gemäß Tabelle 1 bestimmt. Für die Erhitzung des Trinkwarmwassers unter Verwendung eines gebäudezentralen Trinkwarmwasserspeichers wird eine erforderliche Vorlauftemperatur von 67 °C angenommen. Im Gebäudemodell von „Klimaneutral Easy“ wird die Beheizung von Neubauten mittels Flächenheizung abgebildet, während Bestandsgebäude mit Radiatoren beheizt werden.

Tabelle 1: Vorlauftemperaturen der Gebäudeheizung in Abhängigkeit der Heizlast und der Art der Wärmeübergabe (Schrade et al., 2022)

HEIZLAST [W/M ²]	VORLAUFTEMPERATUR [°C] BEI	
	RADIATOREN	FLÄCHEN- HEIZUNGEN
> 120	90	-
> 80	70	-
> 50	55	55
> 30	55	45
≤ 30	45	35

Die DIN V 18599 bildet den Nutzerstrom nicht ab. In „Klimaneutral Easy“ wird der Nutzerstrom in Abhängigkeit der Haushaltsgröße und Haushaltsgrößenverteilung je Gebäudetyp, abgeleitet aus dem Zensus 2011 (Destatis, 2011) sowie dem Stromverbrauch pro Haushalt, abgeleitet aus dem Stromspiegel 2019 (co2online, 2019), ermittelt.

Die Wärmenetzlösungen der zentralen Versorgungskonzepte werden als Zweileitersystem mit drei Strahlen modelliert. Die Trassenlänge wird basierend auf den Siedlungscharakteristika als Gesamtlänge der Straßen angenommen. Der Druckverlust von 100 Pascal pro Meter wird zur Dimensionierung der Rohrdurchmesser verwendet. Die elektrische Leistung der Netzpumpe wird durch den Druckverlust, den Wirkungsgrad der Pumpe (mit einer Annahme von 60 Prozent) und die Volllaststunden der angeschlossenen Verbraucher bestimmt. Die Verluste des Wärmenetzes werden unter Berücksichtigung von Betriebstemperatur, Bodentemperatur, Netzlänge und dem Wärmedurchgangskoeffizienten der Rohrleitungen berechnet. Die Betriebstemperatur des Wärmenetzes wird anhand der Temperaturanforderungen der angeschlossenen Gebäude und der spezifischen Heizlast ermittelt.

Bei der Dimensionierung der Wärmeerzeuger für zentrale Versorgungskonzepte wird die Gleichzeitigkeit des Wärmebedarfs berücksichtigt. Unter der Annahme einer homogenen Verteilung der Verbraucher kann der Gleichzeitigkeitsfaktor mithilfe der Approximationsgleichung 2 von Winter et al. (2001) bestimmt werden:

$$\text{GLF} = a + \frac{b}{1 + (\frac{n}{c})^d} \quad (2)$$

GLF = Gleichzeitigkeitsfaktor; n = Anzahl Abnehmer; a, b, c, d = Parameter der Approximationsfunktion

Um die Gleichzeitigkeit nicht zu überschätzen, wenn der Wärmebedarf großer Gebäude (HH) und kleiner Gebäude (EFH) gemeinsam mit Hilfe eines Wärmenetzes gedeckt wird, werden verschiedene Gruppen der Gleichzeitigkeit gebildet. Die Aufteilung wird entsprechend der Wärmeleistung vorgenommen (Winter et al., 2001).

Den EFH, RH und MFH werden Satteldächer zugeordnet und den GMH und HH Flachdächer. Die im Berechnungsmodell als geeignet angenommene Fläche für den Ausbau von PV-Modulen basiert auf der Annahme, dass 40 Prozent der Satteldachflächen in Südost-Ausrichtung mit 30° Neigung sowie 50 Prozent der Flachdachflächen mit einer Ost-West-Orientierung und 10° Neigung genutzt werden können. Diese Abschätzung orientiert sich an den Erkenntnissen der Studie „Erneuerbare Energien 2020 - Potenzialatlas Deutschland“ (Schmidt & Mühlhoff, 2010). Die spezifische Leistung der PV-Module wird gemäß den „PV-Fakten“ des Fraunhofer-Instituts für Solare

Energiesysteme ISE mit 200 Watt Peak pro Quadratmeter für Dachflächen angenommen (Wirth, 2023). Der spezifische Ertrag wird nach den in der DIN V 18599 hinterlegten mittleren Strahlungsangebotswerten der Klimaregion, in der sich der betrachtete Standort befindet, bestimmt. Verluste aufgrund erhöhter Betriebstemperatur, variabler Einstrahlungsbedingungen, und Verschmutzungen sowie Verluste durch Leitungswiderstände und die Wandlungsverluste werden berücksichtigt.

Monetäre Bewertung

Die Investitionskosten umfassen Komponenten wie den baulichen Wärmeschutz, die Lüftung, die Wärmeerzeuger und PV-Module. Für zentrale Versorgungskonzepte kommen weitere Komponenten des Wärmenetzes hinzu.

Die Energiekosten setzen sich aus Heizkosten, Kosten für die Trinkwarmwasserbereitung und Stromkosten zusammen. Die Energiekosten werden durch Multiplikation der Endenergieverbräuche mit den Energiepreisen der eingesetzten Energieträger ermittelt.

Die Kompensationskosten werden berechnet, indem die Menge an Treibhausgasemissionen für Heizung, Trinkwarmwasserbereitung, und Strom unter Berücksichtigung einer Gutschrift für die Einspeisung des Stroms aus PV mit den vom Umweltbundesamt empfohlenen Klimakosten multipliziert werden (Bünger & Matthey, 2018). Die Treibhausgasemissionen ergeben sich durch Multiplikation der Endenergieverbräuche mit spezifischen Emissionsfaktoren gemäß DIN V 18599 Teil 1. Für Strom wird ein prospektiver mittlerer Emissionsfaktor des Betrachtungszeitraums angesetzt, welcher auf Studien des Internationalen Instituts für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien GmbH (IINAS) basiert, die ein Szenario des Strommixes in Deutschland prognostizieren (Fritsche & Stetz, 2021).

Für die volkswirtschaftliche Betrachtung werden die jährlichen Gesamtkosten abgeschätzt, indem die Investitionskosten über die Nutzungsdauer linear abgeschrieben (40 Jahre für baulichen Wärmeschutz, 20 Jahre für technische Anlagen) werden. Zusätzlich werden Energie- und Kompensationskosten addiert und die Erträge aus der Stromeinspeisung abgezogen.

Zur Ermittlung des „Klimaneutral Easy-Scores“ einer Variante werden die Investitionskosten, Energiekosten, Kompensationskosten sowie die volkswirtschaftliche Betrachtung in Relation zu den anderen Varianten betrachtet, um das Perzentil zu ermitteln. Dabei wird eine Punktzahl von 1 bis 5 zugewiesen, die sich nach den prozentual günstigsten Kosten aufteilt. Die Bewertungsskala in Relation der für jede Kostenkategorie kostengünstigsten Variante (entspricht 100 Prozent) sieht wie folgt aus:

$$1: \begin{cases} 0 \% \\ \vdots \\ 20 \% \end{cases} \quad 2: \begin{cases} 20 \% \\ \vdots \\ 40 \% \end{cases} \quad 3: \begin{cases} 40 \% \\ \vdots \\ 60 \% \end{cases} \quad 4: \begin{cases} 60 \% \\ \vdots \\ 80 \% \end{cases} \quad 5: \begin{cases} 80 \% \\ \vdots \\ 100 \% \end{cases}$$

Die einzelnen Bewertungen werden zu einem „Klimaneutral Easy-Score“ aggregiert, der eine Gesamtbewertung der jeweiligen Variante ermöglicht und Werte zwischen 4 und 20 annehmen kann. Darüber hinaus kann der Einfluss der einzelnen Bewertungen auf den „Klimaneutral Easy-Score“ durch eine Gewichtung individuell angepasst werden. Diese Funktion erlaubt es, unterschiedlichen Bewertungsperspektiven gerecht zu werden. Investoren legen größeren Wert auf die Investitionskosten, während für die Bewohner vor allem die Energiekosten von Bedeutung sind. Die Kompensationskosten spiegeln die anfallenden Treibhausgasemissionen wider und sind somit für eine Umweltbewertung relevant.

Die ausgewiesenen Energiekosten sind die mittleren jährlich anfallenden Kosten eines Betrachtungszeitraums. Unter Berücksichtigung einer jährlich konstanten Preissteigerung in diesem Zeitraum zeigt Gleichung 3, wie der Faktor der Preisänderung berechnet wird. Dieser Faktor wird mit dem Ausgangspreis multipliziert, um die mittleren jährlich anfallenden Energiekosten zu erhalten.

$$f_{\text{Preis}} = \sum_{n=1}^b \frac{(1 + \frac{x}{100})^n}{b} \quad (3)$$

f_{Preis} = Mittlerer Preisänderungsfaktor; b = Betrachtungszeitraum; x = Prozentuale jährliche Preisänderungsrate

Im Tool sind standardmäßig für die verschiedenen eingesetzten Energieträger Energiepreise des Jahres 2020 als Ausgangspreise hinterlegt. Diese werden anschließend mit dem Faktor f_{Preis} multipliziert, um den mittleren Energiepreis im Betrachtungszeitraum zu erhalten. Der Ausgangspreis der einzelnen Energieträger, der Betrachtungszeitraum und die jährliche Preisänderungsrate können von den Nutzenden angepasst werden.

Die geschätzten Investitionskosten für die Umsetzung eines Versorgungskonzepts basieren auf Kostenkennwerten. Die Kosten für die Wärmedämmung werden abhängig von den Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) der einzelnen Bauteile abgeschätzt. Für die Wärme- und Stromerzeugung werden Kostenkurven verwendet, die einen degressiven Verlauf mit zunehmender Leistung aufweisen. Die verwendeten Kostenfunktionen können dem Anhang des Leitfadens von Schrade et al. (2022) entnommen werden.

Anwendungsbeispiel und Testnutzung

Im Projekt „STADTQUARTIER 2050“ wurden Konzepte für eine klimaneutrale Energieversorgung für zwei Quartiere entwickelt. Eines davon befindet sich

in Stuttgart und soll hier als Anwendungsbeispiel für „Klimaneutral Easy“ dienen.

Projektpartner der Landeshauptstadt Stuttgart und der Stadt Überlingen haben eine Beta-Version der Software zu Testzwecken genutzt. Im folgenden Abschnitt werden zunächst die Ergebnisse des Anwendungsbeispiels und anschließend eine Auswertung der Rückmeldung der Projektpartner präsentiert.

Bürgerhospital in Stuttgart

Das Quartier erstreckt sich über eine Fläche von etwa 5 ha und liegt in einem hochverdichteten städtischen Kontext. Geplant sind mehr als 600 Wohneinheiten sowie Kindertagesstätten, Pflegeeinrichtungen, Einkaufsmöglichkeiten, Büroflächen und Kleingewerbe­flächen. Die meisten Bestandsgebäude werden abgerissen und durch Neubauten ersetzt. Das Ziel besteht darin, bezahlbaren Wohnraum zu schaffen. Der städtebauliche Entwurf sieht eine Blockrandbebauung mit bis zu acht Vollgeschossen vor, die um innenliegende Freiflächen angeordnet ist.

Im ersten Schritt wird der Siedlungstyp des Quartiers und der Standort festgelegt. Im Falle des Bürgerhospitals in Stuttgart handelt es sich um den Siedlungstyp „ST 7a: Blockbebauung niedriger Dichte“. Das Quartier liegt in einer Region mit mildem Klima und hoher Solarstrahlung.

Im nächsten Schritt werden die standortspezifischen limitierenden Faktoren eingegeben, um die Versorgungskonzepte einzuschränken. Es gibt diverse rechtliche und technische Restriktionen, wie die Vermeidung von Feinstaub, das Vorkommen von Anhydrid-Gestein im Untergrund und baurechtliche Einschränkungen durch Notwasserbrunnen, Tunnelbauwerke, Thermalwasservorkommen und einen erhaltenswerten Baumbestand im Projektgebiet.

Nach der Eingrenzung durch die limitierenden Faktoren ergeben sich drei dezentrale Versorgungskonzepte (Luft-Wasser-WP, Sole-Wasser-WP mit Hybridkollektoren bzw. PVT-Kollektoren und Sole-Wasser-WP mit Erdsonden) sowie vier zentrale Versorgungskonzepte (Nahwärme Sole-Wasser-WP mit Erdsonden oder Abwasserwärmerückgewinnung und kalte Nahwärme aus Abwasserwärme oder gespeist aus Erdsonden). Zusätzlich könnte auch die in der Nähe gelegene Fernwärme genutzt werden, die jedoch derzeit noch ein hohes Treibhausgaspotenzial aufweist. Die Varianten mit dem Energiestandard EH 100 und der unsanierte Bestand werden nicht betrachtet, da es sich um ein Neubaugebiet handelt, wodurch eine Mindestanforderung an den Energiestandard im Gebäudeenergiegesetz (GEG, 2023) festgelegt ist.

Möchte man aus dieser eingeschränkten Auswahl eine Rangliste der besten Versorgungskonzepte bei Gleichgewichtung der verschiedenen Kostenkategorien erstellen, bietet es sich an, die Versorgungskonzepte mit den höchsten „Klimaneutral Easy-Scores“ zu betrach-

ten. Für den Energiestandard **EH 55** sind dies die folgenden zentralen Versorgungskonzepte mit einem Wärmenetz:

Sole-Wasser-WP mit Erdsonden:	17
Sole-Wasser-WP mit Abwasserwärme:	17
Fernwärme (konventionell)	14

Für den Energiestandard **EH 40** fällt der „Klimaneutral Easy-Score“ geringer aus:

Sole-Wasser-WP mit Erdsonden:	15
Sole-Wasser-WP mit Abwasserwärme:	15
Fernwärme (konventionell)	13

Der negative Effekt der erhöhten Kosten für den baulichen Wärmeschutz der Gebäudehülle auf den „Klimaneutral Easy-Score“ ist im Vergleich zu dem positiven Effekt der Emissions- und Energieeinsparungen größer. Wenn ein ambitionierter Klimaschutz eine Grundprämisse der jeweiligen Quartiersentwicklung ist, sollten die Kompensationskosten als entscheidende Größe betrachtet werden. Sowohl diese als auch die Energiekosten fallen in den Wärmenetzlösungen mit Sole-Wasser-WP und der Ausführung des Energiestandards EH 40 am geringsten aus. Für Investoren jedoch fallen beim Anschluss an das bereits vorhandene konventionelle Fernwärmenetz bei EH 55-Ausführung die geringsten Kosten an.

Um die Versorgungskonzepte umfassend zu bewerten, können ausgewählte Quartiersberichte der vielversprechendsten Versorgungsvarianten erstellt werden. Hierin findet sich eine Beschreibung und Skizze des Versorgungskonzepts und eine Bewertung der ‚weichen‘ Faktoren. So zeigt sich zum Beispiel, dass das Konzept der Sole-Wasser-WP mit Abwasserwärmerückgewinnung negativ in den Punkten Umsetzbarkeit, Übertragbarkeit und Erweiterbarkeit ausfällt. Als wichtiger Bestandteil der Klimaschutzstrategie und durch den Ausbau erneuerbarer Energien ist es jedoch eine zukunftsfähige Technologie.

Im Quartier Bürgerhospital soll tatsächlich ein Nahwärmekonzept mit Sole-Wasser-WP umgesetzt werden. Dieses Konzept nutzt sowohl die Wärmequelle des Erdreichs als auch Abwasserwärme zur Wärmeversorgung. Zusätzlich sollen PVT-Kollektoren eingesetzt werden, um das Erdreich zu regenerieren. Der angestrebte Energiestandard entspricht dem Effizienz-niveau EH 55 (Schrade et al., 2020).

Testnutzung

Im Rahmen der Testnutzung wurden den Projektpartnern verschiedene Leitfragen zur Nutzerfreundlichkeit, Verständlichkeit, Nutzbarkeit und Ergebnisdarstellung gestellt. Es ergab sich folgendes Bild:

Nutzerfreundlichkeit und Verständlichkeit des Tools wurden positiv bewertet. Dass dieses Tool für Quartiere und somit auch für ganze Städte nutzbar bzw. an-

wendbar ist, wurde positiv vermerkt. Die Ergebnisdarstellung des Tools erhielt insgesamt gute Bewertungen. Hierbei wurde die Aufteilung der Ergebnisse im Quartiersbericht auf zwei Seiten, wobei auf der ersten Seite die Kosten und auf der zweiten Seite detaillierte Informationen dargestellt werden, als besonders zufriedenstellend aufgenommen.

Es wurde angemerkt, dass eine klare Reihenfolge bei der Dateneingabe hilfreich wäre, beispielsweise durch eine Durchnummerierung der Schritte. Darüber hinaus wurde gewünscht, bekannte Energiekennwerte aus der kommunalen Wärmeplanung für Bestandssiedlungen in das Tool einbinden zu können. Es wurden zusätzliche Informationen und Kennwerte vorgeschlagen, die in den Ergebnissen berücksichtigt werden könnten, wie beispielsweise die Leistung der PV-Anlagen und die Länge des Wärmenetzes.

Die Verbesserungsvorschläge aus der Testnutzung wurden in einem Release des Software-Tools umgesetzt. Das finale Software-Tool steht als webbasierte Applikation kostenfrei auf der Projektwebseite zur Verfügung.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Umsetzung von klimaneutralen Versorgungslösungen für Quartiere spielt eine zentrale Rolle bei der Erreichung der ambitionierten Klimaschutzziele der Bundesregierung. Eine besondere Herausforderung besteht darin, die unterschiedlichen Interessen der Akteure im Quartier im Planungsprozess zu berücksichtigen und tragfähige Lösungen anzubieten. Um die gewaltige Dimension der kommunalen Energiewende stemmen zu können, werden Hilfestellungen benötigt, die deutschlandweit und zeiteffizient anwendbar sind. Mit „Klimaneutral Easy“ steht den handelnden Personen ein Werkzeug zur Verfügung, das auch Laien in kurzer Zeit eine Spanne an Lösungsmöglichkeiten zur Unterstützung in der frühen Planungsphase bietet. Es zeichnet sich besonders durch die hohe Nutzerfreundlichkeit sowie Anpassbarkeit und Transparenz des Berechnungsmodells aus.

Die Anwendung des Planungstools auf das Wohnquartier in Stuttgart und die Testnutzung durch die Projektpartner haben verdeutlicht, dass das Tool gut einsetzbar ist. Es ermöglicht den handelnden Personen einen umfassenden Überblick über die Vielzahl der verfügbaren Versorgungsvarianten zu erhalten und diese miteinander zu vergleichen. Dabei können die verschiedenen Optionen unter Berücksichtigung der gegebenen Rahmenbedingungen umfassend analysiert und bewertet werden.

Danksagung

Das in diesem Artikel beschriebene Vorhaben wurde im Rahmen des Verbundvorhabens EnStadt mit dem Projekttitle „STADTQUARTIER 2050 - Herausforderungen gemeinsam lösen“ gefördert. Die Förderung erfolgte durch das Bundesministerium für Bildung

und Forschung (BMBF) und das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) unter dem Förderkennzeichen 03SBE116C. Abbildung 5 zeigt das „STADTQUARTIER 2050“-Logo und die Logos der Projektpartner.



Abbildung 5: Logo des Projekts „STADTQUARTIER 2050“ und Logos der Projektpartner und assoziierten Partner



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Literatur

- Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH (BKI) (2022). BKI Kostenplaner. Regionalfaktoren 2022. Version 2021.62.9: Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH (BKI).
- Blesl, M.; Neuffer, H.; Witterhold, F.-G.; Pfaffenberger, W.; Gregorzewski, A.; Schulz, W.; Fahl, U.; Voß, A.; Jochem, E.; Radgen, P.; Schmid, C.; Dribbisch, M.; Sager, J.; Sander, T.; Zschernig, J.; Carter, J. M.; Mauch, W.; Dötsch, C.; Fahlenkamp, H.; Hölder, D., 2001. Strategien und Technologien einer pluralistischen Fern- und Nahwärmeversorgung in einem liberalisierten Energiemarkt unter besonderer Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kopplung und regenerativer Energien: Kurztitel: Pluralistische Wärmeversorgung; AGFW-Hauptstudie - erster Bearbeitungsabschnitt. Band 1, Grundlagen der Kraft-Wärme-Kopplung, Zertifizierungsverfahren und Fördermodelle. Unter Mitarbeit von Universität Stuttgart.
- Breuer, B., 2013. Ziele nachhaltiger Stadtquartiersentwicklung. Hg. v. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR). Bonn.

- Bünger, B.; Matthey, A., 2018. Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.
- co2online gemeinnützige GmbH (Hrsg.), 2019. Stromspiegel für Deutschland 2019.
- Deutsche Energie-Agentur (dena) (Hrsg.), 2023. Erste Schritte in der Kommunalen Wärmeplanung: Die Vorbereitungsphase. Berlin.
- Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) :DIN EN 12831. Energetische Bewertung von Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast. Beuth Verlag, Berlin, 2017.
- Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) :DIN V 18599. Energetische Bewertung von Gebäuden. Beuth Verlag, Berlin, 2018.
- Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, 2018. District Energy Concept Adviser. Online verfügbar unter <https://district-eca.de>.
- Fritsche, U. R.; Stetz, T., 2021. Der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch und THG-Emissionen des deutschen Strommix im Jahr 2020 sowie Ausblicke auf 2030 und 2050. Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien GmbH. Darmstadt.
- Gebäudeenergiegesetz (GEG), 2023. Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden.
- Hertle, H.; Dünnebeil, F.; Gugel, B.; Rechsteiner, E.; Reinhard, C., 2019. Empfehlungen zur Methodik der kommunalen Treibhausgasbilanzierung für den Energie- und Verkehrssektor in Deutschland. ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung. Heidelberg (Bilanzierungs-Systematik Kommunal (BISKO)).
- Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) (2022). Merkblatt Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG). Nichtwohngebäude. Online verfügbar unter [www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-\(Inlandsf%C3%B6rderung\)/PDF-Dokumente/6000004860_M_463.pdf](http://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-(Inlandsf%C3%B6rderung)/PDF-Dokumente/6000004860_M_463.pdf), zuletzt geprüft am 08.02.2023.
- Loga, T.; Stein, B.; Diefenbach, N.; Born, R., 2015. Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. Institut Wohnen und Umwelt. Darmstadt.
- Müller, A.; Koert, J., 2022. Ergebnisbroschüre E4Q. Einbindung erneuerbarer Energieträger in die Energieversorgung vernetzter Quartiere. Institut für Massivbau, TU Darmstadt, Institut Wohnen und Umwelt (IWU):
- nPro Energy GmbH, 2023. nPro. Planungstool für Gebäude & Quartiere. Online verfügbar unter <https://app.npro.energy/>.
- Schmidt, J.; Mühlhoff, J., 2010. Erneuerbare Energien 2020. Potenzialatlas Deutschland. Hg. v. Agentur für Erneuerbare Energien e.V.
- Schrade, J.; Erhorn, H.; Erhorn-Kluttig, H., 2020. Entwicklung eines klimaneutralen Versorgungskonzepts für das Bürgerhospital Stuttgart – Wissenschaftliches Hintergrunddokument (D2.1.1). erstellt im Rahmen des Forschungsvorhaben „Stadtquartier 2050“. Fraunhofer IBP. Stuttgart.
- Schrade, J.; Illner, M.; Erhorn-Kluttig, H.; Erhorn, H., 2022. Wege zur klimaneutralen Energieversorgung von Quartieren – ein Leitfaden (D3.2.1). Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP. Stuttgart.
- Schrade, J.; Illner, M.; Erhorn-Kluttig, H.; Erhorn, H. (2023). Solutions for Climate-Neutral District Concepts. In: Sven Leonhardt, Tobias Nusser, Jürgen Görres, Sven Rosinger, Gerhard Stry-Hipp und Martin Eckhard (Hg.): Innovations and challenges of the energy transition in smart city districts: De Gruyter, S. 505–522.
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2011. Zensusdatenbank - Ergebnisse des Zensus 2011. Online verfügbar unter <https://ergebnisse2011.zensus2022.de/datenbank/online?operation=result&code=4000W-3021>.
- Wärmeplanungsgesetz (WPG), 2023. Entwurf eines Gesetzes für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze.
- Winter, W.; Haslauer, T.; Obernberger, I., 2001. Untersuchungen der Gleichzeitigkeit in kleinen und mittleren Nahwärmenetzen - Teil 1 (Euroheat and Power) 53-57.
- Wirth, H. (2023). Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Fraunhofer ISE. Freiburg. Online verfügbar unter www.pv-fakten.de, zuletzt aktualisiert am 01.03.2023, zuletzt geprüft am 01.04.2023.

BAUPHYSIKTAGE IN WEIMAR 2024: DIE ROLLE DER TECHNISCHEN VERTEILVERLUSTE AUF DEM WEG ZUR KLIMANEUTRALEN WÄRMEVERSORGUNG VON GEBÄUDEN – EIN ZWISCHENRUF

Michael Grafe

Institut Wohnen und Umwelt GmbH, E-Mail: m.grafe@iwu.de

Kurzfassung

Zur Erlangung eines klimaneutralen Gebäudebestandes werden die Reduktion des Energieverbrauchs durch Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes und die Transformation der Wärmeversorgung hin zu erneuerbaren Energieträgern thematisiert und vorangetrieben. Die technischen Verteilverluste führen hingegen ein Schattendasein. Sie tragen nicht unwesentlich zum Energieverbrauch bei. Vielfältige Einflussgrößen treten gebäudeindividuell sehr unterschiedlich in Erscheinung und führen praktisch zu sehr verschiedenen großen Verteilverlusten. Die energetische Modernisierung bietet Chancen, Verteilverluste deutlich zu verringern. Für Aussagen zur Gesamteffizienz verschiedener Wärmeversorgungsoptionen ist die Kenntnis aller Verteilverluste notwendig, aber nicht vollständig vorhanden. In der netzgebundenen Wärmeversorgung treten durch die Heterogenität des Gebäudebestandes und mögliche Interessenskonflikte zwischen Versorgern und Nutzern Besonderheiten in Erscheinung.

In order to achieve a climate-neutral building stock, the reduction of energy consumption by improving structural thermal insulation and the transformation of the heat supply towards renewable energy sources are being addressed and driven forward. Technical distribution losses, on the other hand, lead to a shadowy existence. They make a significant contribution to energy consumption. A wide range of influencing factors have very different effects on individual buildings and in practice lead to very different distribution losses. Energy modernisation offers opportunities to significantly reduce distribution losses. For statements on the overall efficiency of different heat supply options, knowledge of all distribution losses is necessary, but not completely available. The heterogeneity of the building stock and possible conflicts of interest between suppliers and users give rise to special features in grid-connected heat supply.

Einleitung

Die Ziele für einen klimaneutralen Gebäudebestand sind klar – Reduktion des Energieverbrauchs UND

Erneuerbarkeit der Wärmeversorgung. Zu deren Erlangung werden Wärmeschutzanforderungen schrittweise verschärft und Anforderungen an die Erneuerbarkeit von Wärmeversorgungssystemen formuliert. Aber auch die Verteilverluste können im modernisierten Gebäudebestand im Einzelfall die Größenordnung des eigentlichen Wärmebedarfs erreichen. Auch sie sind künftig als Teil des Gebäudewärmebedarfes durch erneuerbare Energieträger zu decken.

Im Beitrag soll aufgezeigt werden, dass geringe Verteilverluste zwar von gesellschaftlichem und individuellem Interesse sind, sich jedoch nicht von selbst einstellen. Er stellt eine qualitative Annäherung an verschiedene Aspekte von Verteilverlusten dar und soll auf mögliche Konflikte auf dem Weg zu einer klimaneutralen Wärmeversorgung von Gebäuden hinweisen.

Klimaneutraler Gebäudebestand und Einzelgebäude

Der Gebäudebestand in Deutschland soll bis 2045 klimaneutral werden. In aktuellen Szenarienstudien wird dieses Ziel als ambitioniert beschrieben. Entsprechend tiefgreifend sind die in den Szenarien enthaltenen Maßnahmenbündel. Ganz grundsätzlich lassen sich die Maßnahmen unterteilen in solche, die zu einer Reduktion des Energieverbrauchs führen und solche, die auf die Erneuerbarkeit der Wärmeversorgung setzen und damit treibhausgasmindernd wirken. Abbildung 1 deutet abstrakt an, in welcher Weise die Maßnahmen zur Erreichung der Klimaneutralität wirken sollen.

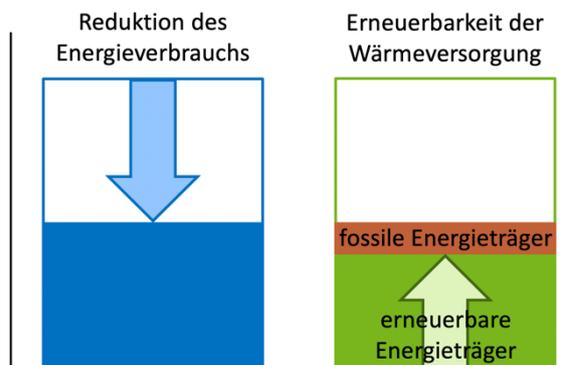


Abbildung 1: Auf dem Weg zum klimaneutralen Gebäudebestand

Die Reduktion des Energieverbrauchs soll durch einen stark verbesserten baulichen Wärmeschutz erreicht werden, der in den Szenarienstudien durch ambitionierte Annahmen berücksichtigt wird. So geht (Prognos AG, et. al. 2022) beispielsweise bereits für das kommende Jahr von einer energetischen Modernisierung (dort „Sanierungstiefe“) im KfW-Effizienzhaus-Standard 70 und einer als entsprechend angenommenen Reduktion des Nutzwärmeverbrauchs für Raumwärme auf unter $60 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ (EZFH – Ein-/Zweifamilienhäuser) bzw. unter $45 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ (MFH – Mehrfamilienhäuser) aus. Für die nachfolgenden Jahre werden noch bessere Wärmeschutzstandards angenommen.

Seitens der Erneuerbarkeit der Wärmeversorgung setzen die Szenarienstudien stark auf Wärmepumpen und Wärmenetze. Zwar wird innerhalb der Szenarien von deutlich unterschiedlichen Transformationspfaden ausgegangen, beide Technologien spielen jedoch generell eine starke Rolle.

Im Einzelgebäude werden die Modernisierungsentscheidungen neben den Anforderungen, die sich aus den oben beschriebenen gesellschaftlichen Zielsetzungen ergeben, auch auf Basis individueller Präferenzen getroffen. Danach sollen die erwarteten Energie- und Kosteneinsparungen auch realisiert werden und getätigte Investitionen sich über die Nutzungszeit amortisieren. Hierbei kommen nun auch die Verteilverluste in Betracht. Im Ausgangszustand eines Bestandsgebäudes vor der energetischen Modernisierung können Verteilverluste in sehr verschiedenen Größen vorliegen. Im Einzelfall können sie zur Erlangung der Energie- und Kosteneinsparungen von zentraler Bedeutung werden. Die nachfolgenden Betrachtungen sollen dafür sensibilisieren, dass neben dem baulichen Wärmeschutz auch der Wärmeschutz der Verteilleitungen wichtig zur Energieeinsparung ist. Weiterhin sind Systeme mit geringen Verteilverlusten auch wichtig für den effizienten Betrieb von Wärmeerzeugern.

Einflüsse auf die Höhe von Verteilverlusten

Auf die Höhe der Verteilverluste haben einige Parameter Einfluss. Die Einzeleinflüsse können gebäudeindividuell sehr verschieden sein. So kann die Länge des Verteilsystems von wenigen Metern bis über 100 m (Blockheizung, Wärmenetze) betragen, der Dämmstandard der Rohrleitungen von etwa $0,1 \text{ W/mK}$ (klein, gedämmt) bis über 3 W/mK (groß, ungedämmt) reichen, im Bestand bei nachträglicher Dämmung von Verteilleitungen Wärmebrücken restriktiv wirken und neben der Anzahl der Rohrleitungen (1|2|3|4-Leitersystem) auch der Verzicht bzw. das Vorhandensein von Zirkulationsleitungen (Warmwasser) signifikant wirken. Die Betriebsparameter – insbesondere die vorhandenen Systemtemperaturen und etwaige

Absenk-/Abschaltbetriebe – wirken ebenfalls auf die Höhe der Verteilverluste, kommen aber in Wechselwirkung mit weiteren baulichen und anlagentechnischen Einflüssen zur Geltung. Für un-/teilmodernisierte bauliche Wärmeschutzstandards und bei Vorhandensein von Heizkörpern lassen sich Systemtemperaturen nicht beliebig absenken.

Aus dieser Verschiedenartigkeit des Auftretens der Einzeleinflüsse sind praktisch resultierende Verteilverluste im Bereich von $0 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ (direkt-elektrische Systeme) bis über $100 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ (Heizung und Warmwasser in Summe in nicht modernisierten Bestandsgebäuden mit Blockheizung bzw. Wärmenetz) möglich. Über die tatsächliche Höhe von Verteilverlusten im Gebäudebestand ist wenig bekannt. Das liegt zum einen daran, dass die Erfassung von Verteilverlusten messtechnisch aufwendig ist. In der Vergangenheit ist auf eine separate Betrachtung von Verteilverlusten auch verzichtet worden mit dem Argument, im Gebäude abgegebene Wärme aus Verteilverlusten könne die Abgabe von Heizwärme verringern und so genutzt werden. Mit dem Blick auf die oben erwähnten, künftig regelmäßig zu erwartenden geringen Raumwärmeverbräuche werden die ohnehin nur teilweise nutzbaren Wärmeeinträge aus technischen Verlusten jedoch kleiner (z.B. durch Verkürzung der Heizperiode).

Modernisierung von Bestandsgebäuden

Bei der energetischen Modernisierung von Bestandsgebäuden ergeben sich Chancen, Verteilverluste deutlich zu verringern. Neben einer wärmebrückenarmen Dämmung der sichtbaren (oft im unbeheizten Bereich liegenden) Verteilleitungen sind auch die verborgenen Leitungsabschnitte in Versorgungs-schächten (MFH) und unter Putz (EZFH und MFH) zu beachten, da auch hier schlecht bzw. nicht gedämmte Leitungsabschnitte zu erwarten sind. Deren spezifische, längenbezogene Leitungsverluste können im Einzelfall bis zu einer Zehnerpotenz größer sein als bei vollständiger Dämmung. Auch die Reduktion von Leitungslängen ist möglich, etwa durch Verzicht auf (Teile der) Warmwasser-Zirkulation oder durch Rückbau der Verteilung zu nicht mehr benötigten Heizkörpern. Bei energetischer Modernisierung des baulichen Wärmeschutzes führen auch die Absenkung der Systemtemperaturen und die mit der Verkürzung der Heizperiode einhergehende kürzere Betriebszeit des Heizungsverteilsystems zu reduzierten Verteilverlusten im Gebäude.

Ausdehnung von Verteilsystemen und Sichtbarkeit der Verteilverluste

Mit der Ausdehnung eines Verteilsystems nehmen (bei gleichem Dämmstandard) die Verteilverluste zu. Bei Betrachtung der Heizsysteme mit Verteilleitungen sind für Etagenheizsysteme also die vergleichsweise geringsten Verluste zu erwarten,

gefolgt von Zentralheizungen, Blockheizungen und Wärmenetzen. Praktisch abgerechnete Heizenergieverbräuche enthalten nicht für alle Heizsysteme vollständig die Verteilverluste. Entscheidend ist hier der Messpunkt des Energieverbrauchs. Für Etagen-, Zentral und Blockheizungen ist das gewöhnlich ein Brennstoff- oder Wärmezähler im Bereich des Wärmeerzeugers. Die Verteilverluste sind dann vollständig enthalten. Die Wärmeverbräuche aus Wärmenetzen werden an der Übergabestelle im Gebäude oder an der Wohnung gemessen. Dementsprechend sind darin die Verteilverluste des Wärmenetzes bzw. teilweise auch des Gebäudes nicht enthalten. Die etwas geringeren Verbrauchskennwerte von Gebäuden mit netzgebundener Wärmeversorgung sagen also noch nichts über die Gesamteffizienz des Systems aus.

Die Kenntnis aller Verteilverluste ist einerseits zur Erlangung eines klimaneutralen Gebäudebestandes wichtig, da auch zu deren Deckung unabhängig vom Wärmeversorgungssystem knappe, erneuerbare Energieträger eingesetzt werden. Andererseits ist die Kenntnis wichtig für individuelle, energetisch-wirtschaftliche Entscheidungen im Rahmen der energetischen Modernisierung von Einzelgebäuden.

Besonderheiten der netzgebundenen Wärmeversorgung

Heterogenität – Ein Effizienzdilemma beim Ausbau und der Transformation der netzgebundenen Wärmeversorgung

Mit dem Auftreten von Gebäuden mit sehr verschiedenen energetischen Standards in einem Versorgungsgebiet der netzgebundenen Wärmeversorgung tritt ein Effizienzdilemma in Erscheinung. Niedrige (Wärmenetzerweiterung und Neubau) bzw. abgesenkte (Wärmenetze im Bestand) Systemtemperaturen bieten Chancen zur effizienten Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmeerzeuger (z.B. COP der Wärmepumpe) und tragen gleichzeitig durch geringere Netzverluste zur Effizienzverbesserung der netzgebundenen Wärmeversorgung bei. Allerdings können die Systemtemperaturen nicht beliebig abgesenkt werden. Es drohen die Unterversorgung von Gebäuden mit geringem Energiestandard und Probleme mit Legionellen. Demgegenüber müssen die Nutzer der Gebäude, die bereits über einen hohen Energiestandard verfügen, die aus ihrer individuellen Sicht unnötig hohen Systemverluste mittragen. Grundsätzlich hat jede weitere Modernisierungsmaßnahme, die zu einer Reduktion des Gebäude-Energieverbrauchs (resp. Wärmeabnahmedichte) führt, auch die Erhöhung des relativen, verbrauchsbezogenen Netzverlustes zur Folge. Hier können sich Transformationszeiträume von einigen Jahren ergeben, in denen die netzgebundene Wärmeversorgung aus Sicht einer zunehmenden Anzahl von Gebäuden mit hohen Energiestandards als wenig effizient angesehen

werden. Langfristig ist die zunächst abnehmende Effizienz der Wärmenetze durch den Austausch von Rohrleitungen (verringerte Dimensionierung, verbesserter Dämmstandard) wiederherzustellen bzw. zu verbessern. Weiterhin sind perspektivisch auch die Systemtemperaturen stetig zu senken (Absenkfahrplan).

Nutzer- und Versorgersicht auf die Effizienz

Im Falle der netzgebundenen Wärmeversorgung sind Gebäudeeigentümer (Nutzer) und Betreiber der Wärmeversorgung (Versorger) in der Regel nicht identisch. Während Energiegenossenschaften Systeme mit möglichst geringen Wärmegestehungskosten betreiben wollen, legen andere Betreiberformen (Contractoren, Fernwärmeunternehmen, Anbieter industrieller Abwärme etc.) den Fokus stärker auf die Stromproduktion bzw. Prozesswärme und einen rentierlichen Betrieb ihres Gesamtsystems. Unabhängig vom Betreibermodell wurden zur Zeit der Errichtung des Wärmenetzes Entscheidungen nach den seinerzeit sinnvollen Präferenzen des Betreibers getroffen, die nicht zwangsläufig auch zu den geringstmöglichen Wärmenetz-Verteilverlusten führen müssen. Während Versorger also mehr oder minder stark auf die Begrenzung von Verteilverlusten fokussiert sind, ist es regelmäßig im Interesse der Nutzer, ihre Energiekosten zu begrenzen. Allerdings haben sie keine Möglichkeit, die Wärmenetzverluste zu beeinflussen. Die energetische Effizienz des Wärmenetzes wird in den kommenden Jahren im Zuge der Wärmenetz-Transformation hin zu erneuerbaren Energieträgern dann stärker in den Fokus geraten, wenn dort künftig knappe, mit weiteren Wärmeversorgungssystemen konkurrierende, erneuerbare Energieträger eingesetzt werden. In netzgebundenen Systemen, die beispielsweise auf Wärmepumpen oder Biomasse setzen, stellen die Verteilverluste des Wärmenetzes dann eine – gegenüber der Wärmeversorgung des Einzelgebäudes – zusätzliche Verlustkomponente dar.

Ausblick

Zur individuellen Erreichung erwarteter Verbrauchsreduktionen wie zur Erlangung eines klimaneutralen Gebäudebestandes kann die Auseinandersetzung mit und die Formulierung von Anforderungen an die Begrenzung von Verteilverlusten wertvolle Beiträge leisten. In diesem Sinne ist ein verstärkter fachlicher Diskurs auch mit Blick auf Gesamteffizienzen von Wärmeversorgungssystemen wünschenswert.

Literatur

Prognos AG, et. al. 2022. Hintergrundpapier zur Gebäudestrategie Klimaneutralität 2045 – Gutachten im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz, Berlin, Basel, München, Freiburg, Heidelberg, Dresden



EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DES POTENTIALS EINES NEUARTIGEN WÄRMESPEICHER- UND ENERGIEERZEUGUNGSSYSTEMS

Birke Schröter¹, Jonas Spiegel¹, Svenja Carrigan¹, Oliver Kornadt¹

¹ Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern Landau

Kurzfassung

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurde der Prototyp eines neuartigen Wärmespeicher- und Energieerzeugungssystems für Gebäude entwickelt und untersucht. Die Energiegewinnung erfolgt über die Erwärmung von wasserdurchflossenen Kollektoren durch auftreffende Solarstrahlung. Eine Steuerung ermöglicht im Anschluss entweder die direkte Nutzung der gewonnenen Energie oder die Einspeicherung in den im Pfahl integrierten Speichern.

Bei den experimentellen Untersuchungen stand zum einen die Eignung des Prototyps zum Beheizen von Gebäuden im Vordergrund. Darüber hinaus wurde für den Kühlfall untersucht, ob ein überhitztes Gebäude durch die Kollektorfläche des Prototyps innerhalb der kühlen Nachtstunden abgekühlt werden kann.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Prototyp großes Potential besitzt, aber im Projekt eine Weiterentwicklung notwendig ist, um eine wirtschaftliche Option darzustellen.

Abstract

The prototype of a new type of heat storage and energy generation system for buildings was developed and investigated as part of a research project. Energy is generated by heating collectors through which water flows using incident solar radiation. Then a control system enables either direct use of generated energy or storage in the storage units integrated in the pile.

The experimental investigations focused on the suitability of the prototype for heating buildings. Additionally for the cooling case was investigated whether an overheated building can be cooled by the collector surface of the prototype during cool night hours.

Results show that the prototype has great potential, but that further development in the project is necessary in order to present an economic option.

Einleitung

Der Energiebedarf in Privathaushalten war im Jahr 2020 in Deutschland für rund 28,9 % Prozent des Endenergiebedarfs verantwortlich. Der Verbrauch in diesem Sektor ist somit sogar höher als der des Verkehrs- und Industriesektors (BMWK, 2022). Bei der in Haushalten benötigten Endenergie wird der Großteil für das

Beheizen der Gebäude verwendet. In deutschen Wohngebäuden macht dieser Bedarf rund 68,3 % Prozent des Energiebedarfs aus. Allerdings ist auch der steigende Bedarf der Gebäudekühlung bei Überhitzung in den Sommermonaten nicht zu missachten. Aktuell werden dafür in Haushalten 0,2 % und in Gewerbe, Handel und Dienstleistungen 1,2 % des Endenergiebedarfs benötigt, allerdings steigt der Bedarf seit 1996 stetig an. (BMWK, 2022) Es wird jedoch prognostiziert, dass bei gleichbleibendem Stand der Technik und unter Berücksichtigung des Klimawandels mit einer wesentlichen Mehraufwendung von Energie zu rechnen ist (Bettgenhäuser et al., 2011). Aufgrund des voranschreitenden Klimawandels und den daraus resultierenden politischen Forderungen, wie der Klimaneutralität des Gebäudesektors bis 2050, muss an einer nachhaltigen Bereitstellung der benötigten Energie gearbeitet werden. Es ist von großer Bedeutung auch neue nachhaltige Methoden zu entwickeln, um sowohl die Gebäudeheizung als auch die -kühlung auf klimaneutrale Weise sicherstellen zu können.

Eine mögliche Lösung sollen die sogenannten Energiepfähle bieten, die im Rahmen des Forschungsprojektes „EffKon – Effizientes Wärmespeicher- und Energieerzeugungssystem zur thermischen Konditionierung von Gebäuden“ (EffKon, 2023, Friedrich, 2023) entwickelt und untersucht werden. Das Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert und gemeinsam mit den Unternehmen Innogration GmbH, Panco GmbH, CuroCon GmbH und Betonwerk Büchner GmbH & Co. KG bearbeitet. Die Energiepfähle ermöglichen sowohl die Energieerzeugung als auch die Energieeinspeicherung in einem autarken System. Außerdem soll überschüssige Wärmeenergie im tages- und jahreszeitlichen Zyklus gespeichert und nutzbar gemacht werden können sowie Gebäudeüberhitzungen vermieden werden. Durch die Energiepfähle soll die Energie zur Gebäudetemperierung auf klimaneutrale Weise sichergestellt werden. Eine weitere Besonderheit ist die Verwendung von Speichersystemen mit unterschiedlichen Temperaturniveaus. Dazu wird zum einen ein Phasenwechselmaterial (engl. phase change material, PCM) im Pfahlspeicher verwendet. PCM sind Latentwärmespeicher, bei denen der Phasenwechsel dazu benutzt wird, dass ohne eine Temperaturänderung des Materials als Wärmeenergie gespeichert wird (Krohn et al., 2022; Bilgin et al., 2017; Friedrich et al., 2014).

Zusätzlich werden Peltier-Elemente eingesetzt, um kleine Temperaturunterschiede zu überwinden und somit beispielsweise eine benötigte Vorlauftemperatur zu erreichen. Peltier-Elemente sind elektrothermische Wandler, die bei einem Stromdurchfluss eine Temperaturdifferenz erzeugen können (Blum et al., 2023).

Darüber hinaus könnten die Energiepfähle sowohl mit Photovoltaik als auch mit einer Windturbine ausgestattet werden. Die dadurch gewonnene Energie soll zum einen den Ertrag maximieren, aber auch den Betrieb des Pfahls sicherstellen. Dabei soll eine maximale Höhe des Energiepfahls von 10 m nicht überschritten werden, damit zur Errichtung der Pfähle keine Baugenehmigung erforderlich ist.

Aufbau des Prototyps

Um die Wirkungsweise der geplanten Energiepfähle untersuchen zu können, wurde ein Prototyp errichtet. Der Prototyp weist eine Höhe von 2 m auf. Er ist zylindrisch aufgebaut und besitzt einen Gesamtdurchmesser von circa 60 cm. Den Kern des Pfahls bildet ein doppelwandiges Stahlrohr, dessen Kammern die Wärmespeichermedien fassen. In der inneren Kammer befindet sich Wasser und in der äußeren Kammer PCM. In beiden Speichermedien befinden sich vertikale Rohrschlangen aus Kupfer, welche von Wasser durchflossen werden und somit die Speicher aktivieren. Um die Wärmeverluste des Speichers zu minimieren ist das äußere Stahlrohr mit einer Dämmung aus Mineralwolle gedämmt. Vor der Dämmung ist eine wasserführende, eng gedrehte Kupferspirale über die gesamte Pfahlhöhe angebracht, die als Solarabsorber dient. Eine schwarze Beschichtung der Spirale erhöht den Absorptionsgrad, um die Wirkweise der Absorberspirale zu verbessern. Die gesamte Konstruktion ist von einer Röhre aus Plexiglas eingehaust, die zum einen die Konstruktion vor Umwelteinflüssen schützt, zum anderen auch durch die Nutzung des Treibhauseffekts zu einer Maximierung der Erträge beiträgt (Abbildung 1, Abbildung 2).

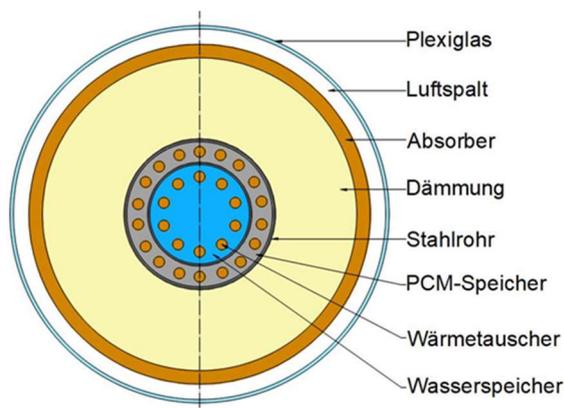


Abbildung 1: Querschnitt des Prototyps

Die Temperatur der Kupferspirale und somit auch des Wassers darin wird durch die auftreffende Solar-

strahlung erhöht. Durch Wärmetauscher im PCM- und im Wasserspeicher kann das erwärmte Wasser Wärmeenergie einspeichern. Dabei wird zuerst der PCM-Speicher und anschließend der Wasserspeicher angesteuert.



Abbildung 2: Prototyp des Energiepfahls

Messaufbau und Durchführung

Für den Messaufbau wird der Prototyp mit einem Pufferspeicher erweitert, welcher sowohl einen Abnehmer für die gewonnene Energie simulieren als auch für unterschiedliche Untersuchungen temperiert werden kann, um eine definierte Vorlauftemperatur zur Verfügung zu stellen.

Die Durchführung der Versuche kann je nach Untersuchung durch unterschiedliche Wasserkreisläufe erfolgen. Dazu steht auch eine Steuerung zur Verfügung, die es über die Regelung der Pumpe und zwei

ansteuerbare Ventile ermöglicht, die unterschiedlichen Wasserkreisläufe anzusteuern.

Bei der Energieeinspeicherung wird das Wasser in Abhängigkeit von den Temperaturen im Prototyp unterschiedlich geleitet. Ist die Temperatur in der Absorberspirale geringer als die Temperatur im Speicherkern, ist die Pumpe ausgeschaltet, sodass sich das Wasser in der Absorberspirale erwärmen kann. Sobald dort die Temperatur höher ist als die Temperatur im Speicherkern, wird die Pumpe eingeschaltet und das Wasser zirkuliert innerhalb des Pfahls. Hat der Pfahlspeicher eine Temperatur von 30 °C erreicht, wird der Wasserkreislauf geändert, damit der Pufferspeicher zusätzlich zur Einspeicherung verwendet werden kann. Das Wasser wird vom Pufferspeicher durch die Kupferspirale, die Wärmetauscher im PCM- und Wasserspeicher und wieder zurück zum Pufferspeicher gepumpt. Bei Nacht und einer Pfahlspeichertemperatur höher als 30 °C kann der Energiepfahl entladen werden. Dafür wird die Absorberspirale durch einen Bypass übergangen und das Wasser wird vom Pufferspeicher durch den PCM- und Wasserspeicher und wieder zurück zum Pufferspeicher gepumpt.

Zur Untersuchung der Kühlung wird grundsätzlich der Speicher des Pfahl-Prototyps umgangen. Tagsüber zirkuliert das Wasser nur innerhalb der Absorberspirale. Parallel dazu kann der Pufferspeicher separat temperiert werden, um ein überhitztes Gebäude zu simulieren. Nachts und bei Temperaturen in der Kupferspirale, die geringer sind als die Temperaturen im Pufferspeicher, wird das Wasser vom Pufferspeicher durch die Kupferspirale und wieder zurück zum Pufferspeicher gepumpt. Sind die Temperaturen in der Spirale noch zu hoch, zirkuliert das Wasser weiter nur innerhalb der Absorberspirale. So kann Wärme an die Außenluft abgegeben werden, sollte die Temperatur in der Absorberspirale höher sein als in der Außenluft.

Zum Messen der Temperaturen im Prototyp wurden sowohl innerhalb der Schichten als auch an den Schichtgrenzen Sensoren verbaut. Um abweichende Temperaturen in Höhe und Ausrichtung zu erfassen, wurden die Sensoren jeweils in drei unterschiedlichen Höhen - am Pfahlfuß, auf mittlerer Höhe und am Pfahlkopf - und in Richtung der unterschiedlichen Himmelsrichtungen platziert. Darüber hinaus wird das Außenklima durch Messungen der Außenlufttemperatur, der Windgeschwindigkeit und der Globalstrahlung festgehalten und die Durchflussgeschwindigkeit im Wasserkreislauf, jeweils im Vor- und im Rücklauf, gemessen.

Eignung des Prototyps des Energiepfahls zum Heizen

Der Energiegewinn wird über die gemessene Temperaturerhöhung über die gesamte Länge der Absorberspirale bestimmt. Der daraus resultierende Energiegewinn kann tagesweise in Abhängigkeit von der gemessenen Globalstrahlung gesetzt werden, um Rück-

schlüsse auf den jährlichen Energieertrag zu ziehen. Dieser Hochrechnung liegt das Testreferenzjahr TRY2015 am Standort Kaiserslautern zugrunde. Dieses Verfahren wird auch zur Bestimmung der möglichen Energieeinspeicherung im jahreszeitlichen Verlauf verwendet. Dabei wird die Temperatordifferenz am Ein- beziehungsweise Auslass des im Prototyp integrierten Speichers zur Berechnung herangezogen. Aufgrund der Speichergröße kann konservativ eine maximale Energieeinspeicherung von 3 kWh pro Tag angenommen werden, unter der Annahme, dass der Prototyp in der Nacht wieder komplett entladen wird. In einer Versuchsreihe zur Entladung zeigte sich, dass eine vollständige Entladung des Prototyps in unter 6 Stunden möglich ist.

Hochgerechnet können im Jahr somit 762,9 kWh Energie gewonnen werden. Der Hauptanteil resultiert dabei aus den Sommermonaten (365,1 kWh) und der Übergangszeit (304,0 kWh). Die gleiche Verteilung zeigt sich auch bei der Energieeinspeicherung. Allerdings können jährlich aufgrund der Begrenzung des Speichers nur 658,5 kWh der gewonnenen Energie eingespeichert werden (Abbildung 3).

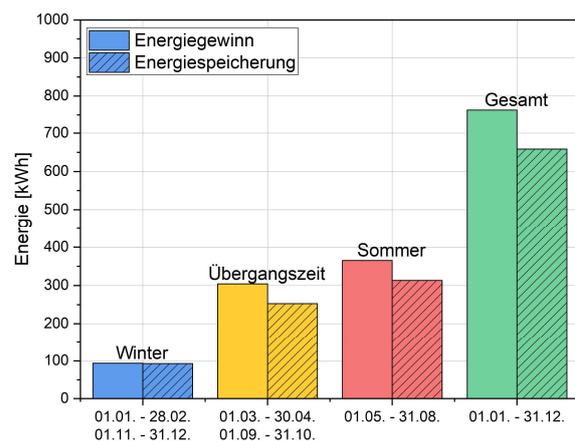


Abbildung 3: Prognostizierter Energiegewinn und Energieeinspeicherung des Prototyps nach einzelnen Jahreszeiten und Gesamt

Bei der Auswertung der Daten zeigt sich, dass der Energiegewinn und damit auch die mögliche Energieeinspeicherung des Prototyps im Wesentlichen von der zur Verfügung stehenden Globalstrahlung abhängig ist. Grundsätzlich gilt, dass bei einer höheren Tagessumme an Strahlung auch mehr Energie gewonnen werden kann. Die auftretende Globalstrahlung kann in einen diffusen und einen direkten Anteil aufgeteilt werden, wobei der Prototyp die Direktstrahlung besser nutzen kann. Nach aktuellem Stand scheint die Außenlufttemperatur hingegen keinen signifikanten Einfluss auf den Energiegewinn beziehungsweise die Energieeinspeicherung zu haben. Bei der Entladung des Prototyps spielt vor allem die Vorlauftemperatur des Wassers eine Rolle. Wird die Vorlauftemperatur gesenkt, sinkt auch die Entladedauer. Ebenso kann die

Entladung durch eine Erhöhung der Durchflussgeschwindigkeit beschleunigt werden.

Um den Energiegewinn des Prototyps einordnen zu können wird der monatliche Gewinn im Jahresverlauf mit dem Ertrag einer Solaranlage zur Heizungsunterstützung gegenübergestellt (Abbildung 4). Der Ertrag einer solchen Vergleichsanlage variiert je nach Auslastung zwischen 250 – 400 kWh/(m²a) (Schabbach und Leibbrandt, 2021). Die monatliche Verteilung resultiert aus der Simulation einer Solaranlage im Gebäudesimulationsprogramm TRNSYS der ebenfalls das TRY2015 am Standort Kaiserslautern zugrunde liegt. Es zeigt sich, dass der Prototyp in seiner Ausführung bereits gute Ergebnisse erzielt. Der gesamte Jahresertrag des Prototyps liegt mit 220,49 kWh/m² nur knapp unter dem der handelsüblichen Solaranlage zur Heizungsunterstützung. Dabei liegt vor allem in den Sommermonaten der Ertrag unter dem Vergleichsertrag. In den Winter- und Übergangsmonaten werden die Vergleichserträge erzielt bzw. zum Teil übertroffen.

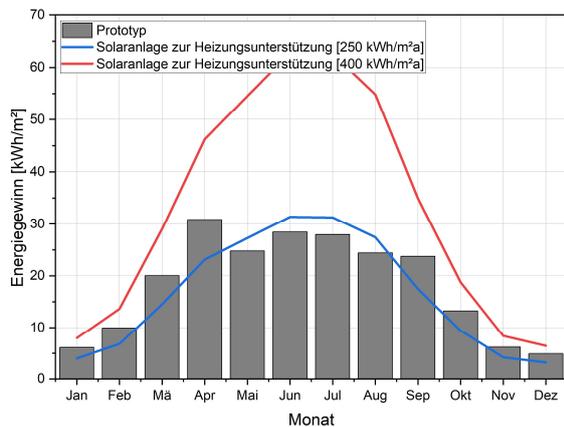


Abbildung 4: Monatsweiser Vergleich des prognostizierten Energiegewinns des Prototyps mit dem Ertrag einer Solaranlage zur Heizungsunterstützung

Optimierungsbedarf besteht vor allem hinsichtlich der Energieeinspeicherung und des Energiebedarfs im jahreszeitlichen Rhythmus. Die mögliche Einspeicherung des Prototyps in den Wintermonaten ist nicht ausreichend, um genug Energie zum Heizen zur Verfügung zu stellen. In den Sommermonaten hingegen, wenn genug Solareinstrahlung vorhanden ist, produziert der Energiepfahl überschüssige Energie, die aufgrund der fehlenden Nachfrage nicht zum Heizen genutzt wird. Hier ist die Ergänzung durch einen saisonalen Speicher sinnvoll.

Die detaillierten Berechnungen zur Bestimmung der Eignung des Pfahls zum Heizen wurden bereits in Schröter et al. (2023) veröffentlicht.

Eignung des Prototyps des Energiepfahls zum Kühlen

Um das Potential des Prototyps hinsichtlich der Gebäudekühlung zu untersuchen, wurde die automatische Steuerung aus den vorherigen Untersuchungen erweitert. Durch die Messung der Beleuchtungsstärke kann zwischen Tag und Nacht unterschieden werden. Tagsüber ist die Pumpe ausgeschaltet und der Pufferspeicher wird zur Simulation eines überhitzten Gebäudes auf circa 30 °C temperiert. Nachts zirkuliert das Wasser nur in der Absorberspirale, bis die Temperatur des Wassers unter der Pufferspeichertemperatur liegt. Dann wird das Wasser durch die Absorberspirale und anschließend in den Pufferspeicher gepumpt, um diesen abzukühlen. Der integrierte Speicherkern wird bei diesem Versuch immer übergangen. Die Durchflussgeschwindigkeit bleibt bei allen Versuchsabläufen unverändert. Bei der Auswertung der Messergebnisse wird die Durchflussgeschwindigkeit mit einbezogen. Dazu wird die Temperaturdifferenz zwischen Eingang und Ausgang der Absorberspirale im zeitlichen Versatz der Durchflussdauer der Spirale berechnet. Die Temperatur im Pufferspeicher und auch die Außenlufttemperatur werden über diesen Zeitraum gemittelt.

Es zeigt sich, dass der temperierte Pufferspeicher in den Nachtstunden um ungefähr 5 K abkühlt. Ab dem Zeitpunkt, in dem sich negative Temperaturdifferenzen zwischen dem Einlass der Absorberspirale und dem Auslass der Spirale einstellen, sinkt die Temperatur im Speicher deutlich. Bei nächtlichen Außentemperaturen zwischen 10 °C und 15 °C stellt sich eine mittlere Temperaturdifferenz von -5 K ein (Abbildung 5).

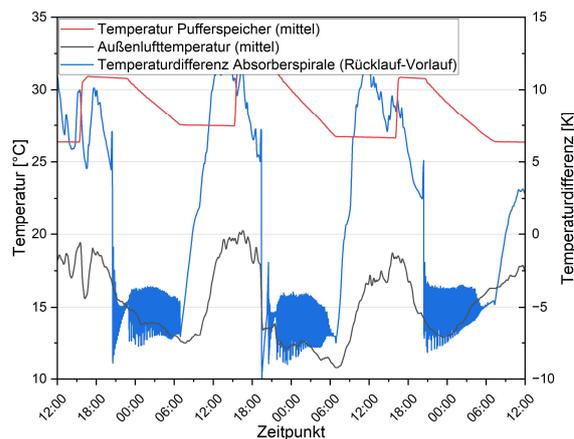


Abbildung 5: Temperaturverlauf der Außenlufttemperatur und der Pufferspeichertemperatur (Abnehmer) und Temperaturdifferenz zwischen dem Rücklauf und dem Vorlauf der Absorberspirale

Die Energieabgabe des Prototyps über die Absorberspirale errechnet sich wie folgt:

$$E_A = \Delta\theta_A \cdot c_W \cdot \dot{m} \cdot t \quad (1)$$

mit E_A = Energieabgabe im Absorber; $\Delta\theta_A$ = Temperaturdifferenz zwischen Auslass und Einlass der Kupferspirale; c_W = spezifische Wärmekapazität von Wasser; \dot{m} = Durchflussgeschwindigkeit und t = Zeit.

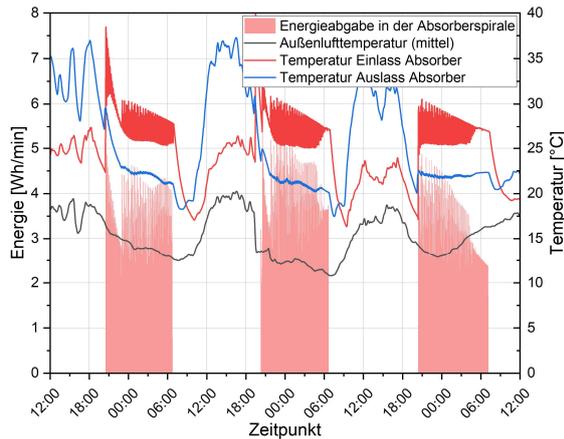


Abbildung 6: mittlere Außenlufttemperatur, Ein- und Auslasstemperatur der Absorberspirale und daraus resultierende Energieabgabe pro Minute

Die Energieabgabe der Absorberspirale wird nur innerhalb der Nachtstunden berechnet. Es ist deutlich zu erkennen, dass nur innerhalb dieses Zeitraums das Wasser am Auslass der Absorberspirale kühler ist als das Wasser, welches in die Absorberspirale hineingepumpt wird (Abbildung 6). Innerhalb eines Tagesverlaufs wird eine durchschnittliche Energieabgabe über die Spirale von rund 1,9 kWh/d erreicht. Die Energieabgabe der Absorberspirale ist eindeutig von der Temperatur der Außenluft abhängig. Bei sinkender durchschnittlicher nächtlicher Außenlufttemperatur steigt die Energieabgabe (Tabelle 1). Die Energieabgabe des Pufferspeichers ist deutlich höher als die der Spirale. Hier kommen neben den Verlusten, die über das gekühlte Wasser erzielt werden, auch noch unbeabsichtigte Verluste aufgrund der Wärmeabgabe des Speichers an seine Umgebung hinzu. Für die Einschätzung der Eignung und der Kühlleistung des Prototyps wird dementsprechend die Energieabgabe über die Absorberspirale herangezogen.

Aus den Ergebnissen ergibt sich eine durchschnittliche Leistung des Prototyps zum Kühlen von circa 185 W bei einer durchschnittlichen Temperaturdifferenz zwischen Außenluft und Vorlauftemperatur von 14,6 K. Die spezifische Leistung einer Flächenkühlung beträgt in der Ausführung als Wandheizung bei einer Raumlufttemperatur von 26 °C maximal 65 W/m² in Bezug auf die Wandfläche (BDH-Köln,

2023). Ein Energiepfahl mit einer Höhe von 10 m und identischem Aufbau wie der Prototyp hätte aufgrund der fünffachen Absorberfläche die Leistung, um einen 14 m² großen Raum über eine Wandkühlung zu temperieren.

Tabelle 1: mittlere Außenlufttemperatur (Nacht), Energieverlust in der Absorberspirale und Energieverlust des Pufferspeichers für die jeweiligen Versuchsdurchläufe

	Mittlere Außenlufttemperatur [°C]	Energieabgabe Absorberspirale [Wh/d]	Energieabgabe Pufferspeicher [Wh/d]
1	12,7	1.872	2.389
2	14,2	1.838	1.860
3	12,3	2.125	2.667
4	14,3	1.809	2.422
5	15,3	1.665	1.916

Ein solcher Pfahl würde somit keine alleinige Möglichkeit zur Vermeidung von Überhitzung darstellen, da die Leistung eines Pfahls nicht ausreichend ist um die Kühlung eines gesamten Gebäudes zu gewährleisten. Es ist jedoch möglich, diesen unterstützend einzusetzen, wenn dieser bereits in den Heizkreislauf des zu versorgenden Gebäudes integriert ist. Der Pfahl könnte zusammen mit baulichen Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz wie beispielsweise außenliegendem Sonnenschutz oder einer Dachbegrünung verwendet werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Zur Bestimmung des Potentials eines neuartigen Wärmespeicher- und Energieerzeugungssystems wurde ein Prototyp entwickelt. An diesem Prototyp wurden diverse experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um seine Eignung zum Heizen und Kühlen bewerten zu können. Bei der Auswertung standen der Energiegewinn, die Energieeinspeicherung, die Entladezeit sowie die Energieabgabe im Vordergrund.

Vergleichende Betrachtungen handelsüblicher Solarthermiekollektoren zur Heizungsunterstützung haben gezeigt, dass der Prototyp bereits gute Ergebnisse hinsichtlich des Energiegewinns erzielt. Allerdings müsste das System für eine Energieeinspeicherung im jahreszeitlichen Verlauf durch einen saisonalen Speicher ergänzt werden. Die Entladung des Speicherkerns stellt keinen limitierenden Faktor dar. Eine vollständige Entladung kann über die Nachtstunden erfolgen, sodass der Speicher am Tag wieder gefüllt werden kann. Die Ergebnisse aus den Kühlversuchen zeigen, dass eine Temperierung eines überhitzten Raumes durch den Prototyp zwar möglich ist, aber keine alleinige Möglichkeit zur Kühlung eines gesamten Gebäudes bietet. Allerdings könnte der Energiepfahl

unterstützend eingesetzt werden, wenn dieser bereits im Heizkreislauf integriert ist.

Aus den Untersuchungsergebnissen resultiert, dass das Konzept des Energiepfahls großes Potential besitzt. Um eine wirtschaftliche Alternative darzustellen, muss allerdings eine Optimierung der Konstruktion durchgeführt werden. Ziel ist es, den Aufbau so zu verbessern, dass der interne Speicher maximiert und die Wärmeverluste minimiert werden. Dies kann beispielsweise durch eine Dämmung der Nordseite des Pfahls erfolgen, über die keine solaren Einträge zu erwarten sind. Des Weiteren kann der Pfahl mit Maßnahmen wie dem zusätzlichen Einsatz von Peltier-Elementen, einer Photovoltaikanlage und einer Windturbine sinnvoll erweitert werden.

Danksagung

Die Autorinnen und Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) für die Förderung des Projekts „EffKon – Effizientes Wärmespeicher- und Energieerzeugungssystem zur thermischen Konditionierung von Gebäuden“ in welchem die hier vorgestellten Ergebnisse erzielt wurden.

Literatur

- BDH-Köln, 2023. Flächenheizung und Flächenkühlung Betriebsweise – Funktionsbeschreibung der Flächentemperierung – BDH: Verband für Effizienz und erneuerbare Energie. In: flächenheizung-bdh, <https://www.flaechenheizung-bdh.de/betriebsweisen/flaechenheizung-und-flaechenkuehlung-betriebsweise-funktionsbeschreibung>, Zugriff am 12.12.2023.
- Bettgenhäuser, K., Boermans, T., Offermann, M., Krechting, A., Becker, D., 2011. Klimaschutz durch Reduzierung des Energiebedarfs für Gebäudekühlung. In: Climate Change 10/2011.
- Bilgin, D., Carrigan, S., Friedrich, T., Kornadt, O., 2017. Raumkonditionierung durch Sandwichfertigteildecken mit integrierten Phasenwechselmaterialien. In: Bauphysik 39, H. 5, S. 299–305.
- Blum, T., Carrigan, S., Platzek, D., Kornadt, O., 2023. Evaluation of the energy efficiency of an active thermoelectric façade. In: Energy and Buildings 292, S. 113–128.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2022. Zahlen und Fakten: Energiedaten (Stand: 20.01.2022)
- EffKon, 2023. EffKon – Effizientes Wärmespeicher- und Energieerzeugungssystem zur thermischen Konditionierung von Gebäuden. In: EffKon, <https://effkon.eu/>, Zugriff am 18.12.2023.
- Friedrich, T., 2023. Energiesäule aus Beton als Beitrag zur Wärmewende. In: Innogration, <https://www.innogration.de/wp-content/uploads/delightful-downloads/2023/10/Energies%C3%A4ule-aus-Beton-als-Beitrag-zur-W%C3%A4rmewende-2.pdf>, Zugriff am 20.12.2023
- Friedrich, T., Kornadt, O., Kurz, W. Schnell, J., 2014. Entwicklung eines weitgespannten Sandwichdeckensystems mit integrierter Haustechnik in Verbundbauweise. In: Beton- und Stahlbetonbau, 109.. Jahrgang, Ausgabe Nr. 10/Okttober 2014, S. 678–688.
- Krohn, J., Carrigan, S., Friedrich, T., Kornadt, O., 2022. Implementierung neuartiger PCM-Speicher in TRNSYS zur Deckung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs. In: Proceedings BauSim2022, Weimar, Deutschland.
- Schabbach, T., Leibbrandt, P., 2021. Solarthermie – Wie Sonne zu Wärme wird (2.Auflage). Springer
- Schröter, B., Spiegel, J., Carrigan S., Kornadt O., Friedrich, T., Wißbach, M., Platzek, D., Büscher, W., 2023. Energiegewinn und Energieeinspeicherung des Prototyps eines neuartigen Wärmespeicher- und Energieerzeugungssystems. In: Bauphysik 45, H. 5, S. 245–251.

AUSWIRKUNGEN DES NUTZUNGSVERHALTENS AUF DEN ENERGIEVERBRAUCH IM MIETWOHNUNGSBAU

Bettina Lehmann¹, Matthias Schirmer²

¹ Bettina Lehmann, Deutschland, E-Mail: bettina.lehmann@eah-jena.de

² Matthias Schirmer, Deutschland, E-Mail: matthias.schirmer@eah-jena.de

Kurzfassung

Diese Studie untersucht anhand von realen Messdaten der Abrechnungsjahre 2019 bis 2023 den Energieverbrauch von 26 gas- und fernwärmebeheizten Mietwohngebäuden mit insgesamt 873 Wohneinheiten. Mittels Gegenüberstellung von Energiebedarfs- und Energieverbrauchsausweisen wird die Diskrepanz zwischen prognostizierten und gemessenen Endenergieverbräuchen dargestellt, welche das vermutete Potential des Nutzungsverhaltens widerspiegelt. Sowohl in unsanierten als auch sanierten Wohngebäuden wird eine teils erhebliche negative Leistungslücke festgestellt. Die Verbrauchskennwerte des Jahres 2022 vergrößern diesen Energy Performance Gap zusätzlich. Mit dieser Analyse soll die Bedeutung einer ganzheitlichen Betrachtung von Bedarfs- und Verbrauchskennwerten für zukünftige Planungen und Prognosen hervorgehoben werden.

Abstract

This study examines the energy consumption of 26 rental buildings, comprising a total of 873 units, heated by gas and district heating, using real consumption data from 2019 to 2023. By comparing energy performance certificates with consumption certificates, the disparity between predicted and measured final energy consumption is highlighted, reflecting the assumed potential impact of user behavior. A substantial negative energy performance gap is identified in both uninsulated and insulated residential buildings, further exacerbated by consumption values from 2022. This analysis underscores the importance of a comprehensive consideration of demand and consumption indicators for future planning and forecasts.

Einführung

Seit Jahren muss festgestellt werden, dass trotz der bisherigen Anstrengungen die Energieverbräuche im Gebäudebereich kaum zurückgehen. Fossile Energien dominieren weiterhin die Wärmeerzeugung und der Gebäudebereich ist mit rund 40 Prozent der Bereich, in dem die meisten CO₂-Emissionen in Deutschland verursacht werden (dena, 2023). Das aktuelle Gebäudeenergiegesetzes (GEG, 2024) und die Förder-

landschaft der Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) legen den Fokus auf hohe Gebäudeeffizienzstandards, Austausch der Heizungstechnik und die Kommunale Wärmeplanung. Zur Erreichung der Klimaziele wird darüber hinaus auch die Betrachtung des Nutzerverhaltens bedeutsam. Die aktuelle ESYS-Studie (acatech, 2023) kommt unter anderem zu dem Ergebnis, dass die Klimaziele kaum ohne Nachfragereduktion erreichbar sind. Als ein Handlungsfeld wird die Stärkung wissenschaftlicher Forschung zur Integration von Verbrauchsreduktionsstrategien benannt.

Mit dieser Untersuchung soll anhand von Felddaten eines exemplarischen Mietwohnungsbestandes herausgefunden werden, wie groß der Einfluss des Nutzungsverhaltens im Vergleich zur Gebäudehülle und der Anlagentechnik ist. Es stellt sich die Frage, welches Potential im Nutzungsverhalten steckt und wie sich der Endenergieverbrauch in den Jahren 2022 und 2023 durch die aktuellen Krisen im Vergleich zu den Vorjahren verändert hat. Darüber hinaus wird ein Ausblick gegeben, welche Auswirkungen und Möglichkeiten dies auf zukünftige Planungen haben könnte.

Felduntersuchung

Im Rahmen der Untersuchung wurde der Mietwohnungsbestand einer mittelgroßen Wohnungsgenossenschaft aus Thüringen analysiert. Dabei wurden 26 Mehrfamilienhäuser mit insgesamt 873 Wohnungen ausgewählt, in denen im Untersuchungszeitraum keine Veränderungen an der Gebäudehülle und der Anlagentechnik vorgenommen wurden.



Abbildung 1: Foto einer typischen Liegenenschaft

Die Wohngebäude besitzen eine Zentralheizung mit herkömmlichen Heizkörpern und eine zentrale Warmwasserbereitung. 10 Liegenschaften mit 320 Wohnungen werden durch Gas-Brennwertkessel beheizt. 16 Gebäude mit 553 Wohnungen sind an das örtliche Fernwärmenetz angeschlossen. Es handelt sich um typische ostdeutsche Mehrfamilienhäuser in industrieller Bauweise der Baujahre 1960-1989 mit einer Größe von 12 bis 96 Wohneinheiten. Dieser Wohnungsbestand lässt sich in unterschiedliche Typologien und Sanierungsstandards unterteilen, welche gesondert ausgewertet werden.

Gruppe 1 - 320 WE - Nr. 1-10:

Diese gasbeheizten Wohngebäude sind in den 60er Jahren in Blockbauweise errichtet worden. Im Rahmen der ersten Sanierungswelle wurden alle Gebäude Mitte der 90er Jahre mit einer geringen Fassadendämmung (WDVS, ca. 5cm) sowie 2-fach verglasten Kunststofffenstern saniert. Alle Mehrfamilienhäuser haben eine Dämmung der obersten Geschossdecke aber keine Kellerdeckendämmung. Der Standard entspricht der Wärmeschutzverordnung von 1995. In den Liegenschaften wurden im Zeitraum von 2013 bis 2018 neue Gas-Brennwertkessel eingebaut.

Gruppe 2 - 200 WE - Nr. 1-6:

Bei den Fernwärme-Liegenschaften 1-6 handelt es sich um Blockbauten der 60er Jahre, welche in den 90er Jahren mit 2-fach verglasten Kunststofffenstern versehen wurden. Ebenfalls wurde eine Dämmung der obersten Geschossdecke nachgerüstet sowie die schmalen Giebelseiten der Wohnblöcke schwach gedämmt (WDVS ca. 5cm). Die Hauptfassaden der nichttragenden Außenwände, welche aus 29 cm starkem „Blähton“ bestehen, sind bisher nicht nachträglich gedämmt worden.

Gruppe 3 - 192 WE - Nr. 7,8,16:

Bei den Wohngebäuden 7 und 8 handelt es sich um die Typologie „Streifenbauweise – Typ Magdeburg“, welche in den 70er Jahren errichtet worden sind. Beide Liegenschaften wurden 1995 mit einem WDVS (ca. 5cm) und 2-fach verglasten Kunststofffenstern auf das Niveau der WSVO 1995 saniert. Einen vergleichbaren Energiebedarfsstandard zwischen 90 und 95 kWh/m²a besitzt auch das Wohngebäude 16. Bei dieser Liegenschaft handelt es sich um einen typischen WBS-70, welcher in der Dreischicht-Außenwandplatte eine 5cm starke Kerndämmung vorzuweisen hat. Hier wurden ebenfalls die Fenster im Jahr 2014 bereits saniert.

Gruppe 4 - 136 WE - Nr. 9,10,11,13,14,15:

Bei den Liegenschaften 9,10,11,13,14,15 handelt es sich um kernsanierte Wohngebäude der Sanierungsjahre 2006 bis 2012, welche einen sehr guten Dämmstandard der gesamten Gebäudehülle aufweisen. Im Rahmen dieser umfassenden Sanierung

wurden ebenfalls alle Fernwärme-Hausanschlussstationen bedarfsgerecht neu errichtet.

Gruppe 5 - 25 WE - Nr. 12:

Gebäude 12 ist ein Neubau aus dem Jahr 2008. Dieses wurde als „Niedrigenergiehaus im KfW60-Standard“ gebaut und erlaubt interessante Vergleichsmöglichkeiten zu den übrigen Bestandsgebäuden.

Es wurden folgende Gebäudeinformationsdaten für jede Liegenschaft erhoben:

Parameter	Einheit
Wohnfläche	m ²
Anzahl Wohneinheiten	WE
Altersdurchschnitt der Mitglieder	Jahr
Leerstand	%
Baujahr des Gebäudes	Jahr
Baujahr der Heizungsanlage	Jahr
Jahr der Sanierung	Jahr
Art der Beheizung mit Leistung	kW
Ausrichtung des Gebäudes	NS / OW
Endenergiebedarf	kWh/m ² a

Weiterhin wurden folgende Verbrauchsdaten der Jahre 2019 bis 2023 auf Gebäudeebene erfasst:

Messdaten	Einheit
Gesamtenergieverbrauch, jährlich	kWh
Gesamtenergieverbrauch, monatlich	kWh
Energieverbrauch für WW-Bereitung	kWh
Kaltwasser	m ³
Warmwasser	m ³

Die vorliegenden Energiebedarfsausweise der untersuchten Wohngebäude liefern Aussagen zur energetischen Qualität der Gebäudehülle sowie der Anlagentechnik. Sie prognostizieren einen theoretischen Endenergiebedarf. Mittels der erfassten Verbrauchswerte der Jahre 2019, 2020 und 2021 wurden nach der Systematik des GEG Energieverbrauchsausweise mit der Software EVEBI der Firma ENVISYS, Weimar erstellt. Damit kann der Endenergieverbrauch als Durchschnitt aus drei Verbrauchsjahren, leerstands- und witterungsbereinigt, mit den Klimafaktoren des DWD, abgebildet werden. Vergleichend dazu wurde für alle Liegenschaften ein weiterer Energieverbrauchs-ausweis auf Basis der Abrechnungsjahre 2020, 2021 und 2022 erstellt. Die Ergebnisse beider Ausweise sollen den Verbrauch vor und unter dem Einfluss der Gaskrise in 2022 aufzeigen.

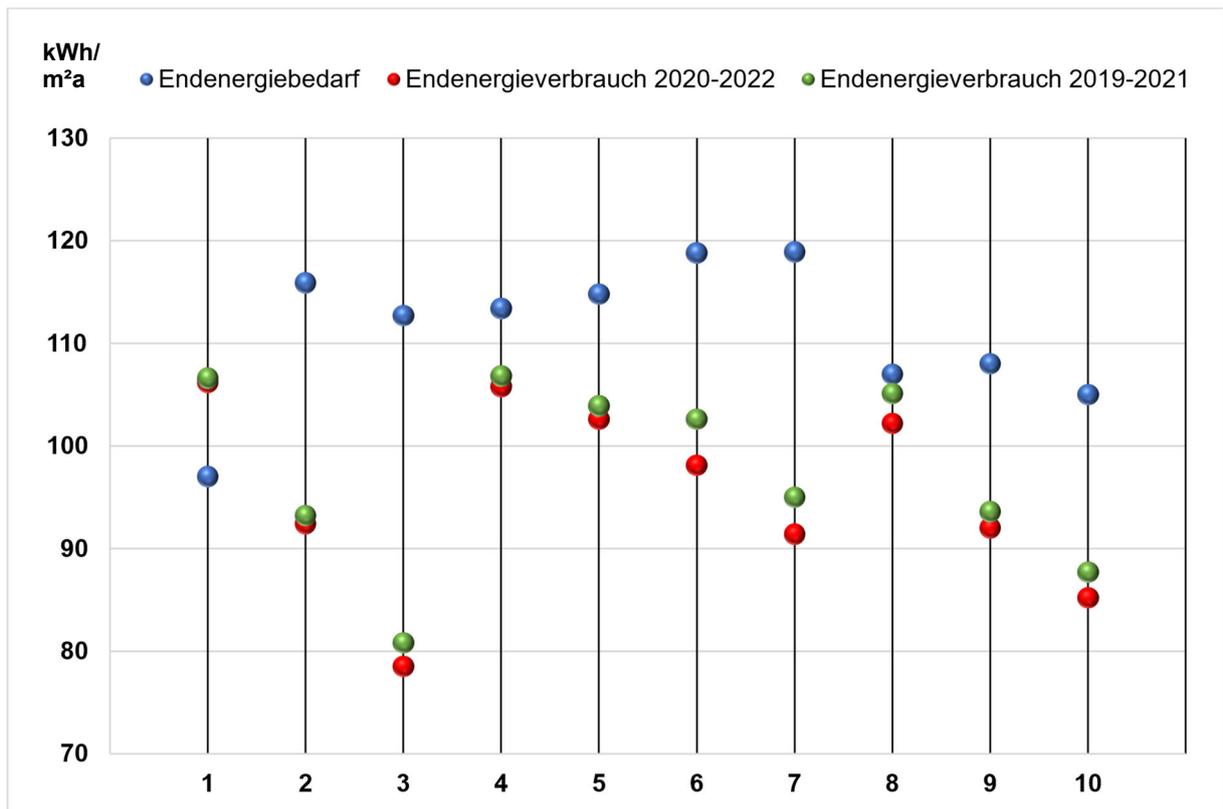


Abbildung 2: Vergleich der Endenergiebedarfs- und der Endenergieverbrauchskennwerte der 10 gasbeheizten Liegenschaften (Gruppe 1) in kWh/m²a

Ergebnisanalyse

In Abbildung 2 sind die Energiebedarfswerte (blau) den Energieverbrauchswerten 2019-2021 (grün) sowie den Energieverbrauchswerten 2020-2022 (rot) der zehn gasbeheizten Liegenschaften der **Gruppe 1** gegenübergestellt.

Bei Gebäude 1 ist kein geringerer Wert für den rechnerischen Endenergiebedarf gerechtfertigt, da sich die Qualität der Gebäudehülle sowie der Anlagentechnik dieses Wohngebäudes nicht von den übrigen Liegenschaften unterscheidet. Es wird deshalb ein Fehler bei der Erstellung der Energiebedarfsberechnung vermutet, weshalb dieses Gebäude aus der Betrachtung herausgenommen wird. Somit ergeben sich prognostizierte Endenergiebedarfe von 105 bis 119 kWh/m² Gebäudenutzfläche im Jahr. Dies entspricht der Energieeffizienzklasse D. Die grün dargestellten Energieverbrauchskennwerte der Jahre 2019-2021 liegen in der Regel deutlich unter dem rechnerischen Bedarf. Es kann eine Spanne der Diskrepanz zwischen 2% und 39% festgestellt werden. Der durchschnittliche Unterschied zwischen Bedarf und Verbrauch liegt bei 17,6%.

Die Verbrauchswerte des Abrechnungsjahres 2022, welche als ein Drittel in die Energieverbrauchsausweise 2020-2022 eingeflossen sind, korrigieren die Kennwerte (rot) nochmals nach unten.

Hierbei sind Spannen der Abweichung von 5%-43,6% festzustellen, durchschnittlich 20,5%. Diese Verbrauchskennwerte liegen somit größtenteils in der Energieeffizienzklasse C.

Im Vergleich der gasbeheizten Gebäude untereinander sind individuelle und unterschiedlich große Abweichungen zu verzeichnen. Interessant erscheint der Vergleich zwischen den Gebäude 3 und 4 in Abbildung 2, welche nebeneinander am gleichen Standort eine identische Bausubstanz aufweisen. Gebäude 4 besitzt mit 105,8 kWh/m²a im Vergleich zu Gebäude 3 mit 78,5 kWh/m²a einen um 35% höheren Verbrauchskennwert.

Die Abbildung 3 zeigt den Vergleich zwischen den berechneten Endenergiebedarfskennwerten (blau) zu den gemessenen Verbrauchskennwerten der Jahre 2019-2021 (grün) und der Jahre 2020-2022 (rot) für 16 Liegenschaften, welche mit Fernwärme beheizt werden.

Da die Wohngebäude der **Gruppe 2 (Nr. 1-6)** über nichtgedämmte Hauptfassaden verfügen, ergeben sich hier die höchsten Energiebedarfskennwerte im Spektrum zwischen 115 und 130 kWh/m²a. Die Differenz zu den gemessenen Verbrauchswerten ist beträchtlich und bewegt sich in einer Spanne von 25%-38,4%. Der durchschnittliche Unterschied zwischen Bedarf und Verbrauch der Jahre 2020-2022 in dieser Gebäudetypologie beträgt 32,4%.

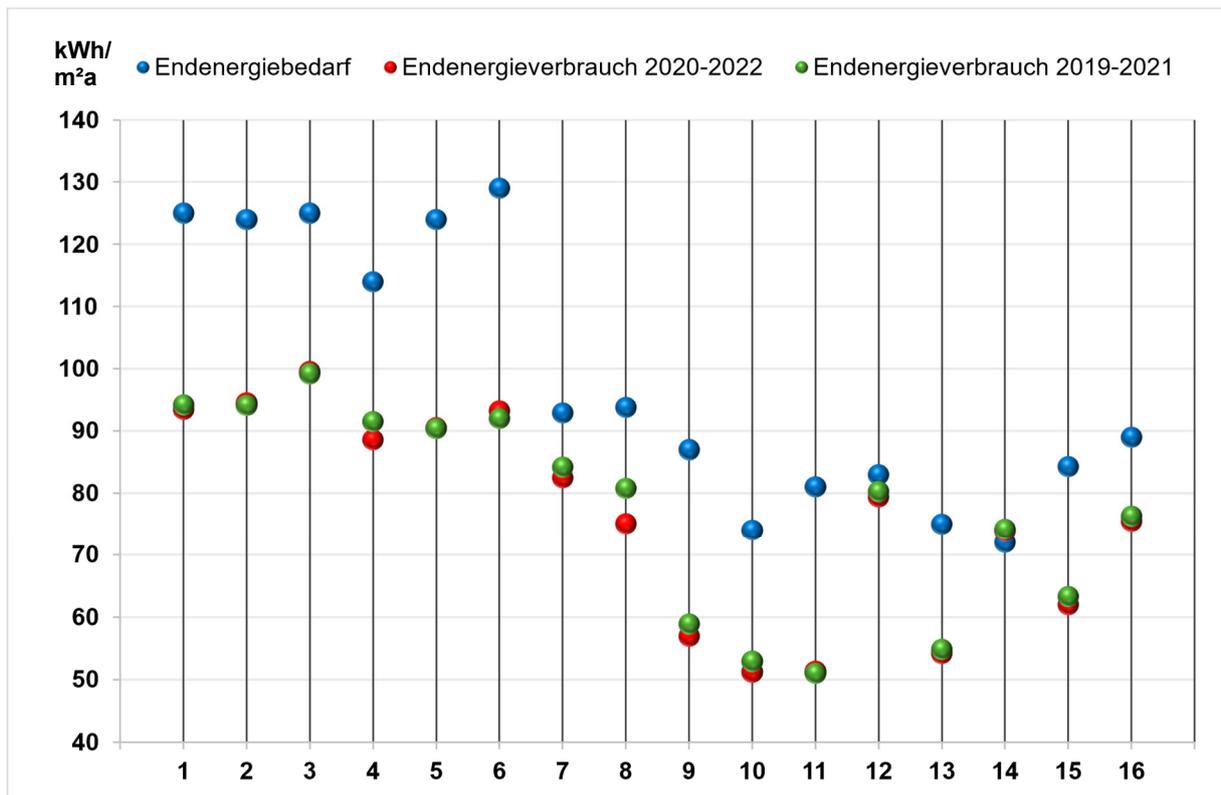


Abbildung 3: Vergleich der Endenergiebedarfs- und der Endenergieverbrauchskennwerte in 16 fernwärme-beheizten Liegenschaften (Gruppe 2-5) in kWh/m²a

Dies deckt sich mit dem bekannten „Prebound-Effekt“. In der Studie „Introducing the prebound effect: the gap between performance and actual energy consumption“ (Sunikka-Blank et al., 2012) stellten Sunikka-Blank und Galvin anhand der Untersuchung von 3.400 deutschen Wohnhäusern fest, dass die Bewohner durchschnittlich 30% weniger Heizenergie verbrauchen als der berechnete Kennwert. Dieses Phänomen wird als der „Prebound-Effekt“ identifiziert und nimmt mit dem berechneten Kennwert zu. Es wird bereits 2012 angenommen, dass die potenziellen Brennstoff- und CO₂-Einsparungen durch nicht-technische Maßnahmen wie das Verhalten der Bewohner weit größer sein könnte als allgemein in den Richtlinien angenommen wird.

Die Wohngebäude der **Gruppe 3 (Nr. 7,8 16)** besitzen ein vergleichbares Bedarfsniveau von 90-95 kWh/m²a. Die Endenergieverbräuche der Jahre 2020-2022 dieser drei betrachteten Liegenschaften liegen zwischen 12,6% bis 24,9% niedriger als der errechnete Bedarf, durchschnittlich ca. 18,5% niedriger.

Bei den kernsanierte Wohngebäuden der **Gruppe 4 (Nr. 9,10,11,13,14,15)** liegen die Bedarfswerte in einem Spektrum zwischen 72 und 87 kWh/m²a. Entgegen manchen Rebound-Effekten unterschreiten hier die gemessenen Verbrauchskennzahlen die bereits niedrigen Bedarfskennzahlen nochmals erheblich in einer Spanne von 36% bis 57,9%.

Die durchschnittliche Diskrepanz beträgt 46%. Die Abweichung, welche bei Gebäude 14 festzustellen ist, kann auf die Berechnungsmethode des Energieverbrauchsausweises zurückgeführt werden. Das Gebäude ist baugleich mit Gebäude 13, besitzt aber eine dezentrale Warmwasserversorgung mit wohnungsweisen Frischwasserstationen. Hierfür liegen keine Messwerte für die Warmwasserbereitung vor, sodass in der Energieberatersoftware ein Standardfaktor angenommen wurde. Die tatsächlich gemessenen Endenergieverbräuche für Heizung und Warmwasser als Gesamtenergieverbrauch sind für beide Gebäude annähernd gleich niedrig.

Der Neubau (**Gruppe 5 Nr. 12**), welcher als Niedrigenergiehaus im KfW60-Standard 2008 errichtet wurde, besitzt einen Endenergiebedarfskennwert von 83 kWh/m²a. Der Verbrauchskennwert der Jahre 2020-2022 liegt bei 79,4 kWh/m²a. Somit decken sich die tatsächlichen Energieverbräuche sehr gut mit dem prognostizierten Bedarf. Es ist kein Rebound-Effekt festzustellen. Der Rebound-Effekt neigt dazu bei Niedrigenergiehäusern aufzutreten, wo die Bewohner mehr verbrauchen, als der Kennwert angibt (Sunikka-Blank et al., 2012). Allerdings liegt der Verbrauchskennwert des Neubaus mit 79,4 kWh/m²a insgesamt höher als beim Nachbargebäude 16, des WBS70-Plattenbau ohne zusätzliche Fassadendämmung oder Fugensanierung, mit 75,5 kWh/m²a.

Veränderung der Verbräuche im Zeitverlauf

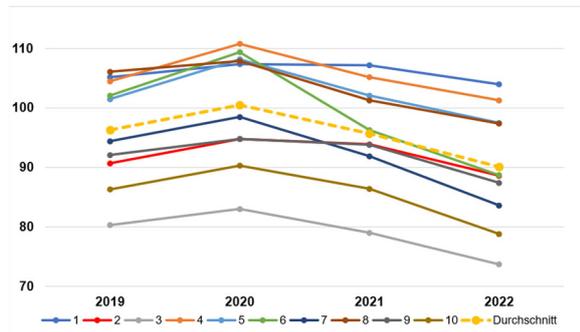


Abbildung 4: Veränderung der Endenergieverbrauchs-kennwerte in kWh/m²a im Zeitverlauf 2019-2022 für alle gasbeheizten Wohngebäude sowie im Durchschnitt (gelb-gestrichelt)

Abbildung 4 zeigt, wie sich die Endenergieverbrauchs-kennwerte in den Jahren 2019-2022 entwickelt haben. Im Durchschnitt aller 10 Liegenschaften der Gruppe 1 sind die witterungsbereinigten Verbrauchskennwerte der gasbeheizten Wohngebäude in 2022 im Vergleich zu 2021 um 7% gesunken, im Vergleich zu 2019 um 6%. Die Kennwerte pro m² Gebäudenutzfläche und Jahr beinhalten stets Heizung und Warmwasserbereitung und wurden nach der Systematik des GEG zur Erstellung von Energieausweisen ermittelt.

Es ist generell eine Reduktion des Endenergieverbrauchs im Jahr 2022 festzustellen.

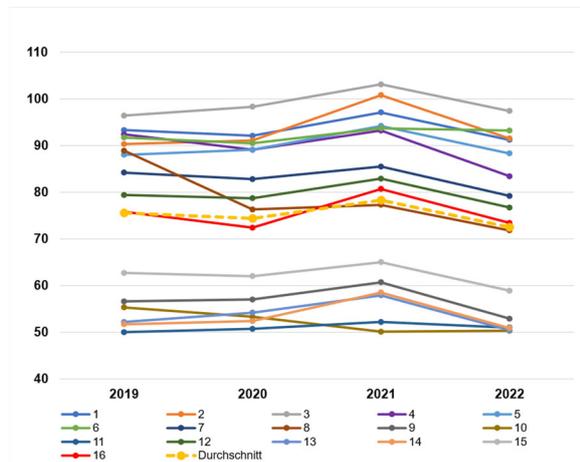


Abbildung 5: Veränderung der Endenergieverbrauchs-kennwerte in kWh/m²a im Zeitverlauf 2019-2022 für alle fernwärmebeheizten Wohngebäude sowie im Durchschnitt (gelb-gestrichelt)

Anhand des Zeitverlaufes in Abbildung 5 soll die Veränderung der Verbrauchskennwerte aus den Energieverbrauchs-ausweisen in den Jahren 2019 bis 2022 für alle Fernwärmeliegenschaften dargestellt werden. Da es sich hierbei um klimabereinigte Werte

auf den Referenzstandort Potsdam handelt, sind im Gegensatz zu den absoluten Abrechnungswerten die Unterschiede ausgeglichener und weniger deutlich. Die durchschnittlichen Verbrauchskennzahlen des Jahres 2022 sind im Vergleich zu 2021 um 8% gesunken. Vergleicht man die Verbrauchskennwerte der Jahre 2022 und 2019, so kann lediglich eine Verbrauchsreduktion von durchschnittlich 4% festgestellt werden.

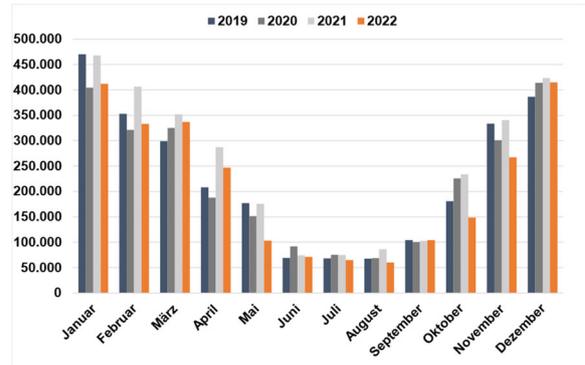


Abbildung 6: Entwicklung des absoluten Endenergieverbrauchs als Summe aller Fernwärmegebäude im Monatsverlauf der Jahre 2019-2022 in kWh

Abbildung 6 zeigt, wann und wie stark sich der Verbrauch in den fernwärmebeheizten Liegenschaften verändert hat. Im Diagramm sind die monatlichen Verbrauchsmengen in kWh der Jahre 2019 bis 2022 dargestellt. Es handelt sich hierbei um absolute Verbrauchswerte in kWh, welche nicht witterungsbereinigt wurden. Für das Jahr 2022 zeigt sich in der Heizperiode im 1. Quartal keine signifikante Veränderung zu den Vorjahren. Mögliche Auswirkungen des Ukrainekrieges und der ausgerufenen Gas-mangellage konnten erst in den Folgemonaten zum Tragen kommen. Klare Unterschiede sind im Monat Mai und den Monaten Oktober und November festzustellen. Anhand der Graphen lässt sich der milde Herbst des Jahres 2022 deutlich ablesen.

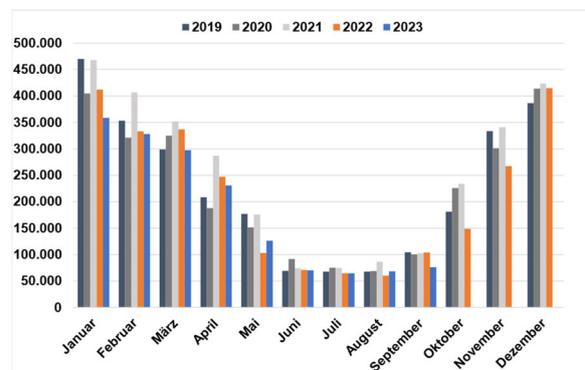


Abbildung 7: Entwicklung des absoluten Endenergieverbrauchs als Summe aller Fernwärmegebäude im Monatsverlauf der Jahre 2019-2023 in kWh

In Abbildung 7 wurden zusätzlich die bereits vorliegenden Verbrauchsdaten des Jahres 2023 für die Monate Januar bis September ergänzt. Es lässt sich feststellen, dass die Werte in der Heizperiode im 1. Quartal 2023 im Vergleich zu den Vorjahren nicht gestiegen sind. In der Summe der Monate Januar bis September liegen die Verbrauchsdaten des Jahres 2023 geringfügig unter den Werten des Jahres 2022 im Vergleichszeitraum. Die Verbrauchswerte Oktober bis Dezember 2023 liegen noch nicht vor.

Diskussion

In zahlreichen Studien wird oft ein erheblicher Unterschied zwischen der prognostizierten (berechneten) Energieeffizienz von Gebäuden und dem tatsächlich gemessenen Energieverbrauch festgestellt. De Wilde (2014) gibt einen Überblick über die Literatur zu dieser „Leistungslücke“.

Cozza et al. (2020) definieren die Wärmeleistungslücke in Gebäuden als Differenz zwischen dem theoretischen und dem tatsächlichen Energieverbrauch für die Heizung. In der Untersuchung von 1.172 Gebäuden in der Schweiz wurde eine negative Leistungslücke von 23% bei Gebäuden vor der Sanierung festgestellt. Weiterhin wurde eine gute Annäherung des tatsächlichen Verbrauchs an den theoretischen Verbrauch nach der Sanierung (eine positive Differenz von 2%) ermittelt. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass die für den theoretischen Bedarf maßgeblichen Eingangswerte, wie die thermischen Eigenschaften der Gebäudehülle (U-Werte) eine geringe Erklärungskraft für den tatsächlichen Verbrauch haben.

Die Ergebnisse der hier analysierten Felddaten zeigen eine deutliche Energieleistungslücke oder Energy Performance Gap zwischen berechnetem Energiebedarf und dem gemessenem Energieverbrauch. Diese fällt je nach Gebäude unterschiedlich aus und verdeutlicht damit eine große Spanne.

Die vorliegende Felduntersuchung bestätigt, dass die Verbrauchskennwerte in ungedämmten Gebäuden ca. 30% unter den Bedarfskennwerten liegen. Es wird aber auch gezeigt, dass in bereits sanierten Wohngebäuden eine zusätzliche und sehr deutliche Absenkung des Verbrauchs möglich ist. Da in dieser Untersuchung die Eigenschaften der Gebäudehülle sowie die Anlagentechnik als konstant angenommen werden können, wird vermutet, dass das Verbrauchsverhalten der Nutzer hierbei eine große Rolle spielt.

Die Metastudie (Mahdavi et.al, 2021) benennt durch Auswertung zahlreicher Veröffentlichungen folgende mögliche Einflussfaktoren zur Erklärung des Energy Performance Gap, welche mit eigenen Beispielen in Klammern ergänzt wurde:

1. Einstellungen an der Anlagentechnik (z.B. Heizkurve, Heizgrenztemperatur)

2. Belegung einer Wohnung (Anwesenheit und Anzahl der Bewohner)

3. Innentemperaturen (Abweichung der tatsächlichen Innentemperatur von den angenommenen Normtemperaturen)

4. Lüftungsverhalten (Unterschied zwischen tatsächlichen und berechneten Lüftungswärmeverlusten über die Fenster)

5. Berechnungsverfahren (z.B. Abweichung zwischen Standortklima und Referenzklima Potsdam)

Während die aufgeführten Punkte 2, 3 und 4 direkt durch das Nutzungsverhalten beeinflussbar sind, haben Mieterinnen und Mieter in einem Mehrfamilienhaus keinen Einfluss auf Punkt 1, die Einstellungen an der Anlagentechnik sowie auf Punkt 5, die Berechnungsverfahren.

Deshalb kommt die Veröffentlichung „Die Rolle der Bewohner in der Energielücke von Gebäuden: Mythos oder Realität?“ (Mahdavi et al., 2021) mittels einer systematischen Literaturrecherche zu dem Ergebnis, dass bisher die Rolle der Bewohner als signifikante oder ausschließliche Mitverursacher der Energieeffizienzlücke nicht ausreichend durch Evidenz untermauert ist.

Um den Einfluss des Nutzungsverhaltens weiter zu untersuchen, sollten die vorliegenden Verbrauchsdaten detaillierter und feinkörniger analysiert werden. Dies könnte z.B. durch eine wohnungsweise Betrachtung geschehen. Eine zusätzliche Ergänzung um weitere quantitative Daten zum Nutzungsverhalten erscheint sinnvoll, um auch die Hintergründe des Verhaltens selbst zu erforschen. Die vorliegenden Ergebnisse der Verbrauchsdatenanalyse sollen zukünftig mit Befragungen der Mieterinnen und Mietern gegenübergestellt werden. Zusätzliche Untersuchung mit Theorien aus der Verhaltensökonomie könnten helfen, das Nutzungsverhalten besser zu verstehen. Vergleichend hierzu wäre die Studie von Moeller et al., 2022 zu benennen.

Durch Information und Diskussion der vorliegenden Ergebnisse mit dem Anlagenbetreiber können geringinvestive und kurzfristige Maßnahmen zur Steigerung der Anlageneffizienz getroffen werden, um die bestehenden Heizungsanlagen an das analysierte Nutzungsverhalten anzupassen.

Generell kann festgestellt werden, dass die Endenergieverbräuche im Abrechnungsjahr 2022 im Vergleich zu den Vorjahren gesunken sind. Die bisher vorliegenden Werte aus 2023 setzen diese Entwicklung fort. Da das Verbrauchsverhalten der Mieterinnen und Mieter im untersuchten Wohnungsbestand insgesamt auch vor dem Jahr 2022 bereits als sparsam eingestuft werden kann, ist von einer Verstetigung auszugehen.

Zusammenfassung

Es konnte festgestellt werden, dass sich der untersuchte Wohnungsbestand bereits in einem guten energetischen Zustand befindet. Es wurden keine Ausreißer oder „Worst-Performing-Buildings“ identifiziert. Die Verbrauchskennwerte als Mittel aus drei Abrechnungsjahren, welche auf den Referenzstandort Potsdam bereinigt wurden, unterschreiten in allen Fällen die prognostizierten Bedarfskennwerte. Die Unterschiede in vielen Gebäuden sind sehr deutlich, worin das Potential des Nutzungsverhaltens vermutet wird. Am Untersuchungsstandort ist im Allgemeinen ein sparsames Verbrauchsverhalten festzustellen. Dies gilt bereits für den Betrachtungszeitraum 2019-2021 und steigert sich nochmals im Jahr 2022. Die ersten Abrechnungsdaten aus 2023 deuten an, dass sich diese Entwicklung fortsetzt.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung können einen Beitrag dazu leisten, darüber zu diskutieren, welche Daten für zukünftige Planungen und Prognosen am besten geeignet sind.

Als Basis für bevorstehende Bestandssanierungen als auch für Quartiers- und kommunale Planungskonzepte liefert eine Analyse von Bedarfs- und Verbrauchskennwerten wertvolle Aussagen, um realistische und praxistaugliche Schlussfolgerungen zu ziehen.

Eine ausschließliche Konzentration auf Bedarfskennwerte, also die Qualität der Gebäudehülle und der Anlagentechnik, könnte zu erhöhten Annahmen führen. Die Autoren sind der Meinung, dass die Auswertung von realen Verbrauchsdaten eine wichtige Rolle spielen sollte, um individuelle und gebäudespezifische Lösungen zu entwickeln.

Weiterhin bedarf es weiterer Forschung, um die Auswirkungen des Verhaltens von Mieterinnen und Mietern auf den Energieverbrauch im Mietwohnungsbau umfassend zu verstehen.

Literatur

acatech, Leopoldina, Akademieunion (Hrsg.) 2023: Wie wird Deutschland klimaneutral? Handlungsoptionen für Technologieumbau, Verbrauchsreduktion und Kohlenstoffmanagement, Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung, 2023.

Cozza, S.; Chambers, J.; Deb, Ch. Scartezzini, J.-L.; Schlüter, A.; Patel, M. 2020: Do energy performance certificates allow reliable predictions of actual energy consumption and savings? Learning from the Swiss national database, Energy and Buildings, Volume 224, 2020.

Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.) (dena, 2023): DENA-GEBÄUDEREPORT 2024. Zahlen, Daten, Fakten zum Klimaschutz im Gebäudebestand, 2023.

DWD Deutscher Wetterdienst 2023. Klimafaktoren (KF) für Energieverbrauchsabweise unter <https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimafaktoren/klimafaktoren.html>, abgerufen am 30.11.2023

de Wilde, P. 2014. The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation, Automation in Construction, Volume 41, 2014.

GEG 2024, Gesetz zur Änderung des Gebäudeenergiegesetzes, zur Änderung des Bürgerlichen Gesetzbuches, zur Änderung der Verordnung über Heizkostenabrechnung, zur Änderung der Betriebskostenverordnung und zur Änderung der Kehr- und Überprüfungsordnung vom 19.10.2023 aus Bundesgesetzblatt Teil 1 <https://www.recht.bund.de/bgbl/1/2023/280/VO.html> abgerufen am 01.12.2023

Mahdavi, A.; Berger, C.; Amin, H.; Ampatzi, E.; Andersen, R.K.; Azar, E.; Barthelmes, V.M.; Favero, M.; Hahn, J.; Khovalyg, D.; et al. 2021. The Role of Occupants in Buildings' Energy Performance Gap: Myth or Reality? Sustainability 2021.

Moeller, S.; Bauer, A. 2022. Energy (in)efficient comfort practices: How building retrofits influence energy behaviours in multi-apartment buildings, Energy Policy, Volume 168, 2022.

Sunikka-Blank, M.; Galvin, R. 2012. Introducing the rebound effect: the gap between performance and actual energy consumption, Building Research & Information, 2012.



SESSION A · 06.03.2024

Thema: Sanierung

Kooperationspartner

R
P **TU** Rheinland-Pfälzische
Technische Universität
Kaiserslautern
Landau

Bauhaus-
Universität
Weimar

WBA

WBA | Bauhaus Weiterbildungs-
akademie Weimar e.V.
Institut an der
Bauhaus-Universität Weimar



ENTWICKLUNG EINER METHODIK ZUR ABLEITUNG VON SANIERUNGSSTRATEGIEN MIT MATHEMATISCHER OPTIMIERUNG (DEUTSCHE VERSION)

Justus Medgenberg¹, Andreas Makowski²

¹ Technische Hochschule Würzburg-Schweinfurt, Deutschland, E-Mail: justus.medgenberg@thws.de

² Technische Hochschule Würzburg-Schweinfurt, Deutschland, E-Mail: andreas.makowski@thws.de

Kurzfassung

Die energetische Bestandssanierung hat für die Dekarbonisierung des Gebäudesektors eine entscheidende Funktion. Um Ressourcen bestmöglich einzusetzen, ist die ganzheitliche Betrachtung und Optimierung von Sanierungsentscheidungen sinnvoll. Mathematische Optimierungsverfahren werden im deutschsprachigen Raum für diese Entscheidungsfindung bisher kaum genutzt. Vorgestellt wird eine neue Methodik, die mittels eines Metamodells auf Basis punktueller Simulationsergebnisse die Optimierung variabler Zielfunktionen erlaubt. Die Stärke der Methode liegt in der Anwendbarkeit für eine große Zahl von Sanierungskombinationen bei minimiertem Rechenaufwand. Ergebnisse für reale Sanierungsprojekte werden anhand eines exemplarisch untersuchten Einfamilienhaus vorgestellt. Dabei werden unterschiedliche Zielfunktionen betrachtet und optimierte Sanierungsstrategien abgeleitet. Derzeit ist die Methode für die Bewertung des Heizwärmebedarfs von Wohngebäuden anwendbar. Es sind verschiedene Erweiterungen denkbar und geplant.

Abstract

The energetic refurbishment of existing buildings plays a key role in the decarbonization of the building sector. In order to make the best possible use of resources, refurbishment decisions should be considered and optimized holistically. So far mathematical optimization methods have hardly been used for decision-making in German-speaking countries. A new method is presented that allows the optimization of variable target functions by means of a mathematical substitute model based on point results from dynamic building simulations. The strength of the method lies in its ability to analyze a large number of refurbishment combinations with minimized computational effort. The applicability to real refurbishment projects is presented using an exemplary residential building of the single-family house type. Different target functions are considered and optimized refurbishment strategies are derived. The method can currently be used to assess the heating

requirements of residential buildings. Further research is planned on this topic.

Einleitung

Die Bundesrepublik Deutschland strebt gemäß Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) eine Netto-Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 an. Der Gebäudesektor trägt gemäß der Datengrundlage des Klimaschutzgesetzes derzeit zu ca. 15% der ausgewiesenen Treibhausgasemissionen bei. Besonders im Bestand erfordert die Dekarbonisierung

a) eine Erhöhung der Energieeffizienz zur Verringerung der Verbrauchswerte

und

b) die Umstellung auf Versorgungs-technologien mit niedrigen spezifischen CO₂-Emissionen.

Daher ist von einer verstärkten Sanierungstätigkeit im Gebäudebestand für die nächsten Jahrzehnte auszugehen. Sowohl aus Sicht des individuellen Gebäudeeigentümers als auch aus übergeordneter Perspektive stellt sich dabei die Frage, mit welchen Sanierungsmaßnahmen jeweils eine effiziente Allokation von wirtschaftlichen und materiellen Ressourcen erreicht werden kann. Dabei spielen unterschiedlichste Fragestellungen und Kriterien wie Wirtschaftlichkeit, CO₂-Gesamtbilanz von Sanierungsmaßnahmen, Höhe des zur Verfügung stehenden Investitionsbudgets, Qualität der vorhandenen Bausubstanz, verbleibende Restlebensdauer von Bauteilen usw. eine Rolle. In der Praxis werden Sanierungskonzepte meist durch hinzugezogene sachkundige Experten erstellt, die auf Grundlage ihrer Erfahrungen und Vorstellungen eine geeignete Sanierungsstrategie für das jeweilige Gebäude erarbeiten. Dieser Ansatz ist durch die vorhandenen personellen und inhaltlichen Beratungskapazitäten limitiert, sodass grundsätzlich ein Bedarf an alternativen entscheidungsunterstützenden Werkzeugen und Methoden besteht, um knappe Personal- und Know-how-Ressourcen zu entlasten. Hier können ITK oder KI basierte Verfahren grundsätzlich einen wertvollen Beitrag leisten.

Entwicklung einer praktisch anwendbaren Optimierungsmethodik

Grundsätzliche Anforderungen

Eine praktisch anwendbare, den Entscheidungsprozess unterstützende Optimierungsmethodik zur Analyse von Sanierungsvarianten sollte aus unserer Sicht mindestens folgenden Anforderungen erfüllen:

- c) Berücksichtigung von Energiebedarfen, Betriebs- und Investitionskosten sowie betriebs- und sanierungsbedingten CO₂-Emissionen
- d) Flexibilität hinsichtlich unterschiedlicher Sanierungsmöglichkeiten
- e) Flexibilität hinsichtlich der zu optimierenden Zielfunktionen, je nach objekt- und nutzerspezifischer Fragestellung
- f) Flexibilität hinsichtlich projektspezifischer Restriktionen zum Beispiel hinsichtlich des zur Verfügung stehenden Investitionsbudgets, CO₂-Emissionen etc.
- g) Idealerweise ein lebenszyklusorientierter Ansatz, bei dem auch der bauliche Zustand der vorhandenen Gebäudesubstanz sowie typische Lebensdauern und Austauschzyklen von Bauteilen oder Technikkomponenten berücksichtigt werden
- h) Vertretbarer Rechenaufwand bei gleichzeitig möglichst einfacher Anwendbarkeit
- i) Möglichst minimierter Einsatz von „manuell“ zu erstellenden Berechnungen und Simulationen

Stand der Wissenschaft

Im deutschsprachigen Raum finden sich bisher nur sehr wenige Ansätze zur Nutzung von multikriteriellen Optimierungsmethoden zur Analyse von Sanierungsstrategien bei Gebäuden. International ist der Einsatz von Optimierungsmethoden für die Gebäudeanalyse hingegen deutlich verbreiteter. Eine gute Übersicht verschiedener Ansätze und bisheriger Anwendungen findet sich zum Beispiel in Longo et al., 2019 und Nguyen et al., 2014. Nguyen et al., 2014 zeigt u.a., dass sich die Anzahl von Veröffentlichungen im Bereich der mathematischen Optimierung im Gebäudebereich besonders in den letzten beiden Dekaden rapide entwickelt hat.

Ein aus unserer Sicht besonders interessanter Ansatz stellt die Nutzung von Metamodellen dar. Dabei werden Metamodelle dazu verwendet, die meist für die Gebäudeanalyse herangezogenen Simulationsmodelle auf einer Zwischenebene zu abstrahieren. Die Metamodelle erlauben deutlich effizientere Auswertungen. Van Gelder et al., 2014 gibt eine Übersicht über verschiedene Metamodelle und vergleicht deren Leistungsfähigkeit für eine beispielhafte Anwendung. Die Verwendung eines

Metamodells zur vereinfachten Analyse von Energie- und Komfortparametern wird beispielhaft auch von Eisenhower et al., 2012 für ein Nichtwohngebäude vorgeschlagen und zeigt gute Ergebnisse für das gewählte Ersatzmodell. Im deutschsprachigen Raum wird durch Madersbacher, 2017 ein Optimierungsansatz auf Grundlage eines Ersatzmodells vorgeschlagen, wobei im Rahmen der Arbeit zwei Ersatzmodelle auf Grundlage neuronaler Netze und einer Support-Vector-Regression miteinander verglichen werden.

Anwendung von Optimierungsmethoden für die Analyse von Sanierungsstrategien für bestehende Gebäude finden sich beispielhaft in Stadler et al. 2014, Niemela et al. 2016, Penna et al. 2015 und Aelenei et al. (2015).

Grundsätzlich lässt sich trotz der großen Anzahl an internationalen Veröffentlichungen zur Anwendung von Optimierungsmethoden für gebäudetechnische Fragestellungen feststellen, dass wenige der vorgeschlagenen Ansätze bisher Eingang in die Planungspraxis gefunden haben. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund der nachgewiesenen methodischen Leistungsfähigkeit und der generell wachsenden Bedeutung von Sanierungsstrategien für bestehende Gebäude bemerkenswert. Daher kann vermutet werden, dass durch die verstärkte praktische Anwendung dieser vielversprechenden methodischen Ansätze zukünftig eine erheblich verbesserte Allokation knapper materieller und personeller Ressourcen erreicht werden könnte.

Grundlegender Ablauf der entwickelten Methodik

Abbildung 1 zeigt den grundsätzlichen Ablauf der von uns verwendeten Optimierungsmethodik.

Zunächst wird in Schritt 1 mithilfe einer dynamischen Gebäudesimulation für das untersuchte Gebäude der zu erwartende Nutzenergiebedarf berechnet.

In Schritt 2 werden die Art und Bandbreite denkbarer Sanierungsmaßnahmen definiert und so das Untersuchungsfeld für das Gebäude abgesteckt.

Schritt 3 beinhaltet die punktuelle Simulation von möglichen Sanierungszuständen innerhalb des zuvor definierten Untersuchungsfelds. Die Anzahl der simulierenden Sanierungszustände hängt von der Anzahl der möglichen Sanierungsmaßnahmen ab.

Im Schritt 4 wird das Metamodell auf die analysierten Sanierungspunkte angepasst bzw. trainiert. Das Metamodell bildet die verschiedenen energetischen Zustände des Gebäudes vereinfacht ab und steht dann für die weitere Analyse zur Verfügung.

Schritt 5 beinhaltet die Definition bzw. Auswahl der auszuwertenden Zielfunktion und der zu beachtenden Restriktionen.

In Schritt 6 erfolgt die eigentliche Optimierung der Zielfunktion innerhalb des Untersuchungsfelds.

Schritt 7 beinhaltet die Auswertung und Darstellung der Ergebnisse.



Abbildung 1: Ablaufdiagramm der entwickelten Sanierungsmethodik

Im Folgenden wird auf die einzelnen Schritte der vorgeschlagenen Methodik detaillierter anhand eines Beispiels eingegangen.

Schritt 1: Dynamische Gebäudesimulation

Die dynamischen Gebäudesimulationen für unsere Untersuchungen werden mit der Gebäudesimulationssoftware IDA-ICE 4.8 erstellt. Für diese Ausarbeitung wird ein typisches freistehendes einstockiges Einfamilienhaus untersucht (Abbildung 2). Die Simulation basiert auf einer Einzonen-Simulation des als beheizt angesetzten Erdgeschosses. Der Außenluftwechsel durch Fensterlüftung wird im sanierten und unsanierten Zustand auf einen dauerhaft wirkenden Luftwechsel von 0,25 1/h festgelegt. Es wird eine zusätzliche Infiltration von 3,0 1/h bei 50 Pa Unter- bzw. Überdruck berücksichtigt. Die Solltemperatur im Heizfall für die Zone „Wohnen“ beträgt 21°C. Eine Kühlfunktion besteht nicht. Für die außenliegende Verschattung der Fenster (sofern an den jeweiligen Fenstern vorhanden) wird eine Regelung anhand der solaren Einstrahlung angesetzt. Weiterhin werden interne Wärmegevinne durch Personenaufenthalt, Beleuchtung und elektrische Geräte berücksichtigt, die entsprechend der Wohnnutzung mit sinnvollen Größen- und Zeitanätzen gewählt werden.

Die thermische Hülle des Gebäudes wird durch die oberste Geschossdecke zum unbeheizten Dachraum, die Kellerdecke zum unbeheizten Keller, die Außenwände des Erdgeschosses und die Fenster im Erdgeschoss gebildet.

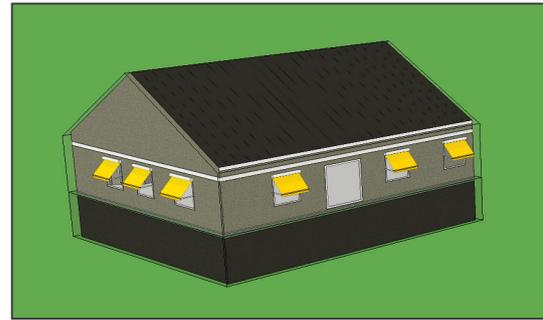


Abbildung 2: Visualisierung des Simulationsmodells für das beispielhaft untersuchte Einfamilienhaus

Für den unsanierten Zustand des Gebäudes werden die in Tabelle 1 aufgeführten Kennwerte für die Bauteile der thermischen Gebäudehülle angenommen.

Tabelle 1: Verwendete Eingangsparameter für die Bauteile der thermischen Gebäudehülle

BAUTEIL UND BESCHREIBUNG	WÄRME-DURCHGANGSKOEFFIZIENT [W/M ² *K]
AUBENWAND BEIDSEITIG VERPUTZTE MAUERWERKSWAND AUS HOCHLOCHZIEGEL	1,03
KELLERDECKE STAHLBETONDECKE MIT ESTRICH AUF DÜNNER TRITTSCHALLDÄMMUNG	1,17
OBERSTE GESCHOSS- DECKE ZUM DACHRAUM STAHLBETONDECKE MIT 2 CM DÄMMSCHICHT IM BESTAND	1,16
FENSTER KUNSTSTOFFFENSTER MIT ISOLIER- VERGLASUNG, G = 0,76	2,77
DACH ÜBER UNBEHEIZTEM DACHRAUM UNGEDÄMMTES ZIEGELDACH	4,50
KELLERAUßENWÄNDE INNENSEITIG VERPUTZTE STAHLBETONWAND	3,03

Auf Grundlage des beschriebenen Modells wird zonenweise mit Hilfe der Simulation der Nutzenergiebedarf Q_N zur Beheizung ermittelt. Für die weiteren Analysen wird der Nutzenergiebedarf dem Endenergiebedarf Q_E zunächst gleichgesetzt, d.h. alle Anlagenverluste der Heizungsanlage werden im

Rahmen der Gebäudesimulation vernachlässigt und erst später über pauschale Zuschläge berücksichtigt (vgl. die Erläuterungen zu Schritt 2).

Schritt 2: Definition der Sanierungsmaßnahmen

Entsprechend des energetischen Gebäudezustands im Bestand werden die folgenden Sanierungsmaßnahmen als grundsätzlich zielführend eingestuft und für die weitere Analyse berücksichtigt.

- Zusätzliche Außenwanddämmung mit Dicke d_{AW}
- Dämmung der Kellerdecke mit Dicke d_{KD}
- Dämmung der obersten Geschosdecke zum unbeheizten Dachraum mit Dicke d_{OG}
- Austausch der Fenster gegen dreifach wärmeschutzverglaste Fenster mit einem Fenster-Wärmedurchgangskoeffizienten von $U_W = 0,81 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bei einem Gesamtenergie-durchlassgrad $g=0,49$.
- Austausch der bestehenden Gasheizung gegen eine neue Gasbrennwerttherme, Fernwärme oder eine Luft- Wasser-Wärmepumpe.

Für die aufgeführten Dämmmaßnahmen werden einheitliche Dämmdicken von 4, 8, 12, 16, 20, 24 und 28 cm bei einer Wärmeleitfähigkeit von $0,035 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ vorgesehen.

Die Umrechnung von simulierter Nutzenergie Q_N in Endenergie Q_E erfolgt für die verschiedenen Heizungsanlagen wie in Tabelle 2 dargestellt. Bei der Wärmepumpe wird dabei eine einheitliche Jahresarbeitszahl von 3,0 zu Grunde gelegt.

Tabelle 2: Umrechnung von Nutzenergie zu Heizenergie für die verschiedenen Heizungsanlagen

HEIZUNGSANLAGE	UMRECHNUNG VON NUTZENERGIE ZU ENDENERGIE
GASTHERME ALT	$Q_E = 1,1 * 1,15 * Q_N$
GASTHERME NEU	$Q_E = 0,95 * 1,15 * Q_N$
FERNWÄRME	$Q_E = 1,15 * Q_N$
WÄRMEPUMPE	$Q_E = \frac{1}{3} * 1,15 * Q_N$

Schritt 3: Punktuelle Simulation von Sanierungszuständen

Für die Anpassung des Metamodells in Schritt 4 muss eine Auswahl der dafür erforderlichen Stützstellen erfolgen. Für das spätere Metamodell und die oben aufgeführten Sanierungsmaßnahmen sind mindestens 8 Stützstellen erforderlich, die aus unabhängigen Simulationen innerhalb des Untersuchungsfeldes erzeugt werden.

Diese 8 Stützstellen werden wie in Tabelle 3 aufgeführt verteilt, um das Metamodell später analytisch und numerisch stabil bestimmen zu können. Prinzipiell können weitere Stützstellen bei der Bestimmung des Metamodells berücksichtigt werden. Damit kann das Modell tendenziell besser an die Simulationsergebnisse angepasst werden, was die Fehler verringern kann.

Tabelle 3: Simulationspunkte für die Bestimmung des Metamodells

d_{AW}	d_{KD}	d_{OG}	FENSTER NEU
28 CM	28 CM	28 CM	JA
4 CM	28 CM	28 CM	JA
0 CM	28 CM	28 CM	JA
28 CM	4 CM	28 CM	JA
28 CM	0 CM	28 CM	JA
28 CM	28 CM	4 CM	JA
28 CM	28 CM	0 CM	JA
28 CM	28 CM	28 CM	NEIN

Schritt 4: Metamodell

Die grundlegende Idee des verwendeten Metamodells für die Nutzenergie basiert auf der Tatsache, dass sich die einzelnen Maßnahmen nur sehr gering bis gar nicht gegenseitig beeinflussen. Daher kann der jährliche Nutzenergiebedarf Q_N in guter Näherung durch ein Metamodell aus mehreren Ansatzfunktionen für die jeweilige Dicken d_{OG}, d_{AW}, d_{KD} der Dämmschichten und einem Term für die Fenstererneuerung $f \in \{0,1\}$ repräsentiert werden. Der Endenergiebedarf Q_N skaliert indirekt proportional zur Dicke d der jeweiligen im Zuge der Sanierung aufgebrauchten Dämmschichten. Die Erneuerung der Fenster als singuläre Maßnahme bewirkt ebenfalls näherungsweise lediglich eine absolute Reduktion des Endenergiebedarfs. Der Austausch der Heizungsanlage hat hingegen keinen direkten Einfluss auf die Nutzenergie und wird daher nicht im Metamodell sondern erst bei der Definition der Zielfunktion berücksichtigt.

Mit den oben getroffenen Annahmen kann der energetische Zustand des Gebäudes allein durch den jährlichen Nutzenergiebedarf Q_N repräsentiert werden. Alle möglichen Zustände von Q_N innerhalb des Untersuchungsfeldes können dann mit ausreichender Genauigkeit durch das Metamodell

$$Q_N(d_{OG}, d_{AW}, d_{KD}, f) = C + C_F f + \frac{C_{OG}}{d_{OG} + D_{OG}} + \frac{C_{AW}}{d_{AW} + D_{AW}} + \frac{C_{KD}}{d_{KD} + D_{KD}} \quad (1)$$

dargestellt werden.

Diese Funktion hat für das untersuchte Beispiel mit 3 Dämmmaßnahmen und der Möglichkeit zum Fensteraustausch die 8 unbekanntten Modellparameter C (Konstante), C_F (Reduktion durch neue Fenster), C_{OG}, C_{AW}, C_{KD} (Koeffizienten), D_{OG}, D_{AW}, D_{KD}

(äquivalente Dämmwirkung der bestehenden Wände). Die Bestimmung dieser Modellparameter erfolgt aus den in Schritt 3 simulierten Stützstellen. Die Anpassung der Ansatzfunktionen auf gegebene Stützstellen wird – je nach Fachdisziplin – u.a. als Regressionsproblem, Curve-Fitting, Parameteridentifikation oder Kleinste-Quadrate-Problem genannt. Zu beachten ist hier jedoch, dass die Parameter D_{OG} , D_{AW} , D_{KD} nichtlinear in das Modell eingehen, sodass zur Berechnung der Parameter meist numerische Methoden verwendet werden (z.B. das Levenberg-Marquardt-Verfahren für nichtlineare Regressionsprobleme). Bei geschickter Verteilung der 8 Datenpunkte, die in Schritt 3 durch 8 unabhängige Simulationen der Sanierungspunkte bestimmt wurden, ist das Regressionsproblem analytisch lösbar und liefert ein Ersatzmodell, welches dann für die weitere Optimierung genutzt werden kann.

Das Metamodell (1) wird anhand der Simulationsergebnisse für das gewählte Beispiel-EFH validiert. Die Datensätze zur Validierung bestehen aus allen Kombinationen der diskreten Werte für die Eingabegrößen Dämmdicken und Fenstererneuerung, in diesem Fall aus 1024 Simulationsdatenpunkten. Das Metamodell wird dabei nur anhand der 8 dargestellten Trainingspunkte erstellt und anschließend ausschließlich zur Validierung mit den zur Verfügung stehenden Ergebnisdaten aller 1024 Simulationen verglichen (siehe Abbildung 3). Dabei ergibt sich eine durchschnittliche relative Abweichung zwischen Simulation und Ersatzmodell von 0.2%. Die größeren Abweichungen treten dabei für Punkte mit vergleichsweise geringen Sanierungsmaßnahmen auf. Die maximale relative Abweichung liegt hier bei 4.1%. Für die Optimierung ist jedoch in der Regel der Bereich mit moderaten bis stärker dimensionierten Sanierungsmaßnahmen interessant, sodass die geringere Genauigkeit des Metamodells bei schwach dimensionierten Sanierungsmaßnahmen akzeptabel ist.

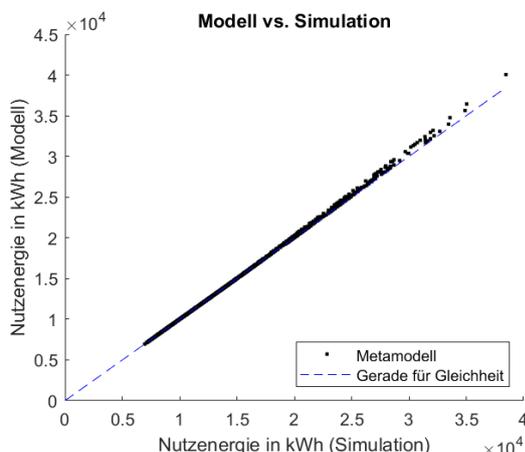


Abbildung 3: Vergleich der simulierten Nutzenergiebedarfe mit den Ergebnissen des Metamodells

Schritt 5: Zielfunktion und Restriktionen

Mit Hilfe des Metamodells können sehr schnell verschiedene Zielfunktionen ausgewertet und optimiert werden. Durch die Wahl der Zielfunktion können verschiedene Perspektiven definiert werden, unter denen die Sanierung des betrachteten Gebäudes bewertet werden soll. Beispielsweise ist es aus der Sicht eines Immobilienbesitzers interessant, den Sanierungsumfang seines Objekts hinsichtlich der Gesamtkosten aus den erforderlichen Investitionen und den anschließenden Betriebskosten zu optimieren. Aus übergeordneter Perspektive könnte es hingegen von Interesse sein, zu evaluieren, mit welchen Maßnahmen sich die CO₂-Emissionen bei der Sanierung von Gebäuden minimieren lassen. Bei allen Zielfunktionen können außerdem unterschiedliche Restriktionen, wie zum Beispiel hinsichtlich des zur Verfügung stehenden Investitionsbudgets zum Tragen kommen. Weitere Zielfunktionen, die z.B. auch graue CO₂-Emissionen aus den Sanierungsmaßnahmen selbst berücksichtigen, sind denkbar und wurden von uns bereits im Rahmen weiterführender Untersuchungen ausgewertet.

Im Rahmen dieses Beitrags werden exemplarisch die drei folgenden Zielfunktionen betrachtet:

Minimierung der durchschnittlichen jährlichen Gesamtkosten KF aus Investition und Betrieb

$$\min KF [\text{€}] = a * K_I / t_b + b * K_B \quad (2)$$

Minimierung der jährlichen Betriebskosten unter einem gegebenen Investitionsbudget

$$\begin{aligned} \min KF [\text{€}] &= K_B \\ \text{unter } K_I &\leq I_{max} \end{aligned} \quad (3)$$

Minimierung der jährlichen CO₂-Emissionen aus dem Betrieb unter einem gegebenen Investitionsbudget

$$\begin{aligned} \min M [t\text{o}/a] &= M_{B,CO_2} \\ \text{unter } K_I &\leq I_{max} \end{aligned} \quad (4)$$

Dabei werden folgende Parameter definiert:

$K_I = K_{I,AW} + K_{I,OG} + K_{I,KD} + K_{I,F} + K_{I,HZG}$: Gesamtinvestitionskosten für die Sanierung der Außenwände, der obersten Geschossdecke, der Kellerdecke, der Fenster und der Heizungsanlage

K_B : jährliche Betriebskosten durch Energie

t_b : Betrachtungszeitraum in Jahren

I_{max} : obere Schranke des Investitionsbudgets

M_{B,CO_2} : betriebsbedingte CO₂-Emissionen

$a, b > 0$: Wichtungssparameter mit denen der Einfluss der Investitions- oder Betriebskosten auf die Gesamtkosten variiert werden kann.

Die Berechnung der Investitionskosten erfolgt mit den in Tabelle 4 aufgeführten Ansätzen.

Tabelle 4: Kostenansätze für die Sanierungsinvestitionen

BAUTEIL	KOSTENANSATZ [€]
AUßENWÄNDE $K_{I,AW}$	$3000 + a_W$ $* (120 + d_{AW} * 2)$
KELLERDECKE $K_{I,KD}$	$2000 + a_{KD}$ $* (60 + d_{KD} * 2)$
OBERSTE GESCHOSSDECKE $K_{I,OG}$	$2000 + a_{OG}$ $* (40 + d_{OG} * 2)$
FENSTER $K_{I,F}$	$3000 + a_F * 500$
GASTHERME NEU $K_{I,HZG}$	10000
FERNWÄRME $K_{I,HZG}$	15000
WÄRMEPUMPE $K_{I,HZG}$	30000

Dabei sind die Dicken der jeweils aufgetragenen Dämmstoffe in cm und die Flächen der jeweils betrachteten Bauteile in m² definiert.

Für die Betriebskosten werden die in Tabelle 5 angegebenen Preise der Energieträger zugrunde gelegt. Dabei ist Q_{max} der maximale unterjährige Heizleistungsbedarf. Dieser wird ähnlich wie Q_N über ein Metamodell mit gleicher Struktur bestimmt. Dazu werden die gleichen Simulationen verwendet, sodass kein zusätzlicher Rechenaufwand entsteht.

Tabelle 5: Kostenansätze für die Betriebskosten r

ENERGIETRÄGER	KOSTENANSATZ [€]
GASTHERME ALT/NEU	$K_B = 0,12 * Q_E$
GASTHERME NEU	$K_B = 0,12 * Q_E$
FERNWÄRME	$K_B = 0,08 * Q_E +$ $60 * 1,15 * Q_{max}$
WÄRMEPUMPE	$K_B = 0,30 * Q_E$

Schritt 6: Optimierung der Zielfunktion

Die zum Einsatz kommenden Optimierungsmethoden hängen davon ab, ob die Optimierungsvariablen d_{OG} , d_{AW} , d_{KD} , f als diskret oder kontinuierlich angesehen werden. Da in der Praxis handelsübliche Dämmdicken d_{OG} , d_{AW} , d_{KD} üblicherweise diskret vorliegen, übernehmen wir eine marktgängige Abstufung von 2 cm auch für die Optimierung. Damit sind alle vier Optimierungsvariablen diskret und es ergibt sich ein diskretes Optimierungsproblem, welches sich auf verschiedene Arten lösen lässt. Die Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten der Optimierungsvariablen erlaubt zwar keine effiziente

Simulation aller dieser Punkte, jedoch ist die Auswertung des Ersatzmodells hinsichtlich des benötigten Rechenaufwands rechentechnisch sehr günstig, sodass die Zielfunktion für das Ersatzmodell und alle denkbaren Kombinationsmöglichkeiten sehr schnell ausgewertet werden kann. Diese *Brute-Force*-Methode löst das zugrundeliegende diskrete Optimierungsproblem exakt (und nicht nur näherungsweise wie z.B. genetische Algorithmen). Außerdem lassen sich Nebenbedingungen, wie z.B. ein begrenztes Investitionsbudget, sehr einfach berücksichtigen. Dazu werden unter allen möglichen Kombinationen für die Minimierung nur diejenigen berücksichtigt, die ein gegebenes Investitionsbudget nicht überschreiten. Führt man dies für eine Spanne von Investitionsbudgets durch, so erhält man auch die Pareto-Front.

Schritt 7: Auswertung der Ergebnisse

Die folgende Abbildung 4 zeigt die Auswertung der Optimierung von Zielfunktion (2), d.h. die Minimierung der durchschnittlichen jährlich Gesamtkosten aus umgelegten Investitions- und Betriebskosten bei Zugrundelegung unterschiedlich langer Betrachtungszeiträume. Die Höhe der Investitionen werden für diese Berechnungen nicht limitiert.

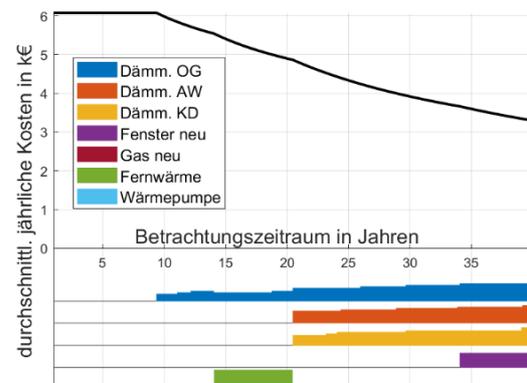


Abbildung 4: Optimierte Gesamtkosten aus Betrieb und Investitionen (als jährlicher Anteil) bei verschiedenen Betrachtungszeiträumen ohne Restriktion der Investitionen

Die Ergebnisdarstellung zeigt unterhalb der x-Achse die erforderlichen Sanierungsmaßnahmen für die jeweils die kostenoptimalen Lösungen. Dabei skalieren die Balken mit der jeweiligen Dämmdicke.

Bemerkenswert ist, dass bei längeren Betrachtungszeiträumen der Energieträgerwechsel nicht mehr relevant ist und die passiven Maßnahmen effizienter sind. Dies resultiert aus dem Fakt, dass die passiven Maßnahmen die Nutzenergie und damit die Energiekosten absolut reduzieren, während der Energieträgerwechsel als Faktor zwischen Nutz- und Endenergie die resultierenden Energiekosten nur relativ reduziert. Ist die Nutzenergie durch passive

Maßnahmen bereits stark reduziert, so sind auch die Einsparnisse durch den Energieträgerwechsel kleiner, was letzteres für die Bewertung weniger attraktiv macht.

Abbildung 5 zeigt die optimalen Ergebnisse für die Zielfunktion (3), für die die jährlichen Betriebskosten minimiert werden und das Investitionsbudget auf verschiedene Werte beschränkt wird. Die damit dargestellte Pareto-Front erlaubt eine Einschätzung darüber, wie weit und mit welchen Maßnahmen sich bei beschränkten Investitionsbudgets die Heizkosten durch eine energetische Sanierung reduzieren lassen.

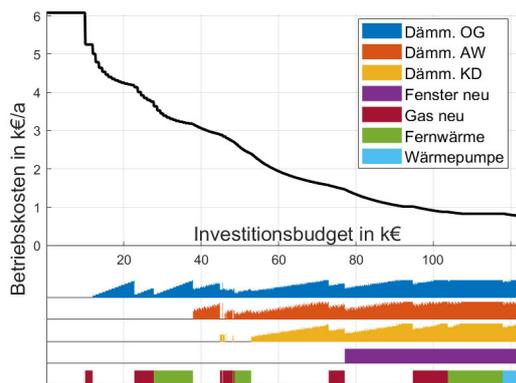


Abbildung 5: Optimierte Betriebskosten in Abhängigkeit von der Höhe des zur Verfügung stehenden Investitionsbudgets

Ähnlich wie zuvor, spielen die passiven Maßnahmen eine große Rolle bei der Reduktion der Betriebskosten. So ist die Ersparnis durch den Energieträgerwechsel gegenüber den passiven Maßnahmen vergleichsweise gering und die Amortisation wäre entsprechend lang. Die Reihenfolge der passiven Maßnahmen folgt wie auch in der Auswertung zuvor in der Reihenfolge *Oberste Geschossdecke, Außenwände, Kellerdecke*. Dabei ist die Dämmung der Kellerdecke gegenüber den Außenwänden mit den Kostenfunktionen in Tabelle 4 zwar erheblich günstiger, allerdings ist deren energetische Wirkung gegenüber dem unbeheizten Kellergeschoss auch deutlich geringer als die Dämmung der Außenwände gegen Außenluft. Die Sanierung der Fenster trägt erst bei hohen möglichen Investitionsbudgets (ab etwa 80 T€) zur Reduktion der Betriebskosten bei, wenn auch nur noch in vergleichsweise geringerem Umfang. Je nach gegebenem Investitionsbudget sind verschiedene Kombinationen aus Maßnahmen möglich. Erhöht man das Budget, so können z.B. plötzlich neue Kombinationen möglich sein und die optimale Maßnahmenauswahl kann sich daher sprunghaft ändern (vgl. z.B. die sprunghafte Änderung der favorisierten Maßnahmenkombination bei ca. 50 T€ Investitionsbudget).

In Abbildung 6 wird die Auswertung der Optimierung von Zielfunktion (4) dargestellt, d.h. die Minimierung

der jährlichen betriebsbedingten CO₂-Emissionen bei Restriktion des zur Verfügung stehenden Investitionsbudgets.

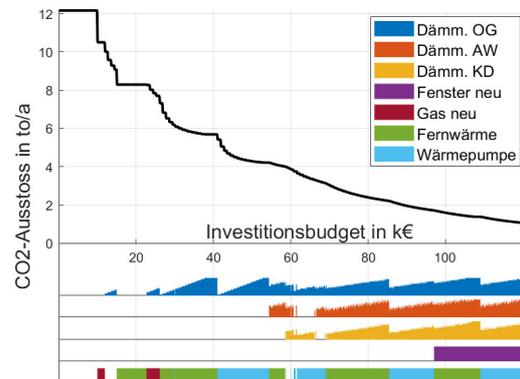


Abbildung 6: Minimierter betriebsbedingter CO₂-Ausstoß in Abhängigkeit von der Höhe des zur Verfügung stehenden Investitionsbudgets

Im Vergleich zu den vorangegangenen Zielfunktionen hat hier nun der Energieträgerwechsel einen deutlich größeren Einfluss auf die Zielfunktion. Die passiven Maßnahmen liefern im Vergleich zu den Optimierungen der Betriebskosten tendenziell erst etwas später einen Beitrag zur Reduktion der CO₂-Emissionen, d.h. der Wechsel des Energieträgers wird für die Zielerreichung präferiert eingesetzt. Der mehrmalige Wechsel zwischen Fernwärme und Wärmepumpe liegt an der sehr ähnlichen Effizienz bzgl. des CO₂-Reduktionspotentials bei den getroffenen Annahmen für diese Energieträger. Daher liefern beide Energieträger ähnliche Beiträge bei der Reduktion der CO₂-Emissionen und die optimale Wahl kann variieren.

Zusammenfassung, Fazit, Ausblick

Bisher werden vor allem im deutschsprachigen Raum mathematische Optimierungsmethoden zur Unterstützung von Sanierungsentscheidungen kaum eingesetzt. International sind zahlreiche Anwendungen publiziert worden, die in der Praxis aber bisher kaum Anwendung finden. Im vorliegenden Beitrag haben wir ausgehend von dem Postulat einer möglichst einfachen und schnellen Anwendbarkeit eine Methode entwickelt, bei der die Optimierung von Sanierungsmaßnahmen anhand eines Metamodells erfolgt. Das Metamodell erlaubt es, mit sehr geringem Aufwand (unter einer Sekunde) unterschiedliche Zielfunktionen auszuwerten und dabei verschiedene Restriktionen zu berücksichtigen. Beispielhaft wurde im Rahmen dieses Beitrags eine Minimierung der Gesamtkosten aus Investitions- und Betriebskosten über einen Betrachtungszeitraum sowie eine Minimierung betriebsbedingter CO₂-Emissionen jeweils unter unterschiedlichen Restriktionen betrachtet. Als Testbeispiel wurde ein Einfamilienhaus gewählt. Die Methode lässt sich

problemlos direkt auch auf andere Wohngebäude übertragen. Durch die Wahl der Zielfunktion und Restriktionen können unterschiedliche Perspektiven und Präferenzen von Entscheidern bei Sanierungsprojekten simuliert werden. Anhand der Ergebnisse lassen sich dann jeweils hinsichtlich der Zielfunktion optimierte Sanierungsstrategien ableiten, wobei passive und aktive energetische Verbesserungen berücksichtigt werden können. Der methodische Ansatz erscheint in Hinblick auf die Entscheidungsunterstützung praxisnaher Sanierungsfragestellungen sehr vielversprechend. Perspektivisch soll die Methodik um zusätzliche Verbesserungsmaßnahmen wie Fotovoltaik und Warmwassererzeugung ergänzt werden. Eine Übertragung auf Nichtwohngebäude sowie die Berücksichtigung von (Rest-)Lebensdauern der verwendeten Bauteile sind ebenfalls angedacht.

Literatur

- Bundesklimaschutzgesetz (KSG), Ausfertigungsdatum 12. Dezember 2019, zuletzt geändert am 18. August 2021.
- Longo, S.; Montana, F.; Sanseverino, E.R. 2019. A review on optimization and cost-optimal methodologies in low-energy buildings design and environmental considerations. *Sustainable Cities and Society* 45 (2019) 87–104, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.11.027>
- Nguyen, A.-T.; Reiter, S; Rigo, P. 2014. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Applied Energy*, 113, 1043–1058. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.061>
- Van Gelder, L.; Das, P.; Janssen, H.; Roels S. 2014. Comparative study of metamodelling techniques in building energy simulation: Guidelines for practitioners. *Simulation Modelling Practice and Theory* 49 (2014), S. 245-257. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2014.10.004>
- Eisenhower, B., O'Neill, Z., Narayanan, S., Fonoberov, V. A., & Mezić, I. 2012. A methodology for meta-model based optimization in building energy models. *Energy and Buildings*, 47, 292–301. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.001>
- Madersbacher, J. 2017. Robuste Optimierung in der Gebäudesimulation - Entwicklung einer Methode zur robusten Optimierung für die energetische Sanierung von Gebäuden unter unsicheren Randbedingungen, Dissertation an der Technischen Universität München.
- Stadler, M., Groissböck, M. Cardosos, G. Marnay, C. 2014. Optimizing Distributed Energy Resources and building retrofits with the strategic DER-CAModel. *Applied Energy* Volume 132, 1 November 2014, Pages 557-567. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.041>
- Niemela, T., Kosonen, R., Jokisalo, J. 2016. Cost-optimal energy performance renovation measures of educational buildings in cold climate. *Applied Energy* Volume 183, 1 December 2016, Pages 1005-1020. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.044>
- Penna, A., Prada, A., Cappelletti, F., Gasparella, A. 2015. Multi-objectives optimization of Energy Efficiency Measures in existing buildings, *Energy and Buildings*, Volume 95, Pages 57-69, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.003>.
- Aelenei, L., Paduos, S., Petran, H., Tarrés, J., Ferreira, A., Corrado, V., Camelo, S., Polychroni, E., Sfakianaki, K., Gonçalves, H., Salom, J., Riva, G., Murano, G., 2015. Implementing Cost-optimal Methodology in Existing Public Buildings, *Energy Procedia*, Volume 78, Pages 2022-2027, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.197>.



SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN LISTED DISTRICTS: CO₂-NEUTRAL WORLD HERITAGE SPEICHERSTADT HAMBURG

Lena Teichmann¹, Laura Fernández Resta², Helen Hein¹, Güren Tan Dinga², Zaher Ramadan¹, Annette Bögle², Daniel Mondino², Harald Garrecht¹

¹ *Universität Stuttgart, Germany, E-Mail: lena.teichmann@iwb.uni-stuttgart.de*

² *HafenCity Universität, Germany, E-Mail: laura.resta@hcu-hamburg.de*

Abstract

To achieve Germany's 2045 climate-neutral building stock goal, the integration of renewable energies in retrofitting is necessary. The CO₂-neutral Speicherstadt Hamburg project in the historic warehouse district focuses on sustainable heat supply in listed buildings. The project consists of two main approaches: a practical approach combining historically sensitive components for heat supply, creating a comprehensive energy renovation concept with renewable energies in the listed area, and a methodological approach using Building Information Modeling (BIM) to integrate various simulation models and centralize outcomes efficiently. This enables a holistic and energy-efficient retrofit, addressing flow-specific, thermal, and ecological aspects, marking a significant step toward a CO₂-neutral listed building stock.

Kurzfassung

Um das Ziel eines nahezu klimaneutralen Gebäudebestands in Deutschland bis 2045 zu erreichen, ist die Integration erneuerbarer Energien bei einer Sanierung entscheidend. Das Projekt CO₂-neutrale Speicherstadt Hamburg im historischen Speicherstadtviertel ist auf nachhaltige Wärmeversorgung in den denkmalgeschützten Gebäuden fokussiert. Das Projekt umfasst zwei Hauptelemente: einen praktischen Ansatz, der aus denkmalpflegerischer Sicht akzeptable Komponenten für die Wärmeversorgung nutzt und damit ein Energiekonzept mit erneuerbaren Energien im Denkmalsbereich schafft. Der methodische Ansatz verwendet Building Information Modeling (BIM), um verschiedene Simulationsmodelle zu integrieren und Ergebnisse zu zentralisieren. Dieses Vorgehen legt die Grundlagen für eine ganzheitliche, energetische Sanierung unter Berücksichtigung von

flussspezifischen, thermischen und ökologischen Aspekten – ein bedeutender Schritt zum CO₂-neutralen, denkmalgeschützten Gebäudebestand.

Introduction

In Germany, the target is to achieve a nearly climate-neutral building stock by 2045 (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2019). That is why the Chamber of Commerce has set itself the goal of making Hamburg a climate-neutral city by 2040 (Handelskammer Hamburg, 2021), which of course also includes the world heritage site 'Speicherstadt Hamburg'. A large proportion of anthropogenic greenhouse gas emissions are attributable to the combustion of fossil fuels for energy production. For this purpose, the use of renewable energies will be indispensable, and their share of the heat supply has to increase significantly in the coming years - using renewable energies is a promising alternative to burning fossil fuels in terms of greenhouse gas emissions. To achieve this, the building stock must be developed sustainably. Key players are increasingly focusing on energy concepts in the building sector to optimize building operation. Therefore, the primary energy demand in Germany is to be drastically reduced by up to 80 percent compared to 2008 through a combination of energy savings and the use of renewable energies (European Commission, 2020). To this end, it is also intended to double the retrofitting rate of the existing building stock from 2020 to 2030 to significantly reduce emissions (Bundesregierung, 2020). The retrofitting measures are not limited to the provision of energy. The aim is to achieve holistic concepts that consider a reduction in energy requirements, e.g. through improved thermal resistance of the outer shell, as well as the integration of innovative components with which renewable energy can be generated, stored, and utilized locally.

This paper presents a joint project that aims to contribute to precisely these objectives by focusing on a holistic approach. The goal is to achieve a near climate-neutral energy supply through structural retrofitting and plant modernization measures that are ecologically justifiable from the point of view of monument protection and through innovative energy supply concepts. These concepts require the incorporation of a locally available supply of renewable energies. This holistic approach with the necessary technologies and concepts is being implemented using Hamburg's Speicherstadt as an example, with a key emphasis on utilizing a BIM (Building Information Modeling) model as the central hub for data exchange.

The 'Hamburg's Speicherstadt'

Hamburg's Speicherstadt is the world's largest contiguous ensemble of blockhouses recognized and protected by the Hamburg Heritage Protection Act since 1991. With its streets, canals, and bridges, it forms, together with the neighboring administrative complex, the Kontorhausviertel, a unique example of functionally connected blockhouses that are used differently for offices, warehouses, trade, gastronomy, etc. The overall development comprises 15 large warehouse blocks standing on coniferous piles, built between 1885 and 1927 on 1.1 km long and narrow islands in the Elbe. The complex underwent partial reconstruction between 1949 and 1967. The block buildings were erected in the style of the "Hanoverian School" in red brick and bear witness to an advanced technical development at the time of construction. The neighboring Kontorhausviertel, Europe's first pure office district, was built between the 1920s and 1950s. The Speicherstadt and the Kontorhausviertel with its "flagship" - the Chilehaus - were added to the UNESCO World Heritage List in 2015.

Beginning in the early 1970s, the expansive warehousing located in the Speicherstadt district began to lose its relevance, leading to the arrival of tenants unrelated to the port and a shift in space requirements. The task of renovating and retrofitting these buildings is complex, as it necessitates accommodating the needs of occupants while preserving the buildings' historical authenticity.

Presently, a combination of public and private stakeholders ensures the long-term preservation and sustainability of the property. This involves the preservation of the historic buildings, their distinctive overall impact, and their characteristic presence within the cityscape; enhancing the quality of life for Hamburg's residents by safeguarding this unique testimony to the city's cultural and historical development, which played a key role in shaping its identity; and promoting awareness and disseminating information about the site.

The Research Project and Motivation for the Holistic Neighborhood Approach

Since the recognition of the Speicherstadt in Hamburg as listed buildings and their subsequent inclusion in the UNESCO World Heritage List, their structural transformation not only has to consider the needs of the tenants, the requirements of modern workspaces and fire protection, but also the restrictions of changes to the outer appearance. For these reasons and to meet climate neutrality targets, Hamburger Hafen und Logistic AG (HHLA), the company that develops, designs, and operates the Speicherstadt historical warehouse district, is increasing its efforts to protect the climate, conserve resources and reach CO₂-neutrality in the entire complex. To this end, HHLA and a range of partners from the research and scientific community aim to obtain and incorporate renewable energies locally, while maintaining monument compatibility, economic efficiency, and usability.

This is the framework of the 0-CO₂-WSHH "CO₂-neutrales Welterbe Speicherstadt Hamburg" research project. The project aims to implement modernization and energy efficiency measures to sustainably reduce the CO₂ emissions of Speicherstadt's historic district by 2040, addressing, in particular, the key objectives of the German government's "Energy Efficiency Strategy for Buildings". To achieve these goals, the research project is taking a holistic, unique-district approach. This includes a comprehensive consideration of all aspects of buildings' ecological and energy optimization to maximize the use of locally generated renewable energies in the district for heat and power supply.

The project consists of three phases:

- **Phase I. Development and Evaluation:** This phase lays the groundwork for adapting systems and concepts to ensure the sustainable reduction of CO₂ emissions while maintaining aspects of compatibility between monuments, economic efficiency, and usability.
- **Phase II. Implementation at Storage Block Level:** In this phase, the measures, components, and concepts tested in Phase I and analyzed through simulation will be selected and tested on Block H under real conditions in a combined form as an example. With the help of monitoring data, the results from the simulations can be comprehensively analyzed and the models validated if necessary.
- **Phase III. Implementation at District Level:** After validation of the implemented measures, HHLA will apply the findings of the holistic approach from the interaction of the Block H measures of the other storage blocks in the entire district.

The project goals and current work described in this paper depict Phase I of the project, which is currently underway.

Work Objectives of the Research Project

The project has five main work objectives, which are presented below.

Record and Analyze Retrofit Measures and Building Properties

First, the **status quo of the retrofitting measures** has to be recorded.

During the building inspections, detailed material-technological, structural, and building-physical features are recorded and analyzed for holistic ecological evaluation.

Furthermore, a digital building model is created in which all relevant building- and neighborhood-related data can be stored to be used by the various simulation and calculation tools with appropriate data interfaces.

Broad-based monitoring is also important. Thus the building system technology in Block H will be designed to ensure that, besides the building automation system, sensors are installed in the four rental units selected for analyzing the indoor air conditions. With these sensors, it is possible to record the indoor air quality, depending on the operation of the ventilation system.

In addition to indoor air conditions and energy consumption for space heating, hot water, and electrical loads, heat flux plates record the dynamic U-values of the building envelope surfaces at selected locations. Sensor systems are also arranged in thermal bridge areas to evaluate condensation failures or the risk of mold growth.

Energy Assessment of the Neighborhood

Another goal is **the analysis and energy assessment of the neighborhood for the energetic upgrading** of the storage block. To systematize the working method for the analysis and assessment of the storage blocks and to obtain the necessary basis for achieving an energy-efficient neighborhood, the tools and methods of the inventory analysis are elaborated and tested in use. By developing a general procedure for holistic energy-efficient and ecological assessment, it should be possible in the future to find suitable renovation concepts for neighborhoods in a simplified way.

Holistic Redevelopment Concept

Another important aspect of the project is the **development of a concept for the holistic redevelopment** of the neighborhood, which considers the historic preservation, energy efficiency, and ecological aspects as well as the physical and structural factors. The goal of a low-CO₂ or nearly CO₂-neutral energy concept is to significantly reduce CO₂ emissions compared to the usual passive house standards. The aim is to undercut these by at least a further 30 percent. The analysis is not limited to the operation of the building but covers the entire life cycle of the building: emissions generated in the course of production, use, and disposal of the refurbishment measures should also be considered.

Emissions over the entire life cycle can be calculated using the life cycle assessment method, which is also to be coupled with BIM in addition to the flow simulation models and the thermal building simulation models.

To develop a low-CO₂ and ecological neighborhood energy concept, the neighborhood must be mapped with sufficient accuracy using appropriate simulation models in its current structural and plant engineering design. This requires a sufficient level of detail, whereby it must be considered that with an increasing level of detail, the calculation processes become increasingly complex and consequently the requirements for the hardware and software to be used become increasingly demanding. Uncertainties play a significant role in the mapping of such complex models and must not be ignored. The aim here is to record recognized and non-eliminable uncertainties and take them fully into account in the analyses. One challenge is therefore to map the buildings as accurately as necessary and as simply as possible to achieve the best possible informative value.

Innovative Energy Retrofitting Techniques

For this purpose, various renovation measures will be focused on the example of Hamburg's Speicherstadt and tested on Block H. Additionally to elements for generating renewable energy, the energy-related renovation measures also include components that enable the energy generated to be stored locally in the neighborhood over extended periods and used when needed. Components that allow energy transfer at low-temperature levels are also considered.

- On the building envelope, the roof surfaces are suitable for energy retrofitting. Within the scope of the project, optimization potentials concerning system structure, choice of materials, and insulation thickness are investigated to achieve an improvement beyond the usual standard. To this end, **solar energy harvesting roof elements**, compatible with preservation constraints for listed buildings and thermally and electrically activated, are developed. These activated roof elements make it possible not only to generate solar power but also to extract heat from the environment and use it directly in the neighborhood.

Two roof variants are developed and tested in terms of their energetic effect and technically optimized and adapted in terms of design:

One variant corresponds to the original appearance of the anthracite-colored roofing of the storage buildings. The small-format roof elements mimic the original slate appearance of the existing roofs. The geometry and color appearance resemble conventional slate shingles but consist of printed glass elements.

Based on a similar principle, another variant has also been developed by printing the glass to resemble copper sheets.

Both variants have already been presented at two trade fairs (in 2022 as well as in 2023) and have received very positive feedback.

- The use of various **heat storage systems** is also being developed and tested in Block H. A thermally activated storage tank made of pile-porous concrete has been developed. Theoretically, about 12 kWh of heat can be stored per cubic meter of thermally activated concrete at a temperature increase of 20 Kelvin. A concrete storage unit of about one cubic meter has been installed in the basement and its potential is being measured in direct use. In addition, the potential of ice storage in direct use is being researched. In this research project, the ice storage system is built on a modular basis, so it is not a permanent facility, but only a temporary one. It can also be expanded or reduced relatively easily.
- The modernization of **ventilation systems** is another relevant parameter in energy retrofitting. Conventional ventilation systems operate with a constant volume flow, which significantly increases the heat demand. This can lead to up to 50 % greater heat energy input compared to classic window ventilation (Intern, 2022). In the project, a variable volume flow control is being tested, where the supply of outdoor air depends on the indoor air condition recorded and evaluated by monitoring. In four selected user units, the demand-oriented operation of the ventilation systems is being tested first simulated and, after installation of a meaningful monitoring concept with variably controllable ventilation systems, during operation under real state conditions in Block H to validate the simulations using CFD (Computational Fluid Dynamics). The findings will be used to consider the use and operation of ventilation systems in the holistic approach.

Inner Courtyard Roofing

Another focus of the project is analyzing the energy-saving potential with an additional roofing of the inner courtyard of Block H.

With a roof, the free exchange of air between the inner courtyard and the outside air is initially prevented. As a result, the temperature conditions in the roofed courtyard will change during the heating period such that the temperatures in the courtyard will rise by a few Kelvin due to the transmission heat losses of the courtyard-side envelope surfaces. Accordingly, the heat losses occurring at the outer walls to the inner courtyard will decrease. The extent to which the

roofing contributes to reducing transmission heat losses is being modeled in simplified form with the help of thermal building simulations and analyzed with flow simulations at a higher precision scale. With flow analyses, however, the daily and seasonal ventilation requirements of the inner courtyard must also be calculated; after all, this requires opening wings in the glass roofing that are operated according to demand. Otherwise, the temperatures in the inner courtyard would increase significantly, especially during sunny summer days. Therefore, control scenarios and the determination of the necessary number and areas of openable surfaces are also the subject of the flow analyses.

Again, the BIM model was used as the basis for the simulations. It was also used for the basic architectural studies for the roofing.

Successes Already Achieved in the Current Project

Most of the building surveys have been completed. As a result of the archive inspections, it has been possible to determine which parts of the building are in what original condition (e.g. bomb damage from the Second World War).

The concept for short-term monitoring was also created and the corresponding measurement sensors were installed.

In addition, the exterior and some relevant and accessible areas inside Block H were scanned, thus obtaining point clouds. These were then processed for use in the creation of a BIM expectation model (Fig. 1).

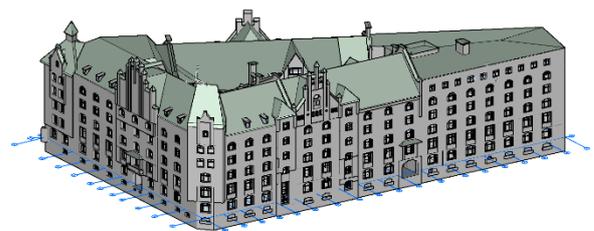


Figure 1: BIM Expectation Model (Source: HCU)

A BIM expectation model is a model created from available information, which is iteratively defined and verified as new geometric and semantic data is received, making it the projects main BIM model

This (main) BIM model is the information centerpiece of the project. It stores the information from the structural analyses and the results from monitoring and short-term measurements. The simulation results from the various simulation programs are also documented here.

For the management of information within the model by the various stakeholders, who do not always have in-depth knowledge of the BIM methodology, a BIM-based dashboard has been developed as a part of the

first concept for the use of the BIM model as a database. Thus all relevant project-relevant information can be organized and presented in the BIM model components, acting as information containers. This can be considered a database since the various project, location, materials, spaces, or building elements data can be read and edited. Users can both access and modify the information, including simulation results. This approach to the BIM model as a database not only allows efficient information management but also encourages retrieval, modification, and analysis processes.

In this way, for example, the material data of a wall layer can be retrieved in a bundled form and used for the thermal-hygric simulation which can then save its results into the model too. Similarly, in a floor component, the technical data of the installed underfloor heating can be read out, as well as simulation results of various simulated heating characteristics. In a room, data for the planned use can be stored and simulations for different ventilation and usage behavior can also be found.

Moreover, as the project progressed, the idea of creating a ‘Research Laboratory’ emerged. This is located in part of the ground floor of the building to be analyzed and is intended to serve as a sort of "showcase" for interested parties (Fig. 2).

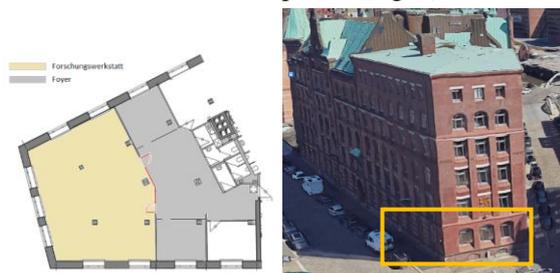


Figure 2: Floor plan of the ‘Research Laboratory’ (left); Location of the ‘Research Laboratory’ in the building (right) (Source: IWB)

The main aim of the ‘Research Laboratory’ is to test the various retrofitting components and make them visible to the public. Three different interior insulating plasters are analyzed. Moreover, floor, wall, and ceiling heating systems were installed. The heating systems in walls and ceilings are a carbon paint heating system and an electric textile heating panel. This allows the testing of different heating options. Ventilation systems were also installed at the four main windows. This allows different ventilation behaviors to be simulated. The measurement results from the different test series of the ventilation scenarios are used to validate the flow simulations using StarCCM+ and the different tests of the utilization scenarios of the dynamic building simulation.

Apart from the investigations at room level, the retrofitting components for the overall system have already been implemented on the systems engineering side. The hybrid roof elements were developed in both

copper sheet and slate roof optics and installed on a test roof area.

Figure 3 shows the hybrid roof elements with a copper look. The current design imitates sheet copper in its non-oxidized form. The copper look can also be developed as a copper sheet with a patina.



Figure 3: Copper-look roof element (Source: Eckpack GmbH)

Figure 4 shows hybrid roof elements with a slate look. Three different looks of slate imitation were developed and applied to the test roof surfaces. Each of them is clad with real slate.



Figure 4: Slate-look roof element (Source: Eckpack GmbH)

An ice storage tank and a solid matter storage tank were also installed in the basement of the property in question. The interaction of the components in combination with a heat pump is to be tested in different control scenarios using the installed measurement sensors.

Figure 5 schematically shows the interaction of the various retrofitting components.

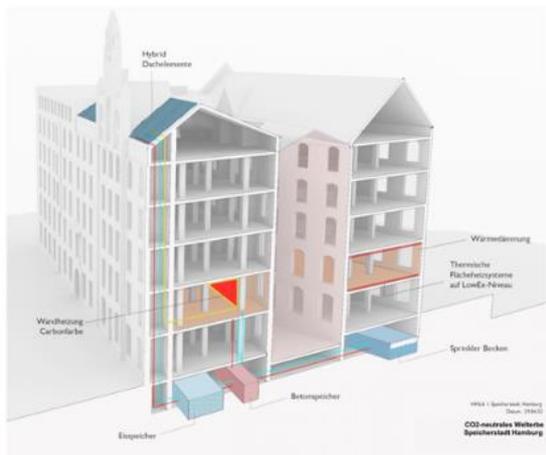


Figure 5: Schematic representation of the individual components in the test object (Source: Demirag Architekten)

The idea of a (semi) transparent roof over the inner courtyard is being investigated in the project. Initially, it was considered a purely theoretical possibility. The following qualitative findings were obtained from initial rough simulations. Roofing over the inner courtyard reduces the building's heating energy requirement. The higher the roofing of the inner courtyard is installed; the more heating energy can be saved in the building as a whole. The installation of doors or similar in the three passages to the inner courtyard has a major influence on the heating energy savings. The energy quality (U-value) of the material of the roofing and the passageways only plays a small part in reducing the building's heating energy. A reduction in heating energy simultaneously leads to a (theoretical) increase in the building's cooling energy. To avoid this increase, a system must be developed to ventilate the inner courtyard in the summer months, either through targeted leaks in the structures or by automatically opening the access doors.

Associated Research Questions and Methodological Approaches

Several research questions arise from the research project. The most obvious is probably the question of which measures in combination with which energy concepts in conjunction with neighborhood networking will reduce CO₂ emissions in the Speicherstadt to make it CO₂-neutral in the long term. Another question is certainly how to optimize the networking. This is followed by the further question of how CO₂ neutrality can be achieved not only in operation but also from a holistic point of view and, above all, how the optimization of the retrofit concepts can work from a holistic perspective.

The innovative approach of using a BIM model as a central source of information exchange in the historic building stock raises further questions:

How can a Building Information Model (BIM) be developed and applied to enable comprehensive simulation and analysis processes, with a particular

focus on information management for the operation of buildings and neighborhoods? Where does the inadequate use of BIM models for operational aspects such as energy saving and resource efficiency come from? How can the project presented here contribute to filling these gaps? These questions can in turn be answered with further "detailed" ones. As long as these are not clarified, the above questions will answer themselves in the negative. The following questions need to be clarified in detail: How can user groups without authoring programs modify and add semantic data to BIM models? How are they verified and approved? Are properties and property sets implemented in the BIM model correctly read into the simulation software? And how can new parameters be inserted?

The holistic energy and ecological assessment approach also raises further research questions. The most important one is probably how exactly this approach can be used to assess and even optimize retrofit options since both energy and ecological assessment are often based on uncertainties and assumptions. These lead directly to an interval-based assessment, whereby the range of results can already be estimated, or to a difference between calculation or simulation results and measurements. However, coupling both assessments (energy and ecological) is essential for a holistic assessment.

Conclusion

The project ranges from theoretical basic research to application-oriented development issues, which is made possible by the heterogeneous consortium of university, company, and client. It thus offers the opportunity to directly test research and development results from science and companies regarding their practical suitability on a real block of the listed Speicherstadt Hamburg district. At the same time, this approach poses several challenges.

Many individual objectives were delayed due to supply bottlenecks and an omnipresent shortage of skilled labor (including the university environment). As a result, not all events could be performed in the planned sequence and new workflows also had to be developed. Nevertheless, much has already been achieved in the project, as this report shows. The subsequent monitoring phases and their evaluation will show whether CO₂ neutrality can be achieved not only in theory but also in practice in historical monuments.

Acknowledgments

This work is part of the research project 0-CO₂-WSHH "CO₂-neutrales Welterbe Speicherstadt Hamburg" (funding code 03EN3027), which is funded by the "Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz" (BMWK) as part of the "7. Energieforschungsprogramm" and implemented with the help of the PtJ ("Projektträger Jülich").

The research project is structured as a joint project and includes the following partners: HHLA 1. Speicherstadt Immobilien GmbH & Co. KG as the joint coordinator, the Institut für Wekstoffe im Bauwesen at Universität Stuttgart, the BIMLab at HafenCity Universität Hamburg, and the Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik at RWTH Aachen. In addition, the Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft, and the Behörde für Kultur und Medien with the Denkmalschutzamt der Freien und Hansestadt Hamburg are involved as associated partners.

References

- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. (2019). Bundes-Klimaschutzgesetz: KSG (letzte Änderung im 2021). Abgerufen am [11.12.2021], von <https://www.bmuv.de/gesetz/bundes-klimaschutzgesetz/>.
- Bundesregierung. (2020, November 1). Das neue Gebäudeenergiegesetz (GEG). In Bundesgesetzblatt.
- European Commission. (2020, October 14). Renovation Wave for Europe - greening our buildings, creating jobs, improving lives. Communication from the commission to the European Parliament and Social Committee and the Committee of the Regions.
- Handelskammer Hamburg. (2021). Klima-Resolution der Handelskammer Hamburg. Abgerufen am [11.12.2023], von <https://www.ihk.de/hamburg/produktmarken/beratung-service/klimaneutralitaet-mitgliederdialog/klima-resolution-des-plenums-5361540>
- Intern. (2022). Interne Planungsunterlagen der von Dritten im Zuge der Maßnahmenplanung für die Ausarbeitung der „Referenzsanierung“ durchgeführten dynamischen Gebäudesimulationen.



ENERGY SAVING POTENTIAL OF SOCIO-TECHNICAL INTERVENTIONS IN EDUCATIONAL BUILDINGS

Branca Delmonte¹, Edelle Doherty², Stefan Maas³

¹ *University of Luxembourg, Luxembourg, E-Mail: branca.delmonte@uni.lu*

² *University of Galway, Ireland, E-Mail: edelle.doherty@universityofgalway.ie*

³ *University of Luxembourg, Luxembourg, E-Mail: stefan.maas@uni.lu*

Abstract

Following the geopolitical crisis in fall 2022, a shortfall of fossil fuels was feared, leading many buildings to save energy by reducing indoor temperatures, disregarding comfort. To address this conflict, we started to analyse the saving potential of socio-technical interventions without major renovation and without comfort reduction. Four educational buildings were selected as pilots due to their great outreach and dissemination potential. This objective requires involvement and participation of the complex chain of all school stakeholders. The proposed strategy combines a participatory energy- and comfort-monitoring approach with analyses of the building specificities, to define reduced operational modes during absence periods.

Introduction

Operations of buildings account for 30% of global final energy consumption (Eurostat, 2023) and 26% of global energy-related carbon emissions (IEA, 2023). In Europe, educational buildings count for 6.5% of the overall floor area and 16% of the non-residential buildings (BSO, 2023). Therefore, schools can contribute significantly to reducing energy consumption of the existing building stock. Furthermore, as stated in the Energy Performance of Buildings Directive (2010) public buildings should set the example due to their great outreach and excellent dissemination potential, which is specially the case for schools where future citizens are educated and thus can serve as multipliers in terms of long-term impacts.

For new buildings norms and standards require high energy performance, while for existing buildings, often incentives are offered to support energetic renovations. Nonetheless, in all cases large discrepancies between predicted and real efficiency can often be detected in field studies, ref. Hoos (2013), Thewes (2014).

Despite efforts to reduce energy consumption in buildings, there remains a significant issue related to the operation of technical installations. This is caused

by the different types of buildings, and it is more pronounced in the non-residential domain, where in general users have less influence on operation and maintenance. These buildings are often more complex and have typically facility managers, operating under contracts to maintain the systems working without faults and to minimize complaints from users. Therefore, many operators prioritize avoiding complaints instead of being energy efficient.

According to Techem (2023), monitoring and professional operation can increase the efficiency of conventional heating systems in residential buildings by 15%. Additionally, there is a clear correlation between energy costs and consumption, with higher costs resulting in lower consumption. Felsmann (2020) has shown an average reduction of around 20% of final consumption when energy is individually measured and billed.

Our study intends to finally explore the energy saving potential from the combination of social and technical interventions in schools. It is based on exact understanding of the individual building use and of precise adaption of operational settings to the real needs, while choosing reduced operational modes for all empty periods (night-time, weekends, and holidays). For the identification of saving opportunities and their implementation the involvement of all stakeholders is essential. Prior to the change of operational modes, a deep understanding of technical installations is necessary to give the staff the confidence to try it. Most of the time, the oversized operational modes are defined to avoid complaints from users of this building.

The interdisciplinary approach of combining social and technical interventions to reach energy savings was initiated by the NWE-Interreg ENERGIE Project, that stands for “Energizing Education to Reduce Greenhouse gas Emissions”. In this project 13 post-primary schools in 6 countries of North-Western Europe (NWE) worked together to tackle this goal. Brychkov et al. (2023) proposes a systemic framework to improve energy efficiency in schools, while Doherty et al. (2022) explores the concept of learning communities to change energy behaviour.

When discussing energy consumption, very often people relate the age of the building with energy performance. However, for instance Hoos et al. (2016) stated that the final heat energy consumption does not directly correlate with year of construction due to many design and execution issues of new buildings and due to partial renovation over time of older ones. Hoos (2013) studied 60% of the older school building stock in Luxembourg to calculate the average specific yearly consumptions of heat and electricity as presented in Table 1.

Table 1: Summary of calculated mean values referred to gross floor area (GFA) (Hoos, 2013)

	Calculated mean values	Amount of sample buildings
Heated gross area	15,400 ± 4,000 m ²	25
End-energy for heat use incl. hot water	161 ± 71 kWh/(m ² /y)	26
End-energy for electricity	35 ± 16 kWh/(m ² /y)	24

The above classification of buildings allows to evaluate their energy performance and provides an indication of energy savings opportunities. Additionally, it also allows discussions with educational purposes to stimulate and enlarge knowledge of young citizens in this field.

From the identified savings opportunities a tailored strategy to reduce energy consumption without influencing comfort can be deduced, analysed, and implemented. In this phase monitoring is essential to assess the impact of the measures, both on the energy consumption and on the comfort side.

The results should prove the saving potential without renovation while maintaining comfort. It also often shows that there is still space for improvement.

Methodology

The socio-technical energy saving potential of school buildings was analysed in for four pilots in Luxembourg. These buildings represent an older part of the stock, as presented in Table 2, although they have been partly renovated over the years.

Our approach in Figure 1 to save energy is based a 5-step methodology, proposed by the outcomes of the

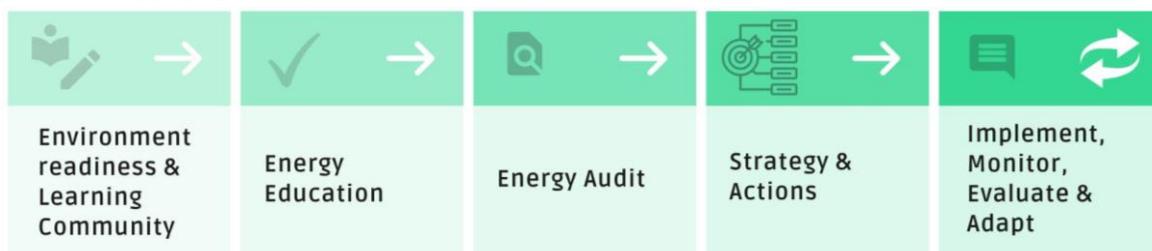


Figure 1: 5-step methodology to reduce energy consumption in school buildings

Table 2: Summary of studied school buildings

School	Gross floor area [m ²]	Year of construction
A	16474	1989
B	30865	1974
C	19996	1972
D	25232	1953

ENERGE project. The methodology aims to raise awareness through educational activities on the energy topic to allow the school communities to identify opportunities, define and implement tailored strategies to reduce their consumption, while keeping comfort.

Environment readiness and Learning Community

The initial step assesses the readiness of the environment and builds upon the existing framework. This includes the identification of stakeholders, their knowledge, willingness and of the available resources. Meanwhile, a working group in each pilot was established based on a learning community approach. The working group should be composed of at least one representative from each stakeholder group, i.e. of students, teachers, directors, maintenance staff, building owners, and partly parents. It is important to engage all different spheres, but the influence should be adapted to the needs, the competence and activity domain of each group.

Energy Education

During step two, the energy efficiency topic is disseminated within the school environment through educational activities. This is a preparation phase raising awareness to the topic in the school community, allowing further contribution to the following steps.

Energy Audit

The third step is characterized by the energy audit of the school building. It starts with the collection of information about the building envelope, its technical installations and the respective operational modes. From the analysis of the energy consumption in comparison to relevant benchmarks, savings opportunities can be identified. Furthermore, the energy consumption is analysed for different types of use, highlighting big consumers.

The school community is involved into this step, both to contribute and specially to benefit from experiential learning. This is also essential for engaging the community in the following steps.

It starts with the analysis of total and specific primary energy consumption relative to comparable buildings. The total yearly consumption of different energy vectors is calculated from real data obtained directly from the monitoring system of the public building owner (Administration des Bâtiments Publics in Luxembourg). From this information it is possible to separate heat and electricity consumptions and divide them by the gross floor area of the building to obtain the specific yearly consumption in kWh/(m²y). In Luxembourg, these values can be compared to the national benchmarks from Hoos (2013).

Specific yearly energy consumptions that are above the average highlight large saving opportunities. The following step is the distribution of the energy consumption within the building to identify big consumers. The analyses of big consumers themselves and their comparison to references deploys the performance of the specific system and helps to plan adjustments.

To monitor big consumers at least temporary electric meters (clamp-on ammeters) can be installed to measure their consumptions. Whenever this is not possible a simpler and more approximate alternative is to identify the power of the equipment and multiply it with the measured or estimated operational time to approximate their energy consumption.

Strategy and Actions

In step four of the energy audit and especially for the big consumers, it is recommended to define an intervention strategy. A clear saving target should be defined, as well as the necessary actions. The saving measures are specified together with a monitoring plan which allows tracking the savings and the real comfort levels.

Implement, Monitor, Evaluate and Adapt

The fifth step is about implementing the tailored energy saving strategy. Monitoring the measures and comfort levels also allows to evaluate the effectiveness of the strategy, that should be constantly questioned and if needed adapted. Furthermore, schools are also constantly subject to changes, requiring the strategy to adapt. Once again, involving the school community into this step assures being up-to-date and provides important learning outcomes inside and outside the school environment.

By going through this process, it is possible not only to reduce the energy consumption but also to provide knowledge for better adapted future investment decisions in case of later renovation.

Analysis and discussion of the results

The energy savings potential from socio-technical interventions are analysed for the four educational buildings in Luxembourg given in Table 2.

Environment readiness and Learning Community

In Luxembourg, school buildings are owned by "Administration des Bâtiments Publics (ABP)". The contact points in these schools are volunteering teachers, that are in contact with students, directors, staff, maintenance companies and ABP. These teams were trained and informed in our case by University of Luxembourg. Although parents are listed as stakeholders in the methods, they are not part of this analysis.

Due to the challenge of reducing carbon emissions in the geopolitical situation all involved stakeholders were open and interested to apply the proposed methodology. Hence, our pilot-buildings were accessible, while technical installations and operational information were made available.

This group of stakeholders working as the learning community shared and discussed information about energy savings concepts.

Energy Education

Energy related educational activities were applied to physics lectures in two institutions, while extra curricula workshops were proposed to the broader public in other schools. Some institutions already had this topic integrated in their curricula, while others encountered more barriers to do it.

This type of activity showed the interest of the school community to join discussions, e.g. on energy consumption in schools and at their homes, thus emphasising the dissemination aspect. It also prepared the community to start the energy consumption analysis.

Energy Audit

The comparison between the specific energy consumption of the four studied educational buildings (A, B, C and D) with relevant benchmarks in Figures 2 and 3 shows the saving potential. Specific energy consumptions below the national average as observed in Figure 2, for heat, indicates a better performance. On the other side, the behaviour observed on Figure 3, for the electricity consumption of the same buildings, indicates potential savings. Thus, for the studied buildings, saving energy on the electric side is easier to achieve than on the heat-side.

Hence, a detailed analysis of electricity consumption and its distribution within the building was started. This study presents the results of the energy audit from building B and C only, as building A and D are still under analysis.

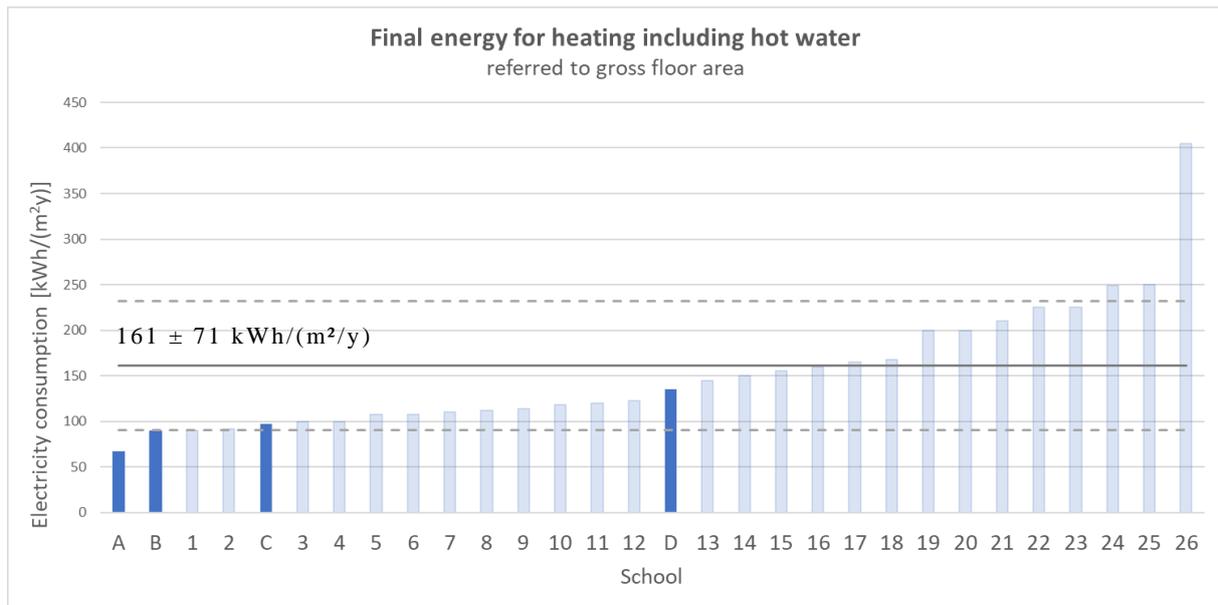


Figure 2: Final energy consumption for heating including hot water, referred to gross floor area. Our 4 pilots of Table 2 are highlighted in dark.

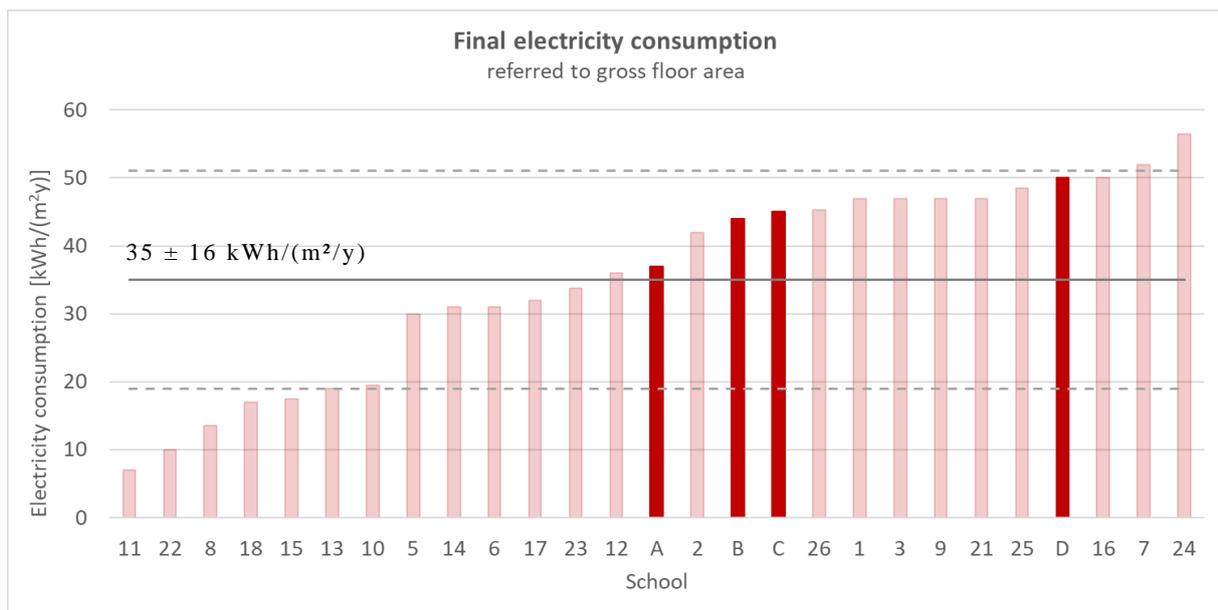


Figure 3: Final electricity consumption, referred to gross floor area. Our 4 pilots of Table 2 are highlighted in dark.

Building B

This is an older building with a façade composed by a big single glazed surface and 6 cm of rockwool insulation layer on the outside of the walls. The complete external wall shows comparatively low thermal resistance and low airtightness of windows and doors leading to high heat losses. However, the consumption is still below the national average for older schools which indicates that heat energy savings probably require more effort.

Nevertheless, radiators and controlling valves were checked and the maintenance staff identified that the system needed to be balanced in order to reduce the

supply temperature. Besides, various valves of the radiators were either broken and constantly working at full power, or simply not allowing the users to modify the reference temperature. This means that it was not possible to adapt the heat flow to the weather conditions, nor to apply reduced operational modus during empty periods. Hence, the building is always fully heated during night time and weekends, although it is not being used.

In another analysis for building B, it was identified that the illuminance at the hallways and corridors was higher than the minimum required 100 lux. Considering the installed older lighting system this

represents an opportunity to save energy, while keeping comfort, by simply switching permanently off some lamps.

Building C

The electricity consumption of building C was analysed and then separated into different sub-users in 2022 (ref. to Figure 4). The chart highlights that the swimming pool and the sports hall cause the highest consumptions of this school, contributing to more than one third of the total consumption of electricity. Then the lighting system and the digital consumers (informatics) follow.

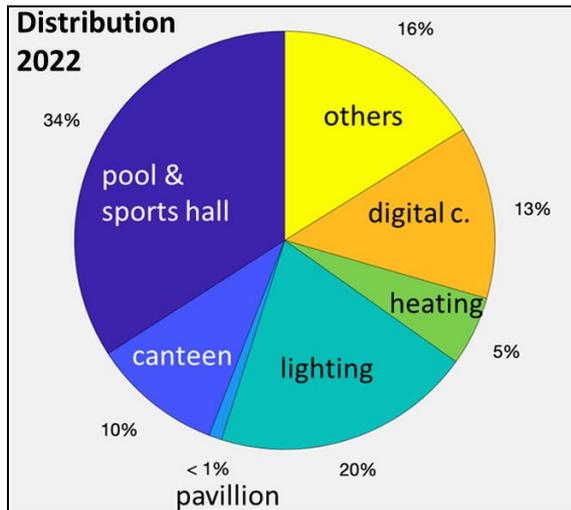


Figure 4: Electricity consumption distribution

Over the years, this school is already replacing the older lighting system by more efficient ones to reduce the consumption. However, the use of more and more electronic devices like computer, notebooks, tablets and servers for educational purposes is increasing the electric consumption.

Furthermore, the information from the distribution of consumption in Figure 4 also indicates that the operation of the swimming pool and the sports hall can has probably a high energy saving potential. It means that a detailed analysis of this part of the building, the technical installations and its operational modes is necessary to indicate where to act.

Every year, the swimming pool is open from mid of of September to mid of July. During the summer break it is cleaned and prepared for the following season. The system includes inter alia three large pumps. Two of them are working simultaneously during the day, from 6h to 22h, while the third one works from 22h until 6h. Besides, the system has a reduced operational mode for Saturdays and Sundays. However, it was also identified that there is no reduced operational mode for holiday periods. The management system of the swimming pool does not allow to change the settings. This means that the staff of the school is not allowed to adapt the

operations to the actual use, which is now questioned.

Strategy and Actions

The results from the Energy Audit indicates the following for buildings B and C.

Building B

To reduce the energy consumption for both heat and electricity, two approaches are defined. The first is focused on balancing the heating system and radiators, besides replacing the broken valves to allow users to correctly control the radiators.

The second intervention approach targets the lighting system to meet only the minimum required illuminance in common areas and hallways. Such measures can be taken by disconnecting permanently some lamps.

Building C

The strategy to reduce the energy consumption in this school is based on adopting reduced operational modes for the swimming pool during holiday weeks, and when the pool has less users or none. To enable such intervention, the management system needs to be adapted to allow specific settings, combined with an attentive control of the staff.

Finally, it is also intended to at least discuss and assess savings based on a sufficiency approach with all stakeholders, e.g. the timewise closing of the pool in winter.

Implement, Monitor, Evaluate and Adapt

In this step the intervention measures are or will be implemented and monitored. The monitoring allows the evaluation of the effectiveness of the different interventions. From this analysis it is possible to adapt interventions to reach better results.

Building B

In this phase the heating system and radiators were balanced and calibrated, while broken valves were replaced. However, reduced indoor temperatures have been implemented before to save energy, thus jeopardizing comfort. The overall temperatures are reduced even during the day, when users are present. This measure led to energy savings, but it also led to increasing complaints and reduced comfort.

An adapted intervention plan is currently worked out. Since there are mainly manual systems, it requires the involvement of users in the process. Sensitizing the public for an active role is essential to achieve the defined goal. In a following step the potential of energy savings with reduced operational modes during the empty hours should be quantified and presented to users and compared to the full demand of full operation during working hours. This is necessary to involve users into the saving-process to

really operate thermostat-valves once they leave the building. Finally, the cleaning staff need to be informed and better trained to supervise it.

The intervention on the lighting system of common hallway areas led to savings of more than 5% of the overall consumption of electricity. This measure did not lead to any extra investment. It only involved working hours of the maintenance staff and the use of the luxmeter to meet the illuminance requirements. This result achieved so far does not include yet classrooms, offices, and laboratories, showing that there is still an important potential to be explored. Monitoring of the consumption does not only allow assessment of the performance of the individual measure, but also assurance of comfort and good fit of future intervention plans that go beyond.

Building C

The interventions at building C are focused on the swimming pool. The technical staff adapted the real number of users in the pool-management system instead of using overestimated predefined figures. However, the intervention also involved other stakeholders and currently the management system is under revision to allow the staff at site to adopt better and quicker a reduced operational mode whenever possible.

The monitoring of the results from these interventions is part of the optimized control of the electric consumption of the pumping system, together with the control of water quality and the water levels.

The results from monitoring are shared with the school community to engage them even more in the process of identifying new opportunities and savings actions.

Conclusions

The study of the energy saving potential of socio-technical interventions in educational buildings in Luxembourg shows that it is possible to save energy by adapting the consumption to the actual needs. When requirements and operation times are well-known, the technical installations can be better adapted to reduce consumption, while keeping comfort high.

Big consumers of buildings with high energy consumption must first be identified and often offer interesting savings opportunities. Examples are buildings with older and less efficient lighting systems especially in hallways and corridors, where assuring only minimal technical and comfort requirements has proven to save already 5% of the electricity consumption.

The approach proposed for this study focusses on involving the school community to both identify savings opportunities during the analysis of the building, and to engage them later into the

implementation, and into the monitoring of comfort and energy characteristics.

Buildings equipped with automated monitoring and operational bus-systems can more easily switch between different operational modes and adapt the indoor conditions easier to the needs of the user, while avoiding energy losses during empty hours. However, these systems also need constant monitoring to ensure that they are working correctly. It shows that the deep knowledge of the building technics, the energy demand and the monitoring of operations are necessary for both older and modern buildings. Therefore, the educational approach to teach the next generations about energy efficiency is essential to reach better performances.

Acknowledgement

The ENERGE Project was funded by the Interreg North-West Europe (NWE) Programme.

Close cooperation with and openness of Luxembourg's Administration de Bâtiments Publics (ABP) is highly appreciated.

References

- Brychkov D, Goggins G, Doherty E, Romero N, Roudil N, Di Trani A, Singh A, Smit S, McLoughlin E, de Castro Rodrigues Lima R, Günbay SM, Delmonte BA, Hill A, Domegan C, Clifford E. 2023. A systemic framework of energy efficiency in schools: experiences from six European countries. *Energy Efficiency* 16(4):21. doi: 10.1007/s12053-023-10099-4. Epub 2023 Mar 16. PMID: 36941971; PMCID: PMC10018605.
- BSO, EU Building Stock Observatory – Factsheets. [Online] October 12, 2023. https://ec.europa.eu/energy/eu-buildings-factsheets-topics-tree/building-stock-characteristics_en
- Doherty, E., Brychkov, D., Romero Herrera, N. A., McLoughlin, E., Roudil, N., Smit, S., Maas, S., Gauthier, F., Clifford, E., & Delmonte, B. A. 2022. Integrating technology, education and practice to change energy behaviours in schools. In *CLIMA 2022 - 14th REHVA HVAC World Congress: Eye on 2030, Towards digitalized, healthy, circular and energy efficient HVAC* [1320] TU Delft OPEN Publishing. <https://doi.org/10.34641/clima.2022.166>
- Energy Performance of Buildings Directive 2010/31/EU (2010)
- Eurostat. Data Browser. Final energy consumption by sector. [Online] April 28, 2023. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/te_n00124/default/table?lang=en

- Felsmann, C. 2020. Auswirkungen der verbrauchsabhängigen Abrechnung in Abhängigkeit von der energetischen Gebäudequalität in der EU, TU Dresden, 31.
- Hoos, T. 2013. Einsparpotential und ökonomische Analyse der energetischen Sanierung staatlicher Gebäude in Luxemburg. Dissertation, University of Luxembourg, ISBN 978-3-8440-1909-4 Editor Shaker, Aachen
- Hoos, Thorsten, Alexander Merzkirch, Stefan Maas, and Frank Scholzen. "Energy Consumption of Non-retrofitted Institutional Building Stock in Luxembourg and the Potential for a Cost-efficient Retrofit." *Energy and Buildings* 123 (2016): 162-68. Web.
- IEA. Buildings. Tracking buildings. [Online] November 15, 2023. <https://www.iea.org/energy-system/buildings>
- Techem Energy Services GmbH. Techem consumption figures 2022 (2023)
- Thewes, A.; Maas, S.; Scholzen, F.; Waldmann, D.; Zürbes, A. 2014. Field Study on the Energy Consumption of School Buildings in Luxembourg. *Energy and Buildings* 68.PA: 460-70. Web.

REBOUND-EFFEKTE NACH ENERGETISCHER MODERNISIERUNG? – KOSMA-FORSCHUNGSERGEBNISSE AUS INGENIEUR- UND SOZIALWISSENSCHAFTLICHER SICHT

Michael Grafe¹, Ulrike Hacke²

¹ *Institut Wohnen und Umwelt GmbH, E-Mail: m.grafe@iwu.de*

² *Institut Wohnen und Umwelt GmbH, E-Mail: u.hacke@iwu.de*

Kurzfassung/Abstract

Der berechnete Wärmebedarf und der gemessene Wärmeverbrauch stimmen oft nicht überein. Dabei ist das Phänomen zu beobachten, dass in energetisch nicht modernisierten Gebäuden der Verbrauch geringer ist als der Bedarf, in neuen und energetisch modernisierten Gebäuden hingegen höher. Dort werden oft auch deutlich höhere Raumtemperaturen gemessen. Daraus wird bisher insbesondere in sozialwissenschaftlichen Untersuchungen der Schluss gezogen, dass mit hohen Energiestandards gestiegene Nutzerkomfortansprüche einhergehen. Diese führen dann über die Wunsch einer höheren Raumtemperatur zu Rebound-Effekten und zur Verfehlung der gewünschten Energieeinsparungen.

Im Forschungsprojekt KOSMA wurde Fragen des Nutzerverhaltens (Lüften und Heizen) nachgegangen. Als Ergebnisse der sozialwissenschaftlichen Befragung wurden einerseits sehr verschiedene Verhaltensweisen für das Heizen und Lüften festgestellt. Andererseits konnten keine deutlichen Verhaltensunterschiede in modernisierten Gebäuden abgeleitet werden. In den ergänzenden ingenieurmäßigen Energiebilanzbetrachtungen wurden für zwei Modellgebäude nutzerabhängige und -unabhängige Parameter variiert. Alle diese Parameter haben deutlichen Einfluss auf den Bedarf. Eine Zuordnung der Bedarfs-Verbrauchs-Abweichung zu einem einzelnen Parameter ist aber nicht möglich, sodass Rebound-Effekte aus dem Nutzerverhalten weder nachgewiesen noch widerlegt werden konnten.

The calculated heat requirement and the measured heat consumption often do not match. The phenomenon can be observed that consumption is lower than demand in buildings that have not been energy modernised, but higher in new and energy modernised buildings. Significantly higher room temperatures are also often measured there. The conclusion drawn from this, particularly in social science studies, is that high energy standards are accompanied by increased user comfort requirements. This then leads to rebound effects

through the desire for a higher room temperature and the failure to achieve the desired energy savings.

The KOSMA research project investigated questions of user behaviour (ventilation and heating). On the one hand, the results of the social science survey revealed very different behaviours for heating and ventilation. On the other hand, no clear differences in behaviour could be identified in modernised buildings. In the supplementary engineering energy balance analyses, user-dependent and user-independent parameters were varied for two model buildings. All of these parameters have a significant influence on demand. However, it is not possible to assign the demand-consumption deviation to a single parameter, so that rebound effects from user behaviour could neither be proven nor disproven.

Einleitung

Der Erfolg von Wärmeschutzmaßnahmen an Wohngebäuden zur Reduktion des Wärmeverbrauchs wird mit Hinweis auf Rebound-Effekte häufig in Zweifel gezogen. Dabei wird die Differenz zwischen dem gemessenen Verbrauch und dem berechneten Bedarf oft allein den Nutzern und deren (Fehl-)Verhaltensweisen zugeschrieben. Zugleich gibt es Erkenntnisdefizite in Bezug auf das komplexe Zusammenwirken von nutzer- und baulich-technisch-bedingten Aspekten und deren Auswirkungen auf den (Mehr-)Verbrauch von Heizwärme.

Vor diesem Hintergrund war der vom BMBF im Förderschwerpunkt FONA/Sozial-ökologische Forschung geförderte Forschungsverbund KOSMA (Komponenten der Entstehung und Stabilität von Rebound-Effekten und Maßnahmen für deren Eindämmung) bestrebt, mögliche Einflussfaktoren direkter Rebound-Effekte im Bereich Heizwärme zu untersuchen. Ein Fokus lag dabei auch in einem Vergleich des Nutzerverhaltens abhängig von vorab definierten unterschiedlichen energetischen Gebäudestandards. Diese Analysen basierten auf Befragungsergebnissen zum Nutzerverhalten ergänzt um gebäude- bzw. wohnungsseitige Informationen, die vom Projektpartner Nassauische Heimstätte Wohnungs- und Entwicklungsgesellschaft mbH (NHW) zur Verfügung gestellt wurden. Flankierend

dazu wurde mit exemplarischen energetischen Betrachtungen ein Blick auf die vielfältigen Größen mit Einfluss auf Rebound-Effekte und deren Wechselwirkungen geworfen.

Konzeption und Methodik der sozialwissenschaftlichen Befragung

Zur Erfassung des Wärmenutzungsverhaltens sowie weiterer relevanter Eigenschaften der Haushalte (z.B. sozio-ökonomische/demographische/kulturelle Merkmale, Werte/Normen, Einstellungen, Wissen) wurde eine standardisierte quantitative Erhebung im Mietwohnungsbestand der NHW durchgeführt. Die Stichprobe umfasst 1.304 auswertbare Fälle. Davon konnte eine Teilgruppe (n = 87) zusätzlich retrospektiv zu ihrem Wohnverhalten vor einer zum Befragungszeitpunkt maximal fünf Jahre zurückliegenden Modernisierung befragt werden.

Weit überwiegend wurde die Befragung in Form persönlicher Interviews in den Wohnungen der Befragten realisiert, pandemiebedingt in zwei Wellen (Heizperioden 2019/2020 und 2021/2022). Die Auswahl der an insgesamt 14 Standorten in Hessen befindlichen Gebäude/Wohnungen erfolgte kriterienbasiert, um eine möglichst heterogene Stichprobe zu erreichen, die sowohl sozio-strukturell unterschiedliche Befragtengruppen als auch verschiedene energetische Gebäudequalitäten beinhaltet. Für die Analysen wurde entsprechend ein umfangreiches Set an Auswertungsvariablen herangezogen (siehe Kleinhüchelkotten et al., 2023).

Neben der Zustimmung zu verschiedenen Aussagen oder Wahrnehmungen wurden in Bezug auf das Heizen die Einstellungen an den Heizkörperventilen, Raumthermostaten o.ä. abgefragt, die – wenn abweichend – einheitlich auf eine sechsstufige Skala (0/*-5) transformiert wurden. Die im Sample befindlichen Wohnungen verfügen überwiegend über Zentralheizungen (56 %), seltener über Gas-Etagenheizungen (21 %) oder Fernwärme (20 %). Vereinzelt fanden sich noch Einzelöfen. Mechanische Lüftungssysteme kommen in 8 % der Wohnungen vor, wobei es sich hierbei – abgesehen von drei Fällen mit Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung, die nicht gesondert betrachtet wurden – um reine Abluftanlagen im Badezimmer handelt.

Die Angaben zum Heizen und Lüften wurden im Allgemeinen für die Räume einer „Normalwohnung“ (Wohnzimmer, Schlafzimmer, ggf. kombiniertes Wohn-/Schlafzimmer, Küche, Bad) abgefragt. Außerdem fanden drei Anwesenheitszustände (tagsüber und nachts bei Anwesenheit sowie tagsüber bei Abwesenheit) Berücksichtigung, wobei die jeweilige Zeitdauer anhand der Angabe der üblichen Abwesenheitsdauer des gesamten Haushalts an einem „normalen Werktag wie heute“ ermittelt wurde. Die Nacht wurde vereinfachend einheitlich mit acht Stunden angesetzt. Auf dieser Basis konnten Variablen für den Gesamttag (24 h-Betrachtung)

aggregiert werden. Beachtet wurden zudem technische „Sonderfälle“ (z.B. Regelung einer Gas-Etagenheizung mit Raumthermostat im Referenzzimmer und Thermostatventilen an den Heizkörpern, Vorhandensein einer Abluftanlage).

Für den Vergleich der hier im Fokus stehenden unterschiedlichen energetischen Qualitäten der Gebäudehülle wurde eine Variable gebildet, die – angesichts der Komplexität und Kleinteiligkeit dieser Thematik – dennoch gut handhabbar sein sollte. Dabei wurde der Bezug auf die konkrete Wohnung als wichtig erachtet, der insbesondere für teilsanierte Gebäude, in denen die Lage der Wohnung im Gebäude einen großen Einfluss auf den Energiebedarf haben kann, präzisere Aussagen ermöglicht. Demzufolge wurde der Dämmstandard der einzelnen Hüllbauteile der Wohnung herangezogen, wobei jeweils die Lage der Wohnung im obersten, in einem mittleren oder im untersten Geschoss berücksichtigt ist. Dies bedeutet, dass nur solche Bauteile in die Variablenbildung eingingen, die die Wohnung des befragten Haushalts auch tatsächlich umgeben. Die Beschreibung des Energiestandards der Wohnung erfolgte anhand der Variable f_{EN} . Sie ist definiert als Quotient aus den flächengewichteten U-Werten der tatsächlichen, die Wohnung umgebenden Hüllbauteile und den für den KfW-Effizienzhaus-Standard 100 notwendigen flächengewichteten U-Werten (siehe Tabelle 1). So entspricht beispielsweise bei einem $f_{EN,EG} = 1,0$ der Wärmeschutzstandard der Wohnung des Erdgeschosses gerade dem für ein KfW EH 100 nachzuweisenden Standard.

Tabelle 1: Auswertungsvariablen zur energetischen Gebäudequalität

Energetischer Gebäudezustand	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sanierung in Neubaustandards bzw. Vollsanierung gemäß jüngeren gesetzlichen Anforderungen ($f_{EN,Wohnung}$ bis 0,7 bzw. $f_{EN,Wohnung} >0,7$ bis 1,5; zusammengefasst wegen der kleinen Fallzahl im besten Segment) 2. Teilsanierung bzw. Sanierung der 1980/90er Jahre ($f_{EN,Wohnung} >1,5$ bis 2,5) 3. Teilsanierung mit wenigen Einzelmaßnahmen oder un-sanierter Bestand ($f_{EN,Wohnung} >2,5$)
Alter der Fenster	<ol style="list-style-type: none"> 1. vor 1978 2. 1978-1994 3. 1995-2001 4. ab 2002

Zudem wurde das Alter der Fenster in Klassen zusammengefasst, die sich an markanten Zeitpunkten der Wärmeschutzverordnung bzw. Energieeinsparverordnung orientieren. Fehlende Angaben zum

Fenstereinbau bei Baujahren vor 1995 wurden auf Basis der verfügbaren, baualterstypischen U-Werte ergänzt. Auf diese Weise konnten eine Klassifizierung der Dichtigkeit (zur Betrachtung des Lüftungsverhaltens) und die Plausibilisierung der Fenster-U-Werte (Vorhandensein einer Wärmeschutzverglasung zur Betrachtung des Heizverhaltens) vorgenommen werden.

Wesentliche Befragungsergebnisse zum Heizen und Lüften

Die Auswertungen der berichteten und – wie oben bereits beschrieben – teilweise aus anderen Regeleinrichtungen transformierten Thermostateinstellungen deuten auf ein allgemein sparsames Heizverhalten bezogen auf alle betrachteten (Wohn-)Räume hin. Dies gilt sowohl für eine 24 h-Betrachtung als auch für die verschiedenen An- und Abwesenheitssituationen, die jeweils hohe Anteile an Haushalten mit Thermostateinstellungen von 0 bis unter 1 aufweisen. Demnach haben je nach Raumnutzung zwischen 20 % und 50 % der Befragten ihre Heizung bezogen auf einen 24 h-Tag entweder vollständig ausgeschaltet oder nur für eine sehr kurze Dauer eingeschaltet. Das Wohnzimmer bzw. das kombinierte Schlaf-/Wohnzimmer wird dabei im Mittel tagsüber bei Anwesenheit von Personen in der Wohnung am stärksten geheizt (mittlere Thermostateinstellung von 2,3 bei Zentralheizung oder Fernwärme; 3,1 bei Gasetagenheizungen). Für Küchen und Schlafzimmer finden sich dagegen geringere Wünsche an die Raumtemperaturen (mittlere Thermostateinstellung jeweils etwa 1 bzw. 1,5).

Die Vergleiche der Thermostateinstellungen in Gebäuden mit unterschiedlicher energetischer Qualität zeigen keine Hinweise auf Rebound-Effekte: Haushalte in unsanierten Gebäuden wählen tagsüber bei Anwesenheit im Wohnzimmer signifikant höhere Thermostateinstellungen (mittlere Einstellung 2,9) als in teilsanierten Gebäuden (2,1) oder solchen in einem besseren energetischen Zustand (2,3). Zwar ist die Mehrheit der Befragten mit den in ihrer Wohnung erreichten Raumtemperaturen zufrieden, etwa jede/r zehnte Befragte empfindet sie jedoch als zu niedrig. Solche Befragte wohnen mehrheitlich in Gebäuden mit mittlerem (42 %) oder schlechterem energetischen Zustand (36 %).

Nach Auskunft der vermietenden Wohnungsgesellschaft wird bei Gebäuden mit Fernwärme oder Zentralheizung eine zentrale Nachtabsenkung auf 18 °C vorgenommen. Ein Großteil der Befragten ist sich dieser Regelung nicht bewusst. Gleichzeitig liegen jedoch die berichteten mittleren Thermostateinstellungen im tagsüber am meisten beheizten Wohnzimmer in der Nacht nach Angaben der Befragten deutlich geringer bei ca. 1,4-1,5. Bezogen auf Schlafzimmer, Küche und Bad wird in den Wohnungen mit der besten energetischen Qualität nachts signifikant seltener eine Temperatur-

absenkung vorgenommen als in energetisch schlechteren Wohnungen. Dies gilt bei stundenweiser Abwesenheit am Tag auch für das Wohnzimmer. Dabei sind jedoch die insgesamt niedrigeren Heizungseinstellungen in diesen Wohnungen zu berücksichtigen.

Im Hinblick auf längere Abwesenheiten, also wenn sich über mehrere Tage niemand in der Wohnung aufhält, haben über 80 % der Befragten angegeben, die Heizung dann ausnahmslos herunterzulegen.

Auch die aus der Retrospektive für eine kleine Teilgruppe erfragten Aussagen zu Veränderungen beim Wärmenutzungsverhalten infolge einer energetischen Sanierung liefern keine Hinweise auf Rebound-Effekte: Diese Befragten heizen nach der Modernisierung nach eigenen Angaben entweder weniger (66 % Zustimmung) oder genauso wie vor der Modernisierung (31 %). Ein gutes Drittel (35 %) startet nach eigenen Angaben zudem später in die Heizsaison.

Die Auswertungen zum Lüftungsverhalten ergaben, dass es insbesondere im Hinblick auf Wohn- und Schlafräume offenbar feste Fensteröffnungsroutinen gibt, wonach die Fenster zum Lüften entweder ausschließlich weit geöffnet oder ausschließlich gekippt bzw. spaltbreit geöffnet werden. Befragte, die für solche Zimmer im Tagesverlauf sowohl Stoß- als auch Kipp Lüftung angegeben haben, sind mit Anteilen zwischen 6 % und 10 % in der Minderheit. Für Küchen und Bäder wurde dagegen vergleichsweise häufiger die Antwortkategorie „das ist ganz verschieden“ gewählt (Küche 30 %, Bad ohne Abluftanlage 25 %), was auf einen eher situativen Charakter der dortigen Fensteröffnung hinweist. 11 % der insgesamt Befragten öffnen alle Fenster ihrer Wohnung in der gleichen Art und Weise, dabei beinahe ausschließlich in Stoßlüftung. Die präferierte Art des Fensteröffnens scheint zudem im Wesentlichen unabhängig davon zu sein, ob die Befragten erst Pflanzen o.ä. von den Fensterbänken räumen müssen oder nicht.

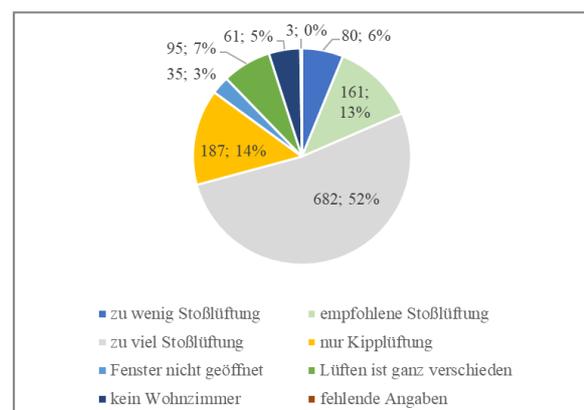


Abbildung 1: Angaben zur Fensteröffnung im Wohnzimmer (n = 1.304)

Die Abbildung 1 zeigt exemplarisch die erfragten Fensteröffnungspräferenzen für das Wohnzimmer.

Die Angaben zur Stoßlüftung wurden dabei zusätzlich entsprechend der Lüftungsempfehlungen von co2-online (ohne Jahr) kategorisiert, wonach die Befragten ihre Wohnzimmerfenster zur Stoßlüftung im optimalen Fall an einem kalten Wintertag etwa vier bis sechs Minuten (fünf Minuten +/- 20 %), an einem milden Tag etwa acht bis 12 Minuten (10 Min +/- 20 %) in 24 Stunden öffnen. Für die jeweilige Zuordnung lag die subjektive Einschätzung der Befragten zugrunde, ob es sich am Befragungstag um einen kalten oder milden Wintertag handelte. Diejenigen mit zu wenig Stoßlüftung liegen dementsprechend darunter, solche mit zu viel Stoßlüftung zum Teil deutlich darüber.

An einem „normalen Werktag“ öffnen die „Stoßlüfter“ im Mittel zwischen zwei- und dreimal ihre Fenster (Median zweimal). Allerdings zeigt sich auch eine große Spannweite: Es gibt Haushalte, die nur einmal am Tag stoßlüften, und andere, in denen im Wohnzimmer bis zu 15-mal oder in der Küche bis zu 20-mal die Fenster weit geöffnet werden. Auch bei der Dauer der Stoßlüftung gibt es sehr große Streuungen. Klammert man die Extremwerte (definiert als Werte größer als die Summe aus Mittelwert und einer Standardabweichung) aus, beträgt das arithmetische Mittel ca. eine halbe Stunde, der Median etwa 20 Minuten pro 24 h-Tag in Wohn-/Schlafräumen und Bädern, in der Küche mit etwa 25 Minuten etwas mehr. Maximal wurden dann bis zu zwei Stunden Stoßlüftung im Winter berichtet. Die ausschließlichen „Kipplüfter“ öffnen ihre Fenster in den einzelnen betrachteten Räumen im Tagesmittel sehr unterschiedlich: Im Wohnzimmer kippt die Hälfte der betreffenden Befragten nicht länger als anderthalb Stunden das Fenster an. Im Schlafzimmer beträgt der Median dagegen acht Stunden. Dabei handelt es sich oft um „klassische Nachtkipplüfter“. Auch in Bad und Küche werden die Fenster bezogen auf 24 Stunden eher länger gekippt bzw. spaltbreit geöffnet (Median: 6 Stunden bzw. 4 Stunden).

Je nach betrachtetem Zimmer bleiben nachts (Anteile zwischen 70 bis 84 %) und tagsüber bei Abwesenheit des gesamten Haushalts (72 bis 84 %) die Fenster in den meisten Fällen geschlossen.

Die berichteten Stoßlüftungsroutinen scheinen des Weiteren nicht durch die Außentemperaturen beeinflusst zu sein. Mittelwertvergleiche ergaben zumindest keine signifikanten Unterschiede zwischen Personen, die den Befragungstag subjektiv als mild bzw. kalt wahrgenommen haben. Im Hinblick auf die Kipplüftung ließ sich lediglich feststellen, dass an kalten Tagen das Badfenster signifikant öfter, jedoch mit signifikant kürzerer Dauer in Kippstellung gebracht wird. Diese Befunde decken sich auch mit den Ergebnissen, dass etwa 29 % der Befragten nach eigenen Angaben bei kälterer Witterung seltener und/oder kürzer, ca. 42 % an einem milden Wintertag häufiger und/oder länger ihre Fenster öffnen. In den jeweils meisten Fällen bleibt die Witterung somit

offenbar ohne Einfluss auf die Fensteröffnungsroutinen.

Ein Einfluss baulicher Merkmale auf das Fensteröffnungsverhalten und damit ein Hinweis auf Rebound-Effekte ließ sich mit Mittelwertvergleichen der Gruppen mit unterschiedlichem energetischen Gebäudezustand nicht feststellen. Einzig die Beschaffenheit der Fenster ist für sich allein genommen teilweise von Bedeutung. Bei Befragten, die im Wohnzimmer die Fenster üblicherweise per Stoßlüftung öffnen, ließen sich signifikante Gruppenunterschiede feststellen, wobei diejenigen mit den ältesten Fenstern vergleichsweise seltener (im Mittel 2,4-mal vs. 2,9-mal) und kürzer (im Mittel 30 Minuten vs. 49 Minuten) in 24 Stunden lüften. Bezogen auf diejenigen Befragten mit Kipplüftung sind die Ergebnisse weniger eindeutig und zeigen zum Beispiel, dass Befragte mit älteren Küchenfenstern diese vergleichsweise länger ankippen als solche mit jüngeren Fenstern (9,3 h vs. 5,8 h).

Einflussgrößen auf Rebound-Effekte aus ingenieurmäßiger Sicht

Zur Erklärung von Rebound-Effekten wird bisher die Raumtemperatur herangezogen. Sie liegt in modernisierten Gebäuden und Neubauten deutlich höher und wird mit erhöhten Komfortansprüchen der Nutzer in Verbindung gebracht. Die nun folgenden energetischen Betrachtungen sollen zeigen, dass es viele weitere, verschiedenartige Einflüsse auf Rebound-Effekte gibt und die festgestellten Abweichungen zwischen Bedarf und Verbrauch keineswegs allein dem Nutzer zugeschrieben werden sollten.

Der zugrundeliegende Forschungsbericht [Grafe, M. 2023] beinhaltet neben den hier vorgestellten Ergebnissen der stationären Energiebilanzierung noch zwei weitere Teile. Der Hinweis darauf und ein kurzer Abriss sind wichtig, um klar zu machen, dass in den anschließend vorgestellten energetischen Betrachtungen nur ein Teil der Einflussgrößen auf Rebound-Effekte detailliert behandelt wird.

So werden zu Beginn des Berichtes die vielfältigen Aspekte benannt und qualitativ betrachtet. Schwierigkeiten bei der Ermittlung von Größen ergeben sich sowohl auf der Verbrauchs- als auch auf der Bedarfsseite. – „Vollständigkeit des Verbrauchs“ z.B. bei Nutzung von Solarenergie; „Einfache Berücksichtigung“ z.B. Abgrenzung des Verbrauchs von Wärmepumpen, Lüftungsanlagen und Haushaltsstrom; „Lagerhaltung, Mengenermittlung“ z.B. Öl, Scheitholz; Abgrenzung von Verbräuchen für Heizung und Warmwasser einschließlich Verteilverlusten; Raumtemperaturen; Lüftung; Lokalklima. Diese Vielfalt zeigt, dass eine alleinige Zuordnung der Abweichungen zwischen Energiebedarf und -verbrauch zum Nutzer der Komplexität der Wärmetransportvorgänge im Gebäude nicht gerecht wird und als falsch anzusehen ist.

Der Bericht schließt mit energetischen Berechnungen, in denen der Einfluss der Raumtemperatur in zeitlich höher Auflösung genauer betrachtet wurde. Diese Ergebnisse wurden bereits vorgestellt [Grafe, M. 2019], sollen dennoch kurze Erwähnung finden. Für ein fiktives Beispielgebäude wurden ein energetisch nicht modernisierter und ein modernisierter Zustand mit hohem Dämmstandard der Gebäudehülle untersucht. Für beide energetische Gebäudezustände wurden in Varianten die gleichen Nutzertypen und ein identischer Anlagenbetrieb angenommen. Es ergaben sich über die Heizperiode gemittelte Raumtemperaturen, die sich vor und nach energetischer Modernisierung um bis zu 3 Grad Kelvin voneinander unterscheiden. Die höheren Raumtemperaturen resultieren allein aus dem verbesserten Wärmeschutz der Gebäudehülle und sind in den vorliegenden Berechnungsbeispielen nutzerunabhängig. Damit wurde gezeigt, dass die Raumtemperatur keine rein nutzerabhängige Größe ist, im untersuchten Spezialfall sogar gänzlich nutzerunabhängig. So wurde auch die häufig anzutreffende Annahme widerlegt, dass allein erhöhte Komfortansprüche des Nutzers für höhere Raumtemperaturen nach energetischer Modernisierung und die damit verbundenen Rebound-Effekte verantwortlich seien.

Beispielhafte Betrachtung ausgewählter Einzeleinflüsse und deren Zusammenwirken

Zur Quantifizierung von Rebound-Effekten ist die Gegenüberstellung des Verbrauchs mit seinem Erwartungswert – einem berechneten Energiebedarf – unabdingbar. Im hier betrachteten Beispiel darf für viele relevante Größen zu Gebäudekubatur, Wärmeversorgungssystem und Verbrauchsdaten von sicheren bzw. sehr guten Angaben ausgegangen werden. Das ist im Rahmen von Untersuchungen zu Rebound-Effekten keineswegs selbstverständlich! Mit den vorliegenden Daten wurde unter Verwendung des IWU-Tools EnEV-XL zunächst ein normnaher Energiebedarf berechnet. Anschließend wurden die Parameter Lokalklima, Raumtemperatur, Luftwechselrate und technische Verteilverluste variiert.

Beispielgebäude

Bei den untersuchten Gebäuden handelt es sich um Wohngebäude der 1930er Jahre. Es sind zwei Gebäude mit zwei Vollgeschossen, ausgebautem Dachgeschoss und ohne Keller. Die Baukörper sind relativ kompakt mit rechteckigem Grundriss, der eine deutlich größere Breite als Tiefe aufweist, einer Lochfassade mit einem baualterstypischen, eher kleinen Fensterflächenanteil und nach oben hin abgeschlossen durch ein Walmdach mit einigen Dachgauben. Bis auf die Anzahl der Dachgauben ist die Geometrie beider Gebäude nahezu identisch, sodass beide Gebäude durch das gleiche Modell für

die Energiebilanzierung abgebildet werden können. Alle Varianten des Energiebedarfs müssen folglich nur einmal berechnet werden und können den Verbräuchen beider Gebäude gegenübergestellt werden. Die Wohnfläche beider Gebäude beträgt in Summe 1140 m². Sie verteilt sich auf insgesamt 20 Wohnungen. Baulich befinden sich die Gebäude weitgehend im ursprünglichen Zustand. Lediglich die Fenster wurden erneuert, seinerzeit jedoch noch mit Zweischeiben-Isolierverglasung. Damit gelten sie nach heutigen Maßstäben als energetisch nicht modernisiert. Die Wärmeversorgung erfolgt über eine Blockheizung, das heißt durch die gemeinsame Nutzung eines Gaskessels für beide Gebäude zur Heizung und zur Warmwasserbereitung. Die Wärme wird durch ein im Erdreich verlegtes Leitungssystem von einem Gebäude zum zweiten transportiert.

Lokalklima

Der Einfluss des Lokalklimas kann entweder durch Korrektur des Verbrauchs (Klimafaktoren) oder bei der Bedarfsberechnung berücksichtigt werden. Zur Betrachtung von Rebound-Effekten ist Letzteres zu bevorzugen. Das Lokalklima wird in diesem Beispiel bei der Berechnung des Bedarfs berücksichtigt, der dann dem gemessenen, nicht angepassten Verbrauch gegenübergestellt wird. Das ist zwar aufwendiger, verspricht aber unabhängig vom Energiestandard der untersuchten Gebäude eine bessere Berücksichtigung des Lokalklimas als bei der Gegenüberstellung des mit einem Klimafaktor angepassten Verbrauchs mit dem nach Standardklima Deutschland berechneten Bedarf.

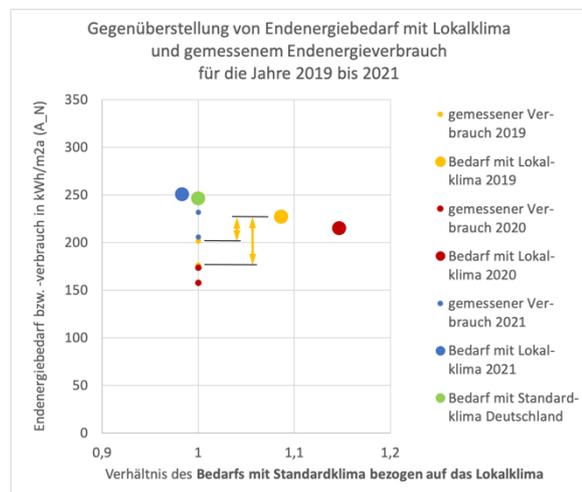


Abbildung 2: Gemessene Endenergieverbräuche und normnah, jedoch mit Lokalklima berechnete Endenergiebedarfe

Die in den beiden Gebäuden gemessenen Verbräuche weichen gegenüber den Bedarfen mit Lokalklima des jeweiligen Betrachtungsjahres um -7%...-27% bzw. -19%...-57 kWh/m²a ab. In Abbildung 2 sind die Abweichungen der gemessenen Verbräuche für das Jahr 2019 (gelbe Punkte) gegenüber dem Bedarf mit

Lokalklima des Betrachtungsjahres (gelb gefüllter Kreis) durch Pfeile dargestellt.

Durch die Berücksichtigung des Lokalklimas ergibt sich ein für energetisch nicht modernisierte Gebäude typisches Bild. In kälteren Jahren liegen die Verbräuche etwas höher und auch die Erwartungswerte des Verbrauchs (mit Lokalklima berechnete Bedarfe) unterscheiden sich zwischen wärmeren und kälteren Jahren. Weiterhin liegen die Verbrauchswerte generell unter den Bedarfswerten. An dieser Stelle wird bei der Betrachtung von Rebound-Effekten gewöhnlich die Berechnung abgebrochen und die verbleibende Abweichung dem Nutzerverhalten zugeschrieben. Das vernachlässigt aber, dass viele weitere nutzerabhängige und -unabhängige Parameter in der Bedarfsberechnung normgetreu angesetzt werden, von denen praktisch keineswegs sicher angenommen werden kann, dass sie in diesen Größen im Gebäude auch vorliegen bzw. wirken. Um den Blick zu weiten, sind nun weitere Einflussgrößen in der Bedarfsberechnung zu variieren, um so einen Eindruck von deren Einflüssen auf die Höhe des Bedarfs resp. des erwarteten Verbrauchs zu gewinnen. Dies soll für drei dieser Parameter – die Raumtemperatur, die Luftwechselrate und die technischen Verteilverluste – geschehen.

Raumlufttemperatur, Luftwechselrate und technische Verteilverluste

In den Varianten des Energiebedarfs sind die hier untersuchten Parameter Raumtemperatur, Luftwechselrate und technische Verteilverluste jeweils in drei verschiedenen Ausprägungen berücksichtigt worden.

Die Raumlufttemperatur und die Luftwechselrate werden in einer praktisch in Mehrfamilienhäusern zu erwartenden Bandbreite variiert.

Raumlufttemperatur:

- 17°C – geringe Temperatur
- 19°C – mittlere Temperatur
- 21°C – hohe Temperatur

Luftwechselrate:

- 0,2 h⁻¹ – geringe Luftwechselrate
- 0,7 h⁻¹ – mittlere bzw. etwas erhöhte Luftwechselrate und gleichzeitig Annahme im öffentlich-rechtlichen Nachweis nach DIN V 4108/4701 (Norm)
- 1,0 h⁻¹ – hohe Luftwechselrate

Die technischen Verteilverluste werden hingegen in einer Bandbreite variiert, die praktisch für das vorhandene Wärmeversorgungssystem der untersuchten Gebäude erwartet werden darf. Angaben zu Wärmeerzeuger, Speicherung und Übergabe werden aus den Gebäudedaten für alle Varianten gleich übernommen. Die Verteilverluste der Varianten gering/mittel/hoch unterscheiden sich nach den für diese Gebäude (in seinem derzeitigen energetischen Zustand) erwarteten Baualterklassen der Verteilsysteme für Heizung und Warmwasser.

Tabelle 2: Endenergiebedarfe mit Lokalklima für das Jahr 2019 bei Variation von Raumtemperatur, Luftwechselrate sowie technischen Verteilverlusten

Untersuchungsjahr 2019

Raumsolltemperatur		Luftwechselrate		
		gering	Norm	hoch
gering	tVv gering	146	166	178
	tVv mittel	170	190	202
	tVv hoch	174	194	206
mittel	tVv gering	179	203	217
	tVv mittel	202	227	241
	tVv hoch	207	231	245
hoch	tVv gering	211	240	257
	tVv mittel	232	260	277
	tVv hoch	252	281	298

tVv - technische Verteilverluste

Ceteris-paribus-Betrachtung der Bedarfe bei Änderung der Raumtemperatur, Luftwechselrate bzw. technischen Verteilverluste

Raumtemperatur mittel – gering: 33 ... 39 kWh/m²a

Raumtemperatur hoch – gering: 62 ... 92 kWh/m²a

Luftwechselrate mittel – gering: 20 ... 28 kWh/m²a

Luftwechselrate hoch – gering: 32 ... 45 kWh/m²a

techn. Verteilverluste mittel – gering: 21 ... 24 kWh/m²a

techn. Verteilverluste hoch – gering: 28 ... 41 kWh/m²a

In Tabelle 2 sind die berechneten Endenergiebedarfe aller 27 Varianten für das Jahr 2019 zusammengefasst. In Abbildung 3 werden die Varianten durch je zwei Marker dargestellt – einen Querstrich für die Luftwechselrate und einen Kreis für die Verteilverluste. Die normnah unter Verwendung des Lokalklimas berechnete Variante (in Abbildung 2 gelb gefüllter Kreis) ist mit einem Endenergiekennwert von 227 kWh/m²a enthalten. Die drei Parameter sind hierbei als „mittel“ (Raumsolltemperatur, technische Verteilverluste) bzw. „Norm“ (Luftwechselrate) angesetzt. Die Bandbreite der Kennwerte aller für 2019 berechneten Varianten reicht von 146 bis 298 kWh/m²a. Diesen Varianten gegenübergestellt sind der normnah mit Standardklima berechnete Bedarf (grün gefüllter Kreis) und die gemessenen, nicht angepasste Verbräuche. Da die Raumtemperaturen nicht bekannt sind, unter denen die Verbräuche zustande gekommen sind, sind die Verbrauchsmesswerte hier nicht über einer bestimmten Temperatur sondern als gepunktete Linien eingezeichnet.

Für das Jahr 2019 liegen alle Berechnungsergebnisse der Bedarfe für die „hohe“ Raumsolltemperatur von 21°C über beiden Messwerten des Energieverbrauchs. Davon ausgehend, dass alle weiteren variierten bzw. fest angenommenen Parameter zutreffend wären, könnte geschlossen werden, dass die Raumsolltemperatur in den Gebäuden wohl eher im Bereich 17 bis 19°C liegen dürfte. Die besten Übereinstimmungen zwischen Bedarfen und Verbräuchen ergeben sich hier für Varianten mit geringer Raumsolltemperatur und mittleren bis hohen Luftwechselraten und Verteilverlusten und für Varianten

mit mittlerer Raumsolltemperatur mit geringen (bis mittleren) Luftwechselraten und Verteilverlusten.

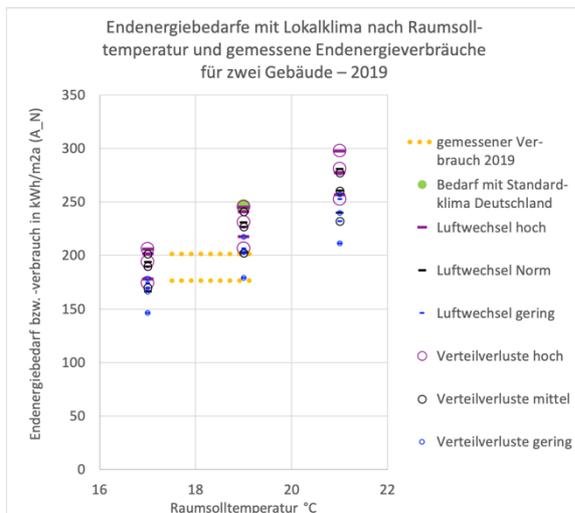


Abbildung 3: Gemessene Endenergieverbräuche und berechnete Endenergiebedarfe für das Jahr 2019

Im Beispiel können gute Übereinstimmungen zwischen Bedarf und Verbrauch erzielt werden in Fällen, in denen das Nutzerverhalten eher positiv bis durchschnittlich angesehen wird (dann mit mittleren technischen Verteilverlusten). Daraus sollte jedoch nicht voreilig der Schluss gezogen werden, dass das auch so ist. Die Berechnungen wurden unter einer ganzen Reihe von weiteren Annahmen durchgeführt, die für alle Varianten unverändert zum Ansatz gekommen sind. Insbesondere die Annahmen zum Wärmeschutz und den Bauteilflächen der Gebäudehülle wirken sich auf die Höhe der berechneten Energiekennwerte aus. Auch die Betrachtung der anderen beiden Untersuchungsjahre (hier nicht dargestellt) hat zeigt, dass bei sonst gleichen Annahmen in der Gegenüberstellung von Bedarfen und Verbräuchen Unterschiede durch das Lokalklima des Untersuchungsjahres möglich sind. Eine nutzerunabhängige Verschiebung aller Ergebnisse nach oben oder nach unten ist also aus verschiedenen Gründen denkbar. Dann würde sich das Feld mit einer guten Übereinstimmung zwischen Bedarfen und Verbräuchen in einen anderen Bereich verschieben und bei alleiniger Betrachtung dieser weiteren Fälle für die gleichen Gebäude und die gleichen Nutzer gegebenenfalls andere Schlüsse gezogen.

Fazit und Ausblick für künftige energetische Betrachtungen zu Rebound-Effekten

• Für die Gegenüberstellung von Bedarfen und Verbräuchen zur Betrachtung von Rebound-Effekten ist eine Bedarfsberechnung unter Verwendung des Lokalklimas ein erster notwendiger Schritt. Der so berechnete Bedarf wird dem gemessenen, nicht angepassten Verbrauch gegenübergestellt. Die weiteren Einflussgrößen können anhand vorliegender Daten in der Bedarfsberechnung angepasst und

dementsprechend der Versuch einer schrittweisen Annäherung an einen wirklichkeitsnahen Bedarf vorgenommen werden.

• Die Variation nutzerabhängiger und nutzerunabhängiger Parameter in der Bandbreite praktischer möglicher Ausprägungen liefert Hinweise zum möglichen Einzeleinfluss eines jeden Parameters auf den berechneten Bedarf. Die so bestimmten Einflüsse sind gebäudeindividuell und damit nicht allgemein übertragbar. Im untersuchten Beispiel wurden neben den nutzerabhängigen Parametern Raumsolltemperatur und Luftwechselrate auch die technischen Verteilverluste als nutzerunabhängiger Parameter variiert. Auf die Variation des Wärmeschutzes der Gebäudehülle und des Wärmeerzeugers konnte wegen der (praktisch außergewöhnlich) guten Datenlage verzichtet werden. Alle untersuchten nutzerabhängigen und nutzerunabhängigen Parameter beeinflussen den berechneten Bedarf deutlich. Außerhalb des Beispiels würden auch die weiteren wesentlichen nutzerunabhängigen Parameter (Wärmeschutz und Flächen der Gebäudehülle, Wärmezeugung) ähnlich deutlich wirken. Es gibt also vielfältige, gebäudeindividuelle Einflüsse auf die Höhe des berechneten Energiebedarfes. Am Beispiel konnte gezeigt werden, dass für die meisten dieser Einflüsse zu wenige Informationen vorliegen, um die Bandbreite möglicher Ausprägungen eng zu halten. Das erschwert die Trennung nutzerabhängiger und nutzerunabhängiger Einflüsse und damit die Beschreibung bzw. gar die Quantifizierung von Rebound-Effekten.

• Die Verbräuche der zwei untersuchten, quasi identischen Gebäude sind verschieden. Ob diese Unterschiede nutzerabhängig und/oder nutzerunabhängig zustande gekommen sind, kann mit den vorliegenden Daten nicht geklärt werden. Die unterschiedlichen Verbräuche zeigen aber auch, dass es nicht angebracht erscheint, aus der für einzelne Varianten ablesbaren, guten Übereinstimmung zwischen Bedarf und Verbrauch ableiten zu wollen, dass die dort getroffenen Annahmen zu Raumtemperatur, Luftwechselrate und technischen Verteilverlusten „zutreffend“ wären. Der Versuch solcher Rückschlüsse würde zwischen den beiden Gebäuden zu verschiedenen, als „zutreffend“ angesehen Annahmen führen. Je nach Untersuchungsjahr ergäben sich für beide Gebäude wieder andere, als „zutreffend“ angesehene Annahmen.

• Obwohl die stationäre Energiebilanzierung zur Bereitstellung eines Erwartungswertes des Energieverbrauchs (berechneter Energiebedarf) bereits eine aufwendige Methode darstellt, verbleiben Unsicherheiten in der Nachbildung der energetischen Zusammenhänge im Gebäude. Art, Umfang und Qualität der praktisch vorliegenden Daten lassen mit dieser Methode nicht zu, die nutzerabhängigen und nutzerunabhängigen Einzeleinflüsse auf den Rebound-Effekt zu quantifizieren.

• Die Methode der stationären Energiebilanzierung lässt nur an allen Tagen gleichbleibende Annahmen zu. Die Bedürfnisse des Nutzers stehen hingegen in Wechselwirkung mit der Umgebung. Das Lüftungsverhalten ist beispielsweise Außentemperaturabhängig und so zumindest saisonal verschieden. Aber auch die Raumtemperatur, die in den vorangegangenen Betrachtungen (der Methode geschuldet) als synonym zur Raumsolltemperatur angesehen werden musste, ist keine rein vom Nutzer abhängige Größe. Auf die starken Wechselwirkungen zwischen Wärmeschutz, Anlagenbetrieb und Nutzer und deren Auswirkungen auf die Raumtemperatur wurde eingangs hingewiesen. So soll an dieser Stelle erneut für künftige Studien zu Rebound-Effekten sensibilisiert werden, Temperaturmesswerte – insbesondere höhere Raumtemperaturen in Gebäuden mit höheren Energiestandards – nicht automatisch und vollständig dem Nutzer zuzuordnen. Denn es wurde in [Quelle BPT2019] gezeigt, dass es nach energetischer Modernisierung auch bei identischem Nutzerverhalten zu mitunter deutlich höheren Temperaturen kommen kann.

Zusammenfassung

In künftigen Studien zu Rebound-Effekten sind die Einzeleinflüsse des Nutzers, der Gebäudehülle, der Anlagentechnik und des -betriebes sowie des Lokalklimas in ihrem Zusammenwirken bzw. in ihren Wechselwirkungen zu betrachten. Das gilt für alle möglichen energetischen Zustände der zu untersuchenden Gebäude. Aus dem Zusammenwirken dieser verschiedenartigen Einzeleinflüsse können sich immernoch Prebound- bzw. Rebound-Effekte ergeben. Die hier vorgestellten Berechnungen haben aber gezeigt, dass der nutzerabhängige bzw. dem Nutzer zuzuordnende Anteil der Abweichungen zwischen Bedarf und Verbrauch nicht quantifizierbar ist. Exemplarisch konnte gezeigt werden, dass Rebound-Effekte auch ganz ohne Nutzereinfluss entstehen können. Ein ähnliches Bild ergibt sich aus den Befragungsergebnissen. Sowohl für Heizen als auch für Lüften konnten für alle energetischen Zustände der Wohnungen deutlich voneinander abweichende Gewohnheiten festgestellt werden. Das Zusammenwirken von Nutzer und Wohnung konnte vereinzelt gezeigt werden (z.B. späterer Heizbeginn in hohen Energiestandards oder auch Lüftungsdauer nach Dichtigkeit der Fenster), jedoch ohne ein substantiell geändertes, auf erhöhte Komfortansprüche hindeutendes Nutzerverhalten ausmachen zu können.

Danksagung

Ein Glücksfall für das Gelingen des Forschungsprojektes KOSMA war unser Praxispartner, die Nassauische Heimstätte Wohnungs- und Entwicklungsgesellschaft mbH mit ihrem Abrechnungsdienst, der MET Hessen. Sie haben mit großem Engagement und qualitativ hochwertigen Gebäude- und

Verbrauchsdaten sehr wertvolle Beiträge geleistet. Herzlichen Dank hierfür!

Literatur

- co2online, ohne Jahr. Online-Quelle: <https://www.co2online.de/energie-sparen/heizenergie-sparen/lueften-lueftungsanlagen-fenster/richtig-lueften/#c115399> (letzter Zugriff: 12.12.2023)
- Kleinhüchelkotten, S. et al. 2023. Determinanten des Heiz- und Lüftungsverhaltens in Miethaushalten. KOSMA-Werkstattbericht Nr. 3. Hannover, Darmstadt.
- Grafe, M. 2023. Einflüsse und Wechselwirkungen nutzerabhängiger und -unabhängiger Aspekte auf Energiebedarf und -verbrauch von Wohngebäuden. KOSMA-Werkstattbericht Nr. 4. Darmstadt.
- Grafe, M. 2019. Ursachen für Rebound-Effekte bei der energetischen Modernisierung von Wohngebäuden – Welche Rolle spielt der Nutzer?, Tagungsbeitrag Bauphysiktage Weimar 2019

SESSION B · 06.03.2024

Thema: Wärmeschutz

Kooperationspartner

R
P **TU** Rheinland-Pfälzische
Technische Universität
Kaiserslautern
Landau

Bauhaus-
Universität
Weimar

WBA

WBA | Bauhaus Weiterbildungs-
akademie Weimar e.V.
Institut an der
Bauhaus-Universität Weimar



SOMMERLICHER WÄRMESCHUTZ DER ZUKUNFT

Marco Hartner¹, Christoph Beecken², Svenja Carrigan¹, Oliver Kornadt¹

¹ Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau, Deutschland,

E-Mail: marco.hartner@rptu.de

² bow ingenieure gmbh, Deutschland, E-Mail: mail@bow-ingenieure.de

Kurzfassung

Der sommerliche Wärmeschutz wird nach dem Gebäudeenergiegesetz (GEG) [1] unter Zuhilfenahme der DIN 4108-2 [2] nachgewiesen. Das aktuelle Nachweisverfahren stützt sich hierbei auf Testreferenzjahre von 2010. Vor dem Hintergrund des Klimawandels und der langen Standzeit von Gebäuden erscheint der alleinige Bezug auf das Testreferenzjahr 2010 nicht sinnvoll. Auch existieren bereits mittlere Testreferenzjahre von 2015 und 2045 sowie sommerfokussierte Testreferenzjahre für 2015 und 2045. Für den sommerlichen Wärmeschutz ist bei gegebenen Randbedingungen wie Raumabmessungen, Fenstergröße usw. eine Betrachtung des Energiedurchlassgrades sowie der Verschattungsmöglichkeit von Fenstern essentiell. An einem Beispielraum wird aufgezeigt, wie sich die Einflussgrößen unter Ansatz der unterschiedlichen Testreferenzjahre auf den sommerlichen Wärmeschutz auswirken. Hieraus folgt, dass Kombinationsmöglichkeiten aus Energiedurchlassgrad und Verschattung, welche den aktuellen Nachweis mit dem Testreferenzjahr 2010 erfüllen, bei Zugrundelegung der Testreferenzjahre 2015 und 2045 teilweise nicht mehr ausreichend sind.

Abstract

The summer thermal protection is verified in accordance with the Gebäudeenergiegesetz (GEG - German Building Energy Law) with the use of DIN 4108-2. The current verification method is based on test reference years from 2010, but there exist already average test reference years from 2015 and 2045 as well as summer-focused test reference years for 2015 and 2045. For summer thermal protection, it is essential to analyse the energy transmittance and the shading possibilities of windows for existing boundary conditions such as room dimensions, window size, etc. The impact of changing influencing parameters due to different test reference years is shown using an example room how the influencing variables behave when using the different test reference years. This shows that possible combinations of energy transmittance and shading, which fulfil the current verification with the test reference year 2010, are no longer sufficient in part when the test reference years 2015 and 2045 are used as a basis.

Einführung

Das aktuelle Nachweisverfahren nach dem Gebäudeenergiegesetz (GEG) sieht eine Begrenzung der operativen Raumtemperaturen im Sommer vor. Dies soll möglichst ohne zusätzlichen Energieeinsatz erreicht werden. Ein besonderes Augenmerk liegt hierbei auf den transparenten Bauteilen der Gebäudehülle, da durch diese ein Energieeintrag stattfindet, welcher zu erhöhten Innenraumtemperaturen führen kann. Weiter haben insbesondere das Lüftungskonzept [3], die Verschattungsmöglichkeiten sowie die baulichen Gegebenheiten [4] wesentlichen Einfluss auf das sommerliche Innenraumklima.

Hinsichtlich des Außenklimas stützt sich das aktuelle Nachweisverfahren des sommerlichen Wärmeschutzes auf Wetterdaten der Testreferenzjahre (TRY) von 2010. Eine zukünftige Klimaveränderung bleibt hierbei außer Acht. Im Hinblick auf den fortschreitenden Klimawandel besteht daher beim sommerlichen Wärmeschutz Handlungsbedarf.

In diesem Beitrag wird durch thermische Gebäudesimulationen an einem Beispiel aufgezeigt, wie sich Änderungen des Klimas auf den Innenraum auswirken. In Abhängigkeit unterschiedlicher Klimadatensätze kann ermessensweise, welche Maßnahmen für die Erbringung des derzeit geltenden Nachweises ergriffen werden müssen und welche möglichen baulichen und planerischen Maßnahmen weiter für den fortschreitenden Klimawandel zu berücksichtigen sind, um auch zukünftig den sommerlichen Wärmeschutz gewährleisten zu können.

Methodik

Für die Durchführung der Simulationen wird das thermische Gebäudesimulationsprogramm TRNSYS [5] herangezogen. Als grafische Grundlage für die Simulation dient ein Sketchup-Modell des Beispielraums nach Abbildung 1.

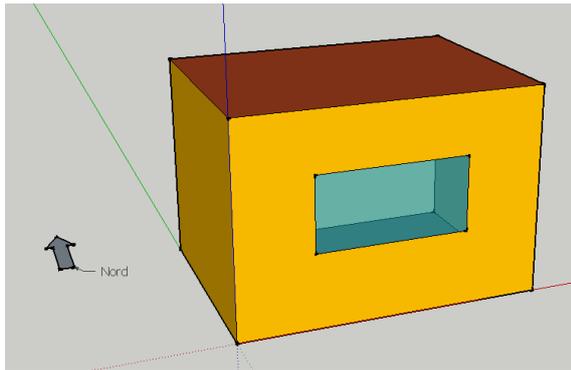


Abbildung 1: Sketchup-Modell des Beispielraums

Der Raum besitzt eine Grundfläche von 12 m^2 ($4 \text{ m} \times 3 \text{ m}$). Die lichte Raumhöhe wurde mit $2,8 \text{ m}$ angenommen. Das 2 m^2 große Fenster ($2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$) ist hierbei nach Süden ausgerichtet. Die südliche Fassade grenzt an das Außenklima. Für alle weiteren Raumumschließungsflächen werden adiabate Bedingungen angesetzt. Alle raumseitigen Wand-, Boden- und Deckenkonstruktionen werden als Massivbauteile berücksichtigt, so dass von einer schweren Bauweise ausgegangen werden darf. Für den Wärmedurchgangskoeffizienten der Außenwand (Südwand) wird in Anlehnung an das Referenzgebäude nach GEG ein Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) von $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ gewählt.

Für die Konditionierung des Raumes werden die Randbedingungen der DIN 4108-2 für Wohngebäude übernommen. Somit wird eine Nutzungszeit von 0:00 Uhr bis 24:00 Uhr berücksichtigt. Der anzusetzende mittlere interne Wärmeeintrag von $100 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \text{ d})$ wird auf den stündlichen Wert von $15 \text{ kJ}/(\text{h m}^2)$ umgerechnet. Die Raumsolltemperatur in der Heizperiode wird mit 20 °C vorgegeben. Zunächst wird ein über den Tag konstanter Luftwechsel von $0,5$ pro Stunde angesetzt. Konform zu DIN 4108-2, die bei Möglichkeit der nächtlichen Fensterlüftung den Ansatz erhöhter Luftwechsel zulässt, wird in der Zeit von 23:00 Uhr bis 6:00 Uhr eine erhöhte Nachtlüftung mit einem Luftwechsel von $2,0$ pro Stunde angesetzt.

Die Simulation berücksichtigt eine strahlungsabhängige Ansteuerung der Sonnenschutzanlage. Dabei ergibt sich die Grenzbestrahlungsstärke für die Aktivierung des Sonnenschutzes für eine südliche Fensterausrichtung zu $300 \text{ W}/\text{m}^2$. Die Art der Verschattung und die damit einhergehende Abminderung des Energieeintrags (F_c -Werte) wurde nach Tabelle 7 der DIN 4108-2 festgelegt. Die verwendeten Werte sind Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: F_c -Werte als Grundlage der Abminderung

F_c -WERT	BESCHREIBUNG
0,10	ROLLLADEN GESCHLOSSEN
0,25	JALOUSIE LAMELLENSTELLUNG 45°
0,30	ROLLLADEN $\frac{3}{4}$ GESCHLOSSEN
0,50	VORDÄCHER, MARKISEN

Bezüglich der Fenster sieht das GEG für das Referenzgebäude einen U-Wert von $1,3 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ vor. Von besonderer Wichtigkeit für die Betrachtung der sommerlichen Überhitzung ist jedoch auch der Energiedurchlassgrad (g-Wert) des Fensters. Die gewählten Werte können Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2: U- und g-Werte der gewählten Fenster

U-WERT	g-WERT
1,37	0,70
1,34	0,63
1,36	0,41
1,36	0,33

Für die Außenklimabedingungen werden unterschiedliche Testreferenzjahre (TRY) desselben Standortes herangezogen. Als Standort wird in diesem Beispiel Potsdam gewählt, der die Sommerklimaregion B nach dem aktuellen Nachweisverfahren repräsentiert.

Für den Vergleich werden neben dem nach GEG zu verwendenden TRY 2010 vier weitere TRYs herangezogen. Zurückgegriffen wird auf ortsgenaue Testreferenzjahre für Deutschland, die das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst für gegenwärtige und zukünftige (jeweils mittlere und extreme) Witterungsverhältnisse erstellt hat [6]. Auf diese Weise liegen dem Vergleich neben dem TRY 2010 für den selben Standort mittlere Testreferenzjahre von 2015 und 2045 sowie extreme sommerfokussierte Testreferenzjahre für 2015 und 2045 zugrunde.

Die Bewertung der sommerlichen Überhitzung erfolgt anhand der operativen Übertemperaturgradstunden, welche sich für den Raum ergeben.

Die operative Temperatur beschreibt die gefühlte Temperatur. Sie ergibt sich unter Berücksichtigung der Raumlufttemperatur sowie der mittleren Strahlungstemperatur und der Luftgeschwindigkeit. Vereinfacht kann, wie auch in diesem Beispiel, die operative Temperatur bei üblichen Luftgeschwindigkeiten in Wohngebäuden als

Mittelwert der Raumlufttemperatur und der mittleren Strahlungstemperatur angenommen werden.

Die Übertemperaturgradstunden beziehen sich jeweils auf einen Bezugswert der operativen Temperatur. Dieser Wert ist für die jeweiligen Klimaregionen durch die Adaption des Menschen [7] an äußere Bedingungen nach Tabelle 9 der DIN 4108-2 angegeben. Für den hier betrachteten Standort Potsdam (Klimaregion B) beträgt der Bezugswert 26 °C (operativ). Wenn die operative Innenraumtemperatur diesen Wert überschreitet, wird diese Überschreitung stündlich über das Jahr aufsummiert.

Die DIN 4108-2 legt in Tabelle 9 weiterhin die maximale Anzahl der Übertemperaturgradstunden fest, die nicht überschritten werden darf. Für Wohngebäude liegt diese Grenze bei 1200 Kh/a.

Ergebnisse

Als Ausgangsvariante der hier gezeigten Untersuchung werden die Randbedingungen nach DIN 4108-2 sowie das für den aktuellen Nachweis erforderliche Testreferenzjahr von 2010 hinterlegt. Hierbei sei angemerkt, dass hinsichtlich der Lüftung durchgängig eine Luftwechselrate von 0,5 (keine erhöhte Nachtlüftung) angesetzt wird. In Tabelle 3 werden die Werte der Übertemperaturgradstunden in Abhängigkeit der Verschattung (nach Tabelle 1) und der Fenster (nach Tabelle 2) aufgezeigt. Grün hinterlegt sind die Übertemperaturgradstunden, welche unter der Maximalgrenze liegen, rot hinterlegt die darüber liegenden Werte.

Tabelle 3: Übertemperaturgradstunden für TRY 2010 ohne erhöhte Nachtlüftung in Abhängigkeit von Sonnenschutz und Fensterart

U-Wert	1,37	1,34	1,36	1,36	
g-Wert	0,70	0,63	0,41	0,33	
Fc	0,10	2890	2290	414	76
	0,25	4962	3995	1055	371
	0,30	5729	4639	1303	525
	0,50	9797	7827	2465	1256

In Tabelle 3 ist zu erkennen, dass bei Verwendung eines Fensterglases mit einem geringeren Energiedurchlassgrad (g-Wert) die Übertemperaturgradstunden deutlich sinken.

Analog verhält es sich bei Verwendung eines Sonnenschutzes mit einem geringen F_c-Wert. Ein kleinerer F_c-Wert steht hierbei für eine effektivere Verschattung des Fensters. Hierbei gilt es zu beachten, dass ein F_c-Wert von 0,1 einem geschlossenen Rollladen entspricht. In einem solchen Fall müsste unter Umständen fehlendes Tageslicht durch künstliche Beleuchtung unter Energieeinsatz ausgeglichen werden. Wegen dieser Prämisse soll dieser Wert nach DIN 4108-2 nicht für den Nachweis

des sommerlichen Wärmeschutzes herangezogen werden.

Unter diesen Voraussetzungen ist ein Fenster mit einem niedrigen g-Wert (kleiner 0,63) und mit einer ausreichenden Verschattung nötig, um den sommerlichen Wärmeschutz gemäß DIN 4108-2 zu gewährleisten.

Zur Reduzierung der Übertemperaturgradstunden wird im nächsten Schritt eine Variante mit erhöhter Nachtlüftung von 2,0 pro Stunde hinterlegt.

Tabelle 4: Übertemperaturgradstunden für TRY 2010 mit erhöhter Nachtlüftung in Abhängigkeit des Sonnenschutzes sowie der Fenster

U-Wert	1,37	1,34	1,36	1,36	
g-Wert	0,70	0,63	0,41	0,33	
Fc	0,10	4	0	0	0
	0,25	84	30	0	0
	0,30	157	66	0	0
	0,50	917	514	0	0

Beim Vergleich der Tabellen 3 und 4 ist deutlich zu erkennen, dass die erhöhte Nachtlüftung eine deutliche Reduzierung der Übertemperaturgradstunden zur Folge hat. Dadurch erfüllen sämtliche hier gewählten Kombinationen die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz gemäß DIN 4108-2.

Auf dieser Grundlage werden für weitere Untersuchungen die Außenklimadaten des Testreferenzjahres 2010 auf die mittleren und sommerfokussierten Testreferenzjahre 2015 und 2045 geändert.

Tabelle 5: Übertemperaturgradstunden für TRY 2015 mit erhöhter Nachtlüftung in Abhängigkeit des Sonnenschutzes sowie der Fenster

U-Wert	1,37	1,34	1,36	1,36	
g-Wert	0,70	0,63	0,41	0,33	
Fc	0,10	1	0	0	0
	0,25	164	84	0	0
	0,30	298	162	0	0
	0,50	1400	823	23	0

Tabelle 6: Übertemperaturgradstunden für TRY 2045 mit erhöhter Nachtlüftung in Abhängigkeit des Sonnenschutzes sowie der Fenster

U-Wert	1,37	1,34	1,36	1,36	
g-Wert	0,70	0,63	0,41	0,33	
Fc	0,10	77	43	0	0
	0,25	603	371	10	1
	0,30	892	565	22	2
	0,50	2596	1762	183	37

In den Tabellen 5 und 6 ist im Vergleich zur Tabelle 4 zu erkennen, dass sich die Übertemperaturgradstunden beim mittleren Testreferenzjahr 2015 und 2045 erhöhen. Einige der Kombinationen erfüllen die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz gemäß DIN 4108-2 nicht.

Tabelle 7: Übertemperaturgradstunden für TRY 2015 sommerfokussiert mit erhöhter Nachtlüftung in Abhängigkeit des Sonnenschutzes sowie der Fenster

U-Wert	1,37	1,34	1,36	1,36	
g-Wert	0,70	0,63	0,41	0,33	
F _c	0,10	1482	1243	553	393
	0,25	2425	2010	904	619
	0,30	2786	2304	1036	709
	0,50	4820	3844	1619	1117

Tabelle 8: Übertemperaturgradstunden für TRY 2045 sommerfokussiert mit erhöhter Nachtlüftung in Abhängigkeit des Sonnenschutzes sowie der Fenster

U-Wert	1,37	1,34	1,36	1,36	
g-Wert	0,70	0,63	0,41	0,33	
F _c	0,10	1088	846	244	136
	0,25	2350	1832	551	322
	0,30	2860	2232	685	400
	0,50	5329	4196	1399	805

In den Tabellen 7 und 8 wird im Vergleich zu den vorangegangenen Tabellen ersichtlich, dass die sommerfokussierten Testreferenzjahre eine weitere Steigerung der Übertemperaturgradstunden zur Folge haben. Auffällig ist jedoch, dass das sommerfokussierte TRY 2015 teilweise höhere Übertemperaturgradstunden als das sommerfokussierte TRY 2045 hervorruft. Grund hierfür sind die unterschiedlichen Wetterdaten der TRYs in Kombination mit den Simulationsrandbedingungen für die strahlungsabhängige Ansteuerung des Sonnenschutzes. So kann es vorkommen, dass die Simulation bei einer geringen Unterschreitung der oben genannten Grenzbestrahlungsstärke von 300 W/m² ohne Ansatz eines Sonnenschutzes erfolgt und ein erheblicher Energieeintrag durch das Fenster berücksichtigt wird. Dies ist besonders bei geschlossenem Rollladen (F_c = 0,10) zu beobachten.

Zusammenfassung und Fazit

Anhand der Simulation für einen Beispielfraum konnte der Einfluss unterschiedlicher Parameter auf die sommerliche Überhitzung aufgezeigt werden. Zur Bewertung der sommerlichen Überhitzung wurden die Übertemperaturgradstunden herangezogen. Die variierten Parameter Energiedurchlassgrad (g-Wert) der Fenster und Grad der Verschattung (F_c-Wert)

beeinflussen den Energieeintrag in das Rauminnere durch Sonnenstrahlung maßgeblich. Für die Praxis bestätigt sich die Erkenntnis, dass die Übertemperaturgradstunden - bei ansonsten unveränderten Randbedingungen wie Fenstergröße, Raumgeometrie usw. - durch die Optimierung der Eigenschaften der Fenster deutlich reduziert werden können (Austausch der Fenster und/oder Installation eines verbesserten Sonnenschutzes). Zudem senkt eine erhöhte Nachtlüftung die beobachteten Übertemperaturgradstunden erheblich.

Allerdings wurde deutlich, dass die üblichen Maßnahmenpakete aus verringertem Energiedurchlassgrad und verbesserter Verschattung, welche die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz nach DIN 4108-2 unter Zugrundelegung des Testreferenzjahrs 2010 erfüllen, dies für aktuelle bzw. zukünftige extreme Testreferenzjahre 2015 und 2045 nicht vollumfänglich gewährleisten können. Dies könnte zur Folge haben, dass Gebäude, die auf Grundlage der aktuellen Normung ausgelegt wurden, in Zukunft vermehrt mechanisch und somit unter hohem Energieaufwand gekühlt werden müssen. Um dies zu vermeiden, sollten bei jedem Bauvorhaben, auch bei Sanierungsmaßnahmen, die möglichen Auswirkungen des fortschreitenden Klimawandels berücksichtigt werden. Eine Überarbeitung des aktuellen Nachweisverfahrens erscheint somit unerlässlich.

Danksagung

Wir bedanken uns an dieser Stelle für die Förderung durch das Zentrale Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM).

Literatur

- [1] Gebäudeenergiegesetz vom 8. August 2020 (BGBl. I S. 1728), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 16.
- [2] DIN 4108-2:2013-02; Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz
- [3] Hartner, M.; Carrigan, S.; Kornadt, O.; Lachmann, M. (2021): Normatives vs. realistisches Lüftungsverhalten – Auswirkung von unterschiedlichen Lüftungsstrategien auf den Energiebedarf. Bauphysik 43, H. 3, S. 148–153.
- [4] Spiegel, J.; Hofmann, M.; Schoch, T.; Kornadt, O. (2021): Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit der Baustoffe auf das thermische Verhalten von Gebäuden. Bauphysik. 43 (4) 2021, S. 231-242.
- [5] TRNSYS18, URL:https://trnsys.de/docs/trnsys/trnsys18_Neuheiten_de.htm [abgerufen am 21.12.2023]

- [6] Handbuch Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse; 07.2017; Ein Gemeinsames Projekt im Auftrag des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR) in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD)
- [7] Blum, T. (2023): Ganzheitliche Bewertung eines auf Peltier-Elementen basierenden Flächenheiz- und -kühlsystems. Dissertation. In: Schriftenreihe des Fachgebiets Bauphysik / Energetische Gebäudeoptimierung, Band 6. Herausgeber: Kornadt, O. Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau, Kaiserslautern. Bauphysik / Energetische Gebäudeoptimierung



SOMMERLICHER WÄRMESCHUTZ UND HOLZBAU – VORURTEILE, TATSACHEN, AUSBLICKE

Elisa Klatte

PIRMIN JUNG Deutschland GmbH, E-Mail: elisa.klatte@pirminjung.de

Kurzfassung

Durch die Folgen des Klimawandels steigen sowohl die Außenluft- als auch die Raumlufitemperaturen in den Bauwerken. Es ist zu hinterfragen, ob die Gebäude, die heute errichtet werden, in 50 Jahren genutzt werden können oder ob die derzeitige Nachweisführung des sommerlichen Wärmeschutzes dafür nicht mehr ausreichend ist.

Einleitung

Der Klimawandel ist allgegenwärtig. Aktuelle Forschungen zeigen, dass das 1,5°C-Ziel, das 2015 in Paris vereinbart wurde, nicht mehr erreichbar ist (von Brackel, 2023). 40% der weltweiten Treibhausgasemissionen stammen aus der Baubranche, 8% davon aus der Zementherstellung (WWF Deutschland, 2019). Viele Bauherren, Investoren und Architekten setzen für emissionsärmere Bauwerke daher vermehrt auf den nachwachsenden und CO₂-speichernden Baustoff Holz. Hinsichtlich des Klimawandels und endenden Ressourcen sind die nachhaltigsten Gebäude, die mit einer langen Nutzungszeit. Es ist daher essenziell, den sommerlichen Wärmeschutz (SWS) so zu planen, dass sich die Nutzenden bei gestiegenen Außentemperaturen in 50 Jahren und darüber hinaus gerne darin aufhalten.

Um dies zu gewährleisten, schreibt § 14 GEG für Gebäude die Einhaltung des sommerlichen Wärmeschutzes nach DIN 4108-2:2013-02 vor. Dabei kann zwischen dem Sonneneintragskennwertverfahren und einer thermischen Simulation gewählt werden. Beide Nachweisführungen beziehen sich auf 2011 veröffentlichte Klimadatenätze. Es stellt sich nun die Frage, wie aussagekräftig die aktuell geführten Nachweise sind, welche sich auf eine Norm aus dem Jahr 2013 beziehen.

Bei all den Vorteilen, die das Holz bietet, weist es eine geringere Wärmespeicherfähigkeit gegenüber Massivbauten auf. Diese konstruktionsabhängige Größe sorgt bei leichten Gebäuden für ein schnelles Aufheizen der Räume. So hält sich das Vorurteil, dass Holzgebäude aufgrund der fehlenden Masse

leicht überhitzen. Es gilt nachzuweisen, ob die Bauweise tatsächlich der Schlüsselfaktor der Nachweisführung darstellt oder es ein hartnäckiges Vorurteil darstellt.

Kurzfassung/Abstract

Der Klimawandel ist unumstritten. Die Erde erhitzt sich und folglich werden die Sommer immer heißer. Die Nachweisführung des SWS, die durch steigende Außenlufttemperaturen an Bedeutung gewinnt, bezieht sich auf 2011 veröffentlichte Klimadaten. Zudem hält sich das Vorurteil gegenüber Holzbauten, dass sie sich aufgrund der geringeren Masse in den Sommermonaten stärker aufheizen. Daher wird untersucht, wie aussagekräftig die heute erstellten Nachweise für die Zukunft sind und wie ausschlaggebend die Bauweise wirklich ist.

Climate change is undisputed. The earth is heating up the summers are getting hotter and hotter. The verification of the SWS, which is gaining in importance due to rising outside air temperatures, refers to climate data published in 2011. In addition, the prejudice against wooden buildings that they heat up more in the summer months due to their lower mass persists. For this reason, it is being investigated how meaningful the evidence produced today is for the future and how decisive the construction really is.

Die Bedeutung des sommerlichen Wärmeschutzes in Zeiten des Klimawandels

Die Bedeutung des sommerlichen Wärmeschutzes wird zukünftig eine immer größer werdende Rolle zugeschrieben. Die Komplexität nimmt zu. Zum einen sind effektive Maßnahmen auszuwählen, die den sommerlichen Wärmeschutz in künftigen Hitzeperioden gewährleisten, zum anderen entstehen Zielkonflikte durch unterschiedliche Anforderungen von Planungsbeteiligten aus TGA und Schallschutz.

In Abbildung 1 wird ersichtlich, dass die Dekade von 2011 bis 2020 die bisher wärmste war. Die Mitteltemperatur in Deutschland hat sich seit 1881 bereits um 1,6 K erhöht. Folglich steigt die Zahl der Sommertage (Tageshöchsttemperatur mind. 22°C) und der heißen Tage (Tageshöchsttemperatur min. 30°C) stark an.

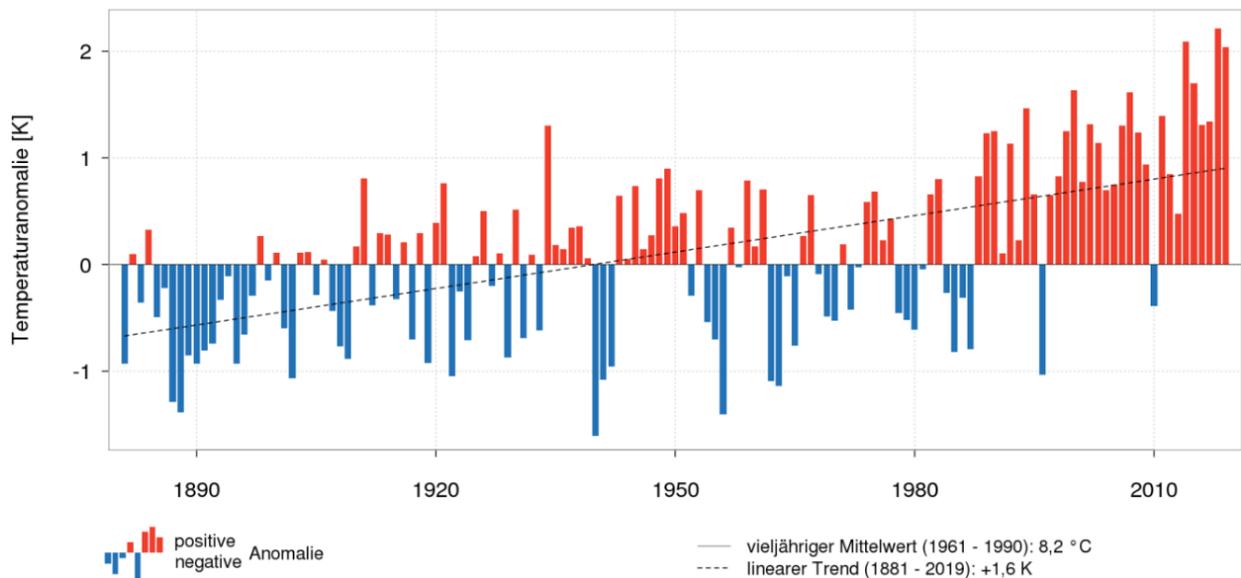


Abbildung 1: Abweichung der Jahresmitteltemperatur gegenüber dem vieljährigen Mittel in Deutschland von 1961 – 1990 (Hutter et al, 2023)

Seit 1951 sind die Sommertage um 100 % gestiegen, die heißen Tage haben sich bereits verdoppelt. Damit geht eine steigende Anzahl der Kühlgradtage nach Spioni einher, die sich seit den 1970ern von jährlich 70 auf 140 verdoppelt haben. Ferner hat sich der Zeitraum, in dem eine Kühlung benötigt wird, auf April bis Oktober ausgedehnt.

Weitere Wärmezunahmen aufgrund erhöhter Treibhausgasemissionen definiert die Wissenschaft als repräsentative Konzentrationspfade (RCP) mit einem Zahlenwert, der den anthropogenen Strahlungsantrieb in W/m^2 für das Jahr 2100 angibt.

Dabei stellt RCP2.6 einen Rückgang der Treibhausgasemissionen dar, sodass das Pariser Klimaabkommen noch eingehalten wäre. (Hutter, et al., 2023) Aktuell liegt die CO_2 -Konzentration bei 419 ppm. (Podbregar, 2023)

Folgende Szenarien sind zudem definiert:

- RCP4.5 bis etwa 650 ppm CO_2 -Äquiv.
- RCP6.0 bis etwa 850 ppm CO_2 -Äquiv.
- RCP8.5 bis etwa 1370 ppm CO_2 -Äquiv.

Abgebildet sind die positiven und negativen Abweichungen der Lufttemperatur vom vieljährigen Mittelwert 1971 - 2000 sowie die zu erwartende Zunahme bis 2100

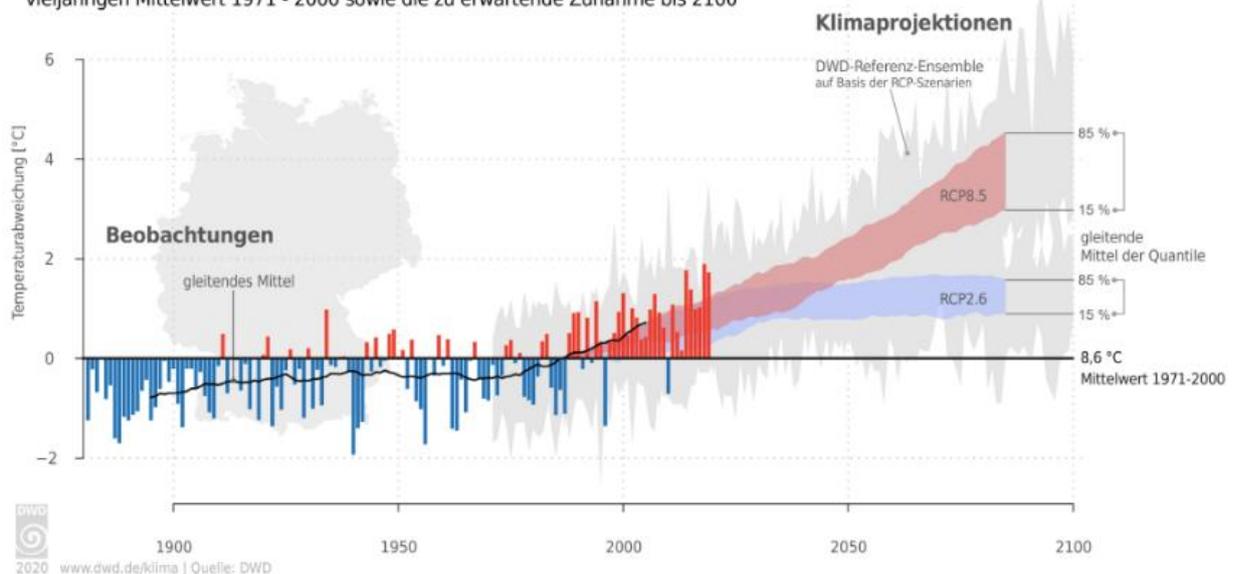


Abbildung 2: Gemessene und projizierte Temperaturentwicklung bis 2100 (Hutter et al, 2023)

Ohne Klimaschutzbestrebungen sind die Szenarien RCP6.0 und RCP8.5 denkbar. Dies bedeutet eine Erhöhung der Jahresmitteltemperatur um 3,8 K. (Hutter et al., 2023)

Steigende Raumlufttemperaturen und die Auswirkungen auf den Menschen

Steigende Außenlufttemperaturen führen zu erhöhten Raumlufttemperaturen. Dies kann sich negativ auf die Gesundheit des Menschen auswirken, da die Körpertemperatur nicht mehr ausreichend reguliert werden kann. Mögliche Folgen sind Schwindel, Kopfschmerzen und Erschöpfung. Bei fehlender Abkühlung in der Nacht kommen Schlafprobleme und fehlende Erholung hinzu. Vulnerable Gruppen können zudem unter Dehydrierung, Herz-Kreislauf-Problemen und Atembeschwerden leiden. In extremen Fällen können die gesundheitlichen Auswirkungen zum Tod führen. Optimale Raumtemperaturen liegen zwischen 20-22 °C, da sich der menschliche Körper hier bei normaler Kleidung im metabolischen Gleichgewicht befindet. Im Sommer liegen die akzeptablen Temperaturen mit 23-27 °C etwas höher.

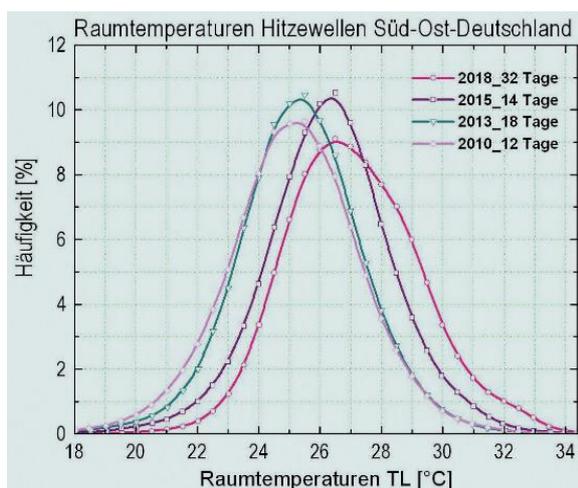


Abbildung 3: Raumtemperaturen während vier Hitzewellen zwischen 2010 und 2018 in Südostdeutschland (Schröder et al., 2019)

Abbildung 3 zeigt die Raumtemperaturen in Südostdeutschland während vier Hitzewellen zwischen 2010 und 2018. Eine Hitzewelle wird hierbei als mindestens 5-tägiger Zeitraum definiert, bei dem sich Hitzetage und Tropennächte abwechseln (Schröder et al., 2019). In der 2019 erstellten Grafik ist eine Rechtsverschiebung der Temperaturverteilung während der Hitzewellen 2015 und 2018 zu erkennen. Sind die Raumtemperaturen 2010 und 2013 noch im angenehmen Bereich, wandert die linke Flanke in den akzeptablen Bereich bzw. verschiebt sich die rechte Flanke vom Bereich

einer akzeptablen Überwärmung in den hitzebelasteten Bereich.

Wird die in Abbildung 4 dazugehörige Summenhäufigkeit betrachtet, kann festgestellt werden, dass sich die Häufigkeit der hitzebelasteten Räume zum Teil verzehnfacht hat.

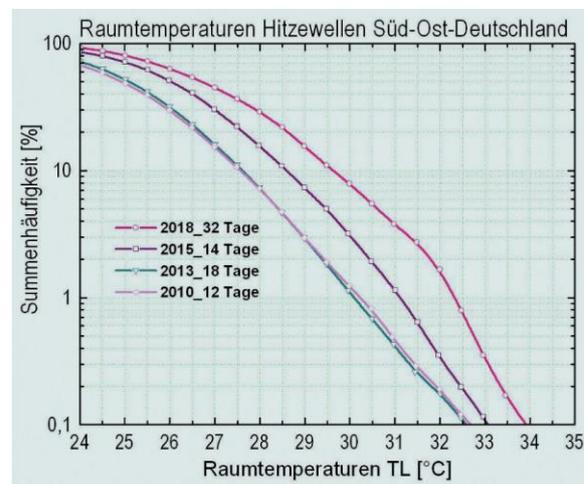


Abbildung 4: Summenhäufigkeit der Raumtemperaturen während vier Hitzewellen zwischen 2010 und 2018 in Südostdeutschland (Schröder et al., 2019)

Grundlagen der normativen Regelungen

Der sommerliche Wärmeschutz (SWS) ist in § 14 GEG verankert. Zugrunde liegt die DIN 4108-2: 2013-02. Sowohl im darin beschriebenen Sonneneintragskennwertverfahren als auch in der thermischen Simulation bezieht sich die Norm auf die drei unterschiedlichen Klimaregionen A, B und C. Die klimatischen Bedingungen beziehen sich dabei auf folgende deutsche Städte:

- A (kühles Klima) → Rostock
- B (durchschnittliches Klima) → Potsdam
- C (warmes Klima) → Mannheim

In der Simulation sind die vom BBSR zur Verfügung gestellten Testreferenzjahre (TRY) aus 2011 zugrunde zu legen (DIN4108-2:2013-02). Bei TRY handelt es sich um Datensätze, die in Stundenaufösung meteorologische Variablen enthalten, die einen repräsentativen Witterungsverlauf darstellen (Hutter et al., 2023). Das TRY2011 betrachtet die Zeitreihe von 1988 bis 2007. Um den Klimawandel mit in die TRY einfließen zu lassen, wurden Projektionen der Lufttemperatur von 2021 bis 2050 verwendet (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, 2023). Der Unterscheid zwischen dem TRY2011 und den nachfolgenden Datensätzen liegt in der Auflösung der Deutschlandkarte. Während für das

TRY2011 Deutschland in 15 Klimaregionen mit jeweils einer Repräsentanzstation eingeteilt wurde, wird für die jüngeren Datensätze ein 1-km-Raster über Deutschland aufgezogen, das die Verwendung von ortsgebundenen TRY ermöglicht (Hutter et al., 2023).

Klimadaten im Vergleich

In Abbildung 5 werden dem normenbezogenen TRY2011 (TRY2010) acht weitere Datensätze gegenübergestellt. Es handelt sich dabei um vier

Testreferenzjahre und vier Datensätze, die mit der Meteonorm-Software erstellt wurden.

Um die tatsächliche Repräsentanz der Datensätze des heutigen Klimas darzustellen, werden zum Vergleich gemessene Werte des DWD in gemittelter Form aus dem Zeitraum von 2011-2020 und das extrem warme Jahr 2018 gegenübergestellt. In hellblau sind die sommerfokussierten Daten dargestellt, in schwarz das gemessene Mittel aus den Jahren 2011-2020 und in grau die Messdaten aus dem extrem warmen Jahr 2018.

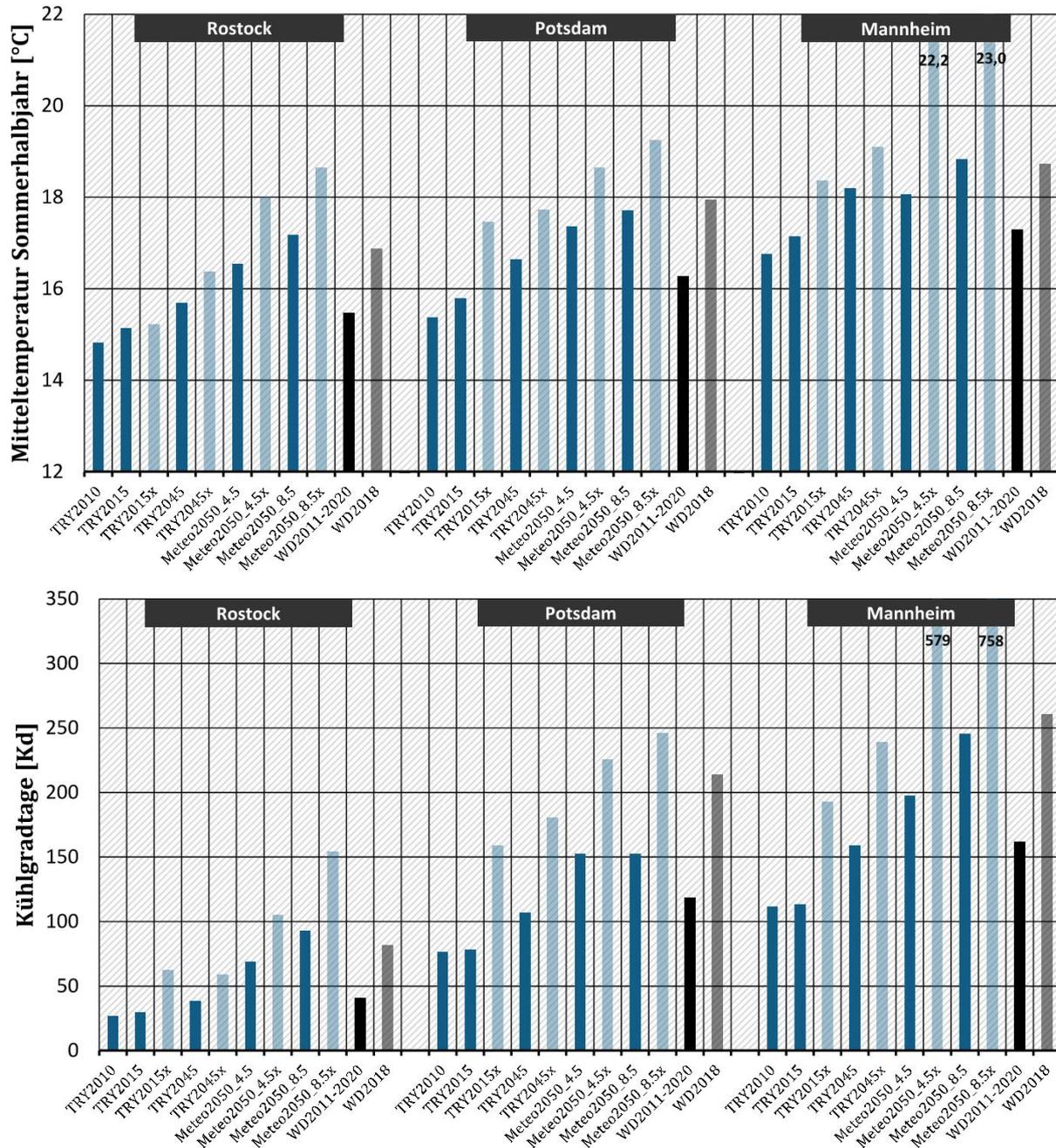


Abbildung 5: TRY, Klima- und Wetterdaten im Vergleich (Hutter et al., 2023)

Tabelle 1: Klima- und Wetterdaten (Hutter et al., 2023)

Klimadaten	
TRY2010	Normbezug DIN 4108-2 (Datensatz TRY2011)
TRY2015	heutiges Jahr (Datensatz TRY2017)
TRY2015x	heutiges Jahr – sommerfokussiert (Datensatz TRY2017)
TRY2045	Zukunftsjahr (Datensatz TRY2017)
TRY2045x	Zukunftsjahr – sommerfokussiert (Datensatz TRY2017)
Meteo2050_4.5	Meteonorm-Software RCP4.5
Meteo2050_4.5x	Meteonorm-Software RCP4.5 - sommerfokussiert
Meteo2050_8.5	Meteonorm-Software RCP8.5
Meteo2050_8.5x	Meteonorm-Software RCP8.5 - sommerfokussiert
Wetterdaten (von Wetterstationen)	
Mess-Daten '11-'20	DWD-Wetterdaten, gemittelt
Mess-Daten 2018	DWD-Wetterdaten

Die Klimadatensätze beziehen sich auf die Vorortlage der jeweiligen Städte, die gemessenen Wetterdaten auf den Standort der Wetterstation.

Ersichtlich ist, dass die tatsächlich gemessenen Daten sowohl höhere Mitteltemperaturen aufweisen als die Klimadatensätze, die unser heutiges Klima repräsentieren, als auch mehr Kühlgradtage. Daher sind für die Repräsentation des derzeitigen Wetters die Klimadatensätze TRY2010, 2015 und 2015x nicht mehr geeignet. (Hutter et al., 2023)

Die Wärmespeicherfähigkeit des Holzbaus gegenüber dem Massivbau

Für ein schlechtes Image des Holzbaus bezüglich des sommerlichen Wärmeschutzes sorgt die geringere wirksame Wärmespeicherfähigkeit gegenüber dem Massivbau. Die Wärmespeicherfähigkeit beschreibt die flächen- und volumenabhängige Eigenschaft eines Raumes, Energie in Form von Wärme aufzunehmen und zeitverzögert wieder abzugeben. Die DIN 4108-2:2013-02 teilt die Bauweisen in Abhängigkeit ihrer wirksamen Wärmekapazität in leicht, mittel und schwer ein:

- leicht: $C_{\text{wirk}}/A_G < 50 \text{ Wh}/(\text{Km}^2)$
- mittel: $50 \text{ Wh}/(\text{Km}^2) \leq C_{\text{wirk}}/A_G \leq 130 \text{ Wh}/(\text{Km}^2)$
- schwer: $C_{\text{wirk}}/A_G > 130 \text{ Wh}/(\text{Km}^2)$.

Eine schwere Bauweise ist für den Nachweis des SWS vorteilhaft, da sich der Raum dann langsamer erwärmt.

Während die leichte Bauweise, als schlechtester anzunehmende Situation, nicht extra nachgewiesen werden muss, müssen beim Ansatz der mittleren und schweren Bauweise ein Nachweis mit der Erfüllung der wirksamen Wärmespeicherkapazität geführt werden. Hierfür haben wir bei PIRMIN JUNG Deutschland eine Variantenstudie unter Berücksichtigung unterschiedlicher Holzbauteile und Raumgrößen durchgeführt. In allen untersuchten Räumen wird der Grenzwert der mittleren Bauweise mit den angesetzten Konstruktionen eingehalten. Außenbauteile spielen eine untergeordnete Rolle, entscheidend sind die Fußböden und Decken.

Im Jahr 2013 wurde seitens Daniel Müller (PIRMIN JUNG Schweiz AG) im Rahmen seiner Masterarbeit eine Studie durchgeführt, in der der Temperaturverlauf eines Holzbaus ($C_{\text{wirk}} = 45 \text{ Wh}/\text{Km}^2$) mit dem eines Massivbaus ($C_{\text{wirk}} = 75 \text{ Wh}/\text{Km}^2$) verglichen wird. Der Temperaturverlauf ist in Abbildung 6 dargestellt. Die operative Temperatur des Holzbaus steigt in den Sommertagen um 1 K höher gegenüber dem Massivbau, sinkt in der Nacht jedoch schneller wieder ab. Eine Nachtauskühlung wird in der Simulation angesetzt.

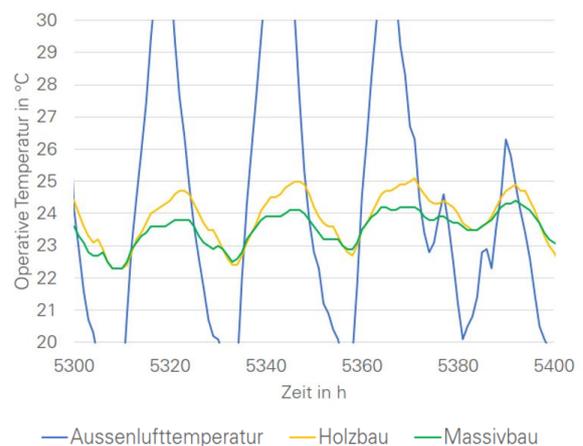


Abbildung 6: operative Temperatur eines Holzbaus gegenüber eines Massivbaus (Müller, 2013)

In Anbetracht der Tatsache, dass der Klimawandel vermehrt zu tropischen Nächten führt, in denen die Außenlufttemperatur nicht unter 20°C fällt, stellt die Eigenschaft einer geringeren Wärmespeicherfähigkeit des Holzbaus einen Vorteil und keinen Nachteil dar. Ein massereicher Wärmeenergiespeicher, wie ihn Massivbauten darstellen, kühlt nachts nicht ausreichend ab und gibt folglich die Wärme ins Rauminnere ab.

Fazit

Zusammenfassend kann man sagen, dass der Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes überarbeitet werden muss, um die Gebäude bestmöglich auf die kommenden Temperaturen vorzubereiten und die Nutzenden zu schützen. Insbesondere hinsichtlich der Klimadatensätze ist eine Anpassung notwendig, da die herangezogenen Daten das aktuelle Klima nicht mehr repräsentieren können.

Räume von Holzgebäuden erwärmen sich im Sommer stärker. Wobei die Differenz der operativen Temperatur lediglich 1 K beträgt. Der Nachteil der geringeren Wärmespeicherfähigkeit wird zum Vorteil, wenn die Nächte immer wärmer werden, da die geringere Masse für eine schnellere Abkühlung sorgt. Zudem fallen die Außenbauteile beim Nachweis der wirksamen Wärmespeicherkapazität nicht ins Gewicht. Ausschlaggebend hierfür sind die Fußböden und Decken.

Literatur

- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, 2023.[Online]: Available at: https://www.bbsr-geg.bund.de/GEGPortal/DE/GEGRegelungen/WeiterereRegelungen/Testreferenzjahre/TRY2011/TRY2011Projekt/01_start.html?nn=4054034&cms_pos=2#doc4054030bodyText5
[Zugriff am 29 01 2024].
- DIN4108-2:2013-02, 2013. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Hutter, C. et al., 2023. Kühle Gebäude im Sommer, Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Müller, D., 2013. Dynamische Gebäudesimulation von Holzbauten. s.l.:s.n.
- Podbregar, N., 2023. wissenschaft.de. [Online] <https://www.wissenschaft.de/erde-umwelt/co2-bilanz-fuer-2023-zeigt-neues-rekordhoch/>
[Zugriff am 29 01 2024].
- Schröder, F. et al., 2019. Hitzefrei in deutschen Wohnungen. HLH - Lüftung, Klima, Heizung, Sanitär, Gebäudetechnik, 10(Sonderdruck 9. und 10. 2019).
- von Brackel, B., 2023. 1,5 Grad Erwärmung sind praktisch besiegt, s.l.: Süddeutsche Zeitung.
- WWF Deutschland, 2019. Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie, Berlin: s.n.



HINDERNISSE IM MINERALWOLLERECYCLING ERGEBNISSE AUS DEM FORSCHUNGSPROJEKT REMELTING MIWO

Tanja Broszies, Prof. Frank U. Vogdt

Technische Universität Berlin, Deutschland, E-Mail: bauphysik@tu-berlin.de

Kurzfassung

Mineralwolle ist einer der verbreitetsten Dämmstoffe im Bauwesen. Aktuell wird sie fast ausschließlich deponiert, obwohl ein Recycling technisch möglich ist. Gründe dafür sind insbesondere die unbekannte Mineralwollchemie und die anhaftenden Störstoffe aus dem Rückbau. Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Remelting Miwo“ konnten alle wichtigen Störstoffe für ein closed-loop Recycling identifiziert und mit Grenzwerten versehen werden. Tests an Proben eines Wertstoffhofs zeigen, dass diese Grenzwerte regelmäßig überschritten werden. Ein theoretisches Konzept zur Aufbereitung rückgebauter Mineralwolle befindet sich aktuell in der Testphase. Mittels Nahinfrarotspektroskopie wurde eine Möglichkeit gefunden Glas- und Steinwolle zerstörungsfrei schnell zu differenzieren.

Mineral wool is a widely used insulation material in the construction industry. At present, it is almost exclusively landfilled, although recycling is technically possible. The main reasons for this are the unknown mineral wool chemistry and the adhering impurities from deconstruction. As part of the "Remelting Miwo" research project, all important contaminants for closed-loop recycling were identified and assigned limit values. Tests on deconstructed samples show that these limit values are regularly exceeded. A theoretical concept for mineral wool processing is currently in the test phase. Using near-infrared spectroscopy, it is possible to differentiate between glass wool and rock wool quickly and non-destructively.

Einleitung

Wachsende Anforderungen an Wärme-, Brand- und Schallschutz im Neu- sowie Altbau führen zu einem stetig ansteigenden Dämmstoffeinsatz im Bauwesen. Mineralwolle hat dabei einen Marktanteil von ca. 50 Prozent (Deutsche Energie-Agentur, 2022). Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Remelting Miwo“ (Broszies et al, 2023) wurde vom Team der Technischen Universität Berlin analysiert, ob das Recycling von Mineralwolle unter Nutzung des Schmelzwannenverfahrens im volumenrelevanten

Umfang wirtschaftlich sowie ökologisch sinnvoll und umsetzbar ist. Dabei wurde ein besonderer Fokus auf die technische Umsetzbarkeit des Recyclings und Störstoffe gelegt.

Mineralwolle gehört stofflich in die Gruppe der „künstlichen Mineralfasern“ (KMF). Unter diesem Begriff wird die Gruppe der auf anorganischer Basis synthetisch hergestellten Fasern zusammengefasst. Unterteilt wird diese in kristalline, einkristalline, polykristalline und glasartige (amorphe) Fasern, wobei Mineralwolle zu letzteren gehört (BBSR, 2011) und grundsätzlich in Glas- und Steinwolle unterschieden wird. Während für Steinwolle (SW) vor allem Natursteine u.a. Basalt, Diabas oder Dolomit verwendet werden, sind es für Glaswollen (GW) Altglas und Glasrohstoffe wie Quarzsand, Feldspat, Kalk und weitere. Aus den Rohstoffen ergeben sich typische chemische Oxidzusammensetzungen. Mineralwolle wird als Faserstoff hinsichtlich einer möglichen Krebsgefährdung als potentiell karzinogen eingestuft (EU-VO Nr.1272/2008). Aus diesem Grund muss die gesundheitliche Unbedenklichkeit für Mineralwolle vor Inverkehrbringen nachgewiesen werden. Der Nachweis der Unbedenklichkeit eines spezifischen Mineralwolle-Produktes erfolgt in Deutschland über die Güte- und Prüfbestimmungen der Gütegemeinschaft e.V. anhand biologischer Tests, die dann eine definierte chemische Zusammensetzung der Faser freizeichnen (GGM, 2021). Eine Einhaltung dieser Zusammensetzung ist für Mineralwollhersteller daher von großer Bedeutung und bei einem möglichen Recyclingprozess zu berücksichtigen. Produktfremde Mineralwollen und Störstoffe beeinflussen die Oxidzusammensetzung des Endprodukts und müssen daher möglichst bekannt sein. Geringfügige Mengen an Störstoffen haben zudem großen Einfluss auf die Anlagentechnik.

Technische Anforderungen an den Recyclingprozess und Störstoffe

Die Herstellung von Glas- und Steinwolle verläuft in groben Schritten identisch: Gemenge der Rohstoffe, Schmelze, Zerkleinerung der Glasschmelze, Bindemittelauftrag, Aushärtung und Zuschnitt. Im

Detail sind jedoch einige Spezifikationen zu beachten, die auch dazu führen, dass Glas- und Steinwollen bei einem späteren Recycling nicht zusammengeführt werden können. Im Rahmen des gegenständlichen Forschungsprojektes wurde das Schmelzwannenverfahren begutachtet, welches typischerweise für Glaswollen verwendet wird, aber auch zur Erzeugung von Steinwollen geeignet ist. Die genaue Auseinandersetzung mit dem Prozess ist notwendig, da sich hieraus bestimmte Anforderungen an die einzubringende Rohstoffqualität ergeben. Als technische Störstoffe wurden alle Stoffe erfasst, die einen negativen Einfluss auf die chemische Zusammensetzung, die Anlagentechnik, Emissionsgrenzwerte oder Gesundheit haben. Die identifizierten Störstoffe werden nachfolgend beschrieben.

Nichteisen- sowie Eisenmetalle schmelzen und/oder reagieren bei den Temperaturen in der Schmelzwanne. Folgen daraus sind Schäden an der Schmelzwanne oder eine veränderte Produktchemie. Im Bauwesen treten Metalle beispielsweise in Form von Bewehrungsseisen, Kupferrohren, Edelstahlkonsolen, Schrauben und Nägeln, aber auch als Aluminiumkaschierungen der Mineralwolle selbst auf.

Keramik, Steine und Porzellane (KSP) schmelzen nicht oder für den Prozess zu langsam in der Glasschmelze auf (Martens et al, 2016). Gelangt nichtaufgeschmolzenes Material in den Zerfaserungsprozess, schädigt dieses die Zerfaserungseinheiten. Daher sollte möglichst kein KSP-Material in den Schmelzvorgang gelangen. Im geringfügigen Umfang kann es mitverarbeitet werden, sofern die Partikel kleiner als der Zerfaserungsdurchmesser sind und die chemische Zusammensetzung möglichst der Zielchemie entspricht. Für die üblichen Verwendungen der Mineralwollämmstoffe im Bauwesen sind mit folgenden KSP-Fractionen zu rechnen: mineralischer Bauschutt, mineralische Putzanhaftungen und Sanitärkeramikbruch. Mineralwolle kann entweder durch Beschichtungen oder durch unsaubere Stoffselektierung im Rückbau mit diesen Materialien in Kontakt kommen. Glaskeramik schmilzt ebenfalls nicht ausreichend bei den in der Schmelzwanne herrschenden Temperaturen auf. Visuell können viele Glaskeramiken meist weder vom menschlichen Auge noch von optischen Geräten zweifelsfrei erkannt werden (Ostermann et al, 2011)

Der in organischen Stoffen enthaltene Kohlenstoff wirkt sich negativ auf den Schmelzprozess aus. Ein Eintrag in den Kupolofen, welcher typischerweise für Steinwollen verwendet wird, ist möglich, jedoch kann die Schmelze das Feuerfestmaterial des Ofens stärker angreifen. In den Glasschmelzwannen sollte der Kohlenstoffanteil möglichst vollständig reduziert werden (Fleckenstein et al, 1994), da die Organik in

der Schmelzwanne bei ihrer thermischen Zersetzung eine schaumähnliche Schicht auf der flüssigen Glasschmelze bildet, die sich dann zwischen Brenner und Schmelze befindet und wie eine Isolierschicht wirkt. Die organischen Stoffe wirken wie ein Reduktionsmittel im Schmelz- und Läuterungsprozess der Glasschmelze (Remi et al, 2008).

Wasser in zu hohen Mengen wirkt sich aufgrund der Verdunstungsenthalpie ungünstig auf den Schmelzprozess aus und erhöht den Energiebedarf in der Schmelzwanne (Remi et al, 2008).

Sulfate und Chloride können zu Bewehrungskorrosion oder treibenden Prozessen führen, die Betone angreifen. Da Dämmstoffe beispielsweise als Vorsatzkonstruktion mit Betonen in Kontakt stehen, stellt auch ein entsprechender Sulfat- oder Chloridgehalt einen Störstoff dar. Eine Verunreinigung im Bauwesen kann stattfinden durch gipshaltige Baustoffe wie Innenputze oder Gipskartonplatten oder chlorhaltige Materialien wie beispielsweise Polyvinylchlorid (PVC) oder bestimmte Anstriche, Lacke und Kleber mit Chlorbindemitteln.

Generell stellen auch alle bautypischen Schadstoffe, die auf einer Abbruchbaustelle zu erwarten sind, Störstoffe dar, die aus gesundheitsschutztechnischen Gründen ein Recycling der Mineralfasern grundsätzlich ausschließen. Interessanterweise sind ausgerechnet „alte KMF“, die aufgrund ihrer lungengängigen Fasergeometrie (WHO-Fasern) und ihrer Oxidzusammensetzung als potentiell karzinogen eingestuft werden, durch das erneute Aufschmelzen in einem closed-loop Recycling von einem Schadstoff in einen potentiellen Sekundärrohstoff umwandelbar (Broszies et al, 2023).

Aus Gründen der Oxidzusammensetzung und der unterschiedlichen Anlagenspezifikationen wie Schmelztemperatur und Zerfaserungsdüsen dürfen Glaswollen nicht in den Steinwollprozess gelangen und umgekehrt (Broszies et al, 2023). Basierend auf Vorarbeiten aus dem Projekt LifeCycleKMF (Vogdt et al, 2019) wurde die Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) als mögliches Verfahren zur Unterscheidung von GW und SW identifiziert (Paul et al, 2020).

Möglichkeiten der Aufbereitung

Es wurde festgestellt, dass es große Schnittmengen in der Störstoffdefinition von Mineralwolle zur Behälterglasindustrie gibt. Angelehnt an die dortigen Aufbereitungsanlagen wurde auf dieser Grundlage ein theoretisches Konzept entwickelt, mit dessen Hilfe Störstoffe von Mineralwolle separiert werden können (vgl. Abb. 1). Ferromagnetische Störstoffe wie bspw. Eisenwerkstoffe und niedrig- bis mittellegierte Stähle können über einen Magnetabscheider entfernt werden. Denkbar sind Trommel- oder Überbandscheider. Nach (Martens et al, 2016).

besteht auch die Möglichkeit einer Nassmagnetabscheidung, da der Trenneffekt in Suspensionen vielversprechend ist und zudem die Nachteile aus zu feuchten oder zu trockenen Proben entfallen. Auf diese Nachteile weist auch (Cetner-Stzalkowska, 2022) hin: Zu feuchte Proben verklumpen, wohingegen zu trockene Proben eine unerwünschte Staubbildung verursachen. Da Feuchte selbst allerdings einen Prozessstörstoff im Recycling darstellt, müsste an dieser Stelle zum Rücktrocknungsverhalten von durchfeuchteter, zerkleinerte Mineralwolle weiter geforscht werden.

Nichteisenmetalle wie Kupfer, Edelstahl oder Aluminium sollen über einen Wirbelstromabscheider von der Mineralwolle getrennt werden. Diese Technik, die über die magnetische Wirkung mit elektromagnetischen Feldern arbeitet, ist nach (Martens et al, 2016) besonders gut für aluminiumhaltige Materialien und für Partikelgrößen > 6 mm geeignet. Die Wirbelstromsichtung sollte prozesstechnisch nach der Abtrennung ferromagnetischer Störstoffe erfolgen.

Zur Trennung der KSP-Fractionen werden in der Regel optische Systeme verwendet, die über Kameras Farben und Nichttransparenz unterscheiden können. Schwierig ist dabei Glaskeramik, welche optisch wie Glas aussieht, aber einen Störstoff darstellt (Martens et al, 2016). Gut erkannt werden kann die Glaskeramik, wenn bei der KSP-Abscheidung auch Röntgenfluoreszenz eingesetzt wird (Ostermann et al, 2011). Wird ein Störstoff erfasst, dann wird dieser in der Regel mit Druckluft aussortiert.

Für die Abtrennung der Organik und insbesondere von Folien und Kunststoffen wird eine Dichtesortierung empfohlen. Die Dichtesortierung nutzt Dichteunterschiede unterschiedlicher Materialien und daraus resultierende unterschiedliche Fallgeschwindigkeiten oder Beschleunigungsreaktionen. Typischer Vertreter der Dichtesortierung ist die Windsichtung. In der Regel fällt dabei das zu reinigende Gut nach unten, während durch gezielte Luftströme leichtere organische Stoffe seitlich oder nach oben aussortiert werden. Es wäre denkbar dieses Prinzip umzudrehen oder gar, die Mineralwolle über einem Fließband abzusaugen. Organik, die auf diese Art nicht aussortiert werden kann, kann über eine Vortemperierung entfernt werden. Aufgrund des notwendigen Energieaufwands sowie der im Verbrennungsprozess entstehenden NO_x-Werte wird der letzte Schritt aber kritisch betrachtet. Gleichzeitig würde aber eine Erwärmung der Proben unerwünschte Feuchte entfernen. Alternativ können die Proben energieärmer, dafür zeitaufwändiger auch durch geschützte Lagerung trocknen.

Generell liegt die Herausforderung bei allen benannten Prozessen in der Faserform der

Mineralwollen, die zu einem gänzlich anderen Verhalten als übliche mineralische Baustoffe führen. Die Eignung der Methoden ist durch Versuchsreihen noch nachzuweisen.

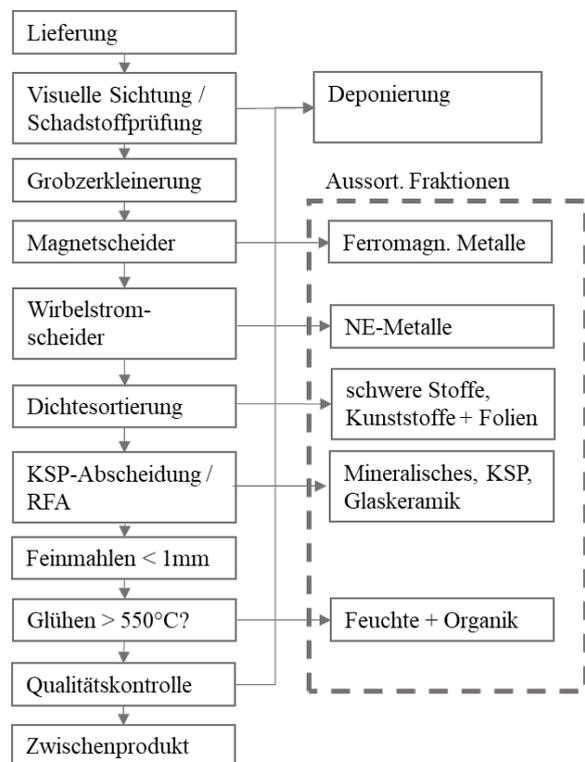


Abbildung 1: Schematische Darstellung von Aufbereitungsschritten mit Ablaufreihenfolge zur Entfernung von Störstoffen aus Abbruchmineralwolle für künftiges closed-loop Recycling entsprechend der erwarteten Störstofffraktionen

Grenzwerte für Störstoffe für die Mineralwolleherstellung in der Schmelzwanne

In Zusammenarbeit mit der Saint Gobain Isover G+H AG wurden für die zuvor genannten Störstoffe Grenzwerte festgelegt, innerhalb derer keine negativen Einflüsse auf die Mineralwollchemie oder die Anlagentechnik mit Schmelzwanne zu erwarten sind. Diese Werte wurden mit verfügbaren Grenzwerten aus der Behälterglasindustrie verglichen (vgl. Tab. 1). Die Grenzwerte für das Mineralwollrecycling bewegen sich in ähnlichen Bereichen wie beim Recycling von Altglasscherben in der Behälterglasindustrie. Nach eigenen Aussagen gilt die Dämmstoffindustrie (bspw. Mineralwolle und Schaumglas) innerhalb der Glaskaskade als anspruchsloser bezüglich der Qualitätsanforderungen an Altglasscherben als die Behälterglasindustrie oder die Flachglasindustrie. Diese Aussage kann durch Tabelle 1 bestätigt werden. Deutlich höher liegen nur die Grenzwerte für KSP und Organik.

Mögliche Anhaftung / Verunreinigung	Anforderung Behälterglasindustrie		Anforderung Mineralwollindustrie (Schmelzwanne)
	Mittel	Max	
Keramik, Steine, Porzellan (KSP) ¹⁾	≤ 0,002 %	< 0,005 %	< 0,5 %
NE-Metalle	≤ 0,0003 %	< 0,0005 %	≤ 0,0005 %
FE-Metalle	≤ 0,0002 %	< 0,0005 %	
Glaskeramik >10mm (BG) / 20mm (Miwo)	≤ 0,0005 %	< 0,0005 %	≤ 0,0 %
Glaskeramik ≤ 10mm (BG) / 20mm (Miwo)	≤ 0,001 %	< 0,003 %	≤ 0,01 %
Lose organ. Stoffe⁴⁾	≤ 0,03 %	< 0,05 %	≤ 5 %
Feuchtigkeit	≤ 2 %	< 5 %	≤ 3 %
Schwermetallgehalt^{2,3)}	≤ 200ppm		≤ 5ppm

1) Korngrößen < 1mm, für Behälterglas siehe [18]
2) Für Glas: Kumulativ Pb, Cd, Cr(VI), Hg
3) Für Mineralwolle: Cd, Hg: < 1 ppm, Cr(VI) < 2 ppm, Pb: < 1 ppm
4) Für Mineralwolle inkl. produkteigenes Bindemittel

Tabelle 1: Grenzwerte für Störstoffe zum Recycling in der Behälterglas- (BV Glas, 2013) - und Mineralwollindustrie

Zur Evaluierung, welcher Verunreinigungsgrad bei Mineralwolle, die auf der Baustelle entsorgt wird, zu erwarten ist, wurden sechs Proben von einem Wertstoffhof sowie eine Probe aus dem Rückbauvorhaben einer Dachgeschosssanierung händisch sortiert und gewogen. Die sieben betrachteten Rückbauproben enthielten verschiedene Dämm- und Störstoffe teilweise innerhalb des gleichen BigBags. Sie wurden per NIRS in Steinwolle und Glaswolle differenziert. In den sieben Probensätzen befinden sich sieben Steinwollen und sechs Glaswollen.

Der Glühverlust der einzelnen, reinen Mineralwollen bei 550°C und 1h Glühzeit wurde ermittelt, um Informationen über den nicht händisch aussortierbaren organischen Anteil an der Mineralwolle zu erhalten. Hauptsächlich zählen hierzu die produkteigenen Bindemittel. Die ermittelten Masseverluste lagen zwischen 0,53 %- 8,9 % und damit im üblichen Bereich für Bindemittel. Der Mittelwert für Glaswollen im Probensatz betrug 7,72 M.-%, der für Steinwollen 3,22 M.-%. Der Bindemittelanteil ist hier als kritisch zu werten, da dieser allein bereits die vorgegebenen Grenzwerte aus Tabelle 1 für vier von sechs Glaswollen überschreitet. Eine thermische Vorbehandlung der Mineralwollfasern ist daher für die Wiedereinführung in die Schmelzwanne ungeachtet der vorhergehenden Aufbereitungsqualität notwendig. Beispielhaft werden nachfolgend die an den sieben Rückbauproben festgestellten Verunreinigungen mit Metallen, KSP-Fractionen und Organik ohne produkteigenes Bindemittel beschrieben und dargestellt (vgl. Abb. 2). Die händische Sortierung ergab bei fünf von sieben Mineralwollproben (W1-W5) einen Massenanteil organischer

Verunreinigungen < 1 %. Eine entsprechende Aufbereitung vorab scheint nicht notwendig, da wie oben beschrieben eine thermische Vorbehandlung durchgeführt werden muss. Probe W6 und W7 hingegen weisen nach der händischen Sortierung organische Fremdstoffe von 8 M.-% bzw. 4 M.-% auf. Eine Auswertung mittels Thermogravimetrischer Analyse (TGA) zeigte, dass bei den Proben W1-W6 die organischen Störstoffe überwiegend durch die händische Sortierung entfernt werden konnten. Der Masseverlust von Probe W7 innerhalb der TGA im Temperaturbereich der Holzpyrolyse (350°C-450°C) betrug ca. 4 M.-% unter Stickstoff, so dass die 4 M.-% (Tab. 2) aus der händischen Sortierung die Verunreinigung unterschätzen. Die Auswertung der Sortierung metallischer Bestandteile zeigt, dass sofern Metalle in den Probensätzen vorhanden waren, diese aufgrund ihrer hohen Rohdichte die Grenzwerte aus Tabelle 1 immer überschreiten. Für die KSP-Fractionen überschreiten die Proben W4 und W7 die ermittelten Grenzwerte von 0,5 %. Sowohl für die metallischen als auch KSP-Fractionen waren die Störstoffe überwiegend stückig in Korngrößen > 20 mm vorhanden, so dass mit einer guten Trennbarkeit gerechnet wird. Feinanteile an KSP konnten im Rahmen des Projekts weder messtechnisch erfasst noch durch Aufbereitung separiert werden.

Eine vorgeschaltete Aufbereitungsanlage wird aufgrund der vorgestellten Erkenntnisse als sinnvoll bewertet. Mögliche Prozessschritte hierzu wurden beschrieben. Trotz Aufbereitungsanlage wird empfohlen, bereits baustellenseitig so sortenrein wie möglich rückzubauen. Größtes Hindernis sind hierbei aktuell unlösliche Verbindungen zwischen Baustoffschichten oder Bauteilen und der hohe Zeit- und damit Kostenaufwand im selektiven Rückbau.

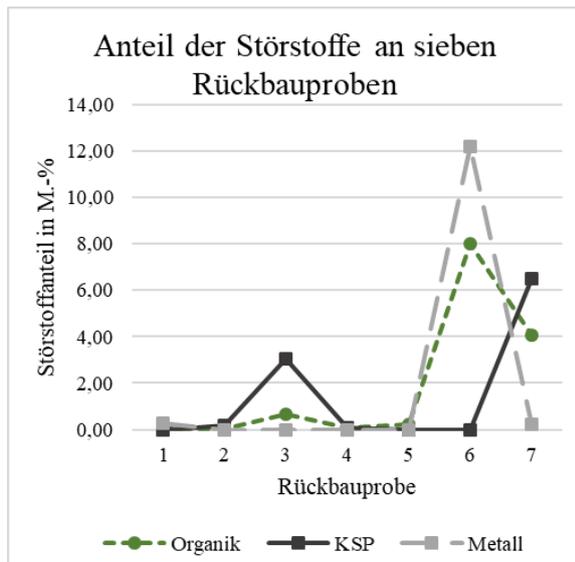


Abbildung 2: Darstellung der Massenanteile der Störstoffe für Metalle, KSP-Fractionen und Organik ohne produkteigenes Bindemittel in [%] für sieben Rückbauproben nach händischer Sortierung

Zusammenfassung und Ausblick

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass closed-loop Recycling für Mineralwolle, die im Schmelzwannenverfahren gefertigt wurde, technisch möglich und auch umsetzbar ist. Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich generell auf den Kupolofen übertragen, der innerhalb der beiden Schmelzverfahren als robuster gilt.

Es wurden Grenzwerte erarbeitet innerhalb derer Mineralwolle in den jeweiligen Herstellungsprozess für Glas- oder Steinwolle zurückgeführt werden kann. Tests an realen Rückbauproben zeigen, dass diese Grenzwerte regelmäßig überschritten werden und daher eine technische Aufbereitung ähnlich zur Aufbereitung von Behälterglas sinnvoll sein kann. Vielversprechende, theoretische Überlegungen hierzu wurden angestellt. Zur Verifizierung des Aufbereitungskonzepts sind umfangreiche Tests notwendig, für deren Validierung zuvor Referenzmethoden ermittelt werden müssen.

Danksagung

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau Aktenzeichen: 10.08.18.7-20.23, Projektlaufzeit: 01.2021 bis 04.2023.

Ein besonderer Dank gilt unseren Verbundpartnern der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), insbesondere dem Fachbereich 1.4

Prozessanalytik, für ihre Projektbeiträge zur Spektroskopie und chemometrischen Datenanalyse.

Für die fachliche und technische Unterstützung bedanken wir uns bei unserem Forschungspartner Saint Gobain Isover G+H AG und bei Zeiss Spectroscopy GmbH.

Literatur

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung 2011. BBSR-Berichte KOMPAKT – Künstliche Mineralfaserdämmstoff, 2011, Bonn.

Broszies, T., Paul, A., Liestmann Z., Schaudienst F., Vogdt F. U. 2023. Recycling von Mineralwolle, die im Schmelzwannenverfahren hergestellt wurde.

Bundesverband Glasindustrie e.V. 2013. Standardblatt T 120, „Qualitätsanforderungen für Glasscherben zum Einsatz in der Behälterglasindustrie“. Ausgabe: 01. Juli 2013

Cetner-Stzalkowska, Z. 2022. W2L final conference, 2022, URL: www.wool2loop.eu/en/finalconference, zuletzt besucht am 20.12.23

Deutsche Energie-Agentur 2022. DENA-Gebäudereport 2022. Zahlen, Daten, Fakten.

Fleckenstein, H., Hornung, H. 1994. Verfahren und Vorrichtung zum Herstellen von Mineralwolle mittels Abfallmineralwolle als rezykliertes Grundmaterial, Patent DE69410976T2

GGM 2021. - Gütegemeinschaft Mineralwolle e.V.: Güte- und Prüfbestimmungen für Erzeugnisse aus Mineralwolle; April 2021

Martens, H.; Goldmann, D. 2016; Recyclingtechnik, Fachbuch für Lehre und Praxis, 2. Auflage, 2016

Ostermann, M., Kühn, A., Bjeoumikhov, A., Wedell, R. 2011. Einsatz der Röntgenfluoreszenzanalyse in der Prozessanalytik. In: tm-Technisches Messen, Band 78, Heft 12, 2011

Paul, A., Broszies, T., Ostermann, M., Maiwald, M., Vogdt, F. U. 2020. Unterscheidung von Mineralwolle mit Nahinfrarot-Spektroskopie (NIRS). In: Bauingenieur Band 95, Heft 12, 2020

Remi, J., Biagio, P., Stephane, M., Laurent, J. 2008. Method and Device for Treating Fibrous Wastes for Recycling, Patent US20080256981A1

Vogdt, F. U., Fischer, D., Schaudienst, F., Schober, M. 2019. LifeCycleKMF - Optimierung der Stoffströme im Lebenszyklus von Bauprodukten aus künstlichen Mineralfaserdämmstoffen, 2019



10 YEARS OF RESEARCH TOWARD VACUUM GLASS INTEGRATION INTO NEW AND EXISTING WINDOW CONSTRUCTIONS: A REVIEW

Ulrich Pont¹, Magdalena Wölzl¹, Peter Schober¹, Matthias Schuss¹, Julia Bachinger²

¹ *Research Unit Building Physics and Building Ecology, TU Wien, Vienna Austria, E-Mail:*

{ulrich.pont|magdalena.woelzl|klaus.schober|matthias.schuss}@tuwien..ac.at

² *Holzforschung Austria|Austrian Forest Products Research Society: j.bachinger@holzforschung.at*

Abstract (English)

While windows are still considered as weak spot in contemporary new and existing building envelopes, exciting new technologies are on the edge to emerge into the market. Amongst these technologies, vacuum glass products are considered to have a major impact on the improvement of the thermal performance of windows. The authors conducted 5 in-depth research projects in the past 10 years that focussed on the integration of vacuum glass products into new and existing window constructions. Thereby, a wide range of different additional aspects and interests had to be covered, e.g. heritage protection aspects for historically relevant windows or motorization of windows toward integration into building automation systems. The contribution on the one hand intends to emphasize the importance of the discipline building physics for these R&D efforts, and on the other hand to showcase the reached results of the projects. These results encompass high-performance windows with very low U-values and minimized effects of frame/glazing thermal bridges at glass thicknesses below one cm, as well as traditional casement windows which can be kept as part of the envelope (desireful from environmental footprint/circular economy point of view) but at the same time deliver a highly improved thermal performance.

Kurzfassung (german)

Fenster werden noch immer als (thermischer) „Schwachpunkt in den Gebäudehüllen bestehender und neuer Gebäude betrachtet, jedoch gibt es aktuell spannende neue technologische Entwicklungen, die die (thermische) Performance von Fenstern stark verändern/verbessern können. Die Autoren dieses Beitrags haben in den vergangenen zehn Jahren fünf Forschungsprojekte zur Integration von Vakuumglasprodukten in neuen und bestehenden Fensterkonstruktionen durchgeführt. Dabei wurden verschiedenste, wesentliche Aspekte untersucht, die von Gebäudeautomation/Motorisierung von Fenstern bis zum Denkmalschutz verschiedenste Disziplinen berührten. Dieser Beitrag soll auf der einen Seite die Bauphysik als ganz wesentliche Triebfeder der Entwicklungen unterstreichen, auf der anderen Seite

die Ergebnisse dieser Forschungsbemühungen zusammenfassend darstellen. Die Ergebnisse bestätigen, dass Vakuumgläser im Stande sind, sehr effiziente und zarte Hochleistungskonstruktionen bester thermischer Performance zu ermöglichen, sowie einen wesentlichen Beitrag zum Erhalt historischer Fensterkonstruktionen unter starker thermisch/energetischer Gebäudeverbesserung lediglich durch minimalinvasivem Tausch von Floatgläsern zu Vakuumgläsern zu leisten.

Introduction

Whereas the cultural history of windows is a rich and interesting one, windows always have been considered as a weak spot in building envelopes in view of structural design and protective functionalities of the hull. These functionalities pertain to thermal and acoustical insulation, water- and wind/air-tightness, as well as protection against blending and overheating in the hot season. In central Europe the technological advances of window technologies of the past 250 years generated maybe the technically most advanced windows world-wide, however the history of advancements is a quite linear one: The improvement history includes adding additional window sashes (casement windows), introduction of window seals, multiplying the glass panes per window (double glazing, triple glazing), introduction of foils attached to window panes that influence the radiative heat transfer characteristics through the glasses, employing different gases as fill gases for interstitial spaces, development of tight edge seals, and the standard-application of turn-and-tilt fittings. It can be assumed that these linear improvements have reached their maximum efficiency, but – to deploy their best performance – such windows regularly are heavy, triple-glazing constructions with rather prominent frame constructions.

Vacuum glazing products emerged in the past 20 years in the glass product market, as the century long challenge of a durable vacuum within the glass has been argued to be solved. By a vacuum glazing product, regularly two parallel glass panes are understood that have a small, evacuated interstitial space of often less than a millimetre. For the upkeep

of form and vacuum, a grid of tiny distance pillars is integrated, as well as a tight edge seal around the panes perimeter. Moreover, most vacuum glazing products encompass a getter surface that shall filter remaining particles from the evacuated space, as well as an evacuation opening. Given that the heat transfer processes conduction and convection require a medium, which is not there in the evacuated gap, such glass products regularly feature very good thermal insulation performances. However, the edge seal, which is in most cases made of glass or metal, and the distance pillars, pose linear and point thermal bridges and need to be addressed in window design and construction efforts. Recent developments – however – seem to advance over the issues of cold edge seals by technological progress and goal-oriented engineering and name it “new generation vacuum glass”, in contrast to the older “1st generation vacuum glass” (VGLASS, 2024). Figure 1 illustrates the major terminology and constituents of typical (1st generation) vacuum glazing products and their implementation in frame constructions. Given the thermal characteristics of vacuum glass products – high thermal insulation capabilities as a rather slim system thickness - an application both in new window constructions and as an option for energy-efficiency-increasing retrofit of historically meaningful building stock seemed and seems viable: Back in 2014 (when the authors started their R&D efforts), this potential had not been exploited given the few publications that focussed on the integration of vacuum glass products in new/contemporary and historic windows. In clear words: While R&D focused a lot on the technology of vacuum glass products, application research into the (European) window technology sector had not been deployed in a satisfactory way.

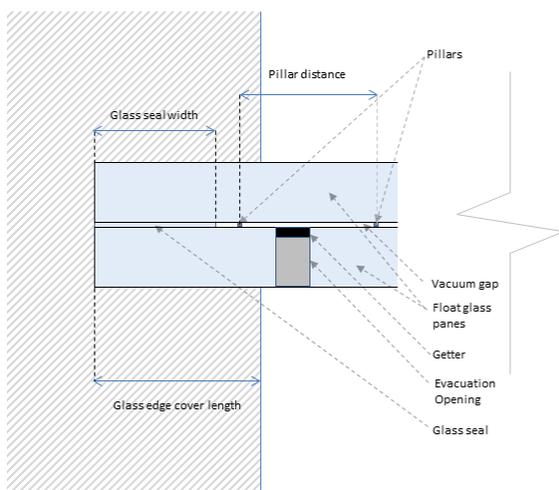


Figure 1: Key terminology of (1st generation) vacuum glass products plus their integration in framing materials (source: the authors)

The objective of this contribution is to review the deployed methods and derived results of 10 years of research on windows with implement vacuum glass

products. Thereby, connected challenges and prerequisites that made these efforts possible are described from an ex-post perspective. Moreover, most recent R&D efforts are delivered as an outlook.

Use cases, prerequisites & observations

As indicated, vacuum glass products offer R&D opportunities both for new window constructions as well as for the retrofit of existing, historically meaningful windows, such as Viennese Gründerzeit casement windows. Thereby, the objective for these two use cases has common aspects but also differences: New windows can be optimized toward an optimal thermal performance and should be designed to meet today’s aesthetic taste. The integration of other contemporary technologies, such as building automation integration and motorization for high-standard and autonomous hygienics ventilation seems a logical choice. Moreover, non-off-the-shelf operation/opening schemes and patterns can be considered for such windows that e.g. help to save space in interior spaces by opening to the outside. In contrast, historically meaningful windows shall be thermally improved and aesthetically preserved at the same time. As such any intervention needs to be compatible with the slim wooden elements of existing constructions and at the same time requires a careful consideration of the linear thermal bridge along the vacuum glass’ edge seal. Figure 2 illustratively subsums the different research directions necessary.

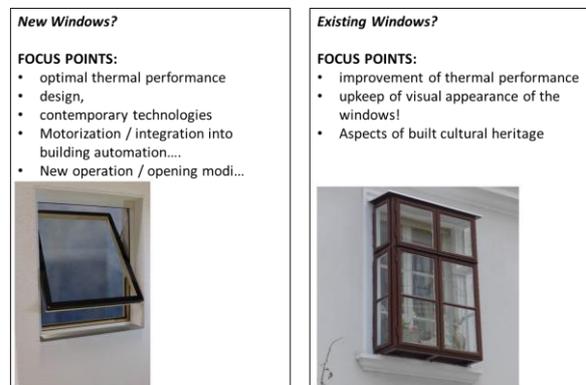


Figure 2: Research direction differences regarding vacuum glass integration into “old” and “new” windows (source: the authors).

From an ex-post perspective, important observations (O) and prerequisites (P) can be named that were of immanent importance in the past 10 years of research (compare Pont et al. 2023a) :

O1: While vacuum glass R&D work dates back to Zoller’s work in 1913, little R&D efforts on to VG integration in windows have been conducted prior to out efforts.

O2: The Central European window industry acknowledged the potential of VG, but was kind of reluctant in doing pioneering work as single

companies due to certain preconceptions (regarding glass availability and durability).

O3: For the glass producing industries, VG would mean the loss of one glass pane in comparison to triple glazing (at least in a VG basis configuration of two glass panes). Moreover, due to patents, VG glass production might be connected with technological investments and licences fees.

O4: In general, windows are still considered the weak(est) spots of the building envelope in cold and moderate climates.

P1: Given the scepticism toward glass durability, extensive testing of the characteristics of VG was required.

P2: Clear and well-defined development objectives (as well as non-goals) for new and existing windows had to be stated for successful integration.

P3: To steer toward success, a strong consortium and peer group of different stakeholders from academia and industry is pivotal, as well as a self-critical and multiperspectival assessment of all development steps. Thereby, we managed to ensure a trustful and open communication atmosphere, so that cross-competitor collaboration worked out fine during the projects.

Outline of the different R&D projects

We started back in 2014 with the exploratory project VIG-SYS-RENO (2014-2015), in which the principle characteristics of vacuum glazing products as retrofit alternative for casement windows were explored. Thereby, principle characteristics of different vacuum glass products were lab-measured, and simulation- and lab-based retrofit possibilities for casement windows employing vacuum glass were verified. Subsequently, another exploratory project named MOTIVE (2016-2017) was conducted. In this project, disruptive new approaches for new windows with vacuum glass products were envisioned in a high number and subjected to principle simulation and small-scale mock-up testing. As the Austrian window producing industry as well as the fitting and window seal industries pointed out their interest in that direction, we started a collaborative project named FIVA (2018 – 2020) to furtherly develop new windows with vacuum glass. As a result, we obtained four functional prototypes of non-off-the-shelf highly-insulating windows with vacuum glass. To follow up the retrofit track started in the beginning, the project VAMOS (2019-2021) was conducted. Here, six real building test sites were selected and casement windows were updated with vacuum glass products. In this project different small scall Austrian carpentry enterprises were our partners. One of the window prototypes of the FIVA project (an offset-and-sliding window) was chosen for a contract research together with a large scale fitting producing

company, resulting in fruitful collaborations in the SLIDE and MOVISTA projects (2021 – ongoing).

Methodology

The multiperspectival and iterative work routines required to develop and test vacuum-glass equipped windows requires different approaches, methodologies and background knowledge of various domains, including carpentry, industrial engineering, building physics, normative testing, monitoring and diagnostics, and – in the very end – marketing/communication skills. Figure 3 illustrates the workflow / workpackage distribution of the project FIVA, which was focussing on the development of new windows with vacuum glass together with major players of the Austrian window building industry. Thereby, the iterative approach in improving the construction, the thermal as well as the acoustical performance of the window prototypes formed a key element in the development of four window prototypes. In later stages of the project, the rather final functional prototypes were subjected to typical test routines such as air-tightness, tightness against wind-driven rain, etc.. Moreover, (end-)user related aspects were worked upon, as new window typologies require a certain acceptance by consumers, otherwise they will not end up as a successful building component in view of industrial planning and economics.

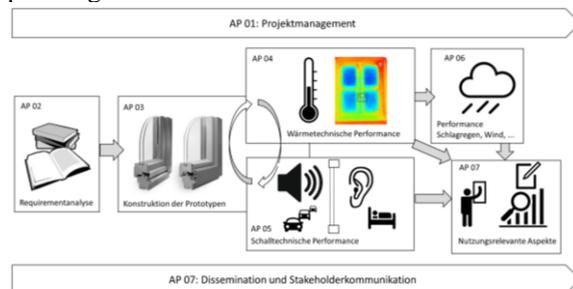


Figure 3: Work package distribution of the project FIVA (source: the authors)

Typically, we deployed in our research and development work the following methods:

(i) Paper/Sketch-based design as a basis for iterative construction improvement: Based on technical drawings of vacuum glass products and (existing) window technologies, both in 2D sectional drafts, and 3D sketches, the integration of the vacuum glass products in existing (casement) window frames was elaborated on, as was compatibility checking with existing frames of contemporary window products. While for the former the change of the frame geometry was no option, for the latter we soon ended up understanding that existing window frame constructions were far from easy to be adopted for vacuum glazing products due to a lack of edge seal cover and thus causing issues with perimetral thermal bridge effects (condensation). As such, - even before having a proof via simulation – it was decided to tackle new windows with vacuum glass rather with

disruptive new approaches then to continue the linear development efforts of past decades.

(ii) Simulation (and calculation): Simulation has been an important instrument within the past ten years, given its possibilities to offer quick and easy insights into the performance of a certain design. From perspective of building physics, we deployed numeric thermal bridge simulation for obtaining key performance indicators of the window construction details (both in 2D and 3D simulations). These indicators encompassed the f_{Rsi} -value, the minimum surface temperatures as well as temperatures within the construction at certain critical points (e.g. condensation risk behind rubber seals). Beside thermal simulations, in recent years numeric methods for mechanical behaviour of fixed and moving parts of frame developments has been deployed. Needless to say, at certain points during the development process both the assumed input data in the modelling (e.g. “replacement conductivity of the vacuum gap”) as well as the “relative” result information coming from simulations (e.g. comparison of surface temperature of different construction variants) had to be critically assessed and validated/verified.

(iii) Lab testing and monitoring: A major effort during the early years of the described efforts was the testing of vacuum glass products in view of thermal, acoustical, mechanical, and durability characteristics. While ten years ago no industrial vacuum glass production was running in Europe, the purchasement of vacuum glass panes meant comparably long delivery times as the panes were coming from the United States, or Far East Asia to our test facilities. Of course, the durability of the glass products became an even more important topic given this situation regarding delivery times: A typically asked question by carpenters was “What shall I do, if one of the panes breaks? How long will it take to get a replacement?” This issue on the one hand was worsened by global events such as COVID-19 or the container ship traffic jam in Suez Canal, but also lost relevance due to the fact that in 2020 a European production line started. In later stages, monitoring efforts have been conducted especially for the casement windows with vacuum glazing improvement. Here we were able to proof that our simulations that assumed extreme boundary conditions could act as a solid basis for a performance prediction of the vacuum glass equipped windows. However, in reality, the importance of careful craftsmanship during installation and setting up windows with vacuum glass turned out as crucial, as e.g. gaps in rubber seal could negatively influence the window performance and outnumber the thermal improvement by the vacuum glass pane.

(iv) Aspects of craftsmanship and industrial engineering: During the collaborative R&D projects focusing on new windows and retrofitted casement windows, aspects of effective assembling, structural performance of components, prefabrication in

factories, transport, mounting, connection with the surrounding wall systems, finetuning of moving parts, and maintenance became an important and to-be-considered perspective majorly brought in by the industry partners. This happened in iterative development steps in a ping-pong exchange with simulation efforts. The industrial partners also manufactured functional prototypes and mock-ups for lab- and real-life testing. A very important aspect in this methodological approach also was to reduce the complexity of designs in view of the “KISS”-principle (keep it super simple), as we often identified possible but hard to realize solutions which we omitted from further development steps as their chance to become built reality was sparse.

(v) Peer assessment: As already mentioned, an open and constructive atmosphere in the multi-head involving R&D projects was a critical necessity that allowed quick progress. The work progress was in that sense subjected to a permanent internal peer review. In later stages, external peer review was also obtained in the different projects: Four prototypes of disruptive new windows employing vacuum glazing technologies have been exhibited in the annual symposium of Austrian window- and door-manufacturing institutions. There, peers were asked to critically assess these prototypes by filling a structured assessment form. Regarding the casement window realizations that were subjected to an extensive monitoring of key performance indicators, people working or living close to these demonstration windows were asked to provide additional, subjective feedback.

Results

Where did we arrive with our research and development efforts conducted in the previously mentioned projects? The following subsections provide insight into the obtained results, however, can only act as an appetizer for the full-scale reports about the research project published by the Austrian Research Promotion Agency (via www.nachhaltigwirtschaften.at; Pont et al. 2018a, Pont et al. 2018b, Pont et al. 2020, Pont et al. 2023b)

Existing, historically relevant casement windows

Within the VIG-SYS-RENO project the connection joint between vacuum glass and wooden frames of casement windows was identified as the critical performance point (given that end users might not accept condensation or icing on recently retrofitted windows. However, simulation suggested that without a fundamental change of the geometry and/or material of the wooden window profiles, an imminent condensation risk would persist. Additionally, the impact of application of vacuum glass in the external or internal sash turned out to be of interest. The old rules of thumb that highly insulating layers should be positioned as far as possible on the external perimeter of constructions, while layers of high diffusion resistance should be

positioned as far as possible on the inner side of constructions are difficult to apply, given that vacuum glazing products regularly possess both a high diffusion and conduction resistance. Figure 4 illustrates some simulation results of the temperature contours along the inner perimeters of both the inner and outer sashes of a casement window for different cases (float/float, vacuum/float, float/vacuum). It can be clearly seen that the application of vacuum glass on the inside does lead to a colder interstitial space and lower surface temperature on the outer sash, while an application on the outside does not severely affect the temperatures of the other sash. As these results come from a thermal bridge simulation tool, certain convective effects might not be seen in the figure. Figure 5 shows a schematic about the heat flow characteristics of inner versus outer sash application of vacuum glass in casement windows. Given these (and other) results of the VIG-SYS-RENO project, it became evident that realization and real-life monitoring are required to be able to assess the performance of vacuum-glass equipped windows. As such, in the VAMOS project six real demonstration sites were chosen, and at each site three casement windows of widely identical configuration regarding orientation, adjacent room usages and shading were improved by small scale carpenters. Thereby, one casement window was kept in original state (regularly float/float configuration with one exception of insulation glass/float), while the other two were equipped with vacuum glass on the inner respectively outer sash. All of the windows were subjected to rigorous long-term monitoring (see Figure 6). Table 1 provides an overview about the demonstration sites and the different characteristics of the corresponding windows. We were able to prove that the U-values of the windows experienced a significant improvement, and that – in case of proper accompanying measures (such as radiators in the rooms, implementation of seals, etc.) – no

condensation risk at normal (not extreme) Winter conditions would occur.

Table 1: Demonstration site characteristics

IMAGE	DESCRIPTION
	Schloss in Wels Type: Rahmenstock in der Leibung innen öffnend 2fgl. + Oberlicht Wohnraum Glastausch
	Villa in Wien Type: Pfostenstock außenbündig außenöffnend 2fgl. + Oberlicht Wohnung Außenfenster neu
	TU Wien Type: Pfostenstock außenbündig außen öffnend 2fgl. Büroraum Flügel neu.
	Stift Wilhering Type: Doppelrahmen außenbündig innen öffnend 2-fgl. leer Neufenster im Steingewände
	Arch. Office/ Salzburg Type: Pfostenstock außenbündig außen öffnend 2 fgl. Büroraum Neufenster
	Office / Innsbruck Type: Rahmenstock in der Leibung innen öffnend 2.fgl. Büroraum Neufenster

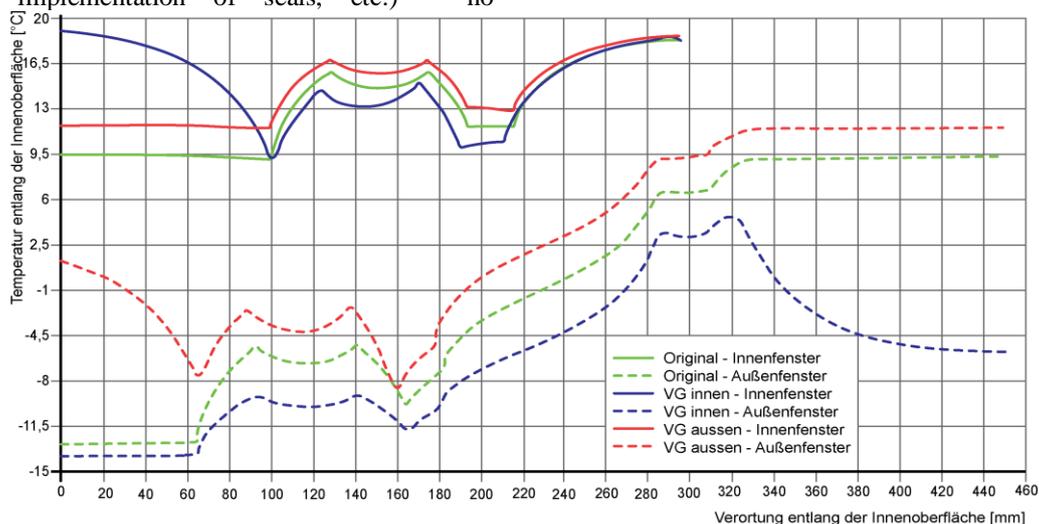


Figure 4: Simulation results of Inner surface temperatures of inner and outer sashes of different configurations (float/float, float/vacuum, vacuum/float; illustration by the authors)

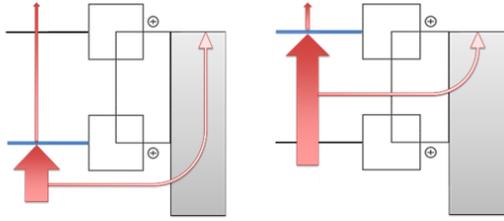


Figure 6: conceptual schematics about vacuum glass application onto the inner sash (left) and outer sash (right): While the application on the inner sash helps against increased thermal bridge effects at the window/wall joint, the outer sash application ensures increased interstitial space temperatures (illustration by the authors).



Figure 6: top: one of the examined case-study buildings; bottom: Monitoring equipment in a vacuum-glass equipped casement window (source: the authors)

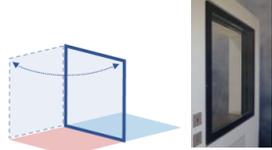
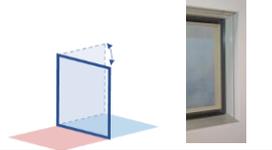
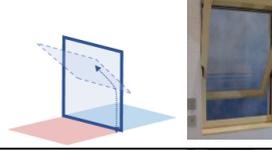
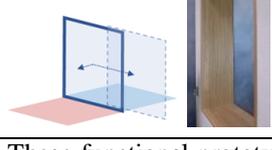
Both from measurements and from calculations/simulations it was found that the casement windows can be significantly improved (drop from 2.5–3.5 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ to 0.5–1.5 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$). For a typical Viennese *Gründerzeit* building the improvement of float/float casement windows would result in about 10% decrease of Winter season heating demand, dependent on the Window to Wall Ratio of the corresponding building.

Functional prototypes of new windows

In the MOTIVE project and later in the FIVA project, we were able to generate different non-off-the-shelf vacuum glass windows, in part utilizing rather exotic operation/opening schemes. During the FIVA project, four different functional prototypes could be developed, tested, and realized as mock-ups.

Table 2 illustrates these functional prototypes A–D and some key characteristics, as derived from simulations. By using a high-end vacuum glass with an U_g -value of $0.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ (system thickness less than 1 cm), we were able to achieve very good U_{win} -values (all below $0.8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$). Note that the minimum temperature indicated in the table is based on a steady-state indoor-outdoor temperature difference of 30 Kelvin ($20 \text{ }^\circ\text{C}$ indoor temperature, $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ outdoor temperature). Moreover, the U -values of these functional prototypes were used by utilizing the corresponding procedures of EN ISO 10077 (2018, 2020), which – at the time of conducting this research – did not consider the existence of vacuum glazing products and their specifications.

Table 2: Functional prototypes as key results of the FIVA project (authors)

SCHEME / ILLUSTRATION	DESCRIPTION
	Type A- Turn window to inside: $f_{R_{si}}: 0.74$ $\theta_{si,min}: 12,23 \text{ }^\circ\text{C}$ $U_{\text{win}}: 0.78 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
	Type B- Turn window to outside: $f_{R_{si}}: 0.77$ $\theta_{si,min}: 13,05 \text{ }^\circ\text{C}$ $U_{\text{win}}: 0.72 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
	Type C- Swing window: $f_{R_{si}}: 0.75$ $\theta_{si,min}: 12,55 \text{ }^\circ\text{C}$ $U_{\text{win}}: 0.68 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
	Type D- Sliding Window: $f_{R_{si}}: 0.74$ $\theta_{si,min}: 12,07 \text{ }^\circ\text{C}$ $U_{\text{win}}: 0.64 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

These functional prototypes were subjected to a peer review in the framework of the Fenster-Türen-Treff 2020 in Salzburg. Figure 6 illustrates the exhibition with the mock-ups, and table 7 illustrates the evaluation of different characteristics of the functional prototype in the Austrian school grade system (1... excellent, 5 non satisfactory).



Figure 7: Exhibition of functional vacuum glass window prototypes at the Fenster-Türen-Treff 2020 in Salzburg (source: the authors)

Table 3: Peer Evaluation results of the four functional prototypes (source: the authors)

CRITERIUM	A	B	C	D
Aesthetics	1.7	2	2.4	1.2
Contemporaneity	1.8	2.4	2.6	1.6
Degree of innovation	2.1	2	2.2	1.2
Feasibility of construction	1.8	2.4	2.6	2.1
Aspects of mounting	1.8	2.4	2.2	2.4
Aspects of operation	1.7	2.4	2.5	1.7
Acceptance amongst customers	1.9	2.4	3	1.8
Average	1.8	2.3	2.5	1.7

While all of the prototypes were evaluated benevolently by the peers, prototypes A and D were favoured due to innovation (D) and aspects of customer acceptance, mounting and operation (A). These prototypes and the exhibition formed the results of the project FIVA and illustrated the potential of new, innovative windows with vacuum glazing, motorization/automation, and integration of innovative technologies. Thereby, a key message of the project outcome was (and still is) that some disruptive innovations should be integrated in any upcoming development step of new window technologies.

In-detail development of the offset-sliding window

Prototype D of the FIVA project not only encompassed a high degree of innovation and a new operation/movement pattern for a window, but also showed that there is a need for specific development of corresponding components pertaining to seals, frame technologies, and – above all – fitting technologies. The original prototype D utilized telescope rails as used for automotive systems (e.g. trucks of the firefighters), and those rails never were intended to act as window fittings. Their structural properties, their dimensioning and resistance against external meteorological conditions, as well as their thermal conductivity never were designed to act in a transparent building component of a building envelope. As such, the project SLIDE/MOVISTA (KDM-INNO, 2024) was formed, together with a major player of the fitting industry to in-depth develop fitting technologies for this type of window, back in 2021. After two years of intensive development work, the MOVISTA window was exhibited at the largest world fair of building components, the Bau 2023 in Munich, Germany. It was well perceived by peers and end-customers, and despite the fact that the prototype shown was not yet available on the market, several visitors suggested that they instantly would purchase a large amount of these window due to its possibilities of integration into building automation, its aesthetics, the space-saving operation scheme and the robustness of the integrated technologies. Figure 8 illustrates the operation/opening scheme of the window prototype schematically, while Figure 9 shows the exhibited window prototype.

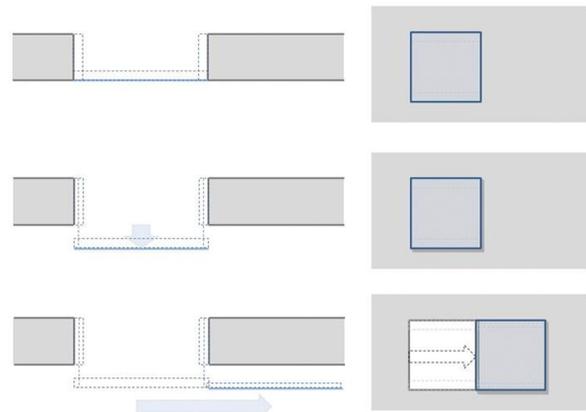


Figure 8: Principle movement pattern of prototype D/ the MOVISTA/SLIDE window (source: the authors)

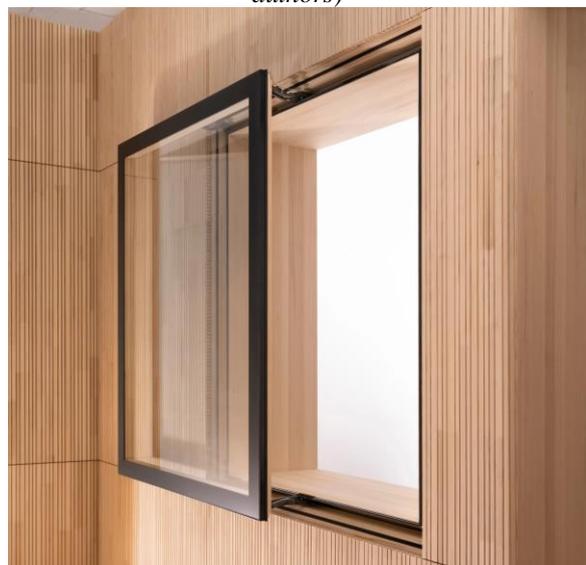


Figure 9: MOVISTA window as mockup as presented at the Bau2023 fair (Image source: KDM-inno.com)

Conclusion & Outlook

The present contribution showcased the approaches, applied methods and results of the research and development efforts onto the integration of vacuum glazing products in contemporary and historic window constructions. While the integration of vacuum glass into existing window constructions of historic meaningfulness could provide valuable energy and emission saving possibilities paired with upkeep of the appearance of these windows, the research and development stream towards contemporary/new windows employing vacuum glass showed the high potential for slim, aesthetically appealing and energy saving windows, especially if developed from scratch with certain functionalities in mind (such as integration into building automation). However, these development efforts are not yet finished. Beside further improvement of technical aspects of the shown windows, specific aspects such as sun shading into such windows are still aspects to be worked upon. Moreover, the third-party communication about the new technologies and their

potential and performance aspects has to be transported to peers, the industry, the governmental bodies (e.g. for adapting retrofit subsidies into window “update” than “window replacement”), and communicated amongst end costumers, architects and clients. Aspects of circular economy, easy mounting, prefabrication, etc. also still are open topics to work-upon, which the authors and their partners are looking forward to start.

Disclaimer

As this is a review paper of ten years of research & development, please note that parts of the presented information have been previously published by the authors in different contributions. Pont et al. 2023c offers a very detailed overview of all the efforts.

Acknowledgement

The described R&D efforts would not have been possible without the generour funding of the Austrian Research Promotion Agency FFG (Projects VIG-SYS-RENO No: 845225, Motive No: 854690, FIVA No: 867352, VAMOS No: 878272). Moreover, the research and development efforts within the project SLIDE/MOVISTA have been generously supported by the company KDM/Blum. The described R&D efforts furthermore benefitted from contributions by the following peole, companies, and institutions: Fa. AGC Interpane, Fa Blum, Fa. Gaulhofer, Fa. IEB Eisele, Fa. Katzbeck, Fa. MaCo, Fa. Prohaska, Fa. Schaden, Fa. Svoboda, Fa. Wick-Norm, Fa. Winkler, and Fa. Zoller-Prantl.

References

- EN-ISO 10077. 2018: ÖNORM EN ISO 10077-2 Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen - Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten - Teil 2: Numerisches Verfahren für Rahmen (ISO 10077-2:2017)
- EN-ISO 10077. 2020: ÖNORM EN ISO 10077-1 Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen - Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten - Teil 1: Allgemeines (ISO 10077-1:2017, korrigierte Fassung 2020-02).
- KDM-INNO. 2024. KDM-Innovation; available via <https://www.kdm-inno.com/de> (checked in December 2023)
- Pont, U., Heiduk, E., Schober, P., Romirer, H., Dolezal, F., Proskumina, O., Schuss, M., Sustr, C., Hohenstein, H., Mahdavi, A. 2018a.

Sondierung von Fenstersystemen mit innovativen Gläsern, speziell Vakuum-Isoliergläsern, zur Gebäudesanierung. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 33/2018; available via https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/sdz_pdf/berichte/schriftenreihe-2018-33-vigsysreno.pdf (checked in Dec. 2023)

- Pont, U., Schuss, M., Mahdavi, A., Schober, P., Hauer, K., Lux, C. 2018b. Modellierung, Optimierung, und technische Integration von Vakuumglas-Elementen; Berichte aus Energie- und Umweltforschung 24/2018; avaiable via https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/sdz_pdf/berichte/schriftenreihe-2018-24-motive.pdf (checked in Dec.2023)
- Pont, U., Wölzl, M., Schuss, M., Mahdavi, A., Schober, P., Haberl, J., Lux, C. 2020. Fensterprototypen mit integriertem Vakuumglas (FIVA); Berichte aus Energie- und Umweltforschung 47/2020; avaiable via https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/sdz_pdf/schriftenreihe-2020-47-fiva.pdf (checked in Dec.2023)
- Pont, U., Schober, K. P., Wölzl, M., Schuß, M. W., & Haberl, J. 2023a. A Review on the FIVA-Project: Simulation-Assisted Development of Highly-Insulating Vacuum Glass Windows. In G. Pernigotto, F. Patuzzi, A. Prada, V. Corrado, & A. Gasparella (Eds.), Building Simulation Applications BSA 2022. 5th IBPSA Italy Conference, Bozen-Bolzano, 29th June - 1st July 2022. Konferenzbeiträge/Atti/Proceedings (pp. 69–76). bu, press - Bozen-Bolzano University Press. <https://doi.org/10.34726/3864>
- Pont, U., Schuss, M., Wölzl, M., Schober, P., Hauer, K., Haberl, J., Lux, Ch. 2023b. Vakuumglas-Kastenfenster: Performance-Monitoring in Sanierungsprojekten; Berichte aus Energie- und Umweltforschung 29/2023; avaiable via https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/sdz_pdf/schriftenreihe-2023-29-vamos.pdf (checked in December 2023)
- Pont, U., Schober, K. P., Wölzl, M., & Schuß, M. W. 2023c). Vakuumglasintegration in Bestands- und Neufenster. In Nabil. A. Fouad (Ed.), Bauphysik-Kalender 2023. Ernst & Sohn,
- VGLASS. 2024. V-Glass – Vacuum Insulating Glass; available via <https://www.vg12.com/> (checked in December 2023)

SESSION B · 06.03.2024

Thema: Raumklima

Kooperationspartner



Bauhaus-
Universität
Weimar

WBA

WBA | Bauhaus Weiterbildungs-
akademie Weimar e.V.
Institut an der
Bauhaus-Universität Weimar

SIMULATIVE UNTERSUCHUNGEN DES EINFLUSSES DER STRAHLUNGSASYMMETRIE AUF DIE THERMISCHE BEHAGLICHKEIT

Tobias Blum, Birke Schröter, Svenja Carrigan, Oliver Kornadt
RPTU Kaiserslautern-Landau, Deutschland, E-Mail: birke.schroeter@rptu.de

Kurzfassung

Gesundheit und Wohlbefinden sind essenzielle Aspekte einer nachhaltigen Gebäudeplanung [Blum, 2023]. Daraus lässt sich insbesondere die Wichtigkeit der thermischen Behaglichkeit für die Gebäudenutzer*innen ableiten. In diesem Beitrag werden mithilfe von simulativen Untersuchungen im thermischen Gebäudesimulationsprogramm TRNSYS [TRNSYS], im CFD-Simulationsprogramm Ansys [Ansys] sowie im thermischen Simulationsprogramm TAITherm [TAITherm] unterschiedliche Strahlungsasymmetrien und ihre Einflüsse auf die thermische Behaglichkeit im Rahmen des PMV-Modells und des UCB Thermal Comfort Modells untersucht. Zusätzlich im Fokus liegt dabei ein Vergleich der Modelle sowie die operative Temperatur zur Eignung als Behaglichkeitsindikator. Im weiteren Projektverlauf werden die vorläufigen Ergebnisse mithilfe von experimentellen Untersuchungen validiert.

Abstract

Health and comfort are essential aspects of a sustainable planning process in the building industry [Blum, 2023], which leads in particular to the importance of thermal comfort for users in the built environments. In this paper, the effects of various radiation asymmetries on thermal comfort are investigated using three different simulation programmes: the thermal building simulation software TRNSYS [TRNSYS], the CFD simulation software Ansys [Ansys] and the thermal simulation software TAITherm [TAITherm]. These analyses are based on Fanger's PMV model, the UCB thermal comfort model and the operative temperature as indicator for thermal comfort. The efficiency of the three concepts is compared, focussing on the ability to accurately determine thermal comfort.

Einleitung

Durch den voranschreitenden Klimawandel steht bei der Nutzung von Gebäuden meist die Einsparung von Energie und Treibhausgasen im Fokus [Schöndube et al., 2022; Krohn et al., 2020; Kornadt et al., 2021; Schröter et al., 2023]. Da die Menschen mit einem Anteil von durchschnittlich etwa 90% den Großteil

ihrer Zeit in diesen Gebäuden verbringen [Hofmann et al., 2020], muss darüber hinaus das Wohlbefinden für die Gebäudenutzenden gewährleistet werden. Folglich ist die thermische Behaglichkeit ein wichtiger Bestandteil einer nachhaltigen Gebäudeplanung, insbesondere durch ihre Einflüsse auf den Energieverbrauch und die Gesundheit der Menschen [Zheng et al., 2022]. Dabei haben sich unterschiedliche Ansätze und Modelle zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit etabliert, die jeweils eigene Vor- und Nachteile mit sich bringen [Rupp et al., 2015; Fanger, 1970; Zhang et al., 2010c] und für verschiedene Randbedingungen mehr oder weniger gut geeignet sind. So sind etwa bei Flächentemperiersystemen besondere Randbedingungen hinsichtlich der Strahlungsasymmetrie im Raum zu berücksichtigen.

In diesem Beitrag werden simulative Untersuchungen des Einflusses der Strahlungsasymmetrie auf die thermische Behaglichkeit vorgestellt. Durch die Verwendung von drei unterschiedlichen Simulationsprogrammen mit je eigenem Untersuchungsschwerpunkt wurde eine möglichst umfassende Analyse auf Simulationsbasis gewährleistet. Zunächst werden die Grundlagen der verwendeten Behaglichkeitsmodelle kurz dargelegt. Dabei liegt der Fokus auf dem Fanger'schen PMV-Modell, dem UCB Thermal Comfort Modell sowie der operativen Temperatur als Behaglichkeitsindikator. Anschließend wird die Methodik anhand der verwendeten Simulationsprogramme, dem thermischen Gebäudesimulationsprogramm TRNSYS, dem CFD-Simulationsprogramm Ansys sowie dem thermischen Simulationsprogramm TAITherm, vorgestellt. Die Untersuchungen erfolgten zunächst ausschließlich durch Simulationen, werden zukünftig jedoch durch experimentelle Untersuchungen in einer Klimakammer validiert und erweitert. Durchgeführt werden Studien sowohl mit einem thermischen Manikin als auch mit Proband*innen.

Modelle der thermischen Behaglichkeit

Das 1970 von Fanger entwickelte Modell zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit [Fanger, 1970] basiert auf einer Wärmebilanz des menschlichen Körpers. Nach Fanger ist die thermische

Behaglichkeit mit einem thermisch neutralen Zustand gleichzusetzen. Dieser stelle sich für die Raumnutzenden dann ein, wenn sie weder ein wärmeres noch ein kühleres Umgebungsklima bevorzugen würden. Mit Blick auf die Wärmebilanz bedeutet dies, dass der Körper genau so viel Wärme erzeugt, wie er auch wieder an die Umgebung abgibt. Auf dieser Prämisse aufbauend, wurden die Proband*innen in den durchgeführten experimentellen Untersuchungen nach ihrem thermischen Befinden befragt und sollten angeben, ob sie das Innenraumklima in diesem Moment als heiß (+3), warm (+2), etwas warm (+1), neutral (0), etwas kühl (-1), kühl (-2) oder kalt (-3) empfanden. Ergebnis war das PMV-Modell, mit dem die Behaglichkeit im Raum anhand der siebenstufigen Skala vorhergesagt werden kann und welches die Grundlage für die DIN EN ISO 7730 [DIN EN ISO 7730] bildet.

Während im Behaglichkeitsmodell nach Fanger lediglich der gesamte Körper und damit die globale thermische Behaglichkeit im Fokus steht, wurde im Behaglichkeitsmodell der University of California Berkeley UCB der Körper in 19 unterschiedliche Segmente unterteilt und dadurch berücksichtigt, dass auch die lokale thermische Behaglichkeit einen wesentlichen Einfluss auf das Wohlbefinden der Raumnutzenden hat [Zhang et al., 2010c, 2010a, 2010b; Zhao et al., 2014]. Die Wahrnehmung der jeweiligen Körpersegmente wird im Modell über eine logistische Funktion mithilfe der Eingabeparameter der lokalen und mittleren Hauttemperatur sowie der Ableitungen der Haut- und der Körperkerntemperatur jeweils über die Zeit vorhergesagt. Der globale thermische Zustand des Körpers wird dabei über die mittlere Hauttemperatur berücksichtigt und die beiden Ableitungen über die Zeit ermöglichen die Analyse instationärer Raumklimata. Ferner wurde die siebenstufige Skala des Modells nach Fanger um die beiden Extrema very cold (-4) und very hot (+4) ergänzt. Zu unterscheiden sind dabei das thermische Empfinden und die thermische Behaglichkeit. Während sich die Skala des thermischen Empfindens, wie aufgezeigt, an der Skala des Fanger'schen Modells orientiert, leitet sich die Skala der thermischen Behaglichkeit aus der Empfindung ab, sodass eine genauere Betrachtung dieses Zusammenhangs erforderlich ist.

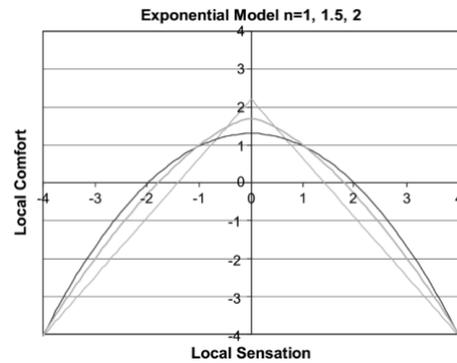


Abbildung 1: Drei mögliche Graphen für den Zusammenhang der lokalen thermischen Empfindung und der lokalen thermischen Behaglichkeit [Zhang et al., 2010a]

Auch das UCB-Modell folgt dem Ansatz von Fanger, nachdem der neutrale Zustand mit einer höheren Behaglichkeit einhergeht. Dies ist in Abbildung 1 an jedem der drei möglichen Graphen für den Zusammenhang der lokalen thermischen Empfindung und der lokalen thermischen Behaglichkeit zu erkennen. Analog zum PMV-Modell liegt der Bereich der größten Zufriedenheit mit dem Umgebungsklima bei einer lokalen Empfindung zwischen etwas warm (+1) und etwas kühl (-1). Dabei wird die Skala der thermischen Behaglichkeit unterteilt in sehr behaglich (+4), behaglich (+2), gerade noch behaglich (+1), gerade so unbehaglich (-1), unbehaglich (-2) und sehr unbehaglich (-4). Es ist zu sehen, dass dabei keine Unterteilung in warme und kühle Zustände vorgenommen wird, entscheidend ist lediglich das Ergebnis mit Bezug auf die Behaglichkeit. Mit dem UCB-Modell können homogene und heterogene sowie stationäre und instationäre Raumklimata analysiert werden.

Beide Modelle wurden in der Vergangenheit hinsichtlich ihrer Funktionalität und Präzision bei der Vorhersage der thermischen Behaglichkeit untersucht und analysiert. In [Völker, 2012] kam Völker zu dem Ergebnis, dass das UCB-Modell bei der Simulation der Körperkern- und der Hauttemperatur in instationären Bedingungen zu guten Ergebnissen führte. Auch bei stationären Bedingungen erwies sich das Modell als verlässlich und genau. Schellen et al. [Schellen et al., 2013] verglich das UCB-Modell mit dem PMV-Modell nach Fanger. Letzteres sei grundsätzlich gut, habe jedoch Schwierigkeiten in heterogenen Raumklimata und sei problematisch bei vielen unterschiedlichen Körperarten, Ethnien und Geschlechtern. Dagegen sei das UCB-Modell auch bei heterogenen Raumklimata vielversprechend [Schellen et al., 2013], sodass sich das Modell besonders für die Untersuchung von Strahlungsasymmetrien eignet, die von ihrer Natur her heterogen sind.

Als ein zusätzlicher Behaglichkeitsindikator dient häufig außerdem die operative Temperatur, welche sich bei niedrigen Luftgeschwindigkeiten vereinfacht

als arithmetisches Mittel aus der Raumluft- und der mittleren Strahlungstemperatur beschreiben lässt [DIN EN 13779]. Diese wird nicht selten als „empfundene Temperatur“ [Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, 2015] bezeichnet und gilt auch in der DIN EN 16798-1 [DIN EN 16798-1] als Kenngröße der thermischen Behaglichkeit in Abhängigkeit von den herrschenden Außentemperaturen.

Simulationen in Ansys

Ziel der Untersuchungen in Ansys [Ansys] war es, zusätzlich zu den Kennwerten der thermischen Behaglichkeit – die operative Temperatur und den PMV-Index – auch die durch die unterschiedlichen Oberflächentemperaturen entstehenden Luftströmungen zu analysieren und die physikalischen Randbedingungen im Raum zu berücksichtigen. Dazu wurde die Zwei-Zonen-Klimakammer des Fachgebietes modelliert (Abbildung 2) und unterschiedliche Strahlungsasymmetrieszenarien simuliert.

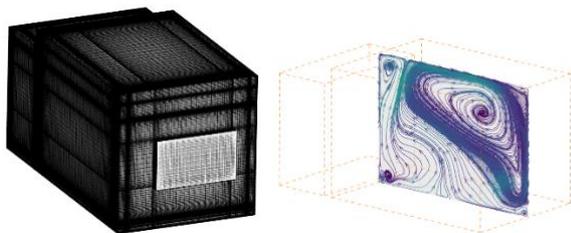


Abbildung 2: Modell der Klimakammer in Ansys (links) mit Schnitt der betrachteten Ebene (rechts)

Der Raum des Innenklimas hat eine Grundfläche von 3 m x 4,2 m und ist 3 m hoch. Auf der rechten Seite der Abbildung 2 ist die betrachtete Schnittebene zu erkennen. Luftströmungen und Lufttemperatur wurden in den Modellen simulativ ermittelt, die Oberflächentemperaturen der Wände, der Decke und des Bodens wurden in Abhängigkeit des betrachteten Szenarios vorgegeben. Um möglichst hohe Effekte zu generieren, wurde zunächst die maximal zulässige Temperatur einer Fußbodenheizung [DIN EN 1264-2] von 29 °C als Referenz für die Oberflächentemperaturen gewählt, die restlichen Oberflächen wurden auf 20 °C eingestellt. In Abbildung 3 ist das Strömungsprofil für eine Fußbodenheizung beispielhaft dargestellt.

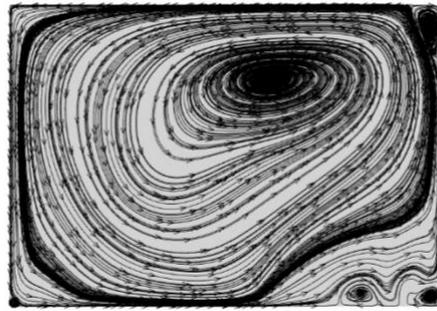


Abbildung 3: Luftströmungsprofil der betrachteten Ebene bei einer Fußbodenheizung mit 29 °C Oberflächentemperatur

Darin ist zu erkennen, wie die warme Luft an einer Wand vorbei nach oben steigt und an der Decke abkühlt, ehe sie auf der anderen Seite des Raums an der Wand entlang wieder nach unten sinkt. Dagegen stellt sich in derselben Schnittebene bei einer Deckenheizung ein wesentlich heterogeneres Strömungsprofil ein, wie an den vielen Verwirbelungen unmittelbar unter der warmen Deckenoberfläche in Abbildung 4 zu sehen ist. Hier ist jedoch zu betonen, dass die aufgezeigten Bilder nicht repräsentativ für alle Fußboden- und Deckenheizungen sind, da aufgrund der Komplexität des betrachteten Systems und entstehender Turbulenzen dieses meist instabil ist. Ferner waren auch große Abweichungen bei den Strömungsprofilen anderer Ebenen zu erkennen.

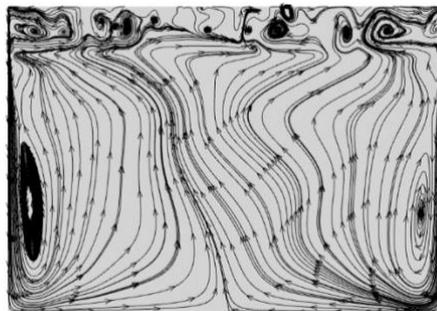


Abbildung 4: Luftströmungsprofil der betrachteten Ebene bei einer Deckenheizung mit 29 °C Oberflächentemperatur

Interessanter als dieser qualitative Blick ist jedoch die Analyse der sich einstellenden Luftgeschwindigkeiten unter Berücksichtigung aller untersuchten Szenarien. In allen Simulationen lag die maximale Luftgeschwindigkeit unter 0,1 m/s, auch in Szenarien, in denen die beheizte Wand 29 °C und die gegenüberliegende Wand nur 15,5 °C warm waren. Ohne Belüftung stellen sich also in einem Raum mit Wandheizung trotz hoher Temperaturdifferenzen von 14 K zwischen verschiedenen Wänden als auch in Räumen mit Deckenheizung nur geringe Luftgeschwindigkeiten ein. Die Werte des Szenarios einer Fußbodenheizung waren mit etwa 0,22 m/s wesentlich höher als bei den anderen Szenarien,

sodass bei Fußbodenheizungen Zuglufterscheinungen und der Transport von Staubpartikeln über die Konvektionsströmungen eine vergleichbar größere Rolle spielen. Die in Ansys simulierten Luftgeschwindigkeiten wurden anschließend für die Simulationen in TRNSYS verwendet und darin im Rahmen der Analyse der thermischen Behaglichkeit nach DIN EN ISO 7730 im Modell hinterlegt.

Simulationen in TRNSYS

Auch in TRNSYS [TRNSYS] wurde zunächst die Klimakammer und anschließend ein Beispielraum mit gleicher Geometrie bei unterschiedlichen Fensterflächen modelliert (Abbildung 5).

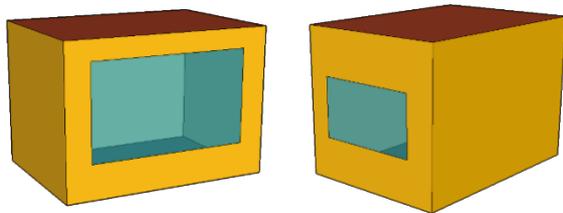


Abbildung 5: TRNSYS Modelle eines Beispielraums (links) und der Klimakammer (rechts)

Erste Untersuchungen konzentrierten sich auf den Vergleich mit den Simulationen in Ansys und speziell auf den Einfluss der Entfernung zur temperierten Fläche. Wie zu erwarten und anhand der Abbildung 6 zu erkennen ist, ist der Einfluss einer beheizten Oberfläche auf die thermische Behaglichkeit höher, je näher sich der Messpunkt an dieser Fläche befindet.

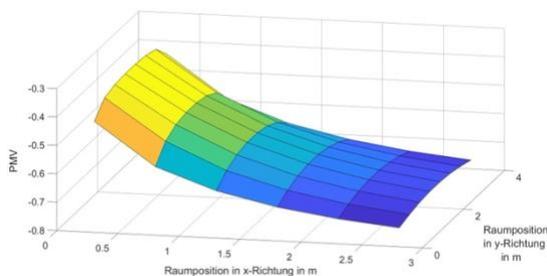


Abbildung 6: PMV in Abhängigkeit von der Lage im Raum und Distanz zur beheizten Wand (yz-Ebene) bei einer Höhe von 1,75 m

In der Abbildung bildet jede Nullebene des Koordinatensystems eine Wand der Klimakammer ab. Die yz-Ebene stellt die beheizte Wand (29 °C) dar. Es ist zu erkennen, dass die PMV-Werte direkt vor der beheizten Wand mittig am höchsten sind. Zu den Rändern hin beeinflussen die kühleren Wände die mittlere Strahlungstemperatur und reduzieren dadurch das PMV leicht. Die dargestellten Effekte der Position der Messpunkte waren für die übrigen Asymmetrieszenarien analog. Für die thermische Behaglichkeit relevante Randbedingungen entsprechend DIN EN ISO 7730 waren: Bekleidungsisolierung: $I_{cl} = 1 \text{ clo}$, Energieumsatz:

$M = 1 \text{ met}$, relative Luftgeschwindigkeit: $v_{ar} = 0,01 - 0,22 \text{ m/s}$, relative Luftfeuchte: $RH = 50\%$. Die Luftgeschwindigkeiten wurden dabei den Simulationen in Ansys entnommen und die Lufttemperatur betrug 20 °C.

Um weitere und insbesondere möglichst realistische Asymmetrieszenarien untersuchen zu können, wurden die beiden Modelle in TRNSYS zusätzlich für die Ermittlung realistischer Oberflächentemperaturen genutzt. Beide Räume aus Abbildung 5 wurden in TRNSYS in einem Außenklima aus TRY-Datensätzen [Deutscher Wetterdienst, Regionales Klimabüro Essen; Deutscher Wetterdienst, 2022] für den Standort Kaiserslautern simuliert. Bei der Klimakammer wurde neben der Wand mit Fenster zusätzlich eine lange Wand als Außenwand abgebildet und bei dem Beispielraum war lediglich die Wand mit Fenster eine Außenwand. Als Dämmstandard wurde jeweils einmal ein GEG-Standard [Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK, 2023] (U-Wert der Außenwände 0,28 W/m²K) gewählt und einmal ein Standard für übliche Gebäude bis 1968 nach [Deutsche Energie-Agentur GmbH, 2015] mit einem U-Wert der Außenwände von 1,4 W/m²K. Die erforderliche operative Temperatur während der Simulationen betrug 20,4 °C und sie wurde durch die unterschiedlichen Heizsysteme gewährleistet. Auf diese Weise wurde der Einfluss des Dämmstandards auf die erforderliche Oberflächentemperatur der Heizfläche und somit auch auf die Qualität der Strahlungsasymmetrie untersucht. Die Innenwandoberflächen betragen in allen Szenarien etwa 20 °C. Bei einem geringeren Dämmstandard mussten die Heizsysteme maximal 27 – 33 °C generieren, beim GEG-Standard reichten maximale Temperaturen von 24 – 26 °C. Gleichzeitig kühlten die Außenwände beim höheren U-Wert auf etwa 16 °C herunter, während die Oberflächentemperatur beim GEG-Standard bei etwa 19,5 °C lag (Tabelle 1). Die simulierten Werte dienten anschließend als Randbedingungen für die Simulationen in TAItherm.

Tabelle 1: simulierte Oberflächentemperaturen aus TRNSYS

U-Wert Außenwand [W/m ² K]	Innenwand [°C]	Außenwand [°C]	Heizfläche [°C]
0,28	~ 20	~ 19,5	24 – 26
1,40	~ 20	~ 16,2	27 – 33

Simulationen in TAItherm

Mithilfe des thermischen Simulationsprogramms TAItherm [TAItherm] war es möglich, die Strahlungsasymmetrien der in TRNSYS bestimmten Szenarien im Rahmen des UCB Thermal Comfort Modells zu untersuchen. Wie in Abbildung 7 zu sehen ist, können darin menschliche Körper modelliert und analysiert werden.

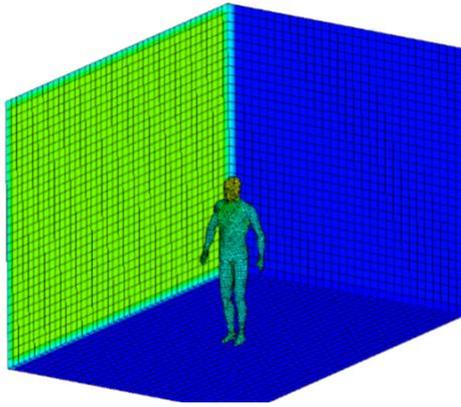


Abbildung 7: TAItherm Modell der Klimakammer

Die Geometrie des Raumes im Modell entspricht den oben vorgestellten Abmessungen der Klimakammer. Das menschliche Modell stand in den Simulationen zunächst mittig im Raum. Entsprechend des UCB-Modells werden als Ergebnis sowohl die lokalen und globalen thermischen Empfindungen (Abbildung 8) als auch die lokale und globale thermische Behaglichkeit (Abbildung 9) generiert.

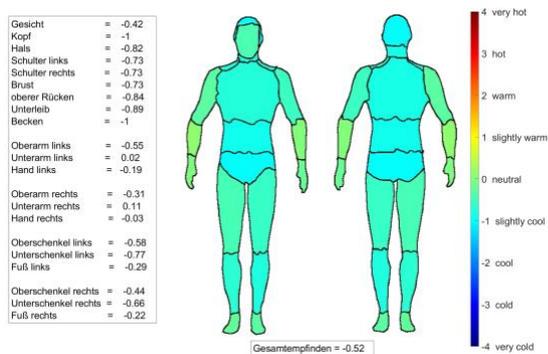


Abbildung 8: thermisches Empfinden einer Person im Raum mit Wandheizung in Blickrichtung rechts der Person und einer gegenüberliegenden Außenwand mit $U = 1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$

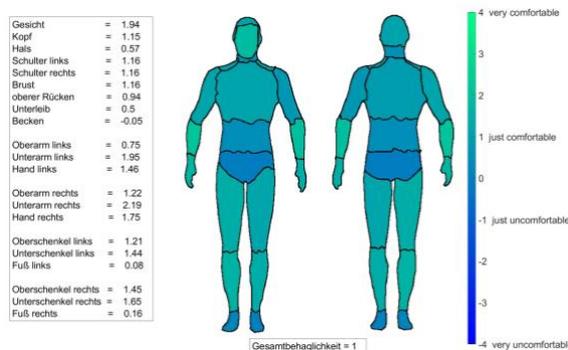


Abbildung 9: thermische Behaglichkeit einer Person im Raum mit Wandheizung in Blickrichtung rechts der Person und einer gegenüberliegenden Außenwand mit $U = 1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$

Wie auch in der DIN EN ISO 7730 gilt für das UCB-Modell, dass unzufriedene Personen solche sind, die nach der 7-stufigen Klimabeurteilungsskala entweder

mit heiß (+3), warm (+2), kühl (-2) oder kalt (-3) urteilen. Daraus ergibt sich der Zusammenhang, dass Werte für das thermische Empfinden zwischen etwas warm (+1) und etwas kühl (-1) zu Wahrnehmungen von mindestens *just comfortable* führen. Dabei sind jedoch auch der Einfluss lokaler Unbehaglichkeiten sowie die gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Segmente zu berücksichtigen. Ein Vergleich der UCB Behaglichkeit mit den PMV-Werten ist schwierig, da der PMV lediglich das thermische Empfinden darstellt, das UCB-Modell jedoch die thermische Behaglichkeit beschreibt. Daher werden in Tabelle 2 zusätzlich die PMV-Werte des Fanger'schen Modells den thermischen Empfindungen des UCB-Modells gegenübergestellt.

Tabelle 2: Gegenüberstellung der globalen Empfindungen durch PMV, UCB und die operative Temperatur der Simulationen des Beispielraumes

Heizfläche	U-Wert Außenwand [W/m ² K]	PMV	sensation / comfort nach UCB		T _{op} [°C]
Wand	0,28	-0,90	-0,52	1,04	20,5
	1,4	-0,91	-0,52	0,99	20,5
Decke	0,28	-0,92	-0,51	1,02	20,4
	1,4	-1,01	-0,55	0,94	20,1
Boden	0,28	-0,86	-0,52	1,13	20,7
	1,4	-0,86	-0,54	1,08	20,7

Es ist zu erkennen, dass die Empfindungen im UCB-Modell als etwas wärmer vorhergesagt werden als im Modell nach Fanger. Auch sind die Abweichungen der thermischen Empfindungen zwischen den drei Heizarten beim UCB geringer als beim PMV-Modell. Diese Abweichungen des PMV korrelieren mit der operativen Temperatur, die als arithmetisches Mittel aus der mittleren Strahlungstemperatur des Körpermodells in TAItherm und der Raumlufttemperatur ermittelt wurde. Die Unterschiede in der operativen Temperatur sind darauf zurückzuführen, dass in TAItherm das PMV-Modell am gesamten Manikin bestimmt wird und in TRNSYS lediglich an einem imaginierten Messpunkt in der Mitte des Raumes. In den TRNSYS Simulationen lagen die operativen Temperaturen bei 20,4 °C und die Oberflächentemperaturen der Szenarien entsprechen den dort simulierten Ergebnissen. Da das Manikin in TAItherm jedoch einen direkten Kontakt zum Fußboden hat und sich die Werte auf einen ganzen Körper und nicht nur auf einen Punkt beziehen, entstehen leichte Diskrepanzen zwischen den Simulationsprogrammen, welche sich wiederum auf die operative Temperatur und folglich auch auf die PMV-Werte auswirken. Durch die Berücksichtigung der lokalen Empfindungen scheint das UCB-Modell stabiler gegenüber diesen kleineren Abweichungen zu sein. Auch die operative Temperatur scheint einen größeren Einfluss im Modell nach Fanger zu haben als unter Berücksichtigung der lokalen Empfindungen. Die

Behaglichkeit nach UCB lag in allen Szenarien der Tabelle 2 in einem Bereich von $1,04 \pm 0,1$ (noch behaglich). Die höchsten Werte wurden ebenfalls bei der Fußbodenheizung erreicht, was auf die von der Richtung des Wärmestroms abhängigen Wärmeübergänge und den direkten Kontakt zwischen Boden und Füßen zurückzuführen ist. Auch wenn die Abweichungen der globalen thermischen Behaglichkeit der jeweiligen Heizsysteme vom Mittelwert etwa 10% betragen, lohnt sich hier ein Blick auf die Skala des UCB-Modells. Alle Werte liegen unmittelbar um den Bereich (+1) *just comfortable*. Wie sehr die leichten Diskrepanzen für Personen im Raum spürbar wären, bleibt fraglich. Die Ergebnisse wurden auch noch nicht validiert und sind als vorläufig anzusehen.

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden simulative Untersuchungen des Einflusses der Strahlungsasymmetrie auf die thermische Behaglichkeit vorgestellt. Die drei verwendeten Simulationsprogramme mit je eigenem Untersuchungsschwerpunkt ermöglichten eine umfassende Analyse des Forschungsschwerpunkts. Fokus der Simulationen lag auf dem Modell nach Fanger, dem UCB-Modell und der operativen Temperatur als Indikator der thermischen Behaglichkeit. In Ansys wurden zunächst Strömungsprofile bei unterschiedlichen Flächenheizungen in der Klimakammer des Fachgebiets simulativ untersucht. Durch eine solche physikalische Raumanalyse können die Einflüsse der Strahlungsasymmetrien auf verschiedene Randbedingungen der thermischen Behaglichkeit analysiert werden. Dabei wiesen die Luftbewegungen bei allen Szenarien mit Wand- oder Deckenheizungen nur geringe Geschwindigkeiten $<0,1$ m/s auf, dagegen bei der Fußbodenheizung mit $0,22$ m/s wesentlich höhere. Anschließend wurden die Klimakammer und ein Beispielraum in TRNSYS modelliert, um zum einen die thermische Behaglichkeit im Rahmen des PMV-Modells zu untersuchen und zum anderen möglichst realistische Oberflächentemperaturen in diversen Asymmetrieszenarien zu ermitteln. Die berechneten Oberflächentemperaturen dienten dann als Randbedingungen für die Simulationen in TAItherm, in denen der Untersuchungsrahmen mit dem UCB-Modell erweitert wurde. Darin waren leichte Diskrepanzen zwischen den beiden untersuchten Modellen zu erkennen, ebenso wie eine Korrelation zwischen der operativen Temperatur und der thermischen Behaglichkeit. Aufgrund noch fehlender Validierungen sind die aufgezeigten Ergebnisse jedoch noch als vorläufig anzusehen.

Danksagung

Die Autor*innen bedanken sich beim Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) für die

Förderung im Rahmen der Forschungsinitiative Zukunft Bau. Aufbauend auf den Erkenntnissen des geförderten Projektes wurden die hier gezeigten Ergebnisse erzielt.

Literatur

- Ansys: Ansys Academic Research Fluent Release 20.2.
- Blum T. 2023. Ganzheitliche Bewertung eines auf Peltier-Elementen basierenden Flächenheiz- und -kühlsystems. In: Schriftenreihe des Fachgebiets Bauphysik / Energetische Gebäudeoptimierung, Band 6. Doctoralthesis. XIII, 144.
- Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat. 2015. Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) Büro- und Verwaltungsgebäude. Soziokulturelle Qualität - Kriterium: Thermischer Komfort. Berlin.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK. 2023. Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden: Gebäudeenergiegesetz - GEG.
- Deutsche Energie-Agentur GmbH. 2015. Reihe "Leitfaden Energieausweis": Teil 1 - Energiebedarfsausweis: Datenaufnahme Wohngebäude. Berlin.
- Deutscher Wetterdienst. 2022. Klimaberatungsmodul. <https://kunden.dwd.de/obt/>.
- Deutscher Wetterdienst, Regionales Klimabüro Essen. Testreferenzjahre (TRY). <https://www.dwd.de/DE/leistungen/testreferenzjahre/testreferenzjahre.html>.
- DIN EN 1264-2: DIN EN 1264-2:2021 Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlssysteme mit Wasserdurchströmung - Teil 2: Fußbodenheizung: Prüfverfahren für die Bestimmung der Wärmeleistung unter Benutzung von Berechnungsmethoden und experimentellen Methoden; Deutsche Fassung EN 1264-2:2021, Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- DIN EN 13779: DIN EN 13779:2005-05, Lüftung von Nichtwohngebäuden - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühlssysteme; Deutsche Fassung EN 13779:2007, Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- DIN EN 16798-1: DIN EN 16798-1:2019, Energetische Bewertung von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden - Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich der Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik - Modul M1-6. Deutsche Fassung EN 16798-1:2019, Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- DIN EN ISO 7730: 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 (ISO 7730:2005), Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- Fanger PO. 1970. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering.
- Hofmann M, Geyer C, Kornadt O. 2020. Indoor Climate Measurements in Buildings and Design Functions for Building Simulations:42029.
- Kornadt O, Carrigan S, Hartner M, Schöndube T, Wilhelm J, Lachmann M, Lermen H, Kissinger M, Beecken C, Becker S. 2021. Analyse der Diskrepanz zwischen berechnetem Energiebedarf nach EnEV und tatsächlichem Energieverbrauch: Abschlussbericht F.
- Krohn J, Carrigan S, Friedrich T, Kornadt O, editors. 2020. Energy efficient heating and cooling ventilation system with integrated PCM heat storage units.
- Rupp RF, Vásquez NG, Lamberts R. 2015. A review of human thermal comfort in the built environment. *Energy and buildings* 105:178–205.
- Schellen L, Loomans M, Kingma BRM, Wit MH de, Frijns AJH, van Marken Lichtenbelt WD. 2013. The use of a thermophysiological model in the built environment to predict thermal sensation: coupling with the indoor environment and thermal sensation. *Building and Environment* 59:10–22.
- Schöndube T, Beecken C, Jülg L, Kornadt O. 2022. Treibhausgaspotenzial von Wohngebäuden unter Berücksichtigung der Herstellungs-, Nutzungs- und Instandhaltungsphase in Abhängigkeit vom energetischen Gebäudestandard. In: *Bauphysik in Forschung und Praxis - Bauphysiktag Kaiserlautern 2022*. Schriftenreihe des Fachgebiets Bauphysik/Energetische Gebäudeoptimierung, Band 5, S. 167-170, ISSN 2363-8206, ISBN 978-3-95974-176-7.
- Schröter B, Spiegel J, Carrigan S, Kornadt O, Friedrich T, Wißbach M, Platzek D, Büscher W. 2023. Energiegewinn und Energieeinspeicherung des Prototyps eines neuartigen Wärmespeicher- und Energieerzeugungssystems. *Bauphysik* 45, H. 5, S. 245–251.
- TAItherm: TAItherm 2022.2.1, 3D thermal simulation software, ThermoAnalytics, Calumet, MI USA.
- TRNSYS: TRNSYS 18: Transient System Simulation Tool, Madison, WI, USA: Thermal Energy System Specialists.
- Völker C. 2012. Entwicklung und messtechnische Validierung der Kopplung von CFD-Simulation mit einem thermophysiologicalen Modell zur Bestimmung der thermischen Behaglichkeit. Autor: Völker, C; Bauhaus-Universität Weimar, Verl. Im Jonas Verlag, ISBN 978-3-95773-051-0. Kornadt, O. (Hrsg.).
- Zhang H, Arens E, Huizenga C, Han T. 2010a. Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part II: Local comfort of individual body parts. *Building and Environment* 45:389–398.
- Zhang H, Arens E, Huizenga C, Han T. 2010b. Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part III: Whole-body sensation and comfort. *Building and Environment* 45:399–410.
- Zhang H, Arens E, Huizenga C, Han T. 2010c. Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments: Part I: Local sensation of individual body parts. *Building and Environment* 45:380–388.
- Zhao Y, Zhang H, Arens EA, Zhao Q. 2014. Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part IV: adaptive neutral setpoints and smoothed whole-body sensation model. *Building and Environment* 72:300–308.
- Zheng P, Wu H, Liu Y, Ding Y, Yang L. 2022. Thermal comfort in temporary buildings: A review. *Building and Environment* 221:109262.

UNTERSUCHUNG DES RAUMSEITIGEN WÄRMEÜBERGANGS VON BAUTEILEN: EIN VERGLEICH DER ERGEBNISSE VON CFD- UND WÄRMETRANSPORT-SIMULATIONEN

Zhenming Peng¹, Svenja Carrigan¹, Oliver Kornadt¹

¹ *Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau, Deutschland, E-Mail: zhenming.peng@rptu.de / svenja.carrigan@rptu.de / oliver.kornadt@rptu.de*

Kurzfassung

In dieser Studie wurde die Oberflächentemperatur in Räumen mit Fußbodenheizung durch CFD- und Wärmetransport-Simulationen untersucht. Verschiedene Randbedingungen wurden in den Wärmetransport-Simulationen berücksichtigt. Der lokale Wärmeübergangskoeffizient wurde aus CFD-Simulationen ermittelt, über einzelne Wandbereiche von $0,5\text{ m} \times 0,5\text{ m}$ sowie $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ auf den gesamten Bauteilflächen gemittelt und dann in den Wärmetransport-Simulationen verwendet. Des Weiteren wurde der Einfluss der Verwendung des normativen pauschalen Werts des Wärmeübergangskoeffizienten für den Feuchteschutz und für energetische Berechnungen untersucht. Die Studie zeigt, dass die Wahl der Referenztemperatur zur Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten entscheidend ist, um realistische Ergebnisse zu erhalten. Die Ergebnisse weisen außerdem die Bedeutung der durchschnittlichen Raumlufttemperatur bei der normativen Bewertung von Schimmelpilz- und Tauwasserbildung hin. Diese Ergebnisse können zur Entwicklung eines präzisen Modells für den Wärmeübergangskoeffizienten beitragen, welches die niedrigste Oberflächentemperatur und die Temperaturverteilung der Oberfläche voraussagen kann.

Einleitung

Die Temperatur an der inneren Oberfläche der Bauteile ist eine wichtige Größe zur Beurteilung der Tauwasser- und Schimmelpilzfreiheit. Des Weiteren ist diese Temperatur eine wichtige Größe zur Auswertung der Behaglichkeit und zur energetischen Berechnung von Gebäuden. Die Oberflächentemperatur wird vom raumseitigen Wärmeübergang beeinflusst. Der Wärmeübergang kann durch den Wärmeübergangskoeffizienten quantifiziert werden.

Die gesamte Wärmestromdichte q_t aufgrund des konvektiven und radiativen innenseitigen Wärmeübergangs aufgrund des Unterschieds zwischen der Temperatur der Innenoberfläche T_s und der Referenztemperatur T_{ref} sowie dem gesamten

Wärmeübergangskoeffizient h_t kann nach Gleichung 1 bestimmt werden.

$$q_t = h_t * (T_s - T_{ref}) \quad [\text{W/m}^2] \quad (1)$$

Gemäß DIN EN ISO 6946 (DIN, 2018) wird im bauphysikalischen Kontext die Raumlufttemperatur als Referenztemperatur angesetzt.

Der Vorteil der Anwendung des Wärmeübergangskoeffizienten liegt darin, dass nur die Energieerhaltungsgleichung in Kombination mit Gleichung 1 für die Simulation der Temperaturverteilung auf den Bauteilflächen und des Wärmestroms durch die Bauteile gelöst werden muss. Dieser Ansatz wird in dieser Studie als Wärmetransport-Simulation bezeichnet, und ist in den meisten Gebäudesimulationsprogrammen, wie z. B. TRNSYS, WUFI, EnergyPlus zu finden.

Der Wärmeübergangskoeffizient ist nicht nur von der Baukonstruktion, sondern auch von dem Raumkonditionierungssystem und der Geometrie des Raums abhängig (Blum et al., 2023; Peng et al., 2022; Peng et al., 2023). Er wird generell empirisch durch experimentelle Untersuchungen oder CFD (Computational Fluid Dynamics) – Simulationen ermittelt, wobei nicht nur die Energieerhaltung, sondern auch die Masse- und Impulserhaltung der Luftströmung berücksichtigt werden.

In der Praxis wird der Wärmeübergangskoeffizient nach Norm als ein pauschaler Wert angenommen. Zur Ermittlung der Wärmestromdichte durch die Gebäudehülle für energetische Berechnungen beträgt der Wert $7,69\text{ W/m}^2\text{K}$ für die raumseitige Oberfläche der Außenwand gemäß DIN EN ISO 6946 (DIN, 2018). Zum Nachweis der Tauwasser- und Schimmelpilzfreiheit an raumseitigen Oberflächen gilt ein reduzierter Wert von $4\text{ W/m}^2\text{K}$ gemäß DIN 4108-2 (DIN, 2013) und DIN EN ISO 13788 (DIN, 2013). Dieser Wert fungiert als eine der Randbedingungen, um die niedrigste Oberflächentemperatur rechnerisch oder simulativ mit Wärmetransport-Simulationen zu ermitteln. Die anderen Randbedingungen sind:

- Außenlufttemperatur: -5 °C

- Wärmeübergangskoeffizient für die Außenoberfläche der Wand: $25 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Raumlufttemperatur: $20 \text{ }^\circ\text{C}$

In dieser Studie wird der gesamte Wärmeübergangskoeffizient der raumseitigen Oberflächen mittels CFD-Simulationen für einen Raum mit einer Fußbodenheizung bestimmt und die Ergebnisse anschließend für die Wärmetransport-Simulationen verwendet. Die aus unterschiedlichen Ansätzen (z. B. lokaler oder flächengemittelter Wärmeübergangskoeffizient) ermittelte niedrigste Oberflächentemperatur und Temperaturverteilung auf den raumseitigen Oberflächen im Bereich einer Wärmebrücke wurden untereinander und mit der Wärmetransport-Simulation anhand des normativen Ansatzes verglichen. Basierend auf diesen Untersuchungen soll ein effizienter Ansatz für die Ermittlung der niedrigsten Temperatur und der Temperaturverteilung auf den raumseitigen Oberflächen gefunden werden.

Methoden

CFD-Simulation

Für die CFD-Simulation wurde die Software ANSYS Fluent verwendet (ANSYS Inc). Die Geometrie des simulierten Raums ist in Abbildung 1 dargestellt.

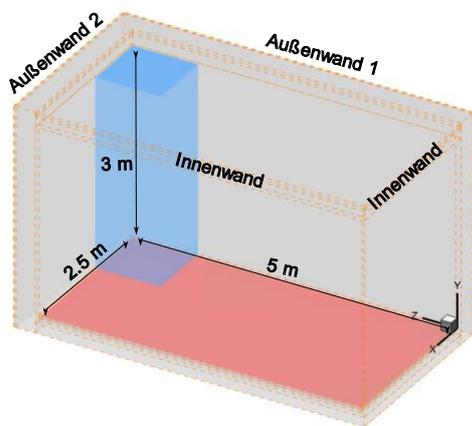


Abbildung 1: Raumgeometrie mit dem beheizten Fußboden (rot) für die CFD-Simulationen und die berücksichtigten Bereiche für die Wärmetransport-Simulationen (blau)

Der Raum hat innere Abmessungen von 5 m Länge, 3 m Höhe und 3 m Breite. Ein schlechterer U-Wert führt zu einer höheren Inhomogenität der Temperaturverteilung auf den raumseitigen Flächen im Bereich der geometrischen Wärmebrücken, was dabei helfen könnte, die Abweichung zwischen unterschiedlichen Ansätzen zur Ermittlung der Oberflächentemperatur zu veranschaulichen. Daher wurde ein U-Wert für die Außenwand von $0,85 \text{ W/m}^2\text{K}$ ausgewählt. Der Aufbau der Außenwand besteht von innen nach außen aus 15 mm Putz, 300 mm Beton, 29 mm Dämmung und 15 mm Putz. Die

Innenwände bestehen aus 15 mm Putz, 175 mm Beton und 15 mm Putz. Boden und Decke sind mit 45 mm Estrich, 40 mm Dämmung und 150 mm Beton ausgeführt.

Die Innenbauteile des Raumes wurden als adiabatische Bauteile angenommen. Für die Außenwände 1 und 2 wurde eine konstante Außenlufttemperatur von $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ und ein äußerer Wärmeübergangskoeffizient von $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ festgelegt. Die Bodentemperatur wurde so angepasst, dass die durchschnittliche Raumlufttemperatur bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$, die der normativen Randbedingung für den Feuchtschutz entspricht, gehalten wurde. Zwei zusätzliche Situationen bei zwei anderen Bodentemperaturen, deren durchschnittliche Raumlufttemperatur von $19 \text{ }^\circ\text{C}$ und $24,8 \text{ }^\circ\text{C}$ von den normativen Randbedingungen abweichen, wurden ebenfalls durchgeführt.

Die Turbulenz wurde mit dem $k-\omega$ -SST Modell modelliert. Der Strahlungsaustausch zwischen den Oberflächen wurde mithilfe des Surface-to-Surface (S2S) Modells berücksichtigt.

Basierend auf den CFD-Ergebnissen wurden sowohl der flächengemittelte Wärmeübergangskoeffizient als auch der lokale (in Gitterelementen der Größe $0,02 \text{ m} \times 0,02 \text{ m}$ ermittelte) gesamte Wärmeübergangskoeffizient berechnet.

Wärmetransport-Simulation

Für die Wärmetransport-Simulation wird die Energieerhaltungsgleichung in ANSYS gelöst. Für den Boden entsprach die Oberflächentemperatur der Bodentemperatur aus den CFD-Simulationen. Für die anderen raumseitigen Oberflächen wurde Gleichung 1 als Randbedingung gesetzt. Die folgenden Ansätze für diese Randbedingung wurden verfolgt:

Ansatz 1 (A1, Referenzvariante): Verwendung der lokalen gesamten Wärmeübergangskoeffizienten $h_{t,local}$ aus den CFD-Simulationen. Das Simulationsgitter entspricht dem Gitter der CFD-Simulationen mit einer Elementgröße von $0,02 \text{ m} \times 0,02 \text{ m}$.

Ansatz 2 (A2): Verwendung der 1 % Quantile der Wärmeübergangskoeffizienten $h_t^{1\%}$ an dem Wärmebrückenbereich aus den CFD-Simulationen für die gesamten Flächen.

Ansatz 3 (A3): Verwendung des flächengemittelten Wärmeübergangskoeffizienten $\bar{h}_{t,1}$. Die Größe jeder Einzelfläche für die Mittelung beträgt $0,5 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$.

Ansatz 4 (A4): Verwendung des flächengemittelten Wärmeübergangskoeffizienten $\bar{h}_{t,2}$. Die Größe jeder Einzelfläche für die Mittelung beträgt $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$.

Ansatz 5 (A5): Verwendung des normativen pauschalen Wertes zum Feuchtschutz $h_{t,n1}$.

Ansatz 6 (A6): Verwendung des normativen pauschalen Wertes zu energetischen Berechnungen $h_{t,n2}$.

Die Referenztemperatur für die einzelnen Ansätze ist in Tabelle 1 zusammengefasst. $\bar{h}_{t,1}$ und $\bar{h}_{t,2}$ für Ansätze A3 und A4 wurden anhand des Temperaturunterschiedes zwischen der Oberfläche und der durchschnittlichen Raumlufitemperatur und der durchschnittlichen Wärmestromdichte bestimmt. Bei der Ermittlung des $h_t^{1\%}$ für Ansatz A2 wurde ebenfalls die durchschnittliche Raumlufitemperatur \bar{T}_{air} als T_{ref} verwendet. Es wurde festgestellt, dass $h_{t,local}$ negativ ausgewiesen wurde, wenn die lokale Oberflächentemperatur höher als die durchschnittliche Raumlufitemperatur ist. Dies geschah vor allem in den Bereichen an den Wänden in der Nähe des beheizten Bodens. Der Einsatz eines negativen Wärmeübergangskoeffizienten als Randbedingung in die Wärmetransport-Simulation führte zur Divergenz. Daher wurde die Fußbodentemperatur T_{boden} , die die höchste Temperatur im Raum ist, als T_{ref} für die Berechnung des $h_{t,local}$ verwendet. In der Wärmetransport-Simulation mit den normativen pauschalen Werten wurden die normative Raumlufitemperatur von 20 °C und \bar{T}_{air} als T_{ref} jeweils für Ansätze A5 und A6 eingesetzt.

Tabelle 1: Referenztemperatur für die Ansätze zur Anwendung des Wärmeübergangskoeffizienten als Randbedingung: T_{boden} , \bar{T}_{air} sind jeweils die Bodentemperatur und die durchschnittliche Raumlufitemperatur

A1	A2	A3	A4	A5	A6
T_{boden}	\bar{T}_{air}	\bar{T}_{air}	\bar{T}_{air}	20°C	\bar{T}_{air}

Die Ergebnisse aus den Wärmetransport-Simulationen, nämlich die niedrigste lokale Temperatur und die Temperaturverteilung auf den raumseitigen Oberflächen wurden für den blau markierten Flächen in der Abbildung 1 ausgewertet. Die berücksichtigten Bereiche wurden so ausgewählt, dass sie dem Bereich in der Norm DIN EN ISO 10211 (DIN, 2018) zur Berechnung der Oberflächentemperaturen im Bereich der Wärmebrücke entspricht. Bei den beiden Außenwänden beginnt die Fläche an der Kante zwischen diesen und erstreckt sich über eine horizontale Länge von 1 m. Bei der Decke und dem Boden beginnen die Flächen jeweils an der Kante zu ihren angrenzenden Außenwänden, sowohl die Breite als auch die Länge dieser Flächen betragen jeweils 1 m.

Tabelle 2: Niedrigste lokale Oberflächentemperatur aus den CFD-Simulationen bei durchschnittlichen Raumlufitemperaturen von 19,0 °C, 20,0 °C, 24,8 °C, und den Wärmetransport-Simulationen mit den Ansätzen A1-A6, dazu deren prozentuale relativen Abweichungen zur Referenzvariante A1.

T_{min} [°C]		\bar{T}_{air} [°C]		
		19,0	20,0	24,8
CFD-SIMULATIONEN		11,8	12,6	16,2
WÄRMETRANSPORT-SIMULATIONEN	A1 (REF.)	11,8	12,6	16,2
	A2	8,1 (-31,87 %)	8,8 (-30,48 %)	12,2 (-24,46 %)
	A3	12,2 (3,30 %)	13,0 (3,17 %)	16,7 (3,09 %)
	A4	12,3 (4,06 %)	13,1 (3,89 %)	16,8 (3,77 %)
	A5	12,4 (4,48 %)	12,4 (-1,83 %)	12,4 (-23,66 %)
	A6	14,0 (17,92 %)	14,7 (16,98 %)	18,5 (14,45 %)

Tabelle 3: Mittlere absolute Fehler (MAE) [K] und die Wurzel aus dem mittleren quadratischen Prognosefehler (RMSE) [K] der Temperaturverteilung auf den raumseitigen Oberflächen von den Wärmetransport-Simulationen mit den Ansätzen A2-A6 zur Referenzvariante A1 bei durchschnittlichen Raumlufitemperaturen von 19,0 °C, 20,0 °C, 24,8 °C.

		\bar{T}_{air} [°C]					
		19,0		20,0		24,8	
		MAE [K]	RMSE [K]	MAE [K]	RMSE [K]	MAE [K]	RMSE [K]
WÄRMETRANSPORT-SIMULATIONEN	A2	3,8	4,2	3,9	4,3	4,1	4,6
	A3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	A4	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2
	A5	0,8	1,0	0,9	1,1	4,4	4,8
	A6	0,9	1,0	0,9	1,0	0,9	1,1

Simulationsergebnisse

Niedrigste Oberflächentemperatur

Tabelle 2 stellt die Ergebnisse der niedrigsten Oberflächentemperatur aus den CFD-Simulationen und den Wärmetransport-Simulationen mit A1-A6 vor. Die prozentuale relative Abweichung der niedrigsten Oberflächentemperatur zu der Referenzvariante A1 (Verwendung der lokalen gesamten Wärmeübergangskoeffizienten $h_{t,local}$ aus den CFD-Simulationen) wird ebenfalls dargestellt.

Es ist ersichtlich, dass die Verwendung des $h_{t,local}$ in den Wärmetransportsimulationen (A1) keine Abweichung zu den Ergebnissen der CFD-Simulationen aufweist, daher wird A1 als Referenzvariante für die Wärmetransportsimulationen verwendet. Durch die Verwendung von der $h_t^{1\%}$ (A2) wurden konservative Werte, d. h. Werte der niedrigsten Oberflächentemperatur, die niedriger als die in der Referenzvariante sind, mit einer Abweichung von bis zu -31,87 % ermittelt. Je niedriger die durchschnittliche Raumlufttemperatur ist, desto konservativer ist die mittels A2 ermittelte niedrigste Oberflächentemperatur.

Die Verwendung von $\bar{h}_{t,1}$ (A3) und $\bar{h}_{t,2}$ (A4) zeigt, dass ein um 3 % bis 4 % höherer Wert der niedrigsten Oberflächentemperatur im Vergleich zur Referenzvariante auftritt. Des Weiteren erhöht eine feinere Flächengröße für den flächengemittelten gesamten Wärmeübergangskoeffizienten die Genauigkeit.

Die Simulationsergebnisse mit dem pauschalen normativen Wert $h_{t,n1}$ (A5) für den Feuchteschutz deutet darauf hin, dass ein leicht konservativer Wert der niedrigsten Oberflächentemperatur mit einer Abweichung von -1,83 % in dem Fall auftritt, in dem die tatsächliche durchschnittliche Raumlufttemperatur der normativen Randbedingung mit 20 °C entspricht. Bei einer höheren durchschnittlichen Raumlufttemperatur von 24,8 °C ist die niedrigste Oberflächentemperatur noch konservativer mit einer Abweichung von -23,46 %. Auffällig ist die Abweichung bei einer durchschnittlichen Raumlufttemperatur unter 20 °C. In diesem Fall ist die niedrigste Oberflächentemperatur höher als die in der Referenzvariante, mit einer Abweichung von 4,48 % bei der durchschnittlichen Raumlufttemperatur von 19 °C. Die Verwendung des pauschalen normativen Wertes $h_{t,n2}$ (A6) zu energetischen Berechnungen zeigt, dass im Allgemeinen ein um 14,45 % bis 17,92 % höherer Wert der niedrigsten Oberflächentemperatur auftritt.

Alle Wärmetransport-Simulationen A1-A6 haben außerdem gezeigt, dass die Vorhersage der Position der Stelle mit der niedrigsten Oberflächentemperatur mit der in den CFD-Simulationen vorhergesagten Position übereinstimmt. Diese Stelle liegt auf der Höhe von 3 m an der dreidimensionalen Wärmebrücke.

Oberflächentemperaturverteilung

Neben der Ermittlung der niedrigsten Oberflächentemperatur ist die Ermittlung der Temperaturverteilung auf den raumseitigen Oberflächen ebenfalls sinnvoll. Sie ist wichtig für die Auswertung der thermischen Behaglichkeit, z. B. der Strahlungstemperatur.

Die Wärmetransport-Simulationen mit $h_{t,local}$ (A1) weisen wiederum keine Abweichung der Temperaturverteilung auf den raumseitigen Oberflächen zu den CFD-Simulationen auf. Tabelle 3 stellt die mittleren absoluten Fehler (MAE) und Wurzel aus dem mittleren quadratischen Prognosefehler (RMSE) der Temperaturverteilung auf den raumseitigen Oberflächen von den Wärmetransport-Simulationen der Ansätze A2-A6 im Vergleich zur Referenzvariante A1 vor.

Die Wärmetransport-Simulationen mit $\bar{h}_{t,1}$ (A3) und $\bar{h}_{t,2}$ (A4) zeigen jeweils ein maximales MAE und RMSE von 0,1 K und 0,1 K bei A3 und von 0,2 K bzw. 0,2 K bei A4 auf. D. h. die Genauigkeit erhöht sich mit einer feineren Flächengröße für den flächengemittelten gesamten Wärmeübergangskoeffizienten. Gemäß VDI 6020 (VDI, 2022) liegen die Genauigkeiten unter dem Richtwert für MAE und RMSE jeweils von 1,5 K bzw. 1 K für thermisch-energetische Simulationen. Die Verwendung von $h_t^{1\%}$ (A2) hingegen zeigt eine generell schlechte Voraussage über die Temperaturverteilung auf den Oberflächen.

Die Wärmetransport-Simulationen mit dem pauschalen normativen Wert $h_{t,n1}$ (A5) für den Feuchteschutz zeigen, dass bei den durchschnittlichen Raumlufttemperaturen von 19 °C und 20 °C die MAE und RMSE jeweils unter 1 K bzw. 1 K betragen. Sobald die durchschnittliche Raumlufttemperatur deutlich von dem normativen Wert von 20 °C abweicht, nehmen MAE und RMSE deutlich zu, auf jeweils 4,4 K und 4,8 K bei einer durchschnittlichen Raumlufttemperatur von 24,8 °C. Die Verwendung des pauschalen normativen Wertes $h_{t,n2}$ (A6) zu energetischen Berechnungen zeigt, dass MAE und RMSE bei allen drei durchschnittlichen Raumlufttemperaturen jeweils unter 1 K bzw. rund bei 1 K liegen.

Diskussion

Die Verwendung des lokalen (0,02 m × 0,02 m) Wärmeübergangskoeffizienten aus der CFD-Simulation in den Wärmetransport-Simulationen ergibt eine sehr gute Übereinstimmung mit der niedrigsten Oberflächentemperaturen und Temperaturverteilungen auf den raumseitigen Oberflächen mit denjenigen, die aus den CFD-Simulationen ermittelt wurden, weshalb diese Variante als Referenzvariante verwendet wurde (A1).

Die Verwendung des 1 %-Perzils des lokalen gesamten Wärmeübergangskoeffizienten führt zu einer deutlichen niedrigen Oberflächentemperatur im Vergleich zur Referenzvariante. Die dabei ermittelte niedrigste Oberflächentemperatur könnte für praktische

Anwendungen zu konservativ sein, d. h. die daraus resultierende erforderliche Dämmschicht könnte überdimensioniert werden. Außerdem wurde eine starke Abweichung in der Temperaturverteilung im Vergleich zur Referenzvariante festgestellt.

Ein um bis zu 4 % höherer Wert der niedrigsten Oberflächentemperatur wurde durch die Verwendung der flächengemittelten gesamten Wärmeübergangskoeffizienten festgestellt, bei einzelnen Flächengrößen von 0,5 m*0,5 m sowie 1 m*1 m. Da in der Praxis solche Abweichung auch aufgrund von Variationen durch Ausführung und in den Materialeigenschaften vorkommen kann, wird eine vierprozentige Abweichung als unkritisch angesehen.

Es wird ersichtlich, dass der normative pauschale Wert des gesamten Wärmeübergangskoeffizienten für den Feuchteschutz nur geeignet für die Ermittlung der niedrigsten Oberflächentemperatur bei einer tatsächlichen durchschnittlichen Raumlufttemperatur von 20 °C ist. Die Verwendung des normativen pauschalen Wertes des gesamten Wärmeübergangskoeffizienten für energetische Berechnungen kann aufgrund des niedrigen MAE und RMSE unter 1 K zur Voraussage der Temperaturverteilung für die Auswertung der Behaglichkeit sowie für energetische Berechnungen herangezogen werden. Jedoch resultiert dies in einer bis zu 17,92 % höheren Differenz der niedrigsten Oberflächentemperatur im Vergleich zur Referenzvariante.

Fazit

In dieser Studie wurden die niedrigste Oberflächentemperatur und die Temperaturverteilung auf den raumseitigen Oberflächen in CFD-Simulationen ermittelt und in unterschiedlichen Varianten in Wärmetransport-Simulationen für einen Raum mit Fußbodenheizung miteinander verglichen. Dabei wurden verschiedene Ansätze für die Randbedingungen in den Wärmetransport-Simulationen berücksichtigt. Basierend auf den CFD-Simulationen wurde der gesamte Wärmeübergangskoeffizient lokal ermittelt sowie über Flächen mit Größen von 0,5 m × 0,5 m sowie 1 m × 1 m gemittelt. Diese Werte wurden anschließend in den Wärmetransport-Simulationen als Randbedingungen verwendet. Zusätzlich wurden Simulationen durchgeführt, in denen der normative pauschale Wert des gesamten Wärmeübergangskoeffizienten für den Feuchteschutz sowie für energetische Berechnungen als Randbedingungen eingesetzt wurde.

Der Ansatz, den lokalen gesamten Wärmeübergangskoeffizienten aus CFD-Simulationen als Randbedingung für Wärmetransport-Simulationen zu verwenden, liefert eine präzise Voraussage zur niedrigsten Temperatur und Temperaturverteilung auf den raumseitigen Oberflächen (Referenzvariante). Dabei ist es wichtig, dass bei der Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten die Referenztemperatur sorgfältig ausgewählt wird, um sicherzustellen, dass der ermittelte lokale Wärmeübergangskoeffizient positiv

bleibt. Der Ansatz mit dem flächengemittelten Wärmeübergangskoeffizienten kann für die Auswertung der Behaglichkeit eingesetzt werden. Eine Mittelung des Wärmeübergangskoeffizienten über eine Fläche von 1 m × 1 m ist dafür ausreichend. Dieser Ansatz kann gleichzeitig zur Ermittlung der niedrigsten Oberflächentemperatur verwendet werden, wobei eine durchschnittliche Abweichung von unter 4 % erzielt wird. Dieser Vorschlag beschränkt sich jedoch auf den Fall in einem Raum mit Fußbodenheizung.

Der Genauigkeit der ermittelten niedrigsten Oberflächentemperatur mit dem normativen pauschalen Wert des gesamten Wärmeübergangskoeffizienten für den Feuchteschutz hängt stark von der tatsächlichen durchschnittlichen Raumlufttemperatur ab. Ein leicht konservativer Wert der niedrigsten Oberflächentemperatur, mit einer Abweichung von -1,83 % im Vergleich zur Referenzvariante, wurde bei einer durchschnittlichen Raumlufttemperatur von 20 °C festgestellt. Kritisch wird es für die Validierung der Schimmelpilz- und Tauwasserbildung, wenn die durchschnittliche Raumlufttemperatur unter die normative Bedingung von 20 °C fällt. In diesem Fall wird ein höherer Wert der niedrigsten Temperatur im Vergleich zur Referenzvariante ermittelt und die Differenz würde weiter mit sinkender Raumlufttemperatur zunehmen.

Die Ergebnisse dieser Studie können als Grundlage für die weitere Entwicklung eines Modells des Wärmeübergangskoeffizienten dienen, um die niedrigste Temperatur und die Temperaturverteilung auf den raumseitigen Oberflächen genau zu ermitteln.

Danksagung

Diese Forschung wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziert. Wir danken herzlich für ihre Unterstützung.

Literatur

- ANSYS Inc. Ansys Academic Research Fluent. Release 21.2.
- Blum, T., Carrigan, S., Platzek, D., & Kornadt, O. (2023). Evaluation of the energy efficiency of an active thermoelectric façade. *Energy and Buildings*, 292, 113–128.
- DIN 4108-2 (02.2013). Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 13788 (05.2013). Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren - Berechnungsverfahren. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 10211 (03.2018). Thermal bridges in building construction - Heat flows and surface

temperatures - Detailed calculations. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN EN ISO 6946 (05.2018). Bauteile –
Wärmedurchlasswiderstand und
Wärmedurchgangskoeffizient –
Berechnungsverfahren. Berlin: Beuth Verlag
GmbH.

Peng, Z., Carrigan, S., & Kornadt, O. (2022). Local
room-side heat transfer of an office room with
different heating strategies. *Bauphysik*, 44(6),
317–322.

Peng, Z., Carrigan, S., & Kornadt, O. (2023).
Numerical investigation of the heat transfer in
realistic rooms with a two-panel radiator. In :
*Building Simulation Conference Proceedings,
Proceedings of the 18th International IBPSA
Building Simulation Conference and Exhibition*,
751–758.

VDI 6020 (12.2022). Anforderungen an thermisch-
energetische Rechenverfahren zur Gebäude- und
Anlagensimulation. Berlin: Beuth Verlag GmbH.



TOMOGRAPHISCHES BACKGROUND-ORIENTED SCHLIERN (BOS) ZUR VISUALISIERUNG VON LUFTSTRÖMUNGEN

Lia Benetas, Hayder Alsaad, Conrad Völker

Bauhaus-Universität Weimar, Deutschland, E-Mail: lia.benetas@uni-weimar.de

Kurzfassung

Mithilfe des Background-Oriented Schlieren (BOS) können Dichtegradienten (basierend auf Temperatur- oder Druckgradienten) in transparenten Medien (hier: Luft) visualisiert werden. Dichtegradienten verursachen eine Ablenkung des Lichts, welches mit BOS visualisiert werden kann. In der vorliegenden Arbeit werden die Grundlagen des BOS sowie die Sensitivität des Setups an der Bauhaus-Universität Weimar vorgestellt. Die Empfindlichkeit des BOS wird über die Visualisierung einer nahezu zweidimensionalen Luftströmung sowie die zeitgleiche Erfassung der Temperatur über Thermistoren auf 0,3 K ($\Delta y = 0,21 \mu\text{m}$) und darunter ermittelt. Im weiteren Verlauf werden die grundlegenden Überlegungen zum Aufbau eines tomographischen BOS zur dreidimensionalen Rekonstruktion der Dichtegradienten vorgestellt.

Abstract

Using background-oriented schlieren (BOS), density gradients in transparent media can be visualized. These density gradients are based on differences in temperature or pressure and cause reflections of the light rays which can be detected by BOS. In this article, the principles of BOS as well as the sensitivity of the current setup at the Bauhaus-University Weimar are presented. The sensitivity is determined by visualizing a nearly two-dimensional airflow and simultaneously measuring the temperature of the flow using thermistors. It was found that the BOS setup described is able to visualize temperature differences of 0,3 K ($\Delta y = 0,21 \mu\text{m}$) and less. Furthermore, fundamental considerations of a tomographic BOS setup for three-dimensional reconstruction are presented.

Grundlagen des BOS

Mit Background-Oriented Schlieren (BOS) ist es möglich, Strömungen, die auf Dichtegradienten in der Luft beruhen, zu visualisieren. Diese Dichtegradienten basieren auf Unterschieden in Temperatur oder Druck des Mediums und verursachen damit Brechungsindexgradienten (Gladstone-Dale-Beziehung). Das Licht, welches den Dichtegradienten passiert, wird in dem Maße des Brechungsindexgradienten abgelenkt (Snelliussches Brechungsgesetz). Diese Ablenkung kann nichtinvasiv über BOS dargestellt werden.

Der Aufbau des BOS an der Bauhaus-Universität Weimar besteht aus einem strukturierten Hintergrund (schwarze Pixel auf weißem Grund mit einer Kantenlänge $G = 0,22 \text{ mm}$ und $\rho = 25 \%$) und einer Kamera (Canon EOS 5DS R mit einer effektiven Auflösung von $8688 \times 5792 \text{ px}$ inkl. Objektiv ZEISS Milvus 2/135, $f = 135 \text{ mm}$) zur zweidimensionalen Aufnahme (Abbildung 1). Zusätzlich kommen Lichtquellen (Blitzlichter Elinchrom ELC Pro HD 1000) zum Einsatz, um die Hintergrundstruktur auszuleuchten. $\Delta\epsilon$ beschreibt den Ablenkungswinkel eines Lichtstrahls, der den Dichtegradienten passiert, was zu einem Integral der virtuellen Verschiebung Δy (Phasenverschiebung) auf dem Kamerasensor führt. Die Dimensionen des Aufbaus werden beschrieben durch Z_B : Abstand von Hintergrund zu Kameralinse, Z_A : Abstand von Kameralinse zu Dichtegradient, Z_D : Abstand von Dichtegradient zu Hintergrund sowie Z_i : Abstand von Kameralinse zu Bildsensor.

Die Luftströmungen, werden über den Vergleich zweier Aufnahmen (Referenz- und Messbild oder zwei Messbilder) als Verschiebungsvektoren dargestellt. Die Auswertung erfolgt über Kreuzkorrelationsalgorithmen.

Sensitivität

In anderen Studien wird BOS oftmals genutzt, um eher große Dichtegradienten zu visualisieren. Bspw. nutzte Bauknecht (2016) BOS, um großskalig die Verwirbelungen an den Rotorspitzen eines Helikopters zu visualisieren. BOS wurde ebenfalls genutzt, um Überschallgeschwindigkeiten (Cozzi und Göttlich 2019; Ota et al. 2015) oder auch Freiluftexplosionen (Mizukaki et al. 2014) abzubilden.

Um die Möglichkeiten des BOS zur Visualisierung kleiner Dichtegradienten auszuloten, wurde in der vorliegenden Studie ein steuerbarer keramischer Heizwiderstand (TE Connectivity) verwendet, um eine nahezu zweidimensionale konvektive Strömung mit sehr geringen Temperaturgradienten zu erzeugen. Die Oberflächentemperatur des Heizwiderstands wurde hierbei über die angelegte elektrische Spannung ($U = 10 - 15 \text{ V}$) geregelt. Zur Überprüfung des Temperaturgradienten wurden drei NTC- (Negative Temperature Coefficient) Thermistoren mit einer Grenzabweichung von $\pm 0,2 \text{ K}$ und einer Auflösung von $0,01 \text{ K}$ installiert, um die Temperatur direkt an der

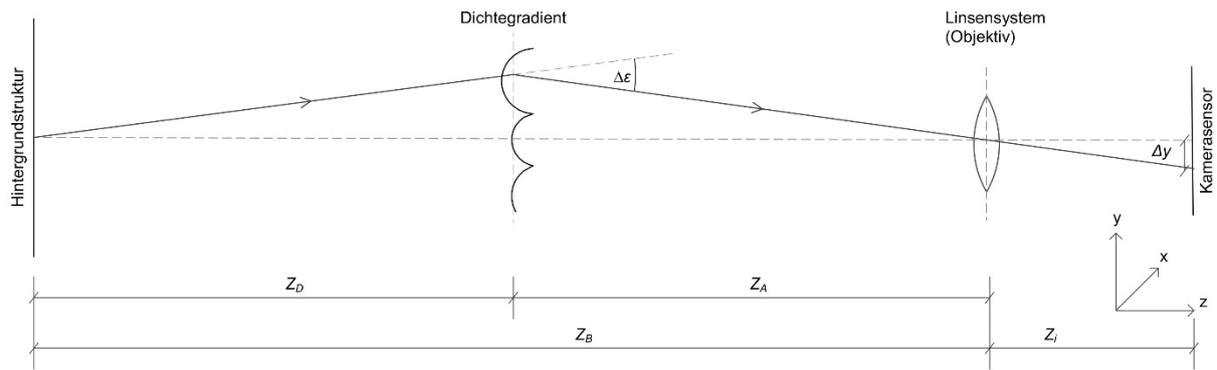


Abbildung 1: Schematisches Setup des BOS

Oberfläche des Heizwiderstands, 7 mm über dem Widerstand und die Temperatur der ungestörten Raumluft außerhalb des thermischen Plumes zu messen, siehe Abbildung 2.

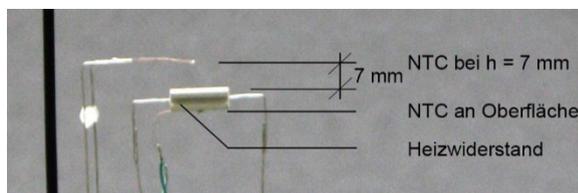


Abbildung 2: Heizwiderstand mit Position der NTCs

Die Sensoren wurden über Einzellitzen mit geringem Durchmesser angeschlossen, um kleine Messfehler zu vermeiden. Die Raumlufttemperatur betrug $\theta_{\text{room}} = 21,8 \text{ }^\circ\text{C}$. Belüftungssysteme, Heizung und Kühlung waren abgeschaltet, um störende Luftströmungen bzw. Gradienten zu vermeiden. Dies ist insbesondere bei der Visualisierung kleiner Temperaturgradienten notwendig. Für die Bildanalyse wurden Kreuzkorrelationsalgorithmen (PIVview2C) verwendet. Hierbei wird die Intensitätsverteilung der Helligkeitswerte der Mess- bzw. Referenzbilder analysiert, um die Pixelverschiebung zu bewerten (Raffel 2002). Der Verschiebungsvektor Δy zwischen Mess- und Referenzbild beschreibt den Ablenkungswinkel ϵ_y eines jeden, den Dichtegradienten passierenden Lichtstrahls. Um die Bildverschiebung zu berechnen, werden Bilddeformationsverfahren (Fensterdeformation) angewendet unter der Annahme, dass die Bewegung der Pixel innerhalb jedes Fensters etwa gleich ist (Raffel et al. 2018).

Als Beispiel zeigt Abbildung 3 eine Auswertung der konvektiven Wärmeabgabe über dem Heizwiderstand mit einer Oberflächentemperatur $\theta_{\text{surface}} = 27,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Da der Auswertalgorithmus keine Korrelation zwischen dem Hintergrund sowie dem diesen verdeckenden Versuchsaufbau herstellen kann, erscheinen der Widerstand sowie dessen Befestigung auf dem Stativ in der Visualisierung als schwarze Bereiche mit $\Delta y > 1 \text{ px}$.

Während die Temperaturdifferenz zwischen der Oberfläche des Widerstands und der umgebenden Raumluft $\Delta\theta = 5,3 \text{ K}$ betrug, lag die Temperaturdifferenz

zwischen dem konvektiven Plume und der Raumluft in einer Höhe von 7 mm bei nur $\Delta\theta = 0,3 \text{ K}$. Abbildung 4 zeigt hierbei deutlich die zunehmende Phasenverschiebung der Pixel aufgrund des konvektiven Plumes. In einer Höhe $> 7 \text{ mm}$ ist der Temperaturgradient innerhalb des Plumes über dem Heizwiderstand wesentlich geringer und daher mit bloßem Auge nur noch schwach erkennbar.

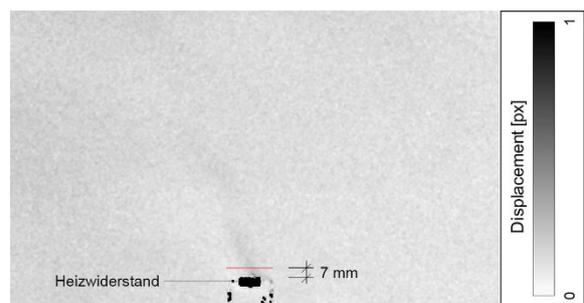


Abbildung 3: Konvektive Wärmeabgabe über dem Heizwiderstand bei $\Delta\theta = 0,3 \text{ K}$ ($h = 7 \text{ mm}$)

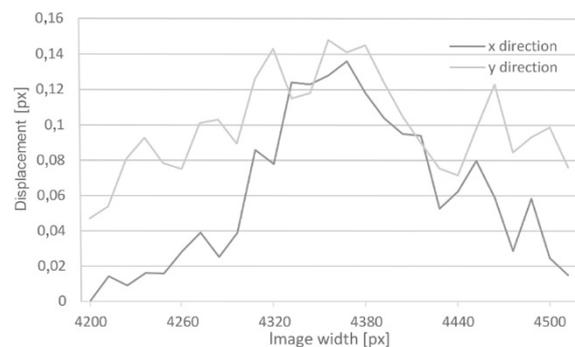


Abbildung 4: Pixelverschiebung bei $h = 7 \text{ mm}$ ($y = 4428 \text{ px}$ Bildhöhe) über dem Heizwiderstand

Die zweidimensionalen Histogramme (Abbildung 5) stellen die berechneten Verschiebungsdaten der in Abbildung 3 gezeigten Visualisierung dar, wobei die mittleren Vektoren für jedes Abfragefenster durch einen Punkt im zweidimensionalen Histogramm repräsentiert werden. Die horizontale Verschiebung liegt hauptsächlich zwischen 0,05–0,1 px, die vertikale Verschiebung hauptsächlich zwischen 0,05–0,15 px

sowie zwischen 0,5–0,6 px. Der Großteil der Verschiebungen, der in die positiv-vertikale Richtung verschoben ist, beschreibt die aufsteigende Konvektionsströmung über dem Heizwiderstand. Die Verschiebungen im negativ-vertikalen Bereich können auf kleinere Turbulenzen innerhalb der Strömung zurückzuführen sein. Die Tendenz der Verschiebung in negativ-horizontale Richtung gibt die in Abbildung 3 zu erkennende leichte Verschiebung der Strömung nach links wieder. Ausschlaggebend hierfür können kleinste Raumluftbewegungen (bspw. kalter Luftstrom am Fenster trotz Abdichtung, Luftschlitz unter der Tür, mögliche kleine Bewegungen der im Raum befindlichen Person etc.) sein.

Abbildung 5b zeigt das Rauschen der Auswertung. Es ist zu erkennen, dass das Hintergrundrauschen bei $\Delta x \ll 0,1$ px bzw. $\Delta y \ll 0,1$ px liegt und damit vernachlässigt werden kann.

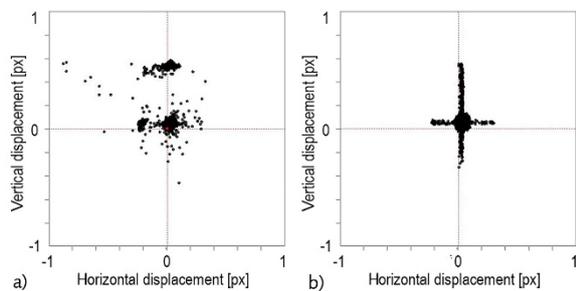


Abbildung 5: Horizontale und vertikale Verschiebung des Plumes über dem Heizwiderstand (a) und des Hintergrundrauschens (b) aus Abbildung 3

Die vorliegende Studie zeigt auf, dass BOS ebenso kleinste Dichtegradienten, die auf Temperaturunterschieden des Mediums basieren, visualisieren kann. Sobald der Dichtegradient einen bestimmten Grenzwert unterschreitet, ist BOS jedoch nicht mehr in der Lage, die Strömung darzustellen. Durch Referenzmessungen der Lufttemperatur wurde festgestellt, dass das hier beschriebene BOS in der Lage ist, Temperaturgradienten von $0,3 \text{ K} \triangleq < 0,1 \text{ px} (\triangleq 0,43 \text{ } \mu\text{m})$ Phasenverschiebung zu visualisieren. Da die räumliche Ausbreitung des Temperaturgradienten in der quantitativen Auswertung noch erkennbar ist, kann davon ausgegangen werden, dass auch Temperaturgradienten von weit weniger als $0,3 \text{ K}$ mit dem beschriebenen Aufbau dargestellt werden können. Dies macht BOS zuverlässig anwendbar für die Visualisierung von Raumluftströmungen mit sehr kleinen Temperaturgradienten.

Tomographisches BOS

Wird nur eine Kamera zur Aufzeichnung der Dichtegradienten genutzt, so kann das meist dreidimensionale Strömungsfeld sichtlinienintegrierend zweidimensional abgebildet werden. Um das aufgezeichnete Strömungsfeld dreidimensional rekonstruieren sowie

absolute Werte extrahieren zu können, ist die Entwicklung eines tomographischen BOS (TomoBOS) an der Bauhaus-Universität Weimar in Arbeit.

Atcheson et al. (2008) nutzen als erste TomoBOS, um die Dichte einer instabilen Gasströmung zu untersuchen. Weiterer Studien folgten, die TomoBOS nutzen, um bspw. kompressible Strömungen, natürliche Konvektionsströmungen oder turbulenten Flammen zu untersuchen (Cai et al. 2021; Goldhahn et al. 2009; Grauer et al. 2018; Liu et al. 2020; Nicolas et al. 2016). Die tomographische 3D-Rekonstruktion basiert auf mehreren BOS-Aufnahmen, die aus verschiedenen Blickwinkeln aufgenommen werden. Da zweidimensionale BOS-Aufnahmen die Strahlenintegrale des Brechungsindexgradienten darstellen, können diese im Prinzip tomographisch rekonstruiert werden, ähnlich den in der Medizin verwendeten Bildgebungsverfahren (Kak und Slaney 2001). Die Herausforderung beim TomoBOS besteht jedoch in der vergleichsweise geringen Anzahl von Kameras (bis zu 100 Kameras in herkömmlichen tomographischen Versuchsaufbauten vs. elf Kameras im hier gezeigten TomoBOS).

Zur fehlerfreien Erfassung des Messfelds muss vor jedem Versuch ein Kalibrierungsziel mit bekannten Geometrien und Maßen aufgezeichnet werden. Somit können mögliche Abweichungen in der Ausrichtung der Kameras vermieden sowie deren äußere Orientierung berechnet werden. Das Kalibrierungsziel muss von allen Kameras zeitgleich aufgenommen werden. Die Herausforderung besteht weiterhin darin, dass das Kalibrierungsziel von allen Kameras erfasst werden muss, weshalb sich planare Objekte als nicht geeignet erweisen. In diesem Setup wird deshalb ein unregelmäßiges Polyeder in Form einer geodätischen Kugel als Kalibrierungsziel vorgesehen, siehe Abbildung 6.

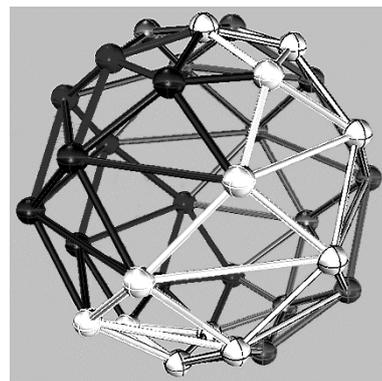


Abbildung 6: Modell der geodätischen Kugel als Kalibrierungsziel

Die Kameras werden in einem Winkel zum Phasenobjekt ausgerichtet, sodass dies mittig auf allen Kamerasensoren abgebildet wird. Daraufhin werden die Kameras mit einheitlichen Einstellungen ausgelöst. Dadurch ist es möglich, das Integral entlang des Strahlengangs aufzulösen. Wie auch beim BOS zur zweidimensionalen Auswertung werden ein Mess- und ein

Referenzbild benötigt. Für die tomographische Rekonstruktion soll insbesondere die algebraische Rekonstruktionstechnik (ART) implementiert werden. ART ist eine iterative Rekonstruktionstechnik, um die zweidimensionalen Strahlendichteverteilungen zu rekonstruieren. Jede ermittelte Phasenverschiebung wird hierbei durch den Rekonstruktionsraum zurückgeworfen, in dem die Verschiebungen iterativ modifiziert werden, um jede rekonstruierte Projektion in Übereinstimmung mit der ermittelten Auswertung zu bringen (Herman und Singh 2009). Die Verknüpfung von aufeinanderfolgenden Einzelbildern führt weiterhin zu einer zeitlichen Verfolgung, die die Strömungsbahnen definiert.

Um auch im tomographischen BOS die hohe Empfindlichkeit des Systems zu gewährleisten, müssen die sensitivitätsbestimmenden Parameter neu definiert werden. Die räumlichen Abmessungen des BOS beeinflussen hierbei nicht die Empfindlichkeit der Ergebnisse. Jedoch müssen stets die veränderbaren Parameter des Setups (Auflösung Hintergrund und Kamerasensor, Brennweite des Objektivs, Abstände innerhalb des Setups) entsprechend angepasst werden, um die geforderte Darstellungsgenauigkeit zu erzielen (Becher et al. 2020).

Um ein ausgeglichenes Verhältnis von scharfer Abbildung zu Sensitivität (hohes Z_A vs. hohes Z_D) zu erzielen, wird der Dichtegradient in einem Verhältnis von $Z_A/Z_D = 1/1$ platziert. Da sich jedoch der Gesamtstand Z_B von den bisherigen 800 cm aufgrund der räumlichen Begrenzungen (Höhe und Breite des Raumes) auf 260 cm verringert, müssen die Brennweite des Objektivs (Bildausschnitt Field of View (FOV)) sowie die Auflösung der Hintergrundstruktur angepasst werden (Tabelle 1).

Tabelle 1: Parameter des 2D- und 3D-BOS

Variable	2D-BOS	3D-BOS
Abstand	$Z_B = 800$ cm $Z_D = Z_A = 400$ cm	$Z_B = 260$ cm $Z_D = Z_A = 130$ cm
Hintergrund	<u>Auflösung:</u> $G = 0,22$ mm <u>Dichte:</u> $\rho = 25$ %	<u>Auflösung:</u> $G = 0,11$ mm <u>Dichte:</u> $\rho = 25$ %
Kamera	Canon EOS 5Ds R <u>Auflösung:</u> 8688×5792 px <u>Brennweite:</u> 135 mm	Canon EOS R5 <u>Auflösung:</u> 8192×5464 px <u>Brennweite:</u> 105 mm
Belichtung	Blitzlichter Elinchrom ELC Pro HD 1000	LED-Panel (ähnlich PURPL LED Panel 33 W 3300 LM)

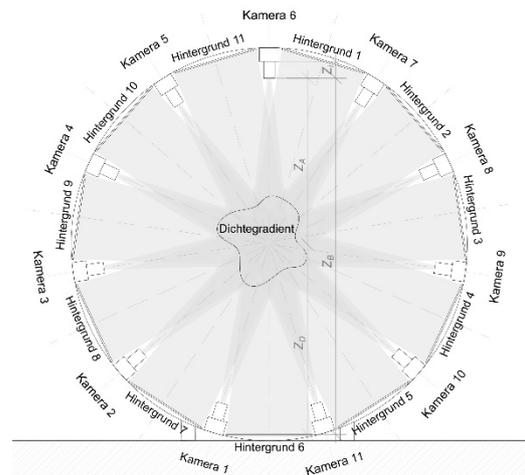


Abbildung 7: Schematische Skizze des geplanten tomographischen BOS

Abbildung 7 zeigt schematisch den Aufbau des TomoBOS. Das Setup ist in vertikaler Richtung orientiert, um freie Konvektionsströmungen, die sich in der Regel in vertikaler Richtung ausbreiten, zu erfassen. Elf Kameras sind in einem Winkel von je 33° zueinander angeordnet. Da ein möglichst großes FOV abgebildet werden soll, ist dies die maximale Anzahl an nutzbaren Kameras. Jede Kamera erfasst hierbei ein FOV von etwa 60×90 cm, was 30×45 cm in der Ebene des Dichtegradienten bei $Z_B/2 = 130$ cm entspricht.

Zusammenfassung und Ausblick

BOS ist aufgrund seiner wenigen Komponenten und des einfachen Aufbaus eine vergleichsweise simple Methode zur Visualisierung von Dichtegradienten. Auch zur Visualisierung von Raumlufströmungen, die auf kleinsten Temperaturunterschieden beruhen, eignet sich BOS bis zu einer Darstellungsgenauigkeit von 0,3 K und darunter.

Zur dreidimensionalen Auswertung der Luftströmungen soll das hier dargestellte tomographische Setup mit den beschriebenen Spezifikationen im Schlierenlabor der Professur Bauphysik der Bauhaus-Universität Weimar aufgebaut werden. Darauffolgend kann ein Algorithmus zur Rekonstruktion der einzelnen Strahlengänge entwickelt werden, um auch auf absolute Werte innerhalb des erfassten Strömungsfeldes schließen zu können.

Nach der erfolgreichen Installation des TomoBOS soll dieses an das optische Schlierenverfahren der Professur Bauphysik der Bauhaus-Universität Weimar (siehe Gena et al. (2020)) gekoppelt werden. Dabei soll sich mit dem Problem der Registrierung der 2D-Ergebnisse des Schlierenspiegels mit den 3D-Ergebnissen des BOS-Tomographie, die mit zeitlich synchronisierten und geometrisch kalibrierten Kameras erzeugt wurden, befassen werden. Die Berechnung zeitlich und räumlich veränderlicher 3D-Strömungsstrukturen soll validiert und verbessert werden. Ansatzpunkte sind dabei die räumliche Übereinstimmung der

aus mehreren Positionen erfassten Bildmerkmale sowie die Verknüpfung zeitlich aufeinander folgender Einzelbilder. Schwerpunkte können die Suche nach Korrespondenzen in den Bildern sowie die exakte geometrische Berechnung sein. Über diese Kopplung der beiden Verfahren können Dichtegradienten detailliert untersucht und rekonstruiert werden.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) (Förderkennzeichen 444059583) für die finanzielle Unterstützung der Arbeit.

Literatur

- Atcheson, B.; Ihrke, I.; Heidrich, W.; Tevs, A.; Bradley, D.; Magnor, M.; Seidel, H.-P. (2008): Time-resolved 3d capture of non-stationary gas flows. In: *ACM Trans. Graph.* 27 (5), S. 1. DOI: 10.1145/1409060.1409085.
- Bauknecht, A. (2016): Characterization of blade tip vortices on large-scale rotors. Dissertation. Leibniz Universität Hannover.
- Becher, L.; Voelker, C.; Rodehorst, V.; Kuhne, M. (2020): Background-oriented schlieren technique for two-dimensional visualization of convective indoor air flows. In: *Optics and Lasers in Engineering* 134,106282. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2020.106282.
- Cai, Shengze; Wang, Zhicheng; Fuest, Frederik; Jeon, Young Jin; Gray, Callum; Karniadakis, George Em (2021): Flow over an espresso cup: inferring 3-D velocity and pressure fields from tomographic background oriented Schlieren via physics-informed neural networks. In: *J. Fluid Mech.* 915. DOI: 10.1017/jfm.2021.135.
- Cozzi, F.; Göttlich, E. (2019): Enhanced Background Oriented Schlieren (EBOS). In: *J. Phys.: Conf. Ser.* 1249, S. 12017. DOI: 10.1088/1742-6596/1249/1/012017.
- Gena, A. W.; Voelker, C.; Settles, G. S. (2020): Qualitative and quantitative schlieren optical measurement of the human thermal plume. In: *Indoor Air*. DOI: 10.1111/ina.12674.
- Goldhahn, Erik; Alhaj, Olga; Herbst, Florian; Seume, Jörg (2009): Quantitative Measurements of Three-Dimensional Density Fields Using the Background Oriented Schlieren Technique. In: Wolfgang Nitsche und Christoph Döbriloff (Hg.): *Imaging measurement methods for flow analysis. Results of the DFG priority programme 1147 "Imaging measurement methods for flow analysis" 2003 - 2009, Bd. 106.* Berlin, Heidelberg: Springer (Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, 106), S. 135–144.
- Grauer, S. J.; Unterberger, A.; Rittler, A.; Daun, K. J.; Kempf, A. M.; Mohri, K. (2018): Instantaneous 3D flame imaging by background-oriented schlieren tomography. In: *Combustion and Flame* 196, S. 284–299. DOI: 10.1016/j.combustflame.2018.06.022.
- Herman, Gabor T.; Singh, Sameer (Hg.) (2009): *Fundamentals of Computerized Tomography. Image Reconstruction from Projections.* 2. Aufl. London: Springer London (Springer eBook Collection Computer Science). Online verfügbar unter <http://dnb.info/997438681/34>.
- Kak, A. C.; Slaney, M. (2001): *Principles of computerized tomographic imaging.* Philadelphia, Pa.: Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM 3600 Market Street Floor 6 Philadelphia PA 19104) (Classics in applied mathematics, 33). Online verfügbar unter http://epubs.siam.org/ebooks/siam/classics_in_applied_mathematics/cl33.
- Liu, Hecong; Shui, Chongyuan; Cai, Weiwei (2020): Time-resolved three-dimensional imaging of flame refractive index via endoscopic background-oriented Schlieren tomography using one single camera. In: *Aerospace Science and Technology* 97, S. 105621. DOI: 10.1016/j.ast.2019.105621.
- Mizukaki, T.; Wakabayashi, K.; Matsumura, T.; Nakayama, K. (2014): Background-oriented schlieren with natural background for quantitative visualization of open-air explosions. In: *Shock Waves* 24 (1), S. 69–78. DOI: 10.1007/s00193-013-0465-4.
- Nicolas, F.; Todoroff, V.; Plyer, A.; Le Besnerais, G.; Donjat, D.; Micheli, F. et al. (2016): A direct approach for instantaneous 3D density field reconstruction from background-oriented schlieren (BOS) measurements. In: *Exp Fluids* 57 (1). DOI: 10.1007/s00348-015-2100-x.
- Ota, M.; Leopold, F.; Noda, R.; Maeno, K. (2015): Improvement in spatial resolution of background-oriented schlieren technique by introducing a telecentric optical system and its application to supersonic flow. In: *Experiments in Fluids* 56 (3), S. 201. DOI: 10.1007/s00348-015-1919-5.
- Raffel, M. (2002): *Optische Untersuchungen in technischen Strömungen unter besonderer Berücksichtigung eines Verfahrens zur Detektion von Dichtegradienten.* Zugl.: Clausthal, Techn. Univ., Habil.-Schr., 2001. 1. Aufl. Clausthal-Zellerfeld: Papierflieger.
- Raffel, M.; Willert, C. E.; Scarano, F.; Kähler, C. J.; Wereley, S. T.; Kompenhans, J. (2018): *Particle image velocimetry. A practical guide / by Markus Raffel, Christian E. Willert, Fulvio Scarano, Christian J. Kähler, Steve T. Wereley, Jürgen Kompenhans.* Cham: Springer.



NEUE MÖGLICHKEITEN EINES ENTWICKELTEN TESTRAUMS MIT VIELFÄLTIGEN MESSTECHNOLOGIEN FÜR DIE INNENPARAMETER UND DIE BENUTZERINTERAKTION IN VERSCHIEDENEN ARTEN VON KOMFORT UND DIGITALEN TECHNOLOGIEN (IOT).

Maximilian Günzel¹, Simon Stinglhammer², Werner Jensch³

¹ Hochschule München, München, Deutschland, E-Mail: maximilian.guenzel@hm.edu

² Hochschule München, München E-Mail: simon.stinglhammer0@hm.edu

³ Hochschule München, München E-Mail: werner.jensch@hm.edu

Kurzfassung

Die Forschungsarbeit präsentiert zwei realisierte Testräume mit umfassenden Messtechnologien für Innenparameter, Benutzerinteraktion und HVAC-Systemenergieverbrauch. Raum eins integriert ein Lüftungssystem und spezielle Beleuchtung (Farbtemperatur usw.), während Raum zwei als Referenz mit standardmäßiger Ausstattung dient. Der Testraum ermöglicht neue praktische Szenarien und Chancen zur Kombination von Komfort und IoT durch Automatisierung und Visualisierung. Die Studie fokussiert auf den Vergleich von Energieverbrauch, Nutzerverhalten und multi-dominanter Umgebung. Ein zentraler Aspekt ist die Benutzerrolle auf verschiedenen Ebenen, von Betreibern bis Studierenden, mit Interventionen in Parametern und Ergebnissen. Die Testräume bieten zudem Möglichkeiten für digitale Integration, inklusive digitaler Zwillinge und Betriebstechnologien.

Abstract

This research paper presents two implemented test spaces with comprehensive measurement technologies for indoor parameters, user interaction, and HVAC system energy consumption. The first space integrates a ventilation system and special lighting (color temperature, etc.), while the second space serves as a reference with standard equipment. The test space allows for new practical scenarios and opportunities to combine comfort and IoT through

automation and visualization. The study focuses on comparing energy consumption, user behavior, and a multi-dominant environment.

A key aspect is the user role at different levels, from operators to students, with interventions in parameters and outcomes. The test rooms also offer opportunities for digital integration, including digital twins and operational technologies.

Einleitung

Die Behaglichkeit der Nutzer hat einen großen Einfluss auf den Energieverbrauch von Gebäuden wie (Delzende et. al., 2017) zeigte. Aus diesem Grunde muss der Quantifizierung des Nutzereinflusses in die Betrachtung des Energieverbrauchs von Gebäuden eine erhöhte Priorität zugesprochen werden.

Das Forschungsinstitut CENERGIE unterhält aus diesem Grund in Zusammenarbeit mit dem Gebäudemanagement der Hochschule München zwei Testräume. Diese sind mit einem unterschiedlichen Grad der gebäudetechnischen Ausstattung bei annähernd gleichen geometrischen Abmessungen (Tabelle 1) versehen.

Vorstellung Testraum und Referenzraum

Die Räume sind unterteilt in einen technisch hoch ausgerüsteten Vorlesungsraum sowie einen zugehörigen Referenzraum. Die darin installierte Technik wurde unter anderem im Rahmen des

Tabelle 1: Geometrischen Daten Messräume (Vgl. Winkler M. et. al., 2016)

PARAMETER	EINHEIT	MASTERRAUM	REFERENZRAUM
GRUNDFLÄCHE	M ²	77,9	77,8
RAUMHÖHE	M	3,00	3,20
VOLUMEN	M ³	234,1	247,8
FASSADENLÄNGE	M	9,0	9,0
RAUMTIEFE	M	9,0	9,0
TRANSPARENTEN FLÄCHE	%	55,3	55,3
BELEGUNG MIT	PERS	38	41

Forschungsvorhabens EnEff (FKZ 03ET1075A) errichtet.

Der Vorlesungsraum verfügt dabei über eine dezentrale Teilklimaanlage mit mehreren thermodynamischen Luftbehandlungsstufen.

Dabei können die Sollwerte der Raumluftqualität (Lufttemperatur und CO₂-Konzentration) von den Nutzern beeinflusst werden.

Die Nutzer des Raumes haben dabei die Möglichkeit die Betriebsmodi der Teilklimaanlage je nach den Behaglichkeitsanforderungen über ein Bediendisplay zu beeinflussen. Eine neuartige Visualisierung in Form eines digitalen Zwillings ist zusätzlich installiert.

Die beiden Räume wurden zur Auswertung der Daten mit umfassenden Sensoren ausgestattet (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Auswahl der verwendeten Sensoren (Vgl. Winkler M. et. al., 2016)

PARAMETER	MESSWERTE
TEMPERATUR	RAUMLUFTTEMPERATUR, AUßENLUFTTEMPERATUR, OBERFLÄCHENTEMP ERATUR
FEUCHTE	RELATIVE LUFTFEUCHTIGKEIT
KONZENTRATION EN	MISCHGAS VOC, CO ₂ - KONZENTRATION
HELLIGKEIT	AUßENHELLIGKEIT, RAUMHELLIGKEIT
BETÄTIGUNGEN	PRÄSENZ, FENSTERÖFFNUNG, SONNENSCHUTZ
ENERGIE	WÄRMEMENGENZÄ HLER, STROMZÄHLER

Einordnung Testraum

Durch die Unterteilung in zwei Räume mit unterschiedlichem Technologiestandard können die Nutzereinflüsse in den Energieverbrauch von Unterrichtsräumen besser quantifiziert werden.

Eine Analyse von von 396 wissenschaftlichen Publikationen zu Testräumen (vgl. A.L. Pisello et. al., 2021) zeigt, dass die beiden Messträume zu den 4% der Räume mit 3 oder mehr physikalischen Domänen die gemessen/untersucht werden können, zugeordnet werden können. Ebenso zeigt die Analyse, dass von den Publikationen, welche bis Juni 2020 erschienen sind, der Großteil (82%) in Europa und Asien errichtet wurden.

Eine Besonderheit des Raumes ist dabei die Nutzung in realer Umgebung durch Studierende im Lehrbetrieb. Er ist damit den 3% der untersuchten

Räume zuzuordnen, welche die Nutzungsart „Klassenzimmer“ aufweisen. Damit können die Studierenden als Nutzer des Raums einen direkten Einfluss auf die Behaglichkeitsparameter nehmen, was bei 21 der 396 untersuchten Publikationen aufgeführt ist.

Ebenso stellt die Nutzung von einem externen Sonnenschutz sowie die Außenfassade eine Besonderheit gegenüber den untersuchten Räumen dar. Dabei weisen nur drei der Räume einen externen Sonnenschutz und vier einen internen Sonnenschutz auf. Ein Fenster ist in den meisten Testräumen (68%), welche in ein Gebäude integriert sind, vorhanden. Die meisten untersuchten Testräume (Abbildung 1) sind dabei von bestehenden Gebäuden losgelöst (43%). In Gebäuden untergebrachte Testräume sind dabei mit 32% der untersuchten Publikationen gegeben. Von den Räumen weisen etwa die Hälfte (49%) eine Grundfläche von über 20 m² auf.

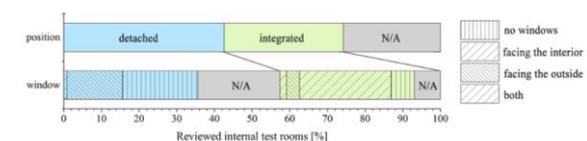


Abbildung 1: Überblick über die Aufteilung von Testräumen hinsichtlich Einbindung und Fenstern (A.L. Pisello et. al., 2021)

Dabei wird bei dem überwiegenden Anteil der Testräume eine zentrale Luftbehandlung vorgenommen und eine raumweise Regelung durch die Nutzer ist nicht möglich. „Der am häufigsten zentral gesteuerte Parameter ist die Lufttemperatur, gefolgt von der Luftfeuchtigkeit und der Luftqualitätskontrolle.“ (A.L. Pisello et. al., 2021)

Dem niedrig technologisch ausgestatteten Referenzraum kommt eine besondere Beachtung zu. Dieser dient hierbei als reale Referenzumgebung gegenüber dem hochtechnologisierten Vorlesungsraum. Damit können die Nutzereinflüsse auf die Behaglichkeit und die Interaktion mit dem Endnutzer quantifiziert werden.

Nutzerverhalten im Kontext von Testräumen

Die Abbildung 2 zeigt die verschiedenen Ebenen, welche unter dem Nutzerbegriff zu verstehen sind. Sie beschäftigt sich mit dem Begriff des „Nutzers“ und dessen unterschiedlichen Ausprägungen im Kontext von Gebäuden und Räumen.

Der Begriff „Endnutzer“ beschreibt Personen, die sich in einem Gebäude oder Raum aufhalten und mit ihm interagieren. Hierzu können beispielsweise Kunden, Besucher oder auch Mitarbeiter zählen. Im Kontext von Bildungsgebäuden und Testräumen sind unter dem Begriff „Endnutzer“ Schülerinnen und Schüler, sowie Lehrerinnen und Lehrer bzw.

Dozentinnen und Dozenten oder Professorinnen und Professoren zu verstehen.

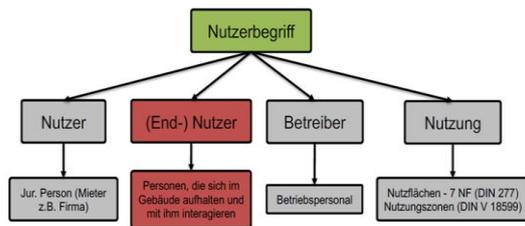


Abbildung 2: Die verschiedenen Ebenen des Nutzerbegriffs (NuData Campus)

Energierrelevantes Nutzerverhalten

Das Nutzerverhalten in Gebäuden, insbesondere im Hinblick auf Energieaspekte, wird in der Literatur oft durch den Begriff „Anwesenheit und Handlungen der Nutzer“ (OPA - occupants' presence and actions) charakterisiert. Jegliche Verhaltensweisen und Aktivitäten der Endnutzer beeinflussen das Gebäude, seine technischen Anlagen, den Komfort und letztendlich den resultierenden Energieverbrauch.

Im Rahmen des Annex 53 wurde der den Begriff des energierelevanten Nutzerverhaltens ("energy-related occupant behavior") durch die Definition von "beobachtbaren Handlungen oder Reaktionen einer Person als Antwort auf äußere oder innere Reize sowie Handlungen oder Reaktionen einer Person zur Anpassung an Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Raumluftqualität und Sonnenlicht". Präzisiert. (**Annex 53 Final Report**)

Nutzer interagieren bereits (passiv) mit der bebauten Umgebung durch ihre Anwesenheit. Dies wird ergänzt durch die Bewegung im Gebäude. Bereits ohne aktive Interaktion treten bereits thermische Lasten, Kohlenstoffdioxid, wie auch Ausdünstungen, Gerüche etc. und Luftfeuchtigkeit durch die Nutzer auf. Diese müssen entweder mechanisch z.B. durch entsprechende Belüftung oder durch anschließendes aktives Handeln bspw. Fensterlüftung abgeführt werden.

Darüber hinaus gibt es die sogenannten (aktiven) Handlungen. Diese können entweder nicht-adaptiven Ursprungs sein, wie zum Beispiel das Nutzen von elektrischen Geräten, oder aber adaptiv durch Trigger ausgelöst werden.

Bspw. kann der Nutzer aufgrund von erhöhter Temperatur oder schlechter Luft das Fenster öffnen. Schließt er es wieder, ist entweder der gewünschte Komfort erreicht, oder aber ein anderer Faktor ist hier der Trigger: Schließen aufgrund von Kälte trotz schlechter Luft, Schließen aufgrund von zu hohem Straßenlärm etc.

In Hochschulgebäuden werden am häufigsten die folgenden Handlungen und Interaktion der Nutzer erwartet:

Anpassung der Raumlufttemperatur: In Abhängig von Raumnutzungstyp und Art der technischen Interaktion zur Erhöhung der Raumlufttemperatur

Öffnen der Fenster/Fensterlüftung: Zur Verbesserung der Raumluftqualität, aber auch zur Absenkung der Raumtemperatur.

Verwendung des Sonnenschutzes/Verschattung: Verschattung durch einen Sonnenschutz gegen übermäßigen Wärmeeintrag (Überhitzung, Anstieg der Raumtemperatur), aber auch zur Verhinderung von Blend- und Spiegeleffekten.

Nutzung der elektrischen Beleuchtung: Sicherstellung der Arbeitshelligkeit aufgrund mangelnder natürlicher Beleuchtung (Fenster). Zusammenhang mit z.B. der Verschattung, der Bildwirkung bei der Nutzung von PCs etc. Trotz ausreichend natürlichem Tageslicht, kann somit Energie für Beleuchtung erforderlich sein.

Nutzung von elektrischen Geräten: Die technische Ausstattung an Hochschulen und der damit verbundene elektrische Stromverbrauch ist je nach Nutzer stark unterschiedlich. Studierende nutzen hauptsächlich eigenen EDV-Geräte. Vereinzelt werden auch Geräte für den persönlichen Komfort verwendet, wie Ventilatoren und Heizgeräte. (**NuData Campus**)

Wie greift der Nutzer ein?

In Gebäuden wird eine Vielzahl von Interaktionen zwischen Endnutzern und Gebäudeschnittstellen diskutiert, die entscheidend für das Verständnis von menschlichem Verhalten, Energieverbrauch und Bewohnerkomfort in bebauten Umgebungen sind. Diese Interaktionen variieren erheblich in ihrer Komplexität und Benutzerfreundlichkeit, und sie spielen eine entscheidende Rolle bei der Gestaltung effizienter und komfortabler Gebäude.

Lichtsteuerungen, ermöglichen es den Nutzern, die Beleuchtung in einem Raum nach ihren Bedürfnissen und Vorlieben anzupassen. Die Interaktionen können durch konventionelle Lichtschalter, Tasten, digitale Bedienfelder oder sogar über Computer- und Smartphone-Apps erfolgen. Die Motivation für diese Interaktionen ist oft durch visuelles Unbehagen, Sicherheitsbedenken oder den Wunsch nach einer bestimmten Atmosphäre getrieben. Die Benutzerfreundlichkeit der Lichtschalter spielt eine entscheidende Rolle für die Zufriedenheit der Nutzer (**Day et al., 2020, S. 10**).

Thermostate, sind eine häufig genutzte Schnittstelle, bei der die Nutzer möglicherweise Schwierigkeiten haben, sie zu verstehen, insbesondere aufgrund der verzögerten Auswirkungen im Raum. Eine verbesserte Gestaltung und Benutzerfreundlichkeit der Schnittstelle könnte dazu beitragen, negative Auswirkungen zu verringern und den Nutzern eine

bessere Kontrolle und ein besseres Verständnis zu ermöglichen (Day et al., 2020, S. 4).

Fenster und Fensterbeschattungen ermöglichen es den Nutzern, die natürliche Belichtung und Belüftung in einem Raum zu steuern. Die Interaktion mit diesen Schnittstellen kann durch den Wunsch nach thermischem oder visuellem Komfort motiviert sein.

Digitale und gestische Schnittstellen repräsentieren einen bedeutenden Fortschritt in der Interaktion zwischen Endnutzern und Gebäuden. Diese Schnittstellen umfassen eine breite Palette von Technologien, von tangiblen und oberflächenbasierten Schnittstellen bis hin zu ambienten, gestischen, anstrengungsbezogenen und kontextbewussten Benutzerschnittstellen. Diese innovativen Interaktionstechniken schaffen zahlreiche neue Möglichkeiten für die Gestaltung digitaler Gebäudeschnittstellen, erfordern jedoch weitere Forschung, um zu verstehen, wie die Nutzer mit diesen neuen Technologien interagieren werden. (Day et al., 2020, S. 12).

Einflussmöglichkeit und Auswirkungen in Bildungseinrichtungen

Die Ergebnisse aus der Analyse integrativer Testräume legen den Weg frei für eine eingehendere Untersuchung des Einflusses von Nutzerverhalten und technologischer Anwendung in schulischen Umgebungen. Die Diskussion über die Ausgestaltung von Gebäudeschnittstellen, insbesondere im Kontext von Lichtsteuerungen, Thermostaten und digitalen Schnittstellen, eröffnet einen erweiterten Blick auf Bildungseinrichtungen.

Die Forschung verdeutlicht den Einfluss von Umweltfaktoren wie Raumtemperatur und Lüftung auf das Wohlbefinden und die kognitive Leistungsfähigkeit von Schülern. In Räumen mit freier Lüftung können durch die wahrgenommene Einflussmöglichkeit des Nutzers gelegentlich extreme Temperaturen oder Luftgeschwindigkeiten auftreten, die als unbehaglich empfunden werden (de Dear et al., 1997; ISSO 74; Nicol, McCartney 2000).

Eine weitere relevante Erkenntnis, präsentiert von Wyon (1996), zeigt, dass eine individuelle Kontrolle der Raumtemperatur im Bereich von $\pm 3K$ die geistige Leistung bei Aufgaben um 2,7 % steigert.

Die Übertragung dieser Erkenntnisse auf Klassenräume, die von einer Vielzahl von Schülern frequentiert werden, wirft jedoch komplexe Fragestellungen auf. Die Umsetzung einer individuellen Einflussmöglichkeit auf die Raumtemperatur gestaltet sich in dieser Umgebung als anspruchsvoll. Insbesondere die Schwierigkeit, jedem Schüler eine personalisierte Kontrolle zu gewähren, könnte erhebliche Auswirkungen auf die empfundene Kontrolle und somit auf das

Wohlbefinden haben. Sedlbauer, Holm und Hellwig (2009) betonen, dass die wahrgenommene Einflussnahme mit zunehmender Anzahl von Personen im Raum abnimmt.

Nutzereinfluss in energieeffizienten Schulen

Ein zentraler Aspekt des Forschungsprojektes „Energieeffiziente Schulen – EnEFF:Schule“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) war die Nutzerzufriedenheit und die Möglichkeit der Nutzereinflussnahme auf das Raumklima. Die Erkenntnis, dass das Wohlfühlen am Gebäude einen bedeutenden Faktor für das Wohlbefinden darstellt, wird durch die Auswertung der Raumklimaparameter, einschließlich Raumtemperaturen, Luftfrische und Lichtverhältnisse, bestätigt. Bei der Betrachtung der Einflussmöglichkeiten auf Licht, Sonnenschutz, Temperatur und mechanische Lüftung zeigte sich, dass die Art der Regelung akzeptiert wird, jedoch direkte Einflussnahme oft nicht möglich ist.

Insbesondere im schulischen Umfeld sind Lehrer oft eingeschränkt, direkt auf Raumparameter einzuwirken, obwohl über 70% eine Einflussnahme bei der Temperatur und etwa 90% bei der Lichtregelung wünschen. Besonders hervorzuheben ist die Thematik der mechanischen Lüftung, bei der lediglich 22% der Schülerschaft die automatische Lüftungsanlage als luftverbessernd bestätigen. Hier wünschen sich 89% der Lehrer die Möglichkeit zur eigenständigen Luftregulierung über Fensteröffnungen und 60% Einfluss auf die Lüftungsanlage (Reiß et al., 2021).

Energieeffizienz durch Gebäudeautomation und Nutzereinfluss

Die Analyse ergibt, dass die Implementierung von Einzelraumregelungen in Schulgebäuden eine Möglichkeit zur Energieeinsparung bietet, indem jeder Raum separat und unabhängig betrieben werden kann. Dies ermöglicht eine gezielte Reduzierung des Energiebedarfs, insbesondere bei außerschulischen Veranstaltungen.

Trotz moderner Technologien und energetischer Ausrichtung fehlt es oft an einer verständlichen Benutzeroberfläche. In einigen untersuchten Schulen führten Schwierigkeiten in der Bedienbarkeit zu einer generellen Unzufriedenheit mit der neuen technischen Gebäudeausrüstung.

Um den Nutzern, insbesondere Lehrkräften, eine effektive Veranschaulichung von Energieverbräuchen im Klassenzimmer zu ermöglichen, ist eine bedienerfreundliche Oberfläche oder eine Schnittstelle im Raum ratsam. Dies könnte durch intelligente Monitoringsysteme realisiert werden, um das Verständnis der Zusammenhänge zwischen Nutzerverhalten und Energieverbrauch

nachhaltig zu fördern (Winkler, M., Jensch, W., 2015).

Visualisierung der Energiedaten als Monitoringsystem

Welche Möglichkeiten und Auswirkungen intelligente Monitoringsysteme haben können, zeigt auch die Studie "Do in-home displays affect end-user consumptions? A mixed method analysis of electricity, heating and water use in Danish apartments". Canale et al. untersucht, wie die Visualisierung von Energiedaten und Verbrauch das Verhalten der Bewohner beeinflusst.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Einführung von In-Home-Displays (IHDs) in Wohnungen zu einem Rückgang des Energieverbrauchs geführt hat. „Als die IHDs in diesem Gebäude ihre Arbeit aufnahmen, sank der durchschnittliche Verbrauch von Kaltwasser, Warmwasser, Strom und Heizung um 17 %, 23 %, 12 % bzw. 17 %. Befragungen von Endbenutzern unterstützten dies und stellten eine positive Wirkung der IHDs fest.“ Dieser Rückgang wurde teilweise durch die Veränderungen im täglichen Verhalten der Bewohner als Reaktion auf die Informationen, die durch die IHDs bereitgestellt wurden, verursacht.

Es wurde beobachtet, dass die bloße Präsenz des Bildschirms in der Wohnung zu einer Reduzierung des Verbrauchs führen kann, auch ohne häufige aktive Interaktion mit dem Bildschirm.

Die Studie legt nahe, dass die Anwesenheit von IHDs und das Bewusstsein für das Monitoring an sich einen Einfluss auf das Verbrauchsverhalten der Bewohner haben können. Dies deutet darauf hin, dass die Bereitstellung von Echtzeit-Energieverbrauchsdaten und die damit verbundene gesteigerte Aufmerksamkeit und Bewusstsein für den Energieverbrauch Schlüsselkomponenten sind, um das Verhalten der Bewohner in Bezug auf den Energieverbrauch zu beeinflussen. (Canale et al. 2021)

Übertragung und Einordnung in den Kontext von Testräumen und dem Masterraum

Wie die Forschungsergebnisse von unter anderem Canale et al., Day et al., dem Annex Report und NuData Campus gezeigt haben, liegt die Bedeutung der energetischen Auswirkungen und des Wohlbefindens in Gebäuden in der Interaktion des Nutzers und der Visualisierung der Energiedaten. Eine Untersuchung dieser beiden entscheidenden Einflussfaktoren in Kombination und in einer realen Testumgebung ist daher unabdingbar. Der in der Hochschule München geschaffene reale Testraum schafft dank seiner Multidomänen Ausstattung und der Referenzumgebung die Grundlage dieser

Untersuchungen. Ein neu installiertes modernes Bediengerät und die seit kurzem geschaffene Visualisierung der Energiedaten in Form eines digitalen Zwillings ergänzen dies.

Interaktion durch Raumbediengerät

Um die Interaktion der Nutzer mit dem Raum zu erforschen, wurde ein neuartiges Oberflächenbediengerät eingeführt. Dieses Gerät ermöglicht es den Nutzern, je nach Situation und individuellen Bedürfnissen einen der vorgegebenen Modi auszuwählen. Die Modi, darunter Komfort, Normal, Sport und Eco, sind mit individuell angepassten Parametern für Licht, Temperatur und Lüftung ausgestattet. Beispielsweise bietet der Komfort-Modus eine erhöhte Raumtemperatur, während der Eco-Modus darauf abzielt, Energie zu sparen und eine niedrigere Raumtemperatur bereitzustellen. Die Interaktion des Nutzers mit dem Bediengerät kann u.a. durch die Häufigkeit der ausgewählten Modi erfasst und analysiert werden.



Abbildung 3: Bediendisplay mit Modi und einstellbarer Parameter

Cloud-Anbindung für Echtzeit-Sensordaten

Die umfassenden Sensoren im Raum übertragen die erfassten Daten in Echtzeit in eine Cloud. Diese Cloud-Anbindung ermöglicht nicht nur die zentrale Datenspeicherung, sondern auch eine kontinuierliche Analyse und Auswertung der gemessenen Parameter. Durch die Verfügbarkeit von Echtzeitdaten können schnelle Anpassungen vorgenommen werden, um den Energieverbrauch zu optimieren und den Nutzerkomfort zu maximieren.

Digitaler Zwilling und BIM-Raummodell

Die Einführung eines digitalen Zwillings, integriert mit einem Building Information Modeling (BIM)-

Raummodell, bietet eine neue Form der Visualisierung.

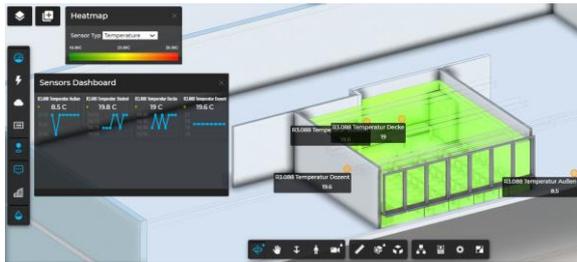


Abbildung 4: Visualisierung des digitalen Zwillings

Über einen Bildschirm im Raum werden nicht nur statische Informationen präsentiert, sondern auch dynamische Heatmaps und Live-Charts der gemessenen Parameter angezeigt. Diese visuelle Darstellung ermöglicht es den Nutzern, den aktuellen Zustand des Raumes zu verstehen und gezielte Entscheidungen zur Optimierung von Energieeffizienz und Komfort zu treffen.

Zusammenfassung

Das vorgelegte Paper behandelte die Bedeutung des Nutzerverhaltens für den Energieverbrauch von Gebäuden, insbesondere von Unterrichtsräumen, und stellt eine Untersuchung von Testräumen an der Hochschule München vor. Zwei Räume mit unterschiedlichem technologischem Standard dienen der besseren Quantifizierung des Nutzereinflusses. Der hochtechnisierte Vorlesungsraum ermöglicht Nutzereinfluss auf Raumluftqualität durch eine Teilklimaanlage, während der Referenzraum niedrig technologisiert ist. Die Räume sind mit umfassenden Sensoren ausgestattet, um verschiedene Parameter wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Konzentrationen, Helligkeit und Aktivitäten zu messen.

Die Einordnung der Testräume in den Kontext von wissenschaftlichen Publikationen zeigt ihre Besonderheiten, darunter die Nutzung als Klassenzimmer durch Studierende und die Verwendung von externem Sonnenschutz. Der niedrig technologisierte Referenzraum spielt eine wichtige Rolle als reale Vergleichsumgebung.

Das Paper betont die Bedeutung des Nutzerverhaltens im Kontext von Testräumen, insbesondere in Bildungseinrichtungen. Verschiedene Handlungen der Nutzer, wie Anpassung der Raumlufttemperatur, Fensteröffnung, Sonnenschutz und Nutzung elektrischer Geräte, beeinflussen den Energieverbrauch.

Ein wichtiger Aspekt ist die Implementierung von intelligenten Monitoringsystemen in Schulgebäuden. Eine benutzerfreundliche Oberfläche oder Schnittstelle im Raum wird als entscheidend angesehen, um Lehrkräften und Schülern eine effektive Veranschaulichung von Energieverbräuchen zu ermöglichen.

Der reale Testraum an der Hochschule München kombiniert die bedeutenden Einflussfaktoren von Nutzereinfluss und der Visualisierung von Energiedaten, durch die Installation eines neuartigen Raumbediengerätes, der Cloud-Anbindung für Echtzeit-Sensordaten und durch einem digitalen Zwilling. Diese Innovationen ermöglichen eine verbesserte Interaktion der Nutzer, eine effiziente Datenauswertung und die Optimierung von Energieeffizienz und Nutzerkomfort. Dieser Testraum stellt somit optimale Bedingungen für weitere Forschung da.

Literatur

- Winkler, M.; Jensch, W.; Grün, G.; Sedlbauer, K. (2015): Niedrigstenergiegebäude im Bildungssektor: Nutzung gebäudetechnischer Systeme vermeidet Überhitzung im Winter. In: GI - Gebäudetechnik, Innenraumklima 136 (2015), H.3, S. 152-165.
- Winkler, M. (2016). Analyse subjektiver Erhebungsdaten einer Licht- und Raumklimastudie in einer Bildungseinrichtung (Dissertation). Fraunhofer IBP, Stuttgart.
- Delzende E, Wu S, Lee A, Zhou Y. The impact of occupants' behaviours on building energy analysis: a research review. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;80: 1061–71. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.264>
- A.L. Pisello, I. Pigliautile, M. Andargie, C. Berger, P.M. Bluysen, S. Carlucci, G. Chinazzo, Z. Deme Belafi, B. Dong, M. Favero, A. Ghahramani, G. Havenith, A. Heydarian, D. Kastner, M. Kong, D. Licina, Y. Liu, A. Luna-Navarro, A. Mahdavi, A. Nocente, M. Schweiker, M. Touchie, M. Vellei, F. Vittori, A. Wagner, A. Wang, S. Wei, Test rooms to study human comfort in buildings: A review of controlled experiments and facilities, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 149, 2021, 111359, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111359>.
- de Dear et al. 1997 de Dear, R., Brager, G., Cooper, D.: Developing an adaptive model of thermal comfort and preference – Final report. ASHRAE RP-884, 1997.
- ISSO 74 ISSO 74: Thermische Behaaglijkheid. Eisen voor de binnentemperatuur in gebouwen. Rotterdam 2004.
- Nicol, McCartney 2000 Nicol, F.; McCartney, K.: Smart controls and thermal comfort project. Final report. Oxford Brooks University School of Architecture. 2000.

- Sedlbauer, K., Holm, A., Hellwig, R.: Raumklima und Schülerleistung, im Auftrag der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) Osnabrück, DBU-Abschlussbericht, AZ-23991, Band 2, 2009
- Klepeis NE, Nelson WC, Ott WR, Robinson JP, Tsang AM, Switzer P, et al. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 2001;11: 231–52. <https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500165>.
- Torresin S, Pernigotto G, Cappelletti F, Gasparella A. Combined effects of environmental factors on human perception and objective performance: a review of experimental laboratory works. *Indoor Air* 2018;28:525–38. <https://doi.org/10.1111/ina.12457>.
- Lassen N, Goia F, Schiavon S, Pantelic J. Field investigations of a smiley-face polling station for recording occupant satisfaction with indoor climate. *Build Environ* 2020;185:107266. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107266>.
- Castaldo VL, Pigliautile I, Rosso F, Cotana F, De Giorgio F, Pisello AL. How subjective and non-physical parameters affect occupants' environmental comfort perception. *Energy Build* 2018;178:107–29. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.020>.
- Lai ACK, Mui KW, Wong LT, Law LY. An evaluation model for indoor environmental quality (IEQ) acceptance in residential buildings. *Energy Build* 2009;41:930–6. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.03.016>.
- Palacios Temprano J, Eichholtz P, Willeboordse M, Kok N. Indoor environmental quality and learning outcomes: protocol on large-scale sensor deployment in schools. *BMJ Open* 2020;10:31233. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2019-031233>.
- Han J, Kwon S bark, Chun C. Indoor environment and passengers' comfort in subway stations in Seoul. *Build Environ* 2016;104:221–31. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.008>.
- Fisekis K, Davies M, Kolokotroni M, Langford P. Prediction of discomfort glare from windows. *Light Res Technol* 2003;35:360–9. <https://doi.org/10.1191/1365782803li095oa>.
- Schweiker M, Brasche S, Hawighorst M, Bischof W, Wagner A. Presenting LOBSTER, an innovative climate chamber, and the analysis of the effect of a ceiling fan on the thermal sensation and performance under summer conditions in an office-like setting. In: Proc. - wind. Conf. 2014 count. Cost comf. A chang. World, NCEUB 2014; 2019. p. 924–37.
- Rodriquez R, Pattini A. Tolerance of discomfort glare from a large area source for work on a visual display. *Light Res Technol* 2014;46:157–70. <https://doi.org/10.1177/1477153512470386>.
- Wyon DP, Andersen I, Lundqvist GR. Spontaneous magnitude estimation of thermal discomfort during changes in the ambient temperature. *J Hyg* 1972;70: 203–21. <https://doi.org/10.1017/S0022172400022269>.
- Fong ML, Lin Z, Fong KF, Chow TT, Yao T. Evaluation of thermal comfort conditions in a classroom with three ventilation methods. *Indoor Air* 2011;21: 231–9. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2010.00693.x>.
- Bluyssen PM, Zhang D, Kim DH, Eijkelenboom AM, Ortiz-Sanchez M. First SenseLab studies with primary school children: exposure to different environmental configurations in the experience room. *Intell Build Int* 2019;1–18. <https://doi.org/10.1080/17508975.2019.1661220>.
- Annex Final Report Yoshino H., Hong T., Nord N. IEA EBC Annex 53: Total Energy Use in Buildings – Analysis and Evaluation Methods (2017) Energy and Buildings 152 DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.07.038
- Canale, L., Peulicke Slott, B., Finsdóttir, S., Ring Kildemoes, L., Korsholm Andersen, R. (2021), Do in-home displays affect end-user consumptions? A mixed method analysis of electricity, heating and water use in Danish apartments. *Energy & Buildings*, 246, 111094.
- Day, J. K., McIlvennie, C., Brackley, C., Tarantini, M., Piselli, C., Hahn, J., ... & Pisello, A. L. (2020). A review of select human-building interfaces and their relationship to human behavior, energy use and occupant comfort. *Building and Environment*, 178, 106920.
- NuData Campus: Banihashemi, F., Botzler, S., Günzel, M., Hahn, J., Januzaj, E., Kierdorf, D., Krefft, V., Maier, Stinghammer, S., Weber, M. (2023) Schlussbericht EnOB: NuData Campus Nutzerdaten basierte Optimierung von Gebäuden und Anlagen am Beispiel der Hochschule München, Förderkennzeichen: 03ET16

SESSION C · 06.03.2024

Thema: U-Wert-Bestimmung

Kooperationspartner

R
P **TU** Rheinland-Pfälzische
Technische Universität
Kaiserslautern
Landau

Bauhaus-
Universität
Weimar

WBA

WBA | Bauhaus Weiterbildungs-
akademie Weimar e.V.
Institut an der
Bauhaus-Universität Weimar



REMOTE MEASUREMENTS OF THERMAL TRANSMITTANCE WITHOUT APPROXIMATING A STEADY STATE

Jacob Estevam Schmiedt¹, Dhruvkumar Patel¹, Marc Röger², Philip Groesdonk¹, Bernhard Hoffschmidt³

¹ *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (German Aerospace Center), Institute of Solar Research, Karl-Heinz-Beckurts-Str. 13, 52428 Jülich, Germany, E-Mail:*

jacob.estevamschmiedt@dlr.de

² *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (German Aerospace Center), Institute of Solar Research, Calle Doctor Carracido 44, 04005 Almería, Spain*

³ *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (German Aerospace Center), Institute of Solar Research, Linder Höhe, 51147 Köln, Germany*

Abstract

The thermal transmittance of the building envelope is a key parameter that determines the energy performance of a building. In order to estimate the potential of refurbishment options, accurate information about the thermal transmittance is desirable. This information should be obtained with as little impact on the use of the building and in as little time as possible. The use of thermography for this purpose has the advantage that it allows for remote measurements without installation of sensors on the envelope. Additionally, a non-intrusive measurement method from outside of the building envelope is favorable. For that, a model calibration approach is proposed to increase the accuracy under varying environmental conditions and to reduce the measurement time for thermography from the outside. A simplified physical model with a small number of thermal resistor and capacitor elements is used to represent the building wall and simulate the heat flow under transient conditions. Its parameters are varied and chosen such that the best reproduction of the measured surface temperature is obtained. The uncertainty of the determined transmittance depends on the thermographic measurements and on the uncertainties in the boundary conditions which describe convective and radiative heat exchange and also have to be determined by measurements. The uncertainty analysis is performed using a Monte-Carlo sampling of all measured quantities.

Introduction

The thermal assessment of building envelopes is of strong interest because the high share of energy consumption in the building sector is a global concern. In most climate zones heating and cooling are responsible for the largest portion of energy consumption in the operation phase of a building. In the EU, private households alone were responsible for

27 % of the final energy consumption in 2020. More than 60 % of this energy is used for space heating and renewables contribute only about 27 % to this (European commission 2022).

A key indicator for the energy performance of a building envelope is the thermal transmittance (or U-value) that is given as the heat flux through an envelope element per temperature difference between inside and outside air. It has been observed frequently that design values or standard assumptions differ significantly from the thermal transmittance measured on real buildings (Gori et al. 2017, Teni et al. 2019, Li et al. 2014). In addition, for many old buildings the design values are not known. To close this so-called energy performance gap between simulation and real energy use (Wilde 2014, Dronkelaar et al. 2016) and to provide a solid basis for decisions about retrofit options, fast and accurate measurement methods measuring actual thermal transmittances of building envelopes are required. The thermal capacitance of building envelopes is another relevant quantity for its energy performance and the user comfort as it can flatten peaks in heating and cooling demand. For example, heat can be stored in the walls and floors, so that it can be released to the room when the outside temperature is extremely low for a short time (Olsthoorn 2017).

There are standardized methods to determine the thermal transmittances of building envelopes and their elements. These rely on averaging procedures to approximate steady-state conditions and, therefore, require relatively long measurement times of several days. The most common one is the heat flux meter (HFM) method (ISO 9869-1) which uses air temperature sensors and heat flux meters that are attached to a building element. Therefore, they only capture the heat flow through a small area and heterogeneities in rest of the envelop are not detected.

Thermography is a way to obtain data for extended areas and, therefore, detect heterogeneous structures, such as thermal bridges. Time series of thermographic images have also been used to determine the thermal transmittance of building envelope elements (ISO-9869-2 2018, Mahmoodzadeh, M. et al. 2022, Fokaides, P. A. et al. 2011, Marshall et al. 2018, Tejedor, B. et al. 2017). However, current methods either show large errors or are restricted to being used from inside of the building and require long measurement periods.

Model calibration is an approach that does not rely on the steady-state assumption and, therefore, is expected to give a higher accuracy while allowing shorter measurement times than the standardized methods (Gori et al. 2017). In order to capture also the dynamic behavior of the heat transport through the building, envelope models may contain also thermal capacitor or thermal mass (TM) elements. Thus, model calibration is also able to provide information about thermal capacitance. In literature, several approaches are found that use measured energy consumption and weather data to determine an overall heat transfer coefficient for the complete building envelope (Rouchier et al. 2018, Shamsi et al. 2020) which implies a strong influence of the user behavior on the results. Other approaches use heat flux meter data to identify the local thermal transmittance or thermal resistance at the respective measurement spot (Gori et al. 2017, Prada et al. 2019).

We have developed an approach that combines thermography and model calibration (Patel et al. 2023). It appears to be promising to be applied from the outside of a building while keeping measurement times short. In this paper, we recapitulate the method and an exemplary application in a setup with reduced environmental influences by wind and solar radiation. The core of the paper is a detailed evaluation of the uncertainty and reproducibility of the measurement results.

Methods

In order to determine the thermal resistance and transmittance, a simplified wall model will be calibrated which consists of two thermal mass elements and three thermal resistor elements. Thus, we have to solve a system of ordinary differential equations (ODEs). A sketch of the model is given in figure 1. The elements R1, R2 and R3 stand for thermal resistors. C1 and C2 stand for thermal capacitors. The elements air_temp_in, convection and rad_exchange on the bottom left represent the internal environmental conditions. The elements air_temp_out, rad_temp_out, convection and rad_exchange on the top right represent external environmental conditions. The prescribed temperatures on the inside and outside are determined by the data_input element.

A thermal resistor is characterized by a resistance R and the heat flux through it is given by

$$q = \frac{1}{R_{\text{therm}}A} (T_l - T_r),$$

where q is the heat flux, R_{therm} is the thermal resistance of the element, A its area, and T_r and T_l are the temperatures on the right and the left side of the resistor element respectively. The capacitor or TM elements stand are characterized by the thermal capacity C in the equation

$$C \frac{dT}{dt} = qA,$$

where C is the heat capacity and dT/dt is the derivative of its temperature T with respect to time. The connections with red lines in figure 1 mean that the temperatures at the connected points are set equal and that the heat flux into one element equals the heat flux out of the other element. If one element is connected to more than a single other element it means that the heat fluxes of those other elements are summed up.

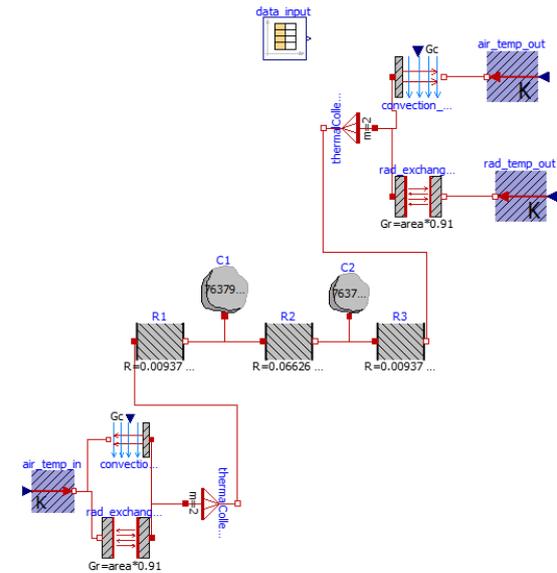


Figure 1: Graphical representation of the model with exemplary parameter values.

We consider convective and long-wave radiative heat exchange with the environment. So, on both sides of the wall, a convective term is added:

$$q_{\text{conv}} = h_{\text{in/out}}(T_{\text{wall}} - T_{\text{air}}),$$

where $h_{\text{in/out}}$ is the convective heat transfer coefficient, T_{wall} is the surface temperature of the wall and T_{air} is the air temperature.

Based on the experimental setup described in section “Experiment”, we determine the convective heat transfer coefficient on the outside wall surface using the Nusselt number Nu (Ghajar 2015) as

$$h_{\text{out}} = \frac{Nu \cdot k}{L},$$

where k is the thermal conductivity of the wall and L is its height. For the convective heat transfer coefficient on the inside we use a literature value of $h_{\text{in}} = 2.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ (ISO 6946:2017).

The long-wave radiation term is given by

$$q_{\text{lw}} = \varepsilon\sigma(T_{\text{wall}}^4 - T_{\text{surr}}^4),$$

where ε is the emissivity of the wall surface in the thermal infrared range between 7.5 and 14 μm , σ is the Stefan-Boltzmann constant and T_{surr} is a weighted average over the black body temperatures of the surrounding objects.

We end up with five unknown quantities R_1 , R_2 , R_3 , C_1 , and C_2 . In our case, the wall has a symmetric structure, so that we can simplify

$$R_c := R_2,$$

$$R_{\text{out}} := R_1 = R_3,$$

$$C := C_1 = C_2.$$

The resulting system of ODEs is solved numerically.

The thermal transmittance of the wall is given by

$$U = \frac{1}{h_{\text{in}}^{-1} + A(R_c + 2R_{\text{out}}) + h_{\text{out}}^{-1}}.$$

To determine the unknown quantities, we record a time series of surface temperatures using a series of thermographic images and the environmental conditions that determine the boundary conditions. Then we vary the unknown resistances and capacities of the model and minimize a target function χ^2 which is a function of the difference between the measured and the simulated surface temperatures. It is given by

$$\chi^2(\mathbf{R}, \mathbf{C}) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} (T_{\text{wall,meas}} - T_{\text{wall,model}})^2,$$

where N is the number of time steps for that measurements were taken, i labels the individual time steps, and σ_i is the estimated uncertainty of the measured temperature at time step i . \mathbf{R} is a vector that contains the resistance values of the model elements, and \mathbf{C} is a vector that contains the capacities.

Uncertainty and Sensitivity

In order to study the reliability and reproducibility of the approach, we first compare the outcome of the calibration for different time intervals. In a second step, we perform an overall uncertainty analysis by a Monte-Carlo sampling. The uncertainties in the measured and estimated quantities are considered by drawing samples from a normal distribution with a standard deviation that is given by the measurement error. A list of these input quantities and the assumed standard deviations is given in table 2. Wherever quantities are taken from the literature, we motivate the standard deviation by comparing different literature values for the same quantity. The model calibration is then performed for each set of values, so that we obtain a distribution of results for the calibration outcome, e.g., the thermal resistance. In order to achieve an efficient sampling, we use the Latin Hypercube Sampling method.

We also study the sensitivity of the calibration results to changes in the individual input quantities. That is, the calibration is performed with a fixed offset in one of the measured or estimated input quantities.

For the uncertainty of the reference measurement, we follow the standard ISO 9868-1.

Experiment

In order to test the method, we heated up a small room which was enclosed by four walls and a roof. The whole structure was covered by a tent, so that no solar radiation could fall onto the walls and the wind speed on the inside and outside of the walls was close to zero. A thermal infrared (IR) microbolometer camera was placed on a tripod about 5 m from one of the walls. The wall was prepared for this experiment with reference temperature sensors (NTC sensors) on the inside and outside, heat flux meters on the inside and outside for reference measurements, and crumpled aluminium foil which serves as a diffuse reflector to measure the radiation temperature of the environment (Marshall et al. 2018). The air temperature close to the wall inside and outside of the room was also recorded. The radiation temperature of objects inside the room is assumed to be equal to the air temperature.

In front of the outside wall, we placed two self-made black bodies which were kept at different temperatures and served as references to correct for a drift of the temperature readings with the thermographic camera which appears due to changes in the housing temperature of the camera. The setup on the outside of the room can be seen in figure 2.

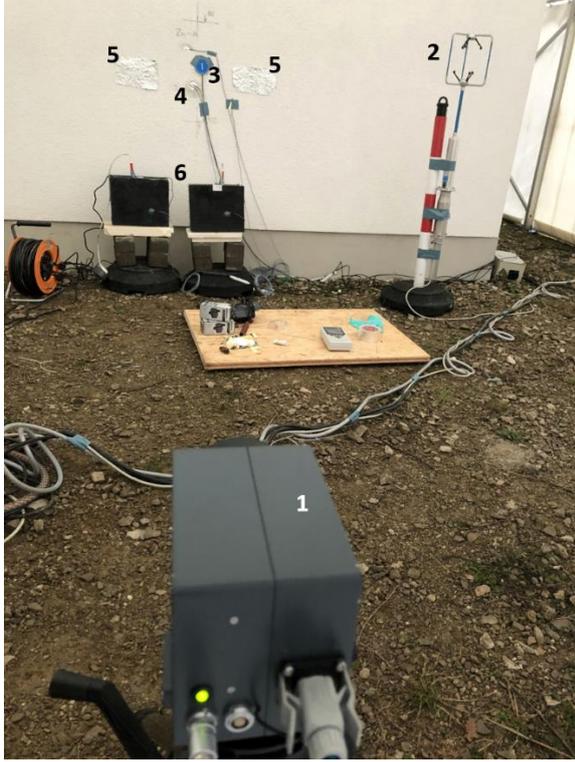


Figure 2: Measurement setup with infrared camera (1), an anemometer (2), a reference heat flux meter (3), reference surface temperature sensors (4) two reflectors made of aluminum foil (5), and two black bodies for reference temperature measurements (6).

Measurements were recorded for five consecutive days with one data point per minute. In parallel, the heat flux sensors on the inside of the wall were used to determine the thermal transmittance following the standard ISO 9869-1.

Results and Discussion

The recorded measurement data was evaluated and the calibration was performed for different time periods. We used the surface temperature average of a small area of a few cm^2 which was located in the center of one of the bricks below the plaster. In a preliminary test of the method with fixed \mathbf{C} and variable \mathbf{R} , we found that the calibration results are almost insensitive to \mathbf{C} . This is consistent with the findings by Arregi et al. who argue that models with one or two TM are not well suited to determine the thermal capacity of a building element (Arregi et al. 2023). Therefore, we will focus on the results for the thermal resistance in the following and will not discuss our results for the thermal capacity.

Thermal Resistance

Table 1 shows the optimal values of $R = R_c + 2R_{\text{out}}$, the thermal transmittance U , the reference value of the transmittance R_{ref} , and the deviation between R and R_{ref} in percent which is denoted as d_R .

Table 1: Results of the calibration and transmittance calculation for various time intervals.

DAY	R [K/W]	U [W/m ² K]	R_{ref} [W/m ² K]	d_R [%]
1 – 5	0.085	1.47	0.064	33
1 – 3	0.083	1.51		30
2 – 4	0.086	1.46		34.4
3 – 5	0.087	1.44		36
1	0.081	1.55		26.6
2	0.085	1.47		32.8
3	0.086	1.46		34.4
4	0.088	1.41		37.5
5	0.087	1.44		35.9

The results of the calibration vary around the mean of $R_{\text{mean}} = 0.085$ K/W which is also the outcome for the longest time period. The standard deviation of the results is $\sigma_{\text{days}} = 0.002$. Both values are identical if they are calculated over all periods or only for the individual days. However, this is a relatively small sample size of measurements. Therefore, we determined the uncertainty of R also using the Monte-Carlo approach described above with the data for the complete five days. Table 2 shows the errors of the input quantities which were used as standard deviations of the distributions to draw samples.

Table 2: The errors of the input quantities for the model calibration. The second column shows the source of the input values.

QUANTITY	SOURCE	ERROR
Outside T_{air}	NTC sensor	± 0.22 K
Outside T_{wall}	IR camera	± 1.5 K
Outside T_{surr}	IR camera	± 1.5 K
h_{out}	Nusselt number method	± 0.5 W/m ² K
ε	Literature (Kolokotsa et al. 2012, Marshall et al. 1982, Engineering Toolbox 2003)	± 0.3
Inside T_{air}	NTC sensor	± 0.22 K
Inside T_{surr}	NTC sensor	± 0.22 K
h_{in}	Literature (ISO 6946 2017)	± 3.0 W/m ² K

As some combinations of input quantity values are unrealistic and do not allow for a good fit, we only use samples with a $\chi_r^2 \leq 0.1$. Figure 3 shows a histogram of the resulting distribution of thermal resistance outcomes.

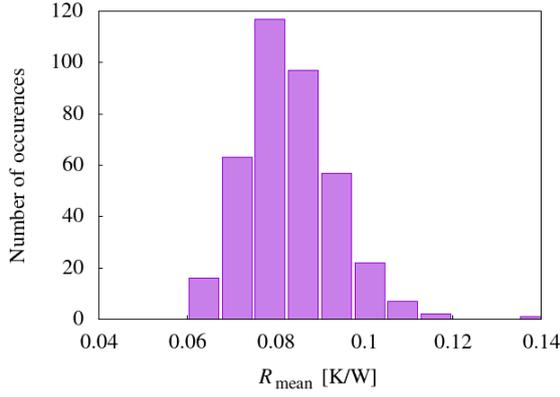


Figure 3: Histogram of occurrences for thermal resistance results in the Monte Carlo-based uncertainty analysis.

In order to check for convergence, we increased the sample size in steps. Figure 4 shows the mean R_{mean} and the standard deviation σ_R of the resulting distribution of thermal resistance. Both appear to be converged at a sample size of about 500. So, we obtain $R_{\text{mean}} = 0.083$ K/W and $\sigma_R = 0.011$ K/W which is significantly larger than σ_{days} . This means that the reference value is within the $2\sigma_R$ range of the thermal resistance from the model calibration.

The error of the reference measurement is determined according to the standard ISO 9869-1. The standard states that the error of a measurement lies between 14 % and 28 %. This means that in our case, the error is at least $\sigma_{\text{ref}} = 0.009$ K/W and may reach up to $\sigma_{\text{ref}} = 0.018$ K/W. So, the 1σ intervals of the reference measurement and the calibration approach likely overlap, indicating that the new approach of determining the thermal resistance from a model calibration using thermography data yields a result that is consistent with the reference method.

In order to distinguish the effect of the individual input quantities on the calibration result, we also did a sensitivity study where we varied the input quantities separately with a fixed positive and negative offset. The results are listed in table 3.

Table 3: The offset and the resulting deviation in the thermal resistance in the sensitivity analysis.

QUANTITY	OFFSET	THERMAL RESISTANCE (MIN, MAX)
Outside T_{air}	± 0.5 K	(0.077, 0.089)
Outside T_{wall}	± 1 K	(0.062, 0.116)
Outside T_{surr}	± 1 K	(0.076, 0.090)
Inside T_{air}	± 3 K	(0.080, 0.086)
h_{out}	± 0.5 W/m ² K	(0.079, 0.087)
h_{in}	± 3 W/m ² K	(0.082, 0.084)

Two offsets are chosen particularly large: the inside air temperature and the convective heat transfer coefficient on the inner side of the wall. These choices were made to account for the fact that a remote measurement ideally does not require any installation of sensors inside the building. In that case, these quantities would have to be estimated. Despite the large offset, the resulting difference in the thermal resistance is small at ± 0.003 K/W. A similar difference of ± 0.0035 K/W is caused by the comparatively small offset in the convective heat transfer coefficient on the outside. This means that a good model and accurate measurements of parameters that influence h_{out} are essential for the method. For a situation with full environmental conditions, i.e. without a tent, this implies that good wind speed measurement is an important requirement.

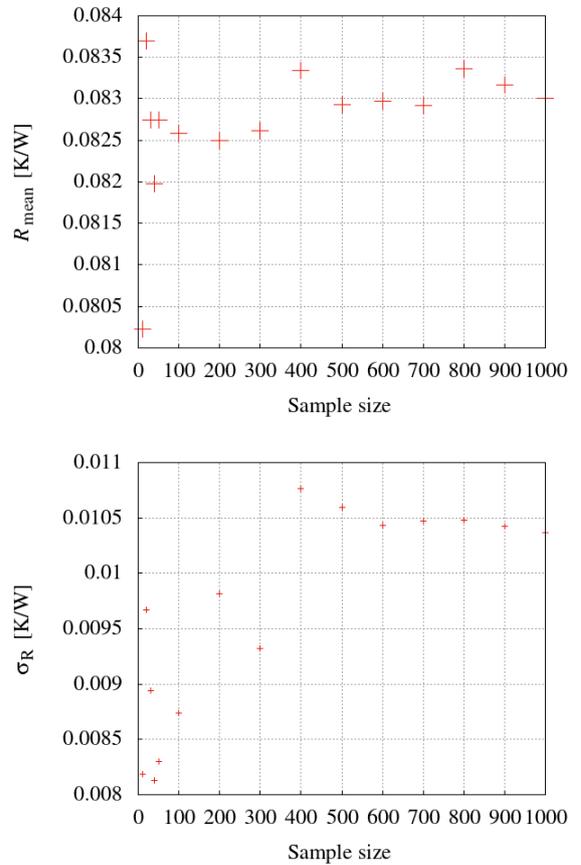


Figure 4: The outcome for R_{mean} and σ_R from Monte Carlo-sampling with increasing sample size.

The offset on T_{wall} and T_{surr} which are both measured with the infrared camera is smaller than the error that we considered before, but still lies in the range of common errors for modern microbolometer cameras. The large sensitivity of R with T_{wall} and T_{surr} that is found here stresses the importance of highly accurate temperature measurements with the camera and, in particular, of ways to detect and compensate possible drifts of the camera.

Conclusions

In this paper, we have summarized a new model calibration-based approach to determine the thermal transmittance of a wall by thermography. We have then presented an uncertainty and sensitivity analysis of the method.

We find that the calibration-based approach gives consistent results for different time periods. This indicates that at least under the controlled environmental conditions as in our experiment, a measurement time of a single day or less is likely to give a reliable result for the thermal transmittance.

The comparison with a reference measurement of the transmittance with a heat flux meter shows that the two measurements are compatible as their 1σ intervals overlap.

Finally, the variation of individual input quantities shows that an estimation of the indoor conditions without measuring them will likely have a very limited negative effect on the accuracy of the transmittance measurement by thermography and model calibration. Therefore, a fully remote measurement of the thermal transmittance without the need for installing sensors inside of the building appears possible. At the same time, variations in the convective heat transfer coefficient on the outside have a relatively strong impact on the results. This calls for a careful choice of the model for convective heat transfer and accurate wind measurements – in particular under full environmental conditions.

Literature

- Arregi, B.; Garay-Martinez, R.; Carlos Ramos, J. 2023. Estimation of thermal resistance and capacitance of a concrete wall from in situ measurements: a comparison of steady-state and dynamic models, *Energy and Buildings* 296, p. 113393.
- Dronkelaar, C.; Dowson, M.; Spataru, C.; Mumovic, D. 2016, *Frontiers in Mechanical Engineering* 1.
- Engineering ToolBox, Emissivity Coefficients common Products [online] 2003, https://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html.
- European Commission. Statistical Office of the European Union 2022. Energy consumption in households, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_consumption_in_households
- Fokaides, P. A.; Kalogirou, S. A. 2011. Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes, *Applied Energy* 88 (12), p 4358-4365.
- Ghajar, A. J. 2015. *Heat and mass transfer*, McGraw-Hill.
- Gori, V.; Marincioni, V.; Biddulph, P.; Elwell, C. A. 2017. Inferring the thermal resistance and effective thermal mass distribution of a wall from in situ measurements to characterise heat transfer at both the interior and exterior surfaces, *Energy and Buildings* 135, p 398-409.
- ISO-6946 2017. *Building components and building elements—thermal resistance and thermal transmittance—calculation method*.
- ISO-9869-1 2015. *Thermal Insulation-Building Elements-In-situ Measurement of Thermal Resistance and Thermal Transmittance-Part 1: Heat Flow Meter Method*.
- ISO-9869-2 2018. *Thermal Insulation-Building Elements-In-situ Measurement of Thermal Resistance and Thermal Transmittance - Part 2: Infrared method for frame structure dwelling*.
- Kolokotsa, D.; Maravelaki-Kalaitzaki, P.; Papantoniou, S.; Vangeloglou, E.; Saliari, M.; Karlessi, T.; Santamouris, M. 2012. Development and analysis of mineral based coatings for buildings and urban structures, *Solar Energy* 86 (5), p. 1648-1659.
- Li, F. G. N.; Smith, A. Z. P.; Biddulph, P., Hamilton, I. G.; Lowe, R.; Mavrogianni, A.; Oikonomou, E.; Raslan, R.; Stamp, S.; Stone, A.; Summerfield, A. J.; Veitch, D.; Gori, V.; Oreszczyn, T. 2014. Solid-wall U-values: heat flux measurements compared with standard assumptions, *Building Research & Information* 43 (2), p 238-252.
- Mahmoodzadeh, M.; Gretka, V.; Lee, I.; Mukhopadhyaya, P. 2022. Infrared thermography for quantitative thermal performance assessment of wood-framed building envelopes in Canada, *Energy and Buildings* 258, p 111807.
- Marshall, A.; Francou, J.; Fitton, R.; Swan, W.; Owen, J.; Benjaber, M. 2018. Variations in the U-Value Measurement of a Whole Dwelling Using Infrared Thermography under Controlled Conditions, *Buildings* 8 (3).
- Marshall, S. J.; Grot, R. A.; Wood, J. T. 1982. We Need To Know More About Infrared Emissivity, *SPIE Proceedings, Thermal Infrared Sensing Applied to Energy Conservation in Building Envelopes*.
- Olsthoorn, D.; Haghghat, F.; Moreau, A.; Iacroix, G. 2017. *Building and Environment* 118, p 113-127.

- Patel, D.; Estevam Schmiedt, J.; Röger, M.; Hoffschmidt, B. 2023. A Model Calibration Approach to U-value Measurements with Thermography, *Buildings* 13 (9), p 2253.
- Prada, A.; Gasparella, A.; Baggio, P. 2019. A Robust Approach For The Calibration Of the Material Properties in an Existing Wall, *Proceedings of the 16th IBPSA Conference*.
- Rouchier, S.; Rabouille, M.; Oberlé, P. 2018. Calibration of simplified building energy models for parameter estimation and forecasting: Stochastic versus deterministic modelling, *Building and Environment* 134, p 181-190.
- Shamsi, M.; Ali, U. Mangina, E. O'Donnell, J. 2020. A framework for uncertainty quantification in building heat demand simulations using reduced-order grey-box energy models, *Applied Energy* 275, p. 115141.
- Tejedor, B.; Casals, M.; Gangoells, M.; Roca, X. 2017. Quantitative internal infrared thermography for determining in-situ thermal behaviour of façades, *Energy and Buildings* 151, p 187-197.
- Teni, M.; Krstić, H.; Kosiński, P. 2019. Review and comparison of current experimental approaches for in-situ measurements of building walls thermal transmittance, *Energy and Buildings* 203, p 109417.
- Wilde, P. 2014. *Automation in Construction* 41, p 40-49.



ANWENDUNG KÜNSTLICHER NEURONALER NETZE ZUR BESTIMMUNG VON U-WERTEN

Alexander Benz¹, Kay Smarsly², Conrad Völker¹

¹ Bauhaus-Universität Weimar, Deutschland, E-Mail: alexander.benz@uni-weimar.de, conrad.voelker@uni-weimar.de

² Technische Universität Hamburg, Deutschland, E-Mail: kay.smarsly@tuhh.de

Kurzfassung

Die in-situ Bestimmung von U-Werten ist in der Regel mit großen Ungenauigkeiten sowie langen Messdauern verbunden. In der Literatur werden Messzeiträume von 72 Stunden bis zu mehr als zwei Wochen angegeben und Ungenauigkeiten von bis zu 40 %, bezogen auf errechnete Referenzwerte (Evangelisti et al., 2016), genannt. Als Hauptgründe für diese Umstände werden geringe Temperaturgradienten, instationäre Randbedingungen, wechselnde Richtungen des Wärmestroms sowie retardierende Einflüsse durch hohe thermische Speichermassen angeführt.

Künstliche neuronale Netze (KNN) bieten die Möglichkeit, die oben aufgeführten Zusammenhänge zu quantifizieren. Durch die Wahl eines Regressionsansatzes innerhalb der KNN können Einflüsse instationärer Randbedingungen (z.B. Lufttemperatur sowie Solarstrahlung) mit definitionsgemäß stationären Größen, wie dem U-Wert, in Zusammenhang gebracht werden.

Die Autoren stellen in dieser Arbeit die Anwendung von KNN für die Bestimmung von U-Werten auf Grundlage von Simulationsdaten vor. Die Erzeugung der Trainings- und Testdaten erfolgt hierfür durch thermisch-instationäre Bauteilsimulationen auf Basis finiter Elemente. Hierdurch sollen umfangreiche Messungen für den Aufbau der Trainingsdaten entfallen. Im Rahmen dieser Arbeit werden dreilagige neuronale Netze mit 2 bis 20 Neuronen in einem Hidden-Layer für die Regression von U-Werten genutzt. Für eine Referenzierung der vorgeschlagenen Methodik werden die erlangten Regressionsergebnisse mit U-Werten des Mittelwertverfahrens verglichen.

Abstract

The in-situ estimation of U-values is usually associated with high inaccuracies and long measuring campaigns. Literature sources mention time intervals of 72 hours up to more than two weeks as well as derivations of up to 40 % (Evangelisti et al., 2016). Main reasons cited for these circumstances are high thermal capacities, low temperature gradients,

transient boundary conditions and alternating directions of the heat flow.

Artificial neural networks (ANNs) offer the possibility of quantifying the correlations listed above. By choosing a regression-based approach implemented with ANNs, transient environmental influences (e.g., heat flow, air temperature and solar radiation) can be correlated with variables that are by definition stationary, such as the U-value.

In this paper, the authors present the application of ANNs for estimating U-values using simulation data. The training data is generated exclusively by transient simulations of building elements based on finite elements, eliminating the need for extensive measurements to generate the training data. In this work, three-layer neural networks with 2 to 20 neurons within the hidden layer are used for the regression of U-values. The regression results obtained are compared with U-values of the mean value method for referencing the proposed methodology.

Einleitung

Der U-Wert (Gleichung 1) charakterisiert die stationäre Wärmetransmission durch ein Bauteil und wird als allgemein anerkannte Größe, unter anderem durch die Verankerung in (DIN EN ISO 6946, 2018), für den Vergleich zwischen verschiedenen Konstruktionen und zur Bewertung für die Einhaltung regulativer Vorschriften genutzt.

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (1)$$

mit: R_T - Wärmedurchgangswiderstand des Bauteils

Für die Berechnung von R_T werden die Wärmedurchlasswiderstände aller Bauteilschichten (R_1, \dots, R_n) um einen äußeren und inneren Wärmeübergangswiderstand (R_{se} und R_{si}) erweitert (siehe Gleichung 2).

$$R_T = R_{si} + R_1 + \dots + R_n + R_{se} \quad (2)$$

Die praktische Anwendung dieses Zusammenhangs setzt jedoch die Kenntnis über den genauen Aufbau einer Konstruktion (Schichtdicken) und deren Wärmeleitfähigkeiten voraus. Für Bestandsgebäude sind diese Werte allerdings häufig unbekannt. Eine in-situ

Messung, beispielsweise beschrieben in (ISO 9869-1, 2014), umgeht dieses Problem und setzt die über die Messdauer (m Messungen) aufgezeichneten Wärmestromdichten q_j in ein Verhältnis zur anliegenden inneren und äußeren Lufttemperatur $\theta_{i,j}$ bzw. $\theta_{e,j}$, wodurch sich der in Gleichung 3 dargestellte Zusammenhang ergibt.

$$U = \frac{\sum_{j=1}^m q_j}{\sum_{j=1}^m (\theta_{i,j} - \theta_{e,j})} \quad (3)$$

Während Gleichung 3 die in-situ Wärmeübergänge berücksichtigt, stellt Gleichung 4 den U-Wert unter Berücksichtigung der Wärmeübergänge nach (DIN EN ISO 6946:2017, 2018) unter Bezugnahme auf die Oberflächentemperaturen ($\theta_{si,j}$ und $\theta_{se,j}$) dar.

$$U = \frac{1}{R_{se} + \frac{\sum_{j=1}^m (\theta_{si,j} - \theta_{se,j})}{\sum_{j=1}^m q_j} + R_{si}} \quad (4)$$

Das bei in-situ Untersuchungen in der Regel vorliegende instationäre thermische Verhalten der untersuchten Konstruktion hat Messdauern zwischen 3 und 14 Tage zur Folge (Bienvenido et al., 2019), wobei nach (ISO 9869-1, 2014) eine minimale Messdauer von 3 Tagen einzuhalten ist.

Eine Verbesserung der in-situ Bestimmungen des U-Wertes ist möglich, wenn das instationäre Verhalten der Konstruktion quantifiziert und in der Auswertung berücksichtigt werden kann. Hierfür schlagen die Autoren der vorliegenden Studie die Nutzung künstlicher neuronaler Netze (KNN) vor. KNN basieren auf einer Vernetzung mehrerer sogenannter Neuronen, wobei ein Input-Layer mit einem Output-Layer verknüpft wird. Im Falle der Regression einer gewählten Größe werden so die gewählten Inputs über Gewichte, repräsentierbar über eine entsprechende Matrix, mit einem Output verknüpft. Werden zwischen Input- und Output-Layer ein oder mehrere sogenannter Hidden-Layer geschaltet, wird ein KNN als Multilayer Perceptron (MLP) bezeichnet. Vorteil der Verwendung solcher Hidden-Layer ist die Möglichkeit nichtlineare Probleme in mehrere lineare Teilprobleme zu unterteilen. Des Weiteren können mehrere hintereinander geschaltete Hidden-Layer unterschiedliche Abstraktionen der Eingangsdaten ausbilden, sodass eine verbesserte Generalisierung auf Grundlage der Eingangsdaten zu erwarten ist.

Durch die Nutzung geeigneter Trainingsdaten (z.B. gemessene Temperaturen oder Wärmeströme) wird ein Regressionswert (z.B. U-Wert) erzeugt. Über einen Vergleich des prognostizierten Wertes mit dem wahren Wert wird über eine Verlustfunktion sowie einen Optimierer im Zuge der sogenannten Backward Propagation die Gewichtsmatrix korrigiert. Durch Iteration dieses Vorgangs wird durch das sogenannte Training eine optimierte Gewichtsmatrix ermittelt.

Nach Abschluss des Trainings steht ein spezialisiertes KNN, in diesem Fall für die Regression des U-Werts aus bestimmten Eingangsgrößen, zur Verfügung.

Stand der Forschung

Eine erste Anwendung von KNN im Rahmen der in-situ Bestimmung des U-Werts wurde von Bienvenido et al. (2019) beschrieben. In dieser Arbeit wurden die Ergebnisse aus 66 in-situ Messungen für das Training von KNN genutzt. Die jeweiligen Messdauern variierten zwischen 4-17 Tage. Als Quelle für die Testdaten wurden wiederum 3 Messungen ausgewählt. Im Rahmen einer Untersuchung des Einflusses der Neuronen im Hidden-Layer Netzarchitekturen wurden dreilagige Netze mit 4 bis 15 Neuronen im Hidden-Layer angewendet sowie 500 bis 120.000 Trainingsepochen durchgeführt. Als leistungsfähigstes KNN wurde in (Bienvenido et al., 2019) eine Architektur mit 14 Neuronen innerhalb des Hidden-Layers angegeben (Leistungsfähigkeit nach dem Training: $R^2 = 0,957$, MAE = 0,050 und RMSE = 0,081). Innerhalb dieser Studie erfolgte jedoch eine unmittelbare Regression des U-Werts, sodass die KNN neben konstruktionsbedingten Einflüssen auf die Messung auch veränderliche Wärmeübergänge, Randbedingungen sowie Fehler während der Messung (z.B. den zusätzlichen Wärmeübergangswiderstand zwischen Oberfläche und Sensor) widerspiegeln. Des Weiteren basiert dieser Ansatz auf der Analyse gemessener Zeitreihen, die unter entsprechendem Zeitaufwand und Einschränkungen der Gebäudenutzung entstanden sind.

Methodik

Im Rahmen dieser Studie werden für den Aufbau der Trainings- und Testdaten synthetische Daten, d.h. Ergebnisse (Oberflächentemperaturen sowie Wärmestromdichte) numerischer Simulationen des transienten Bauteilverhaltens, genutzt. Hierauf basierend untersuchen die Autoren die Möglichkeit, mithilfe eines KNNs eine Regression von U-Werten umzusetzen. Motivation für die Nutzung von Simulationsergebnissen ist der Umstand, dass der Aufbau und insbesondere die gezielte Erweiterung von Trainingsdaten zur Verbesserung der Regressionsergebnisse durch in-situ Messungen vergleichsweise zeitaufwendig ist. Zudem liegen in der Regel keine gesicherten Materialkennwerte der untersuchten Konstruktionen vor, was sich in Kombination mit Messungenauigkeiten negativ auf die Regressionsergebnisse auswirken kann.

Gegenstand der vorliegenden Untersuchung sind verschiedene bauzeittypische Konstruktionen für Außenwände, aufgeführt in (Loga, 2015). Diese werden modelliert und unter transienten Randbedingungen hinsichtlich des Wärmestroms simuliert. Zeitliche Verläufe der äußeren Randbedingungen werden den Testreferenzjahren von (Deutscher Wetterdienst, 2014) entnommen. Für die Berücksichtigung der transienten Einflüsse auf der Innenseite der Bauteile werden die

Ergebnisse der Arbeiten von (Hofmann et al., 2022) genutzt. Diese stellen auf Basis empirischer Untersuchungen zeitabhängige Regressionsansätze der Innenlufttemperatur zur Verfügung und erlauben somit eine zeitabhängige Modellierung der Innenraumtemperatur. Eine Visualisierung dieser Verläufe stellt Abbildung 1 dar.

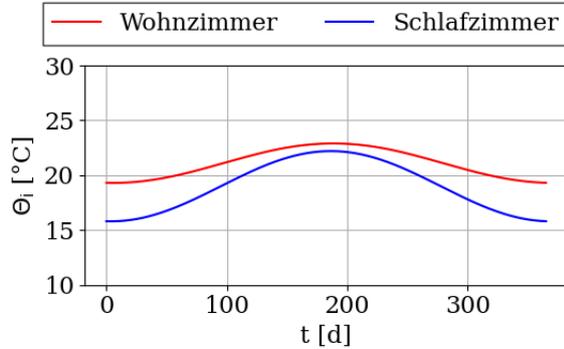


Abbildung 1: Modell des dynamischen Innenraumklimas für zwei Nutzungsszenarien durch Regression nach (Hofmann et al., 2022)

Basierend auf den Simulationsergebnissen werden die in Tabelle 1 aufgeführten Simulationsergebnisse als Eingangsgrößen für die KNN genutzt. Weitere Eingangsgrößen werden als arithmetische Mittelwerte über 24 h vor dem jeweils untersuchten Zeitpunkt errechnet. Dies stellt eine gewisse Kontextualisierung der Daten im Sinne der zeitlichen Entwicklung der Zustandsgrößen dar und soll den Informationsgehalt der Eingangsgrößen erhöhen.

Tabelle 1: Eingangsgrößen der KNN

Symbol	Beschreibung
Δt	Zeitintervall zwischen zwei Simulationsergebnissen
θ_{si}	innere Oberflächentemperatur
θ_{se}	äußere Oberflächentemperatur
q_{si}	Wärmestromdichte (bidirektional) der Wandinnenoberfläche
$d\theta_{si}$	arithmetischer Mittelwert der inneren Oberflächentemperatur in den 24 h vor dem jeweils untersuchten Zustand
$d\theta_{se}$	arithmetischer Mittelwert der äußeren Oberflächentemperatur in den 24 h vor dem jeweils untersuchten Zustand
dq_{si}	arithmetischer Mittelwert der einseitigen Wärmestromdichte in den 24 h vor dem jeweils untersuchten Zustand

Als Zielwert, bzw. Prognosewert, der KNN wird in der vorliegenden Studie der Wärmedurchgangswiderstand (R-Wert) des jeweiligen Bauteils definiert, sodass im Gegensatz zu (Bienvenido et al., 2019) ein R-Wert (R_{MLP}) prognostiziert wird. Aus diesem kann im weiteren Verlauf, unter Berücksichtigung normierter

Werte für R_{si} sowie R_{se} , (DIN EN ISO 6946, 2018) ein normgerechter U-Wert (U_{MLP}) angegeben werden. Eine direkte Regression des U-Werts (U_{MLP}) hätte zur Folge, dass unter anderem auch Einflüsse der beidseitigen Wärmeübergänge durch das KNN aufgenommen und in den Gewichten abgebildet werden. Die Anzahl der Neuronen des Input-Layers ergibt sich in Folge der gewählten Eingangsgrößen zu 7 Neuronen und einem Bias-Neuron. Im darauffolgenden Hidden-Layer wird die Anzahl der Neuronen zwischen 2 und 20, jeweils mit einem Bias-Neuron, variiert. Es ergibt sich die in Abbildung 2 dargestellte schematische MLP-Architektur.

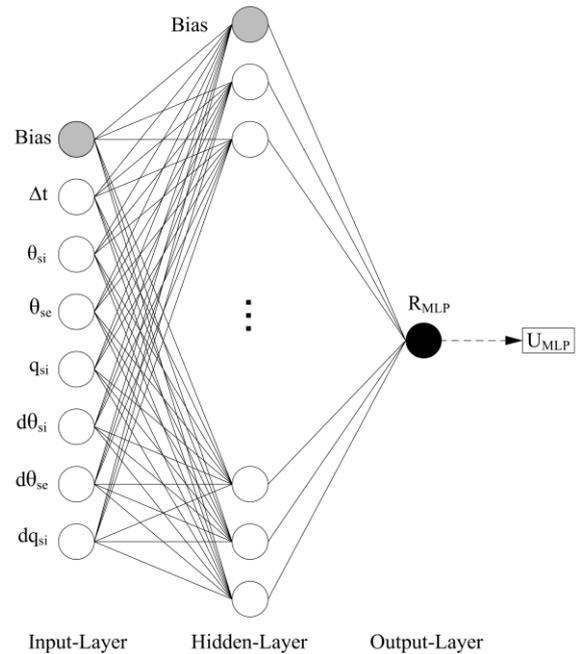


Abbildung 2: Schematische Darstellung der gewählten MLP-Architektur

Implementierung

Die Umsetzung der transienten Bauteilsimulationen erfolgte in ANSYS Mechanical innerhalb des Moduls „Transient Thermal“. Die Modellbildung verlief für die Trainings- und Testdaten in analoger Art. Unter der idealisierenden Annahme eines eindimensionalen Wärmedurchgangs durch das Bauteil wurden für die Simulationen zweidimensionale Ausschnitte der Außenwände mit adiabaten Randbedingungen an den Schnittkanten modelliert. Die Simulationsergebnisse für neun verschiedene Außenwandkonstruktionen dienen hierbei als Grundlage für die Trainingsdurchläufe und umfassen U-Werte im Intervall von $0,12 \frac{W}{m^2K}$ bis $2,00 \frac{W}{m^2K}$. Dieses Intervall umfasst ausgewählte typische Konstruktionen der Bauzeitalter von vor 1859 bis 2001, sowohl in bauzeitlichen Zuständen als auch in sanierten Zuständen (nachträglich gedämmt). Hierbei werden verschiedene Materialien sowie Positionen der Wärmedämmung in die Trainingsdaten integriert. Abbildung 3 stellt die gewählten Trainingsfälle sowie

die entsprechenden U-Werte dar. Die Konstruktionen der drei Testfälle (K1, K2 und K3) gliedern sich in das zuvor genannte Intervall ein und stellen ihrerseits wiederum individuelle (d.h. von den Trainingsdaten abweichende) Konstruktionen dar. K1 stellt eine unsanierte Außenwand zwischen 1860-1918 dar, K2 repräsentiert eine gedämmte Außenwand der Baualtersklasse 1919-1948 und K3 stellt eine zweischalige Außenwandkonstruktion mit zwei Dämmebenen aus der Baualtersklasse 1995-2001 dar. Eine Übersicht der modellierten Querschnitte mit entsprechend referenzierten U-Werten nach (Loga, 2015), bezeichnet als U_{IWU} , ist in Abbildung 3 dargestellt.

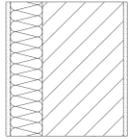
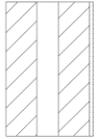
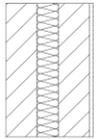
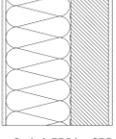
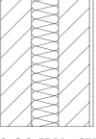
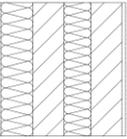
Training			
U_{IWU}	 2,00 W/m ² K	 0,25 W/m ² K	 1,40 W/m ² K
U_{IWU}	 0,36 W/m ² K	 0,13 W/m ² K	 0,36 W/m ² K
U_{IWU}	 0,14 W/m ² K	 0,12 W/m ² K	 0,30 W/m ² K
Test			
U_{IWU}	 1,61 W/m ² K	 0,23 W/m ² K	 0,15 W/m ² K
	 Gefach	 Mineralwolle	 Putz
	 Mauerwerk	 EPS-Dämmung	

Abbildung 3: Querschnitte und referenzierte U-Werte der untersuchten Trainings- und Testfälle

Für die geometrische Diskretisierung der untersuchten Konstruktionen werden quadratische finite Elemente gewählt (beispielhafte Darstellung in Abbildung 4). Um oberflächennahe Einflüsse der transienten Randbedingungen an den Oberflächen der Konstruktionen bestmöglich abbilden zu können, wird das Netz der finiten Elemente an diesen Stellen lokal durch einen graduellen Verlauf verdichtet. Die thermischen Kennwerte der Materialien für die Modellierung der Konstruktionen wurden unter der Annahme konstanter und feuchteunabhängiger Werte aus (Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, 2023) entnommen. Eine Kombination dieser Werte mit entsprechenden Schichtdicken

ergeben die zuvor aufgeführten Referenzwerte (U_{IWU}).

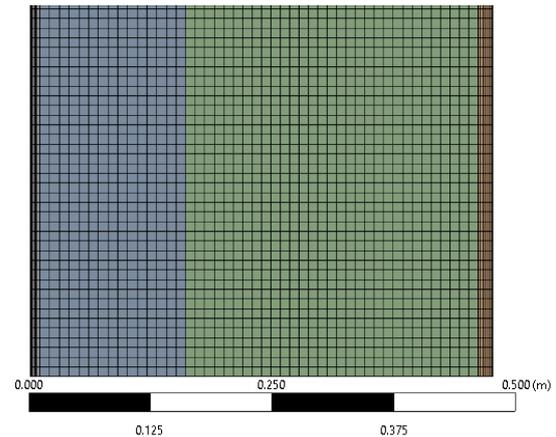


Abbildung 4: Finite Elemente, dargestellt über den Querschnitt der Konstruktion K2 (vgl. Abbildung 3)

Der äußere konvektive Wärmeübergangskoeffizient h_{ce} wurde über den in (DIN EN ISO 6946:2017, 2018) aufgeführten Zusammenhang

$$h_{ce} = 4 + 4v \quad (5)$$

berücksichtigt, wobei v als Windgeschwindigkeit in $\frac{m}{s}$ linear in die Gleichung 5 eingeht. Die entsprechenden Werte der Windgeschwindigkeit wurden für den Trainingsprozess dem Klimadatensatz (Deutscher Wetterdienst, 2014) für die Klimaregion 01 (Nordseeküste) entnommen. Um einen zusätzlichen Unterschied zwischen Trainings- und Testdaten zu generieren, wurde für die Bauteilsimulationen der Testdaten auf den Klimadatensatz der Klimaregion 02 (Ostseeküste) zurückgegriffen. Die auf die Oberfläche auftreffende Solarstrahlung wurde für eine nach Norden ausgerichtete Fassade der Klimaregion 01 (für Trainingsdaten) bzw. Klimaregion 02 (für Testdaten) in das Modell integriert. Die nach Norden orientierte Ausrichtung entspricht der empfohlenen Orientierung für möglichst stabile in-situ Bestimmungen des U-Werts (Bienvenido et al., 2019; Gaspar et al., 2016). Weitere strahlungsinduzierte Wärmeübergänge werden nicht berücksichtigt. Für die Innenoberfläche der simulierten Bauteile wird der Wärmeübergang infolge Strahlung nicht berücksichtigt und lediglich ein konvektiver Wärmeübergang mit einem konstanten Wärmeübergangskoeffizienten $h_{ci} = 2,5 \frac{W}{m^2K}$ nach (DIN EN ISO 6946:2017, 2018) modelliert.

Die Temperaturrandbedingungen für den Außenraum werden analog zur Solarstrahlung für die Klimaregion 01 aus (Deutscher Wetterdienst, 2014) entnommen. Für den Innenraum wird eine Nutzung als Wohnzimmer angenommen und entsprechend (Hofmann et al., 2022) ebenfalls als transiente Randbedingung modelliert. Als Simulationszeitraum wird der 1. Januar bis

31. März gewählt, dies entspricht nach Erfahrungen der Autoren aus vorangegangenen Studien (Benz et al., 2017; Benz et al., 2021) einem Zeitraum in dem entsprechend niedrige Außentemperaturen für eine Bestimmung des U-Werts zu erwarten sind.

Um das für in-situ Messungen übliche Messintervall von 5 bis 15 Minuten (Bienvenido et al., 2019; Gaspar et al., 2016) auch in den Simulationen abzubilden, werden die transienten Zustandsgrößen (Temperatur und Wärmestromdichte) über die Definition entsprechender Teilschritte inkrementell in 10-minütiger Auflösung auf das Modell aufgeprägt. Es ergibt sich aus jeder Simulation eine Zeitreihe über 2190 h, wobei durch die erhöhte Auflösung 13.140 einzelne Datensätze (bestehend aus θ_{si} , θ_{se} , q_{si}) resultieren. Für die Beschreibung des Initialzustands wird das erste Zeitinkrement als stationärer Zustand berechnet, hierauf basierend werden alle weiteren Zeitinkremente als transiente Zustände errechnet. Die Entnahme der Eingangsgrößen der KNN (siehe Tabelle 1) erfolgt jeweils an den Randelementen des modellierten Querschnitts. Diese Elemente stellen im Übergangsbereich zwischen Wandquerschnitt und Umgebung durch ihre reduzierte Elementgröße die Oberfläche näherungsweise dar (siehe Abbildung 4).

Die exakte vertikale Position (Höhe an der Außenoberfläche) ist hierbei aufgrund des idealisierten eindimensionalen Wärmestroms irrelevant.

Für die Modellierung der KNN wird die Deep-Learning-Bibliothek „Keras“ genutzt. Der Trainingsprozess wurde mit Zeitreihen aus 9 Bauteilsimulationen aufgebaut, siehe Abbildung 3. Als Optimierungsfunktion wird Stochastic Gradient Descent mit einer Lernrate von 0,3 und einem Momentum von 0,2 angewendet. Des Weiteren werden die Trainingsdaten nach einer Normalisierung über eine 10-fold Cross Validation in das KNN eingegeben. Die Anzahl der Trainingsperioden liegt bei 1.000. Im Input- und Hidden-Layer wird als Aktivierungsfunktion eine Sigmoidfunktion genutzt. Der Output-Layer wird mithilfe einer linearen Aktivierungsfunktion ausgebildet. Die abschließende Bewertung der Regression durch das KNN wird über die nachfolgenden Kennwerte vorgenommen (Gleichungen 6-8).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (R_{MLP} - R_{ref})^2}{\sum_{i=1}^n (R_{MLP} - \bar{R}_{ref})^2} \quad (6)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |R_{MLP} - R_{ref}|}{n} \quad (7)$$

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (R_{MLP} - R_{ref})^2}{\sum_{i=1}^n (R_{MLP} - \bar{R}_{ref})^2} \right)^{1/2} \quad (8)$$

In Gleichungen 6-8 bezeichnet R^2 das Bestimmtheitsmaß, MAE den mittleren absoluten Fehler und RMSE die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers. Für

R^2 wird ein Wert nahe 1 angestrebt, wohingegen für MAE sowie RMSE ein Wert nahe 0 als bestes Ergebnis zu interpretieren ist.

Ergebnisse und Diskussion

Die aus den transienten Simulationen resultierenden Zeitreihen werden im weiteren Verlauf als mögliche Ergebnisse aus Messungen interpretiert und nach Gleichung 4 für die Errechnung des U-Werts genutzt.

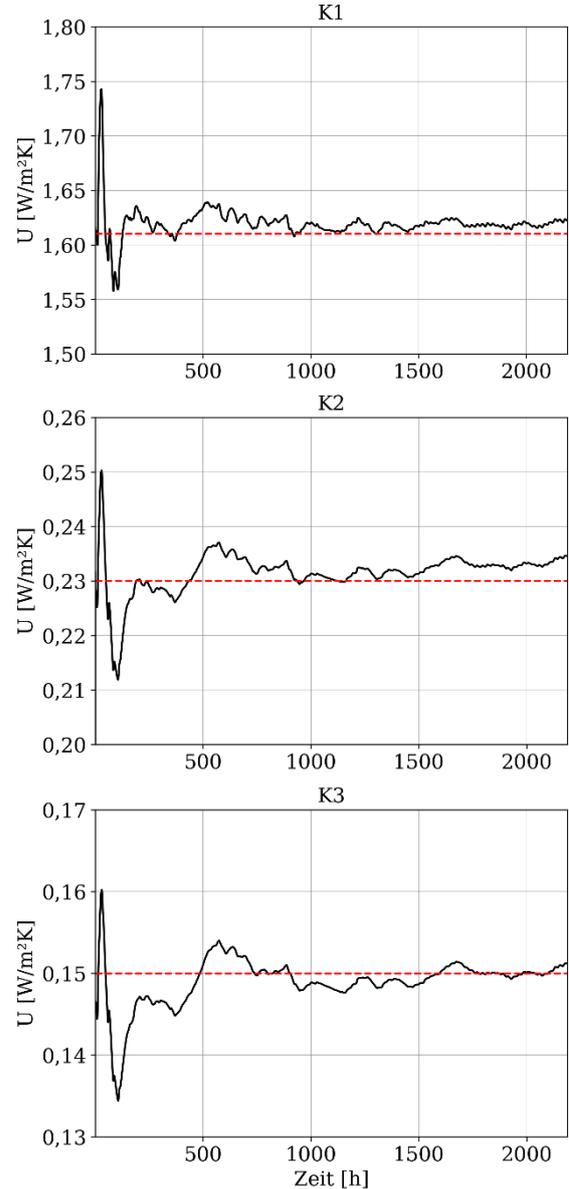


Abbildung 6: U-Werte nach Gleichung 4, aufgetragen über die Zeitschritte der Simulation

(unterbrochene rote Linie: Referenzwert U_{IWU})

Die hieraus resultierenden Ergebnisse sind in Abbildung 6 in Abhängigkeit des Simulationsverlaufs aufgetragen.

Es zeigt sich, dass trotz idealisierter Bedingungen dieser Studie zu Beginn ausgeprägte Oszillationen des errechneten U-Werts vorliegen. Im weiteren Verlauf der

Simulation verringert sich die Amplitude dieser Oszillationen, wodurch sich der errechnete U-Wert dem Referenzwert U_{IWU} annähert. Des Weiteren ist festzustellen, dass für geringere U-Werte die Amplitude der Oszillation geringer ausfällt. Dieser Umstand ist damit zu begründen, dass in den betreffenden Konstruktionen der Hauptteil der thermischen Masse stärker von den äußeren Temperatureinflüssen entkoppelt ist und als Resultat eine konstantere Wärmestromdichte zu erwarten ist.

Des Weiteren ist anzumerken, dass die errechneten U-Werte aufgrund des endlichen Simulationszeitraums sowie des numerischen Ansatzes Ungenauigkeiten unterliegen. Diese fallen im Falle der betrachteten Konstruktionen zwar verhältnismäßig gering aus, können jedoch in Abbildung 6 durch geringfügig zu groß errechnete U-Werte abgelesen werden. Nicht zuletzt aufgrund der begrenzten Fallstudie mit 3 Konstruktionen lässt sich keine abschließende systematische Erklärung für diese beobachteten Abweichungen finden.

Mittels der in Gleichungen 6 bis 8 aufgeführten Kennwerte werden nachfolgend die Regressionen der trainierten MLP bewertet. Abbildung 7 führt hierfür eine Übersicht dieser Kennwerte in Abhängigkeit der Neuronen innerhalb des Hidden-Layers auf. Angegeben sind die Werte nach jeweils 1.000 Trainingsdurchläufen. Bereits MLP mit 2 Neuronen scheinen in der Lage zu sein, die Regression von U-Werten zu realisieren. Die Leistungsfähigkeit der Regression, gemessen an den zuvor genannten Kennwerten, nimmt mit zunehmender Anzahl der Neuronen etwas zu. Bei einer Konstellation von 8 Neuronen innerhalb des Hidden-Layers ist im Vergleich zu den übrigen Konstellationen ein geringfügig besseres Ergebnis zu verzeichnen (siehe rote Markierung in Abbildung 7). Aus diesem Grund wird dieses MLP für weitere Untersuchungen in dieser Studie genutzt.

In Abbildung 8 werden daher für 8 Neuronen innerhalb des Hidden-Layers die Verläufe der gewählten Verlustfunktion (mittlerer quadratischer Fehler, MSE) sowie für R^2 über den Trainings- und Validierungsverlauf dargestellt. Als Verlustfunktion wurde der mittlere quadratische Fehler (MSE) gewählt, dieser wichtet im Gegensatz zu MAE ausgeprägte Prognosefehler deutlich stärker als geringere Abweichungen der Prognose, sodass eine schnellere Konvergenz des Trainingsprozesses zu erwarten ist.

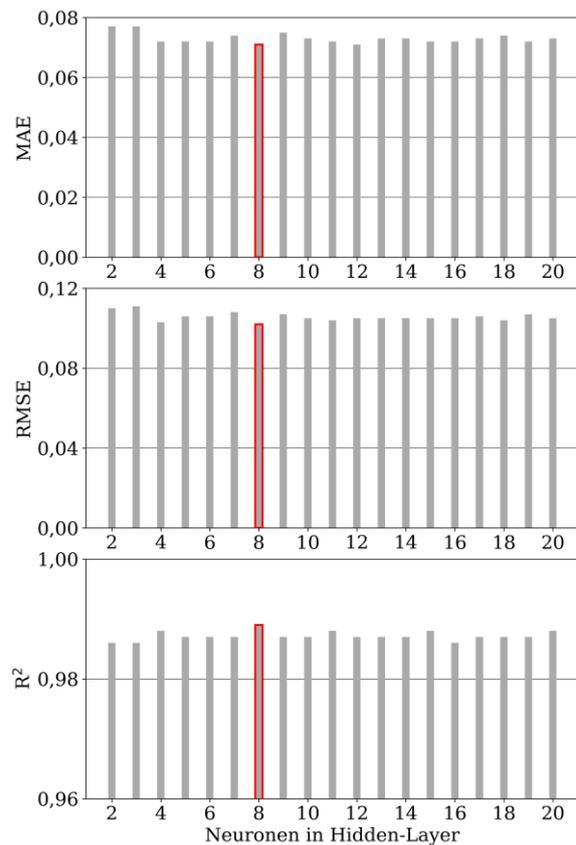


Abbildung 7: Regressionsfehler nach 1.000 Trainingsepochen in Abhängigkeit der Anzahl der Neuronen innerhalb des Hidden-Layers

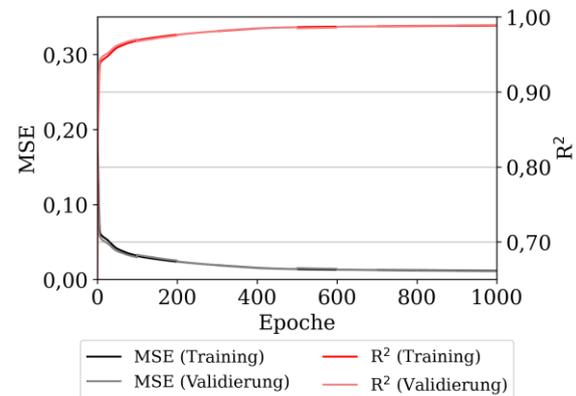


Abbildung 8: Verhalten des MLP während des Trainings- bzw. Validierungsprozesses für 8 Neuronen innerhalb des Hidden-Layers

Mit fortschreitendem Trainingsverlauf kann innerhalb der ersten ca. 100 Epochen eine signifikante Reduzierung des MSE beobachtet werden. Mit weiterem Training konvergiert die Verlustfunktion gegen 0, wohingegen R^2 zunächst stetig zunimmt und in ein konvergierendes Verhalten (Grenzwert siehe Abbildung 7) übergeht. Die beobachteten Konvergenzen treffen hierbei für den Trainings- und Validierungsprozess zu, sodass eine Überanpassung auf den wiederholt eingehenden Trainingsdaten unwahrscheinlich ist.

Nachdem das Verhalten verschiedener MLP für das Training untersucht und dargestellt wurde, stellt Tabelle 4 die Regressionsfähigkeit bezüglich unbekannter Werte dar. Sowohl für das Verfahren nach Gleichung 4 als auch für die Prognose des trainierten MLP zeigen sich für vergleichsweise niedrige U-Werte (K2, K3) bessere Ergebnisse als für den höheren U-Wert im Testfall K1. Die Begründung hierfür kann ebenfalls in der stärkeren Entkopplung von externen Temperatureinflüssen bei niedrigen U-Werten gesehen werden. Es ist zudem festzuhalten, dass mit niedrigeren U-Werten der prognostizierte U-Wert des MLP näher am Referenzwert liegt als nach dem etablierten Verfahren nach (DIN EN ISO 6946:2017, 2018).

Tabelle 4: Übersicht der U-Werte nach IWU (Loga, 2015), Berechnung nach Gleichung 4 sowie als Ergebnis des MLP

	U [W/m ² K]		
	U _{IWU}	U _{DIN6946}	U _{MLP}
K1	1,61	1,62±0,014	1,53±0,140
K2	0,23	0,24±0,006	0,23±0,003
K3	0,15	0,15±0,003	0,15±0,001

Fazit

Mit diesem Beitrag wird die Verwendung von KNN, im Speziellen die Nutzung eines MLP mit einem Hidden-Layer, zur Bestimmung des U-Werts unter transienten Randbedingungen vorgeschlagen. Als Trainingsdaten wurden die Ergebnisse numerischer Bauteilsimulationen genutzt. Im Zuge einer Parameterstudie wurde die, für die gewählte Problemstellung, optimale Anzahl der Neuronen innerhalb des MLP bestimmt. Aus dieser Studie ging unter Nutzung entsprechender Kennwerte ein MLP mit 8 Neuronen im Hidden-Layer als beste Architektur hervor. Für dieses Netzwerk ergibt sich ein Regressionsergebnis hinsichtlich R² von 0,989 (MAE = 0,071, RMSE = 0,102).

Durch die Gegenüberstellung der Ergebnisse aus einer Bestimmung des U-Werts nach (DIN EN ISO 6946:2017, 2018) konnte neben der grundsätzlichen Qualität der Simulationsergebnisse auch die potentielle Eignung von KNN zur Regression von in-situ U-Werten aufgezeigt werden. Für niedrige U-Werte übersteigt die Genauigkeit des MLP zudem die des etablierten Mittelwertverfahrens nach (DIN EN ISO 6946:2017, 2018).

Einschränkend hinsichtlich der in Tabelle 4 dargestellten Ergebnissen, ist anzumerken, dass das gewählte Modell zur Beschreibung des Innenraumklimas keine Schwankungen auf Tagesebene berücksichtigt. Hieraus ergibt sich im Gegensatz zu in-situ Messungen eine wesentliche Erleichterung bei der Bestimmung des U-Werts mit dem etablierten Mittelwertverfahren nach (DIN EN ISO 6946:2017, 2018).

Des Weiteren unterliegen Regressionen des U-Werts außerhalb des genutzten Trainingsintervalls

(0,10-2,00 W/m²K) vermutlich enormen Unsicherheiten.

Ausblick

In weiterführenden Arbeiten streben die Autoren dieser Studie die Erweiterung und Verallgemeinerung des beschriebenen Ansatzes an. Hierfür sollte die Varianz der transienten Bauteilsimulationen erhöht werden. Dies kann durch eine Diversifizierung der simulierten Konstruktionen erreicht werden, sodass neben der Massivbauweise auch Varianten des Holzbaus oder hybride Bauweisen untersucht werden müssten. Auch die Integration statistischer Streuungen der Materialkennwerte sowie die Berücksichtigung zeitabhängiger Verläufe der Innenraumtemperatur auf Tagesebene und detailliertere Strahlungsprozesse an beiden Oberflächen sollte in Erwägung gezogen werden. Im Sinne einer Qualitätssicherung sollten zudem Mesh-Independence-Tests in Kombination mit Validierungen anhand von Messergebnissen vorgenommen werden.

Um eine stärkere Kontextualisierung der einzelnen Zeitschritte zu ermöglichen, könnten für die Regression zunächst weitere Eingangsgrößen auf Basis der Simulationsergebnisse genutzt werden (z.B. Mittelwerte über verschiedene Zeitintervalle zur Charakterisierung periodischer Schwankungen). Im Zuge dessen sollten auch entsprechende Studien zum Einfluss der Hyperparameter (z.B. Lernrate, Verlustfunktion, Optimierer) vorgenommen werden. Weitere Untersuchungen können zudem die Potentiale anderer Arten neuronaler Netze (z.B. rekurrente neuronale Netze) zum Gegenstand haben und entsprechende Verbesserungen der vorgestellten Methodik aufzeigen.

Die Praxistauglichkeit und potentiellen Beschränkungen der beschriebenen Methodik müssen zudem durch umfangreiche Messkampagnen, sowohl unter Labor-, als auch unter in-situ Bedingungen, evaluiert werden.

Literatur

- Benz, A. et al., 2017. Thermografische Abschätzung der thermischen Eigenschaften von Gebäudehüllen zur Verwendung als Eingangsparameter bei der energetischen Gebäudesimulation. Tagungsband der Bauphysiktag 2017.
- Benz, A. et al., 2021. Framework for a UAS-based assessment of energy performance of buildings. *Energy and Buildings* 250, 111266.
- Bienvenido-Huertas, D. et al., 2019. Applying an artificial neural network to assess thermal transmittance in walls by means of the thermometric method. *Applied Energy* 233-234, p. 1-14.
- DIN EN ISO 6946, 2018. Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren.
- Deutscher Wetterdienst, 2014. Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse, DWD, Offenbach.
- Evangelisti, L. et al., 2016. Experimental investigation of the influence of convective and radiative heat transfers on thermal transmittance measurements. *International Communications in Heat and Mass Transfer* (78), S. 214-223.
- Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, 2023. MASEA - Materialdatensammlung für die energetische Altbausanierung. <https://www.masea-ensan.com/>, letzter Zugriff am 6.12.2023.
- Gaspar, K. et al., 2016. A comparison of standardized calculation methods for in situ measurements of façades U-value. *Energy and Buildings* 130, S. 592-599.
- Hofmann, M. et al., 2022. Dependencies of the indoor climate on the course of the seasons and derivation of regressions from long-term measurements. *Indoor air*, Vol. 32 [6].
- ISO 9869-1, 2014. Thermal insulation – Building elements – In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance, Part 1: Heat flow meter method.
- Loga, T., 2015. Deutsche Wohngebäudetypologie – Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden ; erarbeitet im Rahmen der EU-Projekte TABULA, Institut Wohnen und Umwelt. IWU, Darmstadt.

SESSION C · 06.03.2024

Thema: Radon in Gebäuden

Kooperationspartner

R
P **TU** Rheinland-Pfälzische
Technische Universität
Kaiserslautern
Landau

Bauhaus-
Universität
Weimar

WBA

WBA | Bauhaus Weiterbildungs-
akademie Weimar e.V.
Institut an der
Bauhaus-Universität Weimar



RADONSCHUTZ IM BAUBESTAND – STAND DES WTA-MERKBLATTS

Iris M. Reuther¹, Reinhold W. Uhlig²

¹ Jade Hochschule Oldenburg, Oldenburg, Deutschland, E-Mail: iris.reuther@jade-hs.de

² KORA e. V., Dresden, Deutschland, E-Mail: reinhold.uhlig@koraev.de

Kurzfassung

Im Zuge der Umsetzung der Richtlinie 2013/59/Euratom von Dezember 2013 mussten EU-weit u. a. Radongebiete ausgewiesen und Maßnahmen zum Schutz vor diesem radioaktiven, Lungenkrebs begünstigenden Edelgas ergriffen werden. In deutsches Recht überführt wurden diese Vorgaben dann Ende Dezember 2018 in Form der aktualisierten Strahlenschutzverordnung bzw. im Dezember 2017 im Strahlenschutzgesetz.

Inzwischen kamen die Bundesländer ihrer daraus abgeleiteten Pflicht zur Ausweisung von Radonvorsorgegebieten nach. 2021 erschien Teil 1 der Vornorm DIN DIN/TS 18117 „Bauliche und Lüftungstechnische Maßnahmen zum Radonschutz“, die sich auf Neubauten bezieht. Seit 2021 kommen die Arbeitgeber, denn diese sind in den Radonvorsorgegebieten dazu verpflichtet, i. d. R. ihrer Messpflicht an Arbeitsplätzen in bestehenden Gebäuden nach. Doch welche Maßnahmen sind im Falle erhöhter Messwerte vorzunehmen? Bisher gibt es in Deutschland kein Normen-Äquivalent, auf das sich Sachverständige, Planer und Objektüberwacher beziehen können, wenn sie Radonschutzmaßnahmen im Baubestand projektieren und dann die Ausführung überwachen.

Seit geraumer Zeit arbeitet eine Arbeitsgruppe am WTA-Merkblatt „Radonschutz im Baubestand“, um dieser Lücke in den Regelwerken abzuweichen. Die Verfasser dieses Beitrags sind Mitglieder dieser Arbeitsgruppe. Sie berichten im nachfolgenden Beitrag über die besonderen Herausforderungen bei der Erarbeitung sowie den aktuellen Stand des Merkblatts.

Abstract

Radon protection in existing buildings - status of the WTA Code of Practice

As part of the implementation of Directive 2013/59/Euratom of December 2013, it was prescribed across the EU that radon areas be designated and measures taken to protect against this radioactive noble gas, which promotes lung cancer.

These requirements were then incorporated into German law at the end of December 2018 in the form of the updated Radiation Protection Ordinance and in December 2017 into the Radiation Protection Act.

The federal states have now fulfilled their resulting obligation to designate radon protection areas. In 2021, the preliminary standard DIN DIN/TS 18117 "Structural and ventilation measures for radon protection" was published, which relates to newly constructed buildings. In accordance with their obligations in radon precautionary areas, employers have generally complied with their measurement obligations at workplaces in existing buildings since 2021. But what measures need to be taken in the event of elevated readings? To date, there is no equivalent standard in Germany to which experts, planners and building inspectors can refer when planning radon protection measures in existing buildings and then monitoring their implementation.

A working group has been working for some time on the WTA Code of Practice "Radon protection in existing buildings" to remedy this gap in the regulations. The author of this article is a member of this working group. In the following article, she reports on the particular challenges involved in the development and on the current status of the information sheet.

Einleitung

Grundlagen und Kenntnisstand zu Radon und zum Radonschutz

Bei Radon handelt es sich um ein geogenes, farb-, geruchs- und geschmackloses, radioaktives Edelgas. Auch wenn ihm in niedriger Dosierung eine Heilwirkung zugeschrieben wird, gilt es als schädlich und ist nach dem Rauchen als zweithäufigste Ursache für Lungenkrebs. Allerdings findet sich diese seit Jahren als gesichert geltende Lungen-Kanzerogenität nur am Rande in medizinischen Lehrbüchern (hier exemplarisch genannt (Bösch 2014) sowie (Kreuter et al. 2022)). Als geogenes Gas kommt Radon im Erdreich in besonders hohen Dosen in regional stark schwankender Konzentration vor. Nur Messungen durch Fachleute können verlässlich Auskunft über eine vorhandene Belastung geben. Aus dem Erdreich

gewonnene Baustoffe können durch Exhalation von Radon die Menschen in Gebäuden schädigen, allerdings resultiert der Eintrag in ein Gebäude weitaus häufiger aus Undichtigkeiten im erdberührten Bereich.

Die Radon-Prävention geschieht über bau- und lüftungstechnische Maßnahmen. Hierzu finden sich in den allgemeinen Lehrbüchern im deutschsprachigen Raum für den Hochbau erst in der jüngsten Ausgabe (z. B. bei (Hestermann und Rongen 2015)) entsprechende Hinweise oder aber gar nicht (z. B. in (Pech und Pöhn 2018)). Es existiert bisher nur vereinzelt spezielle Fachliteratur z. B. (Breckow et al. 2023). Zu beachten ist auch das vom Bundesamt für Strahlenschutz 2019 neu herausgegebene Radon-Handbuch (Bundesamt für Strahlenschutz 2019). Einleitend kann also aus der eher seltenen Erwähnung in der üblichen Literatur geschlossen werden, dass die Kenntnisse hinsichtlich der Gefahren durch Radon bei den Fachleuten aus der Medizin und die Kenntnisse zur Verhinderung des Eintrags im Bauwesen häufig nur in geringem Umfang vorhanden sind.

Relevanz und Aktualität

Obwohl die kanzerogene Wirkung von Radon schon länger nachgewiesen ist, hat es in der Gesetzgebung und der Bevölkerung erst in den letzten Jahren mehr Aufmerksamkeit gewonnen. Im Dezember 2013 wurde die Europäische Richtlinie 2013/59/ Euratom erlassen, in der der „Gesundheitsschutz der Bevölkerung und der Arbeitskräfte gegen die Gefahren ionisierender Strahlungen“ in Form eines Mindestschutzes (Amtsblatt der Europäischen Union; 2013) vorgegeben wurde. Zum 1. Oktober 2017 trat in Deutschland das Strahlenschutzgesetz in Kraft. Der Referenzwert von 300 Bq / m³ Raumluft im Jahresmittel wurde aus der Euratom-Richtlinie übernommen (Bundesministerium der Justiz 2017). Für Arbeitsplätze, nicht jedoch Wohnräume, existiert in sog. Radonvorsorgegebieten eine Mess- und Meldepflicht. Die Ausweisung der v. g. Gebiete oblag den Bundesländern, die dieser Pflicht bis Ende 2020 nachzukommen hatten. Nur in sechs der 16 Bundesländer wurden solche Gebiete ausgewiesen. Sie sind dadurch gekennzeichnet, dass dort der v. g. Referenzwert „überdurchschnittlich häufig überschritten“ wird (Bundesamt für Strahlenschutz 2021). Wie ein Vergleich der Radonvorsorgegebiete in Abbildung 1 mit der Radonbelastung in Wohnungen in Abbildung 2 zeigt, sollte sich man keineswegs nur innerhalb der erstgenannten Gebiete mit der Thematik befassen. Die im Dezember 2023 veröffentlichte Karte weist in weit mehr Gebieten höhere erwartbare Radonwerte aus als die Vorgänger-Version von 2006. Damit wird die Bedeutung für nicht wenige Regionen und Aktualität des Themas durch das Bundesamt für Strahlenschutz bestätigt.

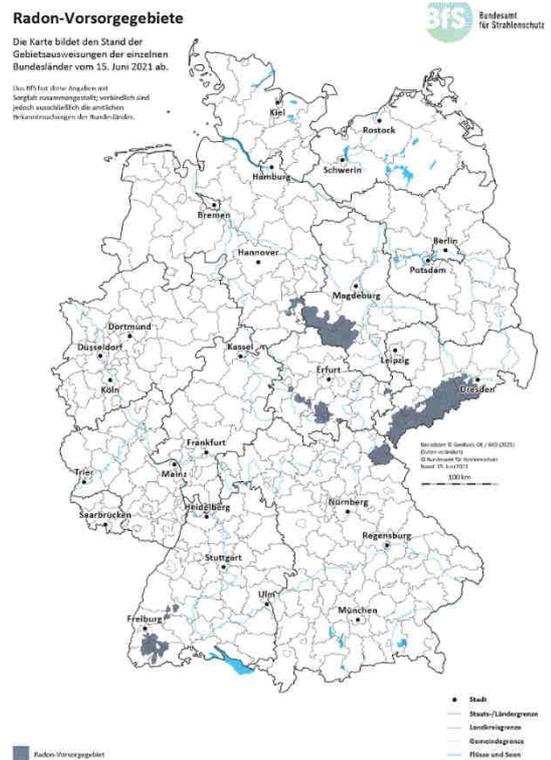


Abbildung 1: Radonvorsorgegebiete (Bundesamt für Strahlenschutz 2021)

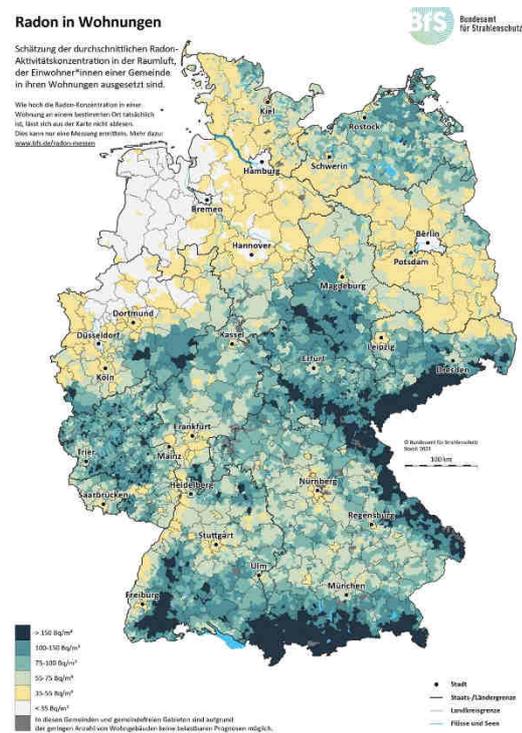


Abbildung 2: Radon in Wohnungen (Bundesamt für Strahlenschutz 2023)

Gängige Maßnahmen des Radonschutzes

Vor dem Beginn einer Sanierung steht im Fall einer Radonbelastung zwingend die Messung. Je nach Zweck gibt es verschieden lang dauernde Möglichkeiten mit je entsprechendem Gerät.

Für die Maßnahmen des Radonschutzes in Gebäuden kommen zumeist die zwei folgenden Lösungsansätze zur Anwendung:

A) Verhinderung des Eindringens radonhaltiger Bodenluft durch die erdberührte Gebäudehülle durch deren konvektionsdichte Ausführung. In der Regel wird dieser Lösungsansatz bereits durch eine Abdichtung nach den heute gängigen Lösungen des Feuchteschutzes erreicht (DIN 18 533, WU-Betonrichtlinie usw.).

B) Verhinderung des konvektiven Luftstromes vom Erdreich ins Gebäude durch Veränderung der Druckverhältnisse zwischen Gebäudeinnerem und Erdreich. Dieser Ansatz wird erreicht, indem entweder im Erdreich ein Unterdruck oder aber im Gebäudeinnerem ein Überdruck induziert wird. Damit können geringe Undichtheiten in der Gebäudehülle akzeptiert werden, da keine Bodenluft mehr ins Gebäude einströmt.

Während Ansatz A) die Standardlösung für Neubauten ist, kommt Ansatz B) vorrangig in der Gebäudesanierung zur Anwendung. Die Realisierung des Ansatzes B) ist weitaus komplexer als Ansatz A).

Norm vs. WTA-Merkblatt

2021 erschien die Vornorm DIN DIN/TS 18117 Teil 1 „Bauliche und Lüftungstechnische Maßnahmen zum Radonschutz“. Wie die allermeisten Bau-Normen, bezieht sich dieses Regelwerk auf das Neubaugeschehen und auch beim voraussichtlich 2024 erscheinenden Teil 2 dieser Norm wird dies der Fall sein (Uhlig 2023).

Das Pendant zu Normen für den Umgang mit dem Baubestand sind die WTA-Merkblätter. Mit „WTA“ abgekürzt wird die Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.. Dieser 1977 gegründete Verein hat inzwischen über 500 Mitglieder, die in elf Referaten zugeordneten Arbeitsgruppen vor allem an der Erstellung von Merkblättern für die Erhaltung und Instandsetzung von Bauwerken arbeiten (Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege 2023).

Die Bauaufgaben innerhalb Deutschlands verlagern sich seit Jahren immer mehr hin zu den Arbeiten im Bestand. Bereits durch das Kreislaufwirtschaftsgesetz vorgegeben („Sanierung vor Abbruch“), dürfte sich diese Verlagerung der Aufgaben für Architekten und Bauingenieure durch Themen wie „graue Energie“ und „CO₂-Budgetierung“ eher verstärken. Damit

gewinnen die WTA-Merkblätter insgesamt an Bedeutung. Für den Radonschutz im Baubestand gilt dies umso mehr, da eine konvektionsdichte Gebäudehülle gegen Erdreich in der Regel nachträglich nicht herstellbar ist. Das vorrangige Ziel des Merkblatts ist folglich die Reduzierung der Konvektion und / oder die Umkehrung des Konvektionsstroms.

WTA-Merkblatt „Radonschutz im Baubestand“

Arbeitsgruppe

Aufgrund der hier dargelegten Relevanz und Komplexität des Themas gründete sich im November 2019 eine WTA-Arbeitsgruppe innerhalb des Referats Bauphysik, um allen in der Sanierung Tätigen mit dem entsprechenden Merkblatt ein „Werkzeug“ für ihre Aufgaben zur Verfügung zu stellen. Die Zielgruppe sind interessierte Bauherren, Planer und ausführende Unternehmen im deutschsprachigen Raum. Ihnen sollen wirksame und wirtschaftliche Lösungen für ihre Bauvorhaben im Bestand vorgestellt werden.

Die Arbeitsgruppe wird fachlich geleitet durch Prof. em. Dr. Reinhold Uhlig, dem Co-Autor dieses Textes. Er hat auch an der v. g. Vornorm für den Radonschutz mitgearbeitet, ist in die Ausbildung zur „Fachperson Radon“ an der Sächsischen Bauakademie in Dresden involviert und hat bereits einige Publikationen zu Radon verfasst, z. B. (Kemski und Uhlig 2019). Die organisatorische Leitung der Arbeitsgruppe liegt bei Dipl.-Ing. (FH) Marc Ellinger. Er ist Sachverständiger für Schäden an Gebäuden und war zeitweise Leiter der WTA-Schulungsakademie.

Prof. Dr. Iris M. Reuther, die Erstautorin dieses Beitrags, ist seit 2020 Mitglied der Arbeitsgruppe, die derzeit aus 16 Mitgliedern besteht. Sie kommen aus Deutschland und der Schweiz. Ihr beruflicher Hintergrund für diese ehrenamtliche Tätigkeit deckt ein breites Spektrum ab. So sind Vertreter vorhanden aus den Sparten

- Hochschule (Forschung)
- Industrie (Abdichtung / Absauglösungen)
- Ingenieurbüro (Planung im Hochbau, Gutachtertätigkeit, Geologie, Messtechnik, Gebäudetechnik)

Die meisten der Arbeitsgruppenmitglieder haben die Ausbildung zur „Fachperson Radon“ absolviert, verbinden somit die Theorie mit der Praxis. Da die Radonschutzmaßnahmen zudem sowohl aus dem Bereich „Bauwesen“ als auch „Lüftung“ stammen, ist die interdisziplinäre Zusammensetzung der Arbeitsgruppe nicht nur von Vorteil, sondern essentiell.

Merkblatt

Inhaltlich geht das Merkblatt einleitend auf die Grundlagen des Radonschutzes im Gebäudebestands ein. Die Gebäudediagnostik ist ein erster Schwerpunkt des Merkblatts, denn sie ist als Vorbereitung für die Planung und Ausführung von Sanierungsmaßnahmen unerlässlich. Umfänglich werden dann alle Maßnahmen beschrieben, die in der Sanierung zur Anwendung kommen, um schließlich Handlungsempfehlungen in Abhängigkeit von den Ausgangssituationen zu geben.

Diese Veröffentlichung anlässlich der Bauphysiktage kann natürlich der des Merkblatts nicht vorgreifen. Die hier nur grob umrissenen Herausforderungen, aber auch Lösungen sowie die in Abbildung 3 dargestellte Gliederung dürften jedoch einen ersten Eindruck des WTA-Merkblatts „Radonschutz im Baubestand“ vermitteln.

GRUNDLAGEN

1. Einleitung
2. Begriffsbestimmungen

LÖSUNGEN DES BAU- UND LÜFTUNGSTECHNISCHEN RADONSCHUTZES IN BESTANDSGEBÄUDEN

3. Grundlagen des Radonschutzes im Gebäudebestand
4. Radon- und Gebäudediagnostik
5. Lösungen des baulichen und lüftungstechnischen Radonschutzes im Gebäudebestands
6. Handlungsempfehlungen

ABSCHLIESSENDE KAPITEL UND ANLAGEN

7. Literatur
8. Anlagen

Abbildung 3: Aufbau des WTA-Merkblatts „Radonschutz im Baubestand“ (eigene Darstellung)

Herausforderungen

Wie unzählige andere Vorhaben wurde auch die Arbeit an diesem Merkblatt durch die kurz nach der Gründung der Arbeitsgruppe verhängten Corona-Maßnahmen im Zeitplan gestört. Inzwischen hat sich ein Wechsel zwischen Online und Präsenz-Treffen etabliert. Die zeitliche Verfügbarkeit für das Engagement im Ehrenamt ist bei allen vergleichbaren Tätigkeiten limitiert, so auch hier. Angestrebt ist die Vor-Veröffentlichung für Mitte / Ende 2024.

Eine weitere Herausforderung ist das Sichtbarmachen des nicht sichtbaren Radons. Konkret bedeutet dies, dass das Merkblatt „Radonschutz im Baubestand“ einer ungewöhnlich großen Anzahl an Zeichnungen bedarf, um die Eindringwege des Edelgases, aber auch die Sanierungsmaßnahmen für die Leser zu visualisieren. Zwar existieren in der erwähnten Literatur bereits teilweise entsprechende Beispiele der Veranschaulichung, jedoch längst nicht für alle Themen und teils nicht in fachlich üblicher Darstellungsweise. Exemplarisch sei im Folgenden aus anderen Publikationen je eine Zeichnung zitiert, anhand derer die Notwendigkeit der Visualisierung teils gar der Begriffe (z. B. „Radonbrunnen“) verdeutlicht wird.

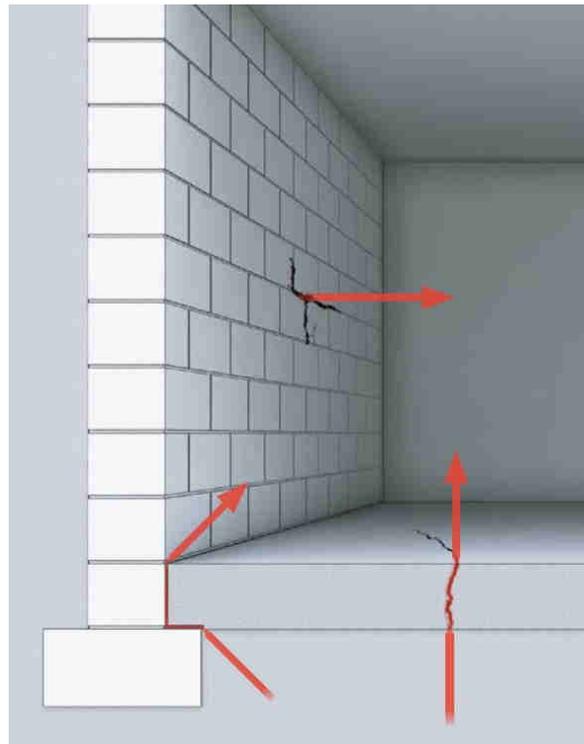


Abbildung 4: Eindringen von radonhaltiger Bodenluft durch Leckstellen (Teilbild aus Bundesamt für Strahlenschutz 2019, S. 29)

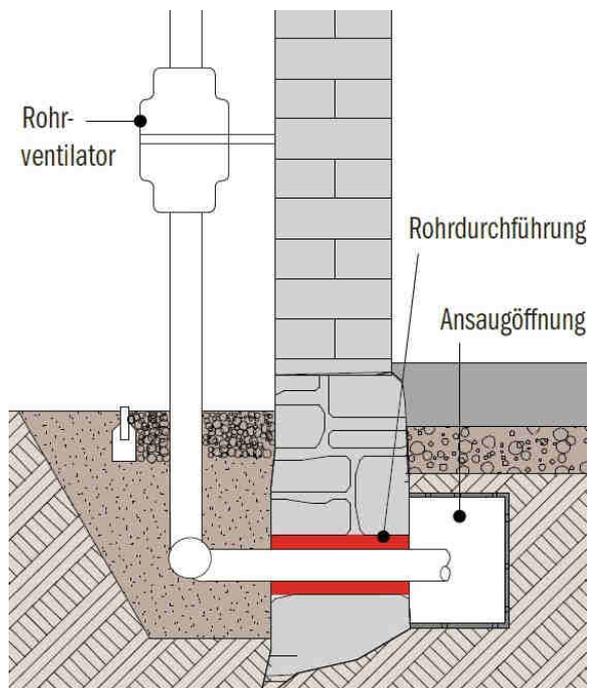


Abbildung 5: Radonbrunnen (Eidgenössisches Departement des Innern 2018, S. 49)

Zusammenfassung

Der allgemeine Kenntnisstand über die gesundheitsschädigende Wirkung von Radon ist derzeit noch ähnlich gering wie der über die Maßnahmen gegen die Ansammlung dieses geogenen Edelgases in Aufenthaltsräumen. Durch gesetzliche Änderungen und die Veröffentlichung neuer Messergebnisse durch das Bundesamt für Strahlenschutz hat das Thema an Aktualität gewonnen. Die Maßnahmen im Baubestand sind komplex, weil sie regelmäßig aus baulichen und anlagentechnischen Komponenten bestehen. Eine Arbeitsgruppe der WTA arbeitet seit Ende 2019 an einem Merkblatt „Radonschutz im Baubestand“. Diese Handreichung ist weit gediehen, jedoch noch nicht fertig gestellt.

Literatur

- Amtsblatt der Europäischen Union. 2013. „RICHTLINIE 2013/59/EURATOM DES RATES.“ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013L0059&from=en> (Zugriff am 3.11.2023).
- Bösch, D. 2014 *Lunge und Atemwege*. Herausgeber: Thomas F. Lüscher, & Jan Steffel. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Breckow, J., Hartmann, T., Kemski, J., Kleve, J., Klingelhöfer, J., Leicht, K. 2023. *Radon und Radonschutz im Bauwesen*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Bundesamt für Strahlenschutz. 2023. *Neue Karte zeigt Radon-Situation in Wohnungen*. <https://www.bfs.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/BfS/DE/2023/010.html> (Zugriff am 27.12.2023).
- Bundesamt für Strahlenschutz. 2019. *Radon-Handbuch Deutschland*. Salzgitter.
- Bundesamt für Strahlenschutz. 2021. „Radon-Vorsorgegebiete in Deutschland.“ <https://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/radon/karten/vorsorgegebiete.html> (Zugriff am 03.11.2023).
- Bundesministerium der Justiz. 2017. *Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung*. <https://www.gesetze-im-internet.de/strlsg/> (Zugriff am 03.11.2023).
- Eidgenössisches Departement des Innern. 2018. „Radon – Praxishandbuch Bau.“ *Bauliche Massnahmen zum Radonschutz*. file:///C:/Users/Acer/Downloads/Buch_Radon_DE.pdf (Zugriff am 28.12.2023).
- Hestermann, U., Rongen, L. 2015. *Frick/Knöll Baukonstruktionslehre I*. 36. Auflage Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Kemski, J., Uhlig, R. W. 2019. *Erarbeitung von DIN-Normen bzgl. baulicher Maßnahmen für den Radonschutz*. Herausgeber: Bundesamt für Strahlenschutz. Salzgitter.
- Kreuter, M., Herth, F. J. F., Costabel, U., Kirsten, D. 2022. *Seltene Lungenerkrankungen*. Berlin: Springer.
- Pech, A., Pöhn, Ch. 2018. *Baukonstruktionen - Band 1: Bauphysik*. Wien: Birkhäuser Verlag.
- Uhlig, R. W. 2023. „Stand der Ausarbeitung des neuen WTA-Merkblattes "Radonschutz im Baubestand".“ In *Tagungsband 16. Sächsische Radontage*, S. 93 - 104. Dresden. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege. *Die Gründungsgeschichte*. 2023. <https://www.wta-international.org/de/ueberuns/die-wta/geschichte/> (Zugriff am 28.12.2023).



IRRWEGE IM RADONSCHUTZ (DEUTSCHE VERSION)

Karin Leicht¹

¹ LEICHT Sachverständige, Würzburg, Deutschland, E-Mail: leicht@leicht-sv.de

Kurzfassung

Seit 31.12.2018 gibt es die gesetzliche Pflicht zum Radonschutz. Inzwischen wurden in einigen Bundesländern sog. Radonvorsorgegebiete ausgewiesen. Die öffentliche Informationslage ist vielfach noch sehr dünn, so dass es häufig noch Missverständnisse und Fehlinterpretationen zum Thema Radon gibt. Der Vortrag bringt Licht ins Dunkel des baulichen Radonschutzes und der damit verbundenen Pflichten. Es wird u. a. auf den Sinn von Bodenluftmessungen, sowie den Feuchteschutz von Gebäuden eingegangen. Um das Thema abzurunden und nicht nur Probleme sondern auch Lösungen vorzustellen, werden zum Abschluss des Vortrages noch einige einfache Beispiele für den baulichen Radonschutz vorgestellt.

Abstract

There has been a legal obligation to protect against radon since December 31, 2018. In the meantime, so-called radon prevention areas have been designated in some federal states. The public information situation is still very thin, misunderstandings and misinterpretations about radon occur. The lecture sheds light on structural radon protection and the associated obligations. Among others, the purpose of soil air measurements and the moisture protection of buildings are discussed. In order to round off the topic and present not only problems but also solutions, some simple examples of structural radon protection will be presented at the end of the lecture.

Einleitung

Die grundsätzliche Verpflichtung zum Radonschutz für alle Neubauten ergibt sich aus dem bereits seit 31.12.2018 gültigen Strahlenschutzgesetz, kurz StrlSchG, dort im § 123 Abs.1 (Unterstreichung und Kursivdruck durch den Verfasser ergänzt):

„(1) Wer ein Gebäude mit Aufenthaltsräumen oder Arbeitsplätzen errichtet, hat geeignete Maßnahmen zu treffen, um den Zutritt von Radon aus dem Baugrund zu verhindern oder erheblich zu erschweren. Diese Pflicht gilt als erfüllt, wenn 1. die nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik erforderlichen Maßnahmen zum Feuchteschutz eingehalten werden und 2. in den nach §121 Absatz 1 Satz 1 festgelegten Gebieten zusätzlich die in der Rechtsverordnung nach Absatz 2 bestimmten Maßnahmen eingehalten werden.“

Besondere, zusätzliche Maßnahmen zum ohnehin vorzusehenden baulichen Radon-schutz sind demnach noch für Neubauvorhaben in sog. Radonvorsorgegebieten zu treffen.“

Für Bestandsgebäude hat die Gesetzgebung vorgesehen, dass Radonschutzmaßnahmen bei Vornahme von energetischen Sanierungen in Betracht gezogen werden sollen, vgl. § 123 Abs. 4 (wie vor):

(4) Wer im Rahmen der baulichen Veränderung eines Gebäudes mit Aufenthalts-räumen oder Arbeitsplätzen Maßnahmen durchführt, die zu einer erheblichen Ver-minderung der Luftwechselrate führen, soll die Durchführung von Maßnahmen zum Schutz vor Radon in Betracht ziehen, soweit diese Maßnahmen erforderlich und zumutbar sind.“

Die bekannte juristische Wertung des Begriffs „Soll“ wird an dieser Stelle nicht vertieft, nur kurz zusammengefasst im Sinne von „Soll bedeutet wenn man kann, dann muss man auch“.

Zu beachten ist dabei die Maxime, dass es um das Schutzziel „Mensch“ geht. Vor schädlichen Einwirkungen durch Radon ist demnach nicht die Baukonstruktion zu schützen, anders als z. B. bei der Einwirkung durch Wasser, Frost, Klima u. dgl., sondern Radonschutzmaßnahmen sind als Gesundheitsprävention demnach dort zu treffen, wo das Schutzziel Mensch sich aufhält und/oder arbeitet. So ist auch zwischen Gebäuden mit Aufenthalts- und Wohnräumen in Untergeschossen und solchen, in denen dort lediglich untergeordnete, zeitlich kaum genutzte Abstellräume vorgesehen sind, zu unterscheiden. Inwiefern Untergeschosse dann durch offene oder geschlossene Treppenhäuser erschlossen sind und möglicherweise ein Luftverbund zu den Aufenthalts- und Arbeitsräumen in den darüber liegenden Geschossen besteht, kann demnach einen wesentlichen Unterschied für die Radonbelastung der Menschen darstellen. Mehrfamilienwohnhäuser und Gewerbegebäude mit abgeschlossenen Treppenhäusern können hier gegenüber offenen Einfamilienhäusern im Vorteil sein.

Es folgt eine nicht abschließend vollständige, exemplarische Auflistung möglicher Fehlinterpretationen im Zusammenhang mit der

Beurteilung von Radon und dem baulichen Radonschutz.

Fehlinterpretation #1: Radonaktivitätskonzentration

Häufig besteht Unkenntnis darüber, dass die Radonkonzentration (eigentlich: Radonaktivitätskonzentration) im Tagesverlauf und auch im Jahresverlauf nicht konstant ist, sondern deutlichen Schwankungen unterliegt. Somit spielt es also bei Radonmessungen eine wesentliche Rolle, wann im Jahr und vor allem auch wie lange gemessen wird. Dies hatte auch die Gesetzgebung im Blick, in dem zur Ermittlung der Radonaktivitätskonzentration in Innenräumen - in Aufenthaltsräumen und an Arbeitsplätzen - der Jahresmittelwert zu erfassen ist. Kurzzeitige Messungen sind zur Ermittlung eines möglichen Radonproblems in Innenräumen nicht geeignet.

Im StrlSchG sind mit den §§ 124 und 126 jeweils die über das Jahr gemittelte Radon-222-Aktivitätskonzentrationen zu bewerten, was konsequenterweise für die Beurteilung einer möglichen Radonproblematik eine einjährige Messung erfordert. Abweichend-kürzere Messungen erfordern eine genaue fachliche Beurteilung des Messzeitraumes maßgeblich unter Bezugnahme auf die Jahreszeitliche Variabilität der Radonkonzentration und der Ungenauigkeit infolge der verkürzten Messdauer.

Bild 1 soll dies verdeutlichen, und zeigt sowohl die mögliche Schwankungsbreite innerhalb eines Tageszyklus, als auch im Jahresverlauf:

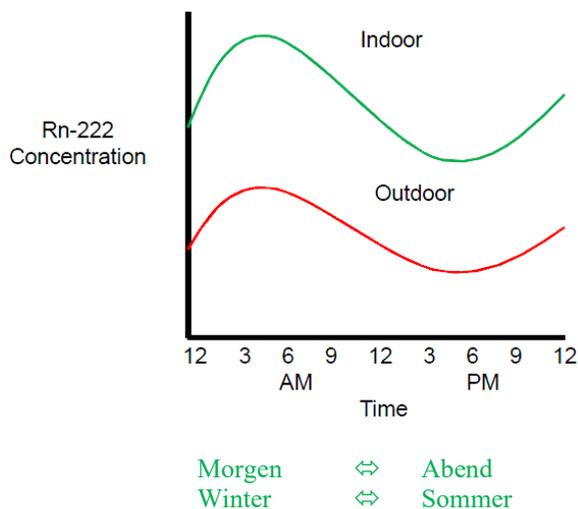


Abbildung 1: Quelle nach Prof. Mehner, Hochschule Zittau/Görlitz, mit Ergänzungen des Verfassers

Fehlinterpretation #2: Feuchteschutz

Der Eintritt von Radongas erfolgt potentiell über alle erdberührten Bauteile infolge der Transportmechanismen Konvektion und Diffusion. Zu beachten sind somit hinsichtlich konvektivem

Radoneintrag mögliche Luftdruckunterschiede zwischen der tendenziell im Überdruck befindlichen Bodenluft und der tendenziell aufgrund von Kaminsog-effekten im Unterdruck befindlichen Luft im Gebäude. Konvektive Barriere stellt somit eine konvektions-/luftdicht hergestellte Gebäudehülle gegenüber den erdberührten Flächen dar.

Hinsichtlich diffusivem Radoneintrag kommt es auf die Konzentrationsunterschiede von Radongas in der tendenziell hochkonzentrierten Bodenluft und der gering-konzentrierten Luft im Gebäude. Diffusive Barriere stellt somit eine ausreichend diffusionsdichte, gering-kapillaraktive Baukonstruktion mittels geeigneter Baustoffe dar.

Im oben zitierten § 123 Abs. 1 hat die Gesetzgebung die Fiktion vorgesehen, dass der „Feuchteschutz nach den anerkannten Regeln der Technik“ bereits ausreichend sei, um einen geeigneten baulichen Radonschutz zu erzielen.

Im Rahmen der fachkundigen Leserschaft braucht an dieser Stelle nicht erwähnt zu werden, dass sich der Feuchteschutz wesentlich komplexer gestaltet, als „entweder man hat ihn, oder nicht“. Vertreter der damaligen Gesetzgebung darauf angesprochen, dass sich in dieser gesetzlich verankerten Fiktion ein echtes Damoklesschwert für die Bauschaffenden befindet, kam die Antwort (wörtliches Zitat) „Ja gibt’s denn dieses drückende Wasser wirklich?!“

Abdichtungsbauweisen nach der Einwirkungsklasse W1-E sind demnach nicht zwingend geeignet, einen funktionalen baulichen Radonschutz herzustellen, da die Bauweisen mit lose sich überlappenden Bahnen und Stößen nicht in allen Fällen auch Konvektionsdichtheit vorsehen, so dass ein Durchtritt von Radongas aus dem Untergrund möglich wird.

Bild 2 soll dies skizzenhaft verdeutlichen:

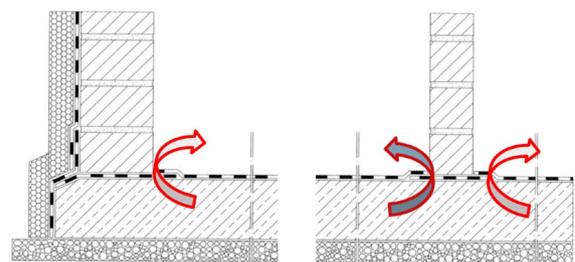


Abbildung 2: keine zwingend konvektionsdichte Verlegung der Abdichtung bei Wasserbeanspruchung W1-E; Quelle: DIN 18533:2017-07, BWA-Richtlinien für Bauwerksabdichtungen Teil 1, mit Markierungen des Verfassers

Fehlinterpretation #3: Bodenluftmessungen

Zunächst: Bodenluftmessungen sind keine gesetzliche Verpflichtung. Der zuge dachte Zweck der Beurteilung der Radonsituation eines

Baugrundstücks ist für das konkrete Bauvorhaben jeweils zu hinterfragen.

Da die Radonkonzentration schwankt und Radon im Boden selbst kleinräumig auf einem einzigen Baugrundstück nicht homogen verteilt ist, ist die Aussagekraft von Bodenluftmessungen stark eingeschränkt. Ähnlich, wie man den heterogenen Aufbau des Baugrundes bereits aus Rammsondierungen und Bohrkernen im Rahmen von Baugrunduntersuchungen kennt. Derartige Bodenluftmessungen können so bestenfalls eine indikative Aussage liefern, in welchen etwaigen Mengen Radon in diesem Baugrund vorhanden sein könnte.

Welche Konsequenz will man anhand derartiger heterogener Ergebnisse dann für den zu planenden und auszuführenden baulichen Radonschutz ziehen? Der zeitliche und monetäre Aufwand für Bodenluftmessungen kann vielfach sinnvoller bereits in Produkte für den baulichen Radonschutz investiert werden. Eine Ausnahme können Bauvorhaben mit sehr großen Grundrissdimensionen und demzufolge einer größeren abzudichtenden Fläche darstellen.

Zur Varianz möglicher Messwerte bei 10 Radonbodenluftmessungen im Vorfeld des Neubaus eines Gewerbeobjekts in Würzburg siehe Bild 3:

Messpunkt	Tiefe [m u. GOK]	Radon [Bq/m ³]
R1 / 09.06.2020	1,00	24.178
R2 / 09.06.2020	1,00	31.207
R3 / 09.06.2020	1,00	14.686
R4 / 09.06.2020	1,00	37.875
R5 / 09.06.2020	1,00	19.263
R6 / 09.06.2020	1,00	18.875
R7 / 09.06.2020	1,00	13.980
R8 / 09.06.2020	1,00	24.813
R9 / 09.06.2020	1,00	21.825
R10 / 09.06.2020	1,00	46.976

Abbildung 3: Bodenluftmessung, Streuung der Messwerte (Quelle: Leicht)

Fehlinterpretation #4: Radonprognose

Mit Bezug auf das technisch bislang nicht durch entsprechende Beispielfälle und Berechnungen validierte Berechnungsformular in DIN/TS 18117, Anhang A und B erübrigt sich der Aufwand für die Prognoseberechnung einer möglichen, sich später im Gebäude einstellenden Radonkonzentration.

Jeder, der jemals eine Baustelle betreten hat, geschweige denn, regelmäßig in die Beurteilung

bautechnischer Defizite eingebunden ist, weiß, dass eine theoretische Bauplanung häufig nichts mit der praktischen Bauausführung zu tun haben muss. Das geht über den Einsatz anderer als der geplanten Baustoffe, in anderer als der geplanten Qualität, in anderer als der geplanten Schichtstärke und mit anderen als der geplanten Fugenbreiten, um nur eine Auswahl möglicher bautechnischer Abweichungen vom geplanten Soll-Zustand exemplarisch aufzulisten.

All diese Parameter sind jedoch in die Berechnung nach o. g. DIN/TS einzugeben. Um bei einer mathematischen Gleichung letztlich als Ergebnis die Einheit Bq/m³ zu erhalten, muss auch vorne in der Berechnung ein solcher Wert eingegeben werden. Dieser Wert soll nun aus dem Ergebnis einer Bodenluftmessung generiert werden, welche, wie oben dargelegt, punktuell bereits auf kleinräumigen Grundstücken stark heterogen sein kann.

Der Verfasser kann hier aufgrund naturwissenschaftlicher Vorbildung keine Empfehlung abgeben, dem Aufwand derartiger Berechnungen zu verfallen. Drei bis vier Spielwürfel können unter Umständen realistischere Ergebnisse hinsichtlich möglicher, sich später im Gebäude einstellender Radonkonzentration liefern.

Beispiele für baulichen Radonschutz

Baulicher Radonschutz ist gerade im Neubau vielfach mit einfachen Mitteln und Maßnahmen zu erreichen. So können Rechteckaussparungen in Bodenplatten, die für die Verlegung von Entwässerungsrohren vorgesehen sind, mit entsprechenden, kostengünstigen Einbauteilen ausgestattet werden, die von den Herstellern auf Radondichtheit geprüft wurden. Bild 4 und 5 zeigen beispielhaft die Verlegung von sog. Hausanschlussstrichern, die mit Kosten von rund 40,00 € netto ein preiswertes Bauteil für den Radonschutz darstellen:

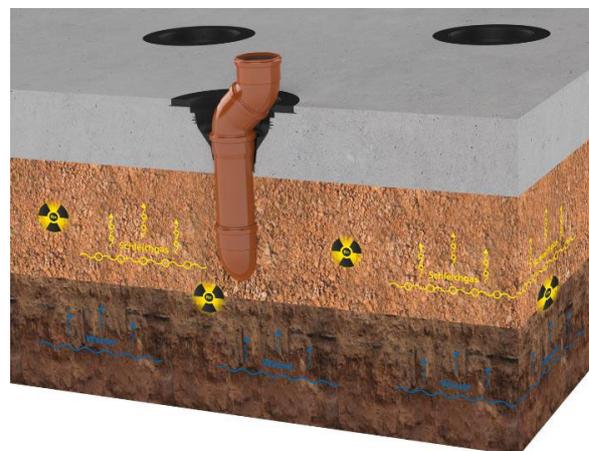


Abbildung 4 Schemaskizze Hausanschlussstrichler, Quelle: Hauff GmbH & Co. KG



16.07.2019
 LEICHT SACHVERSTÄNDIGE
 Abbildung 5: Anschluss einer Abdichtungsbahn auf der Bodenplatte an den umlaufenden Flansch eines Hausanschlussstrichters

Auch sog. Mauerkragen stellen mit aktuell rund 15,00 € Nettokosten pro Stück ein preiswertes Beispiel für den baulichen Radonschutz von Durchdringungen im erdberührten Bereich dar, siehe Bilder 6 und 7:

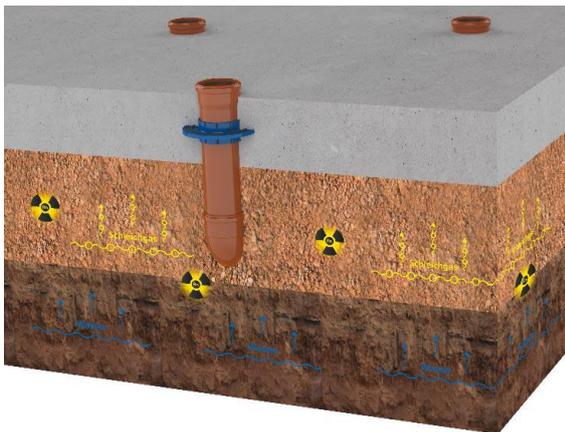


Abbildung 6: Schemaskizze Mauerkragen, Quelle: Hauff GmbH & Co. KG

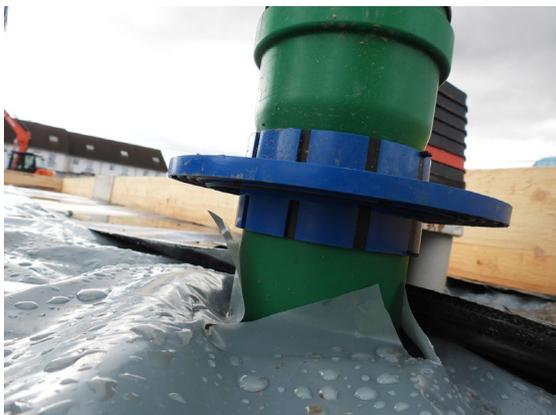


Abbildung 7: Einbaubeispiel Mauerkragen

Um Durchdringungen durch Wände radonsicher abzudichten, eignen sich auf Radondichtheit geprüfte Ringraumdichtungen, siehe Bilder 8 und 9:

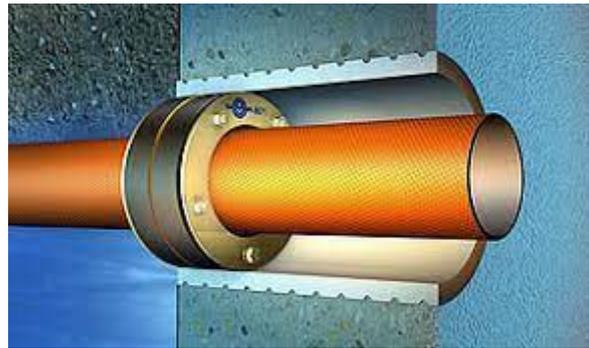


Abbildung 8: Schemaskizze Mauerkragen, Quelle: Doyma GmbH & Co. KG



Abbildung 9: Einbaubeispiel Ringraumdichtung

Auch sog. auf Radondichtheit geprüfte Dichtmanschetten stellen mit rund 45,00 € Anschaffungskosten netto eine preiswerte Möglichkeit des baulichen Radonschutzes dar, siehe Bild 10:



Abbildung 10: Einbaubeispiele Dichtmanschetten

Strahlenschutzgesetz

Aktuell gestaltet sich das Gesetz auch nach über 4 Jahren Gültigkeit (31.12.2018) als zahnloser Tiger, der von den Behörden mit keiner Exekutive verfolgt wird. Dies kann sich jederzeit ändern, wie man am Erlass und der strengen Exekutive in den letzten Jahren bei Gesetzen aus dem Gesundheitswesen nachvollziehen konnte.

Deutschland bekleckert sich bei der Umsetzung des Radonschutzes nicht mit Ruhm und hat im Europavergleich anteilig zur Fläche die wenigsten

Radonvorsorgegebiete ausgewiesen – mit nur rund 2,4 % Flächenanteil am Bundesgebiet. Selbst das nicht so dicht besiedelte Alpenland Österreich hat immerhin 4 % seiner Fläche als Radonvorsorgegebiete ausgewiesen, Belgien als weiterer Nachbar hat rund 20 % der Landesfläche ausgewiesen.

Zusammenfassung

Der gesunde Menschenverstand ist auch bei der Beurteilung der Radonproblematik im Bauwesen niemals außer Acht zu lassen, so dass das interdisziplinäre Thema „Radon“ situationsgerecht bewertet und individuell gelöst werden kann.

Literatur

DIN/TS 18117-1:2021-09 Bauliche und
lüftungstechnische Maßnahmen zum

Radonschutz – Teil 1: Begriffe, Grundlagen und Beschreibung von Maßnahmen

Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung „Strahlenschutzgesetz“, kurz StrlSchG

K. Leicht und G. Klingelhöfer: Radon und Radonschutz im Bauwesen, Reguvis Fachmedien GmbH / IRB Fraunhofer Verlag, Köln / Stuttgart 2023

Bilder: Quellenangabe am Bild, wo nicht anders angegeben: Bilder von Karin Leicht

Kontaktdaten

LEICHT Sachverständige, Dipl.-Ing. (BA) Karin Leicht, www.leicht-sv.de



DISKUSSIONSBEITRAG: RADON ALS PANDEMIEVERSTÄRKER?

Iris M. Reuther¹

¹ Jade Hochschule Oldenburg, Oldenburg, Deutschland, E-Mail: iris.reuther@jade-hs.de

Kurzfassung

Eine höhere Exposition durch Radon steigert das Risiko für Lungenkrebs. In der Lunge angereicherte Zerfallsprodukte sind kanzerogen, die Kausalität gilt als gesichert. Daraus resultieren die geltenden Gesetze und Vorschriften, die zu Messungen an vielen in Radonvorsorgegebieten liegenden Arbeitsplätzen und bei Ergebnissen oberhalb des Referenzwertes zu Maßnahmen gegen die erhöhte Exposition verpflichten.

Dieser Beitrag nun stellt zur Diskussion, ob wirksame Radon Schutzmaßnahmen nicht auch der Prävention anderer Erkrankungen dienlich sein könnten. Konkret wird gefragt, ob es zwischen einer hohen Radonexposition und der Fallsterblichkeit im Zusammenhang mit Covid-19 eine Korrelation geben könnte. Vorschädigungen der Lunge erhöhen bekanntlich das Risiko eines schweren Verlaufs dieser Krankheit. Möglicherweise erhöht auch die Radonbelastung dieses Risiko.

Um dieser Frage nachzugehen, wird die Covid-19-Fallsterblichkeit von vier Bundesländern betrachtet. Der Untersuchung zugrunde liegen die Veröffentlichungen des Robert Koch-Instituts sowie die veröffentlichten Karten des Bundesamts für Strahlenschutz. Im Land Thüringen gilt der Boden als relativ stark durch Radon belastet, in Baden-Württemberg liegt dieses geogene Risiko vor allem im Schwarzwald vor. Bayern ist ebenfalls teilweise belastet; in Niedersachsen dagegen tritt Radon nur punktuell in maßgeblichen Dosen auf.

Eine Korrelation zwischen Radonexposition und dem Verlauf einer weiteren Erkrankung könnte dazu führen, dass den Maßnahmen des Radon Schutzes künftig mehr Bedeutung zukommt.

Abstract

Article regarding the discussion: Radon as a pandemic amplifier?

Greater exposure to radon increases the risk of lung cancer. Decay products that accumulate in the lungs are carcinogenic, with causality considered certain. The applicable laws and regulations are the result of this, and require measurements to be taken at many

workplaces located in radon protection areas and, if the results are above the reference value, measures to be taken against the increased exposure.

This article discusses whether effective radon protection measures could also be useful in preventing other diseases. Specifically, the question is whether there could be a correlation between high radon exposure and case mortality in connection with COVID-19. Pre-existing damage to the lungs is known to increase the risk of a severe course of this disease. Radon exposure may also increase this risk.

The COVID-19 case mortality rate of four federal states is considered in order to investigate this question. The study is based on the publications of the Robert Koch Institute and the maps published by the Federal Office for Radiation Protection. In the state of Thuringia, the soil is considered to be relatively heavily contaminated with radon, while in Baden-Württemberg this geogenic risk is particularly prevalent in the Black Forest. Bavaria is also partially contaminated, while in Lower Saxony, on the other hand, radon only occurs in significant doses in certain areas.

A correlation between radon exposure and the progression of another disease could lead to radon protection measures becoming more important in the future.

Einleitung

Ausgangslage Radon

Bei Radon handelt es sich um ein geogenes, farb-, geruchs- und geschmackloses, radioaktives Edelgas. Auch wenn es in niedriger Dosierung eine Heilwirkung haben kann, gilt es als schädlich. Konkret ist es seit Jahren nach dem Rauchen als zweithäufigste Ursache für Lungenkrebs bekannt (z. B. in Breckow et al. 2023). In jüngster Zeit werden weitere Erkrankungen mit erhöhter Radon-Exposition in Verbindung gebracht. Vor allem seien hier allgemein Atemwegs- und Lungenerkrankungen genannt, so bei (Nyhan et al. 2019), (Mukharesh et al. 2022) oder (Wang et al. 2024). Die Verfasserin dieses Beitrags warf bereits im Jahr 2022 die Frage auf, ob nicht auch ein Zusammenhang zwischen Radonexposition und der Covid-19-Fallsterblichkeit

besteht (Reuther 2022). Die bis Mitte 2022 vorliegenden Daten waren jedoch noch weit unvollständiger als sie es nun, Ende 2023 sind. Zudem hat das Bundesamt für Strahlenschutz jüngst eine aktualisierte Karte mit der Radonbelastung in Wohnungen veröffentlicht (Bundesamt für Strahlenschutz 2023, Abbildung 2). Seit 2006 stand eine weniger kleinteilige Karte zur Radonbelastung in Innenräumen zur Verfügung (Bundesamt für Strahlenschutz 2006, Abbildung 1).

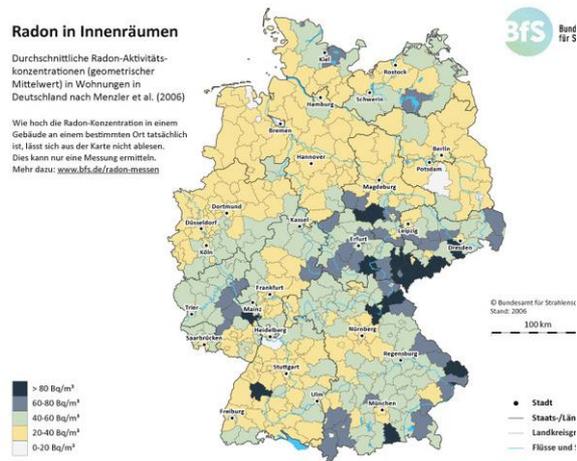


Abbildung 1: Radon in Innenräumen (Bundesamt für Strahlenschutz 2006)

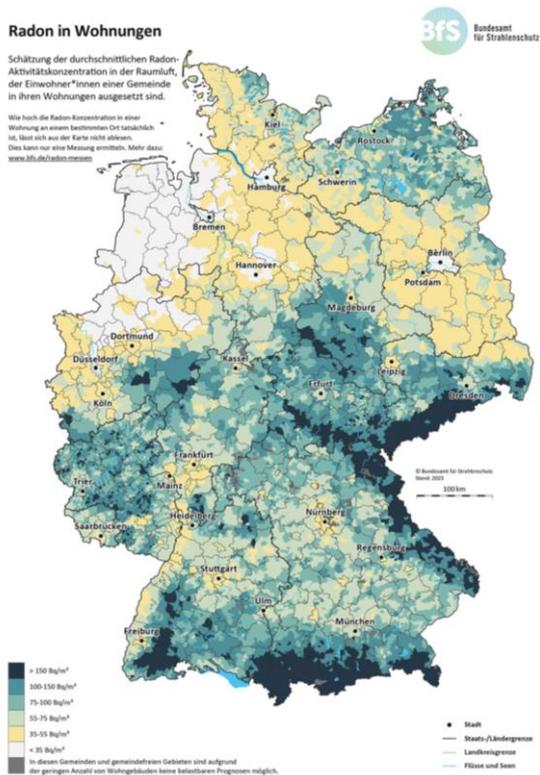


Abbildung 2: Radon in Wohnungen (Bundesamt für Strahlenschutz 2023)

Diese Aktualisierung ist unstrittig eine Verbesserung, wenngleich die veränderte Skala (bisher waren es fünf Skalen mit den Grenzen bei 20, 40, 60, 80 und 100 Bq/m³, nun sind es sechs mit je weit höheren Werten, vgl. Abbildung 1 und 2) bemerkenswert ist. Überhaupt scheint man inzwischen eine stärkere Radonaktivitätskonzentration in Wohnungen festgestellt zu haben. Zugleich ist es interessant, dass sich das BfS in seiner Veröffentlichung unverändert auf Wohnungen bezieht, obwohl die Messpflicht innerhalb von Radonvorsorgegebieten ausschließlich für Arbeitsplätze gilt (Bundesministerium der Justiz 2017). Die Verfasserin interpretiert dies als Signal: da in der Gesamtbevölkerung die Aufenthaltsdauer am Arbeitsplatz weit geringer ist als die im eigenen Heim, ist die Dauer der Exposition und damit das gesundheitliche Risiko innerhalb von Wohneinheiten länger bzw. höher als am Arbeitsplatz. Damit wird dem Gesundheitsschutz generell sowie insbesondere auch dem der Nicht-Arbeitnehmer eine hohe Priorität beigemessen.

Grundsätzlich bestätigt sich durch die Aktualisierung der Karte jedoch die bekannte, innerhalb Deutschlands verschieden hohe Radonexposition: besonders hoch belastet sind Wohnungen in den Alpen, im Schwarzwald, im Thüringer Wald sowie der Grenzregion zu Tschechien. Von einzelnen Gebieten (v. a. Rothaargebirge, Harz) abgesehen, sind also primär die Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern, Thüringen und Sachsen betroffen. Am wenigsten von dieser Problematik tangiert ist Niedersachsen.

Fragestellung und Vorgehensweise

Der eingangs erwähnten Frage eines möglichen Zusammenhangs zwischen der Radonbelastung und einer erhöhten Covid-19-Fallsterblichkeit soll exemplarisch nachgegangen werden anhand vierer Bundesländer. Ausgewählt werden dafür Thüringen als relativ stark von Radon belastetes Bundesland. Für eine in Teilen vorliegende Belastung stehen die Bundesländer Baden-Württemberg und Bayern, wohingegen Niedersachsen als der am wenigsten belastete Flächenstaat gelten dürfte. Die Beschränkung auf Flächenstaaten folgt dem Ziel einer möglichst vergleichbaren Wohnsituation. So ist die Bevölkerungsdichte in diesen vier Ländern mit 132, 167, 185 und 310 halbwegs vergleichbar und weitaus geringer als die in den Stadtstaaten (Bundeszentrale für politische Bildung 2020).

Nicht nur die Radonbelastung ist regional ungleich verteilt, auch die Zahl der Todesfälle infolge einer Infektion mit SARS-CoV-2 ist innerhalb der Bundesrepublik sehr verschieden. Exemplarisch wird hier auf Abbildung 3 verwiesen. Diese Graphik

bezieht sich auf die Todesfälle pro 100.000 Einwohner, lässt folglich keinen Rückschluss zu auf die Fallsterblichkeit.

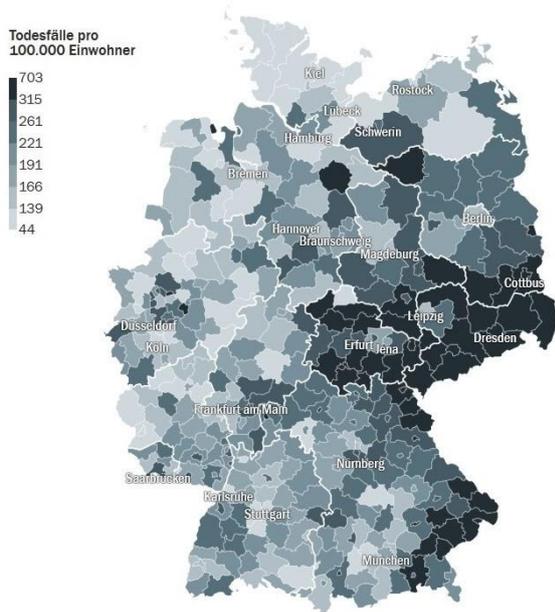


Abbildung 3: Covid-19-Todesfälle pro 100.000 Einwohner auf Kreisebene, Stand 12/2023 (Tagesspiegel 2023)

In diesem Beitrag wird nun für die vier exemplarisch gewählten Bundesländer die Fallsterblichkeit gem. Angaben des Robert Koch-Instituts ermittelt (Tagesberichte gem. Robert Koch-Institut 2023). Dies erfolgt sowohl insgesamt für den Zeitraum bis Ende März 2023 (Einstellung der Berichte im April 2023) als auch für mehrere Zeitabschnitte. Durch die zumeist halbjährliche Betrachtung werden der insbesondere anfangs ungleichmäßigen Verbreitung von SARS-CoV-2 innerhalb Deutschlands, der verschiedenen Test-Kapazitäten und -Pflichten, der Mutationen des Virus und nicht zuletzt des Einflusses der Impfungen zu einem gewissem Grad Rechnung getragen.

Ermittlung und Darstellung der Covid-19-Fallsterblichkeiten

Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, wurden die vom Robert Koch-Institut veröffentlichten Tagesberichte zu bestimmten Stichtagen als Quelle dieser Arbeit herangezogen. Dieses Institut hatte täglich in der Übersicht der Bundesländer je die Zahlen kumuliert und bezogen auf 100.000 Einwohner, jedoch nicht die Fallsterblichkeit veröffentlicht. Der aus den veröffentlichten Daten ermittelte Zuwachs an per PCR-Nachweis bestätigten Fälle einer Infektion mit SARS-CoV-2 sowie der der Anzahl von beim RKI erfassten an und mit Covid-19 Verstorbenen ist in Tabelle 2 auf der folgenden Seite aufgelistet. Aus

diesen beiden Zahlen pro Bundesland und Zeitraum wurde die Fallsterblichkeit in Prozent ermittelt.

Die Betrachtung für den gesamten Zeitraum findet sich in Tabelle 2 rechts unten. Zum Vergleich sei hier auch die Fallsterblichkeit für ganz Deutschland in Tabelle 1 ermittelt: 0,45 %.

Tabelle 1: SARS-CoV-2-Fallzahl, Todesfälle im Zusammenhang mit Covid-19 und die daraus ermittelte Fallsterblichkeit in Prozent für Deutschland bis zum 31.03.2023 (nach Robert Koch-Institut 2023).

SARS-COV-2-FÄLLE BIS 31.03.23	TODESFÄLLE BIS 31.03.23	FALLSTERBLICHKEIT BIS 31.03.23
38.351.642	170.839	0,45%

Graphisch dargestellt sind die Werte aus Tabelle 1 und 2 für den Gesamtzeitraum in Abbildung 3.

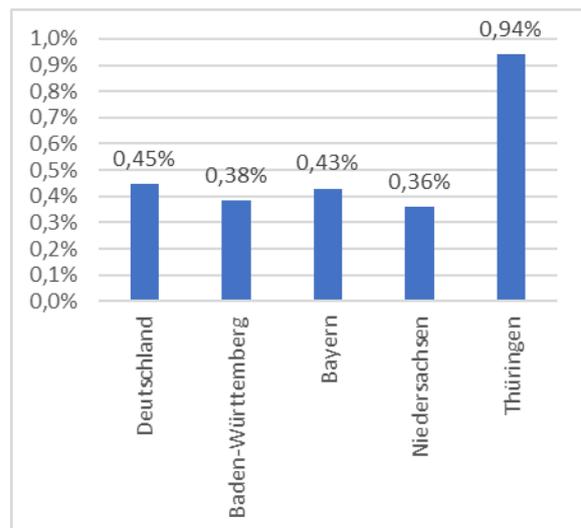


Abbildung 3: Covid-19-Fallsterblichkeit bis 31.03.23 für Deutschland, Baden-Württemberg, Bayern, Niedersachsen und Thüringen gem. Tabelle 1 und 2 (eigene Darstellung).

Abbildung 4 veranschaulicht die Fallsterblichkeiten aus Tabelle 2 (ohne die bereits in Abbildung 3 verwendeten Werte für den gesamten Zeitraum).

Tabelle 2: Fallzahlen, Todesfälle im Zusammenhang mit Covid-19 und die daraus ermittelte Fallsterblichkeit in Prozent für die Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern, Niedersachsen und Thüringen für verschiedene Zeiträume (nach Robert Koch Institut 2023).

	FÄLLE BIS 31.05.20	TODES- FÄLLE BIS 31.05.20	FALL- STERB- LICHKEIT BIS 31.05.20	FÄLLE 01.06.20 – 30.11.20	TODES- FÄLLE 01.06.20 – 30.11.20	FALL- STERB- LICHKEIT 01.06.20 – 30.11.20
BADEN- WÜRTTEMBERG	34.784	1.752	5,04%	115.935	1.024	0,88%
BAYERN	47.004	2.451	5,21%	162.678	1.411	0,87%
NIEDERSACHSEN	12.043	593	4,92%	59.543	566	0,95%
THÜRINGEN	3.015	162	5,37%	14.373	198	1,38%

	FÄLLE 01.12.20 – 31.05.21	TODES- FÄLLE 01.12.20 – 31.05.21	FALL- STERB- LICHKEIT 01.12.20 – 31.05.21	FÄLLE 01.06.21 – 30.11.21	TODES- FÄLLE 01.06.21 – 30.11.21	FALL- STERB- LICHKEIT 01.06.21 – 30.11.21
BADEN- WÜRTTEMBERG	374.832	7.193	1,92%	309.791	1.838	0,59%
BAYERN	474.318	11.091	2,34%	454.713	2.699	0,59%
NIEDERSACHSEN	198.067	4.463	2,25%	108.581	751	0,69%
THÜRINGEN	113.064	3.857	3,41%	84.596	796	0,94%

	FÄLLE 01.12.21 – 31.05.22	TODES- FÄLLE 01.12.21 – 31.05.22	FALL- STERB- LICHKEIT 01.12.21 – 31.05.22	FÄLLE 01.06.22 – 30.11.22	TODES- FÄLLE 01.06.22 – 30.11.22	FALL- STERB- LICHKEIT 01.06.22 – 30.11.22
BADEN- WÜRTTEMBERG	2.839.844	4.312	0,15%	1.222.935	2.099	0,17%
BAYERN	3.762.666	6.427	0,17%	1.640.302	3.046	0,19%
NIEDERSACHSEN	1.992.780	2.943	0,15%	1.226.965	2.480	0,20%
THÜRINGEN	495.239	2.277	0,46%	152.461	628	0,41%

	FÄLLE 01.12.22 – 31.03.23	TODES- FÄLLE 01.12.22 – 31.03.23	FALL- STERB- LICHKEIT 01.12.22 – 31.03.23	GES. FÄLLE BIS 31.03.23	GES. TODES- FÄLLE BIS 31.03.23	FALL- STERB- LICHKEIT BIS 31.03.23
BADEN- WÜRTTEMBERG	174.501	1.261	0,72%	5.072.622	19.479	0,38%
BAYERN	213.877	1.877	0,88%	6.755.558	29.002	0,43%
NIEDERSACHSEN	273.766	2.130	0,78%	3.871.745	13.926	0,36%
THÜRINGEN	23.831	434	1,82%	886.579	8.352	0,94%

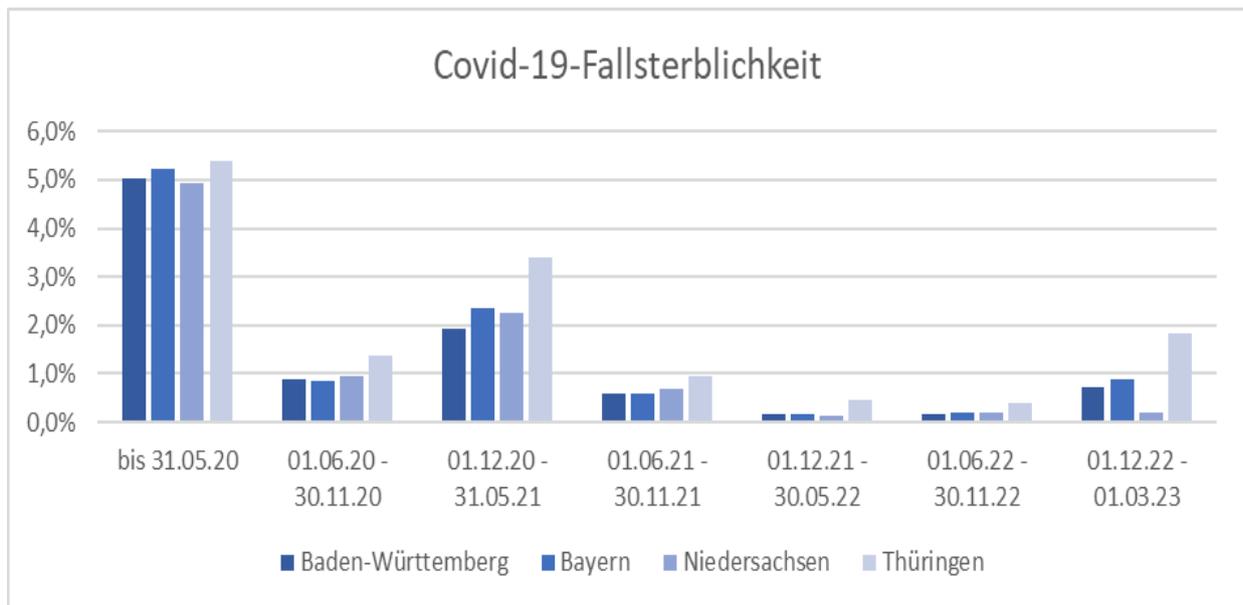


Abbildung 4: Covid-19-Fallsterblichkeit für ausgewählte Zeiträume für Baden-Württemberg, Bayern, Niedersachsen und Thüringen gem. Tabelle 2 (eigene Darstellung).

Diskussion der Daten

Die im vorherigen Kapitel erstellten Daten in Form der Tabellen 1 und 2 sowie der Abbildungen 3 und 4 zeigen teils geringe, teils erhebliche Unterschiede hinsichtlich der Covid-19-Fallsterblichkeit in den exemplarisch gewählten Bundesländern. In jedem der betrachteten Zeiträume sind in Thüringen in Relation zu den festgestellten Fällen mehr Tote im Zusammenhang mit Covid-19 zu beklagen als im Bundesdurchschnitt und in den drei anderen Bundesländern. So ist die Fallsterblichkeit insgesamt im am stärksten von Radon belasteten Thüringen sogar mehr als doppelt so hoch wie im Bundesdurchschnitt.

Im kaum durch Radon belasteten Niedersachsen dagegen darf man sowohl insgesamt als auch während der meisten der hier dargestellten Zeiträume für eine unterdurchschnittliche Covid-19-Fallsterblichkeit dankbar sein. Baden-Württemberg und Bayern weisen i. d. R. ähnliche Werte für die Fallsterblichkeit auf, die zumeist zwischen denen von Niedersachsen und Thüringen liegen.

Bei der Analyse der Fallsterblichkeit im zeitlichen Verlauf fällt auf, dass nach Beginn der Impfungen im Dezember 2020 ein deutlicher Anstieg festgestellt werden muss, obwohl das Gegenteil zu erwarten wäre. Der zweite Anstieg im letzten der analysierten Zeiträume könnte auf ein geändertes Test-Verhalten zurück zu führen sein. Schließlich gab es nach dem Ende der meisten der für die Allgemeinheit gültigen Corona-Maßnahmen nur noch für wenige Bereiche entsprechende Vorschriften. Hier sind Alten- und Pflegeheime sowie Kliniken zu nennen, in denen

durch obligatorische Test noch gehäuft SARS-CoV-2 nachgewiesen wurde, aber aufgrund der betagten Bewohner und vulnerablen Patienten auch die Wahrscheinlichkeit von Todesfällen höher war als in der Allgemeinbevölkerung.

Unabhängig davon zeigt sich jedoch insbesondere im Vergleich zwischen Thüringen und Niedersachsen, dass ein Zusammenhang zwischen der Covid-19-Fallsterblichkeit und der Radonexposition für möglich gehalten werden muss. Für den Nachweis einer Kausalität bedarf es zum einen weiterer Daten: bisher waren zwar die taggenauen SARS-CoV-2-Fallzahlen auf Kreisebene auf den Seiten des Robert Koch-Instituts in Tabellenform frei zugänglich, nicht aber die entsprechenden Zahlen der an und mit Covid-19 Verstorbenen. Zum anderen bedarf es zweifellos noch umfangreicher, weiterer Forschung, auch in anderen Ländern. Der hier durchgeführte Vergleich bekräftigt jedoch die Notwendigkeit dieser Forschung.

Bewertung

Das Ergebnis des hier vorgenommenen Vergleichs bedarf einer Bewertung, damit es eingeordnet werden kann. Sowohl die Erfassung der veröffentlichten Daten des Robert Koch-Instituts, somit der Basis dieser Arbeit, als auch der Vergleich an sich unterliegen einigen Unschärfen.

Da ist zum einen die in den Bundesländern unterschiedlich gehandhabte Testung und folglich Erfassung, da die entsprechenden Verordnungen je Sache der Bundesländer waren. Dazu kommen vermutlich aus der Überlastung der Behörden

resultierende Versehen bei der Erfassung. Exemplarisch dafür genannt seien die häufigen Korrekturen beispielsweise der aus Bayern gemeldeten Fallzahlen (Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit). Darüber hinaus wird in Deutschland generell nicht unterschieden, ob Menschen sterben „an Covid-19“ oder aber „mit Covid-19“. Letzteres bedeutet: primär aufgrund einer anderen Erkrankung, jedoch mit einem in den Wochen vor dem Ableben erfolgten Nachweis von SARS-CoV-2.

Eine zweite Einschränkung ergibt sich aus der Verteilung der Bevölkerung innerhalb der Bundesländer. So sind die Regionen Baden-Württembergs und Bayerns, in denen eine hohe Radon-Exposition vorliegt, ausgesprochen dünn besiedelt (Deutschlandatlas - Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen 2022). Anders in Thüringen, wo sich mit beispielsweise Gera, Suhl und Ilmenau auch größere Orte in Regionen befinden, in denen eine hohe Radonexposition zu erwarten ist.

Da die allermeisten Todesfälle im Zusammenhang mit Covid-19 aufgetreten sind bei Menschen jenseits des 80. Lebensjahrs, ist drittens auch der Anteil der Betagten innerhalb eines Bundeslandes ein nicht unbedeutender Faktor. Der Anteil der über 65-jährigen an der Bevölkerung ist in Thüringen nicht nur geringfügig höher als in Baden-Württemberg, Bayern oder Niedersachsen (Bund-Länder-Demographie-Portal 2022).

Die meisten der vor genannten Einschränkungen sind in einer anderen Analyse der Verfasserin eliminiert (Reuther 2023, in Druck). Diese Untersuchung auf Landkreisebene bestätigt die Vermutung eines Zusammenhangs zwischen Radonexposition und Covid-19-Fallsterblichkeit. Ihr liegt jedoch nur ein sehr kleiner Anteil der Bevölkerung (etwa 365.000 von über 84 Mio Einwohnern) zugrunde. Damit ist die Frage erlaubt, inwiefern es sich um eine repräsentative Studie handelt.

Dieses Kapitel der Bewertung kommt folglich zum gleichen Schluss wie das vorherige. Der Titel dieses Tagungsbeitrags ist bewusst als Frage formuliert und tatsächlich bleibt der Einfluss von Radon auf den Verlauf einer Covid-19-Erkrankung eine noch nicht final beantwortbare Frage. Es bedarf weiterer Analysen, um einen Zusammenhang zwischen Radon-Exposition und einem tödlichen Verlauf von Covid-19 entweder zu bestätigen oder aber die bisher gewonnenen Ergebnisse als zufällig oder anderweitig verursacht betrachten zu können.

Zusammenfassung

Anhand der Tagesberichte des Robert Koch-Instituts bis Ende März 2023 wurde die Covid-19-Fallsterblichkeit von vier beispielhaft gewählten Bundesländern ermittelt: Baden-Württemberg, Bayern, Niedersachsen und Thüringen. Dabei zeigt sich sowohl insgesamt als auch für mehrere Zeiträume von zumeist einem halben Jahr, dass die Fallsterblichkeit in Thüringen weit über dem Bundesdurchschnitt und auch über der in den drei anderen Bundesländern liegt. Niedersachsen hat dabei regelmäßig die niedrigsten Werte.

Thüringen ist von den hier verglichenen Bundesländern das am stärksten mit dem radioaktiven Edelgas Radon und Niedersachsen das diesbezüglich am wenigsten belastete. Deshalb besteht möglicherweise ein Zusammenhang zwischen der Radon-Exposition und einem tödlichen Verlauf einer Infektion mit SARS-CoV-2. Als Nachweis für eine Korrelation oder gar Kausalität ist der hier angestellte Vergleich noch nicht ausreichend.

Gleichwohl zeigen die Ergebnisse dieser Publikation, dass es sich lohnt, diese Untersuchungen fortzusetzen. Zwar wird möglicherweise – wie bei Lungenkrebs – der Nachweis einer Kausalität nicht gelingen, aber eines Tages auch schwere und tödliche Verläufe von Covid-19 als allgemein bekannte Folgen einer Radon-Exposition genannt werden. Dann wäre in Gebieten mit hoher Radonbelastung auch Covid-19 mit einer höheren Mortalitätsrate verbunden und die Erkrankung zählte zu den „stochastischen Strahlenwirkungen“ (Breckow et al. 2023, S. 33).

Diese Erkenntnis könnte den in Deutschland bisher teils etwas stiefmütterlich behandelten baulichen Maßnahmen gegen hohe Radonwerte in Innenräumen als präventive Maßnahme des Gesundheitsschutzes zu mehr Bedeutung verhelfen.

Die deutsche Bundesregierung und alle Länder-Regierungen haben sich während der Corona-Pandemie ausgesprochen besorgt um das gesundheitliche Wohl der Bevölkerung gezeigt. Dies fand Niederschlag sowohl in einer Vielzahl von Verordnungen als auch erheblicher materieller und ideeller Unterstützung der entsprechenden Akteure. Deshalb hofft die Verfasserin, dass die hier dargestellte Relevanz erkannt wird und folglich die Forschungen über Radon und seine gesundheitlichen Folgen sowie Maßnahmen zum Schutz vor einer Radon-Exposition allmählich ebenfalls sowohl mehr Aufmerksamkeit und auch Unterstützung erhalten werden.

Literatur

- Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit. Übersicht der Fallzahlen von Coronavirusinfektionen in Bayern. https://www.lgl.bayern.de/gesundheit/infektionsschutz/infektionkrankheiten_a_z/coronavirus/karte_coronavirus/index.htm (Zugriff mehrfach in den Jahren 2020 - 2023).
- Breckow, J., Hartmann, T., Kemski, J., Kleve G., Klingelhöfer G. und Leicht, K. 2023. Radon und Radonschutz im Bauwesen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Bundesamt für Strahlenschutz. Neue Karte zeigt Radon-Situation in Wohnungen. 12. 12. 2023. <https://www.bfs.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/BfS/DE/2023/010.html> (Zugriff am 27. 12. 2023).
- Bundesamt für Strahlenschutz. Radon in Innenräumen in Deutschland. 2006. <https://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/radon/karten/innenraeume.html> (Zugriff am 4. 11. 2023).
- Bundesministerium der Justiz. Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung. 05 / 2017. <https://www.gesetze-im-internet.de/strlshg/> (Zugriff am 03. 11. 2023).
- Bundeszentrale für politische Bildung. Bevölkerung nach Bundesländern. 10. 08. 2020. <https://www.bpb.de/kurz-knapp/zahlen-und-fakten/soziale-situation-in-deutschland/61535/bevoelkerung-nach-bundeslaendern/> (Zugriff am 17. 12. 2023).
- Bund-Länder-Demographie-Portal. Regionale Alterung. 2022. <https://www.demografieportal.de/DE/Fakten/aeltere-bevoelkerung-regional.html?nn=676784> (Zugriff am 07. 07. 2023).
- Deutschlandatlas - Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. Bevölkerungsdichte. 2022. <https://www.deutschlandatlas.bund.de/DE/Karten/Wo-wir-leben/006-Bevoelkerungsdichte.html> (Zugriff am 27. 12. 2023).
- Mukharesh, L. et al. 2022. Environmental radon and childhood asthma. *Pediatric pulmonology*, 3165–3168.
- Nyhan, M. M. et al. 2019. Associations between ambient particle radioactivity and lung function. *Environment international*.
- Reuther, I. M. 2023. A closer look: additional study of relationship between indoor radon exposure and the Covid-19 case fatality rate. Abstract, Paper noch nicht veröffentlicht, https://wmcaus.org/files/WMCAUS2023_Book.pdf (Zugriff am 03. 12. 2023).
- Reuther, I. M. 2022. Study of relationship between indoor radon exposure and the Covid-19 case fatality rate. Conference Proceedings: World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium - WMCAUS 2022.
- Robert Koch-Institut. Aktuelle Situationsberichte, Wochenberichte und COVID-19-Trends im Überblick. 2023. https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Situationsberichte/Gesamt.html (letzter Zugriff am 04. 12. 2023).
- Tagesspiegel. Alle Corona-Fälle in den Landkreisen, Bundesländern und weltweit. 27. 12. 2023. <https://interaktiv.tagesspiegel.de/lab/karte-sars-cov-2-in-deutschland-landkreise/> (Zugriff am 27. 12. 2023).
- Wang, Veronica A. et al. 2024. Particle radioactivity from radon decay products and reduced pulmonary function among chronic obstructive pulmonary disease patients. *Environmental research*.

SESSION A · 07.03.2024

Thema: Feuchteschutz

Kooperationspartner

R
P **TU** Rheinland-Pfälzische
Technische Universität
Kaiserslautern
Landau

Bauhaus-
Universität
Weimar

WBA

WBA | Bauhaus Weiterbildungs-
akademie Weimar e.V.
Institut an der
Bauhaus-Universität Weimar



INMOB - GRUNDLAGENUNTERSUCHUNGEN ZUM HYGROTHERMISCHEN VERHALTEN HYGRISCH AKTIVER UND NICHT AKTIVER SCHICHTVERBÜNDE

Helena Burchard¹, Christoph Nytsch-Geusen¹, Werner Kaul-Gothe¹

¹Universität der Künste Berlin, Deutschland, E-Mail: h.burchard@udk-berlin.de

Kurzfassung

Baustoffe wie etwa Kalziumsilikat oder Lehm eignen sich auf Grund ihrer hygrothermischen Eigenschaften wie etwa der kapillaren Leitfähigkeit und der hohen Wasseraufnahmefähigkeit als hygrische Puffer-elemente in kritischen feuchtebeaufschlagten Einbausituationen (Häupl et al., 2003). Hiervon ausgehend wird innerhalb des Forschungsprojekts InMoB in Simulations-Analysen analysiert und experimentell an einem Versuchstand untersucht, inwieweit preiswerte nicht-hygrische diffusionsoffene Dämmmaterialien, wie z.B. Holzfaserdämmplatten, zusammen mit hygrisch aktiven Pufferschichten und auch materialtrennenden Luftschichten bei entsprechender Anordnung sich zu kostengünstigen hygrisch unkritischen Innendämmsystemen kombinieren lassen. Hierzu wird eine Vielzahl von Materialkombinationen zunächst systematisch simulativ getestet, um danach die erfolgversprechendsten Varianten in einem wechselbaren Fassaden-Prüfstand unter realem Wettereinfluss und Raumnutzungen zu erproben.

Abstract

Due to their hygrothermal properties such as capillary conductivity and high water absorption capacity, building materials such as calcium silicate or clay are suitable as hygric buffer elements in critical installation situations exposed to moisture. Based on this, the InMoB research project is using simulation analyses and experiments on a test bed to investigate the extent to which inexpensive non-hygric, diffusion-open insulation materials, such as wood fiber insulation boards, can be combined with hygroscopically active buffer layers and material-separating air layers to create cost-effective, hygroscopically uncritical interior insulation systems when arranged accordingly. For this purpose, a large number of material combinations are first systematically tested in simulations in order to then test the most promising variants in an interchangeable façade test bed under real room usages and weather conditions.

Einführung

Die Auswirkungen der weltweiten klimatischen Veränderungen durch den zivilisationsbedingten Eintrag des Treibhausgases CO₂ in die Atmosphäre werden verstärkt sichtbar. In gemäßigten, kühleren Klimazonen entfällt ein erheblicher Anteil der anfallenden CO₂-Emissionen auf den Gebäudesektor (dena, 2023).

In vielen Fällen ist es aufgrund von Denkmalschutzvorgaben oder aus anderen bautechnischen Gründen nicht möglich energetisch ineffiziente Bestandsgebäude von außen zu dämmen. Die einzige Möglichkeit der energetischen Sanierung besteht demnach nur in der Innendämmung der Bestandsfassaden. Dadurch entsteht allerdings ein höheres Risiko von Feuchteschäden durch eindringende Feuchte. Um dies zu verhindern, gibt es die Möglichkeit entweder die Innendämmung vor raumseitigen Feuchteinträgen zu schützen, indem die Konstruktion dampfdicht oder adaptiv dampfbremsend ausgeführt oder eine Innendämmung aus hygrisch aktivem Material verwendet wird. Das hygrisch aktive Material (z. B. Kalziumsilikat) hat eine hohe Wasseraufnahmefähigkeit und kann die Feuchtigkeit in Trocknungsperioden wieder abgeben, hat i. d. R. höhere Werte in der Wärmeleitfähigkeit und ist zudem deutlich teurer als andere gängige Dämmstoffe zur Innendämmung, wie z.B. Holzfaser-Dämmungen.

Nach bisherigem Kenntnisstand wurden hinsichtlich der Anwendung hygrisch aktiver Materialien im Baubereich in erster Linie homogene Innendämmungen untersucht und die hierfür notwendigen Nachweis- und Prüfverfahren etabliert (Plagge et al., 2006). Systematische Untersuchungen zu den feuchtepuffernden Eigenschaften dieser Materialien (Häupl et al., 2003) prädestinieren sie aber auch als feuchteregulierende Komponenten innerhalb komplexer Bauteilverbünde.

Im Projekt InMoB werden daher Kombinationen aus einer hygrisch aktiven Pufferschicht mit konventionellen, hygrisch passiven Dämmmaterialien

und optionalen materialtrennenden Luftschichten untersucht (vgl. Abbildung 1).

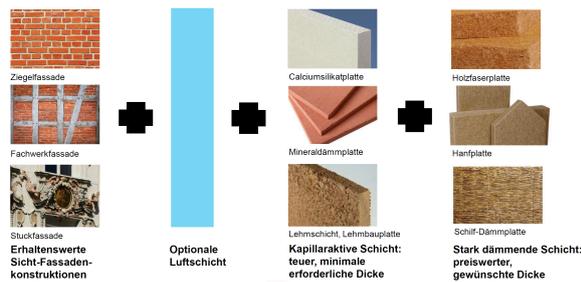


Abbildung 1: Forschungsansatz zu einem mehrschichtigen Innendämmsystem

Das Forschungsziel besteht darin, neue Möglichkeiten für mehrschichtige Innendämmsysteme aufzuzeigen, welche hygrothermisch einwandfrei funktionieren und zudem kostengünstiger und energieeffizienter sind als einschichtige hygrisch aktive Dämmsysteme.

Bauphysikalische Messungen an Testfassaden

Die experimentellen Versuche zu den mehrschichtigen Innendämmsystemen werden an zwei Testfassaden des Rooftop-Gebäudes der UdK Berlin durchgeführt. Dieses Gebäude wurde seinerzeit für den internationalen Wettbewerb Solar Decathlon Europe 2014 in Versailles (Frankreich) von einem Team an Studierenden der UdK Berlin und der TU Berlin geplant und baulich realisiert. Im Jahr 2017 wurde das solare Forschungsgebäude auf dem Hochschulcampus Berlin-Charlottenburg wieder aufgebaut und wird seitdem als Seminarraum und Forschungslabor genutzt (Rooftop, 2023).

Zur Untermauerung der Forschungshypothese für das Forschungsvorhaben InMoB wurden mit Hilfe der beiden Testfassadenelemente in den Jahren 2020/2021 zwei typische Fassadenvarianten des Gebäudebestands mit Ziegelmauerwerk näher untersucht: zum einen ein Fassadenelement mit unverputztem Ziegelmauerwerk und zum anderen ein mit Ziegeln ausgemauertes Fachwerk. Für beide „Bestandskonstruktionen“ wurde eine bauphysikalisch kritische Dicke von nur 11,5 cm (einfache Ziegelbreite) gewählt. Diese zunächst nicht gedämmten Testfassadenelemente wurden mit zwei unterschiedlichen baukonstruktiven Varianten einer Innendämmung ergänzt und seit der Heizperiode 2020/2021 einem hygrothermischen Monitoring unterzogen. Die beiden Testfassaden sind je 1,10 m x 1,20 m groß und befinden sich auf der West-Nordwestseite und auf der Ost-Südostseite des Gebäudes.

Die beiden zu Beginn untersuchten Testfassaden waren wie folgt aufgebaut (Schichtabfolge von außen nach innen):

Fassade 1 – West-Nord-West-Fassade:

- Schicht 1: Ziegelmauerwerk 11,5 cm
- Schicht 2: Kalziumsilikatplatte 3 cm

- Schicht 3: Holzfaserdämmplatte 10 cm
- Schicht 4: Lehmputz 1,5 cm

Fassade 2 – Ost-Süd-Ost-Fassade:

- Schicht 1: Fachwerkmauerwerk 11,5 cm
- Schicht 2: Luftschicht 3 cm
- Schicht 3: Kalziumsilikatplatte 3 cm
- Schicht 4: Holzfaserdämmplatte 10 cm
- Schicht 5: Lehmputz 1,5 cm

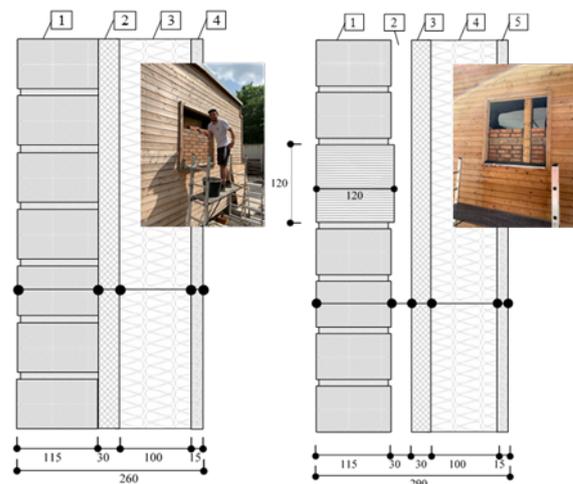


Abbildung 2: Querschnitt und Positionen der Temperatur- und Feuchtesensoren von Fassade 1 (links) und Fassade 2 (rechts)

Die Messungen wurden jeweils an der Außen- und Innenwand sowie an den Schichtübergängen mit hochpräzisen Temperatur- und Feuchtesensoren, die in einer röhrenförmigen Messeinrichtung integriert sind, durchgeführt. Die Messeinrichtung wurde über eine Kernbohrung in den Bauteilquerschnitt der Testfassaden eingebracht. Die Messpositionen können hierbei an die Schichtdicken unterschiedlicher Bauteilkonstruktionen angepasst werden. Die Messdatenerfassung erfolgt über einen Mikroprozessor, über welchen mittels des MQTT-Protokolls die Daten an eine Zeitreihendatenbank übertragen werden.

Die Untersuchungen der Heizperiode 2021/2022 haben bereits gezeigt, dass an der Ziegelfassade ohne Luftschicht zwischen Ziegel und Kalziumsilikat-Dämmung eine durchgehend hohe relative Feuchte von über 80% auftritt, die selbst beim Abtrocknen der Ziegelaußenseite im Bauteil verbleibt. Im Vergleich dazu liegt der Wert der relativen Feuchte zwischen Luftschicht und Kalziumsilikat-Dämmung an der gegenüberliegenden Fachwerkfassade deutlich unter 80%. Auch an der Kontaktfläche von Kalziumsilikat zur Holzfaserdämmung liegt der relative Feuchtegehalt ca. 10% unter dem der Ziegelfassade ohne Luftschicht (vgl. Abbildung 3 und Abbildung 4).

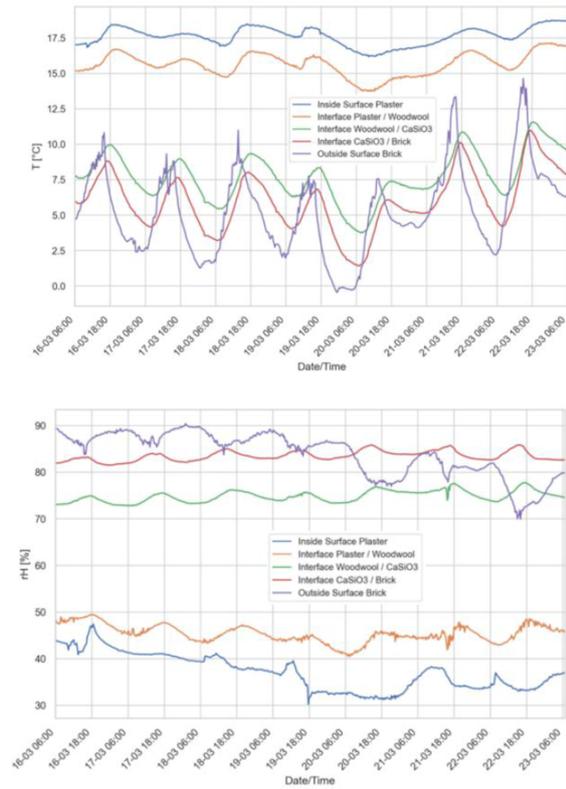


Abbildung 3: Gemessene Temperatur (oben) und relative Feuchte (unten) im Bauteilquerschnitt der Testfassade ohne Luftschicht im März 2022

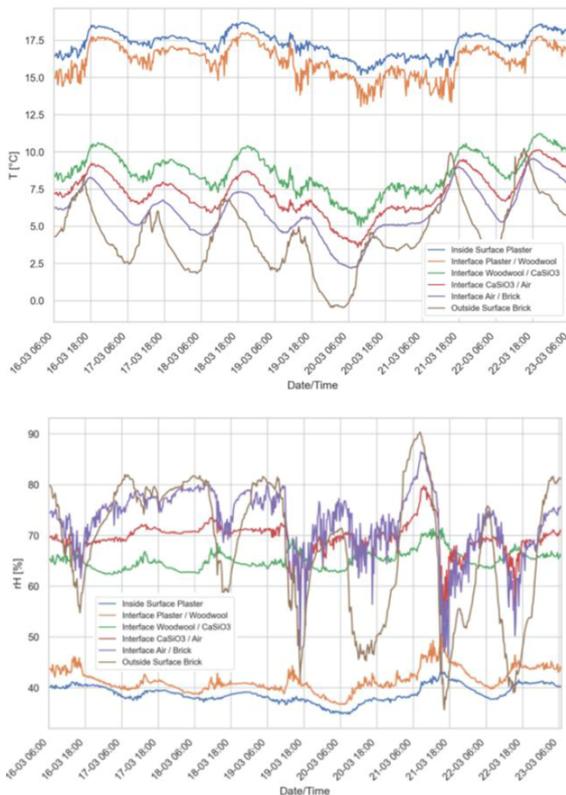


Abbildung 4: Gemessene Temperatur (oben) und relative Feuchte (unten) im Bauteilquerschnitt der Testfassade mit Luftschicht im März 2022

Der Verlauf der relativen Feuchte in Abbildung 4 zeigt, dass durch die physische Trennung der Bauteilschichten die ziegelseitige Feuchtebeaufschlagung der Pufferschicht deutlich reduziert werden kann. Insgesamt ist das Verhalten dadurch deutlich volatiler und zeigt regelmäßige Trocknungsphasen über alle Schichten.

Simulationsanalysen

Die theoretischen Analysen für das hygrothermische Verhalten der mehrschichtigen Innendämmsysteme erfolgen mit dem Simulationswerkzeug DELPHIN der Bauklimatik Dresden Software GmbH (Bauklimatik Dresden, 2023). Dabei handelt es sich um eine Software zur Simulation des gekoppelten Wärme-, Feuchte- und Stofftransports in kapillarporösen Baustoffen.

Das Ziel der Simulationen bestand zunächst darin, herauszufinden, welche Material- und Schichtkombinationen aus hygrisch aktiven und konventionellen Innendämmstoffen am besten funktionieren und im weiteren Verlauf des Projektes in den beiden Fassadenprüfständen praktisch untersucht werden sollten. Um zu bewerten, ob eine Konstruktion „gut funktioniert“ gibt es verschiedene Benchmarks. Mit Hilfe dieser Kriterien lässt sich bestimmen, ob Schäden in der Konstruktion auftreten können. Nach der DIN 4108-3 (DIN 4108-3, 2023) „dürfen weder im Jahresverlauf noch langfristig Feuchtezustände innerhalb der Konstruktion auftreten, welche deren Funktion beeinträchtigen oder sie schädigen können.“

Hierfür erfolgte zunächst eine Reihe von Simulationen unter gleichen Bedingungen. Für die Ausrichtung wurde die Wetterseite gewählt, um den Worst-Case-Fall abzubilden. Die Schichtdicken orientierten sich an den Versuchsaufbauten der Voruntersuchung in der Heizperiode 2021/2022.

Im weiteren wurde eine Materialrecherche durchgeführt. Es wurden die vorhandenen hygrisch aktiven Dämmmaterialien aus der Materialdatenbank des Simulationsprogrammes DELPHIN mit den marktverfügbaren Materialien abgeglichen. Auf Basis dieser Materialrecherche wurden vier weitere hygrisch aktive Dämmmaterialien ausgewählt, die in Kombination mit der Holzfaserdämmung und dem Lehmputz auf der Rauminnenseite kombiniert wurden. Aufgrund der Vielzahl an möglichen Materialkombinationen und zur besseren Vergleichbarkeit wurde festgelegt, nur die hygrisch aktive Dämmung zu variieren und diese mit einer gleichbleibenden 10 cm dicken Holzfaser-Dämmschicht und 3 cm dicken Lehmputzschicht auf der Raumseite zu kombinieren. Für die simulative Untersuchung wurden folgende Materialien ausgewählt:

- Kalziumsilikat
- Mineralschaum

- PUR-Hartschaum kapillaraktiv
- Korkdämmlehm
- Wärmedämmlehm

Zunächst wurden Abkürzungen für eine eindeutige Bezeichnung der einzelnen Materialschichten festgelegt (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht Materialien und Bezeichnungen

MATERIAL	BAUTEIL	BEZEICHNUNG
Ziegelmauerwerk	Fassade 1	F1
Fachwerk gemauert	Fassade 2	F2
Kalziumsilikat	Dämmung hygrysch	DH1
Mineralschaum	Dämmung hygrysch	DH2
Hartschaumplatte	Dämmung hygrysch	DH3
Kork-Dämm-Lehmplatte	Dämmung hygrysch	DH4
Wärmedämmlehm	Dämmung hygrysch	DH5
Holzfaserdämmplatte	Dämmung passiv	DP1
Lehmputz	Innenputz	P1
Luft	Luftschicht	L

Aufgrund der Vielzahl der durchzuführenden Simulationen wurde ein vereinfachtes Modell unter Vernachlässigung der dünnen Kleberschichten zwischen den Materialschichten verwendet. Als Klimastandort wurde Potsdam als nächstgelegener Standort aus der Datenbank gewählt, da zum aktuellen Zeitpunkt noch kein vollständiger lokaler Wetterdatensatz für den Prüfstand vorlag. Die Wetterdatenbank von DELPHIN enthält das Testreferenzjahr (TRY) 2010, das unter anderem auch Niederschlagsdaten zur Verfügung stellt und mit Blick auf die Relevanz von Schlagregenereignissen besonders geeignet erscheint. Um die Simulationsdauer zu begrenzen, wurde zunächst über einen Zeitraum von 3 Jahren gerechnet. Stellte sich in diesem Zeitraum kein eingeschwungener Zustand ein, so, wurde der Simulationszeitraum auf 10 Jahre erhöht.

Die Simulationen wurden mit einem Python-Skript automatisiert. Nach Abschluss der Simulationen wurde zunächst das Feuchtegehaltsintegral der gesamten Konstruktion und in den einzelnen Schichten bewertet.

Für die Basisvarianten wurde zunächst geprüft, ob sich ein eingeschwungener Zustand einstellt. Die Auswertung zeigt, dass der Feuchtegehalt der gesamten Konstruktion jeweils um weniger als 1,0% zum Vorjahr steigt. Abbildung 5 zeigt, dass sich der Feuchtegehalt der gesamten Konstruktion nicht aufschwingt und die Änderungen zu Vorjahr, abgesehen von der Anfangsfeuchte, immer unter 1,0

% bleiben. Nach diesem Kriterium sind alle Basisvarianten funktionsfähig. Die Auswertung weiterer Kriterien und Simulationsvarianten werden im weiteren Projektverlauf durchgeführt.

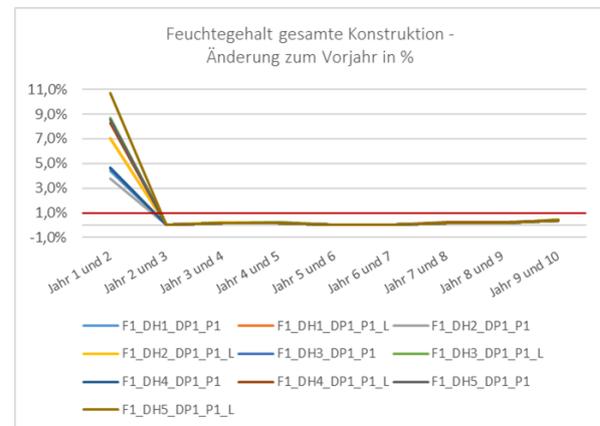


Abbildung 5: Simulierte Änderung des Feuchtegehalts in der gesamten Konstruktion im Vergleich zum Vorjahr

Zukünftig sollen die Bauteilmodelle der eingebauten Testfassaden aus DELPHIN mit den Messergebnissen des Fassadenprüfstands validiert werden. Für diesen Zweck wurden in diesem Jahr Sensoren (Solarstrahlung, Windgeschwindigkeit- und -richtung, Außenlufttemperatur und -feuchte) am Rooftop-Gebäude angebracht, sodass in Zukunft eine lokale Wetterstation vorort ist. Deren Daten zusammen mit den Messdaten im Fassadenquerschnitt kann dann für die Validierung der Simulationsmodelle verwendet werden. Die Simulation nach Standortbedingungen wird mit den realen Ausrichtungen der Testfassaden erfolgen. Um die Konstruktion im Simulationsprogramm so realitätsnah wie möglich abzubilden, werden zukünftig die Kleberschichten in ihrer verwendeten Dicke ebenfalls mit abgebildet.

Neu konfigurierte Testfassaden

Auf Grund der durchgeführten Simulationsanalysen wurden folgende zwei neue mehrschichtige Innendämmsysteme konfiguriert und baulich für die beiden Testfassadenprüfplätze im Rooftop-Gebäude realisiert:

- System A: Cellco Korkdämmlehmplatte 30 mm plus 10 cm Holzfaserdämmung
- System B: Remmers iQ-Therm 30 mm plus 10 cm Holzfaserdämmung

Abbildung 6 zeigt den Aufbau der Variante A mit Korkdämmplatten, wobei eine Hälfte der Fassade mit Abstandshaltern versehen ist, um das unterschiedliche hygrothermische Verhalten der gleichen Schichtkombinationen mit und ohne Luftschicht im Experiment vergleichen zu können.



Abbildung 6: Testfassade mit Korkdämmlehmplatten ohne Luftschicht (rechte Hälfte) und mit Abstandshaltern für die Luftschicht (linke Hälfte)

Abbildung 7 zeigt die beiden neuen Testfassaden in der Ansicht und in den Bauteilquerschnitten mit den zugehörigen Positionen der Temperatur- und Feuchtesensoren.

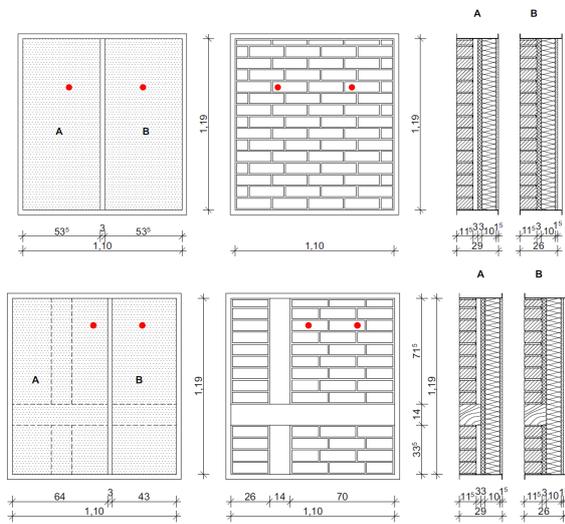


Abbildung 7: Baukonstruktiver Aufbau der beiden neuen Testfassaden und zugehöriger Sensorpositionen

Beide Testfassaden werden in der Heizperiode 2023/2024 kontinuierlich vermessen und sollen danach mit den Ergebnissen der ersten Fassadenvarianten der Heizperiode 2021/2022 verglichen werden.

Ergebnisanalyse und Diskussion

Die Auswertung der Simulation mit gleicher Materialstärke, Ausrichtung nach Westen und mit den Wetterdaten des Testreferenzjahres 2010 aus Potsdam hat gezeigt, dass sich die Ergebnisse der verschiedenen hygrisch aktiven Materialien generell in einem ähnlichen Bereich mit wenig Abweichungen bewegen. Ein deutlicher Unterschied ist jedoch zwischen den Varianten mit Luftschicht und ohne Luftschicht festzustellen (vgl. Abbildung 8). Die Auswertung zeigt, dass die 3 cm breite Luftschicht zwischen Außenwand und hygrisch aktiver Dämmung einen Puffer bildet, der bewirkt, dass die Feuchtigkeit von Außen durch Schlagregen weniger in die passive Dämmung vordringt, als bei den Varianten ohne Luftschicht.

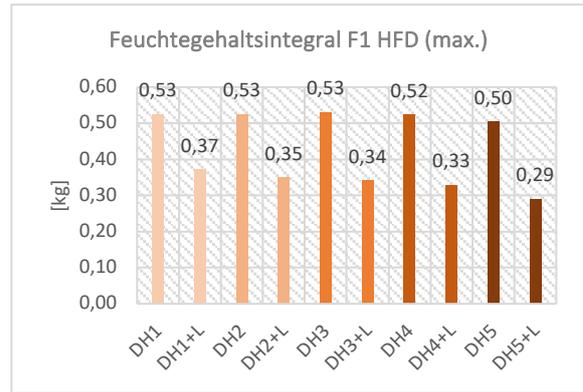
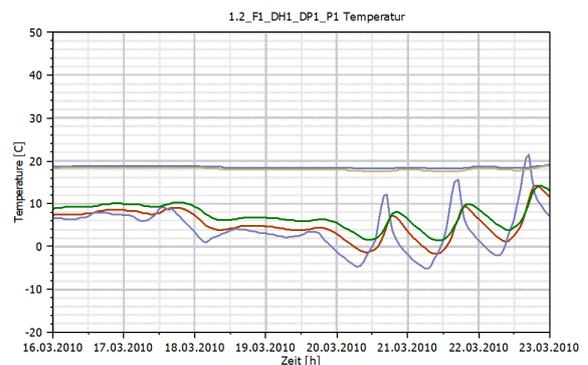
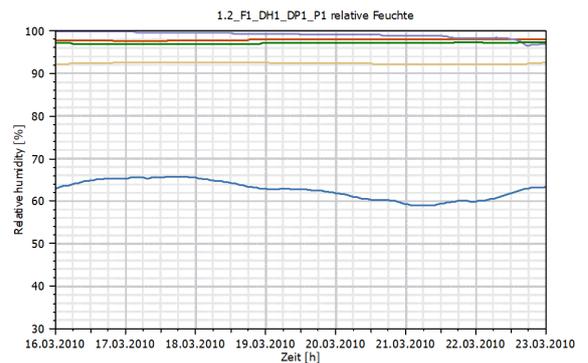


Abbildung 8: Vergleich des Feuchtegehaltsintegrals verschiedener hygrisch aktiver Dämmstoffe mit und ohne Luftschicht

Zudem trocknet die Fassade schneller. Beim Vergleich des maximalen Feuchtegehaltsintegrals der Holzfaserdämmung ist der maximale Feuchtegehalt der gesamten Konstruktion mit Luftschicht bei allen fünf Dämmvarianten insgesamt im Schnitt um 19 % niedriger.



1.2_F1_DH1_DP1_P1 Temperatur



1.2_F1_DH1_DP1_P1 relative Feuchte

Abbildung 9: Simulationsergebnisse der Variante mit Kalziumsilikat ohne Luftschicht (oben: Temperatur, unten: relative Feuchte)

Beim Vergleich der relativen Feuchte der Ziegelfassade mit Kalziumsilikat als hygrisch aktive Dämmschicht wurde der gleiche Zeitraum wie im Kapitel *Bauphysikalische Messungen an Testfassaden* gewählt. Die Ergebnisse zeigen ebenfalls, dass sich

die Luftschicht positiv auf den Feuchtegehalt in der Konstruktion auswirkt (vgl. Abbildung 9 und 10).

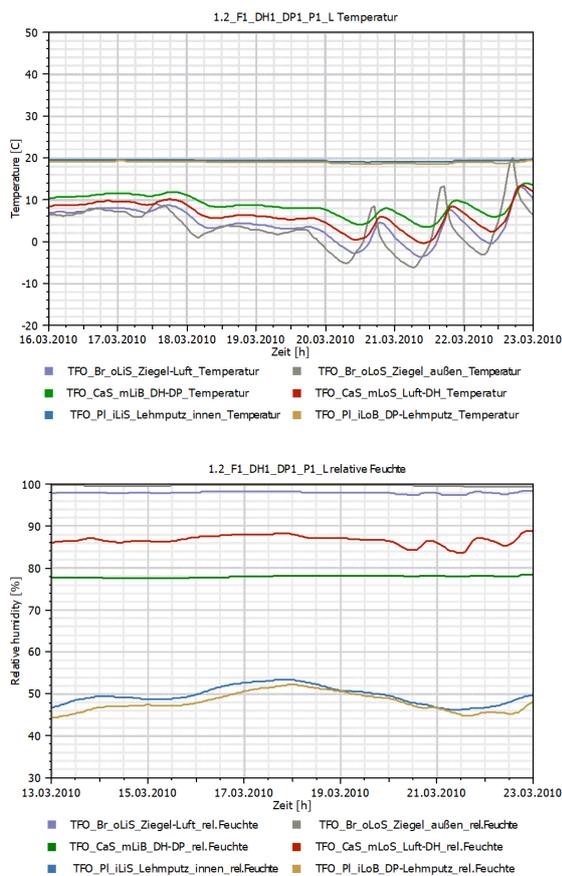


Abbildung 10: Simulationsergebnisse der Variante mit Kalziumsilikat mit Luftschicht
(oben: Temperatur, unten: relative Feuchte)

Im Gegensatz zu den Messergebnissen weisen die Simulationsergebnisse insgesamt eine höhere relative Feuchte auf. Das ist auf die direkte Ausrichtung zur Wetterseite zurückzuführen. Daher sind die Ergebnisse nicht direkt miteinander vergleichbar. Qualitativ zeigen sie jedoch ein ähnliches Ergebnis wie die Messungen an den Testfassaden. Die relative Feuchte an der Innenseite der Wand ist bei der Variante mit Luftschicht um ca. 15% geringer als bei der Variante ohne Luftschicht. In der Schicht zwischen hygrysch aktiver Dämmung und Holzfaserdämmung ist die relative Feuchte um 19% geringer bei der Variante mit Luftschicht.

Zusammenfassung

Die bisherigen simulativen und experimentellen Untersuchungen im Rahmen des Projektes InMoB legen nahe, dass sich Idee eines preisgünstigen mehrschichtigen energieeffizienten Innendämmsystems grundsätzlich realisieren lässt. Hierbei haben unterschiedliche hygrysch aktive Dämmstoffe bei gleicher Schichtdicke und gleicher Ausrichtung, in gleicher Einbausituation in Kombination mit einer nicht hygrysch aktiven Schicht, keine großen Auswirkungen auf das Feuchteniveau der

Konstruktion. Es zeigt sich anhand der Messergebnisse an den Testfassaden sowie an den Simulationsergebnissen jedoch, dass eine trennende Luftschicht zwischen Außenwand und hygrysch aktiver Dämmung wie eine Pufferschicht wirkt und der Feuchtegehalt der Konstruktion insgesamt niedriger ist, als bei den Varianten ohne Luftschicht. Im weiteren Projektverlauf sollen ausgewählte Material- und Schichtkombinationen in den Fassadenprüfständen untersucht und die entsprechenden Simulationsmodelle anhand der Messdaten validiert werden. Hierzu werden über den gesamten Messzeitraum lokale Wetterdaten erhoben. Von besonderem Interesse ist der direkte Vergleich der Messergebnisse der Varianten mit Luftschicht und ohne Luftschicht. Unter Anwendung der validierten Modelle sollen zudem weitere Simulationen mit unterschiedlichen Schichtdicken erfolgen, um die bestmöglichen Material- und Schichtkombinationen für das Innendämmsystem bzgl. seiner bauphysikalischen Funktion und Energieeffizienz, seiner Materialkosten, sowie seiner Ökobilanz zu bestimmen.

Danksagung

Das Forschungsprojekt InMoB wird innerhalb des Förderprogramms Zukunft Bau des Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) gefördert.

Literatur

- Bauklimatik Dresden 2023, Webpräsenz: bauklimatik-dresden.de/delphin/.
- Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.) (dena, 2023): DENA-GEBÄUDEREPORT 2024. Zahlen, Daten, Fakten zum Klimaschutz im Gebäudebestand.
- DIN 4108-3:2023-04 – Entwurf, 2023. Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz - Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung.
- Häupl, P., Petzold, H., Finkenstein, C. 2003. Feuchteschutztechnische und energetische Bewertung der Gebäudesanierung mit raumseitiger Wärmedämmung aus Calciumsilikat. Abschlußbericht, Fraunhofer IRB.
- Plagge, R., Funk, M., Scheffler, G., Grunewald, J. 2006. Experimentelle Bestimmung der hygrysch Sorptionsisotherme und des Feuchttransportes unter instationären Bedingungen. Bauphysik Volume 28, Issue 2, Pages 81-87.
- Rooftop, 2023. Webpräsenz des Rooftop-Gebäudes: <http://www.solar-rooftop.de>.



PLANUNG EINES REALLABORS ZUM INTERDISZIPLINÄREN MONITORING VON MIKROKLIMA, HYGROTHERMIK UND GRAUWASSERAUFBEREITUNG AN GRÜNFASSADEN

Maria Hartmann¹, Gloria Kohlhepp², Hayder Alsaad¹, Silvio Beier², Conrad Völker¹

¹ Professur Bauphysik, Bauhaus-Universität Weimar, Deutschland,

E-Mail: maria.hartmann@uni-weimar.de

² Professur Siedlungswasserwirtschaft und Technologien urbaner Stoffstromnutzungen, Bauhaus-Universität Weimar, Deutschland,

E-Mail: gloria.maria.kohlhepp@uni-weimar.de

Kurzfassung

Fassadenbegrünungen wirken sich positiv auf das urbane Mikroklima aus, ergänzen die thermische Gebäudehülle und können darüber hinaus der Grauwasseraufbereitung dienen. Jedoch werden die physikalischen und chemischen Effekte an Grünfassaden selten über mehrere Monate messtechnisch erfasst. Auch Referenzmessungen sind häufig nicht realisierbar. Daher entsteht an einem Bestandsgebäude in Weimar im April 2024 ein Reallabor bestehend aus einer wandgebundenen Grünfassade, einer bogengebundenen Begrünung sowie einer Referenzwandfläche. Inhalt dieser Studie ist die Datenerfassung und -verarbeitung zur Bewertung des lokalen Mikroklimas, des Tauwasserrisikos, des Wärmetransports durch die Außenwand und der Grauwasserreinigungsleistungen der Grünfassaden.

Abstract

Facade greening has a positive impact on urban microclimates, enhances the thermal efficiency of buildings, and can also contribute to greywater treatment. However, the physical and chemical effects on green facades are rarely measured over extended periods. Consequently, in Weimar, Germany, a living laboratory including a wall-mounted greening, a ground-based green facade, and a reference wall will be constructed in April 2024. This study aims to collect measurement data to assess the local microclimate, condensation risk, heat transport through the exterior wall, and greywater purification performance of both greening systems.

Einleitung

Erhöhte Jahresdurchschnittstemperaturen, Extremwetterereignisse und Ressourcenknappheit bei zugleich steigendem Energie- und Trinkwasserbedarf stellen insbesondere wachsende Städte immer wieder vor neue Herausforderungen. Doch viele dieser Umweltkonflikte können durch Grünfassaden

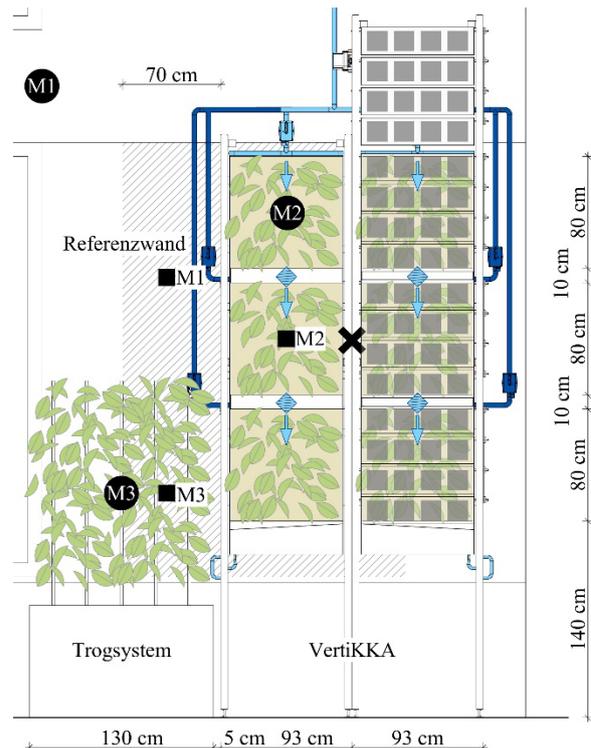
nachhaltig reduziert werden. Beispielsweise verbessern sie das sommerliche Mikroklima, indem sie die Oberflächentemperaturen der Umgebung und damit die mittlere Strahlungstemperatur reduzieren (Alsaad et al., 2022a). Die verringerten Oberflächentemperaturen wirken sich nicht nur auf das Mikroklima, sondern auch auf den Kühlbedarf positiv aus (Hartmann et al., 2023). Die Verbesserung der thermischen Eigenschaften im Winter konnte bereits durch die Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) auf Basis von Messwerten gezeigt werden (Alsaad et al., 2022a; Tudiwer et al., 2019). Eine Begrünung beeinflusst zudem auch das Feuchteverhalten der Fassade. Für warme Tage in gemäßigttem sowie tropischem Klima zeigten Studien einen Anstieg der relativen Luftfeuchte im Luftspalt, sowie eine Abnahme unter winterlichen Bedingungen (Alsaad et al., 2022b; Chen et al., 2013).

Ein weiterer eingangs erwähnter Umweltkonflikt ist der steigende Trinkwasserbedarf. Die begrenzte, aber lebensnotwendige Ressource Trinkwasser sollte stets verantwortungsvoll genutzt werden. Häusliche Abwasserressourcen verschiedener Quellen werden jedoch überwiegend gemeinsam entsorgt, obwohl das aus Duschen, Waschbecken, Wasch- und Spülmaschinen stammende Grauwasser, welches bis zu 80% des kommunalen Abwassers ausmacht, vergleichsweise geringfügig mit Schadstoffen belastet ist (van de Walle et al., 2023). Durch spezielle Grünfassadensysteme mit vorgeschalteten Filtern und Reinigungssubstrat kann das Grauwasser lokal aufbereitet und anschließend als Betriebs- oder Bewässerungswasser wiederverwendet werden. Vorangegangene Messungen an einem Prototyp der Grünfassade VertiKKA (vertikale Klimakläranlage) zeigten bereits maximale Reinigungsleistungen von 92% für den chemischen Sauerstoffbedarf (CSB), bis zu 52% für Gesamtphosphor (TP) und 59% des gesamten gebundenen Stickstoffs (TN_b) (Aicher et al., 2022).

Da die bisherigen Messungen an Grünfassaden jedoch überwiegend auf kleine, lokale Flächen einer Begrünungsvariante und wenige Tage begrenzt sind, können die jahreszeitlichen Auswirkungen auf das bauphysikalische Verhalten, das Mikroklima und die Grauwasserreinigungsleistung nicht erfasst werden. Daher wird im April 2024 an einem Bestandsgebäude in Weimar ein Reallabor, bestehend aus einer wandgebundenen Grünfassade, einer bodengebundenen Begrünung und einer unbegrünten Referenzwandfläche, realisiert. Die Anlage soll über die Dauer einer Vegetationsperiode bis zum frostschutzbedingten Abschalten betrieben werden. Während des gesamten Zeitraumes erfolgen Langzeitmessungen zur Bewertung des Mikroklimas sowie des hydrothermischen Verhaltens der Außenwand in den genannten Wandabschnitten. Beide Begrünungsformen werden mit Grauwasser bewässert, das entlang des Fließweges durch das Reinigungssubstrat physikalisch-biologisch aufbereitet wird. Durch die Beprobung an den Zu- und Abläufen soll die Grauwasserreinigungsleistung beider Begrünungssysteme bestimmt werden. Im Folgenden werden das geplante Reallabor, die Messverfahren, die Datenverarbeitung sowie die erwartbaren Ergebnisse detailliert beschrieben.

Reallabor

Die Westfassade des Bestandsgebäudes, an dem das Reallabor entstehen soll, grenzt an einen dreieckig bebauten, gepflasterten und unbegrünten Hof. Mit 14,2° ist die Fassade leicht aus Westen Richtung Süden rotiert. An der homogenen, gedämmten Außenwand entstehen auf 10,7 m² Wandfläche drei Testabschnitte: 1. eine Referenzwandfläche ohne Begrünung, 2. die wandgebundene und modular aufgebaute Anlage VertiKKA und 3. das bodengebundene, sogenannte Trogsystem (Abbildung 1, oben). Die VertiKKA besteht aus sechs quadratischen Modulen je 80 × 80 × 48 cm, die sich aus einem Reinigungssubstratkörper und Pflanzentaschen zusammensetzen. Weiterhin sind drei dieser Module mit beweglichen Photovoltaik-Elementen (PV) versehen, welche je nach Sonnenstand und Windverhältnissen ausgerichtet werden können (Abbildung 1, unten). Für zusätzliche Referenzmessungen ist auch eine PV-Fläche ohne dahinter befindliche Begrünung vorgesehen. Auch das Trogsystem besteht analog zur VertiKKA aus einer Reinigungs- sowie einer Pflanzsubstratschicht, welche über ein Vlies miteinander verbunden sind. Zudem unterstützen Rankhilfen den Pflanzenbewuchs. Sämtliche Begrünung wird vor der Bepflanzung der Systeme vorkultiviert, um ein hinreichendes Pflanzenvolumen bereits zur Inbetriebnahme des Systems zu gewährleisten.



- Messkette Mikroklima
- Messkette Wärmestrom
- ⊗ Anemometer-Messung
- Hauptbeschickungsweg
- Zweiter Beschickungsweg
- ◆ Wasserprobenahmepunkte

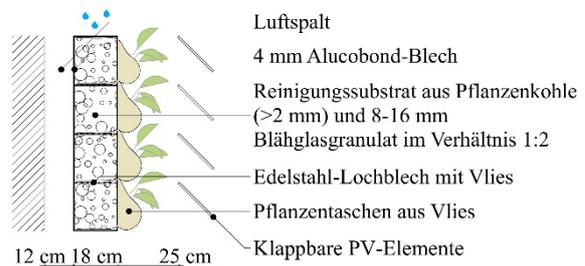


Abbildung 1: Reallabor (oben) und Aufbau der VertiKKA (unten)

Im Innenraum des Bestandsgebäudes befindet sich ein Tank welcher das Grauwasser zur Beschickung vorhält sowie zwei weitere Tanks, die das gereinigte Grauwasser aus dem Ablauf des Trogsystems und der VertiKKA auffangen.

Bauphysikalische Messungen

Die bauphysikalischen Sensoren werden im Innen- und Außenraum des Reallabors sowie innerhalb aller drei Testwandabschnitte montiert. An der VertiKKA erfolgen die Messungen aus praktischen Gründen an den Modulen ohne PV.

Mikroklima

Das Reallabor ermöglicht es, die Lufttemperatur und relative Luftfeuchte an den drei beschriebenen Wandabschnitten zu messen und zu vergleichen. Dafür werden zuvor kalibrierte kapazitive Feuchtefühler, die

über einen eingebauten Thermistor mit negativem Temperaturkoeffizienten (NTC Typ N) verfügen, verwendet (Genauigkeit $\pm 0,4$ K (-20°C bis 0°C) und $\pm 0,2$ K (0°C bis 70°C) bzw. $\pm 4\%$ r.H. (5% bis 98% r.H. und 18°C bis 28°C), Auflösung 0,01 K bzw. 0,1% r.H.). Diese werden in jedem Wandabschnitt jeweils an einer horizontal auskragenden Schienenkonsole in 6 cm, 45 cm, 95 cm und 135 cm Abstand zur Wand montiert (Abbildung 1, oben und Abbildung 2). Somit ergeben sich insgesamt zwölf Messpunkte. Die formstabilen Schienenkonsolen bestehen aus Metall. Daher können sie sich unter andauernder Sonneneinstrahlung stark erhitzen und folglich durch Strahlung und Konvektion Wärme an die Umgebung abgeben. Somit kann die bei Windstille leicht ansteigende Lufttemperatur in der Nähe des Kragarms die Messungen verfälschen. Um dies zu vermeiden, werden die Konsolen mit einem Vlies umwickelt und die Messköpfe der Feuchtefühler mit einem seitlichen Versatz von 20 cm zur Konsole befestigt. Um die Feuchtefühler weiterhin vor direkter Sonneneinstrahlung, Witterung, Staub und Insekten zu schützen, werden sie mit einem Schutzgehäuse aus UV-beständigem, weißem Kunststoff versehen und die werkseitigen Schutzkappen durch eine staubdicht abschließende Doppellage aus Pollenschutzgaze ergänzt. Das Schutzgehäuse reicht über die Unterkante des Sensorkopfes, sodass dieser auch vor Schlagregen geschützt ist. Gleichzeitig sind die Öffnungsfläche des Gehäuses und das Gehäusevolumen hinreichend groß, um die Luftzirkulation um den Sensor nicht zu behindern.

Die Messdaten werden in einem 10-Minuten-Intervall erfasst. Die spätere Auswertung erfolgt für eine Hitze- und eine Kälteperiode sowie für einen Tagesverlauf mit Betrachtung der potentiellen Sonnenstunden ohne Verschattung durch Nachbargebäude, der Stunden mit Verschattung sowie der Nachtstunden. Zum einen werden die stündlichen Mittelwerte über den Tagesverlauf für die Sensorpositionen 1–4 abgebildet. Zum anderen werden horizontale Temperatur- und Feuchteprofile entlang der Messketten 1–3 (Abbildung 2) für einen definierten Zeitraum erstellt. Erwartet werden eine leichte Reduktion der Lufttemperatur an warmen Tagen sowie ein Anstieg der relativen Luftfeuchte durch beide Begrünungsformen wie in Alsaad et al. (2022c). Diese Effekte sollten bei direkter Sonneneinstrahlung am größten sein, gleichzeitig aber mit zunehmendem Wandabstand abnehmen. An kalten Tagen sowie nachts kann sich zu Beginn der Wärmespeichereffekt des Substrats abzeichnen. Dieser kann einen leichten Anstieg der Lufttemperatur nahe der Begrünungen bewirken. Die größten Unterschiede sind für die Sensorposition 2 zu erwarten. Dort ist die Luftzirkulation durch die Begrünung verringert, sodass sich die feuchte, warme Luft stauen kann.

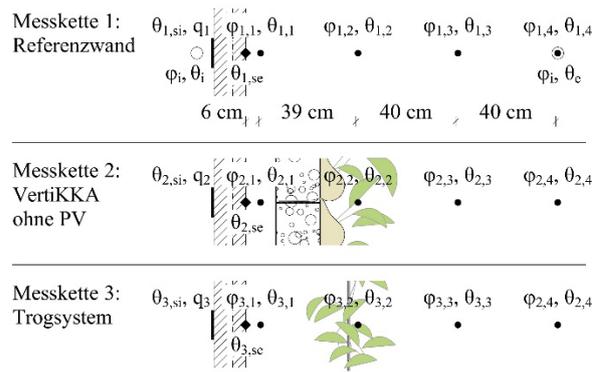


Abbildung 2: Messpunkte der Lufttemperatur, Luftfeuchte, Wärmestromdichte und Oberflächentemperatur

Hygrothermik der Außenwand

Sinkende Lufttemperaturen führen zu einem Anstieg der relativen Luftfeuchte (bei konstanter absoluter Luftfeuchte). Werden die Taupunkttemperatur bzw. die Sättigungsfeuchte erreicht, kondensiert das in der Luft enthaltene Wasser an der Bauteiloberfläche und kann die Fassade auf lange Sicht schädigen. Daher erfolgt ein hygrothermisches Monitoring der drei Testwandabschnitte. Die Oberflächentemperaturen der Wandaußenseite werden durch Thermistoren (vgl. oben) bestimmt. Diese werden mit witterungsbeständigem Kunststoffklebeband, welches einen der Wand ähnlichen Emissionsgrad aufweist, an der Wandoberfläche befestigt. Die Haftung der Sensoren wird während des Messzeitraumes regelmäßig überprüft. Die Lufttemperaturen, relativen und absoluten Luftfeuchten sowie die Taupunkttemperaturen (Auflösung 0,1 K) der angrenzenden Luftschicht werden durch die kapazitiven Feuchtefühler in Position 1 (Abbildung 2) gemessen bzw. berechnet. Die Datenerfassung erfolgt im 10-Minuten-Intervall.

Das Tauwasserrisiko kann anschließend leicht über die Differenz aus der äußeren Wandoberflächentemperatur θ_{se} und der Taupunkttemperatur θ_{TP} abgeschätzt werden:

$$D = \theta_{se} - \theta_{TP} \quad (1)$$

Wird $D \leq 0$, kann sich Tauwasser an der Fassade niederschlagen. Die äußere Wandoberflächentemperatur wird maßgeblich durch die einfallende Solarstrahlung beeinflusst. Auch der Strahlungsaustausch mit der Umgebung und die Strömungsgeschwindigkeit der angrenzenden Luftschicht wirken sich auf die Oberflächentemperatur aus. Folglich sind für sommerliche und winterliche Verhältnisse sowie für Tag- und Nachtstunden unterschiedliche Ergebnisse zu erwarten (Alsaad et al., 2022c). Konkret wird während der Sonnenstunden eine erhöhte Luftfeuchte hinter der VertiKKA im Vergleich zur

Referenzwand erwartet, während nachts bzw. zur kälteren Jahreszeit sogar von einer vergleichsweise verringerten relativen Luftfeuchte hinter der VertiKKA und damit einem reduzierten Tauwasserrisiko ausgegangen werden kann. Diese Effekte sollten durch die Begrünung des Trogsystems in abgeschwächter Form beobachtbar sein.

Zu den hygrothermischen Untersuchungen zählt auch die Bestimmung der Transmissionswärmeverluste durch die drei Wandabschnitte. Diese werden durch den U-Wert beschrieben. Um diesen empirisch zu ermitteln, wird in jedem Wandabschnitt innenseitig eine Wärmeﬂussplatte mit integriertem Thermistor (Messﬂäche aus 12×12 cm Epoxidharzplatte, Genauigkeit $\pm 5\%$ (bei 23°C) bzw. $\pm 0,5$ K (0°C bis 80°C), Auflösung $0,1$ W/m² bzw. $0,01$ K) an der Wand befestigt. Durch die Verwendung einer Wärmeleitpaste wird der Kontakt zwischen Wärmeﬂussplatte und Wand erhöht. Dabei wird darauf geachtet, keine Luﬂeinschlüsse in der Paste zu erzeugen. Die Wärmeﬂussplatte befindet sich auf einer lotrechten Achse mit dem bereits beschriebenen Thermistor zur Bestimmung der Außenoberﬂächentemperatur. Innenseitig begrenzt ein Wandversatz den homogenen Wandbereich und damit auch den Schutzbereich um die Wärmeﬂussplatte auf eine Breite von 70 cm (Wandstärke von $31,5$ cm im schraffierten Bereich in Abbildung 1, oben). Innerhalb dieses Schutzbereichs sollten die Wärmeströme mit denen der Messﬂäche übereinstimmen, sodass seitliche Wärmeströme vernachlässigt werden können. Zur Überprüfung der maximalen Schutzbreite von 29 cm rechts bzw. links der Messﬂäche wurde daher eine Wärmebrückensimulation mit Psi-Therm 3D (Version 9) durchgeführt, die das Ausreichen der Schutzbreite bestätigte. Da durch das Südfenster die Sonnenstrahlen direkt auf die Innenwand des Reallabors einfallen können, wird das Fenster durch einen dauerhaften, lichtundurchlässigen und unbeweglichen Vorhang verschattet, um die Wärmeﬂussplatten vor der direkten Sonneneinstrahlung zu schützen. Des Weiteren werden die Innen- und Außenlufttemperatur über die Thermistoren der Feuchtefühler gemessen. Analog zu den Messungen des Mikroklimas werden die Daten im 10-Minuten-Intervall erfasst.

Der anschließend zu ermittelnde U-Wert ist für den stationären Zustand, d. h. unter Annahme konstanter Wandoberﬂächentemperaturen, deﬁniert, welche in situ jedoch nicht realisierbar sind. Da die Messungen aber über einen längeren Zeitraum erfolgen, kann ein quasi-stationärer Zustand angenommen werden, sofern die Messdaten bestimmte Kriterien erfüllen.

Zunächst werden die Messdaten vorgefiltert, um verschiedene Störfaktoren auszuschließen. Eliminiert werden:

1. Negative Wärmestromdichten (DIN EN 12494). Somit wird nur der Wärmetransport nach außen betrachtet. Außerdem werden Fehler, bspw. durch Berühren der Wärmeﬂussplatte, ausgeschlossen.
2. Nicht erklärbare Spitzen der Oberﬂächentemperaturen bzw. Wärmestromdichten, die durch den Vergleich der Daten untereinander auftreten und nicht von der Außentemperatur abhängen.
3. Plötzliche Schwankungen der Innenraumtemperatur, die durch das Öffnen von Türen und Fenstern auftreten.

Anschließend werden weitere Filterkriterien angewandt. In vorangegangenen Arbeiten von Alsaad et al. (2022a) erwies sich die Vorgehensweise nach Tudiwer et al. (2019) als sinnvoll. Damit werden gleichzeitig die Kriterien der DIN EN 12494 für schwere Bauteile erfüllt:

4. $\theta_{i,j} - \theta_{e,j} > 15$ K mit $|\Delta(\theta_{i,j} - \theta_{e,j})| < 2$ K innerhalb der letzten 24 Stunden.
5. $\theta_{si,j} - \theta_{se,j} > 15$ K im Mittel mit $|\Delta(\theta_{si,j} - \theta_{se,j})| < 2$ K innerhalb der letzten 24 Stunden.

Durch die Anforderungen an die Temperaturdifferenzen werden einerseits nur deutlich messbare Wärmestromdichten in die Berechnung einbezogen und andererseits die Fehler der absoluten Temperaturen auf weniger als 5% reduziert (DIN EN 12494). Des Weiteren können Wärmespeichereffekte, die den U-Wert ebenfalls verfälschen würden, nahezu ausgeschlossen werden. Außerdem wird von einem konstanten Wärmedurchlasswiderstand der Wand ausgegangen, bei dem kein Feuchtetransport stattfindet.

Die Daten werden für ganzzahlige Vielfache von 24 Stunden ausgewählt. Nach der Datenfilterung werden gleitende U-Werte [W/m²K] nach dem Mittelwertverfahren der DIN EN 12494 berechnet:

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (\theta_{i,j} - \theta_{e,j})} \quad (2)$$

Dabei ist q die Wärmestromdichte [W/m²], θ_i die Innentemperatur [$^\circ\text{C}$] und θ_e die Außentemperatur [$^\circ\text{C}$].

Aufgrund der bereits beschriebenen Auswirkungen der Begrünungen auf die Oberﬂächentemperaturen sind besonders durch die VertiKKA verringerte Transmissionswärmeverluste und eine Verringerung des U-Wertes zu erwarten (Alsaad et al., 2022c). Für das Trogsystem sind geringere Effekte erwartbar, die im Gegensatz zur VertiKKA maßgeblich von der Blattﬂächendichte (LAD) beeinflusst sein werden. Aufgrund der höheren Wandstärke und der Dämmung der Außenwand könnten die U-Werte deutlich weniger als in Alsaad et al. (2022a) reduziert werden.

Hinterlüftung

Die Außenwand und die VertiKKA-Rückseite tauschen Wärme durch Strahlung sowie durch Konvektion der dazwischen befindlichen Luftschicht aus. Die Luftwechselrate (LWR) beschreibt die Belüftungseffizienz und hängt von vielen verschiedenen Faktoren ab. Die Geometrie des Luftspalts und der Öffnungsflächen, die Orientierung der Öffnungsflächen zum Wind, die Windgeschwindigkeit sowie die abschirmende Wirkung von Gebäuden und Vegetation bestimmen den Druckgradienten an den Öffnungen des Luftspalts und damit die erzwungene Konvektion. Weiterhin führen die Temperaturgradienten innerhalb der Luft zu freier Konvektion und schließlich bestimmt auch die Oberflächenrauigkeit die resultierende Mischkonvektion. Aufgrund der Vielzahl von Einflussfaktoren reichen die numerisch bestimmten LWR hinterlüfteter Fassaden von 100–1800 h⁻¹ für Spaltbreiten von 4–15 cm. Empirisch ermittelte LWR liegen bei 10–1300 h⁻¹ für Spaltbreiten bis 10 cm (Rahiminejad und Khovalyg, 2021). Die Strömungsgeschwindigkeiten sind hingegen eher gering. Nach Paskert et al. (2022) ergaben sich für eine vierseitig offene Hinterlüftung und eine Öffnungsbreite von 5 cm Strömungsgeschwindigkeiten bis maximal 0,2 m/s. Für eine Breite von 10 cm ermittelten Souza et al. (2018) maximal 0,36 m/s. Die LWR für einen konkreten Fall korrekt einzuschätzen, erweist sich als offensichtliche Herausforderung. Da die Hinterlüftung die bauphysikalischen Auswirkungen von Grünfassaden jedoch maßgeblich beeinflusst und die LWR gleichzeitig ein wichtiger Eingabeparameter für energetische Simulationen darstellt, werden die Strömungsgeschwindigkeiten und LWR hinter der VertiKKA empirisch bestimmt.

Die Strömungsgeschwindigkeit im Luftspalt wird durch ein omnidirektionales Thermo-Anemometer mit einem Messbereich von 0,05 bis 2,5 m/s (Genauigkeit ±(3% v. Mw. + 0,5% v. Mw./K Abweichung von 23°C + 1% v. Ew + 2 Digit), Auflösung 0,001 m/s) erfasst. In Voruntersuchungen wurde die Omnidirektionalität des Anemometers mit einer laminaren Strömung, die durch ein Rohr innerhalb einer Klimakammer erzeugt wurde, messtechnisch überprüft. Wie zu erwarten war, zeigten die Ergebnisse eine gute Rotationssymmetrie entlang der Sensorachse. Allerdings stieg der relative Fehler mit größer werdendem Winkel zwischen Sensorachse und Strömungsrichtung. Gleichzeitig wurde die winkelabhängige Abweichung umso größer, je höher die Strömungsgeschwindigkeit war (bis zu 65,5% für 180° und 1,8 m/s).

Um die Messabweichungen so gering wie möglich zu halten, wird das Anemometer senkrecht zu den Hauptströmungsrichtungen im Luftspalt positioniert. Dazu

wird es zwischen den zwei Modulsträngen auf mittiger Höhe so in den Luftspalt eingeschoben, dass die Sensorspitze bis zur Mitte in die 12 cm breite Hinterlüftung ragt. Für die Berechnung des Volumenstroms nach Gleichung 3 bleibt die Hinterlüftung nur seitlich geöffnet. Die obere und untere Öffnung sowie die horizontalen und vertikalen Spalte zwischen den Modulen werden verschlossen, um eine laminare Strömung über die ganze Anlagenfläche zu begünstigen. Verwendet werden PVC-Lamellen, um die Grauwasserbeobung an den Modulauslässen nicht zu behindern. Die Messungen zur Bestimmung des Volumenstroms und der LWR erfolgen im April sowie im Juli 2024 über einen Zeitraum von jeweils 14 Tagen, wobei die Messdaten in einem 10-Sekunden-Intervall aufgezeichnet werden.

Unter der Annahme, dass die Luft abhängig von der Windrichtung immer nur durch eine der Öffnungsflächen eintritt, können der Volumenstrom Q [m³/s] sowie die Luftwechselrate ACH [h⁻¹] nach Falk und Sadin (2013) berechnet werden:

$$Q = v \cdot A \quad (3)$$

$$ACH = \frac{v}{x} \cdot 3600 \text{ mit } v = 0,67 \cdot v_{max} \quad (4)$$

Dabei sind v bzw. v_{max} die mittlere bzw. maximale Strömungsgeschwindigkeit [m/s], A die Öffnungsfläche [m²] und x die Ausdehnung des Luftspalts orthogonal zur Öffnungsfläche [m]. Die Gleichungen 3 und 4 gelten für Hohlräume, die aus einer konstanten Richtung belüftet werden. Für variierende Windrichtungen wird die LWR überschätzt. Bei laminaren Strömungen zwischen zwei parallelen Platten entspricht das Geschwindigkeitsprofil der Strömung einer Parabel mit maximalen Geschwindigkeiten in der Mitte des Luftspalts und minimalen Geschwindigkeiten an den Grenzflächen (Haftbedingung). Das Verhältnis zwischen maximaler und gemittelter Strömungsgeschwindigkeit beträgt 0,67 für laminare Strömungen mit Reynoldszahlen bis 5700 (Falk und Sandin, 2013). Für die Hinterlüftung der VertiKKA ergibt sich bei 20°C Lufttemperatur, einer Spaltbreite von 12 cm und einer Strömungsgeschwindigkeit von maximal 2,5 m/s eine Reynoldszahl von 1950 (laminarer Bereich). Dennoch handelt es sich bei den Gleichungen 3 und 4 um eine grobe Näherung, nicht zuletzt, da die laminare Strömung durch die Verstrebungen der Unterkonstruktion, die 5 cm tief in den Spalt reichen, gestört wird und die Strömungsgeschwindigkeit lediglich an einem Punkt gemessen werden kann.

Daher wird ein weiterer Ansatz nach Rahiminejad et al. (2021) verfolgt, bei dem der Volumenstrom nicht aus der Strömungsgeschwindigkeit im Luftspalt, sondern aus einer horizontalen Windkomponente und

einer vertikalen thermischen Komponente (Kamineffekt) unter Verwendung der lokalen Windgeschwindigkeit und -richtung resultiert. Daher werden im oben genannten Messzeitraum zusätzlich ein Schalenanemometer mit einem Messbereich von 0,5 bis 50 m/s (Genauigkeit $\pm 0,5$ m/s $\pm 3\%$ v. Mw., Auflösung 0,1 m/s) sowie ein Windrichtungsgeber (Genauigkeit $\pm 5^\circ$, Auflösung $11,25^\circ$) am Reallabor auf mittlerer Höhe der VertiKKA mit einem Wandabstand von 40 cm installiert. Aus den Messdaten erfolgt die Berechnung des Volumenstroms durch:

$$Q_{Wind+Therm} = \sqrt{Q_{Wind}^2 + Q_{Therm}^2} \quad (5)$$

$$\text{mit } Q_{Wind} = [0,04 + 0,12 \cdot \cos(\pi + W)] \quad (6)$$

$$\text{und } Q_{Therm} = C_D A \sqrt{\frac{2g\Delta H_{NPL}|\theta_{e,cav} - \theta_e|}{\theta_e}} \quad (7)$$

Dabei ist W die lokale Windrichtung $[\circ]$, C_D der Auslasskoeffizient $[-]$, welcher abhängig von der Öffnungsgeometrie zwischen 0 und 1,5 liegt (ASHRAE, 2009), g die Erdfallbeschleunigung $[m/s^2]$ und ΔH_{NPL} die Höhe des neutralen Druckniveaus ab der Unterkante der Öffnungsfläche $[m]$, welche laut ASHRAE (2009) mit der halben Öffnungshöhe abgeschätzt werden kann. $\theta_{e,cav}$ ist die durchschnittliche Lufttemperatur im Spalt $\theta_{2,1}$ (Abbildung 2) und θ_e die Lufttemperatur der Umgebung $[\circ C]$. Die Berechnung kann für stündliche Werte oder unter Verwendung der Software EnergyPlus automatisiert für jeden Zeitschritt erfolgen. Die ermittelten Volumenströme werden anschließend miteinander verglichen und diskutiert.

Grauwasseraufbereitung

Die Grauwasserreinigung der VertiKKA basiert auf der Kombination des Biofilmverfahrens mit der Filterwirkung des Reinigungssubstrats und kann mit traditionellen Systemen wie Tropfkörpern und bepflanzten Bodenfiltern verglichen werden. Zunächst besteht das Ziel darin, zu überprüfen, ob das aufbereitete Grauwasser den Anforderungen für eine direkte Einleitung den Vorgaben der Abwasserverordnung Anhang I (BGBI. I 2004, 1118 - 1119), Größenklasse I entspricht. Eine weitergehende Überprüfung erfolgt im Hinblick auf die Möglichkeit der Wasserwiederverwendung. Dabei werden die Kriterien und Vorgaben der EU-Verordnung 2020/741 zur Wasserwiederverwendung, die DIN EN 16941-2 und die Empfehlung der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall DWA-M 277 berücksichtigt.

Grauwassercharakteristik

Die Grauwassersammlung erfolgt in einem Kellerraum eines Mehrfamilienhauses in Weimar. Der angeschlossene Strang ermöglicht die Sammlung von 100% des anfallenden Grauwassers, das sowohl stark als auch schwach belastetes Grauwasser von durchschnittlich 16,5 Personen beinhaltet. Der Tank verfügt über ein Fassungsvermögen von 750 L und wird durch das anfallende Grauwasser von 60 L/Pers/d innerhalb eines Tages vollständig gefüllt. Diese Menge reicht aus, um das Reallabor für ca. 3,5 Tage zu beschicken.

Die Vorbehandlung des Grauwassers erfolgt durch einen Absetztank, der zunächst die Entfernung eines Großteils der Feststoffe ermöglicht, während Fette aufschwimmen und in einen nachgeschalteten Entnahmetank gelangen. Die Entnahme aus dem zweiten Tank erfolgt von unten, um die Fettschicht zu umgehen. Nach jedem Abpumpen des Grauwassers wird der Entnahmetank gereinigt, während die Reinigung des Absetztanks einmal monatlich durchgeführt wird. Das Grauwasser wird zunächst in einen mobilen Tank gepumpt und zum Reallabor transportiert. Am Standort des Reallabors wird das Grauwasser in einen Vorlagetank im Innenraum des Bestandsgebäudes überführt. Vor der Beschickung der Begrünungssysteme erfolgt eine weitere Vorbehandlung des Grauwassers durch ein Sieb, das zusätzliche Feststoffe entfernt. Diese Maßnahmen stellen sicher, dass das Reinigungssubstrat über einen längeren Zeitraum genutzt werden kann und die Lochbleche der VertiKKA zur Verteilung des Wassers sowie das Vlies nicht verstopfen.

Für eine Einordnung des realen Grauwassers aus Weimar und im Hinblick auf die zu erwartende Reinigungsleistung am Reallabor in Abhängigkeit der Grauwasserzusammensetzung wurden die Parameter CSB, biochemischer Sauerstoffbedarf nach 5 Tagen (BSB₅), TN_b und TP analysiert und mit dem synthetisch hergestellten Grauwasser aus den Voruntersuchungen von Aicher et al. (2022) verglichen. Der Vergleich deutet auf eine ähnliche Zusammensetzung der beiden Grauwässer hin. Der CSB ist im Median nahezu identisch mit der Konzentration des synthetischen Grauwassers. Das Grauwasser aus Weimar weist eine marginal höhere Konzentration an TP auf, dahingegen eine geringere Menge an TN_b, sowie eine minimal niedrigere Konzentration an BSB₅. Die Abschätzung der biologischen Abbaubarkeit kann durch das Verhältnis von Kohlenstoff (C), Stickstoff (N) und Phosphor (P) beschrieben werden. Das vorliegende C:N:P-Verhältnis lässt darauf schließen, dass im Reinigungssubstrat möglicherweise nur ein geringer biologischer Abbau zu erwarten ist, während die Filterwirkung überwiegen könnte. Dieser Effekt

konnte bereits von Aicher et al. (2022) beobachtet werden. Zu berücksichtigen ist, dass durch das mehrfache Umpumpen des Rohgrauwassers zum Reallabor zusätzlicher Sauerstoff in das System eingetragen wird und somit bereits im Vorfeld ein aerober Abbau der Grauwasserinhaltsstoffe stattfinden könnte.

Beschickung und Durchfluss

Das Grauwasser wird intervallweise auf das Tropfblech über dem Reinigungssubstrat des obersten Moduls der VertiKKA aufgebracht und nach dem Ablauf des ersten Moduls über das Lochblech flächig auf das darunterliegende Modul weitergeleitet (Reihenschaltung, Hauptbeschickungsweg in Abbildung 1, oben). Zudem besteht die Möglichkeit, jedes Modul einzeln zu beschicken sowie am Ablauf separat zu beproben (Parallelschaltung, zweiter Beschickungsweg in Abbildung 1, oben).

In einem vorangegangenen Projekt wurde die VertiKKA mit 75 L/m²/d beschickt (Aicher et al., 2022; Börmel et al., 2021). Aufgrund des aufwändigen Antransports des Grauwassers an das Reallabor ist jedoch eine Reduzierung der Beschickung auf 55 L/m²/d notwendig. Es wird erwartet, dass die Reinigungsleistung der Anlage durch die Verringerung der Zulaufmenge steigt, da sich die Aufenthaltszeit des Grauwassers im System erhöht und eine geringere Schadstofffracht vom System aufgenommen werden muss. Die Beschickung erfolgt stündlich über zwei Minuten. Somit ergibt sich eine Durchflussrate von 0,65 L/Modul/min und 1,94 L/Strang/min.

Die Durchflussmengen am Reallabor werden mittels magnetisch-induktiver Durchflusssensoren (Messbereich 5 bis 3000 mL/min, Genauigkeit $\pm(2\%$ v. Mittelwert + 0,5% v. Messbereichsendwert), Auflösung 1 mL/min) im Zulauf und Ablauf der Anlage gemessen. Durch Langzeitmessungen während des Regelbetriebs kann aus der Differenz des Zu- und Ablaufs die Verdunstung des Wassers durch Substrat und Pflanzen (Evapotranspiration) abgeschätzt werden. Zu erwarten sind deutliche Schwankungen, die vom Klima aber auch von der Wachstumsperiode der Pflanzen abhängen. Um die Nährstoffzufuhr für die Pflanzen zu gewährleisten, können die unteren Module über den zweiten Beschickungsweg zusätzlich mit Rohgrauwasser versorgt werden (Abbildung 1, oben). Zum Erhalt des Biofilms wird jedoch eine möglichst konstante Beschickung der Anlage angestrebt.

Grauwasseranalyse

Vor dem Regelbetrieb der Anlage ist eine Einfahrzeit zu berücksichtigen. In dieser Zeit baut sich der Biofilm auf und die Ablaufwerte stabilisieren sich. Für

die VertiKKA wird eine Einlaufphase von 55 Tagen basierend auf den bisher erfolgten Untersuchungen (Börmel et al., 2021) angenommen und messtechnisch überprüft. Während der Einfahrzeit wird die Anlage zweimal wöchentlich sowie im Regelbetrieb einmal wöchentlich jeweils am Zu- und Ablauf der Module beprobt. Bei den Abläufen der jeweils oberen zwei Module handelt es sich um Stichproben. Am Gesamtablauf jedes Stranges wird eine 24-Stunden-Mischprobe entnommen. Die Probenmengen variieren abhängig von den analysierten Parametern, wobei Zulauf und Ablauf der 24-Stunden-Mischprobe 2–3 L und Stichproben 1 L umfassen.

Die überwiegend nasschemischen Analysen erfolgen mit Hilfe von Küvettentests und einem Photometer. Dabei werden Parameter wie CSB, CSB_{filtriert}, TP, ortho-P, TN_b, Ammonium (NH₄-N), Nitrat (NO₃-N) und Nitrit (NO₂-N) untersucht. Die notwendigen Messbereiche der Küvetten für die Abläufe der Module werden anhand der Ablaufergebnisse vorheriger Messungen abgeschätzt. Da sich die Beschickungsmenge, die Modulmaße und die Grauwasserzusammensetzung von den Voruntersuchungen unterscheiden, kann zur Festlegung der Messbereiche ein iterativer Prozess notwendig werden. Darüberhinaus erfolgen Messungen des pH-Werts (Messbereich 0 bis 14 pH, Genauigkeit $\pm 0,004$ pH, Auflösung 0,001 pH) der Leitfähigkeit (Messbereich 1 μ S/cm bis 2000 mS/cm, Genauigkeit $\pm 0,5\%$ v. Mw., Auflösung 0,01 bis 1 je nach Messbereich), der Trübung (Messbereich 0 bis 4000 FNU, Genauigkeit 0,0 bis 999,9 FNU/NTU: 0,3 FNU oder $\pm 2\%$ v. Mw., 1000,0 bis 4000,0 FNU/NTU: $\pm 5\%$ v. Mw., Auflösung 0,1 FNU/NTU) und der O₂-Sättigung (Messbereich 0 bis 20 mg/L O₂, Genauigkeit $\pm 1,5\%$ v. Mw., Auflösung 1 mg/L O₂) mittels Messsonden. Zusätzlich werden die mikrobiologischen Parameter E-Coli und Gesamtcoliformen ermittelt. Auch die Analyse von BSB₅ und Feststoffen sind Bestandteil der Untersuchungen.

Die Reinigungsleistung der jeweiligen Parameter wird anhand folgender Gleichung ermittelt:

$$\eta_x = \frac{C_{x,Zu} - C_{x,Ab}}{C_{x,Zu}} \cdot 100\% \quad (8)$$

C bezeichnet die Konzentrationen des jeweils untersuchten Parameters x im Zu- oder im Ablauf der Begrünungssysteme.

Weiterhin wird die Korrelation zwischen Reinigungsleistung und Substrattemperatur untersucht. Die Substrattemperatur wird in den zwei obersten Modulen sowie im untersten Modul des linken Strangs gemessen. Dafür wird ein Thermistor (vgl. oben) in ein Aluröhrchen geschoben, dessen Innendurchmesser

dem des Sensorkopfes entspricht, und mittig im Substrat positioniert. Die im 10-Minuten-Intervall erfassten Messwerte werden je nach Intervall der Beprobung gemittelt.

Zusammenfassung

Das Reallabor dient dem Langzeitmonitoring der wandgebundenen Grünfassade VertiKKA, des Trogsystems und eines Referenzwandabschnitts, um die Auswirkungen beider Begrünungssysteme auf das hygrothermische Verhalten der Außenwand, das Mikroklima und die Grauwasserreinigungsleistung zu untersuchen. Die vorliegende Beschreibung ist Vorbereitung der wissenschaftlichen Praxis zu betrachten und sichert ein planvolles Vorgehen zur stringenten Datenerfassung mit hoher Messgenauigkeit. Eine umfassende Betrachtung systematischer und zufälliger Fehler erfolgt in der Auswertung während und nach den Messungen. In diesem Rahmen nicht diskutiert werden konnten das Monitoring der Pflanzenvitalität und des Wirkungsgrades der PV-Anlage unter Einfluss der dahinter befindlichen Begrünung bzw. der unbegrünten Wand. Diese Untersuchungen werden jedoch ebenfalls Teil der Messungen am Reallabor sein.

Danksagung

Diese Untersuchungen wurden im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Forschungsprojekts VertiKKA2: Umsetzung, Monitoring und Weiterentwicklung der vertikalen Klima-Klär-Anlage im Rahmen der Förderinitiative Ressourceneffiziente Stadtquartiere (RES:Z), Förderkennzeichen 033W108GN, durchgeführt. Wir bedanken uns für diese Unterstützung.

Literatur

Aicher, A., Börmel, M., Londong, J. und Beier, S. 2022. Vertical green system for gray water treatment: Analysis of the VertiKKA-module in a field test. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 976005.

Alsaad, H., Engelhardt, M. und Völker, C. 2022a. Messtechnische Untersuchung der Auswirkung von Fassadenbegrünungen auf den U-Wert der Außenwand. *Bauphysik*, 44(4), 211–219.

Alsaad, H., Hartmann, M., Hilbel, R. und Voelker, C. 2022b. The potential of facade greening in mitigating the effects of heatwaves in Central European cities. *Building and Environment*, 216, 109021.

Alsaad, H., Hartmann, M. und Voelker, C. 2022c. The effect of a living wall system designated for grey-water treatment on the hygrothermal performance of the facade. *Energy and Buildings*, 255, 111711.

ASHRAE 2009. *Handbook of Fundamentals: Chapter 16: Ventilation and Infiltration*. Atlanta, USA.

BGBI. I 2004, 1118 - 1119 (12-2004). *Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung - AbwV) Anhang 1 Häusliches und kommunales Abwasser*.

Börmel, M., Aicher, A., & Beier, S. 2021. *Vertikale Klimakläranlage zur Steigerung der Ressourceneffizienz und Lebensqualität in urbanen Räumen (Das Klima wandelt sich! - Was können wir tun?)*. DWA-Landesverband Thüringen/Sachsen.

Chen, Q., Li, B. und Liu, X. 2013. An experimental evaluation of the living wall system in hot and humid climate. *Energy and Buildings*, 61, 298–307.

DIN EN 12494 (11-1996). *Vor-Ort-Messung des Wärmedurchlasswiderstandes von Oberfläche zu Oberfläche*.

DIN EN 16941-2 (02-2021). *Vor-Ort-Anlagen für Nicht-Trinkwasser - Teil 2: Anlagen für die Verwendung von behandeltem Grauwasser*.

DWA-M 277 (10-2017). *Hinweise zur Auslegung von Anlagen zur Behandlung und Nutzung von Grauwasser und Grauwasserteilströmen*.

EU-Verordnung 2020/741 (25.05.20). *Mindestanforderungen an die Wasserwiederverwendung*. (ABl. L 177, S. 32).

Falk, J. und Sandin, K. 2013. Ventilated rainscreen cladding: Measurements of cavity air velocities, estimation of air change rates and evaluation of driving forces. *Building and Environment*, 59, 164–176.

Hartmann, M., Alsaad, H., Mosayebzadeh, M. und Voelker, C. 2023. The reduction of building energy demand by a living wall system in a Central European climate. *Proceedings of Building Simulation 2023*, Shanghai, China.

Paskert, T., Alsaad, H. und Voelker, C. 2022. Airflow through a facade greening system equipped with vertical photovoltaic modules. *Proceedings of BauSim2022*, Weimar, Deutschland.

Rahiminejad, M. und Khovalyg, D. 2021. Review on ventilation eates in the ventilated air-spaces behind common wall assemblies with external cladding. *Building and Environment*, 190, 107538.

Souza, L. C. O., Souza, H. A. und Rodrigues, E. F. 2018. Experimental and numerical analysis of a naturally ventilated double-skin facade. *Energy and Buildings*, 165, 328–339.

Tudiwer, D., Vertal', M., Korjenic, A. und Čakyová, K. 2019. Abbildung der wärmedämmenden Wirkung eines fassadengebundenen Begrünungssysteme in einem Simulationsmodell. *Bauphysik*, 41(3), 155–161.

Van de Walle, A. et al. 2023. Greywater reuse as a key enabler for improving urban wastewater management. *Environmental Science and Ecotechnology*, 100277.

SESSION A · 07.03.2024

Thema: Building Performance Simulation

Kooperationspartner

R
P **TU** Rheinland-Pfälzische
Technische Universität
Kaiserslautern
Landau

Bauhaus-
Universität
Weimar

WBA

WBA | Bauhaus Weiterbildungs-
akademie Weimar e.V.
Institut an der
Bauhaus-Universität Weimar



EINFLÜSSE UNTERSCHIEDLICHER EINGANGSDATEN AUF DIE QUARTIERSSIMULATION: UNTERSUCHUNG DER INTERAKTIONSEFFEKTE

Mara Geske, Conrad Völker

Bauhaus-Universität Weimar, Deutschland, E-Mail: mara.geske@uni-weimar.de

Kurzfassung

Vor dem Hintergrund des Klimawandels und begrenzter Energieressourcen wird es immer wichtiger, die energetischen Anforderungen und Bedarfe des Gebäudebestandes mit Hilfe energetischer Quartiersmodellierung zu analysieren und zu optimieren. Ziel dieser Studie ist es, die Auswirkungen verschiedener Eingangsparameter, wie z.B. die U-Werte der thermischen Gebäudehülle, und damit verbundener Unsicherheiten, wie beispielsweise eine eventuell bereits erfolgte energetische Sanierung, zu analysieren. Durch die Kombination der Analyse von Haupteffekten mit Interaktionseffekten wird die Reaktion des Modells auf seine Zielgröße, den Heizwärmebedarf, umfassend analysiert. Die Ergebnisse tragen zu einem besseren Verständnis von Unsicherheiten in den Eingangsdaten und den daraus resultierenden Interaktionen bei.

Abstract

Due to climate change and limited energy resources it is becoming increasingly important to analyse and optimise the energy performance and the energy supply of the building stock using Urban Building Energy Modelling (UBEM). This study aims to analyse the effect of different input parameters, such as the u-value of the envelope, and associated uncertainties that may arise due to energy-efficient refurbishment. By combining the analysis of the total effects with the interaction effects, the response of the model is comprehensively analysed in its target variable, the heating demand. The findings contribute to increasing knowledge on the influence of uncertainties of input data and the resulting interaction effects on UBEM case studies.

Einleitung

Um das Ziel der Klimaneutralität bis 2045 zu erreichen, ist eine zeitnahe Wärmewende notwendig. Diese Notwendigkeit wird durch aktuelle Gesetzesvorhaben unterstrichen (vgl. Wärmeplanungsgesetz). Grundlage solcher Planungen sind energetische Modelle und Simulationen auf

Quartiersebene, sogenannte Urban Building Energy Modelling (UBEM), die laut einer Übersichtsstudie von Malhotra et al. (2022) zu 95% nicht reproduzierbar sind. Ein Grund dafür sind lückenhafte Daten zum Gebäudebestand, weshalb 67% der Simulationen auf subjektiven Annahmen in Kombination mit Gebäudetypologien basieren (Malhotra et al., 2022).

In einer bereits durchgeführten Studie von Geske et al. (2023) wurde eine schrittweise Datenanreicherung eines Quartiersmodells durchgeführt. Darauf aufbauend wurde eine Unsicherheitsanalyse auf Basis der Modellgebäude der Deutschen Gebäudetypologie (Loga et al., 2015) durchgeführt. Die Datenanreicherung stellte hierbei unterschiedliche Informationsgehalte wie zum Beispiel Sanierungsstände und Gebäudenutzungen dar. Die Ergebnisse konnten die unterschiedlichen Haupteffekte der eingehenden Unsicherheiten auf die Zielgröße, den Heizwärmebedarf, erklären. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen werden in der vorliegenden Studie die Interaktionseffekte untersucht, um die Reaktion der Zielgröße umfassender darzustellen.

Diese Analyse der Interaktionen ermöglicht ein besseres Verständnis der Fehlerfortpflanzung in der Quartierssimulation. Damit trägt diese Studie zu einem besseren Umgang mit Unsicherheiten und dem damit verbundenen Verständnis von Einflüssen im übergeordneten Kontext der Wärmewende dar.

Wie bereits einleitend erwähnt, wird aufgrund mangelnder Daten häufig auf subjektive Einschätzungen und/oder sogenannte Defaultwerte zurückgegriffen (Ahern & Norton, 2020). Es existieren verschiedene Ansätze zur Beschreibung der daraus resultierenden unterschiedlichen Qualität der Eingangsdaten, wie beispielsweise von Mathur et al. (2021). Allerdings hat sich bisher kein Schema etablieren können.

Vor dem Hintergrund der Wärmewende steigen die Anwendungsfälle energetischer Quartierssimulation mit unterschiedlichen Datenqualitäten und damit auch der Bedarf den Einfluss von Ungenauigkeiten der Eingangsdaten auf die energetische Quartiers-

modellierung besser zu verstehen. Der Einfluss der verschiedenen Eingangsdaten und ihren Unsicherheiten ist im Bereich des UBEM noch nicht umfassend analysiert worden.

Einzelne Studien haben sich dieser Thematik auf unterschiedliche Weisen genähert. Wie bei Mosteiro-Romero et al. (2017) erfolgt hierbei meist die Untersuchung des Einflusses der gesamtmöglichen Parameterbereiche und nicht der Einfluss durch die Ungenauigkeiten, welche bspw. aus der Verwendung typologiebasierter Angaben stammen. Die Einflüsse von Ungenauigkeiten wurden in den bisher erfolgten Studien insbesondere vor dem Hintergrund unterschiedlicher Modellierungsansätze analysiert, wie in einer Studie von PrataViera et al. (2022) mit dem Fokus auf den Einfluss der thermischen Zonierung. Die Übertragbarkeit dieser Erkenntnisse auf die Qualität der Modellierungsergebnisse im Rahmen der kommunalen Wärmeplanung in Deutschland ist bisher kaum möglich.

Um diese Forschungsfrage zu beantworten führten Geske et al. (2023) eine Unsicherheitsanalyse auf Basis einer schrittweisen Datenanreicherung fort. Der Fokus dieser Studie lag auf den Haupteffekten der als mit Unsicherheiten behafteten Parameter. Der Haupteffekt eines Parameters beschreibt den direkten Einfluss auf die abhängige Variable.

Um den Einfluss der Unsicherheiten der Eingangsdaten auf das Ergebnis einer energetischen Modellierung weitergehend zu analysieren ist es notwendig die Gesamtvarianz des Modelles zu betrachten. Neben den Haupteffekten gehen in diese weiterhin die Interaktionseffekte sowie die Fehlervarianz ein, siehe Abbildung 1. Vor dem Hintergrund der energetischen Quartierssimulation liegt beispielsweise eine Interaktion zwischen der energetischen Qualität der Gebäudehülle und dem Einfluss der Solltemperatur auf den Heizenergiebedarf vor. Mit zunehmender energetischer Qualität der Gebäudehülle nimmt dieser Einfluss ab.

Die Fehlervarianz beschreibt darüber hinaus die Varianz, die nicht auf die untersuchten Parameter zurückzuführen ist. Es kann sich hierbei entweder um zufällig bedingte Störeffekte oder um nicht untersuchte Variable, sogenannte Störvariable, handeln. Im Rahmen dieser Untersuchung werden zunächst die Haupteffekte aus der Unsicherheitsanalyse von Geske et al. (2023) dargestellt. Darauf aufbauend erfolgt die Analyse der



Abbildung 1: Zusammensetzung der Gesamtvarianz beschrieben für ein theoretisches Beispiel mit zwei Parametern (i und j)

Interaktionseffekte und eine abschließende Einordnung.

Unsicherheitsanalyse

Die vorangegangene Studie von Geske et al. (2023) konzentrierte sich auf eine Unsicherheitsanalyse, die auf den Ergebnissen einer Case Study aufbauen. Diese Daten bilden die Grundlage für diese Studie und werden im Folgenden kurz dargestellt. Der Workflow der Unsicherheitsanalyse unterteilt sich in 4 Schritte, siehe Abbildung 2 und wird in dieser Struktur aufgegriffen.



Case study Abstraktion Simulation Auswertung

Abbildung 2: Workflow der Studie von Geske et al. (2023)

Schritt 1: Case study

Zu Beginn der Untersuchung wurde am Beispiel der Innenstadt von Königsee, ein Quartier mit 299 Gebäuden im ländlichen Raum Thüringens eine schrittweise Datenanreicherung durchgeführt. Die Modellierung des Quartiers erfolgte mit der von Fonseca et al. (2015) entwickelten Software City Energy Analyst (CEA). Die folgende Abbildung 3 zeigt die fünf Anreicherungsschritte von reinen Defaultwerten zu einem immer angepassten Quartiersmodell.

Der simulierte Heizwärmebedarf sank mit jedem Anreicherungsschritt. Diese kontinuierliche Reduktion von insgesamt über 35% des Heizwärmebedarfs ist ein Effekt der worst-case Annahmen in den Defaultwerten. Die resultierenden Szenarien 0 bis 5 dienen als Grundlage zur ausreichenden Beschreibung der aufgezeigten Unsicherheiten, in Schritt 2: Abstraktion.

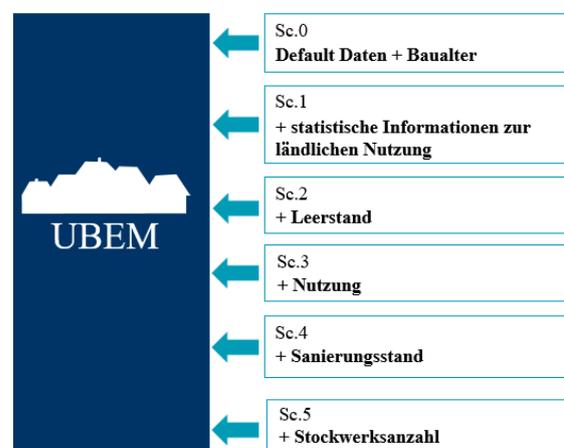


Abbildung 3: Darstellung der Anreicherungsschritte aus Geske et al. (2023)

Schritt 2: Abstraktion

Nach der Simulation dieser sechs Szenarien wurden die betroffenen Inputparameter analysiert. Der Fokus hierbei lag auf dem Intervall der Schwankung (variation interval) sowie der Form der Verteilungsfunktion (probability density function auch als pdf abgekürzt).

Wie auch in der Studie von Prativiera et al. (2022) wurden dreieckige pdf verwendet. Zur mathematischen Beschreibung der pdf wurden einerseits die Grenzen des Intervalls (von X_{\min} bis X_{\max}), wie auch die Lage des Maximalwertes innerhalb des Intervalls p_{PEAK} verwendet.

$$p_{\text{PEAK}} = \frac{X_{\text{PEAK}}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

p_{PEAK} = Lage des Maximalwertes innerhalb des Intervalls

X_{PEAK} = Wert des Maximalwertes

X_{\max} = maximale Intervallgrenze

X_{\min} = minimale Intervallgrenze

Insgesamt wurden 7 Parameter ermittelt, welche in der nachfolgenden Tabelle 1 aufgelistet sind. Bei diesen Parametern handelt es sich um zwei Parameter zur Beschreibung der Geometrie der Gebäude, drei Parameter zur Beschreibung der Eigenschaften der thermischen Hüllfläche und zwei Parameter zur Nutzung.

Tabelle 1: Parameter der Unsicherheitsanalyse aus Geske et al. (2023)

	PARAMETER	p_{PEAK}	INTERVALL
1	Δ STOCKWERKSANZAHL	0,52	-2,36 BIS 1,46
2	GESCHOSSHÖHE	0,5	2,5m BIS 4m
3	U-WERT FENSTER	0,5	± 40 %
4	LUFTDICHTHEIT	0,5	± 40 %
5	U-WERT WAND	0,5	± 20 %
6	BEHEIZTER ANTEIL	0,65	0,6 BIS 1
7	SETPOINT HEIZUNG	0,33	18°C BIS 24°C

Schritt 3: Simulation

Für die Unsicherheitsanalyse wurde auf die Beispielgebäude der deutschen Gebäudetypologie von Loga et al. (2015) zurückgegriffen. Die Ein- (EFH) und Mehrfamilienhäuser (MFH) der Baualtersklassen A (<1859) bis L (> 2002) wurden als Musterquartier in der Software CEA (v.3.32.0) erstellt. Anschließend wurde eine statistische Unsicherheitsanalyse anhand der Erweiterung von Saltelli et al. (2010) der Methode von Sobol durchgeführt. Für die Programmierung wurde auf die Python-Bibliothek Salib von Usher et al. (2016) zurückgegriffen. In einem Preprocessing wurden die jeweiligen Parameterkonstellationen erstellt und für CEA als Simulationsdateien

vorbereitet. Anschließend folgte die automatisierte Simulation dieser 1.024 Simulationsdateien mit jeweils allen Gebäuden des Musterquartiers. Durch ein Postprocessing wurden die Heizwärmebedarfe ausgelesen und in Verbindung mit den Parameterkonstellationen ausgewertet.

Schritt 4: Auswertung

Die Auswertung dieser Analyse konzentrierte sich auf die Haupteffekte S_1 der betrachteten Unsicherheiten, siehe Abbildung 4. Der Haupteffekt oder auch direkte Effekt beschreibt den Einfluss eines Parameters x_1 auf die Ausgabe des Modells, welcher ohne die Unsicherheit von x_1 eliminiert ist.

$$S_1 = \frac{V(E(y|x_1))}{V(y)} \quad (2)$$

S_1 = Haupteffekt von Parameter 1; $V(E(y|x_1))$ bedingte Varianz, des Effektes erster Ordnung von x_1 auf y ; $V(y)$ = Varianz ohne Effekt von x_1

Bei der Auswertung der unterschiedlichen Baualtersklassen und Gebäudearten (EFH und MFH) fiel insbesondere auf, dass die beiden stärksten Einflüsse die energetische Qualität der thermischen Gebäudehülle sowie die Kubatur darstellen. Daraus ergibt sich besonders für die Mustergebäude der MFH eine große Streuung durch sich ändernde Kubaturen und dadurch resultierende A/V-Verhältnisse.

Für die Mustergebäude der EFH lassen sich durch weniger Änderungen an der Kubatur stärker die Effekte durch die zunehmende energetische Qualität der Gebäudehülle analysieren. Der Einfluss der Stockwerksanzahl und der Luftdichtheit nehmen mit einem älteren Baualter zu. Entgegengesetzt steigt der Einfluss des Setpoints der Heizung für jüngere Baualter. Für detailliertere Informationen wird auf die vorangegangene Studie von Geske et al. (2023) verwiesen.

Analyse der Interaktionseffekte

Für die Analyse der Interaktionseffekte in diesem Konferenzbeitrag wurde ein beispielhaftes Mustergebäude aus der vorangegangenen Studie herausgegriffen. Dabei handelt es sich um das Mehrfamilienhauses der Baualtersklasse A, da dieses Mustergebäude die Ergebnisse mit den größten Konfidenzintervallen liefert.

Zu Beginn wurde die Zusammensetzung der Gesamtvarianz betrachtet um einschätzen zu können, wie groß der Anteil und damit auch der Einfluss der Interaktionseffekte ist, siehe Abbildung 4. Hierfür wurden die Haupteffekte von Geske et al. (2023) verwendet. Anschließend wurden die Interaktionseffekte S_{ij} entsprechend

$$S_{ij} = \frac{V(E(y|x_i, x_j)) - V(E(y|x_i)) - V(E(y|x_j))}{V(y)} \quad (3)$$

S_{ij} = Interaktionseffekt von Parameter i auf Parameter j

berechnet. Dieser Wert beschreibt, dass eine Variable den Effekt einer anderen Variable auf eine gemeinsame abhängige Größe beeinflusst. Im vorliegenden Beispiel, kann man sich einen solchen Effekt vorstellen, in dem z.B. durch eine effizientere Gebäudehülle, der Einfluss der Nutzung auf den Heizenergiebedarf gesenkt wird. Die Fehlervarianz lässt sich darauf aufbauend, entsprechend Abbildung 1, errechnen, da alle anderen Größen bekannt sind.

Bei der Analyse der Zusammensetzung der Gesamtvarianz fällt auf, dass ein sehr großer Anteil von ca. 92% durch die Haupteffekte verursacht wird. Die Interaktionseffekte und die Fehlervarianz wirken mit einem kleinen Anteil von je ca. 4% auf die Gesamtvarianz ein. Insbesondere im Vergleich zu den drei Parametern mit den größten Haupteffekten, die jeweils mehr als 20% der Gesamtvarianz erklären, zeigt sich, dass die Interaktionseffekte bei vergleichbarer Datenlage keinen zusätzlichen signifikanten Einfluss haben.

Die Fehlervarianz kann in diesem vorgestellten Beispiel einerseits durch die Anzahl an Parametervariationen von 1.024 verursacht sein. Andererseits können sich in dieser Varianz Interaktionen mit nicht untersuchten Parametern wie durch Unsicherheiten aus den Nutzungsprofilen widerspiegeln.

Die Interaktionseffekte der Unsicherheiten sind nach dieser ersten Untersuchung mit ca. 4% als eher gering einzustufen. Allerdings hängt die Ausprägung stark von der Höhe der Unsicherheit ab. Im Fall größerer Unsicherheiten können sich diese Interaktionen auch einen stärkeren Einfluss zeigen. Eine mögliche Ursache für größere Unsicherheiten wäre die Simulation mit unbekanntem oder sehr unsicheren Baualtern, wie bei der Simulation auf Grundlage statistisch gemittelter Baualter.

Bei einer symmetrischen Verteilung von Unsicherheiten kommt es zusätzlich zu einem sich ausgleichenden Effekt über eine große Anzahl an Gebäuden. Daher ist ein deutlich größerer Effekt zu erwarten, wenn asymmetrische Unsicherheiten vorliegen, denn dann tritt kein ausgleichender Effekt ein. Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn über ein Quartier die Baualter bekannt sind aber keine Sanierungsstände.

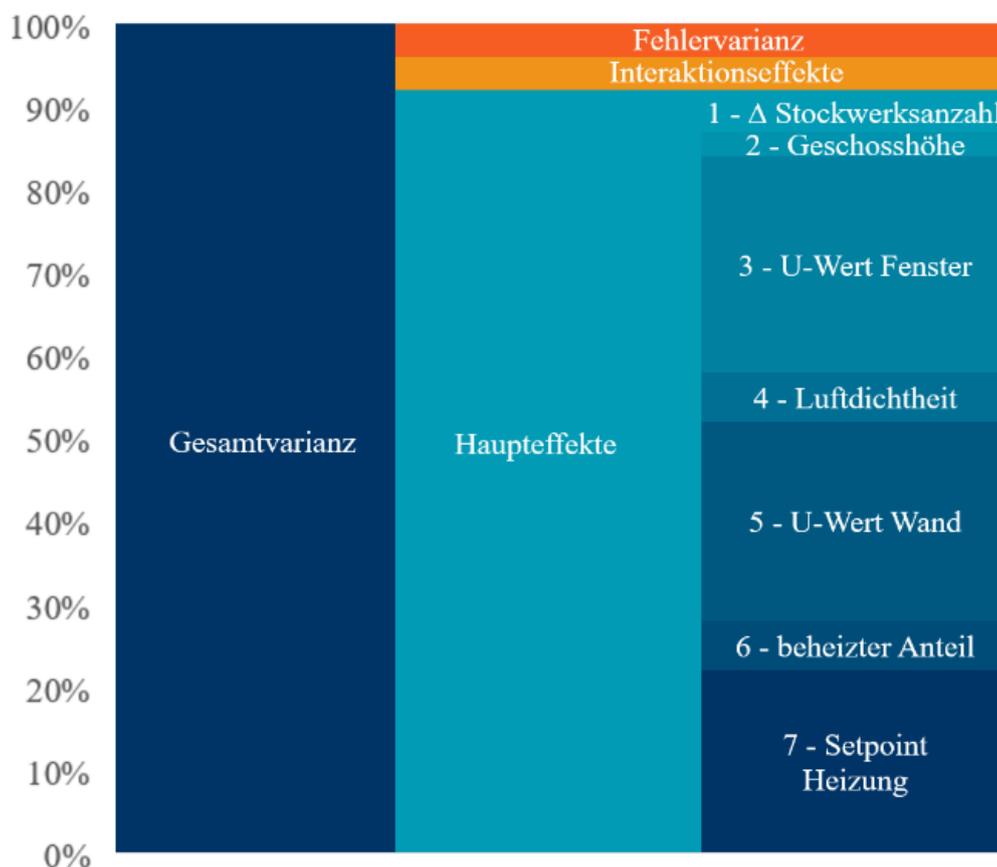


Abbildung 4: Zusammensetzung der Gesamtvarianz aus Haupteffekten, Interaktionseffekten und der Fehlervarianz für das Mustergebäude MFH A

In der nachfolgenden Abbildung 5 sind die Interaktionseffekte dargestellt. Ein negatives Vorzeichen weist in diesem Zusammenhang auf einen Einfluss von Parameter j auf Parameter i hin. Keiner der untersuchten Effekte fällt nur in einer Parameterkombination auf. Parameter 3 – U-Wert Fenster, 5 – U-Wert Wand und 7 – Setpoint Heizung verursachen die stärksten Interaktionen im Bereich von 0,2 % bis 0,4 % der Gesamtvarianz. Diese 3 Parameter zeichneten sich bereits durch die stärksten Haupteffekte aus. Der größte Interaktionseffekt, der im Rahmen dieser Studie aufgezeigt wurde ist $S_{3,5}$ mit einem Anteil an der Gesamtvarianz von 0,39% (Interaktionseffekt von Parameter 3 – U-Wert Fenster auf 5 – U-Wert Wand). Insbesondere die 6 Interaktionseffekte im Bereich von -0,1% bis 0,1% der Gesamtvarianz zeigen Parameterkonstellationen auf, in denen kaum Interaktionseffekte bestehen.

Zusammenfassung und Ausblick

Durch diese Studie kann ein erster Rückschluss auf die Interaktionseffekte in der Quartierssimulation gezogen werden. Anteilig an der Gesamtvarianz verursachen die untersuchten Interaktionseffekte nur einen kleinen Anteil von ca. 4%. Infolge dessen lässt sich aufzeigen, dass die Interaktionseffekte im Falle einer vergleichbaren Datengrundlage keinen zusätzlichen, wesentlichen Einfluss aufweisen. In dem

untersuchten Beispiel stellte sich heraus, dass die Fehlervarianz ungefähr genauso einflussreich wie die genauer analysierten Interaktionseffekte ist.

Zusätzlich bestätigen die Ergebnisse dieser Arbeit den verbreiteten Ansatz, dass sich Effekte aus Unsicherheiten bei einer großen Gebäudeanzahl gegenseitig ausgleichen. Zugleich zeigen sie auf, dass Unsicherheiten bei größeren Variationsintervallen und/oder asymmetrischen Auftretswahrscheinlichkeiten unbedingt analysiert werden sollten. Unter Berücksichtigung dieser Effekte ist es von großer Bedeutung Unsicherheiten mathematisch ausreichend zu beschreiben und im Kontext der energetischen Quartierssimulation als Mehrwert anzusehen. Durch diese Informationen können zu erwartende Schwankungen abgeschätzt werden und bei der Weiterverwendung der Simulationsergebnisse Berücksichtigung finden. Eine Möglichkeit hierfür wäre die probabilistische Simulation, welche besonders vor dem aktuellen Hintergrund anstehender kommunalen Wärmeplanung weiterverfolgt werden sollte. Im Zusammenspiel mit der Planung von Energieversorgungssystemen bietet das Wissen über zu erwartende Schwankungen einen deutlichen Mehrwert.

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass sowohl bei der vorangegangenen Analyse der Haupteffekte

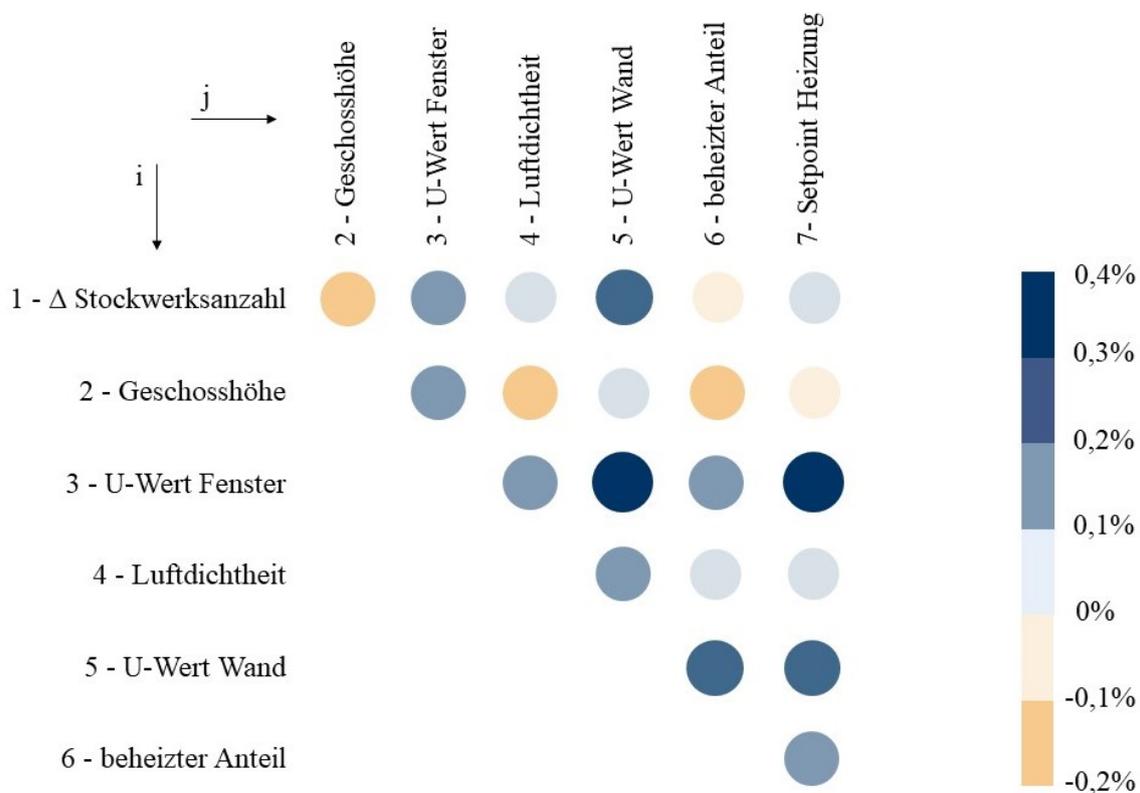


Abbildung 5: Matrix der Interaktionseffekte S_{ij} für der Analyse des Mustergebäudes MFH A, angegeben als prozentualer Anteil an der Gesamtvarianz

der einzelnen Parameter, als auch in dieser Untersuchung ein großes Risiko durch unbekannte Sanierungsstände festgestellt wurde. Gegenwärtig entsteht diese Fehlerquelle durch eine Kombination aus schlechter Datenverfügbarkeit und fehlenden objektiven Methoden zur Datenerhebung. Insbesondere objektive Methoden zur Datenerhebung stellen ein großes Potential dar. Zugleich sollte versucht werden, an bestehende Daten anzuknüpfen und beispielsweise Methoden zur objektiv begründeten Verbesserung bestehender Datensätze zu entwickeln.

Literatur

- Ahern, C.; Norton, B. 2020. Energy Performance Certification: Misassessment due to assuming default heat losses, *Energy and Buildings*, 10.1016/j.enbuild.2020.110229.
- Benz, A.; Geske, M.; Voelker, C., 2022. Machine learning for image-based recognition of building age for urban energy simulation - testing and validation on an exemplary city quarter. In: *Proceedings of BauSIM*, Weimar, Deutschland, September 2022.
- Fonseca, J.; Thomas, D.; Hsieh, S. et al. 2022. architecture-buildingsystems/cityenergyanalyst: v3.32.0. 10.1016/j.enbuild.2017.07.059.
- Geske, M.; Engels, M.; Benz, A. et al. 2023. Impact of Different Input Data on Urban Building Energy Modeling for the German Building Stock. In: *Proceedings of Building Simulation*, Shanghai, China, September 2023.
- Lange, T. 2021. Immobilien: Der Klimawandel als Herkulesaufgabe, docs.dpaq.de/17786-immobilien und klimawandel dzbank.pdf.
- Loga, T.; Stein, B.; Diefenbach, N. et al. 2015. Deutsche Wohngebäudetypologie: Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden; erarbeitet im Rahmen der EU-Projekte TABULA. Institut für Wohnen und Umwelt, Darmstadt.
- Malhotra, A.; Bischof, J.; Nichersu, A. et al. 2022. Information modelling for urban building energy simulation—A taxonomic review, *Building an Environment*, 10.1016/j.buildenv.2021.108552.
- Mathur, A.; Fennell, P.; Rawal, R. et al. 2021. Assessing a fit-for-purpose urban building energy modelling framework with reference to Ahmedabad. *Science and Technology for the Built Environment* 27 (8), 10.1080/23744731.2021.1941248.
- Mosteiro-Romero, M.; Fonseca, J. A.; Schlueter, A. 2017. Seasonal effects of input parameters in urban-scale building energy simulation. *Energy Procedia* 122, 10.1016/j.egypro.2017.07.459.
- Prataviera, E.; Vivian, J.; Lombardo, G.; Zarrella, A. 2022. Evaluation of the impact of input uncertainty on urban building energy simulations using uncertainty and sensitivity analysis. *Applied Energy* 311, 10.1016/j.apenergy.2022.118691.
- Saltelli, A.; Annoni, P.; Azzini, I. et al. 2010. Variance based sensitivity analysis of model output. design and estimator for the total sensitivity index. *Computer Physics Communications* 181 (2), 10.1016/j.cpc.2009.09.018.
- TLBG, 2022. Thüringer Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation - www.Geoportal-Th.de, Datenlizenz Deutschland Namensnennung 2.0 (dl-by-de/2.0) ©GDI-Th.
- Usher, W., Herman, J.; Whealton, C. et al. 2016. Salib/salib: Launch!, 10.5281/zenodo.160164.



UNTERSUCHUNGEN ZUM EINFLUSS DES MIKROKLIMAS AUF DEN HEIZ- UND KÜHLENERGIEBEDARF IM GEBÄUDE

Steffen Landrock¹, Rebekka Regel¹, Gita Regel²

¹ Graner Ingenieure GmbH, Deutschland, E-Mail: bueror@graner-leipzig.de

² TU Dresden-IHI Zittau, Deutschland, E-Mail: gita.regel@mailbox.tu-dresden.de

Kurzfassung

Das Mikroklima in städtischen Außenräumen wird zum einen von den örtlichen Gegebenheiten wie der Vegetation, der Art und Beschaffenheit der Oberflächen und zum anderen von der vorhandenen Umgebungsbebauung beeinflusst. Durch die Wahl der Baumaterialien und Planung von Fassaden- und Dachbegrünungen können Gebäude einen Einfluss auf das Mikroklima nehmen. Im Rahmen dieser Untersuchung soll aufgezeigt werden, inwiefern sich das Mikroklima in den Sommer- und Wintermonaten auf das Raumklima in den Innenräumen auswirkt. Hierbei wird anhand eines Beispielprojektes der Einfluss des Außenraums (Umgebungsvegetation, Dachbegrünung, Oberflächenbeschaffenheit der Umgebung) auf das Innenklima im Gebäude analysiert. Es wird dargestellt, welche Auswirkungen die verschiedenen Parameter des Außenraums im Winter und im Sommer auf das Innenklima haben und wie sich infolgedessen der Heiz- und Kühlenergiebedarf im Gebäude selbst verändert.

Abstract

On one hand, outdoor microclimate in urban areas is influenced by the existence of urban vegetation such as urban trees, grass, and green roof plants. On the other hand, the type and nature of outdoor surfaces such as pavement and building materials can also have impacts on the microclimate. This analysis demonstrates how the microclimate in summer and winter months affects the indoor climate. Using a sample project, the influence of the outdoor environment (surrounding vegetation, roof greening, surface characteristics of the surroundings) on the indoor climate in the building is analyzed. It is explained how various parameters of the outdoor environment in winter and summer impact the indoor climate and influence the heating and cooling energy demand of the building.

Einleitung

Die fortschreitende Klimaerwärmung stellt eine der drängendsten Herausforderungen unserer Zeit dar und erfordert konkrete Maßnahmen im Bereich des Klimaschutzes. Deutschland hat sich ehrgeizige Klimaschutzziele gesetzt, darunter die Reduktion aller Treibhausgasemissionen um 65 % im Vergleich zu 1990. In diesem Kontext gewinnt der Beitrag des Gebäudesektors sowohl zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen als auch zur Klimaanpassung von Gebäuden zunehmend an Bedeutung.

In der vorliegenden Untersuchung wird der Einfluss des Mikroklimas auf ein Gebäude untersucht. Anhand eines exemplarischen Projekts, dem Neubau einer Schule in Dresden, sollen zwei verschiedene Szenarien betrachtet werden:

- Ausgangsvariante: keine Begrünung (weder im Außenraum, noch auf Dach oder Fassade)
- Variante 1: Begrünung im Außenraum und Dachbegrünung

Es wird eine mikroklimatische Simulation mittels ENVI-met durchgeführt. Die hier berechneten Ergebnisse werden im zweiten Schritt auf IDA ICE übertragen. Mithilfe von IDA ICE wird der Heiz- und Kühlenergiebedarf zweier exemplarischer Räume mit und ohne Einfluss des Mikroklimas untersucht.

Berechnungsgrundlagen

Untersuchungsobjekt

Die Untersuchungen wurden anhand eines Schulneubaus in Dresden durchgeführt. Es handelt sich bei dem Bauvorhaben um zwei Gebäude in Holzständerbauweise. Die thermische Hülle ist in Passivhaus-Bauweise geplant.

Im Gebäude sind leichte Trennwände in Holzständerbauweise sowie Geschossdecken in Holzbauweise mit schwimmenden Estrichen geplant. Die Fenster erhalten einen außenliegenden Sonnenschutz.

Klimadatensatz

Für die Berechnungen wurde der Klimadatensatz bezogen auf den Standort Dresden vom DWD für extreme Zukunfts-TRJ verwendet (extremer Sommer 2045 und extremer Winter 2045).

Simulationszeitraum

Aufgrund der sehr langen Simulationsrechenzeiten mit ENVI-met wurde rechnerisch ein Zeitraum von jeweils 48 Stunden im Sommer und Winter ausgewertet.

Gewählt wurde für den Sommerfall der gemäß Zukunfts-Klimadatensatz heißteste Tag (13. August) und der nachfolgende 14. August.

Für den Winterfall wurde mit dem gemäß Zukunfts-Klimadatensatz kältesten Tag (5. Januar) und dem nachfolgenden 6. Januar gerechnet.

Variantenbeschreibung

Für die vorliegende Untersuchung wurden folgende zwei Varianten betrachtet:

- Ausgangsvariante: keine Begrünung (weder im Außenraum, noch auf Dach oder Fassade)
- Variante 1: Begrünung im Außenraum und Dachbegrünung

Mit Berechnung der Ausgangsvariante wird also eine Variante ohne Einfluss des Mikroklimas berücksichtigt.

Mikroklimasimulationen

Simulationsumgebung

Auf dem Baufeld ist bereits ein hoher Begrünungsanteil vorhanden (s. Abb. 1).



Abbildung 1: Foto Untersuchungsgebiet Südwest-Ecke des Baufeldes

Auf der Fläche des Modellgebiets befinden sich insgesamt 223 Bäume (im Bestand und neu), bestehend

aus 18 Baumarten. Die Informationen zum Baumbestand wurden dem Baumplan der LH Dresden, Amt für Stadtgrün und Abfallwirtschaft entnommen.

Das Modellgelände umfasst insgesamt 226 m x 192 m. Das Simulationsmodell umfasst nicht nur das Schulgelände (zwei Gebäude sowie eine Sporthalle), sondern auch eine Kindertagesstätte und ein städtisches Gebäude (s. Abb. 2, Abb. 3). Für die vorliegende Untersuchung wurden zwei Räume näher untersucht:

- EG Nordfassade: Büroraum
- 3. OG Südfassade: Klassenraum

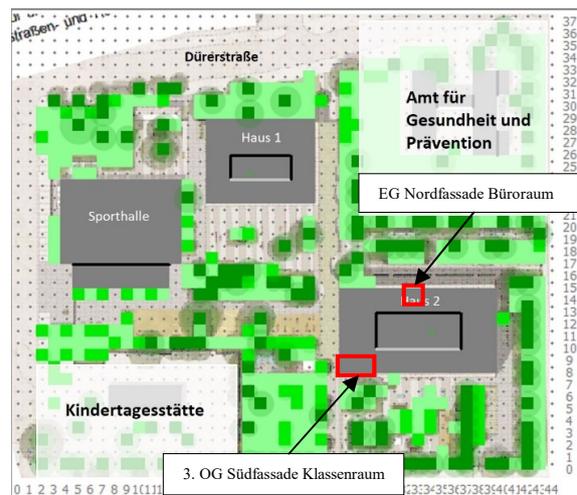


Abbildung 2: 2D-Lageplan Simulationsumgebung (ENVI-met) mit Position der zwei näher betrachteten Räume

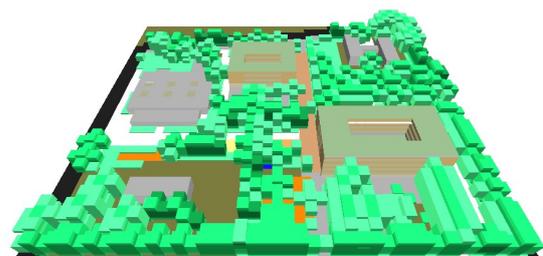


Abbildung 3: 3D-Modell Simulationsumgebung (ENVI-met)

Simulationsergebnisse und Analyse

Die Variante 1 wurde mit ENVI-met simuliert.

In Abbildung 4 ist die Lufttemperatur am 13. August um 12:00 Uhr in 1,50 m Höhe dargestellt. In Abbildung 5 ist die Lufttemperatur am 5. Januar um 12:00 Uhr in 1,50 m Höhe dargestellt.

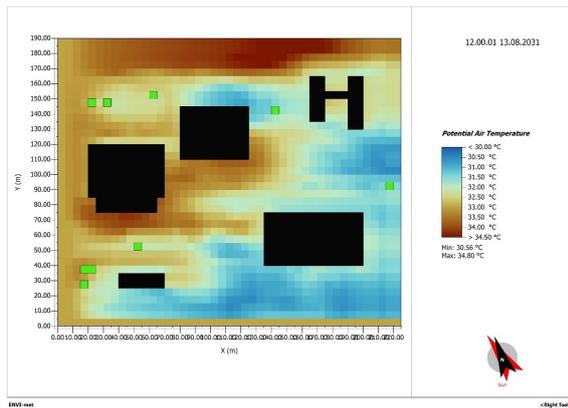


Abbildung 4: Lufttemperatur 13.08., 12:00 Uhr

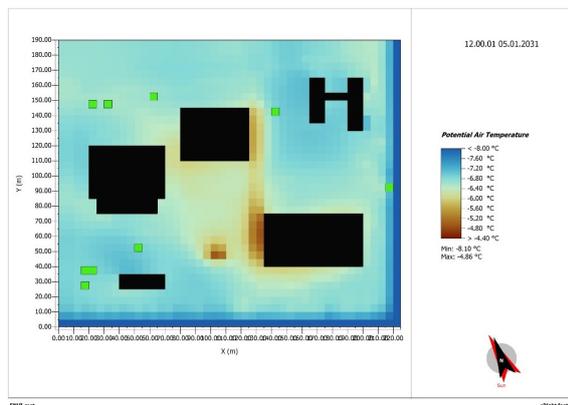


Abbildung 5: Lufttemperatur 05.01., 12:00 Uhr

Pflanzen können das Mikroklima durch verschiedene Mechanismen beeinflussen: Verschattung, langwellige Abstrahlung, Verdunstung und Windschutz.

Baumkronen können verhindern, dass direktes Sonnenlicht den Boden und andere Oberflächen erreicht, was zu niedrigeren Luft- und Oberflächentemperaturen im verschatteten Bereich führt. Gräser und kleinere Pflanzen können im Sommer den Boden vor Hitze schützen.

Pflanzen durchlaufen einen Verdunstungsprozess, bei dem Wasserdampf durch die Spaltöffnungen freigesetzt wird. Der Wasserdampf in der Luft trägt dazu bei, die Lufttemperatur abzukühlen und wirkt sich auch auf das lokale Luftfeuchtigkeitsniveau aus. Feuchtigkeit kann die Geschwindigkeit, mit der alle Oberflächen Wärme abgeben, verlangsamen, was zu einer Reduzierung der mittleren Strahlungstemperatur führt.

Nachts geben Bäume und andere Pflanzen die tagsüber aufgenommene Wärme an den kühlen Nachthimmel ab (nächtliche langwellige Abstrahlung), so dass infolgedessen die Lufttemperatur sinkt.

Wind kann Wärme von Oberflächen abtransportieren. Als Windschutz können Bäume und andere Pflanzen die Windgeschwindigkeit verlangsamen, wodurch weniger Wärme von Oberflächen abgeleitet werden

kann und somit der Wärmeverlust von den Wänden verringert wird. Im Sommer kann der Windschutzeffekt von Bäumen heiße Winde blockieren.

Diese von Pflanzen bereitgestellten natürlichen Mechanismen können also das Mikroklima beeinflussen.

Ohne Einfluss des Mikroklimas wurde in der Ausgangsvariante mit einer Außenlufttemperatur von 33,1 °C am 13.08. um 12:00 Uhr und -6,6 °C am 05.01. um 12:00 Uhr gerechnet.

Übertragung der Ergebnisse von ENVI-met auf IDA ICE

Um den Einfluss des Mikroklimas auf den Heiz- und Kühlergiebedarf zu ermitteln, erfolgte eine Übertragung der Ergebnisse von ENVI-met auf IDA ICE.

Als Ausgangsvariante wurde eine Berechnung des Heiz- und Kühlergiebedarfs ohne Einfluss des Mikroklimas durchgeführt.

Für die Ermittlung des Einflusses des Mikroklimas (Variante 1) wurden die in ENVI-met simulierten außenseitigen Oberflächentemperaturen (Fassaden und Dach) an das Berechnungsmodell angebunden. Diese berücksichtigen die mikroklimatischen Einflüsse der lokalen Windgeschwindigkeiten, des Gründachs, der Verschattungen durch Bäume und lokalen Lufttemperaturen. Bei den begrünten Flächen wurden die Oberflächentemperaturen unterhalb der Begrünung verwendet.

Um den Einfluss der Verschattung der umliegenden Bäume auf die solaren Strahlungseinträge über die Fenster in IDA ICE abbilden zu können, wurden diese in SketchUp modelliert und als Umgebungsver-schattung in IDA ICE berücksichtigt (s. Abb. 6).

Hierbei wurde im Winter eine Transparenz von 60 % für die Verschattungsberechnung berücksichtigt (Laubbäume ohne Blätter). Im Sommer wurde die Verschattung der Bäume mit einer Transparenz von 20 % berücksichtigt (Belaubung der Bäume im Sommer).

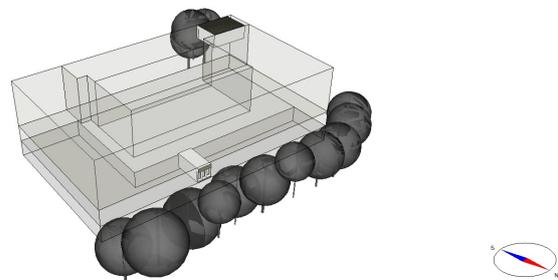


Abbildung 6: 3D-Gebäudemodell IDA ICE mit Verschattung (Variante 1)

Ergebnisse der angepassten thermischen Simulation mit IDA ICE

Ergebnisse Sommer

Nachfolgend werden die Ergebnisse für das Klassenzimmer im 3. OG an der Südfassade dargestellt.

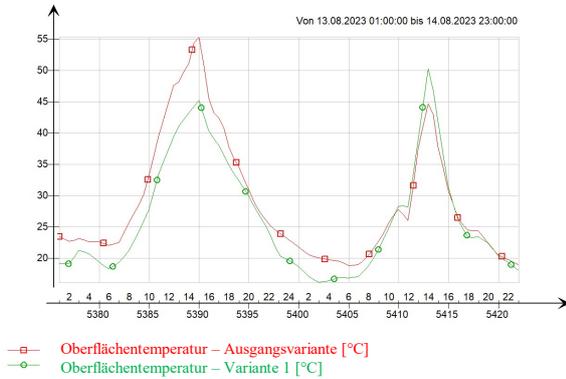


Abbildung 7: Temperaturverläufe Oberflächentemperatur Südfassade (13.08. – 14.08.)

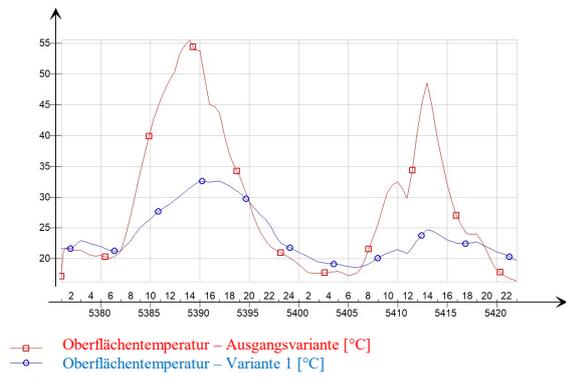


Abbildung 8: Temperaturverläufe Oberflächentemperatur Dach (13.08. – 14.08.)

Nachfolgend werden die Ergebnisse für den Büroraum an der Nordfassade im EG dargestellt.

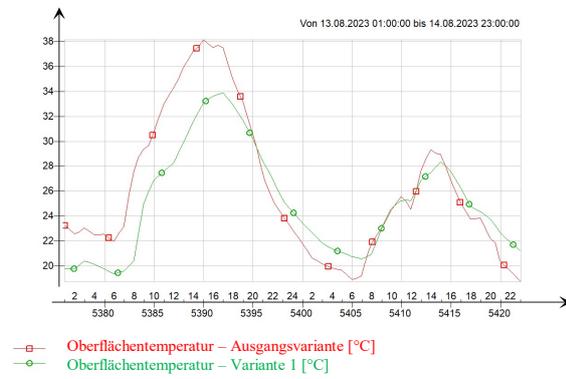


Abbildung 9: Temperaturverläufe Oberflächentemperatur Nordfassade (13.08. – 14.08.)

Die Oberflächentemperaturen mit Berücksichtigung des Mikroklimas (Variante 1) sind im Sommer überwiegend deutlich geringer als in der Ausgangsvariante.

Der Einfluss der Dachbegrünung ist deutlich erkennbar: Die Oberflächentemperatur unterhalb der Dachbegrünung ist tagsüber ca. 20 K geringer als in der Ausgangsvariante und schwankt im Verlauf weniger stark. Nachts stellen sich sogar geringfügig höhere Oberflächentemperaturen ein.

Im Ergebnis ergibt sich für den Klassenraum an der Südfassade ein ca. 20 % geringerer Kühlenergiebedarf, für den Büroraum an der Nordfassade ein ca. 35 % geringerer Kühlenergiebedarf (Raum-Solltemperatur 25 °C).

Ergebnisse Winter

Nachfolgend werden die Ergebnisse für das Klassenzimmer im 3. OG an der Südfassade dargestellt.

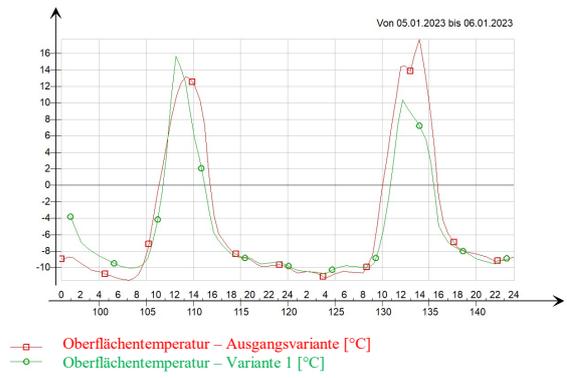


Abbildung 10: Temperaturverläufe Oberflächentemperatur Südfassade (05.01. – 06.01.)

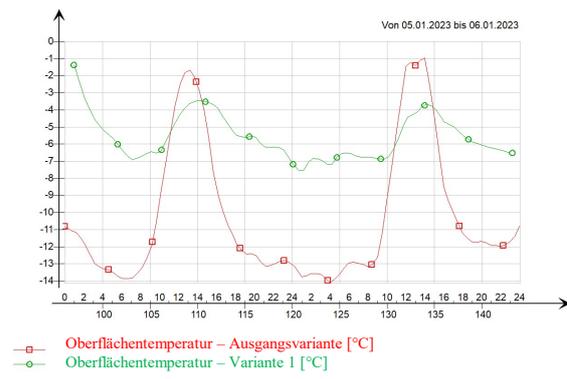


Abbildung 11: Temperaturverläufe Oberflächentemperatur Dach (05.01. – 06.01.)

Nachfolgend werden die Ergebnisse für den Büroraum an der Nordfassade im EG dargestellt.

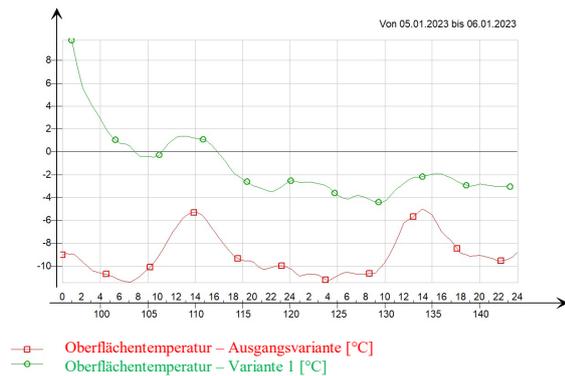


Abbildung 12: Temperaturverläufe Oberflächentemperatur Nordfassade (05.01. – 06.01.)

Die Oberflächentemperaturen mit Berücksichtigung des Mikroklimas (Variante 1) sind im Winter überwiegend höher als in der Ausgangsvariante.

Der Einfluss der Dachbegrünung ist deutlich sichtbar: Die Oberflächentemperaturen unterhalb der Dachbegrünung schwanken nicht so stark und sind größtenteils ca. 5 – 7 K höher als in der Ausgangsvariante. Tagesüber stellen sich mittags geringfügig niedrigere Oberflächentemperaturen ein.

Im Ergebnis ergibt sich für den Klassenraum an der Südfassade ein etwa gleich großer Heizenergiebedarf (im Ergebnis für die Ausgangsvariante ca. 1 % höher als in Variante 1). Für den Büroraum an der Nordfassade ergibt sich ein ca. 5 % geringerer Heizenergiebedarf (Raum-Solltemperatur 21 °C).

Zusammenfassung

Für den Sommerfall zeigen die Untersuchungen, dass die bereits beschriebenen Mechanismen der Pflanzen einen kühlenden Effekt auf das Mikroklima des betrachteten Gebäudes und somit auf die Oberflächentemperaturen der Wand- und Dachoberflächen haben. Die geringeren Oberflächentemperaturen in Variante 1 und die vorhandene Verschattung durch die Umgebungsvegetation führen zu einem reduzierten Kühlenergiebedarf.

Auch für den Winterfall hat sich gezeigt, dass sowohl Dachbegrünung als auch Umgebungsvegetation einen positiven Einfluss auf den Heizenergiebedarf haben. Mit Berücksichtigung des Einflusses des Mikroklimas ergeben sich überwiegend höhere Oberflächentemperaturen, obwohl die Fassaden teilweise verschattet werden.

Auf Gründächern können die Pflanzen die Dachoberfläche verschatten, die direkte Sonneneinstrahlung reduzieren und dazu beitragen, die Temperatur des Daches und des Gebäudes zu senken. Auch die Pflanzen auf den Gründächern durchlaufen einen Verdunstungsprozess, der die Luft über dem Dach abkühlen kann. An Wintertagen können Gründächer den Wärmeverlust durch das Dach reduzieren, da sie eine wärmedämmende Wirkung haben und die Wärmeübertragung zwischen dem Gebäude und der Außenumgebung reduzieren. Dadurch kann die im Gebäudeinneren entstehende Wärme besser gespeichert werden.

Literatur

- Fahrión, M.; Nicki, C.; Bangalore, D.; Lakatos, M.; Brombacher, M. 2021. Sommerlicher Wärmeschutz durch die Begrünung von Außenanlagen und Gebäuden, Bauphysik 43, Berlin.
- Deutscher Wetterdienst (DWD). 2017. Handbuch Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Offenbach.
- Kuhns, M. 2019. Windbreaks for Energy Conservation, <https://trees-energy-conservation.extension.org/windbreaks-for-energy-conservation/>
- Konarska, J.; Uddling, J.; Holmer, B. et al. 2016. Transpiration of urban trees and its cooling effect in a high latitude city. Int J Biometeorol 60, 159–172.
- Okada, Mak.; Okada, Mas.; Kusaka, H. 2016. Dependence of Atmospheric Cooling by Vegetation on Canopy Surface Area During Radiative Cooling at Night: Physical Model Evaluation Using a Polyethylene Chamber. Journal of Agricultural Meteorology. 72. 20-28. 10.2480/agrmet.D-15-00015.
- Li, Z.; Feng, X.; Fang, Z. 2022. A modified method to measure outdoor mean radiant temperature: Comparison between two-hemisphere method and six-direction integral method. Building and Environment, Vol. 221.



ANALYTICAL COMPARISON AND OPTIMIZATION STUDIES OF BUILDING-PERFORMANCE SIMULATIONS ON THE BASIS OF THE FINITE-ELEMENT METHOD

Paul Schoplocher¹, Oliver Steffens²

¹ OTH Regensburg, Germany, E-Mail: paul.schoplocher@oth-regensburg.de

² OTH Regensburg, Germany, E-Mail: oliver.steffens@oth-regensburg.de

Abstract

In this paper, different building-physics related effects are examined using the finite-element method (FEM) to model convection, radiation, heat conduction, and moisture phenomena in building structures. indoor air and surface temperatures of a typical building model.

We compare these findings with the results obtained from a building-performance simulation (BPS) programme based on the lumped-parameter method (LPM). Subsequently, we study enhancements to the LPM, including those for thermal bridges and internal heat transfer coefficients, created with the help of more advanced multi-physics methods within the FEM model. These enhancements seem to yield improved results and suggest that the LPM software still has the opportunity for development.

The improved results indicate only minor differences between the FEM and LPM simulations concerning the average fluid temperature for the radiation, moisture physics, and heat transmission models. In terms of convection and thermal bridging, however, there are some notable differences and areas for development.

1. Introduction

Unlike in previous decades, nowadays the application of BPS in practice has become increasingly important. Building performance simulations have a positive effect on the environment and economy. Building behaviour can be predicted and analyzed to reduce energy use and CO₂ emissions. Consequently, a growing number of engineering companies are utilizing BPS techniques during the design stage of both residential and commercial structures (Baba et al. 2013).

The first record of building simulation dates back to 1965. Research was commissioned by the US Department of Defense (DOD) and Department of Energy (DOE) to examine how buildings function in various climates. The American Department of Energy (DoE) established the Lawrence Berkeley

National Laboratory, which created the DOE-2 software tool as a result of these experiments (Crawley et al. 1997).

In 1963, the Royal Institute of Technology in Stockholm, Sweden, developed BRIS, the first computational simulation tool for buildings. The program utilized in this work, IDA ICE, was derived from this earlier version (Brown 1990).

More sophisticated tools started to appear in the 1970s as computers gained popularity and power. ESP-r, BLAST, HVACSIM+, and TRNSYS are a few examples. The development of standards like ASHRAE 90-75 came after this. The development of BPS evolved and progressed over time as a result of political and scholarly endeavours (Kusuda 1999).

Neutral Model Format (NMF) for building simulation was developed by Sahlin and Sowell (Bring et al. 1999) in the late 1980s, marking the beginning of the present state of the art. IDA ICE, which was developed in 1998, continues to use this model type. Klein (Seem et al. 1989) in that year unveiled the Engineering Equation Solver (EES), a tool used in engineering procedures to solve non-linear equations. Due to the short simulation time, the main method in building simulation remains the LPM (or zone method).

The finite-element method (FEM) was initially applied in 1982 by Cook (Cook 1974) and Rao (Rao 1982). The FEM is a numerical method for approximating differential equations in physics-based problems, which is done by breaking down the problem into smaller, easier-to-manage subproblems. The building industry uses finite element analysis (FEM) much less frequently than mechanical engineering, where it is widely used for applications. FEM is used in the building industry for a variety of purposes, including seismic and structural load calculations (Lucena et al. 2014; Besuievsky et al. 2021) in civil engineering (Mahmoud Ziada et al. 2019). FEM in building physics is sometimes used to calculate two-dimensional thermal bridges and moisture transport. Such as in the work of Berger (Berger et al. 2020).

Similar to this work, Schijndel (Jos Van Schijndel 2015) has already discussed the coupling of the FEM and LPM. Radiation and moisture, however, were not examined in this investigation. The LPM and FEM models were found to differ minimally. It was also determined that FEM is suitable to be used for building performance simulations. This work likewise comes to the same conclusion.

Nevertheless, the engineering community still uses BPS at a low rate, despite its advantages for the economy and the environment. There are still many areas where these BPS tools could be improved upon, and their development is not flawless. One of them is attempted to be addressed in this work. Clarke outlined several issues facing BPS (Clarke 2020) as well as potential future directions for this technology (Clarke 2015).

2. Simulation

For proper improvement and comparison of the two methods, it is necessary to have a reference model. This reference model is created in both LPM and FEM software to identify the significant differences and to exclude differences that are not due to physical effects. An example of this could be differences in numerical values. Each of the different models takes a specific improved thermal-physical model from the FEM software and compares it with a reference model in the FEM software. This makes it possible to analyze the specific effect, rather than filtering out which effect is causing which difference. The reference model is called the simplified FEM model (sFEM). This model will be discussed in the subchapter “2.2. Simplified Model (sFEM)”.

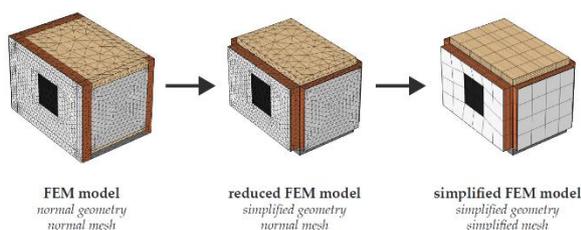


Figure 1: FEM model simplification (own illustration).

2.1. Boundary Conditions

This section describes the boundary conditions for the thermal, meteorological, and geographic conditions of the model.

The reference model is a corner room (“zone”) of a residential building which is part of the co-operative housing estate Margaretenau in Regensburg. The weather data is given from the German weather

agency (Deutscher Wetterdienst 2018). The weather data is for the period of 1.1.2018 at 00:00 to 31.12.2018 at 24:00. The floor plan in Figure 2 displays the dimensions. Material parameters can be provided from the authors upon request.

For the outside walls, the ambient temperature from the meteorological data serves as a boundary constraint. The wind direction and intensity are used to compute the external heat transfer coefficient. The zone-surrounding interior walls (a door has been omitted for simplicity), floors, and ceiling exhibit constant thermal boundary conditions because the room is assumed to be situated inside a heated building. The exterior surface of the interior walls and the upper story ceiling is given a constant boundary of 20°C. The surface temperature of the basement ceiling below the room is fixed at 15°C.

There is also a radiator in the zone, modelled as an ideal, virtual heating element with zero heat loss, directly connected to the air volume and producing 500 W of heat when needed. A heating system maintains the average zone fluid (air) temperature between 19 and 23°C (4 Kelvin regulation).

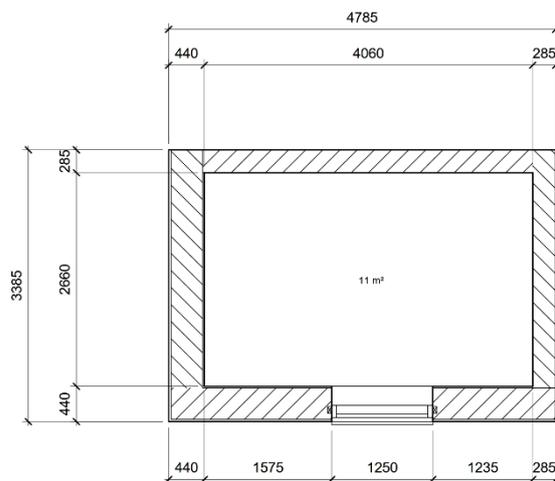


Figure 2: Floor plan and sectional view of the reference model (own illustration).

2.2. Simplified Model (sFEM)

The first challenge was to mimic the “lumpness” of the LPM model (here within the BPS software IDA ICE by Equa Solutions) in the FEM simulation software (here COMSOL). This was done by minimizing the discrete finite elements (mesh spacing) for the walls and air volume (see Figure 1 - right). However, since the FEM software cannot function on only one node for one wall the nodes were reduced to a minimal amount. Figure 1 shows the simplified FEM (sFEM) model where one rectangle represents one node.

This sFEM model is then used for all other physics simulations and models (except the geometrical model, gFEM). Here the thermal effects such as heat

transfer convection and radiation were added. It is important to note that the sFEM model uses the same method of calculation as the LPM model; therefore, more advanced “multiphysics” modules of the FEM software cannot be used here.

The summary of the major physical effects for the sFEM and LPM models is presented in Figure 3.

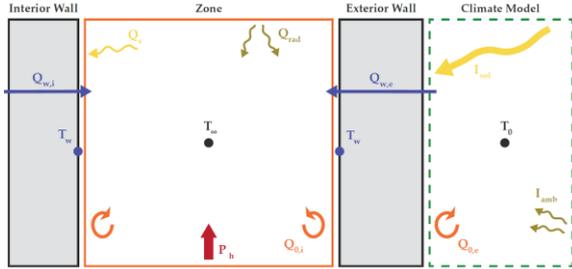


Figure 3: Summary of the physical effects used in the LPM model (own illustration).

Q_w is the interior and exterior heat flux, Q_0 is the convective heat flux for the interior and the exterior, Q_{rad} is the radiation from the objects such as wall and ceiling to the room (longwave radiation), Q_s is the direct solar radiation hitting the wall which consisting of the solar radiation I_{sol} (shortwave) and the ambient radiation I_{amb} (longwave). The temperature for the wall is T_w , the room temperature is T_∞ and the outside temperature is T_0 .

The simplified FEM model uses several equations based on thermal physics to determine the equilibrium equations. One example is the simplified version of Fourier's transient law to calculate the heat transfer through solid walls:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(\vec{q}_c + \vec{q}_r) = \dot{Q} \quad (1)$$

Where ρ is the material density, c_p is the specific heat capacity, and $\partial T/\partial t$ is the temperature change per timestep. \vec{q}_c denotes the heat flux by conduction; \vec{q}_r the heat flux by radiation, and \dot{Q} additional heat sources (if present).

As can be seen in Figure 4 the zone fluid temperatures of both models are very similar (0.09 K difference). Therefore, the sFEM model can be seen as a good reference for further improved FEM models. The large spikes are due to the switching of the heating system. A small shift on the time domain only indicates that the sFEM model reaches the switch point one timestep earlier. However, on the overall time scale this deviation is negligible.

The following subchapter analyzes further improved FEM models with the integrated multiphysics modules from the COMSOL software.

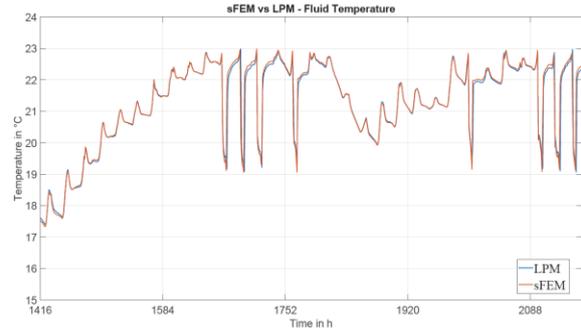


Figure 4 Fluid temperature comparison of the LPM and the simplified (sFEM) models in the month of March (own illustration).

2.3. Geometry and mesh-improved FEM (gFEM)

For this model (Figure 1 - left), we discard the simplified node and geometry setting of the sFEM. Thus, we are able to analyze the effect of a finer mesh and more detailed geometry. The geometrically improved model (gFEM), however, has the same simple physical models as the sFEM. Therefore, thermal bridges and inhomogeneous heat transfer can be correctly considered by the FEM software. In contrast, the LPM software considers a one-dimensional heat transfer only. Additional heat loss in the extended geometry model decreases the fluid temperature by 0.63 K on average (in March). This can also be seen in Figure 6 (gFEM).

This additional heat loss can be quantified and imported into the LPM software, therefore improving the LPM software. The resulting heat transfer coefficient is calculated as:

$$\Psi = \frac{Q_{tb}}{(T_\infty - T_0)L} \quad (2)$$

where Ψ is the heat transfer coefficient, Q_{tb} is the additional heat loss through the component acting as a thermal bridge; $T_\infty - T_0$ is the temperature difference between zone fluid and outside, and L is the length of the component.

The heat transfer coefficient Ψ is calculated for each building element. The corresponding length L of a thermal bridge represents the perimeter of the respective building element. The process of manually adding thermal bridges to the software IDA ICE is depicted in Figure 5.

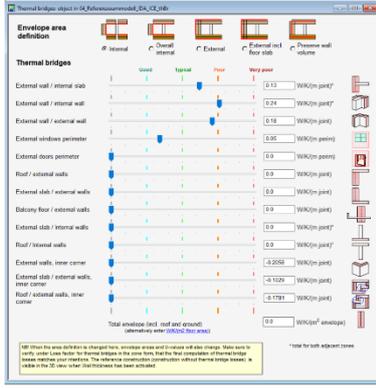


Figure 5: Thermal bridge interface of IDA ICE with the imported heat transfer coefficients Ψ (own illustration)

The imported heat losses in the LPM model can be improved to an average fluid temperature difference of 0.22 K (in March), this results in an average 65% improvement for the fluid temperature (see Figure 6).

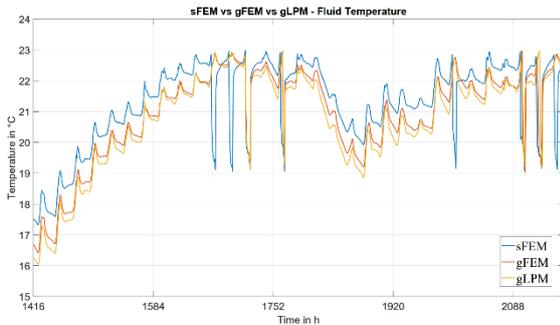


Figure 6: Fluid temperature comparison of the LPM and the simplified (sfFEM), the geometrically FEM model (gFEM) and the geometrical lumped parameter model (gLPM) in the month of March (own illustration).

2.4. Convection

Our next model improves the heat transfer coefficient of the interior walls, ceiling and floor by including convection effects (cFEM). As the heat transfer coefficient h depends on a number of factors and parameters such as geometry, wind speed and characteristics, the calculation of h is not always easy and is therefore often an approximation.

Several methods can be used to improve the coefficient. In this work, a method known as Computational Fluid Dynamics (CFD) is used to compute the coefficient. It is one of the most accurate but also one of the most demanding methods. CFD provides a detailed simulation of fluid flow and convection within the model. However, it would not be appropriate to run a CFD simulation for each time step. Therefore, a steady-state CFD model is used to determine a correlation for the heat transfer coefficient h for the given boundary conditions and geometry. The result is the function:

$$h = C(T_{\infty} - T_w)^n \quad (3)$$

Where h denotes the heat transfer coefficient, T_{∞} the temperature of the zone, T_w the wall temperature; C and n are fitted constants.

This power function for h has been determined at various temperature differences between the temperature of the fluid and the (average) temperature of the wall to obtain suitable average parameters C and n . It is important to note that these parameters are only valid for given geometry and boundary conditions. The fitted constants, which vary for different building elements, are given in Table 1.

	Vertical wall	horizontal walls (upper side)	horizontal walls (lower side)
C	2.06	2.06	0.35
n	0.4	0.4	0.2

Table 1: Fitted constants from the CFD simulation (data (Schoplocher et al. 2023))

The results shown in Figure 7 indicate that less heat is transferred by convection as it has a lower heat transfer coefficient than both the sfFEM and LPM models. Except for a short interval (which can be attributed to details of the heating control system), the average zone temperature in the cFEM is higher than in the sfFEM. The average temperature drop is caused by a lower heat transfer coefficient for the inner surfaces. The zone temperature difference between the sfFEM and the cFEM model is 1.52 K. The temperature difference of the outer walls doesn't have such a large temperature difference. This shows that the improved calculation of h can be important in any LPM software or building physics tool. The IDA ICE software used in this work, however, does not allow the direct implementation of the adjusted heat transfer coefficients. Therefore we must restrict our comparison to the different FEM models.

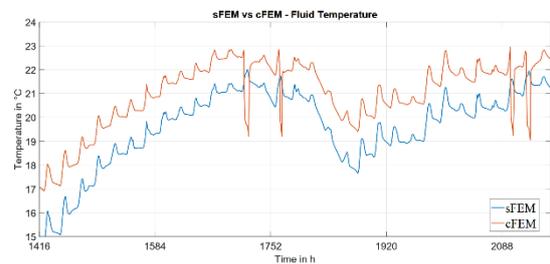


Figure 7: Fluid temperature comparison of the sfFEM and the convective (cFEM) models in the month of March (own illustration).

2.5. Other models

More models were analyzed in the work. However, not all models showed a significant difference between the LPM and FEM models. Therefore, not

every model is worth improving, this can only be determined for the specific case used in this work.

Models that did not show a significant difference were the following:

If only the mesh density of the model is improved without changing the geometry, the effect is rather insignificant. The reason for this is that without taking into account the additional heat losses from corners and thermal bridges, most of the heat flux into the walls and into the zone is one-dimensional, so more nodes do not improve the result.

Another interesting model is one that includes humidity (hFEM), taking into account moisture storage and transport through the solid building materials and the air volume, thus also accounting for the difference in thermal conductivity at different moisture levels. The cFEM model, in terms of moisture transfer and heat transfer coefficient as a function of moisture content, does not appear to have great advantages when only surface and fluid temperatures are considered. However, this may be different when considering more humid situations.

A detailed radiation simulation (rFEM) does not have much impact on the average temperature. The radiation model rFEM uses more advanced methods such as the hemicube or raytracing methods (COMSOL 2023). Although the calculation method is more accurate, the overall temperatures seem to remain the same. However, by using the FEM method of simulation, a finer temperature difference can be observed. One example are the local temperature peaks (because of direct radiation) on the interior walls instead of the usual average temperature increase (see Figure 8).

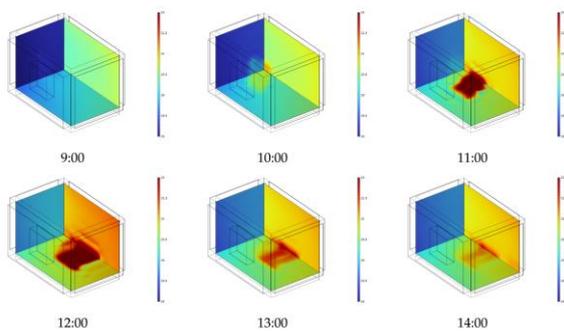


Figure 8: North and west wall surface temperature on 7 November inside the rFEM simulation (own illustration)

3. Summary

A summary table of all the models and their deviations from the LPM model is presented in Table 2. To exclude the initial sFEM model deviations from the

LPM model, the modified (improved) models are only compared with the sFEM model.

Model	Average temperature difference (in relation to sFEM model)		Simulation time
	March (zone)	June (Zone)	Time
Reference LPM model (LPM)	0.08	0.13	13s
Simplified FEM model (sFEM)	0	0	1min 22s
Improved geometry (gFEM)	0.63	0.21	35min 12s
Improved lumped geometry (gLPM)	0.82	0.16	14s
Improved radiation (rFEM)	0.05	0.17	5min 19s
Improved humidity (hFEM)	0.07	0.12	3min 22s
Improved convection (cFEM)	1.52	0.29	4min 15s

Table 2: Comparison of all the physical models in relation to the sFEM model (own illustration)

4. Conclusion and Outlook

There are several notable differences between the FEM simulations (in COMSOL) and the LPM model in IDA ICE. We have derived suitable improvements for the LPM model concerning geometry, mesh, and internal convection. In contrast to this, improved radiation, heat transfer and moisture models in COMSOL do not show any significant potential for improvement. IDA ICE shows good accuracy in these areas, despite the limitations imposed by the physical simplifications. Compared to the FEM programme, the simulation time is significantly shorter by about 13 seconds.

In the geometric model (gFEM), improved mesh and additional heat loss through thermal bridges have been taken into account. These differences can be imported into IDA ICE using table values. As a result, the average temperature difference for the fluid improved from 0.63 K to 0.2 K. This allows the LPM model to produce more accurate results (gLPM).

The convective model (cFEM) also has room for development. With an average zone temperature difference of 0.98 K, the internal heat transfer coefficients h and their dependence on zone and surface temperatures can be modified. Although our

set of parameters is adjusted to a particular combination of boundary conditions and geometry, this approach can be pursued for other situations in subsequent work.

The LPM software still needs to be improved in a few areas. These improvements will lead to more accurate and effective results. As a result, more accurate design can lead to a potential reduction in emissions and CO₂ emissions.

There are many factors to be taken into account that cannot be addressed in this work. So far, all research has used the same geometric model. Future research can use FEM to analyze individual rooms, an external wall or even entire buildings. There will be a new understanding of the complex thermal exchanges inside and outside the building. The study of HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) systems, which include underfloor heating, radiators and ventilation, is also an important objective for the future. This can be used in conjunction with specific, geometrically modelled heating devices and CFD simulation. It may also be possible to analyze convection in larger structures, taking into account phenomena such as the Marangoni effect.

Another emerging issue will be how to integrate these isolated aspects in an effective and reasonably straightforward manner. By improving already powerful and fast BPS software using FEM simulations techniques as an add-on tool, it might be possible to study an entire building structure in terms of radiation, convection, local heating units and possibly even fluid flow, along with even longer time intervals. This additional, more detailed information has the potential to advance our understanding of building behaviour, stimulate innovation and perhaps identify new technological areas that have not been targeted for development.

5. Acknowledgement

Part of this work was funded by the German Federal Ministry of Economic Affairs and Climate Action (BMWK) under ZIM Grant No. 16KN077922. The authors would like to acknowledge the fruitful cooperation with Consolinno Energy GmbH and Luxgreen Climadesign, as well as the support by Regensburg Center of Energy and Resources (RCER) at OTH Regensburg.

Literaturverzeichnis

- Baba A, Mahdjoubi L, Olomolaiye P, Booth C, 2013. State-of-the-art on buildings performance energy simulations tools for architects to deliver low impact building (LIB) in the UK, 2013, 1867–1884.
- Berger J, Gasparin S, Dutykh D, Mendes N, 2020. On the comparison of three numerical methods applied to building simulation: Finite-differences, RC circuit approximation and a spectral method. *Building Simulation*, 13 (1), 1–18.
- Besuevsky G, García-Nevaldo E, Patow G, Beckers B, 2021. Procedural modeling buildings for finite element method simulation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2042 (1), 12074.
- Bring A, Sahlin P, Vuolle M, 1999. Models for Building Indoor Climate and Energy Simulation. *Building Energy Analysis Tools Model Documentation*, Stockholm, 110 S.
- Brown G, 1990. The BRIS simulation program for thermal design of buildings and their services. *Energy and Buildings*, 14 (4), 385–400.
- Clarke J, 2015. A vision for building performance simulation: a position paper prepared on behalf of the IBPSA Board. *Building Performance Simulation*, 1–7.
- Clarke JA, 2020. Why tools for buildings and cities performance simulation need to evolve. *Building and Cities*.
- COMSOL, 2023. Introduction to Computing Radiative Heat Exchange, 09.03.2023. Abgerufen am 09.03.2023, <https://www.comsol.de/blogs/introduction-to-computing-radiative-heat-exchange>
- Cook RD, 1974. Concepts and applications of finite element analysis. A treatment of the finite element method as used for the analysis of displacement strain and stress. Wiley, New York u.a.
- Crawley DB, Lawrie LK, Winkelmann FC, Buhl WF, Edem AE, 1997. What Next for Building Energy Simulation— A Glimpse of the Future. *Building Simulation '97*.
- Deutscher Wetterdienst, 2018. Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Regensburg, 12.07.2022. Abgerufen am 12.07.2022, https://www.dwd.de/DE/wetter/wetterundklima_vorort/bayern/regensburg/_node.html
- Jos Van Schijndel, 2015. BES with FEM: Building Energy Simulation using Finite Element Methods. COMSOL Conference.
- Kusuda T, 1999. Early history and future prospects of building system simulation. *Proceedings of Building Simulation '99*, 1999.

- Lucena CAT, Queiroz PCO, Debs ALHCE, Mendonça AV, 2014. DYNAMIC ANALYSIS OF BUILDINGS USING THE FINITE ELEMENT METHOD. In: Proceedings of 10th World Congress on Computational Mechanics, 08/07/2012. Editora Edgard BlücherSão Paulo, S. 4712–4726.
- Mahmoud Ziada, Sertaç Tuhta, Eren Hayati Gençbay, Furkan Günday, Yosra Tammam, 2019. Analysis of Tunnel Form Building Retrofitted with CFRP using Finite Element Method. International Journal of Trend in Scientific Research and Development (IJTSRD).
- Rao SS, 1982. The finite element method in engineering. Pergamon Press, Oxford, New York, Toronto, Sydney, Paris, Frankfurt Main i.e. Kronberg-Taunus, XXVI, 625 S.
- Schoplocher DP, Ettengruber S, Steffens O, 2023. Improvements for building-performance simulations by a comparative finite-element method analysis. Energy and Buildings, 278, 112563.
- Seem JE, Klein SA, Beckman WA, Mitchell JW, 1989. Transfer Functions for Efficient Calculation of Multidimensional Transient Heat Transfer. Journal of Heat Transfer, 111 (1), 5–12.

SESSION B · 07.03.2024

Thema: Raumakustik

Kooperationspartner



Bauhaus-
Universität
Weimar

WBA

WBA | Bauhaus Weiterbildungs-
akademie Weimar e.V.
Institut an der
Bauhaus-Universität Weimar



ACOUSTIC TRAVEL TIME TOMOGRAPHY FOR SIMULTANEOUS INDOOR AIR TEMPERATURE AND AIRFLOW MEASUREMENTS

Najmeh Sadat Dokhanchi, Albert Vogel, Conrad Völker

Professur Bauphysik, Bauhaus-Universität Weimar, Deutschland, E-Mail:

najmeh.sadat.dokhanchi@uni-weimar.de

Abstract

Developing the technique of Acoustic travel time TOMography (ATOM) for monitoring the indoor air temperature and airflow measurements represents a significant breakthrough for modern buildings especially those prioritizing thermal comfort. While conventional measurement methods are limited to individual measuring points, ATOM technique can measure the climatic parameters' distribution across the entire room with high spatial resolution utilizing sound velocity measurements along various propagation sound paths. This research outlines the ongoing development of the ATOM technique for simultaneous measuring the indoor air temperature and airflow velocity at the Department of Building Physics at the Bauhaus-University Weimar. It presents both the challenges confronted and the solutions developed in establishing a straightforward measuring system that can optimally fulfil the requirements of the indoor climate projects.

Introduction

The simultaneous measurements of indoor air temperature and indoor airflow velocity is a crucial aspect of environmental monitoring, particularly in the context of indoor air quality, thermal comfort, and energy efficiency. Traditional methods of measuring indoor air temperatures and indoor airflow velocities which involve the use of conventional thermal and airflow sensors such as NTC thermistors and anemometers present challenges and limitations in terms of spatial coverage, response time, and accuracy. For instance, they typically offer point measurements which might miss temperature and flow variations across different locations in a room. Moreover, they might also have limitations in terms of response time affecting the accuracy of simultaneous measurements. Another challenging attributes to the installation and positioning of conventional airflow sensors which may potentially negatively affecting the airflow patterns they are meant to measure. To address the limitations of conventional sensors, Acoustic Travel-Time TOMography (ATOM) provides an innovative solution by using the primary relationship between sound velocity and the air properties (Dokhanchi 2023). To employ ATOM in the indoor spaces, several sound sources and microphones can be

placed at the precalculated coordinates in a test room. In a recently developed setup at the Department of Building Physics at the Bauhaus-University Weimar, room acoustics are combined with tomography techniques. This involves measuring the room impulse response for each pair of transducers, determining travel times for direct paths and early reflections till third order reflections. Simultaneously, an image source model simulates the lengths of sound paths and their theoretical travel times. These experimentally derived data are then input into a suitable tomography algorithm to reconstruct the spatial distribution of indoor air temperature throughout the entire room (Dokhanchi et al. 2022a, 2022b).

The latest advancement of ATOM particularly for indoor air temperature measurements involves the development of ultrasonic tomography while integrating high-energy early reflections as the propagation sound paths. Accordingly, several empirical measurements were conducted under various temperature conditions in a climate chamber of the Department of Building Physics at the Bauhaus-University Weimar. The temperatures obtained from ATOM system were consistently compared to those measured by highly precise NTC thermistors for accuracy assessment. Analysis indicates Root Mean Square Error (RMSE) values of less than 0.5 K between ATOM temperatures and NTC thermistors (Dokhanchi et al. 2024).

To integrate airflow calculations into the ATOM measuring system, initial measurements were conducted at the Department of Building Physics. For this purpose, the developed ultrasonic tomography setup was positioned in front of a wind tunnel. This study reports on the initial findings and proposes directions for future progress.

Air temperature vs. airflow velocity

The properties of air that influence the sound velocity include humidity, CO₂ concentration, pressure, temperature, and flow velocity. To determine the air temperature and airflow velocity based on sound velocity measurements in air, it is assumed that humidity, CO₂ concentration, and pressure remain unchanged throughout the entire measurements. Under isotropic condition, where the sound velocity is consistent regardless of propagation direction, the

scalar air temperature can be computed using the following equation

$$T = \frac{c_L^2}{\gamma R_s} \quad (1)$$

where c_L is the Laplace sound velocity, T is the air temperature in K, $R_s=287.05 \text{ J Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ is the gas constant and $\gamma = 1.4$ is the ratio of the specific heat at constant pressure and volume of the gas. The sound velocity in this equation can be measured experimentally. When a sound source and a microphone are placed at a known distance to each other (see Figure 1), then the sound velocity along the direct path is calculated by dividing the length to the measured travel time of the transmitted signal

$$c = \frac{d + \epsilon_1}{\tau + \epsilon_\tau} \quad (2)$$

Where d is the length of the sound path, τ is the travel time and ϵ_1 and ϵ_τ are the deviations for the sound path length and the travel time estimation, respectively.

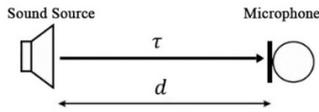


Figure 1: Experimental sound velocity for the scalar air temperature measurement

In a non-isotropic condition, where there is an airflow field in the test area, the velocity at which a sound signal propagates varies across different directions. Thus, unlike the air temperature, addressing the vector field airflow velocity calculation involves generating bidirectional sound paths namely measuring the travel times in opposite directions. In this case, the difference between measured sound velocities along forward and backward sound paths indicates the average airflow velocity tangent to the sound paths (see eq. 3). Accordingly, to measure the average air temperature along the bidirectional sound paths simultaneously, one needs to calculate the average sound velocities along both forward and backward paths (see eq. 4).

$$v_r = \frac{c_{eff,1} - c_{eff,2}}{2} = \frac{d}{2} \left(\frac{1}{\tau_{eff,1}} - \frac{1}{\tau_{eff,2}} \right) \quad (3)$$

$$c_L = \frac{c_{eff,1} + c_{eff,2}}{2} = \frac{d}{2} \left(\frac{1}{\tau_{eff,1}} + \frac{1}{\tau_{eff,2}} \right) \quad (4)$$

Where c_{eff} is the effective sound velocity in the direction of the airflow component, v_r is the airflow component along the sound path, $\tau_{eff,1}$ and $\tau_{eff,2}$ are the measured travel times in the forward and backward directions, respectively. Figure 2 shows the separation of the air temperature and air flow velocity

calculations when two pairs of sound sources and microphones are faced to each other in opposite directions.

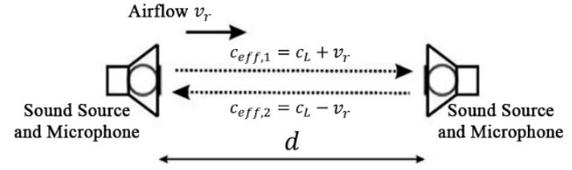


Figure 2: Bidirectional sound paths for separation of airflow velocity from scalar air temperature

Wind tunnel measurement setup

When airflow affects the sound velocity directionally, it can make it challenging to measure flow components if the airflow component doesn't significantly alter the overall sound velocity along the sound paths. To investigate the directional effect of the airflow component on the overall sound velocity along the sound paths, a simple measuring setup is designed to be exposed to a homogenous airflow field. The setup contains two directional ultrasonic sound sources (Kemo L010) and two omnidirectional ultrasonic microphones (MK-301-E) which are placed opposite to each other at a distance of 1 meter. Consequently, the travel times of the direct paths for both forward and backward sound paths can be determined by measuring the impulse response of the test room. To achieve this, a chirp signal is applied as the excitation signal which had an instantaneous frequency of 20 kHz at $t = 0$ s and crosses 40 kHz at $t = 1$ s. The data acquisition is conducted using the "Data Translation DT9847-2-2" device, which operates at a sampling frequency of 216 kHz, resulting in a time shift of 4.63×10^{-6} s. Theoretically, under the temperature of $\theta = 20$ °C and with a sound path length of 1 meter, each sampling shift corresponds to a difference of $\Delta c_L = 0.55$ m/s in the sound velocity which results in $\Delta v_r = 0.27$ m/s difference in the airflow velocity along the sound paths according to equation 3. To increase the power of the received signal, a preamplifier with the type of "M208B" is used. During the measurements, the high pass filter with a cut-off frequency of 15 kHz in the preamplifier is switched on. Figure 3 shows the block diagram of the utilized setup.

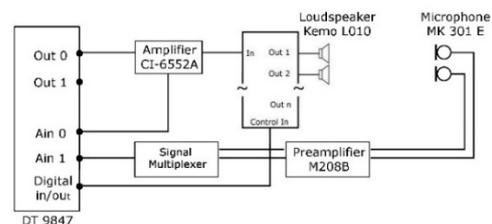


Figure 3: Experimental sound velocity for scalar air temperature measurement

To provide a homogenous airflow field for the investigations, the closed-circuit wind tunnel situated at the Institute of Structural Engineering at the Bauhaus-University Weimar is used. This wind tunnel measures 2.5 meters in length, 1.30 meters in width, and 0.80 meters in height. Its airflow velocity can be adjusted from 0.5 m/s to 30 m/s in increments of 0.1 m/s. The wind tunnel provides a uniform airflow field, allowing for accurate investigation of the directional impact of airflow components on overall sound velocity along sound paths. Moreover, the wind tunnel is equipped with a pressure anemometer installed in the middle of the supply duct cross-section, near its upper part. Figure 4 illustrates the construction of the wind tunnel.

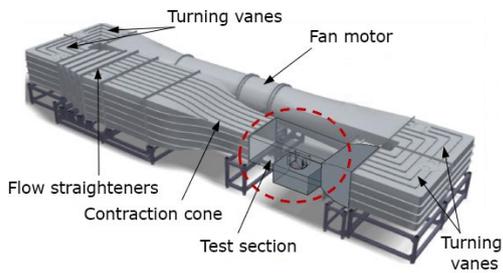


Figure 4: The closed-circuit wind tunnel at the Institute of Structural Engineering at the Bauhaus-University Weimar. The test section size: 2.5 m × 1.3 m × 0.8 m.

The measurements were performed under three different positioning scenarios. In the first scenario, the forward and backward sound paths are parallel to the airflow component's direction. In the second scenario, the sound paths are diagonal with a 45-degree angle relative to the airflow component's direction. In the third scenario, the sound paths align perpendicular to the airflow component's direction. Figure 5 shows the position of the sound paths relative to the supply airflow for these three measurement scenarios in which the angle between the supply airflow component (v) and the sound paths are $\beta=0^\circ$, $\beta=45^\circ$ and $\beta=90^\circ$, respectively.

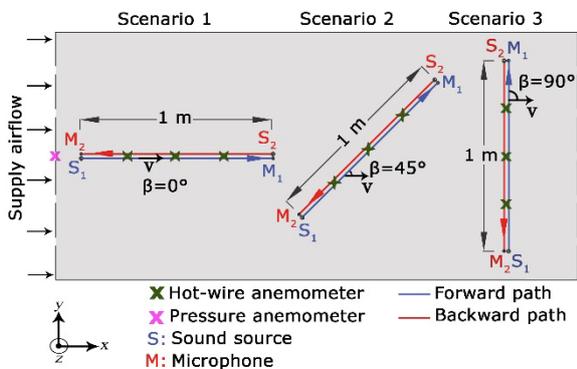


Figure 5: Three different measurement scenarios in which the angle between the supply airflow component (v) and the sound paths are $\beta = 0^\circ$, $\beta = 45^\circ$ and $\beta = 90^\circ$, respectively.

To verify the average airflow measurements along the bidirectional sound paths using ATOM measuring system, three hot-wire anemometers, each with a maximum measurement value of 1 m/s, are positioned at intervals along the 1-meter length of the sound paths. Consequently, the average recorded airflow obtained from the three anemometers is compared with the average airflow along the direct paths derived from the ATOM measuring system. Moreover, the measurements were conducted for three distinct supply airflow rates: 0.5 m/s, 0.8 m/s, and 1 m/s. Ten measurements were taken for each airflow rate, with an interval of approximately one minute between each measurement. Figure 6 depicts the measurement setup for the first scenario, showing the positions of the utilized anemometers. Additionally, the placement of the sound sources and microphones relative to the airflow direction can be observed.

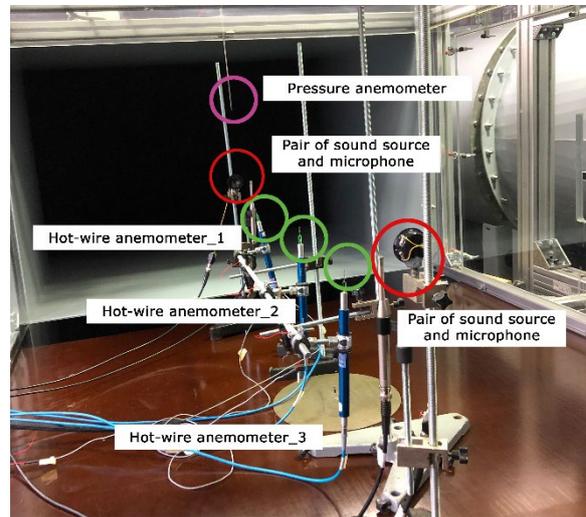


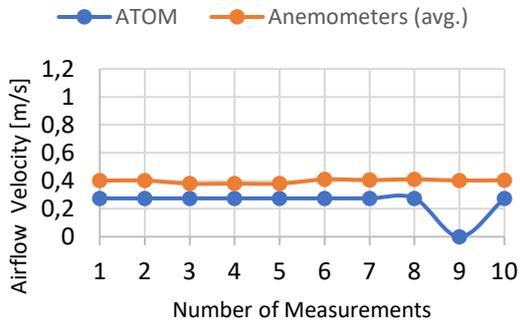
Figure 6: Measurement setup in front of the wind tunnel for the first scenario where the sound paths are parallel to the direction of the airflow ($\beta=0^\circ$)

Measurement results

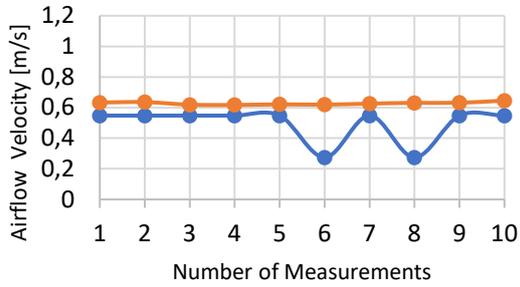
Figure 7 shows the measurement results for the first scenario, where the sound paths are parallel to the direction of the airflow ($\beta=0^\circ$) for three different set supply airflow velocities: 0.5 m/s, 0.8 m/s, and 1 m/s, respectively. The observations from the recorded values obtained from both anemometers and ATOM consistently indicate lower readings relative to the set supply airflow. This difference can be attributed to the positioning of the transducers. Since the sound sources and microphones are aligned with the direction of the supply airflow, they act as obstacles, partially obstructing the airflow and contributing to increased turbulence within the airflow stream.

Furthermore, one-sample shift variations in travel times are evident in this scenario. However, these variations become more frequent with higher airflow rates. It can be inferred that the positioning of the transducers relative to the direction of the supply airflow has the significant impact on the homogeneity

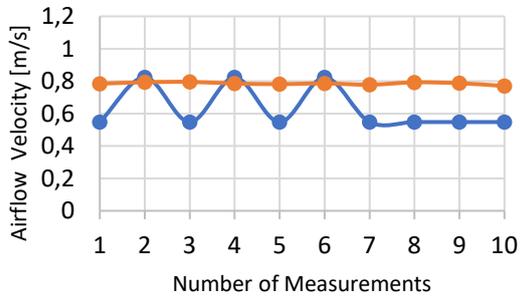
of the airflow along the bidirectional sound paths in this scenario. Increasing the airflow may lead to increased turbulence. As a result, there are more frequent occurrences of one-sample shift variations in the measured travel times.



(a) Supply airflow is set to 0.5 m/s



(b) Supply airflow is set to 0.8 m/s



(c) Supply airflow is set to 1 m/s

Figure 7: Measurement results for the first scenario where the sound paths are parallel to the direction of the airflow ($\beta=0^\circ$). Subfigures (a), (b), and (c) display the results for set supply airflow velocities of 0.5 m/s, 0.8 m/s, and 1 m/s, respectively.

The measurement setup for the second scenario is illustrated in Figure 8, highlighting the positions of the utilized anemometers and positioning the sound source and microphones relative to the supply airflow direction. Accordingly, Figure 9 illustrates the measurement results for the second scenario, where the sound paths are diagonal to the direction of the supply airflow ($\beta=45^\circ$) for three different set supply airflow velocities: 0.5 m/s, 0.8 m/s, and 1 m/s, respectively. In this scenario, the supply airflow component in the x direction has influence on airflow

velocities along the diagonal bidirectional sound paths for all set supply airflows.

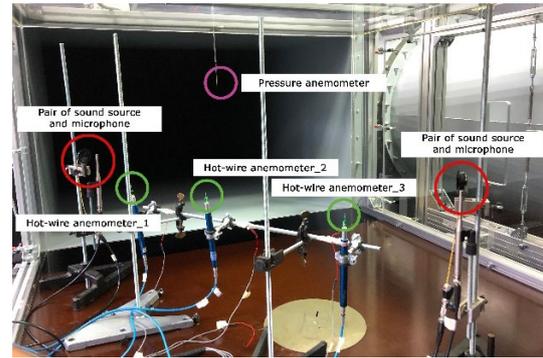
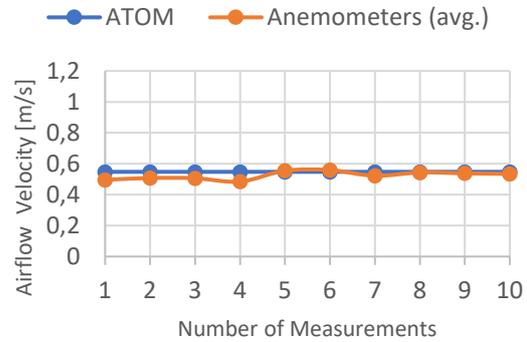
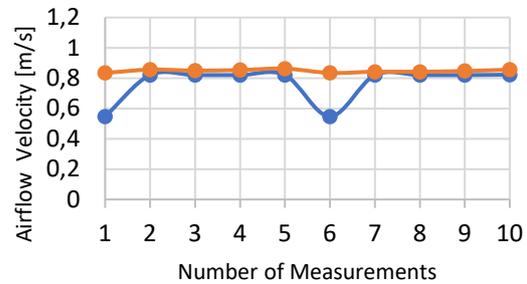


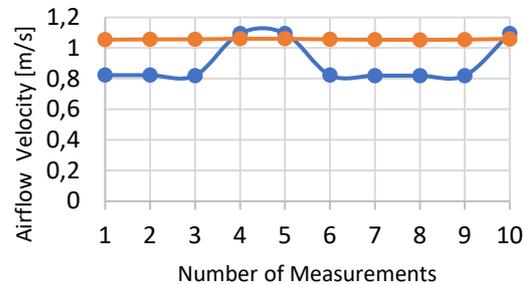
Figure 8: Measurement setup in front of the wind tunnel for the second scenario where the sound paths are diagonal to the direction of the airflow ($\beta=45^\circ$)



(a) Supply airflow is set to 0.5 m/s



(b) Supply airflow is set to 0.8 m/s



(c) Supply airflow is set to 1 m/s

Figure 9: Measurement results for the second scenario where the sound paths are diagonal to the direction of the airflow ($\beta=45^\circ$). Subfigures (a), (b), and (c) display the results for set supply airflow velocities of 0.5 m/s, 0.8 m/s, and 1 m/s, respectively.

For the supply airflow of 0.5 m/s and 0.8 m/s, the ATOM airflow values are in good agreement with the average airflow derived from three anemometers. When the supply air velocity is 1 m/s, the effect of one sample shift variations in the measured travel times is more noticeable. The reason for this discrepancy can be attributed to the time resolution of the system, or in other words, the minimum time difference in travel times that can be observed by the ATOM system. As previously discussed, a single-sample shift in the travel times corresponds to a difference of 0.27 m/s in the measured airflow velocity. The three anemometers exhibit a variation in absolute airflow velocity readings, ranging from 0.98 m/s to 1.14 m/s. However, based on the mentioned sampling frequency of the measuring system, ATOM can theoretically observe airflow ranges of either 0.81 m/s or 1.08 m/s (resulting from three sample shifts, $3 \cdot 0.27 \text{ m/s} = 0.81 \text{ m/s}$, or four sample shifts in the travel times, $4 \cdot 0.27 \text{ m/s} = 1.08 \text{ m/s}$). Therefore, in cases where the airflow velocity falls between these two ranges, ATOM observes the time resolution of three sample shifts in the measured travel times. As illustrated in Figure 9 (c), the ATOM system indicates only three instances where the average airflow exceeds 1.08 m/s.

Consequently, Figure 10 illustrates the measurement results for the third scenario, where the sound paths are perpendicular to the direction of the airflow ($\beta=90^\circ$) for three set supply airflow velocities: 0.5 m/s, 0.8 m/s, and 1 m/s, respectively. Although there is a supply air in the x direction for each measurement, it is evident that there are no variations in the overall airflow velocities along the bidirectional sound paths for all set supply air flows. Therefore, the ATOM measuring system indicates no airflow in this positioning scenario.

To compare the measured values from three positioning scenarios with each other, the RMSE is calculated between the ATOM results and the airflow recorded by anemometers throughout the entire measurements. As shown in Figure 11, the RMSE values are plotted for the three distinct supply airflow rates within each positioning scenario. The RMSE values for the second scenario where the sound paths are diagonal to the direction of the airflow ($\beta=45^\circ$) are relatively less than the other positioning cases mainly for the set supply airflow of 0.5 m/s and 0.8 m/s. However, for the set supply airflow of 1 m/s, both the first and second positioning scenarios exhibit fairly similar amount of errors. The described source of errors can be addressed by first increasing the sampling frequency, or in other words, improving the time resolution of the measuring system. Additionally, optimizing the arrangement of transducers to minimize their negative effects on the measured values, such as obstructing airflow and altering its pattern and quantity due to the presence of

the transducers themselves in the test room, can further contribute to the error reduction.

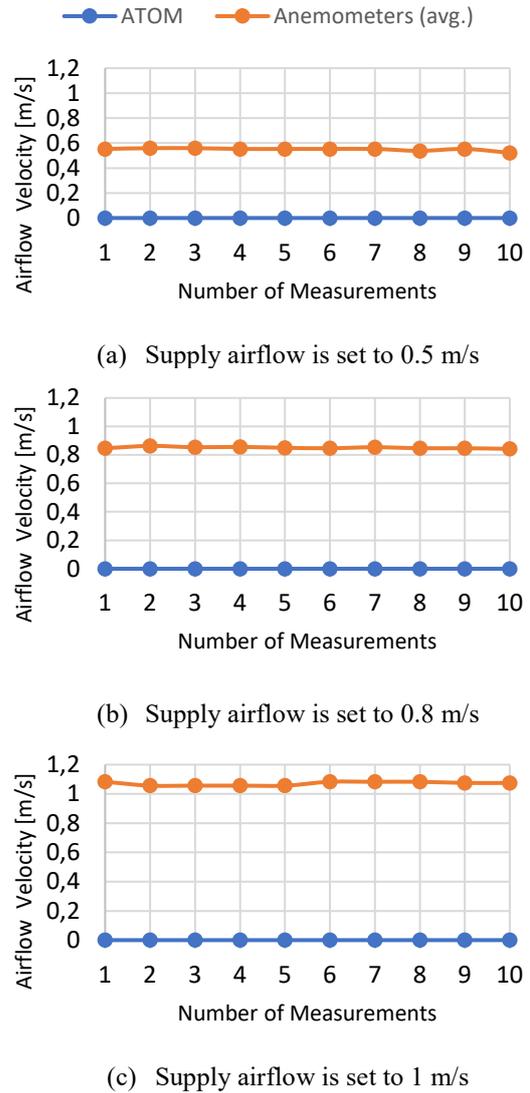


Figure 10: Measurement results for the third scenario where the sound paths are perpendicular to the direction of the airflow ($\beta=90^\circ$), Subfigures (a), (b), and (c) display the results for set supply airflow velocities of 0.5 m/s, 0.8 m/s, and 1 m/s, respectively.

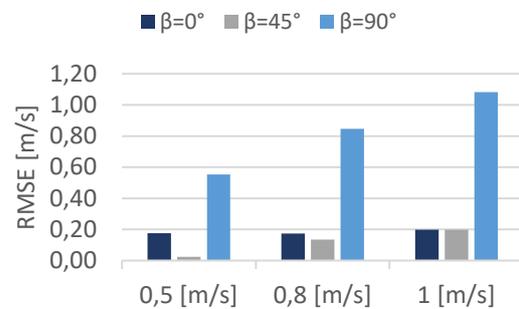


Figure 11: RMSE between ATOM airflow results and the airflow values recorded from anemometers throughout the entire measurements for each positioning scenario and each set supply airflow.

Conclusions

This study experimentally explored the directional influence of airflow components on the overall sound velocity along sound paths. This was achieved by positioning a developed ultrasonic tomography setup in front of a wind tunnel, which offered a uniform airflow spanning a wide range of velocities. Measurements were conducted for three different positioning scenarios, where the travel time of the forward and backward direct paths between two pairs of sound sources and microphones were measured under three distinct set supply airflow velocities: 0.5 m/s, 0.8 m/s, and 1 m/s. The following points were derived from the measurement results:

- To measure very slow movements of airflow in indoor climates, typically ranging from 0.1-0.5 m/s, it is recommended to enhance the time resolution of the current ATOM measuring system. To achieve this, increasing the sampling frequency of the data acquisition device from 216 kSample/s to a higher value, such as 1 MSample/s is suggested. This upgrade would result in a time resolution improvement from 4.63×10^{-6} s to 1×10^{-6} s in the measured travel time. Consequently, it can be anticipated that the ATOM system would be capable of measuring airflow with a resolution in the order of 0.1-0.2 m/s.
- The RMSE calculation between the measured values derived from ATOM system and the anemometers indicated a better results for the second positioning scenario where the sound paths are diagonal to the direction of the airflow ($\beta=45^\circ$).
- To accurately monitoring the airflow variations within the test room, it is recommended to maximize the number of sound paths covering a wide range of directions. This ensures compensation for cases where the airflow component may not significantly alter the overall sound velocity along some of the sound paths.
- In the scenarios where the dominant airflow direction can be expected, it is recommended to carefully consider the positioning of transducers relative to the expected direction of the airflow in the test area. Optimally increasing the number of sound paths that are positioned fairly diagonally to the main airflow stream might enhance accuracy in airflow monitoring. However, it's crucial to ensure that the positioning of the transducers themselves does not obstruct or alter the airflow parameters.

Acknowledgement

This study was funded by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) under project number 465591632. Additionally, we would like to express our gratitude to the staff of the Institute of Structural Engineering at the Bauhaus-University Weimar for their assistance during the wind tunnel measurements.

References

- Dokhanchi, N.S. (2023): Measurement of the Indoor Air Temperature Distribution using Acoustic Travel-Time Tomography. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar. In: Schriftenreihe der Professur Bauphysik, Heft 08, ISBN: 978-3-00-075344-2.
- Dokhanchi, N. S.; Arnold, J.; Vogel, A.; Voelker, C. (2022a): Acoustic travel time tomography: Applicability of an array of directional sound sources. In: Proceedings of DAGA. Stuttgart, Germany, S. 198–201.
- Dokhanchi, N. S.; Arnold, J.; Vogel, A.; Voelker, C. (2022b): Acoustic travel-time tomography: Higher local thermal comfort in workplaces of the future. In: Proceedings of BauSIM. Weimar, Germany, 20.-22. September.
- Dokhanchi, N. S.; Othmani, C.; Arnold, J.; Vogel, A.; Merchel, S.; Voelker, C.; Altinsoy, M. E. (2024): Indoor air temperature measurements using ultrasonic travel-time tomography. In: Applied Acoustics, S. 109894. DOI: 10.1016/j.apacoust.2024.109894.

RAUMAKUSTIK UND BESCHALLUNGSKONZEPTE IN DER ST. HEDWIG-KATHEDRALE BERLIN

Mathias Krumbiegel¹, Andreas Türk¹, Thomas Schnitzler²

¹ *Graner Ingenieure GmbH, 04105 Leipzig, E-Mail: krumbiegel@graner-leipzig.de*

² *PROAID Ingenieure, 41066 Mönchengladbach, E-Mail: thomas.schnitzler@pro-aid.de*

Einleitung

In dem vorliegenden Beitrag wird die aktuelle Planung für die Akustik und Beschallung in der St.-Hedwig-Kathedrale Berlin, einem Zentralbau mit rundem Grundriss und einer großen Kuppel vorgestellt. Neben der ohnehin schon – in akustischer Hinsicht - problematischen Raumform mit typischen Effekten wie Schallfokussierungen und potentiellen Echos, weist die Kirche einen ausgesprochen langen Nachhall auf. Außerdem ist die Platzierung des Altars exakt im Mittelpunkt mit konzentrisch darum angeordneten Sitzreihen vorgesehen. In der Summe sind das schlechte Voraussetzungen für die Planung einer Lautsprecheranlage, die eine gleichmäßige Pegelverteilung und ausreichende Sprachverständlichkeit im Auditorium gewährleisten soll. Als Lösungen wurden aufwändige Beschallungskonzepte mit Beam Steering Lautsprechern entwickelt.

Sanierung der St. Hedwig-Kathedrale

Die Kathedrale St. Hedwig wird momentan saniert und erhält im Inneren ein grundlegend neues Aussehen (Planung: Sichau & Walter Architekten, Fulda). Die Fertigstellung ist für Ende 2024 geplant. Der im 18. Jahrhundert errichtete Bau wurde dem Pantheon in Rom nachempfunden und hat einen exakt kreisförmigen Grundriss. Auf einem umlaufenden Säulenring ruht eine halbkugelförmige Kuppel mit einem Durchmesser von 31 m, deren Scheitelpunkt sich ebenfalls in 31 m Höhe befindet. Eine bei dem Wiederaufbau der im 2. Weltkrieg zerstörten Kathedrale geschaffene große Öffnung zur Unterkirche wurde wieder geschlossen, so dass der Altar jetzt genau in der Raummitte angeordnet werden kann. Die Sitzreihen werden kreisförmig um den Altar herum angeordnet, wodurch eine beeindruckende, fast völlig zentralsymmetrische Innenarchitektur entsteht. Die Kuppel wurde bei dem Wiederaufbau zwischen 1955 und 1963 in einer Betonkonstruktion errichtet und mit einer teilweise schallabsorbierenden Innenschale verkleidet. Die inzwischen neu eingebaute Innenschale besteht ausschließlich aus schallhartem Material, so dass sich die ursprünglich schon lange Nachhallzeit noch einmal deutlich verlängert.



Abbildung 1: bereits fertig gestellte Kuppel, Aufsicht Grundriss und Schnitt (Bilder: Sichau & Walter)

Grundlegendes zur Raumakustik und Beschallung

Raumakustik

In sakralen Zentralbauten mit hohen Kuppeln ergeben sich aufgrund der Größe und den üblicherweise schallharten Oberflächen zwangsläufig lange Nachhallzeiten. Konkrete Vorgaben oder normative Anforderungen für Nachhallzeiten oder andere raumakustische Parameter gibt es nicht. Die Beurteilung der Raumakustik in einem Kirchenraum erfolgt i.Allg. anhand von Vergleichen mit anderen, meist älteren Kirchen. Deren Akustik ist weniger aus einem bewussten Planungsprozess heraus entstanden, sondern ergibt sich aus der Bauweise, den verwendeten Materialien und der Ausstattung. Daraus haben sich gewisse Erwartungshaltungen entwickelt, was man als eine „gute“ oder angemessene Akustik in Kirchen empfindet. Für große Kirchen erwartet man eine sakrale, getragene und volle Akustik, die mit einem langen Nachhall einhergeht. Der Einsatz von Schallabsorbieren zur Reduzierung der Nachhallzeit ist deshalb in Sakralbauten unüblich und wird allenfalls in Kirchenneubauten - aber auch da nur sehr zurückhaltend - praktiziert.

Bestimmte akustische Eigenheiten sind in runden Kuppelbauten kaum vermeidbar und treten hier deutlicher als in üblichen Kirchenbauten mit Längsschiffen auf. So sind oft Echos oder Schallfokussierungen zu beobachten, die an bestimmten Positionen, meistens in der Raummitte bei impulsartigen Schallereignissen – wie z.B. einzelner Händeklatschen - auffällig sind. In der musikalischen Aufführungspraxis (mit kontinuierlich fortlaufenden Schallereignissen), bei Liturgien und Predigten sind diese Echos i.Allg. nicht hörbar.

So gut ein voller Klang prinzipiell für musikalische Darbietungen geeignet ist, so können sich doch zu lange Nachhallzeiten nachteilig auf die Klarheit der Darbietung – besonders bei sehr schnellen und strukturreichen Stücken – auswirken. Für bestimmte Repertoires kann eine hallige Kirche deshalb weniger geeignet sein. Besonders in großen und runden Kirchenräumen wird auch oft die mangelnde gegenseitige Hörbarkeit zwischen den Musikern oder Chormitgliedern und die zu geringe Raumantwort kritisiert. Ursache dafür ist das Fehlen früher und energiereicher Schallrückwürfe, da aufgrund der Raumgeometrie keine Reflexionsflächen in der Nähe existieren.

Natürliche Sprache ist in halligen Räumen ab gewissen Abständen sowieso schlecht zu verstehen. Generell muss deshalb bei Gottesdiensten und anderen Veranstaltungen eine Lautsprecheranlage eingesetzt werden.

Letztendlich ist die Akustik in Kirchen maßgeblich durch die vorhandene Größe und Raumform gegeben. Eine gezielte Beeinflussung der Akustik ist nur eingeschränkt möglich. Raumakustische Maßnahmen, die in Konzertsälen oder anderen Aufführungsstätten üblich sind, wie z.B. der Einsatz von Schallreflektoren, Deckensegeln, Absorberflächen und Diffusoren verbieten sich i.Allg. bei der Sanierung von Kirchen.

Beschallung

Im Gegensatz zur Raumakustik gibt es für die einzubauenden Beschallungsanlagen einige klare Anforderungen für bestimmte akustische Parameter. Das betrifft im Wesentlichen die Sprachverständlichkeit und Pegelverteilung im Auditorium sowie die Mindestlautstärke. Die Sprachverständlichkeit wird durch den Speech Transmission Index (STI) charakterisiert, der sowohl akustisch simuliert als auch gemessen werden kann und nicht unter einem Wert von 0,45 bis 0,5 (auf einer Skala von 0 bis 1) liegen darf. Pegelunterschiede sollten im Hörbereich nicht größer als 4 bis 5 dB(A) sein, die Lautstärke muss mindestens 70 bis 75 dB(A) betragen. Letzteres ist vielmehr ein Problem der Rückkopplungssicherheit der Anlage in Verbindung mit der Mikrofonierung als der möglichen Lautstärke der Lautsprecher.

Die erste Schwierigkeit für die Planung der Beschallungsanlage in der St. Hedwig-Kathedrale stellt die Lage des Altars in der Mitte mit den kreisförmig angeordneten Sitzreihen dar. Das klassische Konzept für die Kirchenbeschallung mit einer dezentrale Anordnung relativ vieler Lautsprecher an den Säulen des Längsschiffs, die nur in eine Vorzugsrichtung strahlen, ist in einer runden Kirche nicht anwendbar. Aus akustischer Sicht wäre

es bei dem vorliegenden Grundriss naheliegend, die Lautsprecher um den Altar herum anzuordnen und radial in alle Richtungen nach außen abstrahlen zu lassen. Selbsterklärend ist das aus architektonischen Gründen nicht gewünscht. Es kommt also nur die Anordnung von Lautsprechern im äußeren Randbereich des Raumes in Frage. Damit ist es nicht möglich, für alle Zuhörer die Abstrahlrichtungen mit den Blickrichtungen zu dem Altar oder Ambo in Übereinstimmung zu bringen. Das kognitive System stellt sich darauf aber relativ schnell ein. Auf jeden müssen die Lautsprecher bei einer Anordnung am Rand in der Lage sein, über größere Entfernungen hinweg die ausgedehnte Fläche zu beschallen.

Eine weitere Schwierigkeit stellt der lange Nachhall in der Kathedrale dar. Zwischen der Nachhallzeit und der Performance einer Beschallungsanlage besteht ein enger Zusammenhang. In sehr halligen Räumen wird der beim Hörer aus den Lautsprechern ankommende Direktschall durch die vielen Raumreflexionen überlagert und dadurch „verwischt“. Die Sprachverständlichkeit nimmt in Folge ab. Deshalb ist die Beschallungsanlage so zu konzipieren, dass der Direktschall der Lautsprecher im Wesentlichen nur auf die Publikumsebene trifft. Alle Schallstrahlen, die auf Wände oder in der Kuppel auftreffen, erzeugen zeitlich verzögerte Reflexionen und verhallen den Raum. Eine starke Bündelung der Abstrahlung der Lautsprecher ist damit unabdingbar. Zudem sollte die Anzahl der Lautsprecher so gering wie möglich gehalten werden (Prinzip der „Quellenminimierung“), da mehrere Lautsprecher auch mehr ungewollte Flächen anstrahlen sowie zusätzliche Laufzeitdifferenzen erzeugen, die durch die unterschiedlichen Abstände des Hörers zu den verschiedenen Lautsprechern bedingt sind.

Das Mittel der Wahl in sehr halligen Räumen in Verbindung mit der Notwendigkeit, größere Entfernungen zu überbrücken, ist der Einsatz von Tonsäulen mit der „Beam Steering Technologie“, wobei die Einzellautsprecher in den Tonsäulen unterschiedlich angesteuert werden, so dass eine gezielte Bündelung in vertikaler Richtung und eine optimierte Neigung der Abstrahlung ermöglicht wird. In horizontaler Richtung strahlen die Tonsäulen dagegen breit ab, so dass eine scheibenförmige Abstrahlcharakteristik entsteht (s. Abbildung 2). Deshalb ist der Anordnung der Tonsäulen immer in einer Höhe erforderlich, die nicht zu sehr über der Hörebene liegt, so dass der Schall mehr oder weniger über die Publikumsfläche streift.

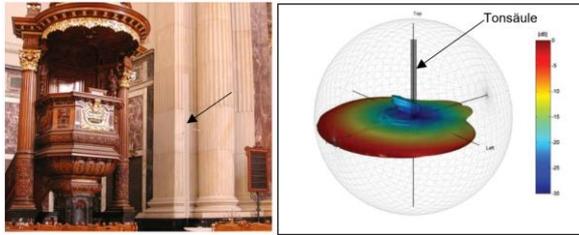


Abbildung 2: Einbaubeispiel im Berliner Dom und beispielhafte Abstrahlcharakteristik von Tonsäulen mit Beam Steering Technologie (Bilder: Duran Audio)

Eine aktuelle Weiterentwicklung sind Matrixlautsprecher mit einer Anordnung vieler Einzelauslautsprecher in einem Rechteck (statt der linearer Anordnung bei Tonsäulen). In Verbindung mit Beam Steering ist eine Bündelung und Ausrichtung der Schallstrahlen in vertikaler *und* horizontaler Richtung möglich. Damit können Publikumsflächen gezielter und selektiver als mit Tonsäulen angestrahlt und somit ungewollte Reflexionen an anderen Raumbegrenzungsflächen besser vermieden werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass man den Lautsprecher höher als Tonsäulen mit ihrer „scheibenförmigen“ Abstrahlung positionieren kann, so dass die gesamte Publikumsfläche mit einem Lautsprecher versorgt wird, ohne im hinteren Bereich die bei streifendem Schall zwangsläufig auftretenden Pegelverluste hinnehmen zu müssen. Das Prinzip der Quellenminimierung kann somit konsequenter umgesetzt werden.

Matrixlautsprecher gibt es schon seit einiger Zeit, hatten aber bisher ein Nischendasein. Erst kürzlich wurde ein wirklich leistungsfähiges System zur Marktreife gebracht, das ein effektives Beam Steering ermöglicht.

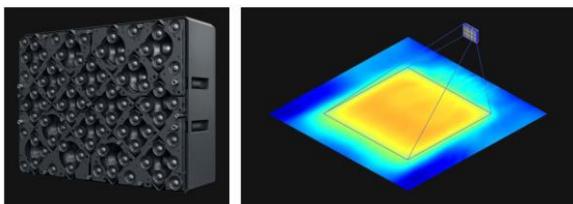


Abbildung 3: Matrixlautsprecher mit Beam Steering Technologie und beispielhafte Abstrahlcharakteristik (Bilder: Holoplot GmbH)

Beide Beschallungssysteme lassen sich nur mit rechnergestützten Simulationen planen und nicht – wie bei konventionellen Lautsprechern teilweise praktiziert – nach „Gefühl“ einbauen. Trotz aufwändiger Simulationen sind in kritischen Räumen Probebeschallung sinnvoll. Zum einen sind Schwächen oder gar Fehler in Simulationsmodellen nicht immer offensichtlich, zum anderen können

wichtige Punkte wie die Rückkopplungssicherheit einer Beschallungsanlage kaum oder gar nicht in Simulationen erfasst werden. Letztendlich kann die subjektive Akzeptanz bestimmter Aspekte wie die fehlende Übereinstimmung der optischen Sichtachsen mit der Abstrahlrichtung der Lautsprecher oder die oft für den Redner irritierende Zeitdifferenz zwischen dem gesprochenen Wort und dem Eintreffen des identischen Signals vom relativ weit entfernten Lautsprecher nur am konkreten Probeaufbau getestet werden.

Planung der Raumakustik und Beschallungsanlage

Raumakustik

Bei der Gestaltung des Innenraumes der Kathedrale hat die Architektur das absolute Primat. Raumgeometrie und Oberflächengestaltung sind weitestgehend vorgegeben. Bauliche Maßnahmen, die zum Zweck der Beeinflussung der Raumakustik dienen, haben sich dem unterzuordnen.

Während des Wiederaufbaues der Kathedrale (1955 – 1963) wurde unter der Betonkuppel eine Verkleidung angebracht, die in größeren Teilbereichen mit schallabsorbierendem, perforiertem Lochblech ausgebildet war. Über die damaligen Beweggründe kann man nur spekulieren. Möglicherweise scheute man sich vor einer extremen und problematischen Akustik, wie sie in einigen damals errichteten, puristischen Kirchenneubauten mit völlig glatten und unstrukturierten Sichtbeton-Oberflächen entstand (ein prominentes Beispiel dafür ist die 1954 gebaute Kirche St. Rochus in Düsseldorf).

Zu Beginn des Planungsprozesses wurde relativ schnell die Entscheidung getroffen, die neue Innenschale der Kuppel schallhart auszubilden, um der Kathedrale auch in akustischer Hinsicht einen sakraleren Charakter zu geben, der zudem besser zur neu geschaffenen, klaren Architektur passt. Daneben spielten aber auch andere Kriterien wie die Feinstruktur der Oberflächen, die Verarbeitbarkeit auf der Baustelle und die erhöhte Verschmutzungsgefahr der letztendlich porösen Absorberoberflächen eine Rolle.

Die nach dem Umbau zu erwartenden Nachhallzeiten wurden mit dem Programm CATT-Acoustic simuliert. Diese erhöhen sich im unbesetzten Zustand der Kathedrale um ca. 2 bis 3 Sekunden gegenüber dem Zustand vor der Sanierung. Mit steigender Besucherzahl sinken die Nachhallzeiten deutlich (Abbildung 4).

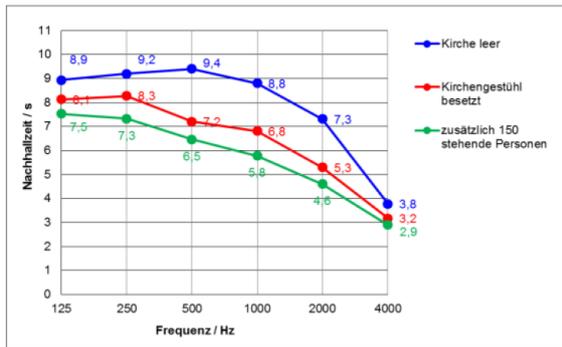


Abbildung 4: simulierte Nachhallzeiten bei verschiedenen Besetzungsgraden

Andere raumakustische Parameter wie z.B. die Klarheit C_{80} , Schwerpunktzeit T_S oder der Seitenschallgrad LF wurden ebenfalls ermittelt. Die Relevanz dieser Ergebnisse ist allerdings begrenzt, da man aufgrund der architektonischen Randbedingungen eigentlich nur Ergebnisse konstatieren kann, ohne sinnvolle Beeinflussungsmöglichkeiten zu haben. Ohnehin gibt es keine allgemein gültigen Bewertungsmaßstäbe oder Zielvorgaben.

Beschallungsanlage

Im Vergleich zur Raumakustik ist der Planungsaufwand für die Beschallungsanlage in der Kathedrale bei weitem größer. So sind die Freiheitsgrade möglicher Lösungen auch höher, obwohl bestimmte von der Architektur vorgegebene Randbedingungen zu beachten waren. Die Beschallungsanlage sollte so unauffällig wie möglich in die Architektur integriert werden. Völlig ausgeschlossen war von Beginn an eine Anordnung der Lautsprecher frei im Raum. Eine Positionierung ist nur am Rand zulässig.

Im Gegensatz zur Raumakustik gibt es eindeutige Anforderungskriterien für die akustischen Eigenschaften der Beschallungsanlage, insbesondere der Sprachverständlichkeit (STI) und der Schallpegelverteilung im Auditorium (s. Ausführungen im vorangegangenen Kapitel).

Um diese Anforderungen in dem (zumindest für Beschallungsanlagen) akustisch schwierigen Raum zu erfüllen, war aus den Erfahrungen mit ähnlichen Planungen sofort klar, dass nur der Einsatz von Tonsäulen mit Beam Steering Technologie in Frage kommt. Die bereits weiter oben beschriebenen Matrixlautsprecher waren damals noch nicht auf dem Markt verfügbar.

Die Feinarbeit lag in der konkreter Auswahl der Tonsäulen, Festlegung der Anzahl und Positionen sowie der elektronischen Optimierung der Abstrahlcharakteristiken (Beam Steering). Das Ergebnis vieler Variantenuntersuchungen und Simulationen (die

ebenfalls mit dem Programm CATT-Acoustic ausgeführt wurden) ist in Abbildung 5 dargestellt. Es sind 6 Tonsäulen unterschiedlicher Leistung im Randbereich angeordnet. Die Hauptabstrahlrichtungen der Lautsprecher von rechts nach links stimmen zumindest für einen Teil der Kirchenbesucher mit der optischen Achse zu den Liturgie Teilnehmern am Altar oder Ambo überein. Die beiden hinteren Lautsprecher werden mit einer zeitlichen Verzögerung (delay) angesteuert und sollen – besonders bei Vollbesetzung der Kirche – dem Pegelabfall durch die Dämpfung des flach über das Publikum streifenden Schalls entgegen wirken. Die vordersten, leistungsschwächeren Tonsäulen ganz rechts beschallen die Plätze um den Ambo herum. Die Sprachverständlichkeiten (STI) sowie die Pegel sind im Auditorium sehr gleichmäßig verteilt. Der Mittelwert der STI-Werte übersteigt im unbesetzten Zustand den Anforderungswert von 0,5 (s. Abbildung 5), so dass in Anbetracht der sehr hohen Nachhallzeiten eine gute Sprachverständlichkeit erreicht wird. Mit steigender Besucherzahl und damit sinkender Nachhallzeit verbessert sich die Sprachverständlichkeit noch einmal deutlich.

Um die Simulationsergebnisse zu validieren und die Rückkopplungssicherheit der Anlage bei der Nutzung von Mikrofonen verschiedenster Art an unterschiedlichen Positionen zu überprüfen, wurde eine Probebeschallung durchgeführt, bei der die Lautsprecher exakt wie in der Planung (gleiche Lautsprecher, Positionen, gleiche Beam Steering Einstellungen, gleiche Delays) in der Kathedrale aufgebaut wurden. Akustische Messungen der STI-Werte und der Pegel ergaben eine sehr gute Übereinstimmung mit den theoretischen Simulationsergebnissen. Noch wichtiger als die reinen Messungen waren durchgeführte Sprachtests mit der Anlage, um einen subjektiven Eindruck zu bekommen. Die Performance der Anlage wurde von den Anwesenden als positiv bewertet.

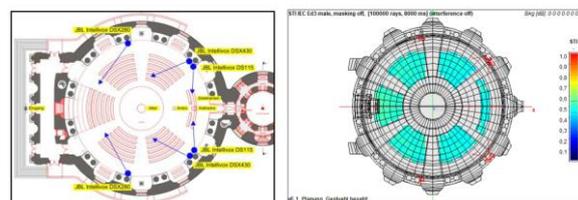


Abbildung 5: Beschallungskonzept für die Tonsäulen und simulierte Sprachverständlichkeit STI

Ursprünglich war geplant, die Tonsäulen bündig in entsprechenden Aussparungen in den Säulen aus Mauerwerk (die den umlaufenden Kuppelring tragen) zu integrieren. Eine entsprechende Kaschierung mit einem akustisch transparenten Material hätte die Lautsprecher fast unsichtbar erscheinen lassen. Aus Gründen des Denkmalschutzes waren bauliche

Eingriffe in den Säulen jedoch nicht zulässig. Die alternative Aufstellung der Lautsprecher vor oder neben den Säulen wurde aus architektonischen Gründen als problematisch angesehen.

In der Folge wurde noch einmal nach völlig neuen Ansätzen zur Beschallung gesucht. Inzwischen sind die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen, neuartigen Matrixlautsprecher mit Beam Steering Technologie von einer deutschen Firma zur Marktreife entwickelt worden, so dass ein Einsatz in der Kathedrale prinzipiell möglich wurde. Der wesentliche Vorteil liegt in einer Bündelung des Schallstrahles in vertikaler und horizontaler Richtung. Da es sich mehr oder weniger um ein Pilotprojekt handelt, das so in eine Kirche noch nie umgesetzt wurde, gab es intensive Vorabgespräche, Diskussionen und Variantenuntersuchungen. Alle erforderlichen Lautsprecherkonfigurationen und akustischen Simulationen konnten nur vom Hersteller durchgeführt werden, weil die entsprechende Software noch nicht allgemein zugänglich ist. Die Planung ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vollständig abgeschlossen, eine sowohl architektonisch akzeptable als auch akustisch sinnvolle Variante mit nur einem einzelnen Matrixlautsprecher bildet sich aber heraus (s. Abbildung 6). Durch eine akustisch transparente Verkleidung soll der Lautsprecher in oder vor der Wand optisch weitgehend unauffällig gestaltet werden.

Bei einer Testbeschallung konnte gezeigt werden, dass eine gute Sprachverständlichkeit (mittlere STI-Werte über 0,5), ausreichende Rückkopplungssicherheit und gleichmäßige Pegelverteilung erzielt wird. Nur in Teilbereichen gibt es noch Optimierungsbedarf, so ist z.B. für die Bestuhlung in der Nähe des Ambos eine Lösung für eine unterstützende Beschallung zu finden. Aufgrund des vorläufigen Zwischenstandes der Planung werden hier noch keine detaillierteren Ergebnisse dargestellt.



Abbildung 6: geplante Anordnung des Matrixlautsprechers und Probebeschallung (mit geringfügig anderer Position des Lautsprechers als in der Planung)

Zusammenfassung

Die St. Hedwig-Kathedrale in Berlin mit ihrem kreisrunden Grundriss und einer beeindruckenden Kuppel wird zum laufenden Zeitpunkt grundlegend saniert. Die bisherige Verkleidung der Kuppel aus schall-

absorbierendem Material wurde durch eine völlig schallharte Innenschale ersetzt. Dadurch erhöhen sich die Nachhallzeiten signifikant. Diese Entscheidung wurde bewusst getroffen, um eine sakrale, dem Raum angemessene Akustik zu schaffen. Der lange Nachhall, die runde Raumform und ein konsequent auf die Raummitte ausgerichteter liturgisches Konzept mit dem zentral abgeordneten Altar stellen eine große Herausforderung für die Planung einer Beschallungsanlage dar. Es wurden 2 Beschallungskonzepte entwickelt, die auf dem Einsatz von Lautsprechern mit der Beam Steering Technologie beruhen. Im ersten Konzept sind mehrere am Rand des Raumes verteilte Tonsäulen vorgesehen, während in einem weiteren, völlig neuartigen Ansatz ein einzelner Matrixlautsprecher an einer erhöhten Position an einer Seitenwand eingesetzt werden soll. Beide Systeme sind hinsichtlich der erzielbaren Sprachverständlichkeiten sehr leistungsfähig. Der Entscheidungsprozess, welches der beiden Konzepte zum Einsatz kommt, findet momentan statt und ist noch nicht abgeschlossen.

Literatur

- Ballou, G. (ed.), Handbook for Sound Engineers, 2nd Edition, Focal Press, 1998
- DIN EN 60268-16:2012-05 Elektroakustische Geräte, Teil 16: Objektive Bewertung der Sprachverständlichkeit durch den Sprachübertragungsindex
- Fasold, W., Veres, E.: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis, Verlag für Bauwesen, 1998
- Meyer, Jürgen: Kirchenakustik, Verlag Erwin Bochinsky, 2003
- Weinzierl, S. (Hrsg.): Handbuch der Audiotechnik, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008

Leistungsfähiger Schallabsorber für Flachdecken mit Bauteilaktivierung

Thomas Friedrich¹

¹ Innogration GmbH, 54470 Bernkastel-Kues, E-Mail: th.friedrich@innogration.de

Kurzfassung

Die Bauteilaktivierung ist ein effizientes System, um Gebäude wirtschaftlich zu klimatisieren. Nachteilig wirkt sich die glatte Deckenunterseite der Betondecke auf die Nachhallzeit aus. Dieses Problem wird mit Streifenabsorber gelöst, die in die deckenbündig integriert werden. Die Optimierung der Geometrie dieser Streifen hat auch dazu geführt, insbesondere hohe Absorptionswerte für die tiefen Frequenzen anzubieten.

Abstract

Component activation is an efficient system for air conditioning buildings economically. The smooth underside of the concrete ceiling has a disadvantageous effect on the reverberation time. This problem is solved with strip absorbers that are integrated flush with the ceiling. The optimization of the geometry of these strips has also led to offering particularly high absorption values for the low frequencies.

Einleitung

Flachdecken stellen eine weit verbreitete Konstruktion für Bürogebäude dar. Die Betonmasse des Querschnitts kann gleichzeitig zur Speicherung von Wärmeenergie genutzt werden. Die im Betonquerschnitt eingelegten Rohrleitungen transportieren die Wärmeenergie. Dank der Temperaturdifferenz zwischen Deckenunterseite und Raum wird über den Selbststrahlungseffekt der Raum infolge der Strahlung erwärmt

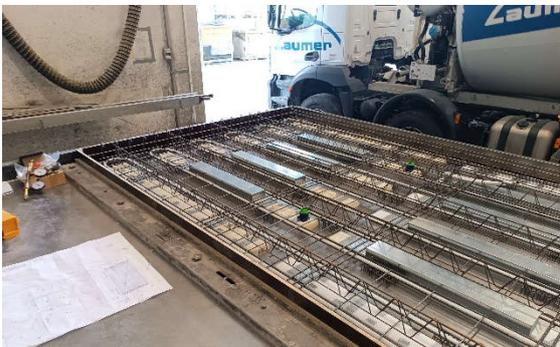


Abbildung 1: Deckenplatte mit Bauteilaktivierung und Schallkörper für die Aussparungen der Absorber

oder auch gekühlt. Die nach diesem Prinzip arbeitende Bauteilaktivierung stellt in der heutigen Zeit

ein sehr wirtschaftliches und energieeffizientes System zur Klimatisierung von Gebäuden dar. Die Vorteile dieser Form der Klimatisierung sind offensichtlich.

Da die Deckenunterseite zur Energieabgabe offenbleiben muss, hat man keine Möglichkeit die Raumakustik über entsprechende Maßnahmen zu beeinflussen. Der Einbau einer abgehängten Decke scheidet aus und vereinzelt Deckensegel behindern den Wärmetransport ebenfalls. Schlussendlich verbleibt die freie Deckenunterseite als schallharte Oberfläche. Die traditionellen Techniken zur Schallabsorption bleiben außen vor.

Streifenförmige Metallkassetten als Absorber

Wir haben uns über einen langen Zeitraum mit dieser Problematik beschäftigt und nach praktikablen Lösungen gesucht. Zuerst war die Idee, schmale streifenförmige Elemente deckenbündig in die Deckenunterseite zu integrieren. Die Streifen bestehen aus



Abbildung 2: Deckenunterseite mit den Aussparungen für die Akustikabsorber

einer Kassette aus Metall, die in einer Aussparung im Beton fixiert werden. Die Geometrie der Kassette ist so geformt, dass die Stege mit dem seitlichen Beton in Kontakt stehen. So kann die Wärme vom Beton in das gut wärmeleitende Blech transportiert werden. Über die Oberfläche der Kassette wird dann die Wärme an den Raum abgegeben.

Entscheiden für die Reduktion der Schallwellen bleibt das eingebaute poröse Material, welches in der Kassette hinter der gelochten Oberfläche angeordnet

ist. So können die Schallwellen in die Kassette eindringen und werden von dem leichten Material gedämpft.



Abbildung 3: Aussparung für einen Absorber mit den ergänzten Volumen für die Tiefenabsorber

Die streifenförmigen Elemente bieten einen weiteren Vorteil bei der Schallreduktion. Die umlaufende Kante der Streifen bildet in der Summe einen großen Anteil und wirkt zugleich als Kantenabsorber. Die Schallwellen werden gebrochen und in viele kleiner Wellen geteilt, was wiederum zur Schallreduktion beiträgt.

Optimierter Querschnitt der Metallkassetten

Um die Funktion der metallischen Absorber weiter zu optimieren wurde die Geometrie weiter optimiert. Die Breite des Querschnitts wurde verdoppelt. Damit gelingt es mit einer geringeren Stückzahl einen hohen Belegungsgrad bis zu 30% umzusetzen. Zudem wurde die zum Raum weisende Fläche des Absorbers über die Aussparung hinweg vergrößert und der Anteil an zusätzlicher Fläche steht in direktem Kontakt mit dem umgebenden Beton. Derart kann der Wärmeaustausch zwischen Beton und Metallkassette noch intensiver stattfinden.

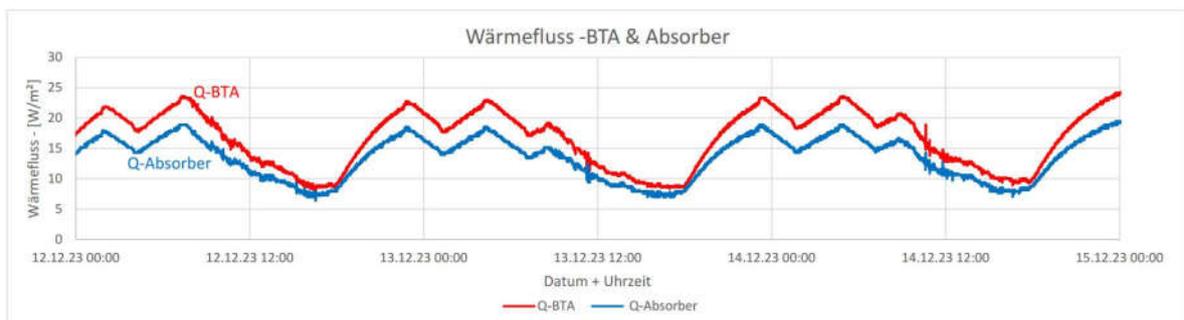


Abbildung 4: Vergleich des Wärmefluss in der Betondecke und in der Metallkassette des Absorbers

Optimierung des Volumens der Absorber zum Einbringen von porösem Material

Diese Lösung zeigt ein entsprechendes Absorptionsverhalten über alle Frequenzen hinweg. Lediglich

der Schallabsorptionsgrad für die niedrigen Frequenzen bleibt weiterhin gering. Diese Aufgaben wurde dann mit einem sogenannten Tiefenabsorber gelöst. Die Aussparung im Beton wurde bereichsweise entlang des Streifens vergrößert, so dass mehr Volumen für den Einbau des porösen Materials zur Verfügung steht, und die Schallwelle über einen längeren Weg eindringt.

Diese Maßnahme führt dann zu einer deutlichen Vergrößerung der Absorptionswerte im niedrigen und mittleren Frequenzbereich.

Umsetzung der Anordnung der Absorber mit vorgefertigten Deckenelementen

Die vorgenannten Aussparungen für die Streifen und den Tiefenabsorber lassen sich idealerweise bei der Vorfertigung umsetzen. Die für die Streifen passenden schlanken Schalkörper werden auf dem Fertigungstische gemäß dem vorgesehenen Belegungsmuster befestigt. Diese Schalkörper bilden die Aussparung bis zu einer Stärke von 4cm ab. Tiefer reichende Aussparungen werden mit aufgesetzten Blechkisten realisiert. Die vorgefertigten Deckenelemente mit den regelmäßig angeordneten Aussparungen für die Streifen werden ausgerichtet und montiert. Erst während der Phase des Ausbaus werden die mit porösem Material bestückten Metallkassetten in

die vorbereiteten Aussparungen eingebaut. Zur besseren Wärmeübertragung werden die Kassetten mit Schrauben fest an der Betonoberfläche fixiert.

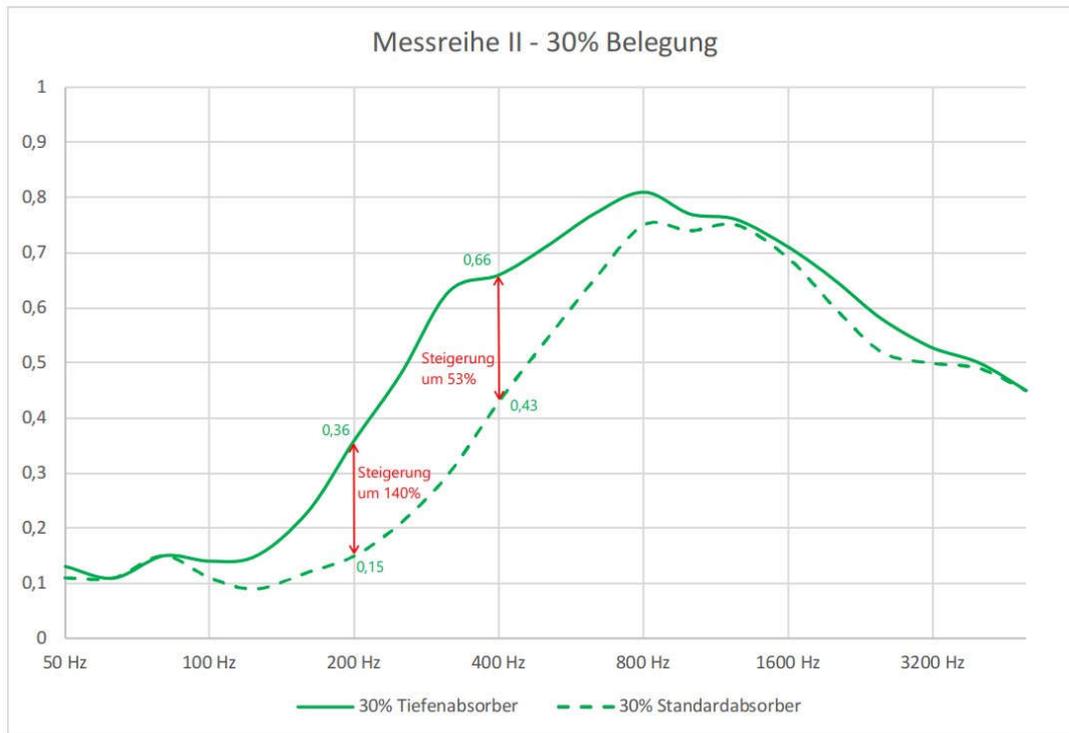


Abbildung 5: Vergleich der Absorptionswerte zwischen Standardabsorbern und den Tiefenabsorbern bei einer Belegung von 30%.



Abbildung 6: Deckenunterseite mit der Anordnung der Absorber

Zusammenfassung

Die neu entwickelten Schallabsorber lassen sich vorzugsweise in die vorgefertigten Deckenelemente mit Bauteilaktivierung integrieren. Die Geometrie der Metallkassetten ist so ausgebildet, dass die thermische Energie ohne Einschränkungen über die gesamte Decke verteilt wird. Das optimierte Volumen der Absorber ermöglicht einen sehr hohen Absorptionswert für alle Frequenzen, insbesondere auch für die tiefen Frequenzen.

SESSION B · 07.03.2024

Thema: Bauakustik

Kooperationspartner

R
P **TU** Rheinland-Pfälzische
Technische Universität
Kaiserslautern
Landau

Bauhaus-
Universität
Weimar

WBA

WBA | Bauhaus Weiterbildungs-
akademie Weimar e.V.
Institut an der
Bauhaus-Universität Weimar



SCHALLSCHUTZ IM HOLZBAU: VORURTEILE & HERAUSFORDERUNGEN - BEISPIELE AUS DER PRAXIS

Veronika Silberbauer, PIRMIN JUNG Deutschland GmbH, Deutschland, E-Mail:
veronika.silberbauer@pirminjung.de

Kurzfassung

Die Klimakrise zwingt die Bauindustrie nachhaltiger zu denken und zunehmend auf nachwachsende Rohstoffe zurückzugreifen. Dieser „Trend“ kommt der Holzbaubranche zugute: So hieß es vor wenigen Jahren noch, der Holzbau sei schlecht gedämmt, wenig „entwickelt“ und häufig stellten der Brandschutz und Schallschutz große Hürden für mehrgeschossige Gebäude dar. Mittlerweile blicken wir auf eine Vielzahl von Konstruktionen und Möglichkeiten im Holzbau. Diese hohe Vielfalt erfordert jedoch auch eine stetige Weiterentwicklung in den verschiedenen Fachbereichen, um mit den Herausforderungen der Zeit mitgehen zu können. Dazu gehört auch der Schallschutz im Einklang mit den Bedürfnissen der Nutzer/innen.

Für Bauphysiker/innen wird es immer schwieriger, Bauteile rechnerisch im Schallschutz nachzuweisen, denn der Holzbau geht mittlerweile weit über die rechnerischen Möglichkeiten der DIN 4109 hinaus. Dennoch darf und muss der Schallschutz keine Abstriche machen, wenn es um Neubauten und Bestandssanierungen in Holzbauweise geht. Das Vorurteil, der Holzbau sei „hellhörig“ steckt noch in vielen Köpfen fest. Anhand von ausgewählten Praxisbeispielen wird erläutert, welche Herausforderungen bei der Nachweisführung aktuell bestehen und mit welchen Möglichkeiten auch ein sehr guter Schallschutz im Holzbau erreicht werden kann.

Abstract

The climate crisis is forcing the construction industry to think more sustainably and increasingly rely on renewable raw materials. This "trend" is benefiting the timber construction industry: just a few years ago, it was said that timber construction was poorly insulated, not very "developed" and that fire protection and sound insulation often posed major hurdles for multi-storey buildings. In the meantime, we can look back on a wide range of constructions and possibilities in timber construction. However, the high degree of variance also requires constant further development in the various specialist areas in order to keep pace with the challenges of the times. This also

includes sound insulation in harmony with the needs of the users.

It is becoming increasingly difficult for building physicists to verify building components mathematically, as timber construction now goes far beyond the mathematical possibilities of DIN 4109. Nevertheless, sound insulation cannot and must not be compromised when it comes to new buildings and refurbishments in timber construction. The prejudice that timber construction is "hard of hearing" is still stuck in many people's minds. Practical examples will be used to explain the challenges that currently exist in the verification process and how these can be worked out and solved at an early stage in the planning process.

Der Holzbau im Wandel der Zeit

Massivholzdecken, Balkendecken, Hohlkastendecken, Holz-Beton-Verbunddecken, Rippendecken, ... bereits durch die Vielzahl an unterschiedlichen Deckenkonstruktionen ist der Holzbau sehr komplex geworden. In Kombination mit (nicht) tragenden Innen- und Außenwänden in Holzrahmen- und Holzmassivbauweise ist die Variabilität in den vergangenen Jahren enorm gewachsen. Zusätzlich entwickeln sich auch die Anforderungen an die verschiedenen Fachbereiche in der Bauphysik: In Abhängigkeit der Gebäudeklasse und Nutzung sind Brandschutzanforderungen zu erfüllen und zusätzlich ist der Bedarf an einem hohen schalltechnischen Komfort durch die Nutzer/innen gewünscht. Und auch der Wärme- und Feuchteschutz fordert eine differenzierte Bauteil- und Detailentwicklung durch stetig zunehmende Anforderungen. Ein weiterer Faktor bei der Entwicklung von Holzbaudetails ist die Statik des Gebäudes, die unmittelbar auch den Schallschutz maßgeblich beeinflusst.

Neben den Knotenpunkten im Gebäude, die für die flankierende Übertragung eine wesentliche Rolle im Schallschutz einnehmen, gibt es jedoch noch viele weitere Faktoren, die in den frühen Planungsphasen durch die Fachplaner/innen berücksichtigt werden müssen. Die Herausforderungen im Praxisalltag im Schallschutz bestehen derzeit zu folgenden Themen:

- Abhangdecken
- Schachtwände von Aufzugsanlagen in Holzmassivbauweise

- Treppenraumwände in Holzmassivbauweise
- Bodengleiche Duschen
- Fertignasszellen

Die Anforderungen an den Schallschutz im Wandel der Zeit

Die Anforderungen der DIN 4109 an den Schallschutz sind in den vergangenen Jahrzehnten stetig angepasst und geändert worden. Seit 1944 steht dabei das Gesundheitswohl der Nutzer im Vordergrund. In Abbildung 1 ist die Historie der Anforderung an das bewertete Bau-Schalldämm-Maß von 1944 bis heute grafisch dargestellt. Seit 1989 mit der Einführung des Beiblatt 2 der DIN 4109 wird im Schallschutz zwischen den erhöhten Anforderungen und den Mindestanforderungen differenziert. Mit der Einführung der neuen DIN 4109 Teil 5: „Schallschutz im Hochbau – erhöhte Anforderungen“ wird ein erforderliches $R'_w \geq 56$ dB für Trennwände zwischen fremden Nutzungseinheiten in Wohngebäuden gefordert.

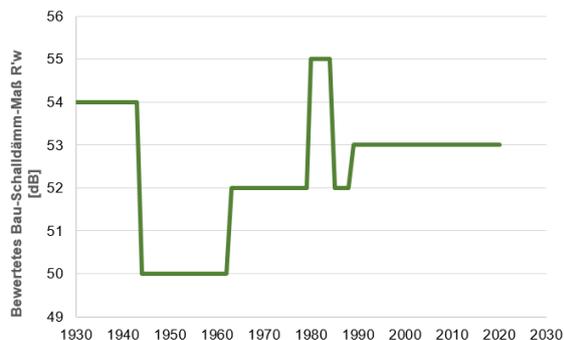


Abbildung 1: Das bewertete Bau-Schalldämm-Maß – die Anforderungen der DIN 4109 seit ca. 1938 bis heute (Neubauer, 2021)

In der Praxis steht die Aufklärung des Bauherren in Bezug auf die Schutzziele der Normen DIN 4109-1 und 4109-5 sowie weiterer Schallschutzziele (z.B. VDI 4100, DEGA 103, Holzbauhandbuch) im Vordergrund. Die Anforderungen an den Schallschutz sind zu definieren, bevor die Holzbauplanung beginnen kann. Dabei sind vor allem die Unterschiede zwischen den Schutzzielen der DIN 4109-1 und der DIN 4109-5 klar hervorzuheben. Zusätzlich ist es wichtig, die Bauherren für die Thematik der tiefen Frequenzen zu sensibilisieren. Vorwiegend aufgrund des Trittschalls.

Tiefe Frequenzen

Die Anforderungen an die Spektrumanpassungswerte sind privatrechtlich mit den Bauherren zu vereinbaren, da bauordnungsrechtlich nur der Frequenzbereich bis 100 Hz betrachtet werden muss. Insbesondere im Holzbau kann der Tieftonbereich einen entscheidenden Einfluss auf die schalltechnische Qualität von Bauteilen bewirken: sowohl bei Decken (Trittschall) (Holzbauhandbuch,

2019), als auch bei Wohnungstrennwänden und Außenwänden.

Trittschall

Derzeit gibt es noch kein normatives Berechnungsverfahren zur Berechnung der Trittschallverbesserung von abgehängten Decken. Pauschale Verbesserungsmaße für Unterdecken wie sie aus dem bereits zurückgezogenen Beiblatt 1, DIN 4109 (1989) bekannt sind, können für den Holzbau nicht angewendet werden. Entscheidend ist die Berechnung der Resonanzfrequenz des Masse-Feder-Systems, die sich aus dem Deckenaufbau ergibt. Die Resonanzfrequenz sollte im Bereich $f_0 < 50$ Hz liegen, um die Schalldämmung des zweischaligen Bauteils deutlich zu verbessern (Holzbauhandbuch, 2019). Hilfreich sind hierbei entkoppelte Abhangsysteme die eine starre Verbindung zur Rohdecke unterbinden. Zusätzlich ist die Erhöhung der Masse des Abhangsystems durch schwere Gipsplatten erforderlich. Die Erregerfrequenz des Abhangsystems muss dabei durch die Fachplanung Bauakustik berücksichtigt werden, in der Regel sollte diese zwischen 10 -12 Hz liegen.

„Leichte“ Deckenkonstruktion (siehe Abbildung 2, Holzbalkendecke) erreichen sehr gute Luft- und Trittschallergebnisse – sowohl bezogen auf die Einzahlwerte $L'_{n,w}$ als auch R'_w als auch unter Berücksichtigung des Tieftonbereichs. Für Massivholzdecken sind dagegen hohe Aufwendungen erforderlich, um die erhöhten Anforderungen an den Trittschall zu erreichen: sowohl eine schallentkoppelte Abhandecke sowie eine biegeeweiche Beschwerung der Massivholzdecke von mind. 150 kg/m² kann unter Berücksichtigung der Spektrumanpassungswerte notwendig sein.

Aufzugsschächte in Holzbaumassivbauweise

2019 wurde die DIN 8989 „Schallschutz in Gebäuden – Aufzüge“ veröffentlicht. Mitunter werden Angaben zu den erforderlichen flächenbezogenen Massen der Schachtwände von Aufzugsanlagen gemacht. Bauordnungsrechtlich ist die DIN 8989 (bislang) in keinem Bundesland eingeführt, sie zählt jedoch zu den anerkannten Regeln der Technik. In Zusammenhang mit einem Schacht in Massivholzbauweise sowie leichten Decken in Holzbauweise lassen sich die Anforderungen der DIN 8989 in Bezug auf die flächenbezogene Masse der Bauteile nicht erfüllen. Die Praxis zeigt jedoch, dass auch Schächte in Massivholzbauweise es ermöglichen, die Anforderungen an den maximal zulässigen Schalldruckpegel einzuhalten. Mit einer zweischaligen Konstruktion aus Brettsperholz und einer freistehenden Vorsatzschale kann auch hier über das physikalische Prinzip des Masse-Feder-Systems die Resonanzfrequenz deutlich unter 50 Hz

ausgelegt werden. Damit werden insbesondere die auftretenden tieffrequenten Geräusche aus dem Betrieb des Aufzugs nicht in die angrenzenden Räume übertragen.

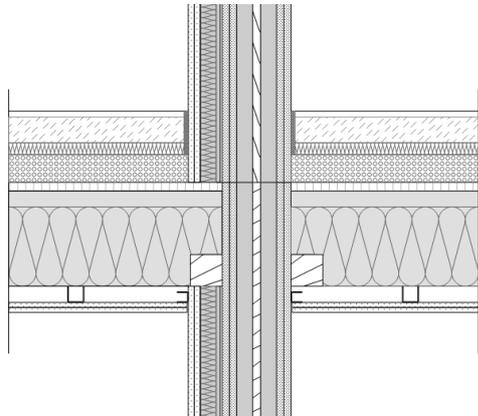


Abbildung 2: Vertikalschnitt Geschossübergang: Schachtwand eines Aufzugs in Brettsperrholz mit freistehender Vorsatzschale und Holzbalkendecke mit schallentkoppelter Abhangdecke. Nach Fertigstellung des Objekts wurde der Norm-Schalldruckpegel gemäß DIN EN ISO 10052 aus dem Betrieb des Aufzuges gemessen: $L_{AF,max,n} \leq 23 \text{ dB(A)}$ (nach Fremdgeräusch-Korrektur) (Neubauer, 2023).

Entscheidend für die Einhaltung der Anforderungen an den Schallschutz aus dem Betrieb von Aufzugsanlagen ist die Montage der Führungsschienen sowie die Betriebsart des Aufzuges. Ausgehend von den in der DIN 8989 angegebenen Anforderungen an die flächenbezogene Masse von flankierenden Bauteilen angeschlossen an die Schachtwand von Aufzügen, ist auch die Anschlusssituation von Wänden, Decken und des Daches ausschlaggebend für die Einhaltung an die maximal zulässigen Schalldruckpegel. Auf kostspielige Neoprenlager konnte in dem in Abbildung 2 dargestellten Detail verzichtet werden, da die Geschosstrenndecken eine schallentkoppelte Abhangdecke aufweisen. Zudem ist die oberseitig aufgebraute biegeweiße Masse (hier: elastisch gebundene Kalksplittschüttung) als Beschwerung der Decken ausreichend. Die Befestigung des Aufzugs an der Schachtwand ist ohne Entkopplungsmaterial ausgeführt worden. Der Aufzughersteller montierte die Führungsschienen des Aufzugs innenseitig am Brettsperrholz der Schachtwand.

Treppenraumwände in Holzmassivbauweise

Auch Treppenraumwände können in Holzmassivbauweise ausgeführt werden, ohne die Erfüllung der Anforderungen an den Trittschallschutz zu gefährden. Hierfür muss die Auflagersituation des Treppenlaufs durch die Fachplanung Bauakustik

geprüft werden. Der in Abbildung 2 dargestellte Wandaufbau ist auch für die Treppenraumwand vorgesehen worden. Die freistehende Vorsatzschale begünstigte nicht nur eine sehr gute Luftschalldämmung ($D_{n,w} \geq 70 \text{ dB}$) der Treppenraumwand, sondern führte auch zur Einhaltung der erhöhten Anforderungen an den Trittschall. Die gewendelte Stahlbetontreppe wurde an insgesamt zwei Auflagerpunkten in der Massivholzwand befestigt.

Weitere Herausforderungen im Schallschutz

Bauteilkenndaten

Für Planer/innen im Schallschutz steht bislang der Bauteilkatalog der DIN 4109-33 als wesentliche Datengrundlage zur Verfügung. Darüber hinaus bieten Produkthersteller aus der Holzbaubranche häufig eigens erstellte Bauteilkataloge mit Angaben zu den bewerteten Labor Schalldämm-Maßen sowie den bewerteten Norm-Trittschallpegeln an. Diese Angaben können nach Prüfung der Bauteilaufbauten hinsichtlich eingesetztem Material und dessen Eigenschaften (Rohdichten, Steifigkeiten, etc.) als Prognosegrundlage angewendet werden. Bauordnungsrechtlich ist der Nachweis jedoch nicht nach DIN 4109 geführt und erfordert daher eine Prüfung der Einhaltung der Anforderungen während bzw. nach Fertigstellung der Baumaßnahme.

Detailanschlüsse im Holzbau

Die hohe Vielfalt an Bauteilen im Holzbau, sowie die verschiedenen Anforderungen der Bauherren, Architektur, Statik und Bauphysik führen auch zu einer Vielzahl von unterschiedlichen Knotenpunkten in Gebäuden. Neben der Direktschalldämmung von Trennbauteilen, die insbesondere für den Trittschall einen wesentlichen Einfluss einnimmt, ist auch die flankierende Übertragung zu berücksichtigen. Die in der DIN 4109-33 angegebenen Daten zur Ermittlung der Flankenübertragung im Holz- und Leichtbau erlaubt jedoch nur eingeschränkt die Berechnung für die in der Praxis vorkommenden Anschlussdetails. Dies führt zwangsläufig dazu, dass oftmals Neoprenlager in Stoßstellen eingesetzt werden, obwohl diese häufig nicht zwingend notwendig sind. Nicht selten werden auch Gipsfaserplatten oder zusätzliche Vorsatzschalen eingeplant, um die Anforderungen an den Schallschutz zu erfüllen. In Anbetracht der erforderlichen **Ressourceneinsparung** sind solche Maßnahmen jedoch vollkommen überflüssig und hinsichtlich des Schallschutzes nicht immer zielführend.

Der Prozess der Lösungsfindung erfolgt in enger Abstimmung mit der Architektur und einem fundierten Austausch mit den übrigen Fachbereichen, insbesondere der Tragwerksplanung, dem Brandschutz und dem Wärme-/Feuchteschutz. Die

Lösungen stecken „im Detail“ und in der frühzeitigen Kommunikation der Projektbeteiligten.

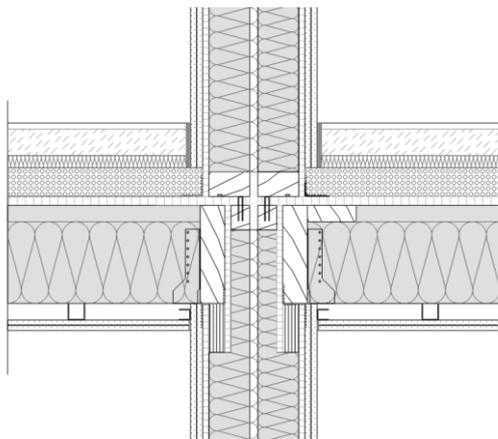


Abbildung 3: Detailplanung - Vertikalschnitt Wohnungstrennwand in Holzrahmenbauweise im Geschossübergang. Die Holz balkendecke spannt quer zur tragenden Wohnungstrennwand. Die flankierende Übertragung über die Decke ist im Holzbau immer spezifisch zu beurteilen, da diese maßgeblich das bewertete Schalldämm-Maß der Wohnungstrennwand beeinflusst.

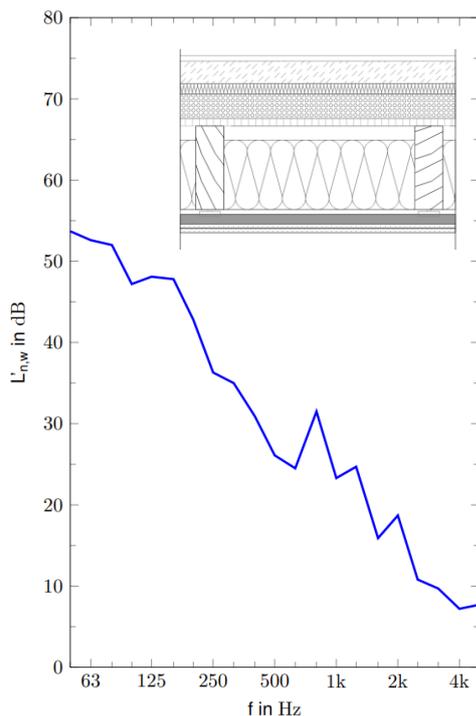


Abbildung 4: bewerteter Norm-Trittschallpegel der Geschosstrenndecke (Holzbalkendecke) mit schallentkoppelter Abhangendecke: $L'_{n,w} = 28 \text{ dB}$, $C_{50-2500} = 17 \text{ dB}$ (Neubauer, 2023)

Das in Abbildung 3 dargestellte Detail der Wohnungstrennwand im Geschossübergang wird in der Holzbauplanung in Leistungsphase 3 entwickelt. Die Anschlussituation ist für Beurteilung der flankierenden Übertragung der Decke für die Wohnungstrennwand entscheidend. Ebenso ist die

Flankenübertragung Luft- und Trittschall „von oben nach unten“ zu berücksichtigen.

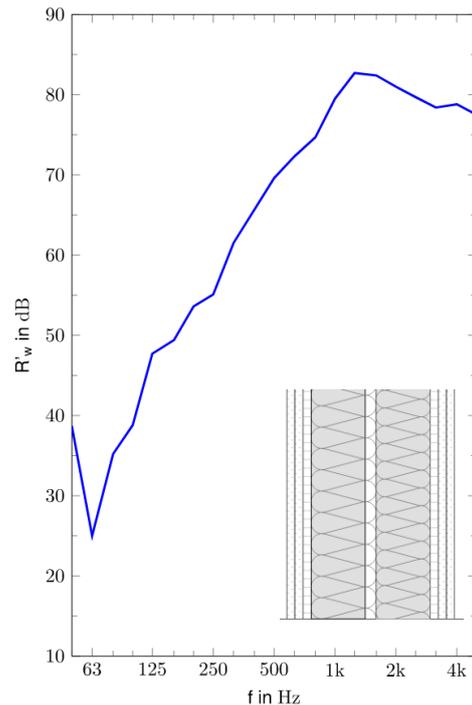


Abbildung 5: bewertetes Schalldämm-Maß $R'_{w} = 67 \text{ dB}$ der Wohnungstrennwand in Holzrahmenbauweise (Neubauer, 2023)

Fertignasszellen

Einen wesentlichen Fortschritt in Bezug auf die Vorfertigung im Bauwesen gibt es auch im Bereich von Nasszellen. Häufig werden Fertignasszellen für Hotelgebäude und Mehrfamilienhäuser aus Gründen der Zeitersparnis vorgesehen. Nasszellen ermöglichen einen komplett fertigen Ausbau von Bädern im Werk und werden vor Ort auf der Baustelle nur noch an die Sanitären Anlagen angeschlossen. Jedoch stehen Nasszellen in der Regel auf der Rohdecke. Bei Decken in Holzbauweise (Brettspertholz, Brettschichtholz oder Brettstapeldecken) ist daher eine Entkopplung der Nasszelle unumgänglich. Nach dem Prinzip des Ein-Masse-Schwingers kann eine Nasszelle prinzipiell mit Hilfe eines Neoprenlagers mit hoher Einfügedämmung ausgelegt werden. Die Theorie des Ein-Masse-Schwingers setzt jedoch voraus, dass die Rohdecke als schwingende Masse eine unendlich steife Platte ist. Dies trifft für den Holzbau nicht zu, insbesondere Massivholzdecken sind keine steifen Platten. Auch aufgrund der deutlich geringeren Masse (Massivholzdecke 200 mm = 90 kg/m²; Stahlbetondecke 200 mm = 480 kg/m²). Die Herausforderung besteht derzeit in der Auslegung der Entkopplung der Nasszellen, um die Anforderungen an den bewerteten Norm-Trittschallpegel zu erfüllen. Ein Prognoseverfahren zur Berechnung der Trittschallübertragung aus Fertignasszellen auf Decken in Holzbauweise diagonal und vertikal gibt es nicht. Hersteller von Fertignasszellen können jedoch

mit Prüfzeugnissen darlegen, dass die Anforderungen an den Trittschall eingehalten werden können. In Abstimmung mit der Fachplanung Bauakustik ist bei der Planung von Nasszellen in Gebäuden in Holzbauweise frühzeitig abzustimmen, welche Maßnahmen zu ergreifen sind. Zusätzlich muss auf eine optimale Grundrissanordnung der Nasszellen Rücksicht genommen werden, indem beispielsweise Nasszellen zwingend geschossweise übereinanderstehend angeordnet werden. Dies ist auch im Sinne der Haustechnik, um Leitungslängen, Verzweigungen und den Verzug von Leitungen zu verringern.

Bodengleiche Duschen

Ein barrierefreier Zugang zu Duschen ist mittlerweile Standard im Wohnungsbau. Die Ausführung bodengleicher Duschen kann dabei mittels Duschwannen oder mithilfe eines Gefälleestrichs erfolgen. Bei leichten Decken (Holzbalkendecken, Massivholzdecken, Hohlkastendecken) kann eine bodengleiche Dusche jedoch schalltechnisch problematisch sein, wenn die Duschwanne und der Ablauf direkt, ohne schallentkoppelnde Maßnahmen, auf der Rohdecke steht. Befindet sich direkt unterhalb des Bades ein schutzbedürftiger Raum einer angrenzenden fremden Nutzungseinheit, können die Aufprallgeräusche des Wassers sowie auch das Betreten der Dusche durch die Nachbarn deutlich wahrgenommen werden.

Es ist daher sinnvoll, bei der Grundrissplanung auf übereinanderliegende Badezimmer Rücksicht zu nehmen. Systeme Bodengleicher Duschen mittels Duschwannen werden mittlerweile von mehreren Herstellern angeboten. Auch bei bodengleichen Duschen mit Gefälleestrich ist die Ausführung spezifisch zu betrachten, da in der Regel keine Trittschalldämmung mit dynamischer Steifigkeit $s' < 10 \text{ MN/m}^3$ ausgeführt werden kann (Grund: Setzung des Estrichs führt zu Undichtigkeiten im Bereich der Dusche). Gummischrotmatten mit entsprechend geringer Steifigkeit sind zu bevorzugen, um den schwimmenden Estrich im Bereich der Dusche frei von Körperschallbrücken auszuführen.

Dachterrassen in Holzbauweise

Massivholzdecken können für den Schallschutz zwischen fremden Nutzungseinheiten mithilfe einer biegeweichen Masse beschwert werden, um die Anforderungen an den Luft- und Trittschallschutz zu erreichen. Die Anforderungen an den Trittschallschutz für Dachterrassen über fremden Nutzungseinheiten sind derzeit an die Anforderungen von Geschossdecken geknüpft. Für Dachterrassen ist aufgrund der fehlenden Masse aus Zementestrich und Trittschalldämmung mit geringer dynamischer Steifigkeit die Anforderung der DIN 4109-5 von $L'_{n,w} = 45 \text{ dB}$ insbesondere bei Massivholzdecken schwer zu erreichen. Daher ist bei Vereinbarung der

Schutzziele darauf zu achten, ob auch für Dachterrassen die erhöhten Anforderungen erfüllt werden können.

Bei einer fehlenden Beschwerung der Tragstruktur aus Holz können daher nur mit einer schallentkoppelten, abgehängten Decke die erhöhten Anforderungen an den Trittschall erfüllt werden.

Schallschutz = Kostentreiber?!

Als Fachplaner/in der Bauakustik wird man häufig mit dem Vorurteil konfrontiert, der Schallschutz wäre ein wesentlicher Grund für erhöhte Kosten. Für einen sehr guten Schallschutz wird weiteres Material in einem Gebäude verbaut: teure (zusätzliche) Gipsplatten an Wänden und Decken, Splittschüttungen zur Beschwerung von Decken und auch teure Entkopplungsmaterialien im Stoß oder im Bereich technischer Geräte. Die Erfahrung aus der Praxis zeigt jedoch, dass hohe Kosten auf vielen unterschiedlichen Faktoren basieren, die in entsprechenden Maßnahmen für den Schallschutz resultieren. Dazu zählen:

- der Entwurf
- das Tragwerkskonzept
- die Kommunikation & Zusammenarbeit zwischen Fachplaner/innen und Architekten
- die Aufklärung der Bauherren hinsichtlich des bauakustischen Komforts
- die gewählten (hohen) Anforderungen

Grundstein für eine wirtschaftliche Umsetzung eines Projekts ist der Entwurf: so resultieren beispielsweise aus komplexen Grundrissituationen in der Tragwerksplanung aufwändige Details. Darauf folgen häufig spezifische Maßnahmen für den Schallschutz (notwendige Vorsatzschalen, zusätzliche Beplankungslagen, ...). Kostentreiber sind somit nicht die Anforderungen der DIN 4109 (weder Teil 1 noch Teil 5), sondern ein komplexer, zu spät bis ins Detail gedachter Entwurf, der häufig zu Herausforderungen bei den Fachplaner/innen (auch im Wärme- und Feuchteschutz, sowie im Brandschutz) führt.

Die offene, konstruktive Zusammenarbeit zwischen den Entwurfsverfasser/innen und den Fachplaner/innen in den frühen Leistungsphasen ist entscheidend für die Entwicklung eines wirtschaftlichen, qualitativ hochwertigen Projektes.

Rückbaubarkeit & Nachhaltigkeit

Auch die Thematik der Nachhaltigkeit geht mit dem Schallschutz in Diskurs. Viele Materialien (Gipsplatten, Beton, gebundene Schüttungen, Silikon, Neoprenlager, Mineralwolle,...), die es ermöglichen einen sehr guten Schallschutz zu erreichen, sind nicht nachhaltig einsetzbar oder ermöglichen gar eine sortenreine Rückbaubarkeit. Mit steigenden Anforderungen an den Schallschutz erhöht sich auch

der Materialeinsatz und damit der Ressourcenverbrauch. Der Mensch steht hierbei immer im Vordergrund: die Bedürfnisse der Nutzer/innen und deren Gesundheitswohl hat (seit 1944) Priorität. Rückblickend auf die Entwicklung der Anforderungen an den Schallschutz (siehe Abbildung 1) muss das Bewusstsein geschärft werden, inwieweit die Herausforderungen der heutigen Zeit (Erderwärmung und Klimawandel, Nachverdichtung in Städten, Heranrücken von Gewerbe an Wohnbebauung) mit den Ansprüchen der Menschen zu vereinbaren sind. Sind wir bereit, Kompromisse einzugehen? Müssen wir überhaupt Kompromisse eingehen, in dem wir die Anforderungen an den Schallschutz wieder reduzieren (Stichwort Suffizienz) und damit den Ressourcenverbrauch einschränken? Fakt ist, dass der Schallschutz nicht allein für den hohen Einsatz von Materialien verantwortlich gemacht werden darf. Es sind viele Einflussfaktoren, die das Bauen (mit und ohne Holz) heute kompliziert machen. Hierzu zählen auch die vielen Normen und Vorschriften, die Fachplaner/innen aller Fachgebiete dazu zwingen, „auf Nummer sicher zu gehen“.

Zusammenfassung

Der Holzbau kann erhöhten Schallschutz unter Berücksichtigung vieler Randbedingungen erfüllen. In der Planung ersetzen dabei Normen nicht das (Mit-) Denken von Ingenieuren und Ingenieurinnen. Im Schallschutz im Holzbau sind häufig flexible und kreative Lösungsansätze gefordert, die weit über den Tellerrand der DIN 4109 hinausgehen. Fachplaner/innen der Bauakustik sind zusätzlich auch von den Herstellern und dessen Informationsbereitschaft abhängig. Mit der erweiterten Bereitschaft in Holzbauweise zu planen, steigt das Interesse auch bei Produktentwicklern und Herstellern diese im Holzbau einsetzen zu wollen. Das wird in den nächsten Jahren immer weitere spannende Lösungsansätze ermöglichen.

In der Politik standen die Anforderungen an den Schallschutz zur Debatte, als die Preise für Rohstoffe

der Bauindustrie in Europa zuletzt stark angestiegen sind (Die Zeit, 2023). Diese Herausforderung wird zukünftig weiterhin bestehen: durch die Globalisierung, durch Konflikte und durch die Knappheit werden die Menschen zu „Einschränkungen“ im Verbrauch, zur Suffizienz, gezwungen – nicht nur im Bauwesen. Jedoch darf der Gesundheitsschutz nicht darunter leiden. Daher ist es umso wichtiger, dass in Netzwerken aus Fachplanern und Architekten gemeinsam an Lösungen gearbeitet wird.

Literatur

Die Zeit, (2023) Teures bauen: Geywitz will Kostencheck für DIN Normen“
<https://www.zeit.de/news/2023-06/26/teures-bauen-geywitz-will-kostencheck-fuer-din-normen>

Informationsdienst Holz (2019) Schallschutz im Holzbau – Grundlagen und Vorbemessung, Holzbau Handbuch Reihe 3, Teil 3, Folge 1

Neubauer, R. O. (2021) Schalldämmung und Schallschutz – Vergleich von bewertetem Bau-Schalldämm-Maß R'_{w} und bewerteter Standard Schallpegeldifferenz $D_{nT,w}$. Bauphysik 43, H. 1, S. 18-26

Neubauer, H. (2023) Bauakustische Untersuchungen im neu errichteten Mehrfamilienhaus, Kramer Schalltechnik St. Augustin



ENTWICKLUNGEN BEI DER PROGNOSE VON GERÄUSCHEN AUS GEBÄUDETECHNISCHEN ANLAGEN

Fabian Schöpfer¹, Andreas Mayr¹, Ulrich Schanda¹, Bernd Nusser², Jörg Arnold³,
Albert Vogel³, Conrad Völker³

¹ Technische Hochschule Rosenheim, Deutschland, E-Mail: fabian.schoepfer@th-rosenheim.de

² Holzforschung Austria, Österreich, E-Mail: b.nusser@holzforschung.at

³ Bauhaus-Universität Weimar, Deutschland, E-Mail: albert.vogel@uni-weimar.de

Kurzfassung

Bei energieeffizienten und nachhaltigen Gebäuden und Gebäudekonzepten spielt die Holzbauweise sowohl im Neubau als auch in der Sanierung eine wichtige Rolle. Diese Entwicklung erfordert auch eine Anpassung und Weiterentwicklung der Planungswerkzeuge unter anderem für den Schallschutz. Diese wurden für die Luft- und Trittschallübertragung in den vergangenen Jahren u.a. durch Arbeiten der Holzforschung Austria und der Technischen Hochschule (TH) Rosenheim erheblich verbessert und ergänzt. Für die Prognose von Geräuschen aus gebäudetechnischen Anlagen stehen bisher jedoch noch keine belastbaren und validierten Methoden zur Verfügung. Dabei ist grundsätzlich zwischen der Luft- und Körperschallemission einer Quelle zu unterscheiden. In Bezug auf die Körperschallemissionen, die im Vergleich ungleich komplexer sind, wurde an der TH Rosenheim ein Ansatz für ein ingenieurtaugliches Berechnungsverfahren auf der Grundlage vorausgegangener Arbeiten, u.a. an der Bauhaus-Universität Weimar (BUW), auf der Basis von gemessenen Übertragungsfunktionen entwickelt.

Grundlage für diese Methode ist eine Trennung von Gebäude und Quelle (hier die gebäudetechnische Anlage). Geräuschquellen werden damit unabhängig vom Gebäude hinsichtlich ihrer Körperschalleigenschaften charakterisiert. Ebenso wird die Schallübertragung im Gebäude unabhängig von der Geräuschquelle messtechnisch in Form von Übertragungsfunktionen erfasst. Hier wurden in den vergangenen Jahren im Rahmen von Projekten an der TH Rosenheim eine Vielzahl von Messungen in Gebäuden durchgeführt, um eine Datenbasis für ein empirisches Prognosewerkzeug aufzubauen. In diesem Beitrag wird die Methode aufgezeigt und die Entwicklung der letzten Jahre bis zum jetzigen Stand zusammengefasst.

Einleitung und Hintergrund

Bei Geräuschen aus gebäudetechnischen Anlagen bzw. Installationsgeräuschen werden baurechtlich Anforderungen an maximale Schalldruckpegel in schutzbedürftigen Räumen gestellt. Nach den Mindestanforderungen zum Schallschutz der DIN 4109 wird hier nach aktuellem Stand der $L_{AF,max,n}$ herangezogen. Unabhängig von Anforderungen besteht aber auch ein grundsätzliches Interesse an einer Möglichkeit, die zu erwartenden Schallimmissionen prognostizieren zu können. So kann es ein Qualitätsmerkmal sein, auch in Situationen ohne gesetzliche Mindestanforderungen, eine niedrigere Lärmbelastung bieten zu können.

In der Praxis bedeutet die Betrachtung von zu erwartenden, absoluten (resultierenden) Schalldruckpegeln jedoch, dass nicht nur die Schallübertragung über Bauteile und Bauteilstöße durch das Gebäude von Relevanz ist, sondern auch die Ursache, also die Quelle. Hier zeigt sich der wesentliche Unterschied zur Prognose der Luft- und Trittschalldämmung, wo die tatsächliche Anregung in der Nutzung eine untergeordnete Relevanz hat und nur Anforderungen an die Bauteile gestellt werden.

Nicht zuletzt dadurch ist die Prognose von resultierenden Schalldruckpegeln aus gebäudetechnischen Anlagen ungleich komplexer. Auch deshalb sind die vorhandenen akustischen Planungsmethoden auch weit hinter den Regelwerken für Luft- und Trittschallübertragung zurück. Dennoch bestehen seit Jahrzehnten Bestrebungen, Methoden zu entwickeln (s. z.B. [1] [2] [3] [4] [5]). Dabei ist die größte Hürde die Komplexität der Prognose in einer Methode zu fassen, die baupraktisch anwendbar ist.

Bei Schallquellen muss stets zwischen der Luft- und Körperschallemission unterschieden werden. So sind für die Luftschallemissionen schon seit langem Messmethoden zur Ermittlung der Luftschalleistung der Quelle vorhanden und normativ eingeführt. Mit dieser

Größe und mit der Kenntnis der Schallpegeldifferenz am Bau zwischen zwei Räumen, die mit vorhandenen Planungsmethoden auch berechenbar ist, kann der resultierende Schalldruckpegel, ausgehend von Luftschallemissionen, im Empfangsraum prognostiziert werden.

Nun ist bei der Körperschallemission zu beachten, dass diese sehr stark von der Baustruktur bzw. vom Bauteil selbst abhängt, an dem die jeweilige Quelle montiert ist. Somit kann die emittierte Körperschalleistung nicht direkt aus Labormessungen auf die Bausituation transferiert werden. Vielmehr sind Methoden erforderlich, die es erlauben, einen Datensatz der Quelle zu bestimmen, der mit beliebigen Empfängerstrukturen kombinierbar ist, um die Körperschallemission gezielt für die jeweilige Situation zu berechnen. Dies erfordert Messmethoden, die eine Charakterisierung der Quellen unabhängig vom Gebäude ermöglichen. Gleichzeitig sind Informationen von der jeweiligen Empfängerstruktur erforderlich.

Sowohl für Luft- als auch für Körperschallemissionen ist zudem zu berücksichtigen, dass jeweils nur für einen spezifischen Betriebspunkt bzw. -zustand der Schalldruckpegel im Empfangsraum bestimmt werden kann. Hier ist dann jeweils der ungünstigste Fall zu betrachten, welcher aber nicht immer einfach zu spezifizieren ist.

Quellencharakterisierung

Die Prognoserechnung für Schalldruckpegel erfordert Eingangsdaten der Quelle, die deren Schwingungseigenschaften an den vorgesehenen Kontaktpunkten mit der Empfängerstruktur beschreiben. Dabei wird unterschieden zwischen einer aktiven Komponente, welche die Quelle im Betrieb bei einem definierten Betriebszustand beschreibt und einer passiven Komponente (mechanische Impedanz Z_s bzw. Admittanz $Y_s = Z_s^{-1}$) zur Charakterisierung der Kopplung, die den Kontaktpunkt in Form der strukturdynamischen Eigenschaften beschreibt [6].

Dabei ist es eine Herausforderung, die aktive Komponente als installationsunabhängige Größe zu bestimmen, da diese in der Einbausituation vom gekoppelten Bauteil abhängt. Man verwendet hier die sogenannte freie Schnelle v_f bzw. die blockierte Kraft F_b , die jeweils eine Idealisierung, entweder einer freien Quelle oder einer Quelle an einer unendlich steifen, schweren Struktur, beschreibt.

Für die baupraktische Anwendung wurden mit der DIN EN 15657 Labormessmethoden entwickelt. Diese Methoden ermöglichen eine Charakterisierung von Quellen mit dem Ziel, die Eingangsdaten für die Schallschutzprognose zu liefern. Dabei wurde unter anderem das auf der Statistischen Energieanalyse (SEA) [6] basierende Prinzip aufgegriffen, Bauteile als Energiesubsysteme zu betrachten und damit keine

Konkretisierung hinsichtlich des genauen Befestigungsortes zu machen. Es wird also lediglich die in ein Bauteil eingeleitete Körperschalleistung betrachtet.

Zur Charakterisierung werden indirekte Methoden verwendet, in denen die Quelle auf einer bekannten Struktur betrieben wird und die Quelleigenschaften aus Messungen an der Struktur abgeleitet werden (s. z.B. [7]). Dies ist die sogenannte Empfangsplattenmethode, bei der die Schwingungsenergie in der Platte im diffusen Körperschallfeld, ähnlich der Hallraummethode bei der Bestimmung der Luftschalleistung, ermittelt wird. An der BUW und der TH Rosenheim und anderen Stellen wurde diese Methode in den vergangenen Jahren intensiv untersucht, angewendet und weiterentwickelt [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17].

Zur Ermittlung der Unsicherheit der Körperschallquellencharakterisierung wurden zahlreiche Empfangsbauteile und -materialien sowie verschiedene Typen von Quellen [17] untersucht. Dadurch konnte für diese Meßmethode für die untersuchten Quellen und Empfangsbauteile ein Teil-Unsicherheitsbeiwert für die Prognoserechnung von ca. 3 – 6 dB ermittelt werden [18] [19]. In [18] ist ermittelt worden, dass generell für schwere Körperschallquellen, wie zum Beispiel Wärmetauscher oder Wärmepumpen auf leichten Empfangsbauteilen, die Unsicherheit für die Prognose zunimmt und Werte von bis zu 7 dB allein für die Leistungsprognose auf dem Empfangsbauteil erreicht. Hier sind weitere Untersuchung erforderlich, um auch für Leicht- und Holzleichtbauteile planungssichere Unsicherheitsbeiwerte zu ermitteln.

Übertragung durch das Gebäude

Um den Schalldruckpegel in einem Empfangsraum (Immission) zu ermitteln, ist die gesamte Übertragung (Transmission) von der Luft- bzw. Körperschallquelle (Emission) zu beschreiben. Sowohl bei der Luftschall- als auch bei der Körperschallemission ist die Schalleistung die wesentliche Eingangsgröße für die Prognose. Dabei ist die Körperschallemission abhängig von der Kombination aus Quelle und Bauteil in der betrachteten Einbausituation.

Die Gesamtübertragung umfasst die Schallausbreitung in Bauteilen und über Bauteilstöße sowie die Schallabstrahlung im Empfangsraum. Vor allem für inhomogene Holzbaukonstruktionen, mit einer großen Konstruktionsvielfalt, ist die Berechnung der Schallübertragung allein auf der Grundlage von Materialeigenschaften und Konstruktionsdetails prinzipiell zwar möglich, aber in ihrer gesamten Komplexität nicht in einer baupraktischen Anwendung abbildbar. Zwar ist in der DIN EN 12354-5:2009 eine Methodik beschrieben, die aber stark limitiert in Bezug auf die Bauweisen ist, bis heute nur im wissenschaftlichen Umfeld verwendet wird und keine Anwendung in der Praxis findet.

Zudem können auch zu betrachtende Situationen mit mehr als einer Stoßstelle zwischen dem Sendebauteil und dem Empfangsraum auftreten. Ein Beispiel hierfür ist ein Technikraum im Keller und ein Schlafzimmer als schutzbedürftiger Raum im ersten Obergeschoss. Diese Übertragungswege höherer Ordnung können aktuell weder für den Holzbau noch für jegliche andere Bauweisen mit den vorhandenen Prognosemethoden berechnet werden. Die Beschreibung der Übertragung ist dann nur durch gemessene Übertragungsfunktionen möglich.

Schon früh wurden deshalb Ansätze vorgeschlagen, die Gesamtübertragung als Black Box zu betrachten und eine Größe dafür zu definieren [1] [2] [3]. Dabei wird das Verhältnis der Wirkung (hier der Schalldruck) zur Ursache (Emission der Quelle), die sogenannte Übertragungsfunktion, betrachtet. Diese kann, wenn die Anregung bekannt ist, messtechnisch bestimmt werden. Das bietet die Möglichkeit, ein Übertragungsmodell aus Messdaten abzuleiten.

Diesen Ansatz griff die BUW im Rahmen einer Messserie in Gebäuden auf und konnte dabei erste Erkenntnisse über die Streuung von Übertragungsfunktionen in verschiedenen Gebäuden erfassen [4]. Dabei wurde die Übertragungsfunktion zwischen der eingeleiteten Kraft und dem resultierenden, mittleren Schalldruck in einem Raum bei horizontaler/direkter Übertragung für verschiedene Gebäude betrachtet. Durch die Anwendung unterschiedlicher Normierungsgrößen konnte die Streuung der Daten reduziert werden. Analog zur Norm-Schallpegeldifferenz und dem Norm-Trittschallpegel wird die raumakustische Eigenschaft des betrachteten Raumes durch eine Normierung auf die äquivalente Schallabsorptionsfläche berücksichtigt. Zudem wurde die Impedanz der angeregten Wand als Korrektur herangezogen. Weiterhin wurde das Schalldämm-Maß der Trennwand als Normierungsgröße eingeführt. Dadurch konnte die Streuung der Daten erheblich reduziert werden.

An der TH Rosenheim wurde der Ansatz aufgegriffen und die Übertragungsfunktion als Verhältnis zwischen dem mittleren, resultieren Schalldruck und der eingeleiteten (installierten) Körperschalleistung definiert [5] [20] (s. Abb.1). In Pegelschreibweise ist die Übertragungsfunktion (Transmission Function) D_{TF} definiert als

$$D_{TF} = L_p - L_w$$

Diese Definition und die Methoden zur Messung wurden in ISO 10848 [21] standardisiert. Die Betrachtung des Pegels der Körperschalleistung L_w entspricht den leistungsbasierten Ansätzen von Prognosemodellen in der Bauakustik.

Durch eine zusätzliche Normierung des Schalldruckpegels auf die Absorptionsfläche kann in Form von $D_{TF,n}$ die raumakustische Eigenschaft des Empfangsraumes berücksichtigt und damit die Streuung der Daten reduziert werden.

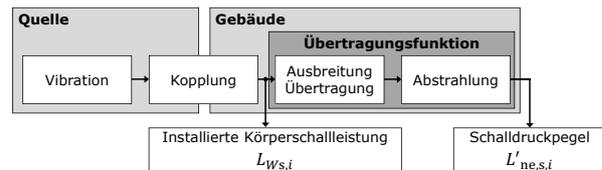


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Gesamtübertragungskette einschließlich der Übertragungsfunktion zwischen installierter Körperschalleistung und Schalldruckpegel im Empfangsraum.

Unter Anwendung dieser Definition wurden von der TH Rosenheim in den vergangenen Jahren eine Vielzahl von Messungen in verschiedenen Gebäuden in Holzbauweise durchgeführt [22]. Dabei wurden neben der horizontalen, direkten Übertragung verschiedene andere Übertragungswege betrachtet, wie sie bei Geräuschen aus gebäudetechnischen Anlagen zwischen dem Aufstellort der Quelle und dem Empfangsraum zu erwarten sind. Bei der Auswahl der Gebäude wurden Ein- und Mehrfamilienhäuser, mehrgeschossige Wohngebäude sowie Beherbergungs- und Objektbauten mit einbezogen. So konnten Messungen über verschiedene Trennsituationen sowohl im eigenen Wohn- und Arbeitsbereich, als auch in fremde Wohn- und Arbeitsbereiche gemessen werden.

Bei den sehr unterschiedlichen Übertragungssituationen handelte es sich ausnahmslos um übliche und häufig gebaute Konstruktionen im Holzbau. So konnten aus den gewonnenen Daten Gruppen ähnlicher Übertragungswege, Konstruktionen und Trennsituationen gebildet werden. Obwohl jede Übertragung zunächst einzigartig ist, zeigten sich, wie auch in den ersten Untersuchungen der BUW, ähnliche spektrale Charakteristika. Auf der Grundlage der Gruppierungen wurden repräsentative Übertragungssituationen abgeleitet, die für die Schalldruckpegelprognose verwendet werden können [22].

So ist es nun bereits in der Planungsphase möglich, für verschiedene Situationen den entsprechenden Datensatz zu verwenden, der die Situation akustisch repräsentativ beschreibt. Somit ist erstmalig eine Berechnung des zu erwartenden Schalldruckpegels in Kombination mit schalltechnisch charakterisierten Quellen möglich. Natürlich ist die Berechnung entsprechend der Streuung aus den bisher vorhandenen (in-situ) Daten und der Definition der Gruppierungen bislang mit größeren Unsicherheiten behaftet. Aktuell muss von ca. 5 dB [17] [19] ausgegangen werden, was als vielversprechender Wert interpretiert werden kann, aber noch zu hoch ist, um in der Praxis Anwendung und Zuspruch finden zu können (vgl. Unsicherheitsbeiwerte u_{prog} für R'_w von 2 dB und für $L'_{n,w}$ von 3 dB [23]).

Aktueller Stand

Untersuchungen, nicht nur auf nationaler sondern vor allem auf europäischer Ebene, mündeten in zwei wesentlichen Überarbeitungen bzw. Neuveröffentlichungen europäischer Normen.

Für die Charakterisierung von Quellen hinsichtlich ihrer Körperschalleigenschaften wurde 2009 die EN 15657-1, Messung des Luft- und Körperschalls von haustechnischen Anlagen im Prüfstand [24], veröffentlicht. Diese war jedoch limitiert auf "Vereinfachte Fälle, in denen die Admittanzen der Anlagen wesentlich höher sind als die der Empfänger". Die CEN Arbeitsgruppe TC126 WG7 entwickelte die Verfahren in den Folgejahren entsprechend weiter, was in der EN 15657:2017, Messung des Körperschalls von haustechnischen Anlagen im Prüfstand für alle Installationsbedingungen [25], mündete. Diese Ansätze wurden analog in der Überarbeitung der EN 14366 übernommen, die 2023 als EN 14366-1:2023, Messung von Luftschall und Körperschall von gebäudetechnischen Anlagen im Prüfstand [26], veröffentlicht wurde.

In Bezug auf die Übertragungsmodelle im Gebäude wurde 2009 die EN 12354-5 veröffentlicht [27]. Darin wurden die Methoden aus Teil 1 und Teil 2 um die Installationsgeräusche erweitert. Aber auch Teil 5 war zunächst noch limitiert auf schwere homogene Bauteile. Im Folgenden wurde von der CEN Arbeitsgruppe TC126 WG2 dieser Teil grundlegend überarbeitet, was in einer 2023 erschienenen neuen Fassung mündete, die auf den Eingangsdaten der EN 15657 basiert und unter anderem Übertragungsfunktionen nach ISO 10848 als Werkzeug für die Prognose enthält [28]. Dabei wurde eine neue Größe, $L'_{n,e,s,i,0}$ eingeführt [29]. Diese ist ähnlich dem Norm-Trittschallpegel und beschreibt den normierten mittleren Schalldruckpegel am Bau (inklusive aller Flankenwege) durch eine Körperschallanregung mit 1 Watt Leistung auf dem Sendebauteil i . Diese Größe steht mit $D_{TF,n}$ in folgendem Zusammenhang

$$L'_{n,e,s,i,0} = D_{TF,n} + 10 \lg(1 \text{ W} / 10^{-12} \text{ W}) = D_{TF,n} + 120 \text{ dB}$$

Mit dieser standardisierten Methode ist es nun möglich, für alle Kombinationen von Quellen und Gebäudetypen, eine Schalldruckpegelprognose durchzuführen. Voraussetzung dafür ist natürlich, dass die erforderlichen Eingangsdaten der Quelle sowie der betrachteten Gebäudesituation vorhanden sind.

Ausblick

Aktuell laufen an verschiedenen Stellen, unter anderem an der TH Rosenheim, Forschungs- und Entwicklungsprojekte, in denen die beschriebenen Prognosemethoden in konkreten Anwendungsfällen erprobt werden [16]. Diese Arbeiten gilt es nun gezielt auszu-

weiten, dass zukünftig allgemein gültige Unsicherheitsbeiwerte für die vollständige Übertragungskette von der Quelle bis zum Empfangsraum in Form einer Gesamtprognoseunsicherheit u_{prog} zur Verfügung gestellt werden können.

Literatur

- [1] Buhlert KJ, Feldmann J. Ein Meßverfahren zur Bestimmung von Körperschallanregung und -übertragung. – *Acustica* 1979;42(3):108-113
- [2] Vercammen ML, Heringa PH. Characterising structure-borne sound from domestic appliances. – *Appl. Acoust.* 1989;28: 105-117.
- [3] Fischer H-M. Determination and use of transfer functions to describe structure-borne sound transmission caused by equipment and installations. *Proceedings of ICA* 2001.
- [4] Arnold J, Kornadt O. Beschreibung Körperschallinduzierter Schalldruckpegel mit Hilfe von Übertragungsfunktionen. *Bauphysik-Kalender* 2014 641–663.
<https://doi.org/10.1002/9783433603338.ch16>.
- [5] Schöpfer F, Hopkins C, Mayr AR, Schanda U. Measurement of transmission functions in lightweight buildings for the prediction of structure-borne sound transmission from machinery. – *Acta Acust Acust* 2017;103:451-464.
- [6] Cremer L, Heckl M. *Körperschall - Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen*. 2nd ed. Berlin. Heidelberg: Springer Verlag; 1996.
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-08182-2>.
- [7] Gibbs BM, Qi N, Moorhouse AT. A Practical Characterisation for Vibro-Acoustic Sources in Buildings. *Acta Acust Acust* 2007;93:84–93. , <https://liverpool.ac.uk/3011701>.
- [8] Reinhold S, Hopkins C. Sampling procedures on reception plates to quantify structure-borne sound power from machinery. *Appl Acoust* 2021;172.
<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107649>.
- [9] Spaeh M. *Characterisation of structure borne sound sources in buildings*. PhD: University of Liverpool; 2006.
- [10] Wittstock V, Villot M, Scheck J. Results of a Round Robin on structure-borne sound power. *Proceedings Forum Acusticum* 2011:2327–32.
- [11] Vogel A, Wittstock V, Kornadt O, Scholl W. Application of the two-stage method on the characterization of different structure-borne sound sources and a moment actor. *Proceedings INTER-NOISE* 2013. 1160.

- [12] Vogel A, Wittstock V, Kornadt O, Völker C. Characterisation of sources injecting a moment power with the two-stage-method. Proceedings International Conference on Sound and Vibration ICSV 2017. (1083).
- [13] Hoßfeld M, Kohrmann M, Mayr AR, Schanda U. Messtechnische Analyse modifizierter Empfangsplattenprüfstände zur Ermittlung der Körperschalleistung haustechnischer Geräte. Fortschritte der Akustik – DAGA 2018.
- [14] Weinzierl J, Kruse T, Mayr AR, Schöpfer F, Schanda U. Leistungsvergleich gebäudeähnlicher Strukturen bei in-plane und out-of-plane Anregung. Fortschritte der Akustik – DAGA 2022.
- [15] Schöpfer F, Kruse T, Weinzierl J, Mayr AR, Schanda U. Experiences with source characterization methods within and beyond the scope of EN 15657. Proceedings of Inter-Noise 2022.
- [16] Kruse T, Schöpfer F, Schanda U, Mayr AR. Input data for the prediction of noise from technical equipment using a heat pump. Proceedings of Forum Acusticum 2023.
- [17] Vogel A., Arnold J., Voelker C., Kornadt O., Applicability of the structure-borne sound source characterisation two-stage method as well as the parameters derived in sound pressure level predictions in lightweight constructions. Applied Acoustics (2023) <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109242>.
- [18] Wittstock V, Scheck J, Villot M. Structure-borne sound sources in buildings – Estimating the uncertainty of source properties and installed power from interlaboratory test results. Acta Acustica 2022;6:16. <https://doi.org/10.1051/aacus/2022012>.
- [19] Vogel A., Arnold J., Voelker C., Kornadt O. Data for sound pressure level prediction in lightweight constructions caused by structure-borne sound sources and their uncertainties. Data in Brief, 2023. ISSN 2342-3409.
- [20] Schöpfer F. Vibroacoustics of timber-frame structures excited by structure-borne sound sources. University of Liverpool; 2019 [Dissertation].
- [21] DIN EN ISO 10848-1:2018-02. Akustik - Messung der Flankenübertragung von Luftschall, Trittschall und Schall von gebäudetechnischen Anlagen zwischen benachbarten Räumen im Prüfstand und am Bau. Teil 1: Rahmendokument.
- [22] Schöpfer F, Mayr AR, Schanda U. Schallschutz bei gebäudetechnischen Anlagen planen. Praxistaugliches Prognoseverfahren nutzt Übertragungsfunktionen im Holzbau. – Bauen+ 2021(5): 21-25.
- [23] DIN 4109-2:2018: Schallschutz im Hochbau – Teil 2: Rechnerische Nachweise der Erfüllung der Anforderungen.
- [24] DIN EN 15657-1:2009-10. Akustische Eigenschaften von Bauteilen und Gebäuden - Messung des Luft- und Körperschalls von haustechnischen Anlagen im Prüfstand. Teil 1: Vereinfachte Fälle, in denen die Admittanzen der Anlagen wesentlich höher sind als die Empfänger am Beispiel von Whirlwannen.
- [25] DIN EN 15657:2017-10. Akustische Eigenschaften von Bauteilen und von Gebäuden - Messung des Körperschalls von haustechnischen Anlagen im Prüfstand für alle Installationsbedingungen.
- [26] DIN EN 14366-1:2023-09. Bauakustik - Messung von Luftschall und Körperschall von gebäudetechnischen Anlagen im Prüfstand. Teil 1: Anwendungsregeln für Abwasserinstallationen.
- [27] DIN EN 12354-5:2009-10. Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften. Teil 5: Installationsgeräusche.
- [28] DIN EN 12354-5:2023-08. Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften. Teil 5: Installationsgeräusche.
- [29] Villot M. Predicting In Situ Sound Levels Generated by Structure-Borne Sound Sources in Buildings. – Acta Acust Acust 2017;103(5): 885-886.



FLANKENÜBERTRAGUNG IM HOLZ- UND HYBRIDBAU

Veronika Silberbauer

PIRMIN JUNG Deutschland GmbH, E-Mail: veronika.silberbauer@pirminjung.de

Kurzfassung

Die flankierende Übertragung im Massivbau (Stahlbeton- und Mauerwerksbau) kann gemäß DIN 12354-1 (2017-11) mithilfe des Stoßstellendämmmaßes berechnet werden. Für die Flankenübertragung bei Stoßstellen aus Massivholzbauteilen (Brettsperholz, Brettschichtholz oder Brettstapелеlemente) liegen ebenfalls in der DIN 12354-1, Anhang F Prognoseformeln zur Berechnung des K_{ij} vor. Derzeit gibt es jedoch noch kein Prognoseverfahren zur Ermittlung der Stoßstellendämmung von Massivholzelementen in Kombination mit Stahlbetonbauteilen (z.B. Brettsperholzwände in Kombination mit Stahlbetondecken). In der Praxis wird hier oftmals von einer hybriden Bauweise gesprochen. Im Rahmen einer Masterthesis sind die theoretischen Grundlagen der Flankenübertragung im ‚Hybridbau‘ mithilfe der Wellentheorie untersucht worden. Anhand von Messergebnissen der Stoßstellendämmmaße in Laborprüfungen und in verschiedenen Objekten (Mehrfamilienhäuser) sind Prognoseformeln ermittelt worden, die eine Abschätzung der Flankenübertragung ‚hybrider Stoßstellen‘ ermöglichen – sowohl für einen Kreuzstoß (nachfolgend auch X-Stoß genannt), als auch für einen T-Stoß. (Silberbauer, 2021)

Abstract

European and International Standards are including prediction models for the Vibration Reduction Index to calculate the sound transmission across junctions of walls and floors. In timber constructions, formulas for the prognosis calculation for the flanking transmissions described by F_f , D_f and F_d on the basis of the mass ratio are already available for joints of solid timber components (Cross Laminated Timber). However, there is currently no prediction method for determining the joint insulation of solid timber elements in combination with reinforced concrete components (e.g. cross-laminated timber walls in combination with reinforced concrete floors). Based on measurement results of the joint insulation dimensions in laboratory tests and structure-borne sound measurements in various buildings, prediction formulas were determined that enable an estimation of the flanking transmission of 'hybrid joints' - both for a cross joint (hereinafter also referred to as X-joint) and for a T-joint.

Einführung

Neben der Direktschalldämmung von Trennbauteilen ist auch die flankierende Übertragung für die Beurteilung des Schallschutzes in Gebäuden relevant – insbesondere im Holzbau.

Norm-Flankenschallpegeldifferenz im Hybridbau

Für die Flankenübertragung von Holzleichtbauteilen in Hybridgebäuden kann die Norm-Flankenschallpegeldifferenz $D_{n,f,w}$ angewendet werden, um die flankierende Übertragung des Weges F_f zu ermitteln. Die Übertragungswege F_d und D_f sind vernachlässigbar.

Angaben zur Norm-Flankenschallpegeldifferenz können den Ergebnissen aus Untersuchungen der Technischen Universität München entnommen werden. Für die flankierende Übertragung von Fassadenelementen in der Hybridbauweise sind bereits Planungsdaten veröffentlicht (Winter, 2016).

Stoßstellendämm-Maße im Massivholzbau

Für flankierende und trennende Bauteile aus Massivholzelementen kann in Abhängigkeit des Masseverhältnisses aus flankierendem und trennendem Bauteil das Stoßstellendämmmaß für einen T-Stoß und einen X-Stoß ermittelt werden. Prognoseformeln zur Ermittlung des Stoßstellendämmmaßes K_{ij} für die Berechnung der Übertragungswege F_d , D_f und F_f sind in DIN 12354 Teil 1 (2017-11), Anhang F angegeben. Jedoch können diese Prognoseformeln nur für Bauteile mit einem flächenbezogenen Masseverhältnis $0,5 < m_1/m_2 < 2$ sowie unter Berücksichtigung einer gelenkigen Verbindung der Bauteile (nicht starr) angenommen werden. Für hybride Stoßstellen sind daher die Prognoseformeln der DIN 12354-1 nicht anwendbar, da die Anforderung an das Masseverhältnis nicht eingehalten werden kann.

Stoßstellendämm-Maße im Hybridbau

Für die Berechnung der Flankenübertragung im Hybridbau bei Detailanschlüssen mit Stahlbetonelementen und Massivholzelementen sind derzeit noch keine Prognoseformeln in den einschlägigen DIN Normen zur Ermittlung des K_{ij} hinterlegt.

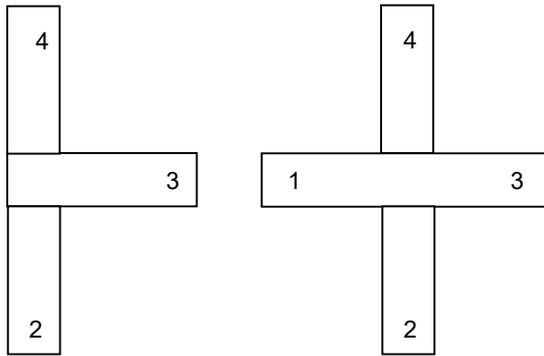


Abbildung 1: Schematische Abbildung T-Stoß (links) und Kreuzstoß/X-Stoß (rechts) mit Bauteilnummerierung.

Theorie

Grundlegende Theorie für die Körperschallausbreitung in einer Stoßstelle ist die Wellentheorie unter Betrachtung der auftretenden Wellenarten: Biege-Wellen, Transversalwellen und Longitudinalwellen. Für das Stoßstellendämmmaß ist das Transmissions- und Reflexionsverhalten einer einfallenden Biege-Wellen an einer Stoßstelle maßgeblich.

Bereits 1967 setzte sich M.A. Heckl in der Wellentheorie umfassend mit dem Einfluss der Verbindungsart von Bauteilen auseinander. Zusätzlich werden in der Wellentheorie (Heckl, 1967) auch die Einflussgrößen

- Elastischer Zwischenlager,
- Dickenwechsel,
- Materialwechsel
- und Sperrmassen

in einer Stoßstelle berücksichtigt.

Sperrmassen

Die (ersten) Messergebnisse von Stoßstellendämmmaßen in unterschiedlichen Bausituationen zeigen bei dem Übertragungsweg 2 – 4 bzw. 4 – 2 (Bauteilbezeichnung siehe Abbildung 1) im mittleren Frequenzbereich ein hohes Stoßstellendämmmaß auf (siehe Abbildung 2). Aufgrund dessen wird der theoretische Vergleich unter Berücksichtigung des sog. Sperreffekts in der Wellentheorie gesucht.

Dieser Effekt tritt bei dem Einsatz von Sperrmassen auf und ist abhängig von der Drehfedersteife im Knotenpunkt bzw. der Stoßstelle. Zusätzlich wirkt sich die Verbindungsart - gelenkig oder starr – auf den Sperreffekt und damit auf das Stoßstellendämmmaß aus. Anhand der Lage der Resonanzfrequenz des schwingenden Systems aus den verbundenen Bauteilen (Decke und Wände), der sog. ‚Sperrfrequenz‘ kann in den ermittelten Ergebnissen des K_{ij} ein vergleichsweise hohes Stoßstellendämmmaß abgelesen werden (siehe Abbildung 2, $f = 500$ Hz).

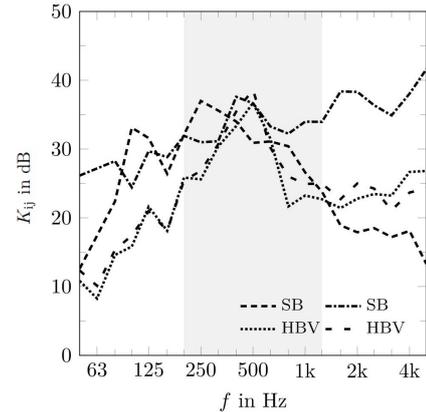


Abbildung 2: gemessene Stoßstellendämm-Maße „hybrider Stoßstellen“ in vier verschiedenen Gebäuden unterschiedlicher Konstruktionen: die flankierenden Bauteile sind Brettsperreholzelemente, das trennende Bauteil eine Stahlbeton-Hohlkammerdecke (SB) (siehe Detail in Abb. 3) bzw. Holz-Beton-Verbunddecke (HBV). Das dargestellte K_{ij} ist für die Übertragungssituation 2↔4.

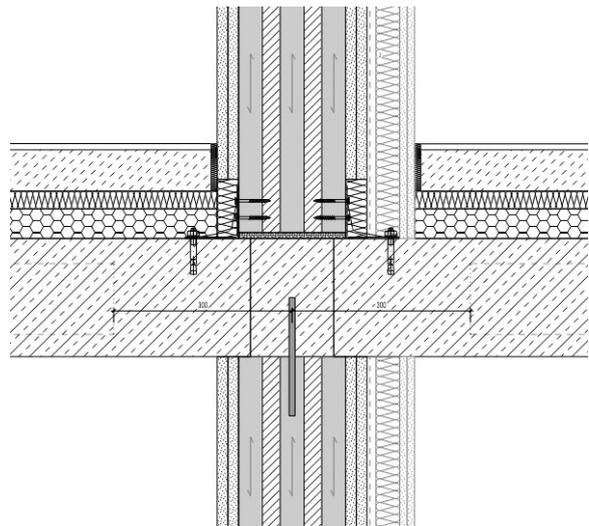


Abbildung 3: Stoßstellensituation im Geschossübergang. Das Trennbauteil (Stahlbeton-Hohlkammerdecke) trennt die flankierenden Wohnungstrennwände in Brettsperreholz. Die Wände sind tragend und jeweils beidseitig mit Gipsfaserplatten beplankt.

Stoßstellendämm-Maße

Massivholzbau

Zur Validierung der in Anhang F der DIN 12354-1 angegebenen Prognoseformeln (siehe Gleichung 1 – 5 folgend) zur Berechnung der Stoßstellendämmmaße bei Stoßstellen aus Massivholzbauteilen (Brettsperreholz) liegen Messergebnisse ‚in situ‘ und aus Laborprüfungen vor (Timpte, 2016).

Anhand der Mittelwerte aus den vorhandenen Ergebnissen soll eine Tendenz abgebildet werden, inwieweit die Messungen des K_{ij} mit den Prognoseformeln abgebildet werden können.

Für einen T-Stoß gilt:

$$K_{24} = 22 + 3,3 \cdot \log(f/f_k) \quad (1)$$

$$K_{34} = 15 + 3,3 \cdot \log(f/f_k) \quad (2)$$

Für einen Kreuzstoß gilt:

$$K_{13} = 10 - 3,3 \cdot \log(f/f_k) + 10M \quad (3)$$

$$K_{24} = 23 + 3,3 \cdot \log(f/f_k) \quad (4)$$

$$K_{34} = 18 + 3,3 \cdot \log(f/f_k) \quad (5)$$

für $f_k = 500$ Hz und $M = \log^*(m'_1 / m')$.
(DIN 12354-1, 2017)

Hybridbau

Als Datengrundlage für die Erstellung von Prognosen zur Berechnung der Stoßstellendämm-Maße von ‚hybriden Stoßstellen‘ liegen Ergebnisse aus Laborprüfungen vor. Zusätzlich sind Körperschallmessungen in verschiedenen Bausituationen durchgeführt worden.

- Laborprüfung Holz-Beton-Verbund-Rippendecke und Massivholzwände
- Laborprüfung Stahlbetondecke und Massivholzwände, starr verbunden
- Baumessungen an Stahlbetonhohlkammerdecke und Massivholzwänden
- Baumessungen an Holz-Beton-Verbunddecken und Massivholzwänden

Für die Stoßstellensituation eines Kreuzstoßes sind die Übertragungswege K_{13} , K_{23} , K_{34} und K_{24} untersucht worden, für T-Stoßstellen sind die Stoßstellendämm-Maße K_{24} , K_{23} und K_{34} gemessen worden.

Aus den Ergebnissen der Messungen sind frequenzabhängigen Mittelwerte für die unterschiedlichen Stoßstellensituationen und Bauteilfügungen zur Auswertung herangezogen worden. Diese dienen der Prognose der Stoßstellendämmung hybrider Stoßstellen.

Für die verschiedenen Stoßstellensituationen ergeben sich die Prognoseformeln für ein flächenbezogenes Masseverhältnis $1 \text{ m} < m'_1/m' < 9$ wie folgt:

T-Stoß:

$$K_{23} = 1,4 \cdot \log(f/f_k) + 16,7 \quad (6)$$

$$K_{34} = 1,3 \cdot \log(f/f_k) + 16,6 \quad (7)$$

$$K_{24} = 3,2 \cdot \log(f/f_k) + 28,1 \quad (8)$$

Kreuzstoß:

$$K_{23} = -0,23 \cdot \log(f/f_k) + 14,8 \quad (9)$$

$$K_{34} = 0,12 \cdot \log(f/f_k) + 15,9 \quad (10)$$

$$K_{24} = 1,5 \cdot \log(f/f_k) + 26,2 \quad (11)$$

$$K_{13} = -1,7 \cdot \log(f/f_k) + 6,1 \quad (12)$$

für $f_k = 500$ Hz.

Bauteilnummerierung gemäß Abbildung 1.

Ergebnisse

X-Stoß

Die folgenden Abbildungen 4 bis 7 zeigen den Vergleich der Stoßstellendämm-Maße ‚hybrider Stoßstellen‘ (rot) im Vergleich zur Auswertung vorliegender Messergebnisse von Stoßstellen im Massivholzbau (blau) (Timpte, 2016). Die Anzahl n gibt die Menge vorliegender Messergebnisse zu ebener Bausituation an, aus denen jeweils die Mittelwerte (MW) in den Grafiken abgebildet werden. Die Bezeichnung der Übertragungswege bezieht sich auf die Nummerierung der Bauteile in Abbildung 1. Trennendes Bauteil der hybriden Stoßstellen war jeweils eine (massive) Trennedecke die vollständig die flankierenden Wände trennte.

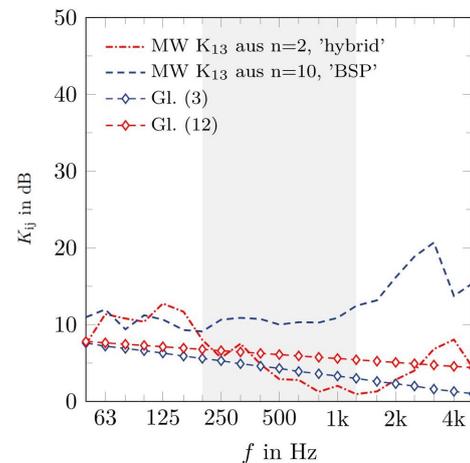


Abbildung 4: Stoßstellendämm-Maße K_{ij} für die Übertragungssituation $1 \leftrightarrow 3$ eines X-Stoßes. Die vorliegenden Ergebnisse von Stoßstellen in Massivholzbauweise liegen deutlich über den Prognosewerten der DIN 12354-1. Aus den Mittelwerten im Hybridbau ergibt sich für die Prognose nach Gleichung 12 eine höhere Stoßstellendämmung (frequenzabhängig) gegenüber Gleichung 3 (Massivholzbau).

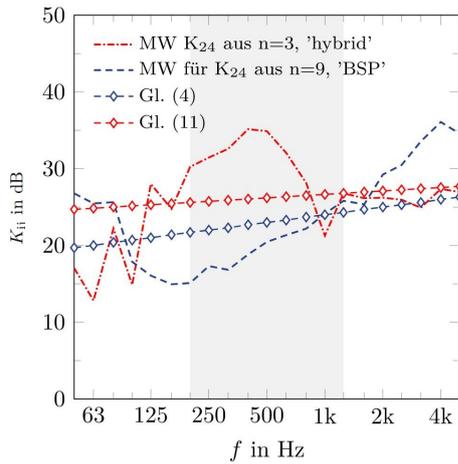


Abbildung 5: Stoßstellendämm-Maße K_{ij} für die Übertragungssituation $2 \leftrightarrow 4$ eines X-Stoßes. Der „Sperreffekt“ bei $f = 500$ Hz machte sich auch in der Auswertung der vorliegenden Ergebnisse hybrider Stoßstellen in den Mittelwerten bemerkbar.

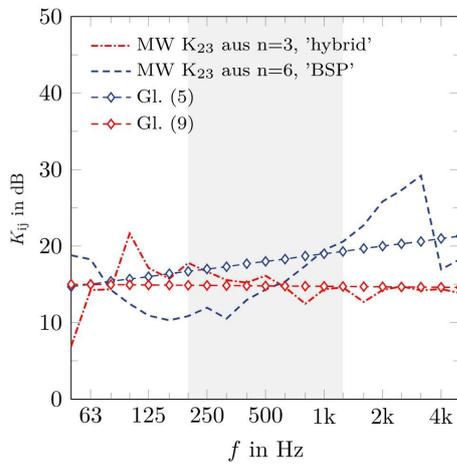


Abbildung 6: Stoßstellendämm-Maße K_{ij} für die Übertragungssituation $2 \leftrightarrow 3$ eines X-Stoßes.

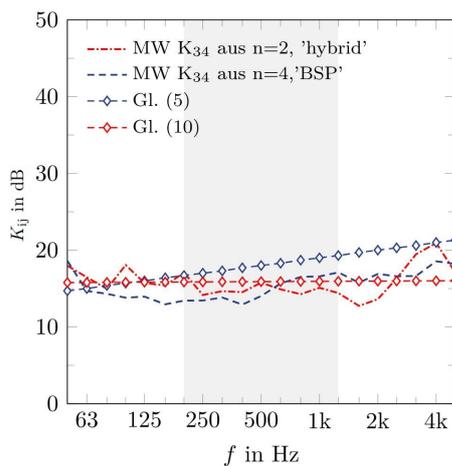


Abbildung 7: Stoßstellendämm-Maße K_{ij} für die Übertragungssituation $3 \leftrightarrow 4$ eines X-Stoßes.

T-Stoß

Die folgenden Messergebnisse und Prognosen zeigen die Auswertung für einen T-Stoß im Massivholzbau und Hybridbau. Auch hier sind die roten Graphen bezogen auf die Ergebnisse hybrider Stoßstellen, in blau die Ergebnisse aus dem Massivholzbau.

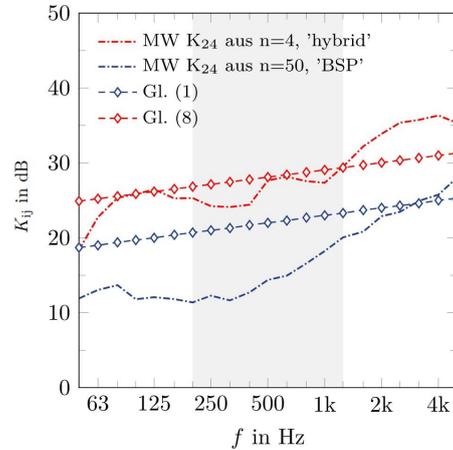


Abbildung 8: Stoßstellendämm-Maße K_{ij} für die Übertragungssituation $2 \leftrightarrow 4$ eines T-Stoßes.

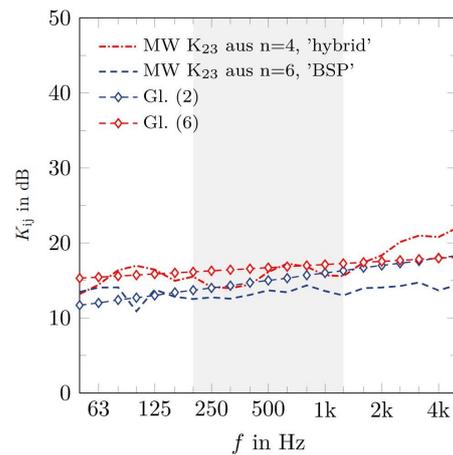


Abbildung 9: Stoßstellendämm-Maße K_{ij} für die Übertragungssituation $2 \leftrightarrow 3$ eines T-Stoßes.

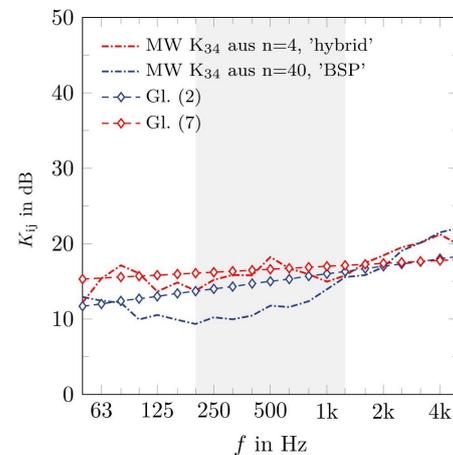


Abbildung 10: Stoßstellendämm-Maße K_{ij} für die Übertragungssituation $3 \leftrightarrow 4$ eines T-Stoßes.

Anwendung des K_{ij}

Das Stoßstellendämm-Maß ist sowohl für die Berechnung der flankierenden Übertragung von Luftschall als auch für den Trittschall relevant. Für die Flankenwege F_f , F_d , sowie D_f ist das bewertete Flankendämm-Maß $R_{ij,w}$ zu ermitteln, zum Beispiel für den Flankenweg F_f aus

$$R_{Ff,w} = \frac{R_{F,w} + R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Ff,w} + K_{Ff} + \left(10 \cdot \log \frac{S_s}{l_{olij}} \right) \quad (13)$$

(DIN 12354-1, 2017)

Die bewerteten Schalldämm-Maße $R_{F,w}$ von Holzmassivbauteilen (beplankt oder unbeplankt) lassen sich berechnen aus dessen flächenbezogener Masse m' mit folgender Formel (Rabold et. al., 2019):

$$R_w = 25 \cdot \lg(m') - 7 \text{ dB} \quad (14)$$

Für homogene Bauteile im Massivbau (Stahlbeton) können die Formeln zur Berechnung des bewerteten Schalldämm-Maßes gemäß Angabe der DIN 12354-1 (homogene Bauteile) bzw. nach DIN 4109-32 (massive Bauteile) angewendet werden.

Aus den Prognoseformeln Gl. 6-12 lassen sich die Einzahlwerte \overline{K}_{ij} aus dem arithmetischen Mittelwert zwischen 200 Hz und 1250 Hz berechnen, siehe Tabelle 1. (Silberbauer, 2021)

Tabelle 1: Einzahlwerte des Stoßstellendämm-Maßes für hybride Stoßstellen

	\overline{K}_{23}	\overline{K}_{34}	\overline{K}_{24}	\overline{K}_{13}
T-Stoß	18,4 dB	16,4 dB	29 dB	-
X-Stoß	14,8 dB	15,9 dB	26,2 dB	6,1 dB

Fazit

Die Ergebnisse der Abbildungen 4 bis 10 deuten an, dass sich die Stoßstellendämm-Maße in Hybridgebäuden mit den Prognoseformeln der DIN 12354-1 Anhang F nur bedingt abschätzen lassen. Für die „über-Eck“-Übertragungssituationen K_{34} und K_{23} eines X-Stoßes sind im Hybridbau die Stoßstellen deutlich besser zu bewerten.

Für die Übertragungswege $2 \leftrightarrow 4$ zeigen die Messergebnisse deutlich höhere Stoßstellendämm-Maße im Hybridbau im Vergleich zum Massivholzbau. Der Zusammenhang zwischen dem in der Wellentheorie beschriebenen Sperreffekt und dem damit verbundenen Schalldämmverhalten bei Sperrmassen spiegelt sich auch in den Messergebnissen wider. Sowohl bei einem hybriden T-Stoß, als auch einem

X-Stoß. Weitere Untersuchungen sind notwendig, um die Zusammenhänge zwischen dem Einfluss der Drehfedersteife, Trägheitsradius und der Lage der Sperrfrequenz darlegen zu können.

Die Praxis zeigt, dass die Detailanschlüsse im Holzmassivbau und Hybridbau individuell betrachtet werden müssen. Insbesondere die flankierende Übertragung von Decken über Trennwänden mit Anforderungen an den Schallschutz bedürfen einer genaueren Betrachtung. Hier ist nicht nur das Stoßstellendämm-Maß aus der Betrachtung des Verhältnisses der flächenbezogenen Masse der Bauteile zu ermitteln. Vielmehr ist auch die Anschlusssituation aus Sicht der Statik zu berücksichtigen. Um die Stoßstellendämm-Maße im Hybridbau noch genauer abschätzen zu können, bedarf es daher weiterer Untersuchungen. Auch der Einfluss gelenkiger und starrer Verbindungen ist in weiteren Untersuchungen zu betrachten.

Literatur

Cremer, L. Heckl, M.A. 1967. Körperschall: Physikalische Grundlagen und Anwendungen

DIN 12354-1, 2017. Bauakustik – Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften – Teil 1: Luftschalldämmung zwischen Räumen (ISO 12354-1:2017); Deutsche Fassung EN ISO 12354-1:2017

Rabold, A., Châteauevieux-Hellwig, C., Mecking, S., Schramm, M., 2019. Flanking transmission of solid wood elements in multi-storey timber buildings – input data and prediction models for airborne and impact sound excitation, inter.noise 2019, Madrid

Silberbauer, V.; 2021. Stoßstellendämm-Maße im Hybridbau – Theoretischer Vergleich, Simulation und Messtechnische Validierung am Bau. Technische Hochschule Rosenheim

Timpte, A. 2016. Stoßstellen im Massivholzbau – Konstruktionen, akustische Kenngrößen, Schallschutzprognose. Masterarbeit, TU Berlin, Hochschule Rosenheim

Winter, S. Lang, W. Fischer, O. 2016. Konstruktionskatalog Fassadenelemente für Hybridbauweisen. TU München



BAUAKUSTISCHE EIGENSCHAFTEN VON DECKENKONSTRUKTIONEN IN HOLZBAUWEISE

Michael Flieger¹, Oliver Kornadt¹, Veronika Silberbauer², Tobias Götz²

¹ Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau, Deutschland,

E-Mail: michael.flieger@rptu.de

² PIRMIN JUNG Deutschland GmbH, Deutschland, E-Mail: veronika.silberbauer@pirminjung.de

Kurzfassung/Abstract

Aus ökologischen Gründen wird untersucht, bei Holzdecken den meist verwendeten Ortbeton durch Lehmsteine oder Schüttungen aus recycelten Materialien zu ersetzen. Ebenfalls werden Alternativen für den Estrich-Unterbau von Deckenauflagen analysiert. Im Vergleich zu aktuell üblichen Holzdecken soll aus akustischer Sicht eine gleichwertige oder bessere Qualität erreicht werden. Erste Ergebnisse zu simulativen Untersuchungen einer Deckenkonstruktion mit Lehmsteinbeschwerung werden diskutiert und bewertet. Zudem wird gezeigt, wie die Trittschallpegelminderung durch Deckenauflagen auf Holzdecken in einem akustischen Deckenprüfstand mit massiver Bezugsdecke unter Verwendung einer Holzdeckenattrappe gemessen werden kann.

Concrete is generally used to add necessary weight to wooden ceilings. For ecological reasons, it is being investigated whether this concrete can be replaced by clay stones or fills made from recycled materials. Alternatives are also being examined for the screed substructure. The aim is to achieve an equivalent or better quality from an acoustic point of view compared to current wooden ceilings. Initial results from simulative studies of a ceiling construction with clay stone weighting are discussed and evaluated. Additionally, it is shown how the impact sound reduction due to floor coverings of wooden ceilings can be measured in an acoustic test room with a massive reference ceiling using a wooden ceiling dummy.

Einleitung

Für die Baubranche wird die Berücksichtigung ökologischer Aspekte zunehmend wichtiger. Insbesondere die Reduktion der durch die Verwendung von Beton entstehenden CO₂-Emissionen und die Schonung von natürlichen Ressourcen spielen eine zentrale Rolle bei der Errichtung neuer Bauwerke.

Der Holzleichtbau benötigen gegenüber dem klassischen Massivbau keinen oder deutlich weniger Beton und ermöglichen zudem die schnelle Errichtung

leichter, schlanker Konstruktionen mit hohem Vorfertigungsgrad. Als Holzdeckenkonstruktionen werden jedoch in der Regel Holz-Beton-Verbunddecken, abgekürzt HBV-Decken, verwendet, um die für die Schalldämmung benötigte Masse über den Beton einzubringen.

Die Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau (RPTU) und die Pirmin Jung Deutschland GmbH forschen gemeinsam an der akustischen und materialtechnischen Optimierung von Holzleichtbaukonstruktionen [1, 2]. Anstelle der üblicherweise verwendeten Ortbetonbeschwerung sollen recycelte Materialien und/oder alternative Materialien verwenden. Im Vergleich zu aktuell üblichen Holzdecken soll aus statischer, baupraktischer, wirtschaftlicher sowie akustischer Sicht eine gleichwertige oder bessere Qualität sowie eine deutliche Verbesserung des ökologischen Aspekts erreicht werden. Gefördert wird das Forschungsprojekt von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt DBU.

Erste akustische Forschungen beschäftigen sich mit Lehmsteinen als Alternative zu Betonbeschwerungen. Der Fokus liegt dabei auf dem Norm-Trittschallpegel im Frequenzbereich von 50 bis 500 Hz. Gleichzeitig werden neue Deckenauflagen, welche alternative Materialien anstelle von Estrich verwenden, entwickelt und durch simulative sowie experimentelle Untersuchungen schrittweise akustisch optimiert.

Simulative Analyse einer Holzdecke mit Lehmsteinbeschwerung

Es wurde eine „Basiskonstruktion“ für erste simulationstechnische Untersuchungen einer Holzdeckenkonstruktion mit Lehmbausteinen definiert. Die Konstruktion stellt noch keinen finalen Entwurf dar, sondern dient in erster Linie zur grundlegenden Analyse des akustischen Verhaltens von Deckenkonstruktionen mit Lehmsteinbeschwerungen im Vergleich zu Deckenkonstruktionen mit Betonbeschwerungen. Die betrachtete Konstruktion ist ein zweischaliges System, dessen genauer Aufbau Abbildung 1 entnommen werden kann.

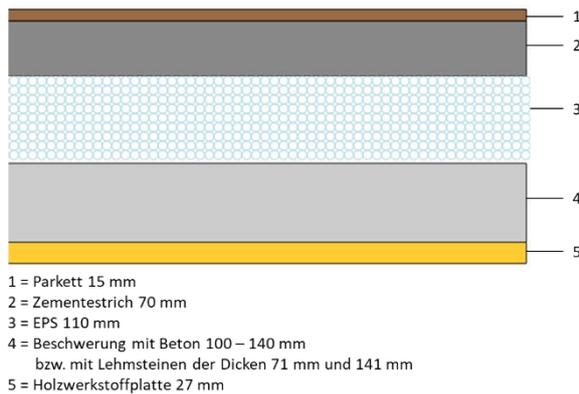


Abbildung 1: „Basiskonstruktion“ für erste Simulationen von Deckenauflagen mit Lehmbausteinen anstelle einer Betonbeschwerung

Diese Konstruktion stellt ein Masse-Feder-Masse-System dar, wobei die Schichten 2 und 4 in Abbildung 1 als Massen und die Schicht 3 mit EPS-Dämmmaterial als Federn fungieren. Ein solches System besitzt eine Resonanzfrequenz, welche einen entscheidenden Einfluss auf die Schalldämmung hat. Im Bereich der Resonanzfrequenz schwingt die Konstruktion besonders stark, d.h. mit großer Amplitude, wodurch die Schallübertragung durch das Bauteil begünstigt wird. Die Schalldämmung ist daher gegenüber anderen Frequenzen merklich reduziert. Für Leichtbaukonstruktionen liegen die Resonanzfrequenzen meist im tieferen, aber vom menschlichen Ohr noch gut wahrnehmbaren, Frequenzbereich und haben maßgeblichen Einfluss auf die akustische Performance des Bauteils. Die Reduktion der Auswirkungen der Resonanzfrequenz und deren Verschiebung in unkritischere Bereiche ist daher ein zentraler Punkt bei der akustischen Optimierung und wird für Decken in der Regel durch eine Beschwerung realisiert. Rechnerisch kann die Resonanzfrequenz eines zweischaligen Systems nach Gleichung 1 aus den flächenbezogenen Schalenmassen und der dynamischen Steifigkeit der Federschicht ermittelt werden.

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{s' \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \quad (1)$$

f_o Resonanzfrequenz in Hz
 m_i Flächenbezogene Schalenmasse in kg/m^2
 s' Dynamische Steifigkeit der Federschicht in N/m^3

Die simulationstechnischen Untersuchungen der „Basiskonstruktion“ aus Abbildung 1 konzentrierten sich auf die Trittschalldämmung im Frequenzbereich 50 Hz bis 500 Hz. Die Deckenkonstruktion wurde dazu mit der Simulationssoftware INSUL [3] nachgebildet. Die Beschwerungsschicht (Schicht 4) wurde zunächst als 100 mm dicke Betonschicht mit einer Rohdichte von 2500 kg/m^3 angesetzt. Anschließend fand eine Variation der Betondicke von 100 mm bis 140 mm statt. Im nächsten Schritt wurde anstelle der

Betonschicht eine Beschwerung mit Lehmsteinen der Dicke 71 mm bzw. 142 mm simuliert. Die Rohdichte der Lehmsteine wurde zwischen 1000 kg/m^3 und 2200 kg/m^3 variiert.

Eine Beschwerung mit Beton bietet die Möglichkeit, die Schichtdicke im Rahmen der Statik und Kosten nahezu beliebig anzupassen. Dahingegen ist für Lehmsteine die Schichtdicke direkt von der Höhe des verwendeten Steins abhängig, welche üblicherweise 52 mm, 71 mm oder 113 mm beträgt. Für die hier gezeigten Simulationen wurde ein Lehmstein der Höhe 71 mm gewählt. Die zweite simulierte Schichtdicke von 142 mm ergibt sich durch die Anordnung von zwei übereinander liegenden Lehmsteinreihen. Die Rohdichte der Lehmsteine kann je nach Hersteller stark schwanken und liegt in der Regel zwischen 700 kg/m^3 und 2200 kg/m^3 . Für die nachfolgenden Vergleiche wurden repräsentativ die vier Rohdichten 1000 kg/m^3 als unterer Grenzwert, 1200 kg/m^3 als Grenzwert zwischen Leichtlehmsteinen und Lehmsteinen, 1800 kg/m^3 und 2200 kg/m^3 als oberer Grenzwert festgelegt. Niedrigere Rohdichten als 1000 kg/m^3 wurden nicht betrachtet, da die Lehmsteine als Beschwerung verwendet werden.

Simulationsergebnisse

Abbildung 2 zeigt einen Vergleich der simulierten Norm-Trittschallpegel der Deckenauflage mit Betonbeschwerungen der Dicken 100 mm, 120 mm und 140 mm für den Frequenzbereich 50 Hz bis 500 Hz. Der Norm-Trittschallpegel nimmt für den gesamten betrachteten Frequenzbereich mit zunehmender Betondicke ab. Im Frequenzbereich 200 Hz bis 500 Hz beträgt die Differenz zwischen den Dicken 100 mm und 140 mm 3 dB bis 4 dB. Unterhalb von 200 Hz liegt der Unterschied bei 1 dB bis 2 dB. Durch eine Dickenerhöhung der Beschwerungsschicht können somit niedrigere Norm-Trittschallpegel für die untersuchte Deckenauflage erreicht werden, wobei für tiefe Frequenzen die Verbesserungen geringer ausfallen.

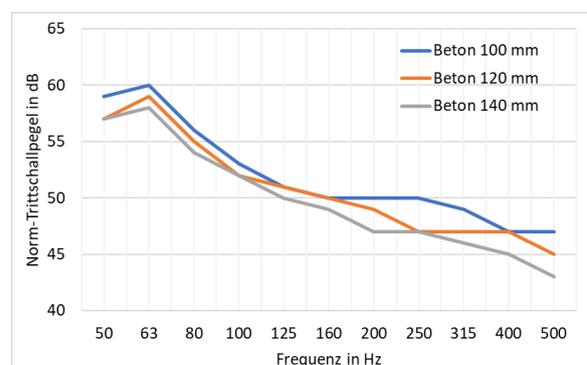


Abbildung 2: Vergleich der simulierten Norm-Trittschallpegel für die Deckenauflage mit Betonbeschwerungen der Dicken 100 mm, 120 mm und 140 mm

Allgemein ist die Verbesserung der Trittschalldämmung jedoch nicht nur von der Dicke und dem Material der Beschwerungsschicht abhängig, sondern hängt auch direkt vom restlichen Aufbau der Decke ab. Je nach Anordnung, Material (Rohdichte) und Dicke der einzelnen Bauteilschichten kann das Ergebnis für andere Deckenaufbauten abweichen. Bei der Entwicklung der neuen Holzleichtbau-Deckenkonstruktionen werden daher die Interaktionen zwischen deren verschiedenen Bauteilschichten und das akustische Verhalten alternativer Beschwerungsmaterialien durch Simulationen sowie durch experimentelle Messungen detailliert betrachtet. Dies ermöglicht sowohl die Optimierung der Schalldämmeigenschaften als auch die Optimierung des Materialeinsatzes. Erste Ergebnisse zu Simulationen mit Lehmsteinen werden nachfolgend gezeigt.

In Abbildung 3 und Abbildung 4 werden für den Frequenzbereich 50 Hz bis 500 Hz die simulierten Norm-Trittschallpegel für die Deckenauflage mit Lehmsteinbeschwerden unterschiedlicher Rohdichte einander gegenübergestellt. Sowohl für die Steinhöhe 71 mm als auch für die Steinhöhe 142 mm verbessert sich der Norm-Trittschallpegel für alle Frequenzen mit steigender Rohdichte der Lehmsteine. Die Differenz zwischen den Grenzwerten 1000 kg/m³ und 2200 kg/m³ nimmt mit abnehmender Frequenz zu. Bei 500 Hz beträgt der Unterschied 4 dB, während für Frequenzen unterhalb von 200 Hz eine Verbesserung von 8 dB bis 10 dB beobachtet werden kann. Der Betrag der Verbesserung ist auch hier maßgeblich von der Anordnung, dem Material (Rohdichte) und der Dicke der restlichen Bauteilschichten abhängig. Insgesamt kann jedoch gesagt werden, dass eine höhere Rohdichte der Beschwerung bei gleichbleibender Schichtdicke in der Regel zu einer Senkung des Norm-Trittschallpegels führt.

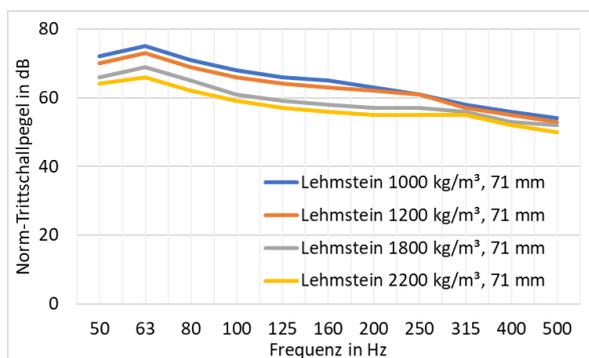


Abbildung 3: Vergleich der Norm-Trittschallpegel für die Deckenauflage mit Lehmsteinbeschwerden unterschiedlicher Rohdichte (Steinhöhe 71 mm)

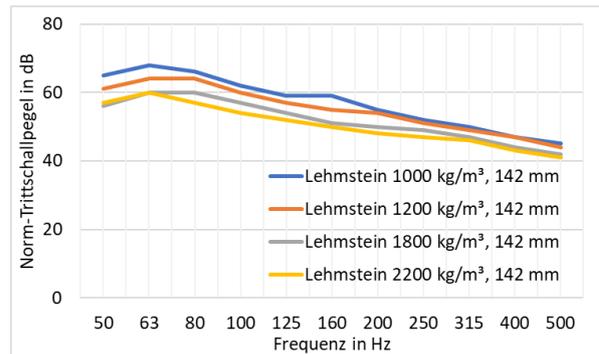


Abbildung 4: Vergleich der Norm-Trittschallpegel für die Deckenauflage mit Lehmsteinbeschwerden unterschiedlicher Rohdichte (Steinhöhe 142 mm)

Im nächsten Schritt wurden die Simulationsergebnisse für die beiden Beschwerungsschichtdicken 71 mm und 142 mm miteinander verglichen. Abbildung 5 zeigt dies exemplarisch für die Rohdichten 1000 kg/m³ und 2200 kg/m³. Analog zu den Simulationen mit Betonbeschwerung verbessert sich der Norm-Trittschallpegel für alle Frequenzen bei größerer Schichtdicke. Die größten Verbesserungen liegen auch hier im Frequenzbereich 200 Hz bis 500 Hz und betragen zwischen 8 dB und 9 dB. Unterhalb von 200 Hz sinkt der Norm-Trittschallpegel durch die Verdopplung der Beschwerungsschichtdicke um 5 dB bis 7 dB.

Ein Vergleich zwischen den Simulationsergebnissen für die Deckenkonstruktion mit der Lehmsteinbeschwerungsschicht der Rohdichte 1000 kg/m³ und der Dicke 71 mm und den Simulationsergebnissen für die Deckenkonstruktion mit der Lehmsteinbeschwerungsschicht der Rohdichte 2200 kg/m³ und der Dicke 142 mm zeigt deutliche Unterschiede bei den frequenzabhängigen Norm-Trittschallpegeln. Für den gesamten Frequenzbereich 50 Hz bis 500 Hz kann für die Simulationen mit der schwereren und dickeren Lehmsteinschicht eine Verbesserung von mindestens 12 dB bei 315 Hz und maximal 15 dB bei 50 Hz, 63 Hz, 160 Hz sowie 200 Hz beobachtet werden. Für den simulierten Deckenaufbau führt die Kombination aus höherer Rohdichte und größerer Dicke der Beschwerungsschicht somit zu einer signifikanten Senkung des Norm-Trittschallpegels und damit zu einer wesentlich höheren Trittschalldämmung im Frequenzbereich 50 Hz bis 500 Hz.

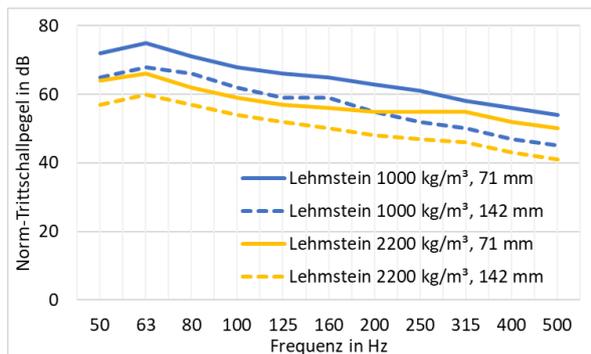


Abbildung 5: Vergleich der Norm-Trittschallpegel für die Deckenauflage mit Lehmsteinbeschwerden der Rohdichten 1000 kg/m³ und 2200 kg/m³ für die Steinhöhen 71 mm und 142 mm

Um aus akustischer Sicht eine erste Aussage zum Einsatz von Lehmsteinen anstelle von Beton zu treffen, können die Simulationsergebnisse für die Betonbeschwerung der Dicke 140 mm und die Simulationsergebnisse für die Lehmsteinbeschwerden der Dicke 142 mm einander gegenübergestellt werden. Für die Lehmsteinbeschwerung mit der höchsten Rohdichte von 2200 kg/m³ ist der Vergleich in Abbildung 6 dargestellt. Wie zu sehen ist, liegen die Norm-Trittschallpegel nahe beieinander. Für den tieffrequenteren Bereich 63 Hz bis 200 Hz liegen die Werte für den Beton um 1 dB bis 2 dB niedriger, während im Frequenzbereich 400 Hz bis 500 Hz die Werte für den Lehmstein um 2 dB niedriger sind.

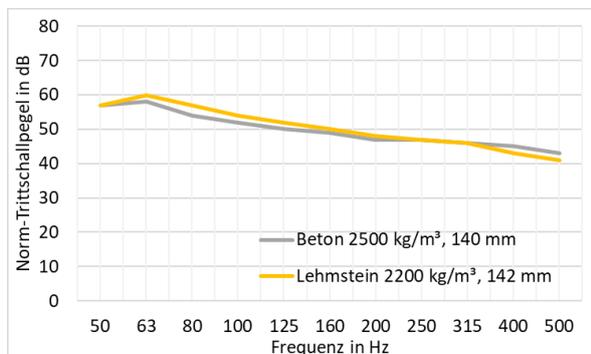


Abbildung 6: Exemplarischer Vergleich zwischen Lehmstein- und Betonbeschwerung

Die geringen Abweichungen lassen vermuten, dass der Lehmstein bei nahezu gleicher Schichtdicke und einer um 300 kg/m³ reduzierten Rohdichte eine realistische Alternative zum Beton darstellt. Im weiteren Forschungsverlauf soll dies durch die Simulation weiterer Deckenkonstruktionen und durch experimentelle Messungen genauer untersucht werden. Dabei wird insbesondere auch das Zusammenspiel der Beschwerungsschicht mit dem restlichen Deckenaufbau näher betrachtet. Zudem werden weitere Untersuchungen mit alternativen Materialien wie Schiefer-, Beton- und Ziegelschüttungen durchgeführt

Experimentelle Messung mit einer Holzdeckenattrappe nach DIN 10140

Parallel zu den simulationstechnischen Analysen begannen im akustischen Deckenprüfstand die Vorbereitungen zur experimentellen Messung der Verbesserung der Trittschalldämmung durch Deckenauflagen bei Montage auf Leichtbau-Rohdecken nach DIN 10140-1 Anhang H [4].

Abbildung 7 zeigt die akustischen Prüfstände an der RPTU, mit dem Deckenprüfstand im rechten Teil der Abbildung. Der akustische Deckenprüfstand besteht aus zwei übereinander liegenden Räumen, welche durch eine fest eingebaute, massive Bezugsdecke nach DIN EN ISO 10140-5 Anhang C2 [4] getrennt sind.



Abbildung 7: Akustische Prüfstände an der RPTU

Zur experimentellen Messung von Deckenauflagen auf Leichtbau-Deckenkonstruktionen sollten diese auf einer Leichtbau-Bezugsdecke und nicht auf einer Massiv-Bezugsdecke montiert werden. Alternativ kann jedoch die Massivdecke in Kombination mit einer Holzdeckenattrappe nach DIN EN ISO 10140-5 Anhang G [4] verwendet werden. Auf deren Aufbau und die damit einhergehende experimentelle Versuchsdurchführung wird im Nachfolgenden näher eingegangen.

Die Holzdeckenattrappe ist eine leichte Oberdecke, die an der vorhandenen massiven Bezugsdecke befestigt wird. Zuvor wird auf der massiven Decke eine dünne Lage elastischen Materials aufgebracht. Das elastische Material gleicht kleinere Unebenheiten aus und stellt dadurch einen vollflächigen Kontakt zwischen Holzdeckenattrappe und massiver Bezugsdecke sicher.

Soll keine bestimmte Leichtbaudecke nachgebildet werden, besteht die Holzdeckenattrappe aus einer 22 mm dicken Spanplatte der Fläche 2 m auf 2,6 m, welche auf 20 Holzfüßen montiert wird. Die Spanplatte muss ein Elastizitätsmodul zwischen 3000 MPa und 3500 MPa und eine Rohdichte zwischen 700 kg/m³ und 900 kg/m³ besitzen. Der Abstand zwischen den äußeren Holzfüßen und den Plattenkanten muss ungefähr 100 mm betragen. Die Holzfüße selbst sind 200 mm hoch, haben einen Querschnitt von 50 mm auf 50 mm und müssen aus Fichtenholz gefertigt werden. Die normativ geforderte feste Verbindung zwischen Spanplatte und Holzfuß wird sowohl durch Verschrauben als auch durch Verkleben erzielt.

Bei Verwendung der Holzdeckenattrappe sind die Messergebnisse des Verfahrens jedoch nur auf

analoge Einbaubedingungen übertragbar. Die Norm erlaubt daher eine Anpassung der Holzdeckenattrappe. Hierzu wird die Spanplatte entfernt und durch eine oder mehrere andere Platten ersetzt, welche den oberen Teil einer beliebigen Leichtbaudecke nachbilden. Dies ermöglicht eine direktere Untersuchung der akustischen Wechselwirkungen zwischen Deckenauflage und eigentlicher Leichtbaudecke, sodass praxisnahe Werte für die spätere Einbausituation gemessen werden können.

Vor der experimentellen Messdurchführung müssen auf der montierten Holzdeckenattrappe zunächst fünf Gewichte mit einem jeweiligen Gewicht von 20 kg bis maximal 25 kg angeordnet werden. Eines der Gewichte muss in der Mitte der Holzdeckenattrappe und die vier übrigen Gewichte an den Ecken aufgebracht werden. An den Ecken ist dabei ein Abstand von 40 cm zu den Kanten einzuhalten. Die Gewichte sind sowohl bei Messungen mit als auch ohne Deckenauflage zu verwenden. Die Gewichte stehen dabei stellvertretend für eine typische Möblierung.

Umgebungsbedingungen, insbesondere die Temperatur und die Luftfeuchte, können Einfluss auf die akustischen Eigenschaften von Deckenauflagen haben und müssen bei der Messdurchführung beachtet werden. Normativ wird daher auch eine Temperatur zwischen 18°C und 25°C in der Mitte der Deckenoberfläche und die Angabe der Luftfeuchte im Prüfbericht gefordert.

Zur Anregung des Prüfbauteils wird ein Norm-Hammerwerk mit Konfigurationen gemäß DIN EN ISO 10140-5 Anhang E [4] verwendet. Das Norm-Hammerwerk wird an mindestens sechs Positionen aufgestellt, wobei jede Position wenigstens 300 mm zu den aufgebrachten Gewichten und 100 mm zu den Bauteilkanten entfernt sein muss. Die Positionen sind für Messungen mit und ohne Deckenauflage gleich zu wählen. Für jede Hammerwerksposition wird eine eigene Messung des Norm-Trittschallpegels durchgeführt. Gemessen wird der Norm-Trittschallpegel mit Mikrofonen, welche im unteren Raum des akustischen Deckenprüfstandes aufgestellt werden.

Der Norm-Trittschallpegel der Holzdeckenattrappe-Bezugsdecken-Konstruktion wird zunächst ohne Deckenauflage und im Anschluss mit Deckenauflage experimentell bestimmt. Aus deren Differenz ergibt sich nach Gleichung 2 die frequenzabhängige Verbesserung der Trittschalldämmung durch die Deckenauflage in Dezibel.

$$\Delta L = L_{n,0} - L_n \quad (2)$$

ΔL Verbesserung der Trittschalldämmung
 $L_{n,0}$ Norm-Trittschallpegel ohne Deckenauflage
 L_n Norm-Trittschallpegel mit Deckenauflage

Im nächsten Schritt wird aus den experimentell bestimmten, frequenzabhängigen Verbesserungen der Trittschalldämmung die bewertete Trittschallpegelminderung ΔL_w nach den Vorgaben von DIN EN ISO

717-2 [5] bestimmt. Zur Beachtung der akustischen Merkmale typischer Gehgeräuschspektren wird abschließend der Spektrum-Anpassungswert $C_{I,\Delta,t}$ nach DIN EN ISO 717-2 [5] ermittelt. Zur besseren Berücksichtigung des tieffrequenten Bereichs 50 Hz bis 100 Hz wird zusätzlich der Spektrum-Anpassungswert $C_{I,\Delta,t,50-2500}$ bestimmt.

Zusammenfassung und Ausblick

Die bisherigen Forschungsergebnisse lassen vermuten, dass Lehmsteine der Rohdichte 2200 kg/m³ aus akustischer Sicht eine praktikable Alternative zu Beschwerungen aus Beton sind. Durch die simulationstechnische Analyse weiterer Holzdeckenkonstruktionen mit Lehmsteinbeschwerung und durch experimentelle Messungen soll dies im weiteren Forschungsverlauf detaillierter untersucht werden. Neben Lehmsteinen sollen dabei auch Beton-, Ziegel- und Schieferschüttungen als Alternativen für die Beschwerungsschicht erprobt werden.

Für die Entwicklung der neuen Deckenkonstruktionen sollen verschiedene Deckenauflagen im akustischen Deckenprüfstand der RPTU messtechnisch untersucht werden. Zur weiteren Verbesserung des ökologischen Aspekts sollen die Deckenauflagen möglichst ohne Estrich-Unterboden auskommen. Stattdessen sollen rückbaubare, alternative Materialien verwendet werden. Im Deckenprüfstand der RPTU finden hierzu erste experimentelle Untersuchungen unter Verwendung einer Holzdeckenattrappe statt. Die Holzdeckenattrappe ermöglicht normgerechte Messungen der Trittschallpegelminderung durch die Deckenauflage auch ohne Leichtbau-Bezugsdecke. Parallel werden verschiedene neu entworfene Deckenauflagen simulativ analysiert und verbessert.

Auf Basis der bisherigen Forschungen und umfangreicher Recherchen konnten bereits erste Ansätze für neue ökologisch vorteilhaftere Holzdeckenkonstruktionen entwickelt werden. Diese werden in den nächsten Monaten simulationstechnisch untersucht und schrittweise weiterentwickelt, sodass Prototypen für experimentelle Prüfstandmessungen erstellt werden können.

Danksagung

Unser Dank gilt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt DBU für die finanzielle Förderung des Forschungsprojekts.

Literatur

- [1] *Flieger M.; Hofmann M.; Kornadt O. et al.:* Entwicklung und experimentelle Untersuchung einer neuartigen Holzleichtbauwand für Schulen. Bauphysik-Kalender. Ernst & Sohn, Berlin, 2022.

- [2] *Flieger, M.; Hofmann, M.; Kornadt, O.:* Experimentelle Messung des Schalldämm-Maßes von Leichtbaukonstruktionen zur Dimensionierung akustisch entkoppelnder Schichten. Bauphysiktage, Kaiserslautern, 2022.
- [3] INSUL Version 9.0 [Software]. Marshall Day Acoustics.
- [4] DIN EN ISO 10140:2021-09, Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand, Beuth Verlag.
- [5] DIN EN ISO 717-2:2021, Akustik - Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen - Teil 2: Trittschalldämmung, Beuth Verlag.



BERÜCKSICHTIGUNG DES MAXIMALPEGELS IN DEN REGELWERKEN ZUM SCHALLSCHUTZ GEGEN AUßENLÄRM

Wilfried Wieland¹, Jan Weinzierl²

¹ Wolfgang Sorge Ingenieurbüro für Bauphysik GmbH & Co. KG, 90449 Nürnberg,

E-Mail: bauphysik@ifbsorge.de

Kurzfassung

Im vorliegenden Beitrag wird ein Berechnungsansatz für den passiven Schallschutz im Hinblick auf die Berücksichtigung von Spitzenpegeln diskutiert. Es wird ein Maximalpegelkriterium für Straßenverkehrslärm zur Berücksichtigung im Nachweisverfahren zum Schallschutz gegen Außenlärm vorgestellt.

This article discusses a calculation approach for passive noise protection with regard to the consideration of peak levels. A maximum level criterion for road traffic noise is presented for consideration in the verification procedure for noise protection against external noise.

Einleitung

Im gegenwärtig in Deutschland anzuwendenden Regelwerk zum passiven Schallschutz gegen Außenlärm, der DIN 4109, wird in den baurechtlich eingeführten Fassungen als heranzuziehende Größe zur Festlegung der Anforderungen an den baulichen Schallschutz der Mittelungspegel als Beurteilungsgröße verwendet. Zur Berücksichtigung von Maximalpegeln ist lediglich der Hinweis aufgeführt, dass bei Verkehrsgeräuschen mit starken Pegelschwankungen die Berücksichtigung von Pegelspitzen zur Kennzeichnung einer erhöhten Störwirkung zusätzliche Informationen zur Auslegung des Schallschutzes liefern kann [1][2]. Eine baurechtlich bindende Anforderung in Bezug auf Maximalpegel ist nicht enthalten.

Insbesondere für Bauvorhaben an wenig frequentierten Straßen ergeben sich durch verhältnismäßig geringe Beurteilungspegel unter Berücksichtigung der Vorgaben gemäß DIN 4109 oftmals nur die Mindestanforderungen an die Schalldämmung der Außenbauteile. Die Schallpegel akustischer Einzelereignisse wie vereinzelt Pkw- oder Lkw-Vorbeifahrten liegen bei gering befahrenen Verkehrswegen häufig deutlich über dem Niveau des Beurteilungspegels, werden in der Auslegung des baulichen Schallschutzes gegen Außenlärm jedoch nicht berücksichtigt.

Warum Maximalpegel?

Auf dem Gebiet der Lärmwirkungsforschung wurde durch Untersuchungen physiologischer Effekte von Verkehrslärm auf dem menschlichen Organismus insbesondere während des Schlafes eine signifikante Korrelation zwischen dem Maximalpegel akustischer Einzelereignisse und deren Auswirkung auf den Nachtschlaf beobachtet [3].

Als öffentlicher Interessenträger hat sich das Umweltbundesamt im Rahmen der Neufassung der Normenreihe der DIN 4109 explizit für die Berücksichtigung von Maximalpegeln im Schallschutz gegen Außenlärm ausgesprochen [4].

Daneben sind Anforderungen an den Maximalpegel bereits in etablierten Regelwerken verankert, zu erwähnen sind hier die VDI-Richtlinie 2719 [5], in welcher eine Differenz zwischen Mittelungs- und Maximalpegel von $\Delta L = 10$ dB (20 dB Bandbreite zulässig) aufgeführt ist, sowie die TA Lärm mit $\Delta L = 10$ dB (innerhalb von Gebäuden) und $\Delta L = 20$ dB (außerhalb von Gebäuden) [6]. Auch im Kontext der DIN 4109 waren im Jahr 1975 in den Ergänzenden Bestimmungen zur DIN 4109 „Schallschutz im Hochbau“ bereits Maximalpegel ($\Delta L = 10$ dB) berücksichtigt. In den darauffolgenden Fassungen der Norm wurden aus den Anforderungen lediglich Hinweise [7].

Ferner sei darauf hingewiesen, dass die skandinavischen Länder Norwegen, Schweden und Island in ihren Regelwerken zum Schallschutz gegen Außenlärm Anforderungen an den Maximalpegel ($\Delta L = 15$ dB) aufführen.

Um ein in der Praxis anwendbares Kriterium zur Berücksichtigung des Maximalpegels in Bezug auf Straßenverkehrslärm zu entwickeln, ist eine Berechenbarkeit erforderlich. Nachstehend wird ein mit den anerkannten Rechenmethoden quantifizierbarer Ansatz zur Diskussion gestellt.

Rechenansatz

Die RLS-19 als etablierte Richtlinie zur Berechnung von Schallemissionen von Straßenverkehrswegen erlaubt die Ermittlung des Grundwertes des Schalleistungspegels $L_{W0,FzG}$ als Kenngröße der

Schallemission eines einzelnen Fahrzeuges bei der Geschwindigkeit v_{FzG} [8]. Aus dem Grundwert des Schalleistungspegels kann über die Schallausbreitungsrechnung der Maximalpegel einzelner Fahrzeugvorbeifahrten L_{AFmax} an einem Immissionsort bestimmt werden. Im Rahmen der Maximalpegelbetrachtung wird vorgeschlagen, Maximalpegel nur auf Straßen ohne Lkw-Fahrverbot zu berücksichtigen. Demnach wird die Fahrzeuggruppe Lkw2 (Lastkraftwagen mit Anhänger bzw. Sattelkraftfahrzeuge) gemäß RLS-19 als maßgebliche Kenngröße herangezogen.

Es kann eine hinreichende Korrelation zwischen dem theoretischen Berechnungsansatz nach RLS-19 und messtechnisch erfassten Schalleistungspegeln von Kfz festgestellt werden. Zum Vergleich mit dem theoretischen Berechnungsansatz wurden die messtechnisch erfassten Schalldruckpegel für Lkw mit einer zulässigen Gesamtmasse von $m_{zul} > 12$ t aus einem Forschungsvorhaben [9] herangezogen (siehe Abbildung 1).

In den Betrachtungen wird dem Mittelungspegel (gleichmäßig fließender Verkehr) Linienschallquellencharakteristik zugeschrieben. Eine einzelne Lkw-Vorbeifahrt hingegen kann als Punktschallquelle modelliert werden, welche den maßgeblichen Schalldruckpegel L_{AFmax} an der Stelle mit der kürzesten Entfernung zwischen Fahrzeug und Immissionsort erzeugt. Die Rechenansätze führen zu einer entfernungsbedingten Schalldruckpegelabnahme von 3 dB (Mittelungspegel) bzw. 6 dB (Maximalpegel) je Abstandsverdoppelung.

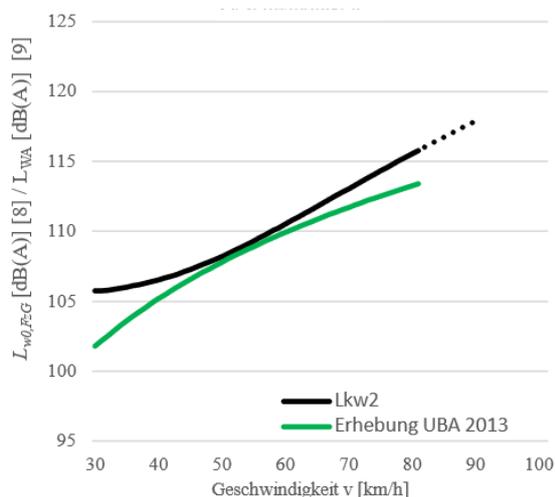


Abbildung 1: Gegenüberstellung des Grundwertes des Schalleistungspegels nach [8] und des messtechnisch ermittelten Schalleistungspegels nach [9] in Abhängigkeit der Geschwindigkeit

Maximalpegelkriterium

Folgende grundlegende Annahmen in Bezug auf den Vorschlag eines Maximalpegelkriteriums werden getroffen:

- Es werden ausschließlich Maximalpegel, ausgehend von Lastkraftwagen mit Anhänger bzw. Sattelkraftfahrzeugen mit einer zulässigen Gesamtmasse von mehr als 3,5 t berücksichtigt (Lkw2 gemäß RLS-19).
- Zum Schutz des nächtlichen Schlafes werden ausschließlich Räume mit Schlafnutzung betrachtet.
- Aufgrund der üblichen, hohen Verkehrsstärken auf Bundesautobahnen und Kraftfahrstraßen kann davon ausgegangen werden, dass auf diesen Straßenarten die Schallemissionen hinreichend durch den Mittelungspegel beschrieben werden. Hinsichtlich des Maximalpegelkriteriums werden die Straßengattungen ausgeschlossen.

Im Hinblick auf die bereits etablierten Kenngrößen bestehender Regelwerke wird als Differenz zwischen dem Mittelungs- und Maximalpegel $\Delta L = 15$ dB vorgeschlagen. In anderen Worten: Überschreitet der rechnerisch ermittelte Maximalpegel im Nachtzeitraum einer Lkw2-Vorbeifahrt den auf Basis des durchschnittlichen täglichen Verkehrs DTV ermittelten Mittelungspegel im Nachtzeitraum um mehr als 15 dB, so ist der Maximalpegel der Ermittlung des maßgeblichen Außenlärmpegels zugrunde zu legen. Andernfalls wird der Mittelungspegel herangezogen.

Anwendung in der Praxis

Der vorgeschlagene Rechenansatz der Autoren soll anhand einer beispielhaften Situation weitergehend diskutiert und konkretisiert werden.

Das Beispiel zeigt ein Neubaugebiet in unmittelbarer Nähe zu einer Gemeindestraße. Charakteristisch sind Abstände von weniger als 25 m zwischen den Fassaden schutzbedürftiger Räume und der Straßenachse.

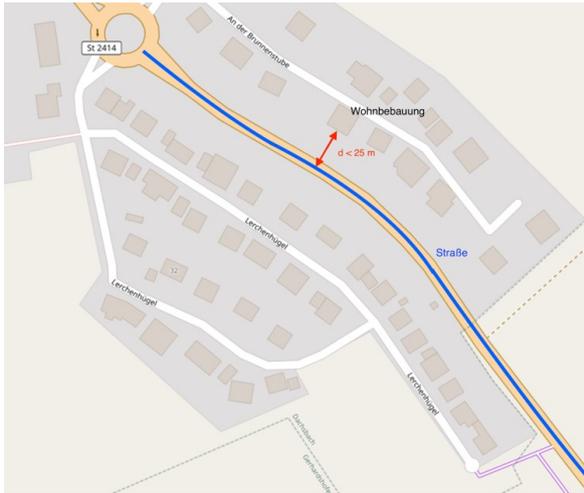


Abbildung 2: Typische bauliche Situation eines Neubaugebietes in unmittelbarer Nähe einer Gemeindestraße [10]

Für die Diskussion des Maximalpegelkriteriums werden die statistischen Standardwerte der RLS-19 bezüglich der durchschnittlichen Verkehrsstärken und Lkw-Anteile im Nachtzeitraum herangezogen. Es soll insbesondere der qualitative Unterschied zwischen Mittelungs- und Maximalpegelbetrachtung aufgezeigt werden. Diesbezüglich werden die in der RLS-19 beschriebenen Korrekturen $D_{SD,SDT,FzG}$ für Straßendeckschichten, $D_{LN,FzG}$ für Längsneigung sowie $D_{K,KT}$ für Knotenpunkte und D_{refl} für Mehrfachreflexionen vernachlässigt.

Betrachtet man für den vorliegenden Fall die Schalldruckpegel am Immissionsort (Fassade) auf Grundlage des Mittelungspegels (hier: DTV = 2000 Kfz/24h) und des Maximalpegels einer Lkw2-Vorbeifahrt in Abhängigkeit des Abstands zur Straßenachse bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h, so kann man feststellen, dass der Maximalpegel (abzüglich 15 dB) bis zu einem Abstand von etwa 160 m zur Straßenachse höher als der Mittelungspegel ist (siehe Abbildung 3). Dies würde im genannten Abstandsbereich zu einer Auslegung der Anforderungen ausschließlich auf Grundlage des Maximalpegels führen.

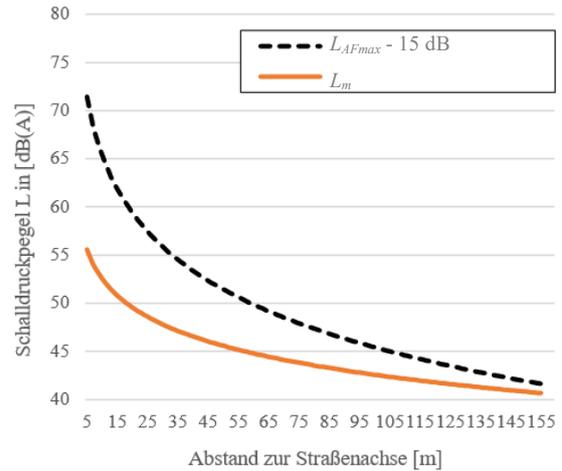


Abbildung 3: Schalldruckpegel L_{AFmax} (Lkw2) und L_m in Abhängigkeit des Abstands (Gemeindestraße, $v = 50 \text{ km/h}$, DTV = 2000 Kfz/24h)

Wird nun die zugrunde gelegte Verkehrsmenge (DTV) erhöht, so erhöht sich auch der rechnerisch ermittelte Mittelungspegel, während der Maximalpegel unverändert bleibt.

Erst der theoretische Ansatz einer durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke von DTV $\approx 15.000 \text{ Kfz/24h}$ verursacht für die vorliegende Situation bei einem Abstand von 25 m zur Straßenachse dieselben Anforderungen wie der Maximalpegel einer Lkw2-Vorbeifahrt:

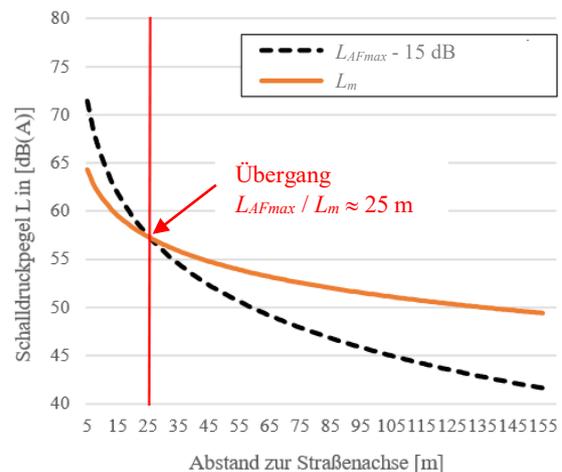


Abbildung 4: Schalldruckpegel L_{AFmax} (Lkw2) und L_m in Abhängigkeit des Abstands (Gemeindestraße, $v = 50 \text{ km/h}$, DTV = 15.000 Kfz/24h)

Stellt man die Schalldruckpegel L_m und L_{AFmax} in Abhängigkeit des DTV dar (siehe Abbildung 5), so ergibt sich nach den Standardwerten der RLS-19 für den Lkw2-Anteil im Nachtzeitraum ($p_2 = 4 \%$, Gemeindestraße) statistisch eine Lkw-Vorbeifahrt bei einem DTV von 313 Kfz/24h. Die Differenz zwischen Mittelungs- und Maximalpegel beträgt $\Delta L \approx 17 \text{ dB}$.

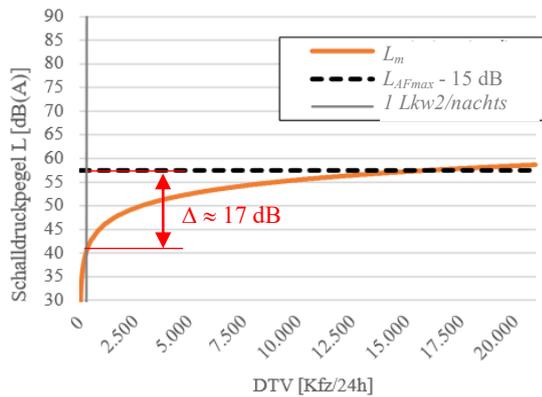


Abbildung 5: Schalldruckpegel L_{AFmax} und L_m in Abhängigkeit des DTV bei einem Abstand von 25 m, $v = 50$ km/h

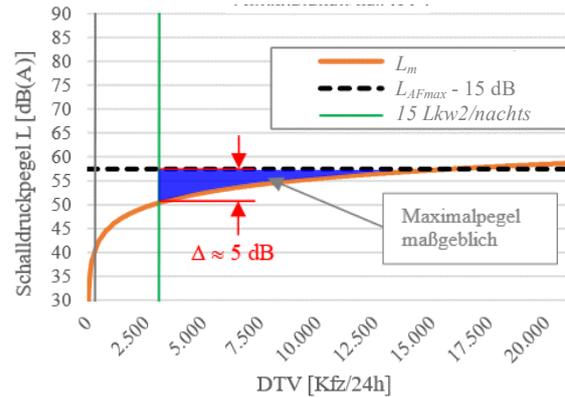


Abbildung 6: Schalldruckpegel L_{AFmax} und L_m in Abhängigkeit des DTV bei einem Abstand von 25 m, $v = 50$ km/h

Unter Berücksichtigung der Mindestanforderungen hinsichtlich des erforderlichen Schalldämm-Maßes der Außenbauteile ($R'_{w,ges} = 30$ dB) von schutzbedürftigen Räumen gemäß DIN 4109-1 führt dies im vorliegenden Fall zu einer resultierenden Differenz zwischen Mittelungs- und Maximalpegel von $\Delta L \approx 10$ dB.

Um eine bauliche Umsetzbarkeit weiterhin gewährleisten zu können, wird es als notwendig erachtet, einen „unteren Schwellenwert“ einzuführen, um seltene akustische Einzelereignisse nicht überzubewerten. In Anlehnung an Teil 4 der DIN 4109 [2] wird vorgeschlagen, als Schwelle zur Berücksichtigung des Maximalpegels 15 Lkw2-Vorbeifahrten im Nachtzeitraum zuzulassen. Bei den beschriebenen Randbedingungen entspricht dies einer durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke von rund $DTV \approx 3000$ Kfz/24h und es ergibt sich eine um etwa 5 dB höhere Anforderung durch den Maximalpegel im Vergleich zum Mittelungspegel. In Abbildung 6 ist der Bereich zwischen dem „unteren Schwellenwert“ (15 Lkw2-Vorbeifahrten im Nachtzeitraum) und dem Übergang zu den Anforderungen auf Grundlage des Mittelungspegels blau eingefärbt dargestellt. Innerhalb dieses Korridors sind die Anforderungen an das Schalldämm-Maß der Fassade auf Grundlage des Maximalpegels auszulegen.

Ausblick

Aus Sicht der Autoren ist es unstrittig, dass die Berücksichtigung von Maximalpegeln in der Normung zum passiven Schallschutz gegen Außenlärm verankert werden muss. Um eine vollumfängliche Anwendbarkeit in der Praxis gewährleisten zu können, sind weitere Verkehrslärmarten zu untersuchen.

Der Ansatz der Differenz zwischen Mittelungs- und Maximalpegel steht in einem Zielkonflikt aus der Notwendigkeit, wirtschaftlich wie ökologisch nachhaltig zu bauen und dabei gleichzeitig einen adäquaten Gesundheitsschutz bzw. akustischen Komfort zu gewährleisten und ist als Vorschlag für die zukünftige Regelung von Maximalpegeln zu verstehen.

Ferner ist der vorgeschlagene „untere Schwellenwert“ von bis zu 15 zulässigen Lkw2-Vorbeifahrten im Nachtzeitraum durchaus diskutabel und sollte insbesondere seitens der Lärmwirkungsforschung in Bezug auf die Aufwachwahrscheinlichkeiten und Schlafstadienwechsel hinreichend untersucht werden.

Literatur

- [1] DIN 4109-1:2018-01; Schallschutz im Hochbau - Teil 1: Mindestanforderungen
- [2] DIN 4109-4:2016-07; Schallschutz im Hochbau - Teil 4: Bauakustische Prüfungen
- [3] Sanok, S., et. al. “Road traffic noise impacts sleep continuity in suburban residents: Exposure-response quantification of noise-induced awakenings from vehicle pass-bys at night”, in: Science of the Total Environment, Ausgabe 817, 2022

- [4] Umweltbundesamt (UBA), Fachliche Stellungnahme zu Maximalpegelkriterien für den baulichen Schallschutz gegen Verkehrslärm, Dessau-Roßlau, 2022
- [5] VDI 2719:1987-08; Schalldämmung von Fenstern und deren Zusatzeinrichtungen
- [6] Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm - TA Lärm), 2017
- [7] Richtlinien für bauliche Maßnahmen zum Schutz gegen Außenlärm (Fassung September 1975) - Ergänzende Bestimmungen zu DIN 4109 „Schallschutz im Hochbau“
- [8] Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen RLS-19, Ausgabe 2019
- [9] Müller BBM GmbH (im Auftrag des UBA), „Ermittlung der Geräuschemissionen von Kfz mittels statistischer Vorbeifahrtmessung zur Fortschreibung einer langjährigen Zeitreihe“, München, 2013
- [10] OpenStreetMap,
URL:
<https://www.openstreetmap.de/karte/>

SESSION C · 07.03.2024

Thema: Brandschutz

Kooperationspartner

R
P **TU** Rheinland-Pfälzische
Technische Universität
Kaiserslautern
Landau

Bauhaus-
Universität
Weimar

WBA

WBA | Bauhaus Weiterbildungs-
akademie Weimar e.V.
Institut an der
Bauhaus-Universität Weimar

GRUNDLAGEN ZUR BRANDSCHUTZTECHNISCHEN ANWENDBARKEIT VON BEGRÜNTE FASSADEN AN MEHRGESCHOSSIGEN GEBÄUDEN

Thomas Engel, Stefan Winter

Technische Universität München, E-Mail: engel@tum.de

Kurzfassung

Begrünte Fassaden liegen im Trend. Die Brandausbreitung entlang der Fassade stellt grundsätzlich weltweit eines der kritischsten Brandszenarien dar und Pflanzen sind zusätzliche brennbare Materialien. Der Einfluss begrünter Fassaden auf die Brandweiterleitung entlang der Fassade ist folglich nicht zu vernachlässigen. Allerdings steht nur wenig Forschung zu diesem Thema zur Verfügung. Dies soll das Forschungsvorhaben FireSafeGreen ändern. Haupteinflussfaktor auf das Brandverhalten von Pflanzen ist der Feuchtigkeitsgehalt. Die Pflanzenart selbst spielt eine untergeordnete Rolle in Bezug auf das Brandverhalten. Eine Kombination aus Holz- und begrünter Fassade führt unter Berücksichtigung einiger Randbedingungen nicht zu einer Entzündung der dahinterliegenden Holzfassade. Grundsätzlich sind die angemessene Pflege und Wartung der maßgebende Faktor für brandsichere begrünte Fassaden.

Einleitung

Begrünte Fassaden werden zunehmend populärer. Gründe hierfür sind u. a., dass durch begrünte Fassaden in urbanen Räumen die Luftqualität und die thermische Leistung des Gebäudes verbessert, der Wärmeinseleffekt verringert und Lärm durch Absorption reduziert werden sollen (Alexandri et al., 2008), (Perini, et al., 2011). Der Begriff begrünte Fassaden ist ein Überbegriff für sehr unterschiedliche konstruktive Ausführungen von Fassadenbegrünungen. Abbildung 8 zeigt die verschiedenen Arten von Fassadenbegrünungen. Prinzipiell zu unterscheiden sind eine direkte bodengebundene Begrünung an der Außenwand durch Kletterpflanzen, eine indirekte bodengebundene Begrünung durch von der Außenwand abgesetzte Kletterhilfen und begrünte Wandsysteme mit Bepflanzung in Gefäßen oder an flächigen vertikalen Vegetationsflächen (Living Wall). Auch Mischformen sind möglich. (Köhler et al., 2012). (Mahabadi et al., 2018), (Pfoser, 2018).

Für bodengebundene Begrünungen an Kletterhilfen haben sich je nach Dickenwuchs (Wüchsigkeit) Wandabstände von 50 bis 200 mm zur Kletterhilfe etabliert (Mahabadi et al., 2018), (Pfoser, 2018). Ein

ausreichender Abstand ist neben der Wüchsigkeit der Pflanze auch aufgrund der sonst möglichen Überhitzung der Gerüstkletterpflanze durch die Außenwand notwendig (Pfoser, 2018).

Wandgebundene Begrünungssysteme (ohne Bodenanschluss) zeichnen sich durch integrierte Bewässerungssysteme, beliebige Begrünungsgrößen und einfache Austauschbarkeit der Pflanzen aus. Sie ermöglichen eine vorkultivierte Begrünung der Fassade ab Fertigstellung des Gebäudes durch Modul- oder Regalsysteme (Köhler et al., 2012), (Pfoser, 2018). Eine wandgebundene Begrünung in Form einer "Living Wall" ist ein komplettes, vorgehängtes, hinterlüftetes Fassadensystem. Es besteht aus Hinterlüftung, Unterkonstruktion, Tragstruktur, Trägerplatten, Dämmung, Substrat, Vlies, Bewässerungssystem und der Pflanze selbst. Die Systeme unterscheiden sich von Hersteller zu Hersteller erheblich.

Die Verwendung von Kletterpflanzen zur Fassadenbegrünung weist viele regionale Besonderheiten auf (Köhler et al., 2012). (Mahabadi et al., 2018), (Pfoser, 2018). Das Artenpotenzial für Kletterpflanzen in der DACH-Region umfasst ca. 150 Arten und Sorten (Köhler et al., 2012). Das Spektrum der möglichen Pflanzenarten für wandgebundene Begrünungssysteme ist wesentlich umfangreicher. Für die DACH-Region werden in (Mahabadi et al., 2018) ca. 100 Arten und Sorten aufgeführt. Zu unterscheiden sind Stauden, Gräser und Klettergehölze (Köhler et al., 2012).

Abbildung 1 und Abbildung 2 zeigen Beispiele für realisierte Grünfassaden.



*Abbildung 1: Bodengebundener Bewuchs an Kletterhilfen (Swiss Re Bürogebäude München);
(Quelle: Bundesverband GebäudeGrün)*



Abbildung 2: Wandgebundenes Begrünungssystem (Stadtverwaltung Venlo Niederlande); (Quelle: Bundesverband GebäudeGrün)

Brandschutztechnische Bewertbarkeit der verschiedenen begrünten Fassadentypen

Wie zuvor beschrieben sind „Living Walls“ komplexe Fassadensysteme, die sich von Hersteller zu Hersteller erheblich unterscheiden. Die herstellereigenspezifischen Systeme lassen sich nur durch großmaßstäbliche Brandversuche am jeweiligen Gesamtsystem produktspezifisch zielführend untersuchen (Engel, 2023a). Anders verhält sich dies für Kletterpflanzen an Rankhilfen. Diese können brandschutztechnisch allgemeingültig untersucht und im Folgenden bewertet werden. Aus diesen Untersuchungen ergeben sich allgemein gültige Prinzipien für einen brandschutztechnisch sicheren Betrieb (Engel, 2023a).

Stand der Forschung

Zum Brandverhalten begrünter Fassaden und der daraus folgenden Brandweiterleitung über die Fassaden stehen zum aktuellen Zeitpunkt international nur wenige Erkenntnisse zur Verfügung. Eine genaue Übersicht zum aktuellen Stand der Forschung für das Brandverhalten von begrünten Fassaden kann (Engel, 2023a), (Engel et al., 2023b) entnommen werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass mittel- bzw. großmaßstäbliche Brandversuche an begrünten Fassaden bis dato vor allem in Österreich und Deutschland durchgeführt wurden. Diese Untersuchungen fanden jedoch vorwiegend an genormten Fassadenbrandprüfständen, die ursprünglich für einen anderen Anwendungsfall konzipiert wurden und nicht den Einwirkungen realer Brandereignisse entsprechen (Engel, 2023a), statt. Die aktuelle Herausforderung für begrünte Fassaden besteht folglich darin, dass Ergebnisse skaliert Prüfverfahren, wie beispielsweise nach (ÖNORM B 3800-5:2013) oder (DIN 4102-20:2017-10), in Verbindung mit Bewertungskriterien, die ebenfalls für andere Baustoffe konzipiert wurden, direkt in die

Realität überführt bzw. Maßnahmen darauf aufbauend abgeleitet werden. Dieses Vorgehen kann zu unrealistischen Ergebnissen führen und birgt ohne gesamtheitliche Betrachtung Risiken (Engel, 2023a).

Die Auswertung des Stands der Forschung liefert zwei wesentliche Erkenntnisse: Erstens ist eine regelmäßige Pflege und Wartung eine wichtige Grundlage für eine brandschutztechnisch sichere Fassadenbegrünung. Großflächig abgestorbene Pflanzen müssen zeitnah erkannt und entfernt werden. Zweitens ist bei einer Brandbeanspruchung der begrünten Fassaden mit einem Austrocknen der Begrünung und im weiteren Verlauf mit einer abrupten kurzweiligen Brandausbreitung („Strohfeuer“) begrenzender Bereiche außerhalb des Primärbrandes zu rechnen. (Engel, 2023a)(Engel et al., 2023b)

Brandverhalten der Pflanzen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens FireSafeGreen (FireSafeGreen, 2024) wurde in einem ersten Teil das Brandverhalten von begrünten Fassaden untersucht. Im Fokus stand hierbei die Entflammbarkeit begrünter Fassaden, die im Rahmen von 40 kalorimetrischen Brandversuchen im mittleren Maßstab mit der Prüfmethode Single Burning Item (SBI) (EN 13823:2020-09) bewertet wurde. Schwerpunkt der Untersuchung waren insgesamt 25 Kletterpflanzenarten. Der Haupteinflussfaktor auf das Brandverhalten von Pflanzen ist der Feuchtigkeitsgehalt der Pflanze. Ein Vergleich der Wärmefreisetzungsrate von vitalen Pflanzen (normaler Feuchtigkeitsgehalt) zeigt ein ähnliches Verhalten, vgl. Abbildung 3.

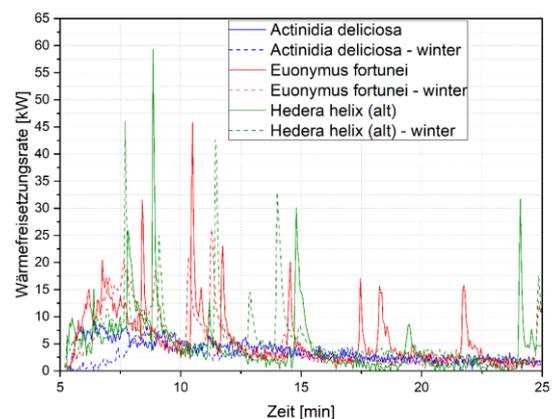


Abbildung 3: Vergleich der Wärmefreisetzungsrate von Actinidia deliciosa, Euonymus fortunei und Hedera helix im Sommer und Winter

Im Verlauf der Beanspruchung kommt es zu kurzen Spitzen der Wärmefreisetzungsrate. Diese Spitzen sind die aus vorherigen Untersuchungen bekannten „Strohfeuer“. Sie entstehen, wenn Teile der Pflanzen durch die Brandeinwirkung austrocknen und sich

dann schlagartig entzünden. Die Pflanzenart selbst hat keinen signifikanten Einfluss auf das Brandverhalten. Bei allen Versuchen trat mit vitalen, gepflegten Pflanzen eine horizontale Brandausbreitung in nur sehr geringem Umfang und nach Abschalten des Brenners ein Selbstverlösch auf. Auch ein direkter Vergleich zwischen jungen und alten Pflanzen sowie der Vergleich des jahreszeitlichen Einflusses zwischen Sommer und Winter ergab keinen signifikanten Unterschied bei vitalen, gepflegten Pflanzen. (Engel 2023a), (Engel et al., 2023b), (Engel 2023c)

Ein entscheidender Unterschied lag bei getrockneten Pflanzen vor. Hier trat zu Beginn eine abrupte Wärmefreisetzung auf. Abgestorbene Pflanzen sowie ungepflegte Pflanzen mit einem hohen Anteil an Totholz stellen folglich den kritischsten Fall dar. Abbildung 4 stellt die Wärmefreisetzungsraten eines 42 Tage getrockneten, eines vitalen jungen und eines vitalen alten Efeus im Vergleich zu einer 9 mm Span- und einer 13 mm Sperrholzplatte dar.

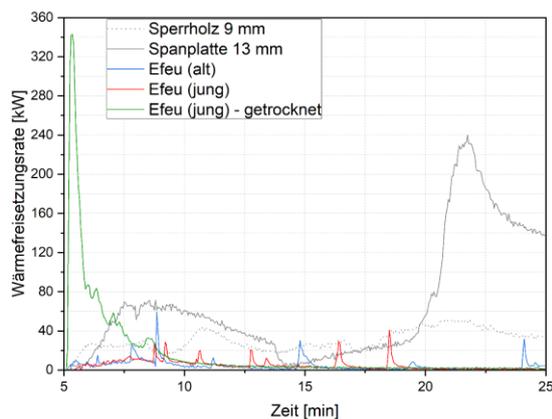


Abbildung 4: Wärmefreisetzungsraten eines 42 Tage getrockneten, eines vitalen jungen und eines vitalen alten Efeus im Vergleich zu einer 9 mm Span- und einer 13 mm Sperrholzplatte

Pflege und Wartung einer begrünter Fassade sind daher der wichtigste Faktor für die Aufrechterhaltung der Brandsicherheit. Totholz in Form von abgestorbenem Laub, Ästen oder Vogelnestern ist regelmäßig zu entfernen. Außerdem ist stetig zu prüfen, ob die Pflanzen noch vital sind und einen normalen Feuchtigkeitsgehalt aufweisen. Zusätzlich sind die Pflanzen regelmäßig zurückzuschneiden. Unkontrolliertes Wachstum kann zu viel Totholz führen – vor allem bei lichtfliehenden Pflanzen. (Engel 2023a), (Engel et al., 2023b), (Engel 2023c)

Im nächsten Schritt ist es notwendig, die Erkenntnisse aus den mittelgroßen Versuchen im großen Maßstab zu überprüfen; insbesondere die vertikale Brandausbreitung ist hierbei genauer zu bewerten. (Engel 2023a), (Engel et al., 2023b), (Engel 2023c)

Kombination von Holz und Grünfassaden

Eine zentrale Frage für die Realisierung kombinierter Holz- und Grünfassaden sind die entstehenden Wechselwirkungen im Brandfall. Die konkrete Frage ist, ob der Wärmestrom einer brennenden begrünter Fassade ausreicht, um eine dahinterliegende Außenwandverkleidung aus Holz zu entzünden und ob eine begrünter Fassade im Bereich von Brandsperren (MHolzBauRL, 2020) von Holzfassaden zu einem Zündschnurreffekt führt.

Zur Untersuchung dieser Fragestellung wurden mittelmaßstäbliche Brandversuche durchgeführt (Engel, 2023a), vgl. Abbildung 5.



Abbildung 5: Fotodokumentation des Brandversuchs Test 3 mit Holz- und Grünfassade zur 3. Prüfminute

Im Rahmen der Versuche wurde ein Abstand von 110 mm zwischen Rankgitter und Holzschalung gewählt. Diese Wahl soll eine möglichst kritische Brandeinwirkung der begrünter Fassade aufgrund des geringen Abstandes zur Holzschalung generieren. Bekannt ist, dass Wandabstände für bodengebundene Begrünungen von 50 mm bis 200 mm zur Kletterhilfe üblich sind (Mahabadi et al., 2018), (Pfoser, 2018). Diese Richtwerte orientieren sich an typischen mineralischen Außenwänden ohne Brandsperren. Ein ausreichender Mindestabstand zur Außenwand ist notwendig, da vor allem Pflanzen mit

dichter Blattmasse einen Hitzestau begünstigen und folglich absterben können. Um eine Überhitzung zu vermeiden, muss eine Luftzirkulation an der Fassade durch einen ausreichenden Abstand der Rankgitter zur Außenwand uneingeschränkt möglich sein (Pfoser, 2018).

Für Holzfassaden an mehrgeschossigen Gebäuden sind in Deutschland Brandsperren (MHolzBauRL, 2020), (Engel et al., 2021a), (Engel et al., 2021b) in jedem Geschoss notwendig. Diese Brandsperren definieren einen Mindestabstand der Begrünung zur Außenwand, da die Pflanze auf der einen Seite nicht durch die Brandsperre hindurch wachsen kann und auf der anderen Seite ein ausreichender Mindestabstand zur Stahlbrandsperre nötig ist, um eine Überhitzung der Pflanze in diesem Bereich zu vermeiden. Mit Zunahme der Auskrugung der Brandsperre nimmt auch der Abstand des Rankgitters zur Holzschalung zu; folglich nimmt die Einwirkung aus dem Abbrand der Begrünung aufgrund des größeren Abstandes ab. Dies ist der Grund, warum bei den durchgeführten und in (Engel, 2023a) genauer beschriebenen Brandversuchen eine Nut-Feder-Holzschalung mit verhältnismäßig geringer Auskrugung der Brandschutzabschottungen bzw. Brandsperren gewählt wurde.

Im Rahmen der Versuche wurde die Begrünung direkt bündig vor der 100 mm auskragenden Brandsperre vorbeigeführt. Weiter wurde der Bereich zwischen Holzschalung und Rankgitter flächig mit Pflanzentrieben eines über 15 Jahre alten Efeus gefüllt (Engel, 2023a). Die Wahl fiel auf Efeu, da er eine hohe Blattmasse und einen verhältnismäßig großen Triebdurchmesser hat. Die Versuchsanordnung und die Begrünungsdichte sollten eine ungepflegte und folglich mit Blick auf die Brandeinwirkung kritische Fassadenbegrünung simulieren, die zwar nicht über größere Mengen an Totholz verfügte, aber auch nicht regelmäßig zurückgeschnitten wurde.

Der mittelmaßstäbliche Versuchsaufbau ist in diesem Fall repräsentativ, da die Pflanzenmasse und -anordnung die eigentlich mögliche flächenbezogene Brandleistung bzw. maximale Wärmefreisetzung der Begrünung bestimmen und nicht die Größe des Versuchsstandes oder die Größe der Brandeinwirkung (Engel, 2023a).

Bei beiden Versuchen mit angeordneter Begrünung stellte sich weder während der Versuchsdurchführung noch im Rahmen der anknüpfenden Beobachtungszeit ein selbständiger Brand auf der Holzschalung oberhalb der Brandsperre ein (Engel, 2023a). Dies lässt sich am besten visuell an den Holzschalungen nach Beendigung der Brandversuche beurteilen, siehe auszugsweise Abbildung 6.



Abbildung 6: Fotodokumentation der Holzschalung oberhalb der Brandsperre nach Beendigung des Versuches und der Beobachtungszeit für Test 3

Eine Verfärbung und Verkohlung stellte sich in Teilbereichen der Holzschalung aufgrund der Brandeinwirkung aus der Begrünung ein. Am intensivsten fiel die Verkohlung im mittleren, unteren Bereich der Fassade direkt oberhalb der Brandsperre aus. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich einzelne Holztriebe des mit Draht befestigten Efeus nach Abbrand der Blätter und Jungtriebe vom Rankgitter lösten und auf der Brandsperre abbrannten (Engel, 2023a). Auch diese Brandeinwirkung führte nicht zu einem selbständigen Brand der Holzfassade. Die direkte Brandeinwirkung auf den unteren Bereich der Holzschalung durch brennende Pflanzenteile auf der Brandsperre wäre für offene Schalungen infolge der dreiseitigen Brandeinwirkung auf den Holzquerschnitt kritischer als im vorliegenden Fall. Aufgrund des beschriebenen größeren Abstandes der Begrünung zur Holzschalung und der größeren Auskragungen der Brandsperren ist jedoch bei offenen Schalungen nicht mit einer Brandeinwirkung direkt an der Holzschalung zu rechnen (Engel, 2023a).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass ein Abbrand der Begrünung im Rahmen der Versuche (Engel, 2023a) nicht zu einer Entzündung der dahinterliegenden Holzfassade führte. Voraussetzungen hierfür sind ein Mindestabstand von 110 mm zwischen Rankgitter und Holzschalung und eine regelmäßige Pflege und Wartung der Begrünung, bei der Totholz entfernt wird.

Abschließende Großbrandversuche

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Beitrages fanden in Freiberg die abschließenden Großbrandversuche des Forschungsvorhabens FireSafeGreen (FireSafeGreen, 2024) statt.

Im Rahmen dieser Großbrandversuche wird untersucht welchen Einfluss ein sehr kurzfristiger

Wärmestrom auf die Außenwand, Fenster, Balkone und die dahinter liegenden Bereiche hat und welches Risiko damit verbunden ist. Eine konkrete Frage wäre zum Beispiel, ob der Wärmestrom einer trockenen grünen Fassade (worst case) ausreicht, um bei offenstehendem Fenster, die Einrichtung direkt an der Öffnung innerhalb der Nutzungseinheit zu entzünden. Darüber hinaus soll insbesondere die vertikale Brandausbreitung genauer bewertet werden.

Geplant sind in Summe acht Fassadenbrandversuche, die sowohl flächig an der Wand als auch an einer Balkenkonstruktion angeordnet werden, vgl. Abbildung 9.

Abbildung 7 zeigt darüber hinaus den 2. Versuch (V1) mit vitalen Pflanzen am flächigen Aufbau.



Abbildung 7: Foto des abschließenden Großbrandversuchs V1 des Forschungsvorhabens FireSafeGreen mit der 12 m hohen flächigen Anordnung und vitalen Kletterpflanzen

Zusammenfassung und Ausblick

Für die brandschutztechnische Bewertung von begrünten Fassaden gibt es aktuell nur wenige Bewertungsgrundlagen. Mittelmaßstäbliche

Brandversuche im Rahmen des Forschungsvorhabens FireSafeGreen (FireSafeGreen, 2024) zeigten: Haupteinflussfaktor auf das Brandverhalten von Pflanzen ist der Feuchtigkeitsgehalt. Die Pflanzenart selbst spielt eine untergeordnete Rolle in Bezug auf das Brandverhalten und ist nach diesen Erkenntnissen, – zumindest für die untersuchten Varianten – zu vernachlässigen. Auch der direkte Vergleich von jungen und alten Pflanzen sowie der Vergleich eines jahreszeitlichen Einflusses von Sommer und Winter zeigte keinen signifikanten Unterschied bei vitalen, gepflegten Pflanzen. Im Verlauf von Bränden an begrünten Fassaden kommt es zu kurzen Wärmefreisetzungsspitzen. Diese Spitzen werden als „Strohfeuer“ bezeichnet. Sie entstehen, wenn Teile der Pflanzen durch die Brandeinwirkung austrocknen und sich dann schlagartig entzünden. Bei vitalen, gepflegten Pflanzen tritt eine horizontale Brandausbreitung nur in sehr geringem Umfang auf. Weiter verhalten sich vitale begrünte Fassaden nach Ende der Primärbrandeinwirkung selbstverlöschend. (Engel, 2023a), (Engel et al., 2023b), (Engel 2023c)

Für eine Kombination aus Holz- und begrünter Fassade lässt sich festhalten, dass ein Abbrand der Begrünung nicht zu einer Entzündung der dahinterliegenden Holzfassade führt. Voraussetzung ist ein Mindestabstand von 110 mm zwischen Rankgitter und Holzschalung und eine regelmäßige Pflege und Wartung der Begrünung. (Engel, 2023a)

Im nächsten Schritt gilt es, die Erkenntnisse aus den mittelmaßstäblichen Versuchen im Großmaßstab zu überprüfen und vor allem die vertikale Brandausbreitung genauer zu untersuchen. Weiter ist die Definition der angemessenen Pflege und Wartung für brandsichere begrünte Fassade tiefergehend auszuarbeiten. Zu klären ist, welche Intervalle notwendig sind und wann die unterschiedlichen Pflegemaßnahmen erforderlich sind. Genauer zu untersuchen ist darüber hinaus der Einfluss des sehr kurzweiligen Wärmestroms einer brennenden Fassadenbegrünung auf die Außenwand, die Fenster und die dahinterliegenden Bereiche. Welches tatsächliche Risiko ergibt sich daraus für eine Brandausbreitung?

Förderhinweis

Dieses Projekt wird gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen aus Mitteln der Zukunft Bau Forschungsförderung.

Literatur

Alexandri, E.; Jones, P. 2008. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. In: Building and

Environment 43 (4), S. 480–493.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.055>

DIN 4102-20:2017-10. Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 20: Ergänzender Nachweis für die Beurteilung des Brandverhaltens von Außenwandbekleidungen.

EN 13823:2020-09. Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten – Thermische Beanspruchung durch einen einzelnen brennenden Gegenstand für Bauprodukte mit Ausnahme von Bodenbelägen.

Engel, T. 2023a. Brandschutz für biogene Fassaden – Experimentelle Untersuchungen als Grundlage brandschutztechnischer Prinzipien, Dissertation, Technische Universität München

Engel, T.; Werther, N. 2023b. Fire Safety for Green Façades- Part 1: Basics, state-of-the-art research and experimental investigation of plant flammability; Fire Technology [Manuscript submitted for publication]

Engel, T., Werther, N. 2021a. Structural Means for Fire-Safe Wooden Façade Design. Fire Technol. <https://doi.org/10.1007/s10694-021-01174-2>

Engel, Thomas 2021b. Aktuelle Erkenntnisse zur Planung von Holzfassaden. Tagungsband der EIPOS-Sachverständigentage Brandschutz 2021

Engel, Thomas 2023c. Brandverhalten von Grünfassaden. OIB aktuell – Das Fachmagazin für Baurecht und Technik, Heft 2.2023 – Herausgeber: Österreichisches Institut für Bautechnik, S. 14-18

Engel, T. 2023d. Die begrünte Fassade. 24. EIPOS-Sachverständigentage Brandschutz, Dresden

Forschungsvorhaben FireSafeGreen, Homepage <http://www.firesafegreen.de>

Köhler, M.; Ansel, W. 2012. Handbuch Bauwerksbegrünung. Planung - Konstruktion - Ausführung. Köln: Rudolf Müller.

Mahabadi, M.; Althaus, C.; et al. 2018. Fassadenbegrünungs-richtlinien - Richtlinien für die Planung, Bau und Instandhaltung von Fassadenbegrünungen. Hg. v. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. - FLL.

MHolzBauRL, vom Oktober 2020 (21.06.2021): Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise.

ÖNORM B 3800-5:2013. Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 5: Brandverhalten von Fassaden - Anforderungen, Prüfungen und Beurteilungen.

Perini, K.; Ottel , M.; et al. 2011. Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. In: Building and Environment 46 (11), S. 2287–2294. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.009>

Pfoser, N. 2018. Vertikale Begrünung. Bauweisen und Planungsgrundlagen zur Begrünung von Wänden und Fassaden mit oder ohne natürlichen Boden-/Bodenwasseranschluss. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer (Fachbibliothek grün).

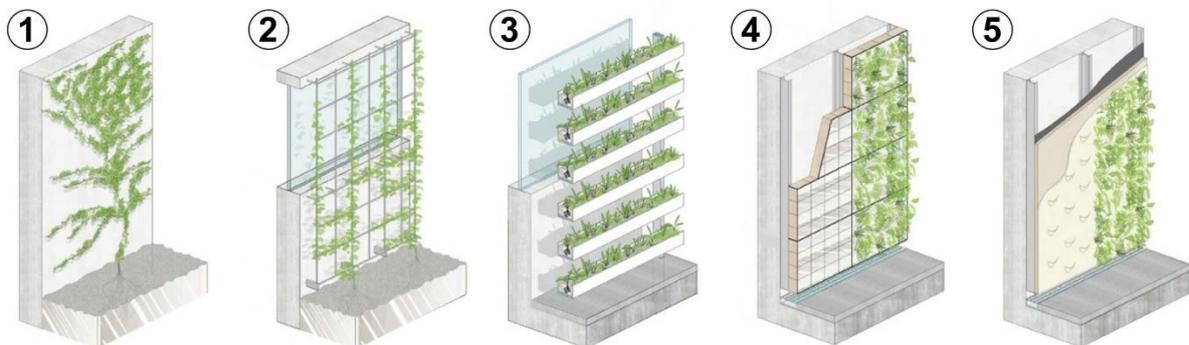


Abbildung 8: Ausbildungsformen von Fassadenbegrünungen. 1) Direktbewuchs mit Selbstklimmern, bodengebunden, 2) leitbarer Bewuchs an Kletterhilfen, bodengebunden, 3) Pflanzgefäße, horizontale Vegetationsflächen, wandgebunden, 4) modulares System (Living Wall), vertikale Vegetationsflächen, wandgebunden, 5) flächiges System (Living Wall), vertikale Vegetations-flächen, wandgebunden; basierend auf Bildquelle (Pfoser, 2018)

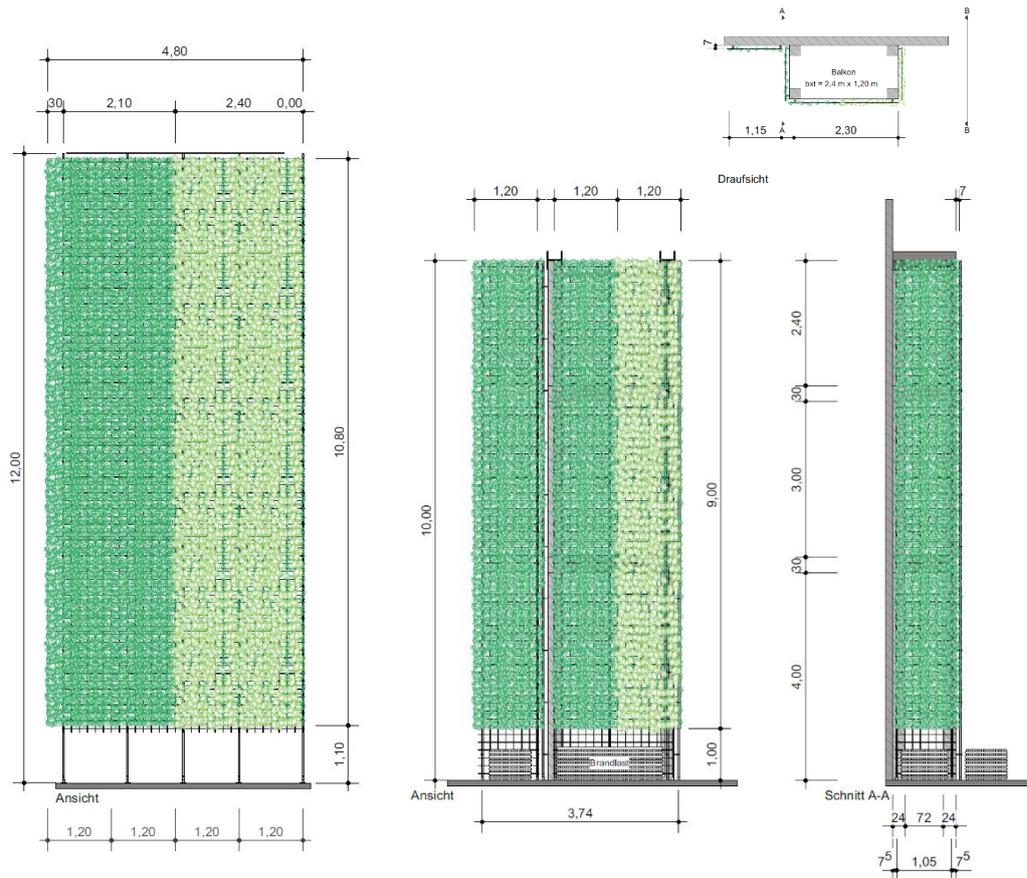


Abbildung 9: Links: Flächige Versuchsanordnung (12 m hoch) für die Versuche V0, V1 und V2; rechts: Balkenkonstruktion (10 m hoch) für die Versuche V3, V4, V5, V6 und V7

BEST PERFORMANCE RATIO IM BRANDSCHUTZ

Claudius Hammann^{1,3}, Daniel Herzog^{1,2}

¹ Technische Universität München, Lehrstuhl für Bauphysik, E-Mail: claudius.hammann@tum.de

² BC Ingenieure, Freising, E-Mail: daniel.herzog@bci-ing.de²

³ Technische Universität München, HR 6 – Werkfeuerwehr Garching

Kurzfassung

Das Paper beschreibt die Möglichkeit der Risikoquantifizierung und Optimierung im vorbeugenden Brandschutz durch eine Fault-Tree-Analyse (FTA). Diese Methode ermöglicht die Kosten-Nutzen Analyse in Bezug auf den Zuwachs an Sicherheit eines Systems bzw. Gebäudes. Anhang zweier Szenarien konnte die Risikominderung im Verhältnis zum Mitteleinsatz durch Varianten (redundante Sprinklerpumpe/ Brandwand) quantifiziert werden. Dabei wurde gezeigt, dass die Errichtung einer Brandwand um ca. den Faktor 10 effektiver ist gegenüber der Variante mit der redundanten Sprinklerpumpe. Weiterführend konnte aufgezeigt werden, dass die FTA eine Möglichkeit bietet, einen Kosten-Nutzenfaktor zu benennen.

Motivation

Die Baukostensteigerung ist ein viel diskutiertes und auch politisch beachtetes wesentliches Themenfeld (Bundesbauministerium, 2019), gleichwohl zeigen Daten der Versicherer, dass die Kosten für den Brandschutz im Wohnungsbau lediglich 2 bis 3 % der Baukosten ausmachen, Fehlplanung und Baumängel jedoch bei ca. 10 % liegen (Normenkontrollrat, 2021). Insbesondere die frühzeitige Planung ist dabei ein Garant zum Kostensparen (Bundesbauministerium, 2015). Im Zuge der effizienten Baukostensenkung ist

die Frage "Wo liegt das beste Verhältnis zwischen eingesetzten finanziellen Mitteln und dem Zuwachs an Sicherheit im Brandschutz?" von zentraler Bedeutung. Der vorliegende Artikel beschreibt den methodischen Ansatz mittels Fehlerbaumanalyse (eng. Fault-Tree-Analysis = FTA), um diese Frage zu beantworten. Die Methode kann Planern sowie Versicherungsunternehmen die Möglichkeit bieten unterschiedliche Maßnahmen zu vergleichen und diese im Verhältnis von Mitteleinsatz (Kosten) und dem Zuwachs an Sicherheit für das Gebäude zu bewerten.

Stand der Wissenschaft und Technik

Die FTA wurde mit dem Ziel entwickelt, Fragen der Art "wie kann es dazu kommen, dass [...]?" in einer strukturierten Art und Weise zu beantworten und

bewerten zu können (Eder, 2015). Der Platzhalter [...] steht hierbei für ein unerwünschtes Ereignis, welches in der FTA als TOP-Event beschrieben wird. Im Fall des hier beschriebenen Anwendungsfalls beschreibt das TOP-Event die Versagenswahrscheinlichkeit des Beispielgebäudes in Bezug auf ein Brandereignis. Die folgende Aufzählung beschreibt isoliert zwei Varianten zur Risikominderung, welche für den Anwendungsfall herangezogen werden. Reale Gebäude weisen einen weitaus komplexeren Fehlerbaum mit diversen weiteren Elementen auf. (Ruijters, 2015).

Im weiteren werden die einzelnen Elemente der FTA vorgestellt:

TOP-Event: Diese Element beschreibt den höchsten Punkt innerhalb eines FTA und das Ziel der Analyse. Unterhalb des Top-Events wird das TOP-Event durch GATE's mit anderen Primärevents verbunden.

ODER-Gate: Das Gate verbindet mehrere darunter liegende Elemente. Das übergeordnete Element tritt ein, wenn mindestens eines der untergeordneten Ereignisse eingetreten ist.

UND-Gate: Das übergeordnete Ereignis tritt ein, wenn alle untergeordneten Ereignisse eingetreten sind.

Primärevent: Ein Primärevent beschreibt die Ausfallwahrscheinlichkeit p innerhalb einer FTA als tiefstes Element innerhalb der Fehlerbaumanalyse. Dabei wird das Event E des jeweiligen Primärevents definiert mit:

$$p(E) \in [0; 1] \quad (1)$$

Die mathematische Gesetzmäßigkeit eines FTA beruht im Wesentlichen auf der Booleschen Algebra, welche ein Teilgebiet der linearen Algebra von Hassler Whitney darstellt (Whitney, 1935). Hierbei wird auf Basis der Interpretation von komplexen Systemen eine Logikform eingeführt, welche durch Operatoren unterschiedliche Variablen verknüpfen. Diese sind:

- Operator für UND-Gate mit \wedge
- Operator für ODER-Gate mit \vee

Somit gibt es feste Kombinationen aus den Operatoren und den Variablen mit jeweils einer dichotomen Ausprägung. Mögliche Kombination sind aus Abbildung 1 zu entnehmen. (Genocchi, 1899):

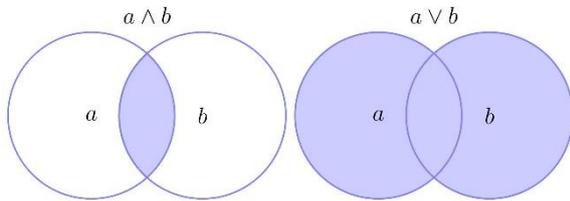


Abbildung 1: Venn-Diagramm mit den möglichen Operatoren der Booleschen Algebra innerhalb eines FTA

Hieraus ergeben sich nach den allgemein gültigen Regeln für die ODER und UND-Gates folgendes Berechnungsarten für die Eintrittswahrscheinlichkeit des jeweiligen übergeordneten Elements in Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit eines ODER-Gates p_{oder} und eines p_{und} für ein ODER-Gate mit unabhängigen Ereignissen nach (Bronstein, 2015):

$$p_{und} = p(E_1 \cap E_2) = p(E_1) * p(E_2) \quad (2)$$

$$p_{oder} = p(E_1) \cup p(E_2) = p(E_1) + p(E_2) - p(E_1) * p(E_2) \quad (3)$$

Mittels dieser Operatoren werden die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Primärevents logisch verknüpft um die Wahrscheinlichkeit des Top Events zu berechnen.

Risiko im Brandschutz

Grundlegend wird Risiko als das Produkt der Eintrittshäufigkeit und des Schadensausmaßes (Gefahr) definiert. (Wälder & Wälder, 2017) Könnte einer dieser beiden Multiplikatoren zu 0 gesetzt werden, wäre kein Risiko vorhanden. Da dies im Bauwesen, konkret im Brandschutz nicht möglich ist, weil mit einer Gefahr jederzeit zu rechnen ist, vgl Urteil OVG Münster (OVG Münster - 10 A 363/86," 1987) muss die Verhältnismäßigkeit zwischen

eingesetzten Mitteln zur Risikominimierung und dem Niveau der Risikoakzeptanz bewertet werden. (Bundesarbeitsgericht Urteil: 9 AZR 1117/06). Diese Verhältnismäßigkeit entwickelt sich auf Grundlage der subjektiv-qualitativen Risikowahrnehmung einer Gesellschaft. Brandereignisse unterliegen dabei einer starken subjektiven Wahrnehmung, da das Erleben der Gefahr unmittelbar, direkt und meist mit großer medialen Berichterstattung einhergeht. (Whyte & Burton, 1982). Diese Vielzahl subjektiver Wahrnehmungsgrößen führt dazu, dass die gesellschaftliche Risikoakzeptanz sehr gering, bzw. ein erheblicher Mitteleinsatz zur Risikominimierung von der Gesellschaft toleriert wird. (Smith, 2013) Dieses akzeptierte Risiko wird als Grenzkrisiko bezeichnet (Herzog, 2024) oder international als ALARP-Prinzip (As Low as reasonably practicable) beschrieben. (Hurst et al., 2019). Die Definition des ausreichenden Mitteleinsatz erfolgt dabei im Brandschutz in Deutschland durch die Bau- und Sonderbauvorschriften sowie die technischen Baubestimmungen der Länder. (MBO, 2023). Dieses Restrisiko wird z.B. in der Musterbauordnung (MBO) in §14 durch die Formulierung „Rettung muss **möglich** sein“ beschrieben. Die „Möglichkeit“ beinhaltet dabei das Restrisiko. Deutlich wird dies beim Vergleich zur Formulierung der Standsicherheit; „Gebäude müssen Standsicher sein“. Ein potientielles Versagen des Tragwerks ist damit nicht akzeptiert, während im Brandschutz ein Versagen (Toter im Brandfall) akzeptiert ist (Maiworm et. al., 2023).

Baurechtlicher Rahmen der Anwendung

Das Grundscenario (ohne erweiterte Maßnahmen) beschreibt das bauordnungsrechtliche Sicherheitsniveau in Deutschland. Zusätzlich zu den Basisanforderungen der Bauordnung können bei geregelten Sonderbauten Erleichterungen sowie höhere Anforderungen durch Sonderbauvorschriften erlassen werden (MIndBauRI, 2019). Abgestimmt auf die Abmessungen und Größe der Nutzungseinheiten

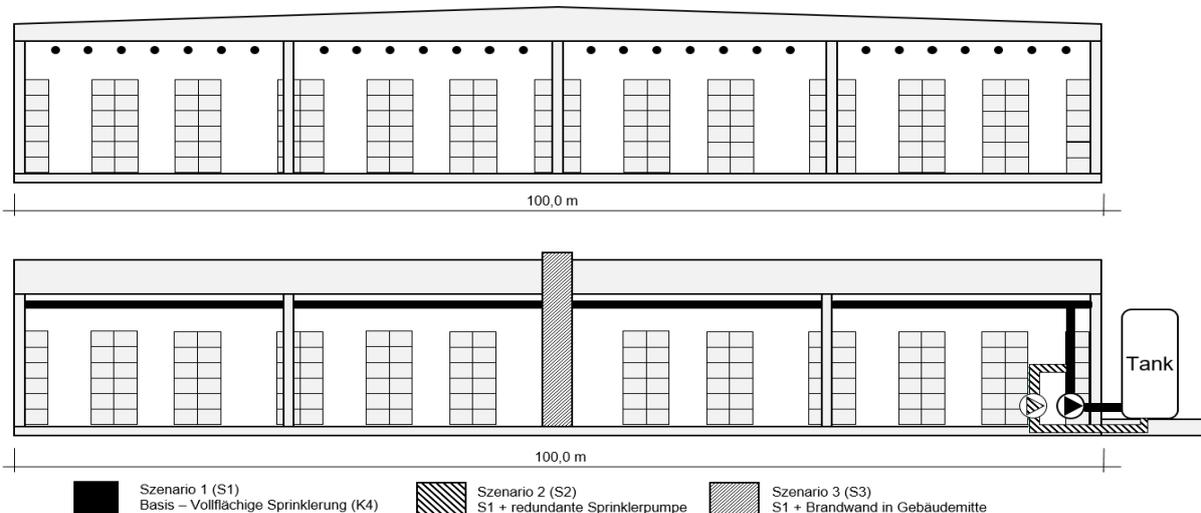


Abbildung 2: Visualisierung der Szenarien (SZ); Szenario 1 Gebäude 100 m x 100 m, mit Sprinklersystem, Szenario 2 wie SZ 1 mit zusätzlicher Sprinklerpumpe, SZ 3 wie SZ 1 mit zusätzlicher Brandwand in Gebäudemitte.

verschärfen sich die brandschutztechnischen Anforderung mit zunehmender Gebäudeklasse oder wie in diesem Beispiel einer Indsturiehalle die Anforderungen an das Tragwerk oder die maximale Brandabschnittfläche zwischen den Brandwänden nach Musterindustriebaurichlinie (MIndBauRI). Neben der Nachweisführung anhand der Bauordnung können für komplexe unregelmäßige Gebäude schutzzielorientierte Ingenieurmethoden des Brandschutzes (DIN 18009) angewendet werden, um damit das Sicherheitsniveau zu erreichen. Mit beiden Methoden (deskriptiven Anforderung / Ingenieurmethoden) ist das Bauordnungsrecht formal erfüllt und das Gebäude brandschutztechnisch baurechtskonform geplant. Darüberhinaus können Versicherungen erhöhte Anforderungen an den Gebäude-, Anlagen- und Sachwertschutz stellen, der ebenfalls durch die Planung im vorbeugenden Brandschutz umgesetzt werden kann.

Anwendungsbeispiel: Definition der Gebäude und Anlagenparameter

Die Modellierung der Risikominimierung erfolgt anhand eines erdgeschossigen Industriebaus, bewertet nach MBO sowie der MIndBauRI, Abschnitt 6. Die Abmessungen des Gebäudes sind 100 m Länge auf 100 m Breite, bei einer Höhe von 7 m. Siehe Abbildung 2. Das Tragwerk ist aus nichtbrennbaren Baustoffen ohne Feuerwiderstand ausgeführt. Zudem wird das Gebäude durch eine flächendeckende Sprinkleranlage geschützt. Dies führt zur Einstufung in Sicherheitskategorie K4 und einer maximal zulässigen Brandabschnittsgröße von 10.000 m². (MIndBauRI, 2019). Das Gebäude dient als vollautomatisiertes Industrielager, das bedeutet, es befinden sich keine Personen dauerhaft im Gebäude. Folgende drei Szenarien werden analysiert:

- Szenario 1: ohne erweiterte Maßnahmen in den Brandschutz. Diese Parameter stellen das Basisszenario der folgenden Risikokalkulation dar (s_{ohne}). Der entsprechende Fehlerbaum ist in Abbildung 3 dargestellt.

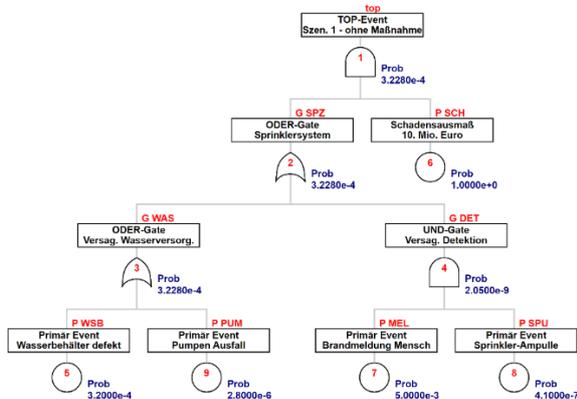


Abbildung 3: FTA des Grundscenario 1, ohne zusätzlicher redundante Sprinklerpumpe und ohne Brandwand in Gebäudemitte

- Szenario 2: die Sprinkleranlage verfügt über eine zweite redundante Sprinklerpumpe, die bei Ausfall der ersten Pumpe das System mit Löschwasser versorgt. Die Kosten für den Einbau dieser redundanten Pumpe sind zu 10.000 € angenommen (s_{SPZ}). Da in diesem Szenario keine Brandwand vorhanden ist, ist die Wahrscheinlichkeit, dass es im Brandfall zu einem Gesamtverlust der gesamten Halle kommt bei $p = 1$. (siehe Abbildung 4 FTA SPZ bei $p = 1$.)

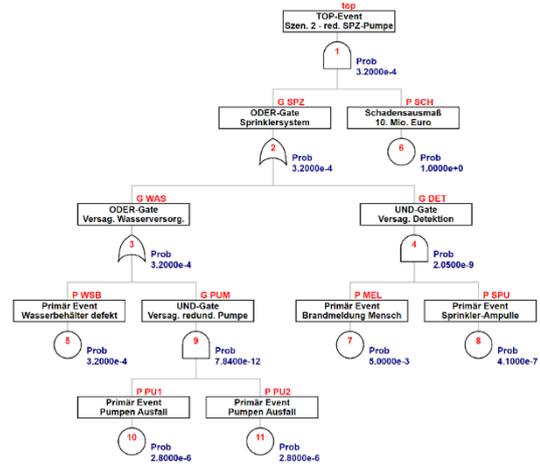


Abbildung 4: FTA Szenario 2: Grundscenario 1 mit zusätzlicher redundanten Sprinklerpumpe, ohne Brandwand

- Szenario 3: die Halle wird in der Hälfte der Längsausdehnung durch eine qualifizierte Brandwand getrennt. Die Brandwand wird als Stahlbetonwand in Betonklasse C25/30 ausgeführt. Für die Quantifizierung, wird ein Preis von 350 €/m² angenommen. Daraus resultiert, bei 100 m Länge und 7 m Höhe, ein Gesamterrichtungspreis der Brandwand von 245.000€. Diese unterbindet einen Brandüberschlag in die nicht vom Brand betroffene Gebäudehälfte (s_{BW}). Der Fehlerbaum ist Abbildung 5 zu entnehmen.

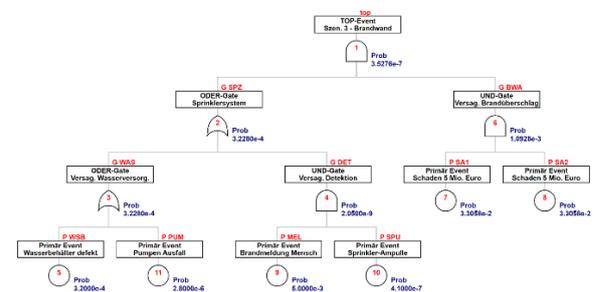


Abbildung 5: FTA Szenario 3: Grundscenario 1 mit zusätzlicher Brandwand in Gebäudemitte, ohne redundante Sprinklerpumpe.

Türen, Öffnungen und Schotts, sowie der Flächenbedarf zur Errichtung der Brandwand oder der Sprinklerpumpe werden bei der Analyse vernachlässigt.

Methode: Drei Varianten der FTA

Die Fehlerbäume wurde in der open-source Data-Science Programmiersprache R analysiert. Hierbei wurde das Package "FaultTree" in der Version 1.0.1 verwendet, um Fehlerbäume zu erstellen und zu berechnen (R Studio, 2024). Um das Veränderungspotential der jeweiligen geplante Maßnahme zu quantifizieren, muss zuerst die Versagenswahrscheinlichkeit p des Gesamtsystems ohne der Verbesserungsmaßnahme (p_{ohne}) errechnet werden. Dabei werden in der FTA die Versagenswahrscheinlichkeiten der einzelnen Systemelemente berücksichtigt. Die Versagenswahrscheinlichkeiten ergeben sich für die gewählten Szenarien zu:

- Branddetektionswahrscheinlichkeit für die Halle bei einer Anwesenheit von 1/3 der Zeit mit $p_{MEL} = 5^{-3}$ (Berry, 1979)
- Wahrscheinlichkeit eines defekten Wasserbehälters mit $p_{WSB} = 9,9^{-8}$ (GRS, 2001)
- Wahrscheinlichkeit einer nicht funktionsfähigen Sprinklerampulle mit $p_{SPU} = 4,1^{-7}$ (Burkhard, 2016)
- Pumpenausfall der Sprinklerpumpe mit $p_{PUM} = 2,8^{-6}$ (GRS, 2001)
- Wahrscheinlichkeit eines Brandüberschlag über die Brandwand hinweg mit $p_{BWU} = 3,3^{-2}$ (AGBF, 2023).

Eine ausführliche Auflistung weiterer Versagenswahrscheinlichkeiten sind in Hammann (2021) zu finden. Im betrachteten Szenario 1 sind dies z.B. (defekt Sprinklerampulle/ Wasserbehälter oder Sprinklerpumpe sowie Versagen Brandmeldung, siehe Fehlerbaum in Abbildung 3. Im Anschluss wird die FTA angepasst, sodass die alternativen Lösungsansätze simuliert werden. In diesem Beispiel wird die Versagenswahrscheinlichkeit des Szenarios 2 mit der redundanten Sprinklerpumpe p_{SPZ} und des Szenarios 3 mit der Brandwand p_{BW} beschrieben.

Somit ergeben sich die drei unterschiedliche Versagenswahrscheinlichkeiten p_{ohne} , p_{SPZ} und p_{BW} .

Da sich das Risiko R aus dem Produkt der Eintrittswahrscheinlichkeit p des Events E und dem zu erwartenden Schadensausmaß S des Events E definiert, gilt:

$$R=p(E)*S(E) \quad (4)$$

$$R_{ohne}=p_{ohne}*S_{ohne} \quad (5)$$

$$R_{SPZ} = p_{SPZ} * S_{SPZ} \quad (6)$$

$$R_{BW} = p_{BW} * S_{BW} \quad (7)$$

Um das beste Verhältnis zwischen dem Zuwachs an Sicherheit und dem entsprechenden Mitteleinsatz zu bemessen, muss die Differenz Δ des Risikowertes R zwischen dem Risiko ohne der Maßnahme R_{ohne} und dem Risiko mit der ergriffenen Maßnahme für die Brandwand R_{BW} und die Maßnahme redundante Sprinklerpumpe R_{SPZ} ermittelt werden mit:

$$R\Delta_{BW} = R_{ohne} - R_{BW} \quad (8)$$

$$R\Delta_{SPZ} = p_{ohne} - R_{SPZ} \quad (9)$$

Nun müssen die Δ -Risiko-Werte, also $R\Delta_{BW}$ und $R\Delta_{SPZ}$ in das Verhältnis zu den entsprechenden Kosten der Maßnahmen gesetzt werden. Dies wird durch die Verhältniszahl (vz) beschrieben.

Nun kann die Frage: "Wie viel Δ erhält man für wie viel €?" beantwortet werden. Im Beschriebenen Beispiel gilt dann:

$$vz_{BW} = \frac{R\Delta_{BW}}{\epsilon_{BW}} \quad (10)$$

$$vz_{SPZ} = \frac{R\Delta_{SPZ}}{\epsilon_{SPZ}} \quad (11)$$

Durch die Bemessung der vz wird dann die Frage nach dem Best-Performance-Ratio Entscheidung beantwortet.

Ergebnisse

Durch die drei verschiedenen Varianten der FTA (siehe Abbildung 3, Abbildung 4 und Abbildung 5) ergeben sich nun die drei Versagenswahrscheinlichkeiten der FTA mit:

$$p_{FTA} = \begin{cases} p_{ohne} & = 3,2280^{-4} \\ p_{SPZ} & = 3,2000^{-4} \\ p_{BW} & = 3,5276^{-7} \end{cases} \quad (12)$$

Nun folgt die Berechnung des Risikowertes der drei Varianten mit:

$$R_{ohne} = p_{ohne} * S_{ohne} = 3,2280^{-4} * 10^6 \text{€} = 3228 \quad (13)$$

$$R_{SPZ} = p_{SPZ} * S_{SPZ} = 3,2000^{-4} * 10^6 \text{€} = 3200 \quad (14)$$

$$R_{BW} = p_{BW} * S_{BW} = 3,5276^{-7} * 10^6 \text{€} = 3,53276 \quad (15)$$

Hieraus ergeben sich dann die Risikoreduzierungsweite (Δ -Werte) mit:

$$R\Delta_{BW} = R_{ohne} - R_{BW} = 3228 - 3,53276 = 3224,46724 \quad (16)$$

$$R\Delta_{SPZ} = p_{ohne} - R_{SPZ} = 3228 - 3200 = 28 \quad (17)$$

Die Verhältniszahl vz ergibt sich damit aus:

$$vz_{BW} = \frac{R\Delta_{BW}}{\epsilon_{BW}} = \frac{3224,46724}{245 \text{ €}} = 13,161 \quad (18)$$

$$vz_{SPZ} = \frac{R\Delta_{SPZ}}{\epsilon_{SPZ}} = \frac{28}{10 \text{ €}} = 2,8 \quad (19)$$

Für eine bessere Vergleichbarkeit der eingesetzten Mittel für die SPZ-Variate mit 10.000 € und jene mit der der Brandwand mit 245.000 € wurden beiden Werte des Mitteleinsatzes mit 1.000 difiviert.

Nun folgt die Bemessung der Verhältniszahlen vz_{BW} und vz_{SPZ} mit:

$$vz_{BW} = 13,161 > 2,8 = vz_{SPZ} \quad (20)$$

Hieraus ergibt sich eine positive Entscheidung für die Verhältniszah der Variante „Brandwand“.

Diskussion

Es konnte gezeigt werden, dass im angeführten Beispiel der Einbau einer Brandwand mit deutlich höheren Errichtungskosten (245 T €) gegenüber der redundanten Sprinklerpumpe (10 T €) das Risiko effektiver positiv beeinflusst. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die FTA eine Möglichkeit ist, die Einflussfaktoren auf das Risikosenkungspotential zu identifizieren. Dabei sind die quantifizierten Risiken nur im Verhältnis zueinander zu bewerten und nicht als realer Wert quantifizierbar. Diese weitereführende Berechnung bedarf weiterer Forschung. Im Übrigen zeigt sich, dass die Ergebnisse in großem Maße von den Eingangsparametern der Versagenswahrscheinlichkeiten abhängen. Diese Eintrittswahrscheinlichkeiten können ausschließlich über die Analyse stattgefundenere Schadesereignisse quantifiziert werden. Kritisch muss zudem die Datenqualität der Eingangsparameter diskutiert werden. So sind Kennzahlen zu Versagenswahrscheinlichkeiten aus Kernkraftwerken (GRS, 2011 & Brukhard, 2016) nicht mit den Versagenswahrscheinlichkeiten aus realen Bränden einer urbanen Umgebung (AGBF, 2023) zu kombinieren, da Prüfintervalle und die Genauigkeit beim Einbau und Betrieb sehr unterschiedlichen Sicherheitsstandard unterliegen. Hinzu kommen unterschiedliche Datenqualitäten (Hammann, 2021), welche einen Vergleich erschweren. Für den beschriebene Fall einer Best-Performance-Ratio Entscheidung ist die Anwendung jedoch möglich, da es sich bei der Bemessung (siehe Formel 20) letztendlich um eine Verhältnis handelt. Werden

ausschließlich Versagenswahrscheinlichkeiten einer hohen Güte verwendet, ändert sich das Verhältnis nicht. Hier ist weitere Forschung erforderlich. Im gleichen Verhältnis wie die Erhöhung von Sicherheiten über die FTA quantifizierbar sind, könnte in weiterer Forschung auch die Reduzierung von Anforderung und die damit einhergehende Risikozunahme prognostiziert werden. Dies ist vor allem in Bezug auf die Identifizierung von Baukostensenkungspotentiale für die Bau- und Immobilienwirtschaft von entscheidender Bedeutung. Die Auswirkungen von Änderungen in der brandschutztechnischen Gesetzgebung wirken sich u.a. aufgrund des Bestandschutzes nur sehr langsam auf die Schadensfallzahlen aus und können bis dato nur sehr schwierig, oder gar nicht prognostiziert werden. Die Anwendung der FTA hat das Potenzial dies zu ermöglichen.

Allgemein kann festgestellt werden, dass die FTA in Kombination mit den entsprechenden Versagenswahrscheinlichkeiten und dem entsprechenden Mitteleinsatz als Methodik funktioniert. Eine Aussage über eine nachvollziehbare Entscheidung zwischen mehreren Maßnahmen zugunsten des besten Preis-Leistungsverhältnisses (Mitteleinsatz und Zuwachs an Sicherheit) kann somit getroffen werden.

Literatur

- (AGBF, 2023) Arbeitsgemeinschaft Leiter der Berufsfeuerwehren Deutschland. B-Einsatzstellenbewertung AGBF Bund. Aktuelle Ergebnisse der VB-Einsatzstellenbewertung. Stand August 2023. <https://www.agbf.de/downloads-fachausschuss-vorbeugender-brand-und-gefahrenschutz>
- (Berry, 1979) Dennis Berry and Earl Minor. Nuclear power plant fire protection - fire hazards analysis (subsystem study task 4). U. S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-0654(SAND79-0324):56-60, 1979.
- (Bronstein, 2015) I.N. Bronstein, K.A. Semendiyayev, Gerhard Musiol, Heiner Mühlig; Handbook of Mathematics; Springer Berlin, Heidelberg (2015).
- (Burkhard, 2016) Burkhard Forell and Svante Einarsson. Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen sicherheit und zum strahlenschutz - ergänzung und aktualisierung von zuverlässigkeits- kenngrößen für brandschutzeinrichtungen in deutschen leichtwasserreaktoren – vorhaben 3610r01370. Technical report, Bundesamt für Strahlenschutz, 2016.
- (Bundesarbeitsgericht, 2008) Urteil: 9 AZR 1117/06

- (Bundesbauministerium, 2015) Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat; Bericht der Baukostensenkungskommission im Rahmen des Bündnisses für bezahlbares Wohnen und Bauen - Endbericht; November 2015.
- (Bundesministerium, 2019) Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat; Maßnahmenpaket Baukostensenkung Umsetzungsstand der Empfehlungen der Baukostensenkungskommission und Ausblick; Juli 2019.
- (DIN 18009) DIN-Reihe 18009 Brandschutzingenieurwesen. Beuth Verlag (2016).
- (Eder, 2015) Fehlerbaumanalyse in Theorie und Praxis. Frank Edler, Michael Soden, René Hankammer. Springer Verlag Berlin Heidelberg (2015).
- (Genocchi, 1899) Angelo Genocchi; Differentialrechnung und Grundzüge der Integralrechnung, B. G. Teubner, Leipzig (1899).
- (GRS, 2001) Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit. Ermittlung kernkraftwerksspezifischer zuverlässigkeits- kenngrößen für brandschutzeinrichtungen in einem ältern kraftwerk und in der konvoianlage. Technical report, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2001.
- (Hammann, 2021) Claudius Hammann. Analysis of safety systems: Methodology and data for risk quantification in organizational, technical and structural systems with focus on fire protection. Dissertation. Technische Universität München – Lehrstuhl für Nukleartechnik (2021).
- (Herzog, 2024) Daniel Herzog. Entwicklung einer Methode zur Analyse und Vergleichbarkeit der individuellen Nutzergefährdung durch lokale gesundheitsschädliche Einflüsse aus Umweltexpositionen. Dissertation. Technische Universität München – Lehrstuhl für Bauphysik (in Prüfung vsl. 06/2024).
- (Hurst, J., McIntyre, J., Tamauchi, Y., Kinuhata, H., & Kodama, T. 2019). A summary of the ALARP principle and associated thinking. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 56(2), 241-253. doi:10.1080/00223131.2018.1551814
- (Maiworm et. al., 2023) Björn Maiworm, Claudius Hammann, Michael Schleich. Prescriptive Building Regulations, Safety Objectives, and Residual Risk in Germany. *Fire Technology*, 59(6). (2023).
- (MBO, 2022) Bauministerkonferenz. Musterbauordnung Fassung November 2002 zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom 22./ 23.09.2022. In. Berlin: ARGE Bau.
- (MIndBauRI, 2019) Bauministerkonferenz, Musterindustriebaurichtlinie Fassung 2019
- (Normenkontrollrat, 2021) Normenkontrollrat Baden-Württemberg; Entlastung von Bürokratie und Baukosten durch Optimierung des Brandschutzes; Stuttgart, 2021.
- (OVG-Münster, 1987) Urteil 10 A 363/86
- (R Studio, 2024) Software R in der Version 2023.12.0+369, <https://posit.co/download/rstudio-desktop/> zuletzt geprüft am 6.1.2024.
- (Ruijters, 2015) Enno Ruijters, Mari elle Stoelinga; Fault tree analysis: A survey of the state-of-the-art in modeling, analysis and tools; *Computer Science Review*; Volumes 15–16, 2015, Pages 29-62.
- (Smith, K. 2013). *Environmental Hazards - Assessing Risk and Reducing Disaster* (Vol. 6). Abingdon, Oxon: Routledge.
- (Wälder, K., & Wälder, O. 2017). Der Risikobegriff. In K. Wälder & O. Wälder (Eds.), *Methoden zur Risikomodellierung und des Risikomanagements* (pp. 1-3). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- (Whitney, 1935) Hassler Whitney; On the abstract properties of linear dependence, *American Journal of Mathematics*, 57(3):509, jul (1935).
- (Whyte, A., & Burton, I. 1982). *Living with risk : environmental risk management in Canada*. Toronto: University of Toronto.



BRANDVERHALTEN BRENNBARER DÄMMSTOFFE MIT ZUMISCHUNG NATÜRLICHER FLAMMSCHUTZMITTEL – ERSTE ERGEBNISANALYSE

Sabine Scheidel, Tobias Götz², Sebastian Dienst³, Oliver Kornadt⁴

¹ Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau, Deutschland,

E-Mail: sabine.scheidel@rptu.de

² Pirmin Jung Deutschland GmbH, 53424 Remagen, Tobias.Goetz@pirminjung.de

³ Pirmin Jung Deutschland GmbH, 53424 Remagen, Sebastian.Dienst@pirminjung.de

⁴ Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau, Deutschland,

E-Mail: oliver.kornadt@rptu.de

Kurzfassung

Um die Nutzung ökologischer Dämmstoffe, die meist brennbar sind, für Baukonstruktionen zu erleichtern, wurden Entwicklungen durchgeführt, wie diese durch den Zusatz von natürlichen Flammenschutzmitteln in ihrem Brandverhalten verbessert werden können. Dabei wurden gängige Dämmstoffe, überwiegend aus nachwachsenden Rohstoffen mit Stoffen kombiniert, die neben dessen natürlichen Vorkommens auch Ansprüche an die Nachhaltigkeit und ökologische Aspekte erfüllen. Der Beitrag gibt einen Überblick über die Ergebnisse von Vorversuchen, bei dem es darum ging, eine erste Auswahl an Kombinationen von Dämmstoff und Flammenschutzmittel zu überprüfen und zu bewerten.

Abstract

In order to promote the use of combustibile insulation materials, it was investigated how their fire behaviour can be improved through the use of natural flame retardants. Common insulation materials, predominantly consisting of renewable raw materials, were combined with materials that, in addition to their natural origin, also meet sustainability and ecological requirements. The article provides an initial overview of the results of the first series of tests, in which an initial selection of combinations of insulation material and flame retardants was tested and evaluated.

Einleitung

Der Förster Hans Carl von Carlowitz (1645-1714) formulierte 1713 den Begriff der Nachhaltigkeit in Bezug auf die Forstwirtschaft: Es dürfe nur so viel Holz geschlagen werden, wie durch planmäßiges Aufforsten wieder nachwachsen kann (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft [BMEL], 2023). Längst wird der Begriff jedoch nicht nur im Bereich der Forstwirtschaft verwendet. Vielmehr findet sich das Thema „Nachhaltigkeit“ in allen Bereichen wieder. Dabei geht es laut Definition darum, nicht mehr zu verbrauchen, als bereitgestellt werden kann

(Deutscher Bundestag, NaN). Für den Bausektor bedeutet dies ein Umdenken in der Wahl der Bauweisen und Baustoffe. Hierzu zählen neben den Konstruktionsbaustoffen, wie Holz, Mauerwerk, Beton oder Stahl, auch Dämmstoffe. Dies erfordert zusätzlich zu den „klassischen“ Dämmstoffen wie Steinwolle oder Glaswolle, die Einbindung von natürlichen Dämmstoffen, welche bislang aus Brandschutzgründen für den Einsatz in Gebäuden der Gebäudeklasse 4 und höher, vor allem bei Holzbauten, nicht zulässig sind (Scheidel, et al., 2022a, MBO, 2022/November 2002; MVVTB, 2023; MHolzBauR, 2021). Begründet wird dies durch deren brennbare Eigenschaft und somit mit einem selbstständigen weiterbrennen bei einer Entzündung. Aus diesen Gründen wird für den Holzbau in Gebäuden ab der Gebäudeklasse 4 Steinwolle als formstabile nichtbrennbare Dämmung vorgeschrieben (MholzBauR, 2021). In den heutigen Zeiten, in denen die Klimakrise, Energiekrise und Rohstoffverknappung immer deutlicher und präsenter werden, ist die Baubranche auf Alternativen angewiesen. Diese müssen unausweichlich auch im Bereich der nachwachsenden Rohstoffe gesucht werden. Daher befasst sich das Fachgebiet Baulicher Brandschutz der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität (RPTU) Kaiserslautern im Forschungsprojekt zur brandsicheren Aufstockung bestehender Gebäude durch Holzbaugeschosse auch mit der Frage, wie Dämmstoffe aus natürlichen Rohstoffen optimiert werden können, um sowohl die ökologischen und nachhaltigen Aspekte als auch die des Brandschutzes abdecken zu können.

Ziele der Versuchsreihe

Ein entscheidender Faktor von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen ist die Brennbarkeit. Anders als Steinwolle oder Glaswolle, die sich bei einem Brand nicht an dessen Geschehen beteiligen, brennen Dämmstoffe aus natürlichen Rohstoffen selbstständig mit und verlieren dadurch nicht nur deren dämmende und ggf. schützende Wirkung, sondern setzen zusätzliche Energie in Form von

Wärme mit frei. Diese Eigenschaft wird auch bei der Berechnung nach additiven Methoden zur Bemessung von Bauteilen berücksichtigt (Scheidel et al, 2022b, Scheidel et al., 2023) Bei den Versuchen zur Verbesserung brennbarer Dämmstoffe werden diese daher mit Flammschutzmitteln natürlichen Ursprungs versehen. Dabei werden nicht nur deren Wirkung zur verzögerten Entflammbarkeit des Dämmstoffs betrachtet, sondern auch die Möglichkeit, diese zu mischen, wie sich der Dämmstoff nach dem Mischen verändert und ob die Materialien in Deutschland oder angrenzenden Ländern hergestellt werden. Es soll eine Kombination gefunden werden, die das Potenzial aufweist, als ökologischer, nachhaltiger und langlebiger Dämmstoff weiterentwickelt zu werden.

Versuche zu Flammschutzmittel und Dämmstoffen

Die Versuche zur Verbesserung brennbarer Dämmstoffe und natürlicher Flammschutzmittel wurden in mehreren Versuchsreihen durchgeführt. Dabei gliedern sich diese so, dass die Ergebnisse direkt in die nächste Versuchsreihe einfließen können. Untersucht wurden bis zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Beitrags die Dämmstoffe:

- Holzfaserdämmplatten
- Holzfaser-Einblasdämmung
- Zellulosedämmung (mit Flammschutzmittel)
- Zellulosedämmung (ohne Flammschutzmittel)
- Schafswolle
- Reet-Dämmplatten
- Flachsdämmplatten mit pflanzlicher Stützfaser
- Flachsdämmplatten ohne Stützfaser
- Blähton
- Blähton mit Stampflehm

Dabei ist der Blähton als natürlicher Dämmstoff, nicht aber in die Kategorie nachwachsender Dämmstoff einzuteilen. Dieser soll jedoch aufgrund seiner nichtbrennbaren Eigenschaft in die Untersuchungen mit eingebunden werden.

Als Flammschutzmittel werden die folgenden Stoffe in die Untersuchungen eingebunden:

- Lehmpulver
- Milchpulver
- Laktosepulver
- Kartoffelstärke
- Maisstärke
- Leichtsoda
- Schwertsoda
- Blähgrafit (ES 700 F5 PH, ES 299 B8 DS, ES 100 C10)

Vorversuchsreihe: Verhalten der Flammschutzmittel bei Temperaturbeanspruchung

Damit für die Planung der Kombinationen von Dämmstoff und Flammschutzmittel eine erste Abschätzung erfolgen konnte, wie sich insbesondere die gewählten Flammschutzmittel bei einer Temperaturbeanspruchung verhalten, wurden diese in einem Abzug (Digestorium) untersucht. Hierzu wurde das Flammschutzmittel auf eine Messingplatte gegeben und mit einem Gasbrenner indirekt beaufschlagt, siehe Abbildung 1.



Abbildung 1: Versuchsaufbau Flammschutzmittel

Für die anschließende Beurteilung wurden der Temperaturverlauf im untersuchten Stoff und deren optische Reaktion auf die Temperatureinwirkung beobachtet. Die verwendete Messeinrichtung konnte eine Temperatur bis 400 °C aufzeichnen, welche für diese Versuche als ausreichend zu betrachten sind. Die Versuche sollen vor allem die Reaktionen bei Temperaturen zu Brandbeginn zeigen. Bei Kartoffelstärke konnte hier eine Selbstentzündung bei ca. 220 °C festgestellt werden, siehe Abbildung 2. Die weiteren Stoffe entzündeten sich bis zu einer Temperatur von 400 °C nicht, zeigten aber teilweise deutliche Reaktionsanzeichen.



Abbildung 2: Entzündete Kartoffelstärke

Die Reaktionen der Stoffe durch die Temperaturbeaufschlagung spiegelten sich in Form von Verfärbungen, und Karamellisierung wieder. Blähgrafit intumesziert wie erwartet und vergrößert sich dabei erheblich in dessen Ausdehnung, siehe Abbildung 3.

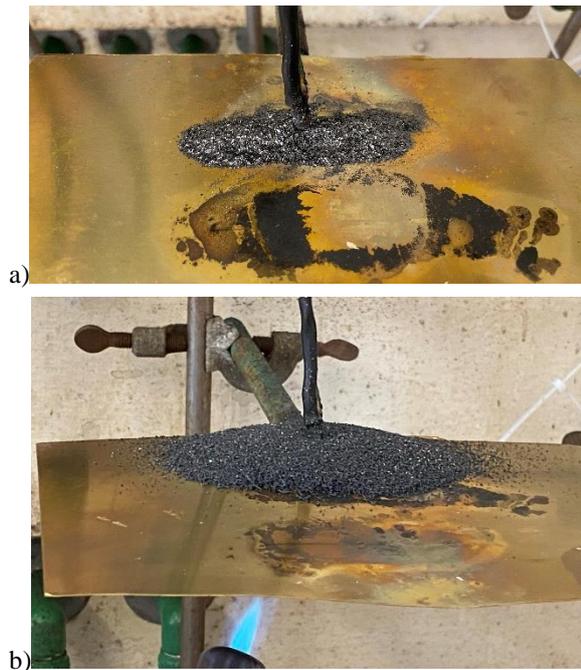


Abbildung 3: Intumeszierter Blähgrafit ES 200B8 DS
a) kalt, b) Temperaturbeaufschlagt

Dabei kann ein deutlicher Unterschied in der Ausdehnung zwischen den drei Arten des Blähgrafits bei den Untersuchungen festgestellt werden. Den endgültigen Expansionsgrad erhält das Material bei einer Temperatur von 1.000 °C, was bei diesen Versuchen nicht erreicht wird. Dabei soll sich nach Herstellerangaben das Blähgrafit ES700 F5 pH am stärksten ausdehnen.

Anhand dieser ersten Untersuchungen, wurde die Kartoffelstärke bereits als möglicher Flammschutz aufgrund seiner frühzeitigen Selbstentzündung ausgeschlossen.

Versuchsreihe: Kombinationen von Flammschutzmittel und Dämmstoffen

Bei der Untersuchung möglicher Kombinationen von Flammschutzmittel und Dämmstoffen wurden drei unterschiedliche Gruppen definiert. Die erste Gruppe bezieht sich auf die Plattendämmstoffe, welche in einer Suspension bzw. Lösung des Flammschutzmittels getaucht wurden. In der zweiten Gruppe erfolgte die trockene Mischung aus losen Dämmstoffen, wie Zellulose und Holzfasereinblasdämmung mit den pulverförmigen Flammschutzmitteln. Die dritte Gruppe beinhaltet ein Aufbringen der Suspension/Lösung der Flammschutzmittel auf die Dämmstoffe durch besprühen. Hierfür wird in den ersten beiden Gruppen jeweils eine Auswahl getroffen, welche Kombinationen bei den Zwischenversuchen am besten überzeugen konnten.

Unabhängig von dieser Gruppeneinteilung wird der Blähthon sowie der Blähthon mit Stampflehm betrachtet. Da hier eine Brennbarkeit ausgeschlossen werden

kann, besteht das Interesse bei diesem Dämmmaterial darin, eine Formstabilität durch natürliche Zusatzstoffe zu erreichen. Der Stampflehm erreicht diese Formstabilität durch die Zugabe von Wasser. Der reine Blähthon wurde für diese Betrachtung mit einer Maisstärkesuspension gemischt. Für die Verwendung von Blähthon mit Stampflehm wird vom Hersteller eine erdfeuchte Einbringung in das Bauteil vorgeschrieben. Weitere Angaben zum Mischungsverhältnis mit Wasser erfolgt hier nicht (Pilosith GmbH, 2014b). Daher wurde die Mischung mit 62 ml Wasser und 130 ml Wasser auf jeweils ~0,5 kg Blähthon mit Stampflehm (Pilosith GmbH, 2014a, Pilosith GmbH, 2017). Für den reinen Blähthon wurde ~0,3 kg des Dämmmaterials mit 60 ml Maisstärkesuspension in einem Mischungsverhältnis von 1:2 vermischt. Nach dem Trocknen konnte festgestellt werden, dass die Mischung aus Blähthon und Stampflehm mit 130 ml Wasser auch nach dem ausschalen der Probekörper einen besseren Zusammenhalt bietet. Allerdings lösen sich, wie auch bei dem anderen Probekörper viele Blähthonsteine ab.

Die Mischung des Blähthons mit Maisstärke zeigt, dass der Zusatz eines natürlichen Klebemittels einen Zusammenhalt der Steine ermöglicht, siehe Abbildung 4. Um hier allerdings eine zuverlässige Formstabilität zu erhalten, muss die erste Mischung weiter angepasst werden.



Abbildung 4: Blähthon und Maisstärke

Bei der Gruppe der Dämmstoffplatten, welche in das Flammschutzmittel getaucht wurden, ist, wie erwartet, eine Verhärtung der Stoffe festzustellen. Die Dämmung wird steifer und verliert bei einigen Mischungen an Dicke. Besonders deutlich ist dies am Beispiel Schafswolle in Abbildung 5 zu sehen.



Abbildung 5: Vergleich Schafswolle pur und mit Maisstärke

Um dieses Problem zu minimieren soll in der dritten Gruppe der Probekörper zu den unterschiedlichen Kombinationen die Lösung bzw. Suspension auf den Dämmstoff aufgesprüht werden. Für eine spätere Herstellung eines Dämmstoffes mit Flammenschutzmittel wäre eine Aufbringung auf die Fasern vor der Fertigstellung als Plattendämmstoff sinnvoll um die positiven Eigenschaften des Flammshutzes zu nutzen und gleichzeitig die Dämmwirkung des Stoffes nicht zu schwächen.

Die Einwirkung auf die Probestücke erfolgte durch eine Feuerzeugflamme für 15 sek. als direkte Beanspruchung. Nach weiteren 15 sek. erfolgte das Ablöschen der Probekörper. Die Ergebnisse aus der ersten Gruppe zeigen teilweise schon deutlich Verbesserungen der Entflammbarkeit im Vergleich zu den unbehandelten Probestückern. Ein Beispiel hierfür ist unter Abbildung 6 gezeigt. Die betrachtete Flachsdämmung ohne werkseitig eingebrachte Stützfasern verbesserte durch die Zumischung der gewählten Flammshutzmittel deutlich die Entflammbarkeit. Neben Soda schützte vor allem Milchpulver sehr effektiv vor einer Ausbreitung des Brandes. Jedoch erloschen die Flammen nach entfernen der Zündquelle nicht vollständig. Dies konnte bei der Kombination mit Maisstärke betrachtet werden. Hier ist sehr deutlich zu erkennen, das der Dämmstoff nur in den Bereichen brannte, die nicht, oder nur unzureichend mit Maisstärke behandelt wurden. Die Bereiche des Probekörpers, bei denen die Maisstärke deutlich erkennbar ist, entzündeten sich bei der Beanspruchung durch die Flamme nicht. Dies zeigt deutlich, welch große Rolle die vollständige und gleichmäßige Mischung der Dämmstoffe und Flammshutzmittel spielen.

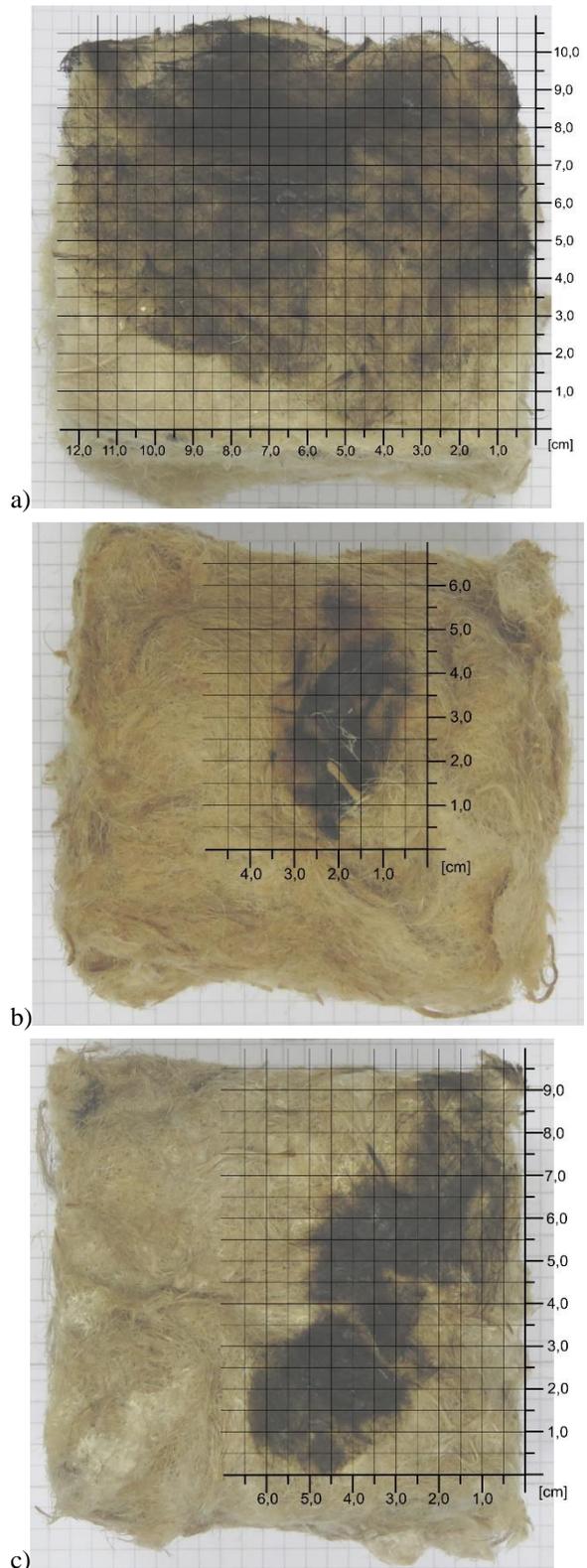


Abbildung 6: Vergleich Flachs ohne Stützfasern
a) pur b) Milchpulver c) Maisstärke

Aus der Gruppe der losen Dämmstoffe konnte mit der Zumischung von Blähgrafit gute Ergebnisse erzielt werden. Diese sind vor allem beim Zellulosedämmstoff ohne bereits werkseitig zugeführtes Flammshutzmittel erkennbar. Neben dem Blähgrafit ES 100 C10 zeigt aber auch

Leichtsoda eine gute Wirkung, wobei hier eine deutlich größere Rauchausbreitung zu erkennen ist. Einen Vergleich zwischen der Probe ohne Zusatzstoffe und mit Blähgrafit oder Leichtsoda nach 14 sek. Befkammung ist in Abbildung 7 zu sehen. Dabei ist die Reaktion des Blähgrafits durch ein leises knistern erkennbar. Die Dämmstoffmischung mit Leichtsoda wies im Vergleich zu der mit Blähgrafit eine stärkere Rauchentwicklung auf.

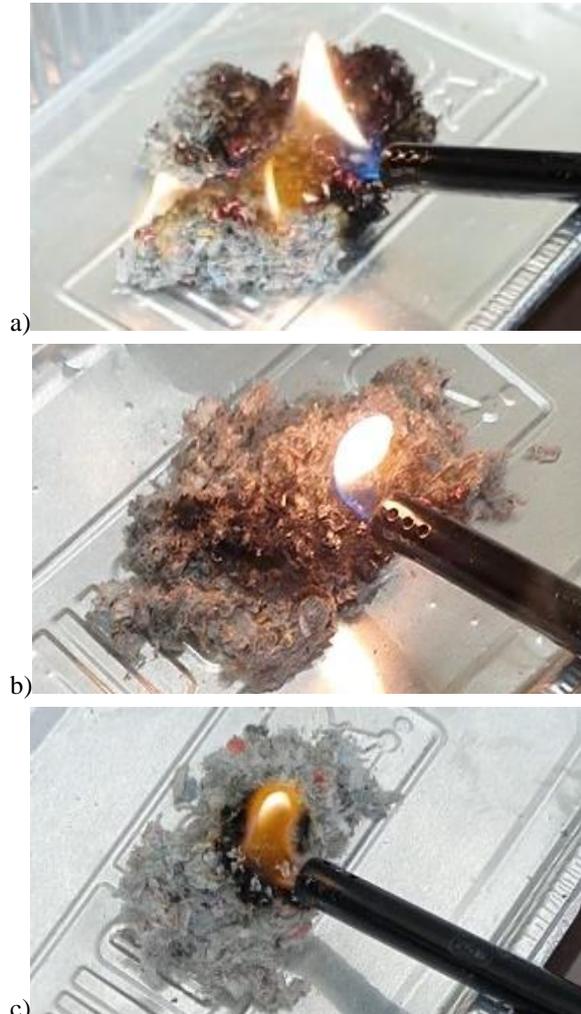


Abbildung 7: Vergleich Zellulose ohne Flammschutz
a) pur b) Blähgrafit ES 100 C10 c) Leichtsoda

Bei den Dämmstoffen *Zellulose mit Flammschutz* und *Holzfasern-Einblasdämmung* konnten diese beiden Zusatzstoffe ebenfalls mit einer guten Wirksamkeit nachgewiesen werden, allerdings ist die Brandausbreitung hier deutlich geringer einzustufen, da die Dämmstoffe werkseitig bereits mit einem Flammschutzmittel versehen wurden.

Weitere Untersuchungen

In der nun ausstehenden Versuchsreihe sollen die Kombinationen mit den am Besten zu bewertenden Ergebnissen betrachtet werden. Die Plattendämmstoffe werden hierzu mit dem Flammschutzmittel besprüht. Für die Gruppe der losen

Dämmstoffe ist vorgesehen, ein besprühen durch einzelne Schichten des aufgeblasenen Dämmstoffs umzusetzen. Dabei muss ein Verkleben der Dämmstoffe vermieden werden. Die Versuche sollen zeigen, welche Unterschiede zwischen den einzelnen Verfahren des Auftrags bestehen.

Als Ergebnis der ersten Versuchsreihe der Dämmstoffkombinationen, insbesondere in Bezug auf deren Herstellung, ist die Mischbarkeit der Stoffe mit in die Beurteilung aufzunehmen. Bei den losen Dämmstoffen wurde festgestellt, dass sich dieses, je grober das zugegebene Flammschutzmittel ist, nur schwer gleichmäßig miteinander mischen lassen. Ebenso muss die Änderungen der Flexibilität der Plattendämmstoffe bei der Auswahl mit betrachtet werden.

Fazit

Es konnte gezeigt werden, dass die Zumischung natürlicher Flammschutzmittel eine Entzündung der Dämmstoffe und eine Brandausbreitung auf diesen wirksam eingegrenzen können. Weitere Untersuchungen sollen nun zeigen, dass diese auch Potenzial für neu entwickelte Dämmstoffkombination aufweisen. Hierfür sind weitere Untersuchungen geplant, um die Möglichkeiten und Wirksamkeiten der Dämmstoffproben mit den natürlichen Flammschutzmitteln weiter bestimmen zu können.

Danksagung

Die Autoren danken dem „Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM)“ für die finanzielle Unterstützung der Forschungsarbeit „Entwicklung einer Methodik zur beschleunigten Nachverdichtung durch brandsichere Aufstockungen von Wohngebäuden in Massivbauweise mittels leichter Holzbaugeschosse“.

Literatur

- Bauministerkonferenz, Juni 2021. Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise (MHolzBauR).
- Bauministerkonferenz, September 2022. Musterbauordnung. MBO.
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Wald in Deutschland - Über 300 Jahre forstliche Nachhaltigkeit. Zugang: <https://www.bmel.de/DE/themen/wald/wald-in-deutschland/carlowitz-jahr.html> [04.12.2023].
- Deutscher Bundestag. Was ist Nachhaltigkeit? Zugang: https://www.bundestag.de/ausschuesse/weitere_gremien/pbne/vorstellung/was-ist-nachhaltigkeit-890694 [04.12.2023].
- Deutsches Institut für Bautechnik, 2023. Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen. MVVtB.

Pilosith GmbH, August 2014. Technisches Merkblatt
Lehmmörtel LMN.

Pilosith GmbH, November 2014. Technisches
Merkblatt Stampflehm-Blähton-Leichtlehm.

Pilosith GmbH, Oktober 2017. Technisches Merkblatt
Unterputz UPS 20.

Scheidel, Sabine; Dienst, Sebastian; Kornadt, Oliver:
Anwendungsmöglichkeiten der neuen „Muster-
Holzbaurichtlinie“ für Holzrahmenbauteile,
Bauphysik 44 (2022) Heft 1

Scheidel, Sabine; Dienst, Sebastian; Götz, Tobias;
Kornadt, Oliver:
Berechnungsverfahren von Holzrahmenbauteilen
mit brandschutztechnischer raumabschließender
Funktion, Bauphysik-Kalender 2022: Holzbau.
Herausgegeben von Nabil A. Fouad, S. 115 –
146

Scheidel, Sabine; Dienst, Sebastian; Götz, Tobias;
Kornadt, Oliver:
Bauteiluntersuchung von Holzrahmenwänden
mit Verwendung brennbarer Dämmstoffe,
Bauphysik 45 (2023): Heft 3

<https://www.conftool.pro/bauphysiktage2024/>

SESSION C · 07.03.2024

Thema: Energieversorgung

Kooperationspartner



Bauhaus-
Universität
Weimar

WBA

WBA | Bauhaus Weiterbildungs-
akademie Weimar e.V.
Institut an der
Bauhaus-Universität Weimar

MODELLIERUNG EINES PROTOTYPES EINES NEUARTIGEN SOLARTHERMIKOLLEKTORS MIT INTEGRIERTEM LATENTWÄRMESPEICHER IN TRNSYS

Jonas Spiegel, Birke Schröter, Svenja Carrigan, Oliver Kornadt

Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau, E-Mail: jonas.spiegel@rptu.de

Kurzfassung

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wird ein Prototyp eines innovativen pfahlförmigen Solarthermiekollektors mit integriertem Speicher erforscht, der es ermöglichen soll, vor allem in der Winter- und Übergangszeit möglichst effizient solare Wärmeenergie zu sammeln und zu speichern. Dabei sollen die solaren Erträge aufgrund der vertikalen Ausrichtung und einer rundherum angebrachten Absorberfläche gerade bei niedrigem Sonnenstand optimiert werden. Der integrierte Latentwärmespeicher dient der verbesserten zeitlichen Bereitstellung der Wärmeenergie.

Um belastbare Voraussagen zur Energieeffizienz verschiedener Varianten des Pfahls bei unterschiedlichen Randbedingungen treffen zu können, wurden thermische Simulationen durchgeführt. Neben der Modellierung des zylinderförmigen Absorbers stellt die korrekte Berechnung des Verhaltens des Latentwärmespeichers eine besondere Herausforderung dar, die in diesem Paper näher beleuchtet wird.

Abstract

As part of a research project, a prototype of an innovative pile-shaped solar thermal collector with integrated storage is being investigated, which should make it possible to collect and store solar thermal energy as efficiently as possible, especially in the winter and transitional periods. Solar thermal yields are to be optimized due to the vertical orientation and an all-round absorber surface, especially when the sun is low. The integrated latent heat storage serves to improve the temporal provision of thermal energy.

In order to make reliable predictions about the energy efficiency of different variants of the pile under different boundary conditions, thermal simulations are essential. In addition to the modeling of the cylindrical absorber, the correct calculation of the behavior of the latent heat storage is a particular challenge, which will be examined in more detail in this paper.

Einleitung

In Zeiten des fortschreitenden anthropogenen Klimawandels und vor dem Hintergrund der Klimaschutzziele der Bundesregierung für den Gebäudesektor, bekommt die Bewirtschaftung von Gebäuden mit erneuerbaren Energien immer mehr Relevanz. Dabei spielt die Versorgung mit Heiz-, aber auch in steigendem Maße mit Kühlenergie eine wichtige Rolle (Schröter, et al. 2023) (Blum, et al. 2023).

Im Projekt EffKon (EffKon 2023) (Friedrich 2023), wird zu diesem Zweck ein neuartiger Solarthermiekollektor mit integriertem thermischen Speicher entwickelt. Das Projekt wird in Zusammenarbeit mit den Unternehmen Innogration GmbH, Panco GmbH, CuroCon GmbH und Betonwerk Büscher GmbH & Co.KG bearbeitet und vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert. Im Unterschied zu flächig ausgestalteten Systemen, die seit langer Zeit am Markt verfügbar sind, wird hier eine andere Herangehensweise gewählt. Ein bis zu zehn Meter hoher, sogenannter "Energiepfahl" soll aufgrund seiner vertikalen Ausrichtung und rundherum angebrachten Absorberfläche vor allem bei niedrigem Sonnenstand effizient Solarenergie sammeln. Der integrierte Latentwärmespeicher ermöglicht eine Speicherung der gesammelten thermischen Energie für mehrere Stunden bis Tage und ermöglicht somit zeitverzögert die Bereitstellung von Wärmeenergie.

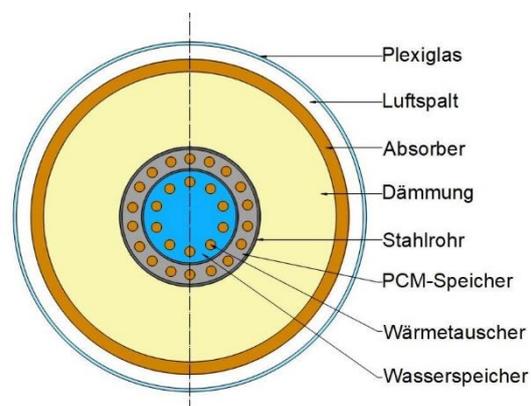


Abbildung 1: Schnittzeichnung des Energiepfahls

Der hier vorgestellte Prototyp wurde bereits früh in der Projektlaufzeit als Labordemonstrator an der RPTU in Kaiserslautern errichtet. Abbildung 1 zeigt den Aufbau des im Querschnitt. Der Labordemonstrator wurde als zylindrischer Pfahl ausgestaltet, der von einer Plexiglasröhre, zur Erzeugung eines Treibhauseffekts sowie zum Schutz vor der Witterung, ummantelt ist. Als Solarabsorber dient ein mattschwarz lackiertes Kupferrohr, welches spiralförmig um den gedämmten Pfahlkern gewickelt ist. Als Transportmedium für die gesammelte Wärmeenergie wird Wasser verwendet. Den tragenden Kern des Labordemonstrators und gleichzeitig thermischen Speicher bildet ein doppelwandiges Stahlrohr, in dessen äußerer Schicht ein Paraffinwachs als Phasenwechselmaterial (PCM) im Latentwärmespeicher eingebracht wurde. Im inneren Rohr dient Wasser als zusätzlicher sensibler Wärmespeicher. Die Wärmeübertragung erfolgt im Speicher ebenfalls über wasserführende Kupferrohre. Nähere Informationen zur Funktionsweise des Pfahls sind in (Schröter, et al. 2023) zu finden.

Simulation in TRNSYS

Simulationsansatz

Neben umfangreichen Messungen sind für die Entwicklung des Energiepfahls thermische Simulationen von besonderer Bedeutung. Damit sollen belastbare Voraussagen der Energieeffizienz verschiedener Entwürfe des Gesamtsystems unter variierenden Randbedingungen im Jahresverlauf sowie Untersuchungen von Anpassungen im Entwurf möglich werden. Hierfür wurde das Simulationsprogramm TRNSYS (Thermal Energy System Specialists 2019) gewählt. Es zeichnet sich dadurch aus, dass damit detaillierte thermische Gebäudesimulationen mit vergleichsweise geringem Rechenaufwand möglich sind, wobei aufgrund der umfangreichen Modulbibliothek nahezu beliebige Szenarien in der Anlagentechnik abbildbar sind. Weiterhin bieten verschiedene Schnittstellen die Möglichkeit völlig eigene Module ("Types") zu programmieren.

Da der Labordemonstrator aufgrund seines Aufbaus hinsichtlich Geometrie und Verknüpfung mit dem Speicherkern nicht mit Hilfe der Standardbibliothek abgebildet werden kann, wurden hierfür mehrere neue Module für TRNSYS erstellt. Dafür wurde der Labordemonstrator in je ein Modul für Absorber, Speicher und Leitungen unterteilt, wobei in diesem Paper der Fokus auf dem Speicher liegt. Als besondere Herausforderung stellte sich hierbei die korrekte Modellierung des Temperaturverhaltens des PCM heraus.

Bei der Verwendung von PCM in thermischen Speichern wird ausgenutzt, dass sie bei einem Wechsel des Aggregatzustandes ohne nennenswerte Temperaturänderung große Mengen Energie

aufnehmen bzw. abgeben können. Für spezifische Temperaturbereiche sind sie daher mitunter deutlich effizienter als ein sensibler Temperaturspeicher, wie hier im Vergleich zu Wasser deutlich sichtbar ist (siehe Abbildung 2). Aus technischen Gründen wird dabei idR. der Wechsel zwischen fester und flüssiger Phase genutzt. Das hier verwendete Paraffinwachs hat seinen Schmelzpunkt bei $\sim 27-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Rubitherm Technologies GmbH 2020) bei einer gesamten Wärmespeicherkapazität von 250 kJ/kg im Bereich von $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $36\text{ }^{\circ}\text{C}$. Naturgemäß ist die Verteilung der Enthalpie für das Erwärmen und Abkühlen des PCM versetzt, Energie wird also erst bei einer niedrigeren Temperatur freigesetzt als jene bei der sie aufgenommen wurde. Für die Modellierung der Speichertemperatur wurde hier eine mittlere Enthalpiekurve verwendet (siehe Abbildung 2). (Krohn, et al. 2022)

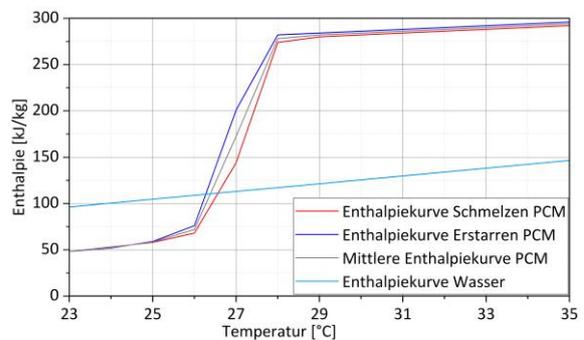


Abbildung 2: Temperaturabhängige Enthalpieverteilung vom verwendeten PCM sowie von Wasser

Umsetzung

Grundlegend besteht eine Simulation in TRNSYS aus einer Verbindung von mehreren Modulen. Diese repräsentieren jeweils eine Komponente des abzubildenden Systems und werden analog zum realen Aufbau des System miteinander verknüpft. Dafür hat jede Komponente unterschiedliche zeitabhängige Input- und Output-Größen sowie statische Parameter. In jedem Simulationsschritt berechnet TRNSYS für jede Komponente auf Basis der angegebenen Input-Werte und statischen Parameter neue Output-Werte, die dann ggf. an die nächste Komponente weitergegeben werden und dort für die Berechnung als Input verwendet werden. So wird das gesamte Systemverhalten im zeitlichen Verlauf simuliert.

Für die Berechnung des Speicherkerns wurde ein Berechnungsmodul in Python geschrieben, welches durch Type-3157 in TRNSYS integriert wird (Bernier, Marcotte und Kummert 2022). Dies hat den Vorteil, dass alle Prozesse innerhalb des Speichers in einem Simulationsschritt berücksichtigt werden und zudem eine Portierung in andere (TRNSYS-)Simulationen

einfach umsetzbar ist. Weiterhin ist eine Implementierung von ähnlichen Pfahlprototypen auf diese Weise mit wenig Aufwand möglich. Das Ziel war dabei ohne den Einsatz von FEM oder ähnlich rechenaufwändigen Methoden eine ausreichend genaue Modellierung des Speicherverhaltens zu erreichen.

Zunächst wurde dafür der Speicher in mehrere Bereiche unterteilt. Kopf- und Fußbereich des Speichers werden stark von Wärmebrücken beeinflusst, die vor allem durch die provisorische Natur des Prototypen bedingt sind. Für die Modellierung wird also der mittlere, weitestgehend ungestörte Bereich des Labordemonstrators verwendet. Entsprechend Abbildung 3 stehen die beiden Speichermaterialien PCM und Wasser untereinander, mit den angrenzenden Speicherbereichen sowie mit dem vor der Dämmung liegenden Absorber im Energieaustausch. Die modellierten Temperaturen im PCM und im Wasser können mit gemessenen Daten verglichen werden.

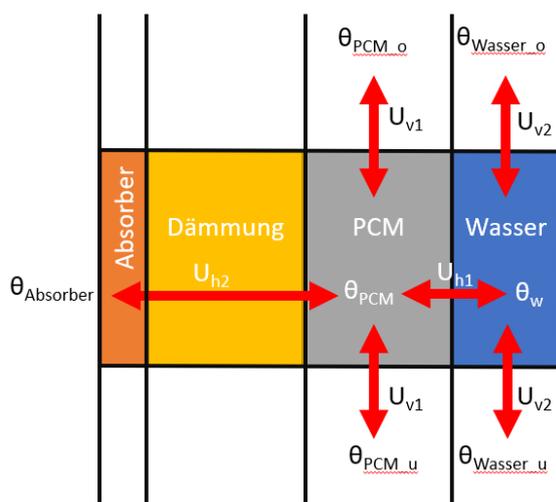


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Energieströme im modellierten Speicher mit zugehörigen Bezugstemperaturen und U-Werten (Wärmedurchgangskoeffizienten)

Grundsätzlich wird nun für jeden Zeitschritt (1 Minute) der Simulation unter der Annahme von stationären Bedingungen eine neue PCM- sowie Wassertemperatur ermittelt. Dafür wird zunächst auf Basis der zuletzt ermittelten Temperatur die aktuell im PCM gespeicherte Energie aus der gemittelten Enthalpiekurve abgelesen. Anschließend wird entsprechend untenstehender Gleichung 1 die im Zeitschritt transferierte Energie durch den Wärmetauscher (WT) berechnet.

$$dQ = q \cdot c_w \cdot dT \cdot \eta \quad [\text{kJ}] \quad (1)$$

Mit:

q = Durchflussrate im WT [kg/min]

c_w = spez. Wärmekapazität Wasser [4,185 kJ/kgK]

dT = Temperaturdifferenz zwischen WT und Speicher [K]

η = Faktor übertragbare Energie (0,25)

Der Übertragungsfaktor η stellt eine erste Näherung dar, die sich aus der Auswertung der bisherigen Messwerte ergeben hat. Im weiteren Verlauf der Forschungsarbeiten ist geplant, diesen Faktor näher zu untersuchen und anzupassen.

Mit Hilfe gemessener Werte der Absorberrtemperatur, PCM-Temperatur im Kopf- und Fußbereich sowie der zuletzt errechneten Wassertemperatur im Mittelteil wird anschließend der Energieaustausch mit der Umgebung und den angrenzenden Speicherbereichen berechnet:

$$dQ = U_{vi} \cdot A \cdot dT \cdot \frac{60}{1000} \quad [\text{kJ}] \quad (2)$$

$$dQ = U_{hi} \cdot h \cdot dT \cdot \frac{60}{1000} \quad [\text{kJ}] \quad (3)$$

Mit:

U_{vi} = Wärmedurchgangskoeffizient vertikal [W/m²K]

U_{hi} = Wärmedurchgangskoeffizient horizontal [W/m²K]

A = Übertragungsfläche vertikal [m²]

h = Betrachtete Abschnittslänge vertikal [m]

dT = Temperaturdifferenz zwischen jeweiliger Speicher- und Bezugstemperatur [K]

Der Faktor 60/1000 resultiert aus der Einheitenumrechnung von W in kJ für die Simulationszeitschritte von einer Minute.

Die Summe aus gespeicherter, ab- und zugeführter Energie ergibt die aktuelle gespeicherte Energie, mit welcher die aktuelle Temperatur des PCM abgelesen wird. Analog dazu wird im Anschluss die Temperatur des Wasserspeichers berechnet.

Ergebnisse

Für eine Validierung der Berechnungen wurde zunächst der in Abbildung 4 dargestellte Zeitraum simuliert. In dieser Zeit wurden verschiedene Betriebszustände des Labordemonstrators durchgeführt. Zunächst wurde er im Rahmen von Abkühlversuchen künstlich aufgeheizt und abgekühlt um die Entladegeschwindigkeit des Speicherkerns zu untersuchen (25.04 – 28.04.23). Die Wasser- und PCM-Speicher (blau, grau) wurden hier durch einen Bypass angesteuert, das Wasser im Absorber stand still. Die Temperaturschwankungen im Absorber (gelb) sind daher ausschließlich auf die solare Einstrahlung und Außenlufttemperatur (türkis) zurückzuführen.

Nach den Abkühlversuchen lief der Labordemonstrator für mehrere Tage im Dauerbetrieb, d. h. die Pumpe lief Tag und Nacht bei konstanter Leistung. Absorber und Speicher wurden kontinuierlich nacheinander durchflossen, daher

hängen ihre Temperaturen eng miteinander zusammen.

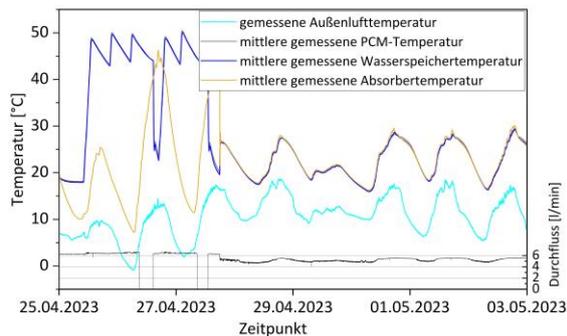


Abbildung 4: gemessene Temperatur in den beiden Speichermaterialien, an der Absorberoberfläche und in der Außenluft, sowie die Durchflussrate

Wie ausschnittsweise in Abbildung 5 dargestellt, zeigen die simulierten Temperaturen des PCM- wie auch Wassertempers im Dauerbetrieb bereits eine sehr gute Übereinstimmung. Die Abweichungen zwischen simulierten und gemessenen Werten der PCM-Temperatur schwanken zwischen 0,30 K und 0,55 K mit vereinzelt Spitzen bis 1,2 K. In diesem Betriebszustand dominiert die Energieübertragung durch das Wasser in den Wärmetauscherrohren das Temperaturverhalten der Speichermaterialien. Da die Abweichungen sowohl der berechneten Wasser- wie auch PCM-Temperaturen verhältnismäßig gleichmäßig sind, liegt die Vermutung nahe, dass hier die Energieaufnahme über- und/oder die Energieverluste unterschätzt werden.

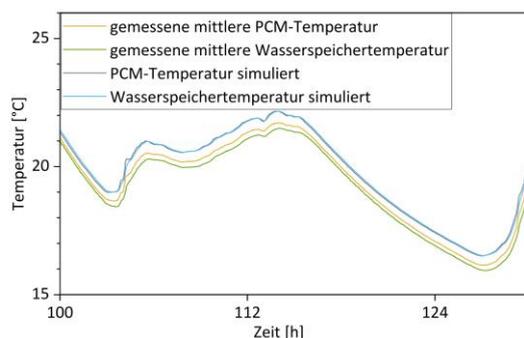


Abbildung 5: gemessene und simulierte Temperaturen in den beiden Speichermaterialien sowie zugehörige Durchflussrate – Ausschnitt 30.04.2023

Größere Diskrepanzen sind in den Zeiträumen mit ausgeschalteter Pumpe aufgetreten. Hier findet keine Energieübertragung durch den Wärmetauscher statt und der Wärmeaustausch der einzelnen Komponenten mit der Außenluft dominiert somit. In Abbildung 6 ist gut erkennbar, wie die Simulationswerte von den

Messwerten abweichen, sobald die Pumpe abgeschaltet wurde (Durchflussrate = 0).

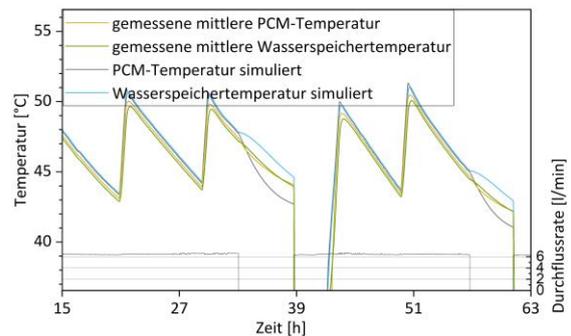


Abbildung 6: gemessene und simulierte PCM- und Wassertemperaturen sowie jeweilige Durchflussrate im Wasserkreislauf – Ausschnitt 26. – 27.04.2023

Zur genaueren Untersuchung dieser Zusammenhänge wurde ein weiterer Zeitraum nachsimuliert. In diesem wurde der Labordemonstrator zunächst künstlich auf über 40 °C erwärmt und danach die Pumpe ausgestellt und der Pfahl über mehrere Tage auskühlen gelassen. Während dieses natürlichen Abkühlvorganges werden die simulierten Speichertemperaturen ausschließlich durch die angrenzenden Speicherbereiche sowie die Temperaturen des an der Dämmung anliegenden Absorbers beeinflusst.

Abbildung 7 zeigt die gemessene und simulierte Temperatur im Wassertemper. Es ist zu erkennen, dass die Simulationswerte bereits sehr gut zu den gemessenen Werten passen und den Absorbertemperaturen, die als Referenztemperaturen für die Verlustberechnung angesetzt wurden, ähnlich stark folgen. Während der Aufheizphase zeigt sich eine kurzzeitige Überschätzung der Energieaufnahme des Speichers durch das Wasser im Wärmetauscher. Die Simulation des natürlichen Abkühlvorganges stimmt anschließend sehr gut mit den gemessenen Werten überein. Die durchschnittliche Abweichung beträgt 0,24 K.

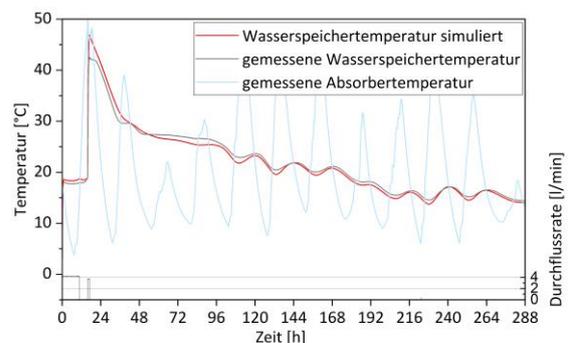


Abbildung 7: gemessene und simulierte Wassertemperatur während mehrtägiger Abkühlung

Die Überschätzung der Energieaufnahme im PCM-Speicher ist deutlich geringer, siehe Abbildung 8. Die simulierten Temperaturwerte zeigen im Abkühlvorgang jedoch eine größere Abweichung als die Werte des Wasserspeichers. Insgesamt scheinen die simulierten PCM-Temperaturen noch zu stark von den Absorbertemperaturen beeinflusst zu werden. Die durchschnittliche Abweichung beträgt für das PCM 0,70 K.

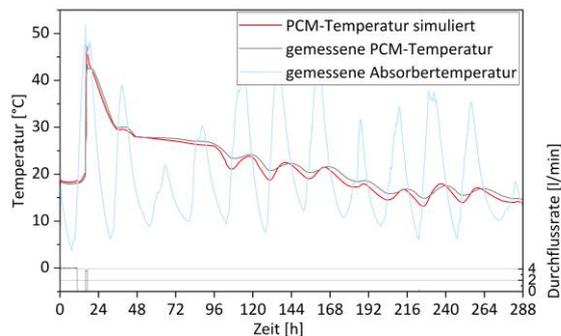


Abbildung 8: gemessene und simulierte PCM-Temperatur während mehrtägiger Abkühlung

Zusammenfassung

Um belastbare Voraussagen hinsichtlich des thermischen Verhaltens und energetischer Effizienz des hier vorgestellten Prototypen eines neuartigen Solarthermiekollektors mit Latentwärmespeicher treffen zu können, wurde mittels TRNSYS und Python ein Simulationsmodell entwickelt. Durch minutenweise stationäre Berechnung der Energiebilanz im Speicher unter Berücksichtigung der Einflüsse von über den Wärmetauscher zugeführter Energie sowie Austausch mit Umgebung und angrenzenden Speicherbereichen, ist eine sehr gute Abbildung des realen Temperaturverhaltens gelungen.

Die verbleibenden Abweichungen zwischen Mess- und Simulationswerten sind einerseits auf die Energieaufnahme über den Wärmetauscher im Speichermaterial zurückzuführen. Eine große Rolle spielt dabei der gewählte Transferfaktor. Hier in erster Näherung als konstant angenommen, ist dieser tatsächlich vor allem in Abhängigkeit von der Durchflussrate im Wärmetauscher veränderlich. In der fortlaufenden Forschungsarbeit ist geplant, dies zu genauer zu untersuchen.

Weiterhin stellt die stationäre Berechnung des Energieaustauschs mit Umgebung und angrenzenden Speicherbereichen über einzelne U-Werte eine Ungenauigkeit dar. Aufgrund des Aufbaus des Energiepfahls herrschen hier dynamisch wechselnde Bedingungen (fließendes Wasser in Absorber und Wärmetauscher mit wechselnden Temperaturen). Auch Prozesse innerhalb des Speichermediums wie Konvektion können so nicht abgebildet werden. Diese

Einflüsse werden derzeit untersucht, um sie in Zukunft besser berücksichtigen zu können.

Danksagung

Die Autorinnen und Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) für die Förderung.

Literatur

- Bernier, Nicolas, Bruno Marcotte, und Michael Kummert. *Calling Python from TRNSYS with CFFI*. Zenodo, 2022.
- Blum, Svenja, Svenja Carrigan, Dieter Platzek, und Oliver Kornadt. „Evaluation of the energy efficiency of an active thermoelectric façade.“ *Energy and Buildings* Vol 292, 01. 08 2023.
- EffKon. *EffKon - Effizientes Wärmespeicher- und Erzeugungssystem zur thermischen Konditionierung von Gebäuden*. 29. 12 2023. www.effkon.eu (Zugriff am 29. 12 2023).
- Friedrich, Thomas. *Energiesäule aus Beton als Beitrag zur Wärmewende*. 10 2023. <https://www.innogratiion.de/wp-content/uploads/delightful-downloads/2023/10/Energies%C3%A4ule-aus-Beton-als-Beitrag-zur-W%C3%A4rmewende-2.pdf> (Zugriff am 3. 12 2023).
- Krohn, Jonas, Svenja Carrigan, Thomas Friedrich, und Oliver Kornadt. „Implementierung neuartiger PCM-Speicher in TRNSYS zur Deckung des Heiz- und Kühlbedarfs.“ *BauSim2022*. Weimar, 2022.
- Rubitherm Technologies GmbH. *Rubitherm Datasheets*. 09. 10 2020. https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_RT28HC_DE_09102020.PDF (Zugriff am 15. 11 2023).
- Schröter, Birke, et al. „Energiegewinn und Energieeinspeicherung des Prototyps eines neuartigen Wärmespeicher- und Energieerzeugungssystems.“ *Bauphysik* 5/2023, 2023: 245 - 251.
- Thermal Energy System Specialists, LLC. *TRNSYS*. 2019. www.trnsys.com (Zugriff am 15. 12 2023).



LIFE CYCLE ASSESSMENT OF THE PROTOTYPE OF A NOVEL ENERGY GENERATION AND HEAT STORAGE SYSTEM

Mahnoor Khawaja, Svenja Carrigan, Oliver Kornadt

Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau (RPTU)

E-Mail: mahnoor.khawaja@rptu.de

Abstract

Life cycle assessment (LCA) is a useful method to quantify the environmental impacts of a product or system for different life cycle stages. In the design stage, it can help decision makers to find the most sustainable material choices. A novel energy generation and heat storage system is under development at Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau (RPTU). A prototype of this system has been developed and installed at RPTU for testing and validation purposes. This paper depicts the significance of the LCA application for the design stage of the prototype. By use of LCA, hotspots have been identified and it could be shown that potential replacement with better material choices result in a reduction of around 21% of Global warming potential (GWP) and non-renewable primary energy consumption (PENRE) in the design stage.

Keywords

Life cycle assessment, Energy production and storage system

Introduction

Buildings as a result of construction, use and demolition have a share of around 40% of gross energy consumption in the European union (EU) (European Commission, 2020). Likewise, 35% of green house gases emissions in EU are linked to the building sector (European environment agency, 2023). This has given rise to several improved practices and building concepts such as “Passive houses”, “Low energy houses” and “Net zero energy buildings”. In Europe, the “Energy performance of buildings directive EPBD (2010/31/EU)” introduced a concept of “Net zero energy building NZEB” where the operational energy consumption is almost brought down to zero by improving building construction details and the residual energy demand should be met by provision of renewable energy generation (Directive, 2010). On the contrary, research has shown that achieving low consumption in the operational stage is resulting in additional resource consumption in other stages and

thus elevated embodied impacts (Crawford and Stephan, 2013). Life cycle analysis (LCA) is one of the widely used methods to assess life cycle environmental impacts (Means and Guggemos, 2015). By using this methodology, the LCA practitioner can get a clear depiction of how much impacts, the design alternative under question, pose to the environment.

The German government plans to reach the goal of a nearly climate neutral building stock by 2050 (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi, 2019). In addition to heating, cooling is also gaining significant emphasis with respect to the building efficiency. Thus, there is a need to develop new sustainable solutions. The key target of the project “EffKon” at Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau (RPTU) is to research and develop a novel energy generation and thermal storage system for building cooling and heating operations (Schröter et al., 2023). The project is sponsored by the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action and is being executed along with industrial partners Innogration GmbH, Panco GmbH, CuroCon GmbH and Betonwerk Büchner GmbH & Co. KG. The work presented in this paper is a life cycle analysis of the prototype of the system aimed to be designed under project EffKon.

Prototype description

The Prototype consists of an ‘energy pole’ mounted with the help of a foundation (see section in Figure 1). The outermost layer of the prototype consists of a transparent Plexiglas pipe which is divided by an air gap from the solar absorber copper pipes spiral.

The centre of the pole is insulated by a layer of glass wool. In the centre, two hollow steel pipes can be seen where copper heat exchanger pipes are immersed in an organic wax-based paraffin phase change material (PCM). The innermost core consists of the water, again immersed in copper heat exchanger pipes. Water from the building enters the absorber pipes from the bottom and absorbs the heat from the absorber pipes.

The heated water enters the heat exchanger copper pipes surrounded by the PCM, transferring heat energy. Afterwards, the water flows through the heat exchanger copper pipes surrounded by the water,

where more energy can be transferred, and finally exits the prototype.

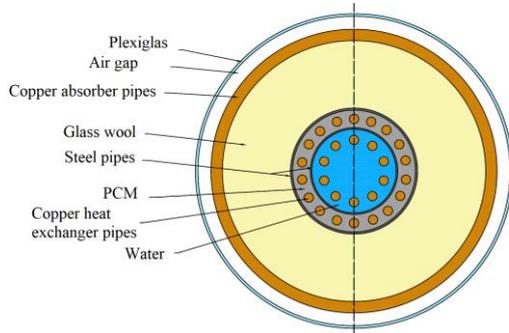


Figure 1. Sectional view of the energy pole

The prototype's foundation consists of wooden plate, followed by Aluminium plate fixed to the Extruded polystyrene XPS insulation board with the help of threaded rods. The detailed bill of quantities for prototype is listed in Table 1.

Life cycle analysis of prototype

Life cycle analysis (LCA) is one of the widely used methods to assess the environmental impacts over parts of or while life cycles of materials and products (Means and Guggemos, 2015). By using LCA, different life cycle stages of a product under question can be examined. Eventually, its possible to evaluate different environmental effects caused by the product in its different lifecycle stages, i.e. production, construction, operation, disposal.

This paper reports values for the impact categories global warming potential (GWP) and non-renewable primary energy (PENRE). The system boundary of the LCA is production stage only (A1-A3). Due to lack of data available other impact categories such as Ozone depletion potential or use of net fresh water are not be evaluated. To ensure comparability, only the datasets using EN14025 (DIN, 2011) and EN15804:A1 (DIN, 2019) as core product category rules (PCR) have been selected. Omission of components $\leq 1\%$ by mass is permissible as per EN15804:A1. As the data for small components such as copper connectors and nuts/washers were not available, impacts for these components have been excluded. As evident from Table 2, the major focus has been to shortlist materials relevant to geographical regions relevant to Germany. However, due to unavailability of data for some materials, the impacts have been derived for products from other European countries i.e., Norway, Sweden, Poland etc. Sources of the data inventory have mainly been Ökobaudat (Bundesministerium des Innern, 2018) and Environmental product declarations (EPD). Data for PCM has been derived from literature. Likewise, data for stainless steel in pipe form could not be derived and has only been available for products in sheet form.

Table 1. Bill of quantities for the prototype

	Material	Specification	Quantity	
Pole	Plexiglas Pipe	$\varnothing_{\text{INNER}} = 600 \text{ mm}$ $\varnothing_{\text{OUTER}} = 610 \text{ mm}$	2.10 m	
	Glass wool (roll)	120mm thick $\lambda = 0.032 \text{ W/mK}$	3.04 m ² providing R-3.75 m ² K/W thermal resistance	
	Outer steel pipe	$\varnothing_{\text{INNER}} = 236.6 \text{ mm}$ $\varnothing_{\text{OUTER}} = 244.6 \text{ mm}$ Pressure graded steel P235GH, welded	2.10 m	
	Inner steel pipe	$\varnothing_{\text{INNER}} = 162.4 \text{ mm}$ $\varnothing_{\text{OUTER}} = 168.4 \text{ mm}$ Stainless steel 1.4301/V2A series	2.10 m	
	Steel plate	Stainless steel Thickness 5mm	302.4 x 302.4 mm	
	Spiral absorber pipe Copper	$\varnothing_{\text{INNER}} = 20 \text{ mm}$ $\varnothing_{\text{OUTER}} = 22 \text{ mm}$ Cu-DHP, CW024A Type R220	~ 149.3 m	
	Heat exchange pipes 1 and 2 Copper	$\varnothing_{\text{INNER}} = 16 \text{ mm}$ $\varnothing_{\text{OUTER}} = 18 \text{ mm}$ Cu-DHP, CW024A Type R290	~ 55 m	
	Copper connectors (Absorber pipes)	Sleeve	4 pieces	
	Copper connectors (Heat exchange pipes)	90° Elbow Inner-outer 90 ° Elbow Outer-outer	18x 34x	
	PCM	Rubitherm RT28HC Organic Paraffin wax	0.034 m ³	
	Wasser		0.036 m ³	
	Foundation	Threaded rods	Length 0.5m	4 x $\varnothing 6 \text{ mm}$ 4 x $\varnothing 10 \text{ mm}$
		Nuts	8x	
Washers		8x		
Wooden plate (With weather resistance coating)		0.96m ² with 12mm thickness	2x	
XPS (Board)		165mm thick $\lambda = 0.035 \text{ W/mK}$	1.0m ² providing R-4.7 m ² K/W thermal resistance	
Aluminium plate		1m ² with 5mm thickness	2x	

Results and discussion

Figure 2 shows the resulting environmental profile of the prototype production. GWP and PENRE both are almost in similar proportions for all the materials. In the pole, copper pipes and the outer steel pipe are the major hotspots followed by PlexiGlas or Polymethyl methacrylate (PMMA) pipe and inner stainless-steel pipe. Whereas, in the foundation, Aluminium has a major impact share. An overview of the impacts is listed in Table 3. The GWP and PENRE from the pole amounts to be 701 kg-CO₂ and 10136 MJ, respectively, while the foundation causes GWP and PENRE of 326 kg-CO₂ and 4719 MJ, respectively.

After the evaluation of impacts and identification of hotspots, the next step has been to explore material alternatives with lesser impacts for different components. Figure 3 shows an overview of possible sustainable alternatives and to what extent of impact

Table 2. Data inventory for production stage of the prototype

Part	Material	Sub category	ID	Source	EPD program	Plant location	Reference unit	GWP	PENRE	
Pole	Plexiglas (sheet)		795ab193-fc50-463d-a5f8-e37d5336ee78	Okobaudat	-	DE	1m ²	6291	107500	
			41b8a86d-5d44-49fb-a9b8-de2a9041f1fd	Okobaudat	-	DE	1m ³	5757	99870	
			EPD-EVO-20180023-IAD4-EN	EPD	IBU	DE	1kg	1190	103.4	
	Pressure steel (pipe)		EPD-ARC-20220192-CBA1-EN	EPD	IBU	FR RO PL CZ	1tonn	2800	28700	
			EPD-ERC-20200034-IBC1-EN	EPD	IBU	TR	1tonn	2948	39999	
	Stainless steel (sheet)		EPD-OTO-20190002-IBD1-EN	EPD, Okobaudat	IBU	DE , SE , FI , US , MX	1tonn	3390	55900	
			EPD-OTO-20190003-IBD1-EN	EPD, Okobaudat	IBU	DE , SE , FI , US	1tonn	2740	37200	
		EPD-RFI-20210280-IBD1-EN	EPD	IBU	FI , DE	1tonn	3390	55900		
	Copper (pipe)		EPD-KME-20150002-IBE1-DE	EPD	IBU	DE	1kg	1.97	21.8	
	Glass wool (Roll)	Phenol resin		EPD-SAR-20200272-CBA1-EN	EPD	IBU	CH	1kg	1.31	33.6
			Biobased resin	S-P-01894	EPD	EPD international	BE , DE , CZ	1 m ² , 240mm thickness	5.71	94.8
			EPD-SAR-20200273-CBA1-DE	EPD	IBU	CH	1kg	1.08	27.1	
	PCM		-	-	Literature	-	1kg	0.995	31.2	
Water		ce3057d1-3371-47b4-a982-a1c42c2c6a85	Okobaudat	-	-	1kg	0.000128	0.001754		
Foundation	stainless threaded rods		EPD-OTO-20190107-IBD1-EN	EPD	-	UK , US , SE	1tonn	2890	37200	
	Wood plate (Coated)		205/2021	EPD	Ecoplatform	PL	1m ³	-62.4	12100	
	XPS (board) with blowing agent options:	CO2 + BMB		EPD-BAS-20190114-IBA1-DE	EPD, Okobaudat	IBU	DE	1 m ² , 120mm thickness	3.25	158.96
				70199377-9eac-401c-b76b-0bf412291949	EPD, Okobaudat	IBU	DE	1 m ² , 120mm thickness	9.85	179.09
		CO2		EPD-BAS-20190113-IBA1-DE	EPD, Okobaudat	IBU	DE	1 m ² , 120mm thickness	10.2	146
				41e09ab7-0e73-4303-84fd-97cb0809db02	EPD, Okobaudat	IBU	DE , EL	1 m ² , 100mm thickness	10.2	146
		EPD-DOW-2-13111-DE	EPD	IBU	DE , EL	1 m ² , 100mm thickness	9.38	145		
		EPD-FPX-20190111-IBE1-DE	EPD, Okobaudat	IBU	DE	1 m ² , 100mm thickness	121	1860		
		54b63599-07e3-48b1-b33b-11bcbab9032f	EPD, Okobaudat	IBU	DE	1m ³	121	1860		
		EPD-JAI-20200164-IBC1-EN	EPD, Okobaudat	IBU	DE	1m ³	121	1860		
		a8782644-13be-42ab-93ea-950ad7f0c2a5	EPD, Okobaudat	IBU	DE	1m ³	121	1860		
		43e99b8c-90d8-4fcd-90ce-342fb0b7366e	Okobaudat	-	DE	1m ³	96.34	1406		
	Aluminium (plate) with surface treatment options:	Coil coated		EPD GDA 130	EPD	IBU	EU-28	1kg	6.39	83.2
			EPD hydro	EPD	EPD norge	NO	1kg	1.32	16.6	
Anodized		EPD3-COIL-2017	EPD	European Aluminium	BE	m2, 0.5mm thick, anodic layer 8um	15.3	214		

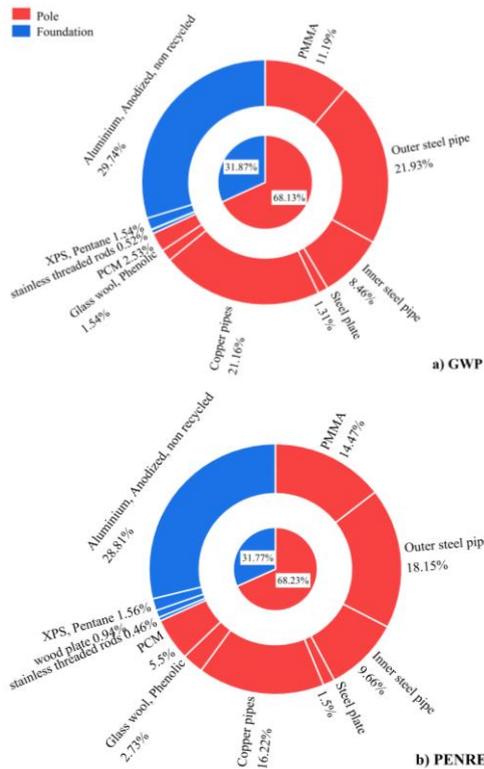


Figure 2. Environmental profile of prototype (Original scenario)

Table 3. Impact values for prototype (Original scenario)

Part	Components	GWP [kg-CO2]	PENRE [MJ]
Pole	PMMA pipe	115	2150
	Outer pressure graded steel pipe	226	2696
	Inner stainless steel pipe	87	1435
	Stainless steel plate	13	222
	Copper pipes	218	2409
	Glass wool	16	406
	PCM	26	817
	Water	4.61E-03	6.31E-02
	Total pole	701	10136
Foundation	stainless threaded rods	5	69
	wood plate	-1	139
	XPS, Pentane	16	231
	Aluminium, Anodized, non recycled	306	4280
	Total Foundation	326	4719
Total	1027	14855	

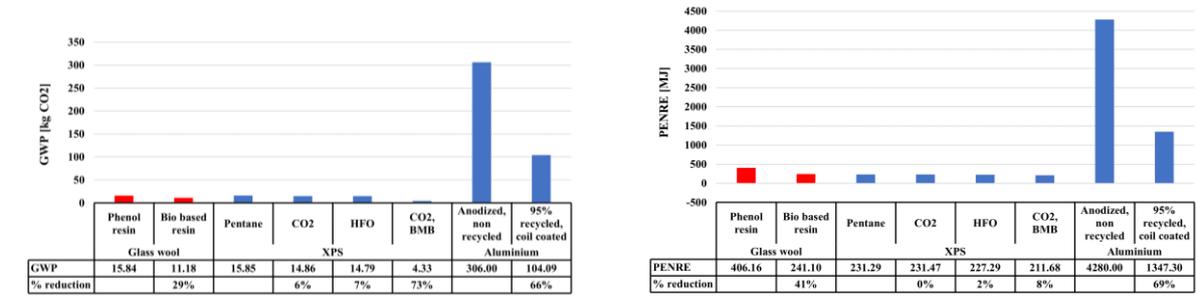


Figure 3. Effects of possible material alternatives

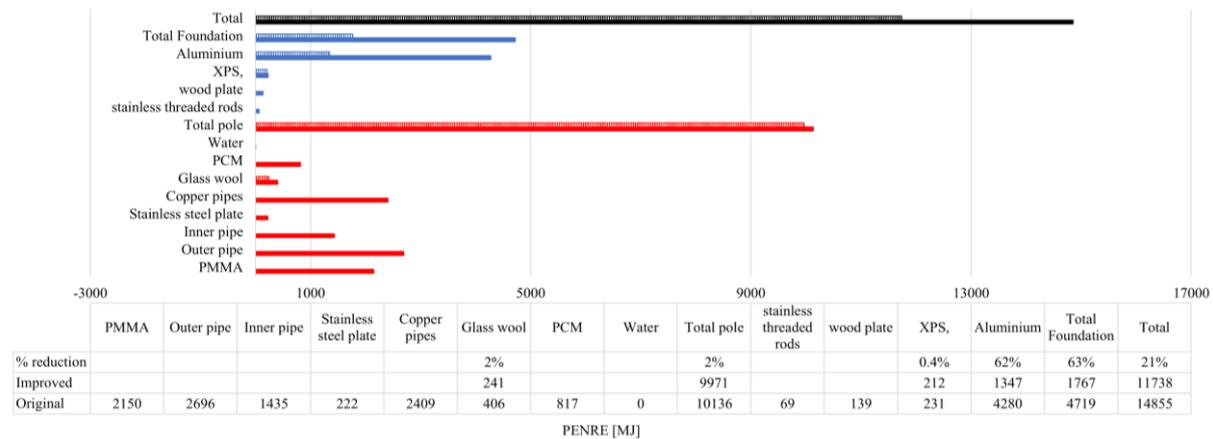
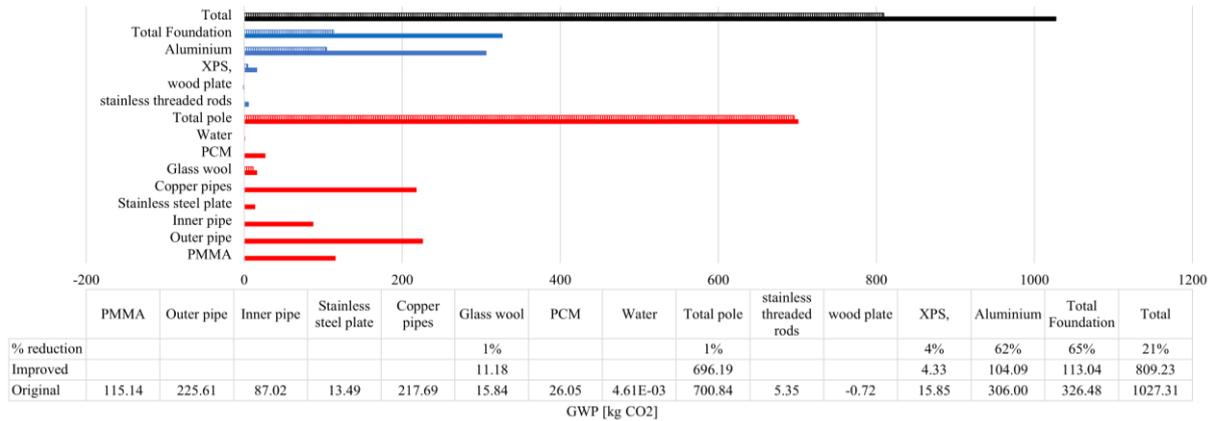


Figure 4. Improved environmental profile after substitution.

reduction, their substitution causes on a material level. The components for pole and foundation are depicted by red and blue color respectively. The possible alternative in the pole for the glass wool is 'phenol' bonded glass wool with a glass wool manufacturer using a 'biobased' binder. The latter has GWP and PENRE 11.18 kg-CO₂ and 241 kg-CO₂ on material level which is 29% and 41%, respectively, lesser than the former one.

In the foundation, XPS has several alternative options available. In the past, XPS blowing agents consisted of chlorofluorocarbons CFCs with a high ozone depletion potential and have been eventually discouraged especially in the EU. Several innovative blowing agents such as Pentane, CO₂ and hydrofluoroolefin HFO etc. have thus been introduced to the market. However, as apparent from Figure 3, all

blowing agents have almost similar impact on GWP and PENRE and cause no significant reduction by substitution. However, if the manufacturing of XPS is done via Biomass balanced method (BMB), it can cause a significant reduction of 73% and 8% GWP and PENRE, respectively, on the material level.

This is because BMB manufacturing involves utilization of renewable resources i.e., bio-Naptha Biogas along with conventional non-renewable resources sourced from the fossil materials. Similarly in the foundation, the substitution of Aluminium brings down the impact by 66% and 69% GWP and PENRE, respectively, on a material level. This is because the alternative consists of 95% recycled Aluminium. The substitution of the primary aluminium with a recycled one has a significant influence because extraction of Aluminium from

Bauxite ore is an impact intensive process. Likewise, the substituted material has coil coating instead of an anodized coating, which also further improves the environmental profile.

Figure 4 shows the influence of substitution on the product level. The components for pole and foundation are represented by red and blue color respectively. The black color shows impacts on whole product level. The solid line stands for impacts before substitution while the hashed line shows the improved impacts after substitution. In the pole, as glass wool is not a hotspot and it's used in a small amount in the pole, there is almost no improvement in pole i.e. 1% GWP and 2% PENRE reduction. Similarly, in foundation XPS contributes a small amount of 4% and 0.4% reduction to GWP and PENRE, respectively. However, Aluminium is a hotspot and its replacement results in 62% decrease in both GWP and PENRE of foundation. So, switching to more sustainable options result in 1% and 65% GWP reduction in pole and foundation, respectively. On the whole prototype level, this GWP reduction is 21%. Similarly, replacement generates 2% and 63% PENRE decline in pole and foundation, respectively. On the whole prototype level, this reduction is 21%.

Conclusion

In this paper, the significance of LCA has been demonstrated by its application on a prototype. The impacts of the production stage (A1-A3) were evaluated, and hotspots were identified. Finally, substitution with alternative material choices improved the GWP and PENRE profile of the prototype by 21%. Due to the lack of data available other impact categories such as Ozone depletion potential or use of net fresh water are not evaluated. In this paper, only the production impact stages have been reported. The authors want to emphasize the importance on conducting LCA to evaluate the environmental impact of a product.

Acknowledgements

The research work has been presented as a part of project 01218514/1-Effkon funded by "Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK.IIC6)". The authors would also like to thank "Deutscher Akademischer Austauschdienst" for partially funding the research.



References

- Bundesministerium des Innern, für B. und H., 2018. Ökobaudat-Informationportal nachhaltiges Bauen.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi, 2019. Zweiter Fortschrittsbericht

zur Energiewende 'Die Energie der Zukunft' Berichtsjahr 2017,.

- Crawford, R.H., Stephan, A., 2013. The significance of embodied energy in certified passive houses. *Int. J. Archit. Environ. Eng.* 7, 427–433.
- DIN, E., 2019. 15804: 2020-03 Sustainability of construction works-Environmental product declarations-Core rules for the product category of construction products. Ger. Version EN 15804, A2.
- DIN, E., 2011. 14025: Umweltkennzeichnungen und-deklarationen-Typ III Umweltdeklarationen-Grundsätze und Verfahren (ISO 14025: 2006). Dtsch. Engl. Fass. EN ISO 14035.
- Directive, E.C., 2010. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast).
- European Commission, 2020. URL https://commission.europa.eu/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-02-17_en (accessed 12.5.23).
- European environment agency, 2023. URL <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissions-from-energy#:~:text=The%20buildings%20sector%20is%20a,related%20EU%20emissions%20in%202021>. (accessed 12.5.23).
- Means, P., Guggemos, A., 2015. Framework for Life Cycle Assessment (LCA) Based Environmental Decision Making During the Conceptual Design Phase for Commercial Buildings. *Procedia Eng.*, Defining the future of sustainability and resilience in design, engineering and construction 118, 802–812. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.517>
- Schröter, B., Spiegel, J., Carrigan, S., Kornadt, O., Friedrich, T., Wißbach, M., Platzek, D., Büscher, W., 2023. Energiegewinn und Energieeinspeicherung des Prototyps eines neuartigen Wärmespeicher- und Energieerzeugungssystems. *Bauphysik* 45, 245–251. <https://doi.org/10.1002/bapi.202300014>



OPTIMIZATION STRATEGIES FOR THE USE OF HEAT PUMPS IN EXISTING BUILDINGS AS PART OF POTENTIAL ANALYSES OF SECTOR COUPLING

Miaomiao He, Niklas Hüdopohl, Isabell Nemeth

Technische Hochschule Rosenheim, E-Mail: miaomiao.he@th-rosenheim.de

Abstract

In the transformation of the building stock in Germany, which is still predominantly heated by fossil fuels, the extensive use of heat pumps promises considerable potential for integrating renewable energies through sector coupling. The content of a research network is therefore, among other things, to develop technical solutions and the necessary planning bases for a spread of sector coupling in order to realize a maximum of emission reduction without a costly grid expansion.

For the purpose of mapping scenarios of sector coupling in the Bavarian residential building stock, the present research work investigates, on the basis of typical single-family and multi-family buildings of different construction age classes, under which system configurations heat pumps can be used efficiently in existing buildings. With the help of thermal-dynamic simulations, implementation strategies are developed, starting from the installation of the heat pump and the reduction of the supply temperatures in the heating circuit of the buildings, which compensate for the resulting comfort and efficiency deficits. Combined with the goal of being able to identify the least invasive measures possible to compensate for thermal deficit, the effects of adjusting the control system, adding additional heating surfaces and replacing radiators on the under-temperature hours were quantified.

The results show that in residential buildings of the construction age class after the introduction of the Second Thermal Insulation Ordinance, control adjustments alone allow a significant reduction in the supply temperatures with only minor losses in comfort, while in older buildings this requires considerable additional measures.

Introduction

The past year has clearly demonstrated that climate change is progressing rapidly and requires decisive action to reduce greenhouse gas emissions and adapt to climate change. The restructuring of the energy system is an urgent task. The research network "Energy - Sector Coupling and Micro-Grids", or

"STROM" for short, develops technical, organisational, planning and regulatory solutions, to drive this change forward quickly. The integration of electricity into the heating and mobility sectors is a necessary prerequisite for significantly increasing the share of renewable energies in these sectors.

The current research work is carried out under the sub-project 9: Structural optimization of the existing building. The objectives of the sub-project are the generation of scenarios for the long-term development of the building stock with regard to sector coupling, energy demand and emission, costs, and impact of political and legal framework. In order to achieve these objectives, a Bavaria Residential Building Stock model based on building typologies are under further development, with the particular focus to map the developments in residential buildings in the context sector coupling, and in particular the conversion of the heat supply in buildings.

The current study aims to identify the applicability of heat pumps in existing residential buildings in Bavaria, without invasive measures on the building envelope, but with only the non-invasive required measures on the heating system to achieve efficient and economical operation with consistent comfort. The simulation of the operation of heat pump and room air temperature require thermal dynamic modelling of the buildings. However, due to the large scale and limited information regarding the building geometry, it is not possible to simulate all buildings using thermal dynamic modelling in the building stock model. Therefore, thermal dynamic simulations of the heat pump systems were carried out using a typical single-family house and a multi-family house of four different construction age classes (BAK: Baualterklasse) as defined by Institut Wohnen und Umwelt (IWU), namely BAK 58-68, BAK 69-78, BAK 79-83, and BAK 84-94 (Loga et al. 2015). The findings, which indicate which buildings can be heated by heat pumps when the room air temperature remains within "certain" limits under certain required measurements and costs, are to be used as boundary conditions for the Bavaria Residential Building Stock Model. In this paper, only the results from the single-family house in presented.

Bavarian Residential Building Stock Model

The Bavarian Residential Building Stock Model is a bottom-up building physics based model. The building inventory of the whole Bavaria is compiled from various data sources original from different surveys. The foundation is the living area census 1987, where number of existing residential buildings and living area in classification of building typology, building age class and heating type were recorded at the level of district in Bavaria. The development of yearly changes of the number of building and living area from 1987 to 2021, due to new builds and demolition of old buildings, in each classification of the buildings, were implemented based on the data obtained from special analyses commissioned at the statistical state office. The development from 2022 to future is estimated according to statistical projections on population and living area pro person.

The area of each building envelop (e.g. external wall, roof, window, ground floor) was calculated using the simplified estimation method (Loga et al., 2005) and the thermal characteristics (e.g. U-values and g-values) of the building envelop of each building type in each building age class were taken from the German Building Typology from IWU (Loga et al., 2015). With these data, the yearly heating demand of each building can be calculated using DIN V 4108-6 (2003).

In order to take into account the improvement of thermal quality of building envelop due to building refurbishment over the years, the life cycle of the building envelop of each building was simulated. For each component of the building envelop, a synthetic development plan is determined up to a selected point in time based on the technical lifespan of the individual components. Based on the normal distribution, the failure times are calculated. Energetic renovation is then determined based on the predicted failure times so that the energetic renovation rates of each component is consistent with the observed statistical data. Motivated renovations, independent of factors such as weathering but driven by the building owner's motivation, are modeled through the exponential distribution ("memoryless").

Methodology

In order to access the operation of heat pumps in building of various construction ages and the required measurements to maintain the comfort room temperature, a typical single-family house model was constructed using the thermal dynamic simulation tool IDA ICE. The thermal properties of the building envelops of the four chosen BAKs in this study were then set according to the German residential building typology (Loga, et al., 2015). The targeted air temperatures in different rooms were used to access if the thermal comfort can be maintained in the building.

These values were selected so that the operative room temperature meets the requirements of the standard for heating load calculation (DIN V 4108-6). Necessary countermeasures were then introduced in the modelling when the thermal comfort in the building cannot be maintained. The effects of these measures were then analysed and quantified.

Thermal dynamic building model

The geometry of the typical single-family house was taken from a study by Klauß (2010), where synthetic model buildings were derived from statistical data and data from real buildings. The building type "single-family house_small" was chosen (Figure 3).



Figure 3: "Single-family house_small" - view north-west (illustration from (Klauß, 2010))

The simulated building has a usable area of 162m², which has been divided into three zones for the simulation (Figure 4).

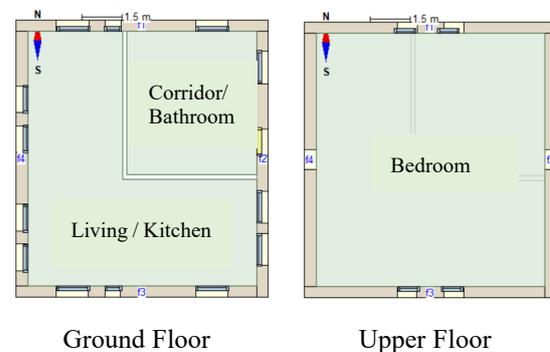


Figure 4: Floor plan of the building model in IDA ICE.

These are intended to represent three typical usage areas of a single-family house. The first floor contains a living/kitchen area on around two thirds of the area (54m²) and a zone representing the corridor and bathroom areas on around one third of the area (26m²). These areas were grouped together as they can be considered to have a lower, constant room temperature. The upper floor includes a zone as a sleeping area (82m²). The usable area would be somewhat smaller than a real single-family house due to the interior walls. For reasons of computing capacity and speed, it was decided here to divide the

building only into "usage zones" and not into rooms. In principle, zone results are decisive for quantifying the comfort deficits, room simulation would also have been sufficient, however, in order to be able to quantify efficiency gains and costs for measures in the building stock model, the whole building was considered.

The orientation of the building was also taken from (Klauß, 2010). As can be seen in Figure 8, the gable ends of the building face north and south. The thermal bridge coefficient was assumed to be $0.1 \text{ W/m}^2\text{.K}$ for all calculated building models. This corresponds, for example, to the assumptions from (Loga et al., 2015). Here, a thermal bridge allowance of $0.1 \text{ W/m}^2\text{.K}$ was also assumed for all pre-1995 BAK. As it cannot be assumed that mechanical ventilation systems are present in existing single-family homes in the BAK under consideration, a constant air exchange rate of $n=0.7 \text{ h}^{-1}$ was assumed. This value is based on the specification for buildings not tested for tightness from DIN V 4108-6 (2003).

In addition to the heating energy requirement, the energy requirement for hot water heating is also included in this analysis. This is set at $20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. It is distributed over the course of the day using a schedule that reflects living in a detached house.

The test reference year (TRY) for the Regensburg30 location was selected as the weather data set for this study. Test reference years represent the typical weather pattern over a year in the corresponding region in hourly averages. They are based on measurement series of weather data between 1995 and 2012. By averaging and interpolating over this period, these data sets are particularly suitable for mapping a typical weather pattern as part of a dynamic thermal building simulation, as they do not contain any extreme weather events.

Building envelop and heating distribution system

The compositions and thermal transmittance coefficients (U-values) and of each component of the building envelop for the four BAKs are specified in (Loga et al., 2015) (Table 1). These values were adopted for the simulation models. There are some

probable changes made to the buildings since the construction, for example, window replacement after approx. 25 years and insulation of the top storey ceiling, which have been taken into account. This consideration is also suggested by the building sample from (Günther et al., 2020). Here, too, almost all of the buildings are no longer in the state of construction. Looking at the BAK buildings covered in this study, the windows have already been replaced in over 50% of the buildings built between 1958 and 1994. For this reason, the simulation models in this work are also created with windows that have already been modernized. In order to determine the heat transfer coefficient of the modernized window, a usage period of around 30 years was applied to the average year of construction of each BAK treated. A typical heat transfer coefficient for this period was therefore selected for the modernized windows.

Similarly, the design procedures and design temperatures of the radiators have also changed over the years (Table 2).

Table 2 Radiator design temperatures in four selected BAKs

Radiator design temperature supply/return [°C]			
BAK 58-68	BAK 69-78	BAK 79-83	BAK 84-94
90/70	70/55	70/55	55/45

This was primarily a matter of adapting to existing technologies and saving energy. Until around the early-1970s, for example, in correspondence to the standard applicable at that time, radiators were designed for $90/70^\circ\text{C}$. With the introduction of low-temperature boilers, $70/55^\circ\text{C}$ was the recommended design temperature until the mid-1980s. It was later reduced further to $55/45^\circ\text{C}$ for the use of condensing boiler technology (from around 1985) (Schramek,

Table 1: Composition and U-values for building envelopes in four selected BAKs

	BAK 58-68		BAK 69-78		BAK 79-83		BAK 84-94	
	Composit.	U-value [W/m ² .K]	Composit.	U-value [W/m ² .K]	Composit.	U-value [W/m ² .K]	Composit.	U-value [W/m ² .K]
Roof	Pitched with 5 cm insulation	0.8	Flat with 6cm insulation	0.5	Pitched with 8 cm insulation	0.5	Pitched with 12 cm insulation	0.4
External Wall	Perforated bricks	1.2	lightweight perforated bricks	1	lightweight perforated bricks	0.8	Aerated concrete blocks	0.5
Window	Double-glazing	1.5	Double-glazing	1.2	Double-glazing	1.2	Triple-glazing	1
Ground Floor	Concrete with 1 cm insulation	1.6	Reinforced concrete with 2 cm insulation	1	Reinforced concrete with 4 cm insulation	0.8	Reinforced concrete with 6 cm insulation	0.6

2011). Accordingly, the radiators were also sized with these design temperatures in the simulation models for the individual BAK, in accordance with DIN EN 12831, whereby the individual zones of the simulations were considered as rooms within a building. In common practise, the radiators were oversized by 15% compared to the standard heating load. This oversizing represents an existing potential for optimization within the existing system, for example through hydraulic balancing (Wapler et al., 2018).

Heat pump model

For the initial simulations, a standard inverter-controlled air-to-water heat pump with a buffer tank is modelled for supplying space heating and domestic hot water, with a supply temperature of 55 °C. This supply temperature is chosen because the flow temperature must be set as high as possible, especially with older BAKs, in order to maintain the desired room temperatures with the existing radiators. In addition, 55°C is often the upper limit of the technical performance of standard heat pumps. The required hot water temperature is set at 55°C. The space heating flow temperature is adjusted to the weather via an outdoor temperature-controlled heating curve. In this study high-temperature heat pumps are not considered, as the coefficient of performance (COP) is significantly lower and a correspondingly higher electrical energy requirement is incurred.

For comparison purposes, a simulation is also carried out for each BAK with an ideal heat generator and ideal radiators in the zones. This makes it possible to easily identify any comfort or efficiency deficits in the simulations with the existing radiators and heat pump and to take appropriate optimization measures in the next step. It also serves as a comparative position for the annual heating energy requirement and is also used below to validate the simulation model.

Target temperature, limit temperature und under-temperature hour

The target temperature is the room air temperature, which was selected so that the operative room temperature meets the requirements of the standard for calculating the heating load of different zones. The limit temperature is set at 1 K below the target temperature of each zone accordingly (Table 3). An under-temperature hour is counted if room air temperature is below the limit temperature. With the tolerance range of 1K, a small comfort deficit compared to the target temperature is already permitted here. However, with this actually low deficit, it can be assumed that most residents of a single-family house will tolerate it for a few hours a year. In any case, the negative temperature peaks usually occur at night and therefore have hardly any influence on the perception of comfort in the living space.

Table 3: Target and limit temperature of living room and bed room

Living Room		Bed Room	
Target Temp. [°C]	Limit Temp. [°C]	Target Temp. [°C]	Limit Temp. [°C]
21.0	20.0	20.0	19.0

Procedure to assess the comfort deficits and necessary countermeasures

Step 1: Analysing what room temperature is reached in the buildings when a heat pump is installed with a supply temperature of 55 °C and when the supply temperature is lowered to 45 °C. This step includes quantification of the deviations in the initial situation by visualising the under-temperature degree hours.

Step 2: Implementation of measures

- Measure 1: retrofitting of PI heating controllers for more efficient control of radiators or general control optimization of the heating system, which primarily involves adjusting the heating curve
- Measure 2: partial or complete replacement of old radiators to more efficient new low temperature radiators
- Measure 3: installation of additional heating surfaces in or on walls, ceilings and floors

Simulation Results

The results of a simple validation of the building models of the four BAKs are firstly presented. The annual heating demand of the building models constructed in IDA ICE are compared to the values from the static monthly balance calculation in accordance with DIN V 4108-6. This is followed by the results from the initial simulations of the heat pumps, where the quantification of the deviations in the initial situation are presented by visualising the under-temperature hours. Finally, the improvement of the thermal comfort, or more specifically the under-temperature hours, due to the implementation of the measurements are demonstrated.

Validation

For the validation of the building models, an comparison of the annual heating demand calculated by the dynamic models in IDA ICE and by the static monthly balance method in accordance with DIN 4108-6 have been carried out. For a like-to-like comparison, the room temperature in the dynamic models were adjusted to 19 °C, the same as the room temperature set in the static monthly balance method. It should be noted that in the later part of the analysis, the simulations of the heat demands in dynamic models were again carried out with the previously defined room temperatures (Table 3) in order to maintain comparability with the all simulation variants.

Table 4 shows the annual heat demand for the various BAKs from the thermal-dynamic simulation and according to the static calculation method in accordance with DIN V 4108-6. The statically determined annual heating energy requirements are very consistently around 16% higher than the dynamically calculated ones. It is known from the literature that the deviation between statically and dynamically determined annual heating energy requirements is between 15 and 20% (Leindecker et al., 2014; Sumereder, 2013). These deviations result primarily from the consideration of the building's own storage masses within the thermal-dynamic simulation. The data shown here is within this range. It can therefore be assumed that the simulation boundary conditions applied here lead to reliable and consistent results.

Table 4: Comparison of the annual heat demand of the IDA ICE model with the DIN V 4108-6 method

BAK	Annual Heat Demand [kWh/a]		Deviation [%]
	IDA ICE	DIN V 4108-6	
58-68	34,358	41,204	16.6
69-78	29,921	35,625	16.0
79-83	27,238	32,590	16.4
84-94	22,064	26,244	15.9

Results of initial simulations

A general look at the summarized simulation results (Table 4) clearly shows that the specified room temperatures cannot be maintained in the older two of the BAKs under consideration. This results in a large number of under-temperature hours, and in the case of BAK 58-68 covers nearly the entire heating period. These occur because the maximum heat output of the radiators is considerably reduced by reducing the flow temperature, specially in BAK 58-68, as the difference between the design and operating flow temperature of

the radiator is greatest here. The reduction in flow temperature from 90°C to 55°C results in a reduction in peak output of around 59%. As a result, the radiators are no longer able to cover the room heating load. What is also noticeable is that in the two older BAKs, the annual heating energy requirement of the “55” and “45” variant is significantly lower than that of the “ideal” variant. This is also due to the reduced output of the radiators as a result of the flow temperature reduction. The heat transfer system cannot transfer the required amount of heat to the room.

On contrast, at a flow temperature of 55°C, the average room air temperature in both living room and bedroom in BAK 84-94 can be maintained at 20°C throughout the year, and even the target room air temperature of 21°C in the living room is only undershot in a few exceptional cases. In this simulation variant, there are no under-temperature hours for both zones (Table 4).

Figure 5 and Figure 6 figures show the temperature differences between the limite temperature and the room air tempeprature of the living room, over the simulated period of one year, under the two supply temperatures at 55 °C and 45 °C respectively. In contrast to purely counting the under-temperature hours, the under-temperature degree hours of can be visualised in these two graphs. A under-temperature degree hour [Kh/a] is the product of the temperature falling below the target temperature and the duration of the fall below the target temperature. It therefore indicates not only the frequency but also the severity of the undershoot. In relation to Figure 5 and Figure 6, it is therefore the sum of all values below the setpoint temperature.

In the case with a supply tempeature of 55°C, the number of undertemperature hours and the undertemperature degree hours correlate quite well. It can be clearly seen that the BAK 58-68, with an under-

Table 4: Summarized results of the initial simulations

BAK	Variant	Heat Demand [kWh/a]	Heat Pump SPF	Living Room		Bedroom	
				min. Temp. [°C]	under-Temp. Hour [h]	min. Temp. [°C]	under-Temp. Hour [h]
58-68	ideal	38,135		21	0	20	0
	55	31,387	3.1	16.2	5,557	17	3,399
	45	25,638	3.5	12.8	6,202	13.3	4,995
69-78	ideal	33,282		21	0	20	0
	55	31,896	3.1	19.3	398	18.9	3
	45	28,222	3.6	17.1	5,486	17.6	2,574
79-83	ideal	30,319		21	0	20	0
	55	29,427	3.1	19.3	179	19.6	0
	45	26,601	3.5	17.7	5,098	18.2	1,315
84-94	ideal	24,607		21	0	20	0
	55	24,759	3.1	20.1	0	20.3	0
	45	24,119	3.6	19.7	42	19.9	0

temperature frequency of 5557 h/a (Table 4) and 11198 Kh/a under-temperature degree hours, does not reach the limit room temperature in the living zone for most of the year. In contrast, the other three BACs (69-78; 79-83; 84-94) with significantly lower under-temperature frequencies (398 h/a; 179 h/a; 0 h/a) also generate lower under-temperatures in terms of intensity (82 Kh/a; 30 Kh/a; 0 Kh/a).

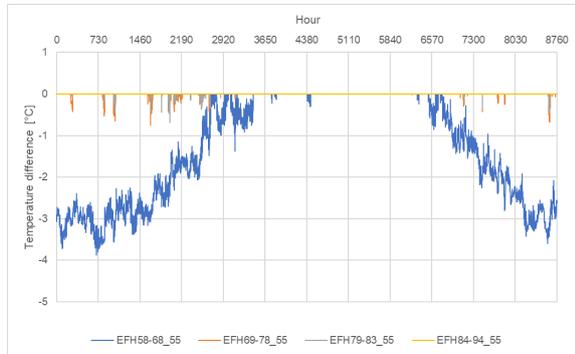


Figure 5. Yearly temperature difference between the room air temperature and the limit temperature of the living room with a supply temperature of 55 °C.

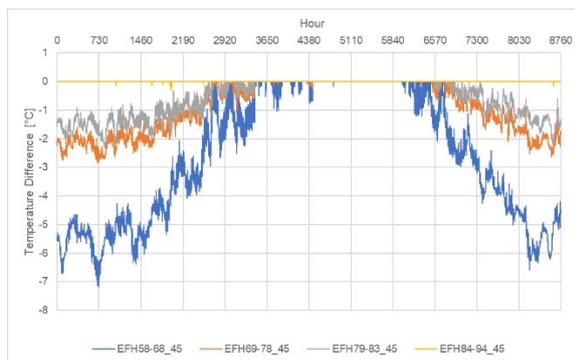


Figure 6. Yearly temperature difference between the room air temperature and the limit temperature of the living room with a supply temperature of 45 °C.

The situation is different for the case with a supply temperature of 45°C. Here, in both cases, high under-temperature frequencies are achieved in the living room in the BAK 58-68 and 69-78. However, the under-temperature degree hours show that the severity of the undershoots is significantly lower in BAK 69-78. There are only 7950 Kh/a of undertemperature degree hours, whereas in the BAK 58-68 there are 22104 Kh/a of undertemperature degree hours. It can also be clearly seen in the visualisation that the deviations in BAK 69-78 are significantly lower than those in BAK 58-68, which leads to the conclusion that despite the high number of overtemperature hours, this problem can generally be solved with less refurbishment effort than in BAK 58-68.

Results of measure implementation

The summarized results of the implemented measures are presented in Table 5.

BAK 84-94

The BAK 84-94 can be converted to a heat pump without major effort and with minimal invasiveness for both supplying temperatures. The only optimization measure required here is the control-related adjustment of the heating curve. This ensures that the radiators, which are slightly undersized due to the flow temperature ranges can emit enough heat to the room to fully meet the specified comfort targets.

It is therefore possible to reduce the flow temperature to 45°C without any problems in order to also increase the overall efficiency of the heat pump system to a good level (SPF: 3.5). This efficiency can be further increased by using ground source heat pump. Here, the system described above with a system temperature of 45°C can be increased to a SPF of 4.2.

Table 5: Summarized results of the implemented measures

BAK	Supply Temp. [°C]	Implemented Measures	SPF	
			ASHP	GSHP
84-94	55	heating curve adjustment	3.1	3.7
	45	heating curve adjustment	3.6	4.2
79-83	55	heating curve adjustment	3.1	3.7
	45	heating curve adjustment + radiators replacement (part)	3.5	4.2
		heating curve adjustment + additional panel heating (14 m ²)	3.5	4.2
69-78	55	heating curve adjustment	3.1	3.7
	45	heating curve adjustment + radiators replacement (part)	3.5	4.2
		heating curve adjustment + additional panel heating (29 m ²)	3.5	4.2
58-68	55	heating curve adjustment + radiators replacement (all)	3.1	3.7
		heating curve adjustment + additional panel heating (37 m ²)	3.1	3.7
	45	heating curve adjustment + radiators replacement (all) + additional radiators	3.5	4.2
		heating curve adjustment + additional panel heating (109 m ²)	3.5	4.2

BAK 79-83

These statements can also be applied to the BAK79-83 with minor restrictions. However, the system temperature can only be reduced to 55°C if only the heating curve is adjusted. If further reduce of supply temperature to 45°C, it will be necessary to replace several existing radiators to heat pump radiators in the hallway and living area.

Alternatively, smaller panel heating systems (hallway: 4 m²; living room: 10 m²) can be installed. If a flow temperature of 55°C is chosen, a SPF of only 3.1 can be achieved. Replacing the radiators and consequently reducing the flow temperature to 45°C enables an increase in the SPF to 3.5. For both cases, an increase in efficiency to a SPF of 3.7 ($T_{\text{supply}}=55^{\circ}\text{C}$) or 4.2 ($T_{\text{supply}}=45^{\circ}\text{C}$) can also be reached through the use of a ground source heat pump.

BAK 69-78

The same applies to BAK69-78. It is possible to reduce the flow temperature to 55°C by adjusting the heating curve. To reduce the flow temperature to 45°C, however, a somewhat greater effort is required in this case. Again, replacing radiators is the preferred option, and in this case, two radiators in the living area and both radiators in the hallway need to be replaced with efficient low temperature radiators. Alternatively, additionally installed surface heating must be increased to 25 m² in the living area zone. In the hallway zone, 4 m² is still sufficient. With a reduced flow temperature of 45°C, a SPF of 3.5 can be achieved. At 55°C it is only 3.1. Here too, an increase to 3.7 or 4.2 is possible by using a ground source heat pump.

BAK 58-68

In BAK 58-68, a very high level of effort is required overall to convert the building for heat pump use. To reduce the flow temperature to 55°C, the heating curve must be adjusted and radiators replaced. All existing radiators in the building must be replaced with new heat pump radiators. If this result is also to be achieved with additional panel heating, 22 m² of ceiling heating would have to be installed in the living area alone. In the hallway zone it would be 3 m² and in the sleeping zone 12 m². By reducing the temperature to 55°C, a SPF of 3.1 (ASHP) or 3.5 (GSHP) can be achieved. If the temperature is to be reduced further to 45°C, the existing radiators must be replaced with larger radiators and two completely new radiators must also be installed in the bedroom zone. Alternatively, 50 m² of ceiling heating would have to be installed in the sleeping zone, 9 m² in the hallway zone and 50 m² in the living zone in addition to the existing heat transfer system. At this system temperature, a SPF of 3.5 (ASHP) and 4.2 (GSHP) can then be achieved.

In general, it must be said here that the effort required to maintain the old heat transfer system does not make

sense for any of the variants in BAK 58-68. Since an additional surface heating system as large as the floor area of the actual zone would have to be installed to reduce the system temperature to 45°C in the residential zone, it must be noted from a technical point of view that the efficiency gain achieved is disproportionate to the effort required. Although a reduction to 55°C is technically feasible, the resulting low efficiency does not justify the expense of the conversion.

Conclusion and outlook

In this paper, thermal-dynamic building simulation was used to investigate whether heat transfer systems in existing single-family homes of various construction ages can continue to be operated when converted to heat pumps without prior façade renovation. Furthermore, various strategies were shown as to how this can be achieved using building and control technology. To this end, the results from the building simulations were examined with regard to comfort and efficiency deficits in order to subsequently develop optimization strategies for the operation of the heat pump system based on the knowledge gained. Finally, the strategies developed were also examined in terms of costs in order to include both technical and economic criteria in the development of the optimization strategy.

In general, it can be stated that the under-temperature degree hours are a very good measure of how much and by what means the heat transfer system needs to be changed. It can be assumed that with a small number of under-temperature degree hours, the comfort deficits can be eliminated by smaller additional heating surfaces, selective radiator replacement or control adjustments. A further finding from the comparison of the under-temperature degree hours is that the design temperatures of the existing heating system are a decisive factor in determining whether operation with a heat pump at low system temperatures is feasible.

The results show that it is possible for the majority of existing buildings of the investigated building age classes to be operated with a heat pump without renovating the building envelope. However, the effort involved in upgrading and modifying the existing heat transfer system increases significantly for older buildings. While in BAK 84-94 the existing heat transfer system can continue to be operated with a high flow temperature of 55°C as well as with the reduced flow temperature of 45°C without structural changes, from BAK 79-83 structural changes or additional measures must be carried out by additionally installing panel heating systems in order to be able to operate the heat pump at an efficient flow temperature of 45°C. At 55°C, it is sufficient to adapt the system to the new flow temperature. At 55°C, it is sufficient to adjust the heating curve in the medium temperature range (0°C-10°C), which was also carried out in the BAK 84-94.

In the BAK 69-78, the comfort targets could also be achieved at 55°C flow temperature by adjusting the heating curve. The air-to-water heat pump used achieved a COP of approx. 3.1 at a flow temperature of 55°C. If the system temperature is reduced to 45°C, the efficiency can be increased and the COP rises to approx. 3.6. It can be concluded that an air-to-water heat pump can be operated in the BAK 69-78 and 79-83 without any structural changes to the existing heat transfer system. However, the efficiency here tends to be in the lower range. It is only really efficient when the system temperature is reduced to 45°C. This can only be achieved in BAK 84-94 without structural changes to the existing heat transfer system.

In general, it should be noted that without retrofitting the building envelop, the buildings still have a very high annual heating demand. Although the installation of a heat pump system significantly reduces the final energy requirement and therefore also CO₂ emissions, this is still significantly higher compared to a building whose façade has been refurbished in accordance with GEG. If these solutions were scaled up to the entire building stock, the electricity requirement for heat pumps is far too high to be covered by the current German electricity grid. Not only capacity problems due to a lack of grid expansion play a role here, but the renewable electricity that would be needed to make the switch to heat pump systems sensible and sustainable in the first place is not yet available in sufficient quantities. In order to counteract this problem and to create a comparative value of how the buildings considered here compare to the GEG variant, a PV system was designed for each variant, which compensates for the difference in final energy demand between the variant considered here and the GEG variant. The size of the PV system thus directly reflects the size of the difference to the GEG variant. The use of PV electricity proved to be the economically better alternative for all variants.

In conclusion, it remains to be said that the majority of the optimization variants considered here cannot be implemented in reality in a meaningful way. Although it is technically possible to operate buildings from all the BAK considered with a heat pump at individual building level without renovating the façade, the costs for older buildings are very high and the benefits are low due to the persistently high annual heating energy requirement. This is because this immense demand for renewably generated electricity could not currently be met at the level of the entire building stock. The strategy for refurbishing the building stock must therefore continue to focus on reducing heating energy requirements. To this end, optimized considerations for the refurbishment of the the heating system, as well as building envelope, must increasingly continue in the future.

Acknowledgement

This work was supported by Bavarian Research Foundation (Bayerische Forschungsstiftung) under the research grant: Forschungsverbund Energie - Sektorkopplung und Micro-Grids – STROM.

References

- DIN V 4108-6, 2003. Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs.
- Günther, D.; Wapler, J.; Langner, R.; Helmling, S.; Miara, M.; Fischer, D. 2020. Wärmepumpen in Bestandsgebäuden: Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt "WPsmart im Bestand". Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Freiburg.
- Klauss, S. 2010. Entwicklung einer Datenbank mit Modellgebäuden für energiebezogene Untersuchungen, insbesondere der Wirtschaftlichkeit.
- Leindecker, H.C.; Luger, S.; Sumeder, E. 2014. Wärmetechnisches Verhalten von Mauerwerk: Dynamische Berechnung versus statische Betrachtung. In: Tagungsband des 8. Forschungsforum der österreichischen Fachhochschulen. FFH 2014. Kufstein, 22.04.2014, S. 57–61.
- Loga, T.; Diefenbach, N.; Knissel, J.; Born, R. 2005. Kurzverfahren Energieprofil. Institut Wohnen und Umwelt (IWU).
- Loga, T.; Stein, B.; Diefenbach, N.; Born, R. 2015. Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. Institut Wohnen und Umwelt (IWU).
- Schramek, E. 2011. Recknagel - Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. 75. Auflage. München: Oldenbourg Industrieverlag München
- Sumeder, E. 2013. Vergleichende dynamische und statische Untersuchung in monolithischer Ziegelbauweise. Masterarbeit. Hochschule Oberösterreich, Wels.
- Wapler, J.; Hess, S.; Kleinstück, M; Ohr, F.; Bongs, C. 2018. Wärmepumpen-Systeme im Mehrfamilienhaus-Bestand. In: Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e.V. (Hg.): DKV-Tagung 2018.

EINE GLEICHMÄßIGE UND KONSTANTE ENERGIEQUELLE MIT DEM NEU ENTWICKELTE ENERGIEPFAHL

Thomas Friedrich¹

¹ Innogration GmbH, DE-54470 Bernkaste-Kues, E-Mail: th.friedrich@innogration.de

Kurzfassung

Um unsere Gebäude zukünftig zu klimatisieren, müssen wir erneuerbare Energien nutzen. Ein wichtiger Baustein auf dem Weg dorthin wird die Wärmepumpe einnehmen. Diese nutzen als Energiequelle die verschiedenen Alternativen der erneuerbaren Energie. Die Leistungsfähigkeit der Wärmepumpe wird von der Temperaturdifferenz zwischen der Quelle und Raumtemperatur bestimmt. Je geringer dieser Wert ausfällt, umso geringer ist der Stromverbrauch. Das vorgestellte Verfahren stellt eine Form von Zwischenspeicher zum Sammeln von Strahlungsenergie dar. Dabei wird die Temperatur in dem Speicher auf ein höheres Niveau als die Ausgangsquellen angehoben. Wird Wärmeenergie gebraucht, kann die Wärmepumpe immer auf eine Quelle mit hohem Temperaturniveau zurückgreifen. Die vorgestellte Energiesäule ist in der Lage, Energie aus Strahlung auf einem hohen Temperaturniveau einzusammeln. Die beiden zugehörigen Wärmespeicher bevorraten die erzeugte Wärmeenergie als Input für die Wärmepumpe im Heizfall. Sofern überschüssiger Strom vorhanden ist, wird das Temperaturniveau in den beiden Speichern angehoben.

Abstract

In order to air-condition our buildings in the future, we must use renewable energies. The heat pump will be an important building block on the way there. These use various renewable energy alternatives as an energy source. The performance of the heat pump is determined by the temperature difference between the source and room temperature. The lower this value is, the lower the power consumption. The method presented represents a form of intermediate storage for collecting radiant energy. The temperature in the storage is raised to a higher level than the output sources. If thermal energy is needed, the heat pump can always rely on a source with a high temperature level.

The presented energy column is able to collect energy from radiation at a high temperature level. The two associated heat storage units store the heat energy generated as input for the heat pump when

heating. If there is excess electricity, the temperature level in the two storage units is raised. angehoben.

Einleitung

Für die Klimatisierung unserer Gebäude nutzen wir bislang fossile Brennstoffe und zum Kühlen verbrauchen wir mit der aktuellen Generation von Klimaanlage den aus den Kraftwerken hergestellten Strom. Wir müssen die Aufgaben der Gebäudeklimatisierung zukünftig mit erneuerbarer Energie bewerkstelligen. Ein wesentliches Element der Wärme- bzw. Kälteerzeugung wird die Wärmepumpe sein. Hierbei gelingt es, die Quellen aus erneuerbarer Energie zu nutzen und mithilfe der Wärmepumpe auf ein brauchbares Temperaturniveau zu bringen.

Der Wirkungsgrad und damit die Leistungsfähigkeit der Wärmepumpe wird entscheidend von der Ausgangstemperatur der verwendeten Quelle bestimmt. Ist die Temperaturdifferenz zwischen der Ausgangstemperatur der Quelle und der Raumtemperatur groß, so wird auch der Wärmepumpe eine entsprechende Leistung abverlangt. Je geringer die Temperaturdifferenz ausfällt, umso größer wird die Jahresarbeitszahl (JAZ) und umso geringer der Stromverbrauch für die Wärmepumpe.

Es geht zukünftig auch darum, den Strom aus erneuerbaren Energien dann zu nutzen, wenn er ansteht. Anstelle von großen Batteriespeicher brauchen wir alternativen für die Wärmespeicherung.

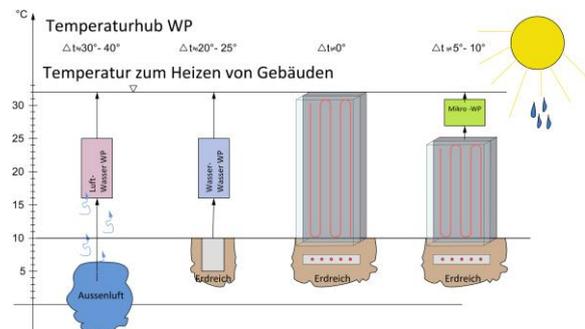


Abbildung 1: Vergleich der Energiequellen in Verbindung mit der Temperaturdifferenz

Die üblichen Wärmequellen für die Wärmepumpe

Als Quelle für die Wärmepumpe stehen die erneuerbaren Energien wie die Luft, die Sonnenstrahlung, das Wasser und das Erdreich zur Verfügung. Zukünftig werden noch weitere Quellen wie z.B. das Abwasser oder die Abwärme von Industrieanlagen nutzen müssen. Von der Umweltenergie steht unendlich viel zur Verfügung, es geht nur darum, diese effizient anzuzapfen. Allerdings ist die mit den vorgenannten Quellen einhergehende Temperatur i.d.R. gering und zudem unterschiedlich hoch. So muss z.B. eine Luftwärmepumpe im Winter bei den kalten Lufttemperaturen eine hohe Temperaturdifferenz überwinden, um die gewünschte Raumtemperatur zu erreichen. Wasser und Erdreich als Quelle starten mit einer höheren und über das Jahr hinaus gleichmäßigen Temperatur. Diese Vorgaben reduzieren den Stromverbrauch. U.U. kann man dann auch geringe Mengen an Strom nutzen, weil dieser gerade aufgrund der Wind- bzw. Sonnenflaute in voller Höhe vorhanden ist.



Abbildung 2: Behälter mit PCM gefüllt als Einbauteile für die Betonelemente

Nutzung der Strahlungsenergie als Quelle

In den Diskussionen über mögliche Energiequellen werden derzeit die Möglichkeiten, aus Strahlung Energie einzusammeln nicht weiterverfolgt. Es gibt zwar die Möglichkeit der klassischen Solarthermie mit den entsprechend konstruierten Absorbern. Allerdings wird bei diesem System eine sehr hohe Temperatur erzeugt, die überwiegend für die Warmwasserbereitung genutzt werden kann. Als Quelle für die Wärmepumpe scheidet diese Quelle aufgrund der hohen Temperatur aus. Man erkennt jedoch an den erzielbaren Temperaturen, wie leistungsstark die Sonnenstrahlung sein kann.

Um die Strahlung auch als Quelle für den Betrieb mit einer Wärmepumpe zu nutzen, braucht es angepasste Absorber und die Möglichkeit die so gewonnene Wärme direkt zu speichern. Die derart bevorratete Wärmeenergie kann dann bedarfsweise als Quelle für die Wärmepumpe genutzt werden.

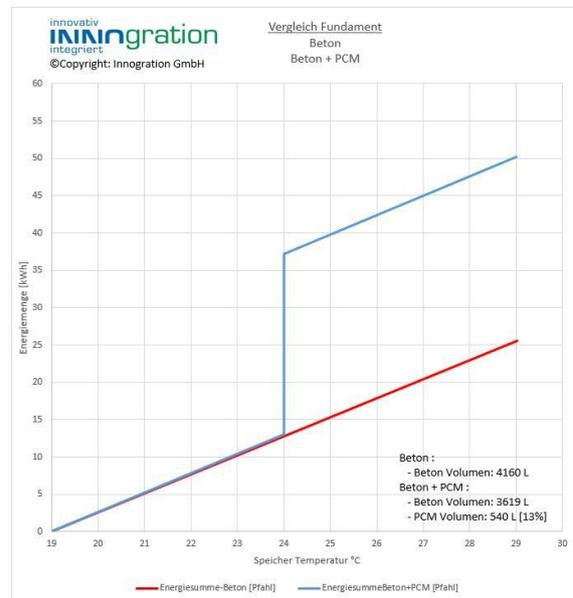


Abbildung 3: Steigerung der Energiedichte mit den Einbauteilen mit PCM

Absorber zur Nutzung der Strahlungsenergie

Die passenden Absorber bestehen i.d.R. aus einer glatten und schwarzen Fläche mit integrierten Rohrregister, um die gewonnene Wärme abführen zu können. Idealerweise sollte eine Glasfläche vor der eigentlichen Absorberfläche angeordnet werden. Dann wird der Luftraum zwischen Glas und Absorber durch die Strahlung erwärmt. Die erwärmte Luft kann jedoch in dem Zwischenraum nicht entweichen und erwärmt den Raum vor der Fläche zusätzlich. Hier spricht man von der so genannten unterdrückten Konvektion. Gewächshäuser funktionieren nach dem gleichen Prinzip. Die erwärmte Luft erhöht die Temperatur auf dem Absorber zusätzlich. Ein derartig konstruierter Absorber ist dann eine zuverlässige Energiequelle sobald die Strahlung der Sonne vorhanden ist. Die Leistung des Absorbers wird von der Strahlungsintensität und der Sonnenscheindauer bestimmt.

Ergebnisse mit solchen Absorbern zeigen auch bei niedrigen Außentemperaturen eine sehr hohe Temperatur auf der Absorberoberfläche. Werte von über 100°C sind üblich. Sobald jedoch die Energie

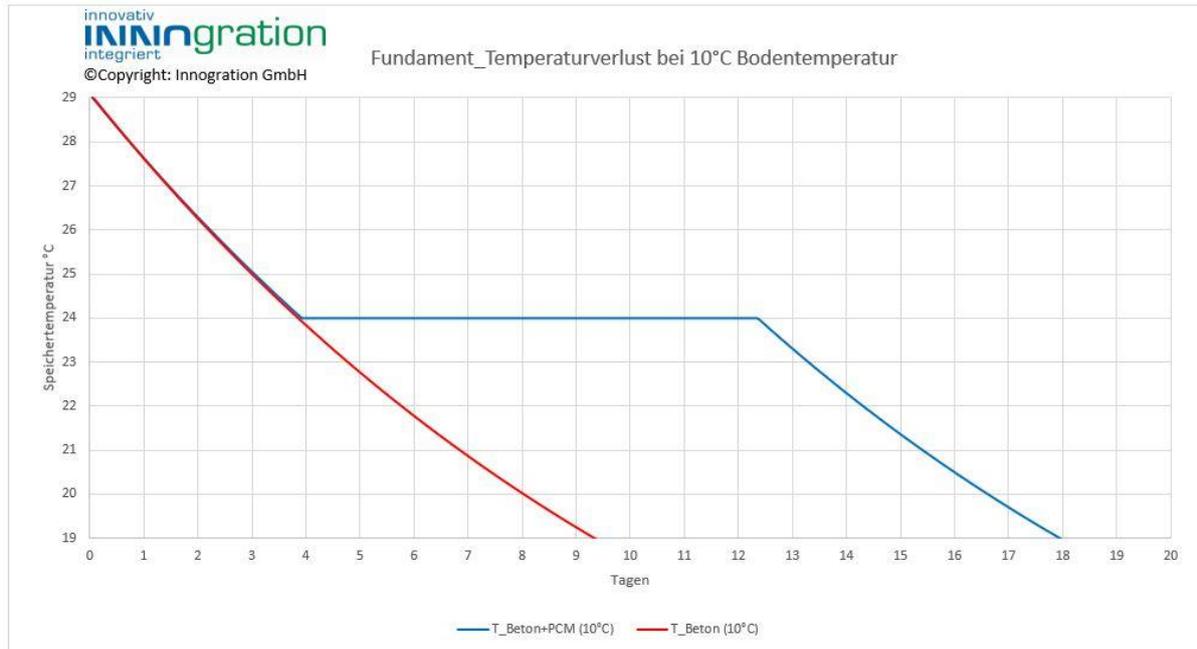


Abbildung 4: Vergleich der Energieverluste des Betonbauteile mit und ohne Einlagen mit PCM

über die integrierten Rohrleitungen abgezogen wird, sinkt auch die Oberflächentemperatur.

Diese Form von Absorberfläche kann man sowohl in der Fassade von Gebäuden unterbringen als auch in einem separaten Bauteil einbauen. I.d.R. sollte die Fläche nach Süden ausgerichtet sein. Um auch die Vorteile dieser Technik für einen nachträglichen Einbau zu nutzen, bietet sich die eigenständige Konstruktion in Form einer Säule an. Die Säule bietet gleichzeitig mehrere Vorteile. Drei Oberflächen der Säule (Osten, Süden, Westen) können unabhängig voneinander betrieben werden, um so den gesamten Sonnenverlauf über einen Tag zu nutzen. Das Volumen der Säule aus Beton wird direkt als Wärmespeicher verwendet ebenso wie das zugehörige Fundament. Wie eingangs erwähnt, brauchen wir beides, die Flächen zum Einsammeln der Strahlung aber auch die Speicher, um die gewonnene Wärmeenergie zu bevorraten. Zur Umsetzung dieser beiden Anforderungen ist die Konstruktion einer Säule mit Fundament bestens geeignet. Säule und Fundament werden aus bewehrtem Beton erstellt, um die statischen Anforderungen zu erfüllen. Zur Speicherung der Wärme im Beton muss die Konstruktion vollständig isoliert werden. Die Absorberflächen werden an den Flächen der Säule angebracht. Dabei liegt i.d.R. eine Blechtafel auf der Isolierung. Der Wärmetransport von der Sammelstelle zum Speicher erfolgt über die in dem Absorber integrierten

Rohrregister sowie den entsprechenden Wärmtauscher in der Betonkonstruktion.

Erhöhung der Wärmespeicherkapazität

Das Betonmaterial besitzt eine hohe Wärmespeicherkapazität. Um diese Eigenschaft weiter zu optimieren, werden in dem Volumen Behältnisse als Einbauteile angeordnet, die mit Phasen-Wechsel-Material (PCM) gefüllt sind. Die Verwendung von PCM bietet nun mehrere Vorteile. Die Wärmespeicherkapazität wird deutlich erhöht. Mit der Auswahl einer sogenannten Schalttemperatur für das PCM lässt sich die Wärme für längere Zeit zugleich auf einem festgelegten Niveau speichern. Bei der Speicherung auf einer konstanten Temperatur sind die Wärmeverluste deutlich geringer als bei reinem Beton mit gleichem Speicherniveau und demzufolge höher Temperatur. Weiterhin besteht bei dem Einbau der vorgenannten Behältnisse die Option, die Zu- und Abfuhr der Wärmeenergie über zwei Wärmetauscher umzusetzen. Einerseits über die Register, die im Beton eingebaut sind, und andererseits über die Leitungen, die innerhalb der Behältnisse eingebaut sind. Diese zweifache Versorgungsleitung eröffnet auch die Option, den Speicher gleichzeitig zu beladen aber auch parallel zu entladen.

Die Behältnisse bestehen aus quadratischen Stahlrohren mit einer innenliegenden Leitung für den Wassertransport und Wärmeleitblechen (sogenannten Fans), die sternförmig um die zentrale Leitung angeordnet sind. Diese Elemente dienen dazu, die

aufgenommene Wärmeenergie im Querschnitt gleichmäßig zu verteilen und das gesamte Material des PCM zu aktivieren.

Die Verwendung von zwei verschiedenen Betonelementen bietet zudem den Vorteil, dass die Schaltemperatur des PCM individuell angepasst werden kann. In dem Turm verwenden wir ein PCM mit hoher Schalttemperatur (29°C) und im Fundament wird eine niedrigere Temperatur (24°C) verwendet. Je nach anstehender Wärme aus dem Absorber wird entweder der eine oder der andere Speicher geladen. Auch wenn die eingesammelte Temperatur niedrig ausfällt kann zumindest ein Speicher befüllt werden. Oder bei unterschiedlichen Temperaturverlauf über den Tag kann immer ein Speicher bedient werden.



Abbildung 5 Vorgefertigter Fundamentblock für die Energiesäule

Herstellung der Betonbauteile

Die Abmessungen von Säule und Fundament wurden aufgrund der statischen Anforderungen dimensioniert. Beide Teile wurden als Fertigteil in dem Werk hergestellt. Diese Vorgehensweise hatte den Vorteil, dass die Einbauteile der mit PCM gefüllten Behältnisse strukturiert und zuverlässig eingebaut werden konnten. Die länglichen Behältnisse werden mithilfe einer Schablone in mehreren Reihen montiert. Die zugehörigen Leitungen werden angeschlossen, so dass sie gleichmäßig durchströmt werden. Die ergänzenden Rohrregister für den Energieaustausch mit dem Beton werden ebenfalls bei der Vormontage aller Einbauteile berücksichtigt.

Die Schalung für Turm und Fundament wurde mit der zugehörigen Bewehrung vorbereitet. Nachdem die vorgefertigte Einheit für die Einbauteile in der Schalung fixiert ist, wurden die Bauteile betoniert. Wegen der hohen Dichte von Einbauteilen wurde ein

selbstverdichtender Beton mit einer Korngröße von 8mm verwendet.

Unter den geschützten Verhältnissen des Werks konnten die heiklen Einbauarbeiten zuverlässig erledigt werden.



Abbildung 6: Montage der Energiesäule mit den vorgefertigten Elementen für das Fundament und den Turm

Montage der vorgefertigten Bauteile

Die einzelnen Bauteile werden zum Bestimmungsort geliefert und montiert. Dann erfolgen die restlichen Arbeiten wie die Isolation, der Einbau der Absorberflächen und der vorgesetzten Glasscheibe. Die Leitungen von den Absorbern müssen an die Verteiler angeschlossen werden, ebenso wie die Leitungen der Register des Wärmespeichers. Diese Arbeiten werden in einem Schaltschrank zusammengeführt, der auf der Nordseite der Säule integriert ist. Ein Steuerprogramm übernimmt nun die Entscheidungen, welche Rohrleitungen in den Absorberflächen aktiv werden und welcher Speicher geladen wird.

Messergebnisse

Die bisherigen Ergebnisse zeigen das ausgeprägte Verhalten der einzelnen Flächen entsprechend dem Tagesgang der Sonnenstrahlen. Da die Register einzelnen schaltbar sind, lässt sich jeweils das

Maximum an Wärmeenergie einsammeln. Die Ergebnisse wurden mit der Simulation verglichen und die Annahmen für die Simulation validiert. In Abhängigkeit von einem Wetterdiagramm mit den Angaben über die Strahlungsintensität und die Sonnenscheindauer lässt sich das Ergebnis der Wärmeausbeute im Voraus bestimmen. Entsprechend kann der Einsatz der Säule und ihr Ergebnis an jedem Ort vorausgeplant werden.

Die Speichertemperatur kann auf lange Sicht gleichmäßig gehalten werden und die Wärmeverluste entsprechen den angestellten Überlegungen. Die Ergebnisse führen auch zu weiteren Überlegungen für eine alternative Dämmung, bzw. einer angepassten Möglichkeit für das Be- und Entladen.

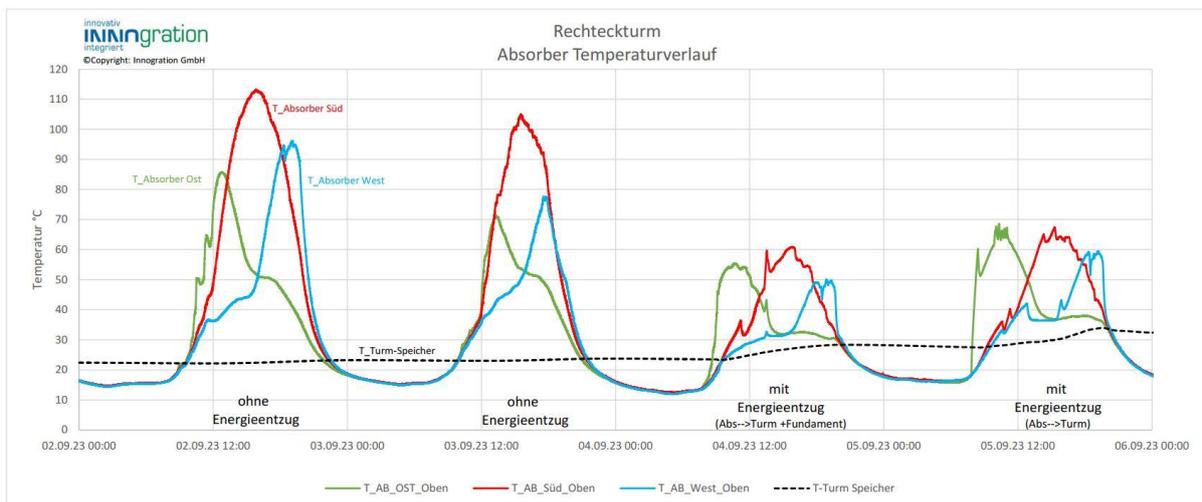


Abbildung 7: Temperaturverhalten in den Absorbern mit und ohne Energieentzug

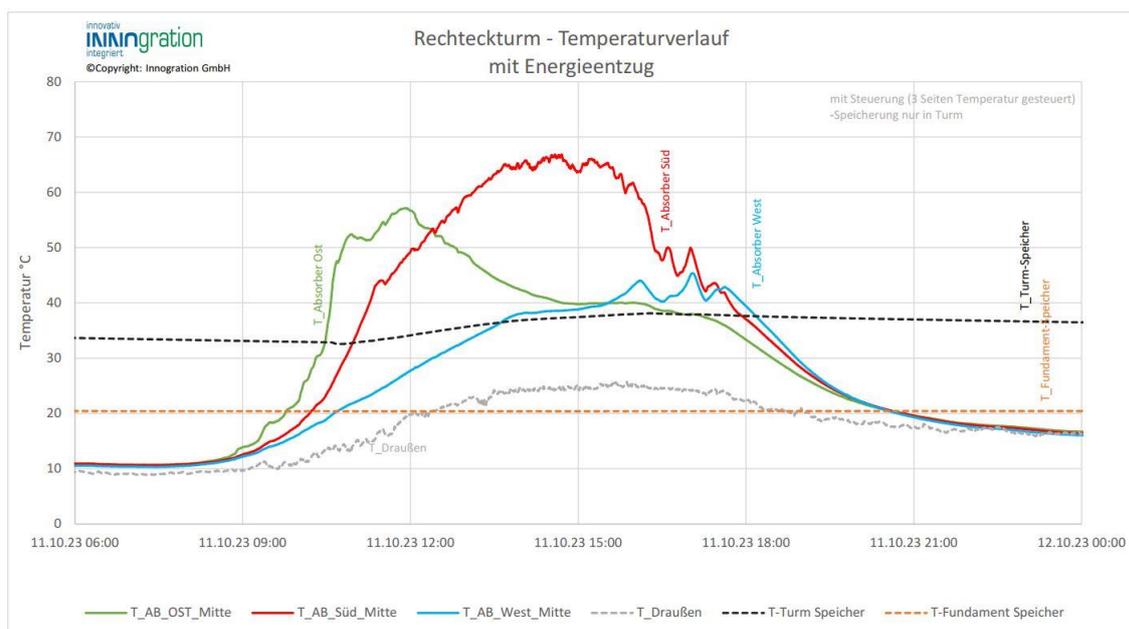


Abbildung 8: Temperaturverlauf in dem Betonspeicher des Turms mit und ohne Energiezufuhr

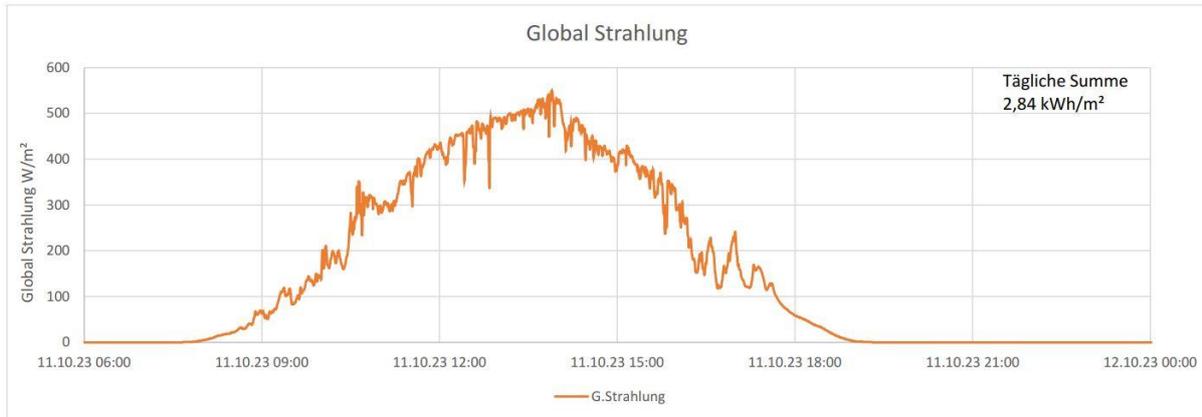


Abbildung 9: Zugehörige globale Strahlung

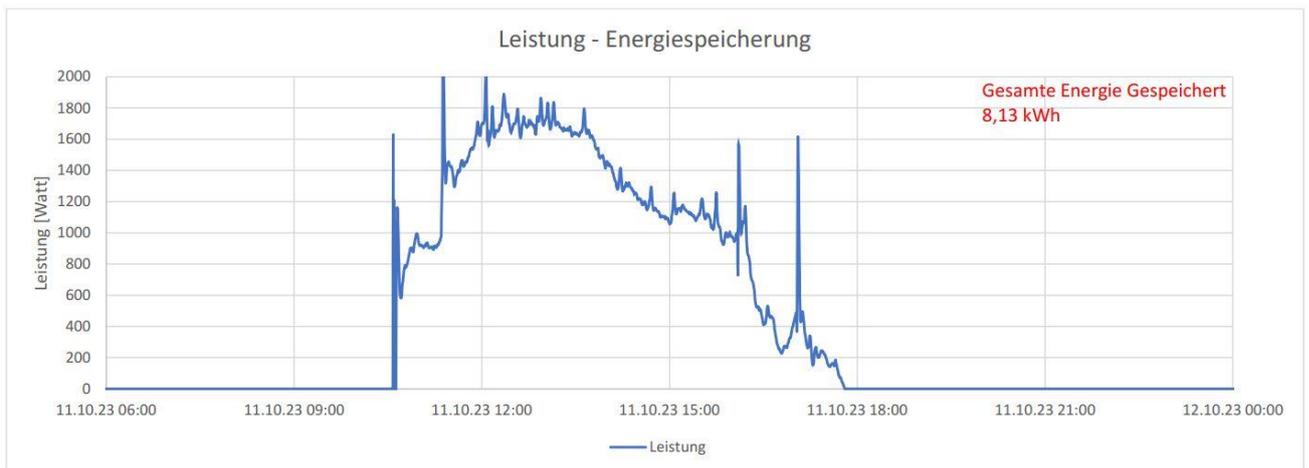


Abbildung 10: Zugehörige globale Strahlung

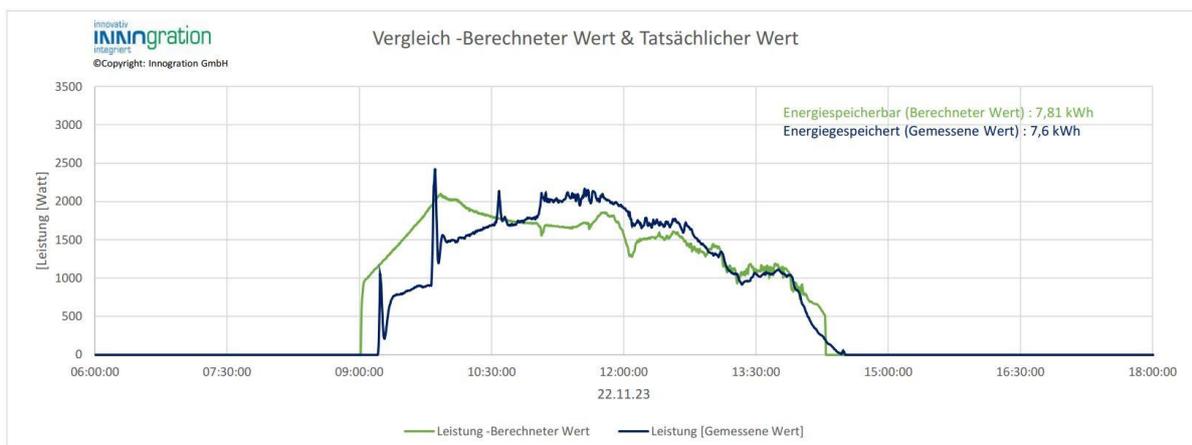


Abbildung 11: Zur Strahlung zugehörige Energieausbeute über die Absorber

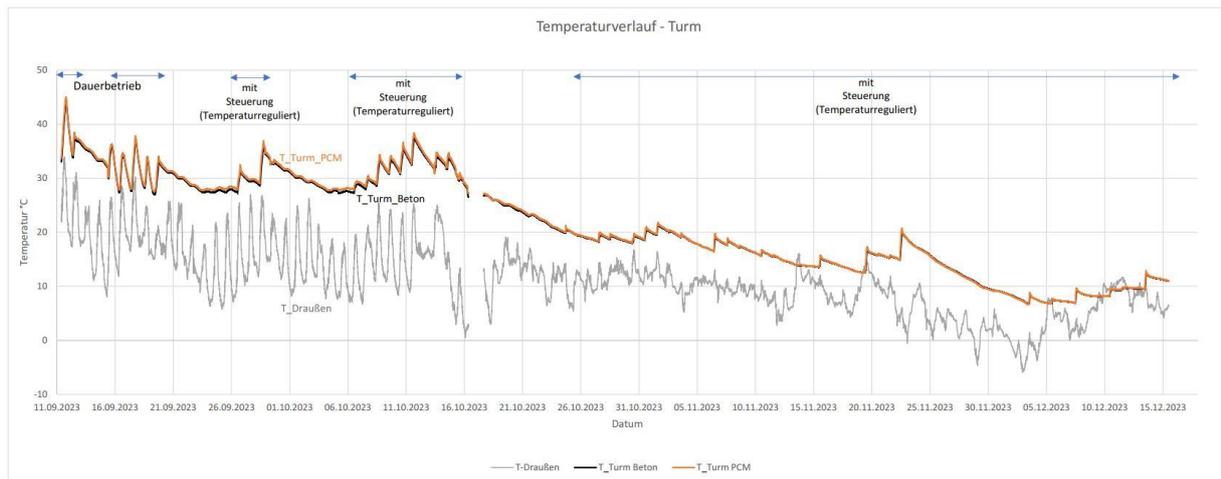


Abbildung 12: Temperaturverlauf in dem Betonspeicher des Turms mit und ohne Energiezufuhr

Ergänzungen

Die Säulenkonstruktion wird zukünftig noch ergänzt mit den Möglichkeiten, Strom aus PV zu gewinnen. Zum Einsatz kommt ein Solartracker, um bei kleiner Fläche die maximale Ausbeute an Strahlung zur Stromerzeugung zu nutzen. Gespeichert wird der Strom in einer Batterie mit 48V. Die bereits entwickelte thermoelektrische Wärmepumpe kann diesen Strom direkt ohne Umwandlung nutzen. Auch die Pumpen für den Wärmetransport über die Wasser geführten Leitungen arbeiten mit dem niedrigen Spannungsniveau.

Auf der Spitze des Turms werden noch kleine Windturbinen angeordnet, um ergänzend zu dem PV-Strom eine weitere Stromquelle zu nutzen, die alternativ zum Sonnenschein arbeiten.

Die Speicherung des Stroms bietet zudem die Option, bei überschüssigem Strom über die integrierte Wärmepumpe das Temperaturniveau in den beiden Speichern kurzfristig zu erhöhen. Das erfolgt dann ohne zusätzliche Kosten. Die Temperatur der Energiequellen werden in diesem Fall angehoben und für den nächsten Abruf im Heizfall vorbereitet. Bei einer höheren Temperatur braucht die Wärmepumpe weniger Strom. Derart kann der Wärmespeicher den Stromspeicher entlasten, weshalb die Kapazität der Batterie auf einem niedrigen Niveau ausgelegt werden kann.

Die Energiespeicherung erfolgt mit den hier vorgestellten Wärmespeichern. Damit wird eine Alternative zur einer Strombatterie vorgestellt.

Weitere Anwendungen und zukünftige Entwicklungen

Absorber und Wärmespeicher können auch an anderer Stelle in Gebäuden vorgesehen werden. Die Fassade ist eine ideale Fläche zum Sammeln von Strahlung. Die im Gebäude verwendeten Betonbauteile lassen sich auch multifunktional in Verbindung mit den Einbauteilen mit eingebauten Behältnissen mit PCM nutzen. Dazu bieten sich die Bodenplatte und auch die Kellerwände direkt an. An diesen Herausforderungen werden wir mit der Umsetzung des Gebäudes InnoTiny arbeiten.



Abbildung 13: Betrieb der Energiesäule

Kurzfassung

Um unsere Gebäude zukünftig zu klimatisieren, müssen wir erneuerbare Energien nutzen. Ein wichtiger Baustein auf dem Weg dorthin wird die Wärmepumpe einnehmen. Diese nutzen als Energiequelle die verschiedenen Alternativen der erneuerbaren Energie. Die Leistungsfähigkeit der Wärmepumpe wird von der Temperaturdifferenz zwischen der Quelle und Raumtemperatur bestimmt.

Je geringer dieser Wert ausfällt, umso geringer ist der Stromverbrauch. Das vorgestellte Verfahren stellt eine Form von Zwischenspeicher zum Sammeln von Strahlungsenergie dar. Dabei wird die Temperatur in dem Speicher auf ein höheres Niveau als die Ausgangsquellen angehoben. Wird Wärmeenergie gebraucht, kann die Wärmepumpe immer auf eine Quelle mit hohem Temperaturniveau zurückgreifen. Die vorgestellte Energiesäule ist in der Lage, Energie aus Strahlung auf einem hohen Temperaturniveau einzusammeln. Die beiden zugehörigen Wärmespeicher bevorraten die erzeugte Wärmeenergie als Input für die Wärmepumpe im Heizfall. Sofern überschüssiger Strom vorhanden ist, wird das Temperaturniveau in den beiden Speichern angehoben.

Zusammenfassung

Mit dem vorgestellten Verfahren wird insbesondere die Strahlungsenergie als Quelle genutzt. Dazu ist es erforderlich, diese Form von erneuerbarer Energie mit entsprechenden Verfahren zu absorbieren. Gleichzeitig braucht es entsprechende Wärmespeicher, um die über die Absorber eingesammelte Wärmeenergie zu bevorraten. Die gespeicherte Wärmeenergie dient dann als Quelle für den eigentlichen und oftmals zeitversetzten Bedarf, um Gebäude zu beheizen. Die vorgestellte Energiesäule bietet sowohl die Möglichkeit, die Strahlungsenergie einzusammeln als auch diese zu speichern. Dieses System bietet eine ideale Ergänzung, um den Bedarf an Heizenergie mit dem zeitversetzten Angebot an erneuerbarer Energie zu kompensieren. Mit dem zweifachen Wärmespeichersystem bietet sich auch die Möglichkeit, Strom zu speichern, indem Wärme erzeugt und abgespeichert wird.



CO₂-FREIE WÄRMEVERSORGUNG EINER STADT

Eric Störlein¹

¹ IPH Selzer Ingenieure GmbH, Weimar, E-Mail: E.Stoerlein@IPHKS.de

Kurzfassung

Im Zuge der angestrebten Klimaneutralität stehen wir alle vor immensen Herausforderungen. Insbesondere im Gebäudebestand steckt enormes Potential im Hinblick auf die Einsparung von Energie und CO₂-Emissionen. Im Zuge der Wärmenetzstrategie 2040 gemäß § 8 Absatz 5 Thüringer Klimagesetz sollen dabei alle Stadtwerke eine erste Betrachtung für die bestehende Fernwärmeversorgung vorlegen. Die Stadtwerke Heilbad Heiligenstadt GmbH sind sich dabei ihrer Verantwortung bewusst und planen den weiteren Umstieg zu einer hundertprozentigen regenerativen Wärmeversorgung. Um die Potentiale zu untersuchen, hat das Ingenieurbüro IPH Selzer Ingenieure GmbH ein Transformationskonzept durchgeführt. Dieses betrachtet sowohl die mittels Fernwärme als auch die über Erdgas versorgten Objekte. Hinsichtlich der Fernwärme werden die Möglichkeiten zur Steigerung des derzeitigen regenerativen Anteils von ca. 60 Prozent analysiert, auch in Vorausschau, auf die ab 2032 auslaufenden Vergütungsmechanismen des derzeit in der Verstromung und integrierter Wärmenutzung eingesetzten auf Erdgasqualität aufbereiteten, Biogases. Für die momentan mit Erdgas direkt beheizten Liegenschaften sind Konzepte zur regenerativen Versorgung im Hinblick auf Wirtschaftlichkeit und einem hohen regenerativen Standard entwickelt worden. Hierbei wurde die Gestaltung in Form von kleinen Quartieren oder größeren Versorgungslösungen mittels Nahwärme berücksichtigt. Betrachtet wurde der Einsatz von solarer Wärmebereitstellung sowie der Einsatz von Wärmepumpen im Hochtemperaturbereich mit den Quellmedien Luft, Geothermie, Abwasser und Flusswasser. Weiterhin wurden die Einsatzmöglichkeiten von Biogas und regenerativ erzeugtem Wasserstoff in Erdgasqualität untersucht. Innovative Ansätze und neue Technologien wurden im Konzept mit eingebracht.

Teile des Beitrages

Titel

CO₂-freie Wärmeversorgung einer Stadt

Autoren

M.Eng. Eric Störlein
Dipl. Ing.(FH) Kathrin Selzer
M.Eng. Florian Stelling

Kontaktdaten

M.Eng. Eric Störlein,
e.stoerlein@iphks.de, +49 3643 4574080,
IPH
99423 Weimar, Friedrich-Ebert-Straße 38

Kurzfassung/Abstract

Um die Umstellung auf eine CO₂-freie Wärmeversorgung zu realisieren, müssen alle wärmeversorgten Bereiche der Stadt Heiligenstadt untersucht werden. Dabei ist es notwendig, dass für jeden einzelnen Teilbereich ein individueller Lösungsansatz gewählt wird.

Die Bereiche, die untersucht wurden, waren:

- Die Fernwärmenetze Liethen und Sperberwiese
- Vitalpark
- Kurparkkliniken
- Objekte von Wohnungsgenossenschaft

Für jeden der genannten Bereiche erfolgte zunächst eine Bestandaufnahme. Anschließend wurden technische Lösungen ausgearbeitet, die auf den jeweiligen Teilbereich abgestimmt und die vorliegenden Energiequellen (Abwasser, Flusswasser, Geothermie) optimal nutzen. Die erarbeiteten Lösungsansätze finden sich in den jeweiligen Energiekonzepten wieder. Die Konzepte sind darauf ausgelegt, sowohl im Zwischenstand (nur bei Fernwärmenetz Liethen und Sperberwiese) als auch in der Endvariante eine CO₂-neutrale Wärmeerzeugung zu ermöglichen. Für beide Fernwärmenetze wurden zusätzlich Simulationen mit Simulation X durchgeführt, um den Wärmeverbrauch der Netze besser abschätzen zu können. Auf Grundlage der erstellten Energiekonzepte erfolgte unter Berücksichtigung der gewählten

Wärmeerzeuger und der notwendigen Peripherie eine Ermittlung der Betriebs- und Investitionskosten.

In order to realize the conversion to a CO₂-free heat supply, all areas of the city of Heiligenstadt supplied with heat must be examined. It is necessary to select an individual solution approach for each sub-area.

The areas that were examined were:

- The Liethen and Sperberwiese district heating networks
- Vitalpark
- Kurpark clinics
- Housing cooperative properties

For each of the areas mentioned, an inventory was first carried out. Technical solutions were then developed that are tailored to the respective sub-area and make optimum use of the available energy sources (wastewater, river water, geothermal energy). The solutions developed are reflected in the respective energy concepts. The concepts are designed to enable CO₂-neutral heat generation both in the interim stage (only for the Liethen and Sperberwiese district heating networks) and in the final variant. Simulations were also carried out with Simulation X for both district heating networks to better estimate the heat consumption of the networks. The operating and investment costs were calculated based on the energy concepts created, considering the selected heat generators and the necessary peripherals.

Energiekonzepte zur Umstellung auf CO₂-freie Wärmeversorgung

Die ausgearbeitete Machbarkeitsstudie „CO₂-freie Wärmeversorgung der kommunalen Unternehmen der Stadt Heilbad Heiligenstadt“ untersucht, wie die Transformation in eine CO₂-neutrale Wärmeversorgung der Stadtwerke Heilbad Heiligenstadt gelingen kann.

Fernwärmenetz Liethen

Mit dem Einsatz von Wärmepumpen und Solarthermie wird eine grüne Fernwärme für das Gebiet Liethen erreicht. Die Wärmepumpen nutzen dabei die Quelle Abwasser und einen separaten Eisspeicher. Zusätzlich werden sie mit Großwärmepumpen, die das Kältemittel CO₂ nutzen, ergänzt.

Solarthermie unterstützt bei der Wärmebereitstellung und der Regeneration des Eisspeichers. Im Sommer ist die Solarthermie in der Lage den notwendigen Wärmebedarf eigenständig zu decken.

Fernwärmenetz Sperberwiese

Analog zum Fernwärmenetz Liethen ist eine Umstellung auf den Wärmepumpenbetrieb notwendig, um das Fernwärmenetz Sperberwiese CO₂-neutral zu versorgen. Insgesamt kommen bei

den Wärmepumpen drei verschiedene Quellenmedien zum Einsatz. Das erste Medium, welches genutzt wird, ist das Abwasser aus einem Sammelschacht in der Nähe des Heizhauses. Daneben wird das Flusswasser der Leine als Quelle genutzt. Aufgrund der geringen Temperaturen im Fluss Leine kann die Wärmepumpe allerdings nicht ganzheitlich genutzt werden. Der Großteil der Wärme wird mit CO₂-Wärmepumpen erzeugt. Die Quellentemperatur wird durch einen separaten Wärmeerzeuger (Solarthermie oder Hackschnitzel) auf ein konstantes, für den Wärmepumpenbetrieb effizientes, Temperaturniveau erwärmt.

Vitalpark

Die Modernisierung der Wärmeversorgung des Vitalparks erfolgt mit Hilfe eines Teils der bestehenden Kraft-Wärme-Kopplung und einer Erweiterung um ein Wasserstoff Blockheizkraftwerk. Das Bestands- BHKW wird auf Biogas umgestellt und der notwendige Wasserstoff für das zweite BHKW kann mit dem eigenem Elektrolyseur hergestellt werden. Die anfallende Abwärme lässt sich im Vitalpark aufgrund des hohen Grundlastbedarf an Wärme durchgehend abnehmen. Der restliche Wärmebedarf wird mit einem Biogas betriebenen Spitzenlastkessel bereitgestellt. Die Biogaseinsparungen bei den Fernwärmenetzen decken den zusätzlichen Bedarf des Vitalparks.

Kurparkkliniken

Die Substituierung des Gasbedarfs lässt sich bei den Kurparkkliniken nur teilweise erreichen. Neben einem Einsatz von Sole-Wasser Wärmepumpen wird noch auf ein bestehendes BHKW zurückgegriffen. Nur durch eine Umstellung beim BHKW auf Biogas, analog zum Vitalpark, lässt sich eine CO₂-neutrale Wärmeversorgung erreichen.

KOWO und Wohnungsgenossenschaft Heilbad Heiligenstadt

Um den Gebäudebestand beider Genossenschaften mit CO₂-neutraler Wärme zu versorgen, muss eine Kopplung zwischen den Fernwärmenetzen und den Liegenschaften erfolgen. Dies gelingt durch ein eigenes Kaltnetz und dezentralen Wasser/Wasser-Wärmepumpen. Diese sind in jedem Objekt der Genossenschaften untergebracht und erhalten die benötigte Entzugsleistung aus dem neu errichteten Kaltnetz. Mit der bereitgestellten Wärme aus dem Rücklauf der Fernwärmenetze wird eine ganzjährig konstante Quellentemperatur für den Wärmepumpenbetrieb ermöglicht.

Gesamtvariante

Die Gesamtvariante setzt den Fokus auf die Umstellung der bisherigen Wärmeerzeuger, vor allem in den Fernwärmenetzen, auf einen Wärmepumpenbetrieb. Um dies zu realisieren,

müssen zuerst die Rücklauftemperaturen der Fernwärmenetze abgesenkt werden. Ohne dieses Vorgehen ist ein Wärmepumpenbetrieb nicht umzusetzen.

Unter Berücksichtigung der in den Fernwärmenetzen geforderten hohen Vorlauftemperaturen müssen die Quellentemperaturen für die Wärmepumpen auf einem Maximum gehalten werden. Die Lösung im Bereich Sperberwiese hat dafür einen Weg aufgezeigt. Gleichzeitig bieten mögliche Varianten eines eigenen Kaltnetzes für den Quellspeicher neue Anschlussmöglichkeiten an die Fernwärmenetze. Damit besteht die Möglichkeit, angrenzende Objekte (z.B. Wohngebiete) über dezentrale Wasser/Wasser-Wärmepumpen an die Trasse anzubinden.

Im Sinne weiterer Effizienzsteigerungen sollten eingesetzte Wärmepumpen gleichzeitig Wärme und Kälte produzieren. Durch diese Maßnahme wird der COP nahezu verdoppelt. In unmittelbarer Nähe der Fernwärmenetze sind potenzielle Abnehmer von Kälteenergie (z. B. Magna und das zukünftige Eichsfeld Klinikum) angesiedelt. Durch ihre Einbindung kann ein weiteres Vertriebsfeld der Eichsfeld-Werke entstehen.

Für den Aufbau eines effizienten und klimaschonenden Fernwärmenetzes ist es wie in der Studie dargestellt zwingend notwendig, alle zur Verfügung stehenden regenerativen Wärmeerzeuger oder Abwärmequellen in die Energiekonzeption einzubeziehen.

Dank der ganzjährig konstanten Temperaturen stellt das Abwasser in diesem Zusammenhang eine zuverlässige Wärmequelle dar. Mit der Quellentemperatur des Abwassers können Wärmepumpen ganzjährig effizient betrieben werden.

Eine weitere geeignete Wärmequelle ist die Agrothermie. Zwar ist die Technologie noch nicht sehr weit verbreitet, bietet aber besonders für das Fernwärmenetz Liethen enormes Potential. Die umliegenden landwirtschaftlichen Flächen könnten als Flächenkollektor den Großteil der benötigten Quellenenergie bereitstellen.

Als 100 % regenerative Wärmeerzeugung fügt sich die Solarthermie perfekt in das Gesamtkonzept ein. Eine Herausforderung stellt hierbei die Flächenkonkurrenz zu anderen Anwendungsmöglichkeiten dar. In Form einer Großanlage ist Solarthermie eine sehr kostengünstige Möglichkeit zur Wärmeerzeugung und ergänzt besonders in den Sommermonaten sinnvoll die Fernwärme. Darüber hinaus kann sie auch in den Wintermonaten als Energiequelle für die Quellspeicher genutzt werden.

Die mit der Modernisierung der Wärmenetze entstehenden Biogasüberschüsse können für andere Teilbereiche übertragen werden. Besonders für die

Liegenschaften der Wohnungsgenossenschaften mit ihrem hohen Erdgasverbrauch wäre das eine gute Übergangslösung. Um langfristig eine regenerative Wärmeerzeugung für die Gebäude zu etablieren, ist eine Umstellung auf den Wärmepumpenbetrieb notwendig. Hierbei hat sich der Einsatz von Wasser/Wasser-Wärmepumpen in Kombination mit einem eigenen Kaltnetz als innovative und sinnvolle Lösung herausgestellt. Die Kaltnetze sind mit den Fernwärmenetzen verbunden und sorgen für eine Auskühlung der Rücklauftemperaturen, was wiederum eine Effizienzsteigerung der Großwärmepumpen bewirkt. Durch diese Maßnahme werden auf Seiten der Kaltnetze ganzjährig konstante Quellentemperaturen für die dezentralen Wärmepumpen bereitgestellt.

Auch die Liegenschaften der Kurparkkliniken profitieren von den geplanten Maßnahmen im Bereich der Fernwärmenetze. Durch die hohen Biogaseinsparungen lässt sich die Wärmeversorgung CO₂-neutral gestalten. Es ist empfehlenswert, die bestehende Wärmeversorgung mit Sole/Wasser-Wärmepumpen zu ergänzen, um den Gasverbrauch zu reduzieren. Perspektivisch lassen sich auch die Liegenschaften in das Fernwärmenetz Sperberwiese einbinden. Durch dieses Vorgehen kann die bestehende Wärmeversorgung entfallen.

Mit einer Umstellung der Energieversorgung des Vitalparks lässt sich ein weiterer Energieträger in das Energiekonzept integrieren. Der Vitalpark ist mit seinem Heizungsprofil gut für den Einsatz eines Elektrolyseurs geeignet und kann eine nicht unerhebliche Wärmemenge für das Objekt produzieren. In Kombination mit einem Wasserstoff-BHKW und einem weiteren, auf Biogas umgestellten Bestands BHKWs lässt sich die Liegenschaft nahezu klimaneutral versorgen. Als Wasserstoffproduzent kann der Elektrolyseur gleichzeitig als Grundlage für eine neue Ausrichtung in der Verkehrsinfrastruktur der Stadt Heilbad Heiligenstadt dienen.

Mit der Umstellung auf eine vorwiegend wärmepumpenbasierte Wärmeerzeugung ändert sich der notwendige Energieträger grundlegend. Durch die Ablösung vom Erdgas wird der Strombedarf in Zukunft enorm ansteigen. Damit die Fernwärme »grün« bleibt, muss der bezogene Strom für die Fernwärmenetze und alle neuen Wärmeerzeuger aus regenerativen Quellen stammen. Die Eichsfeldwerke produzieren bereits seit 2021 zu 100 % Ökostrom. Somit ist die Grundlage für ein nachhaltiges Betreiben der Wärmepumpen gesichert. Doch auch die lokale Stromerzeugung durch PV und Windkraft kann für das Gesamtkonzept herangezogen werden um eine nachhaltige Wärmeerzeugung zu realisieren. Besonders der Einsatz von Agri-PV und die Belegung der öffentlichen Dachflächen mit Photovoltaik-Modulen

bieten enormes Potential, um kurzfristige wie langfristige Erfolge zu erzielen.

Energiekonzeptes vor allem auf politische und »ideologische« Argumente.

Zusammenfassung

Die Untersuchung zeigt, dass die Transformation auf eine regenerative Art der Wärmeversorgung in allen Zonen umsetzbar ist. Um eine vollständige Modernisierung der Wärmeversorgung realisieren zu können, müssen zunächst erhebliche Summen investiert werden.

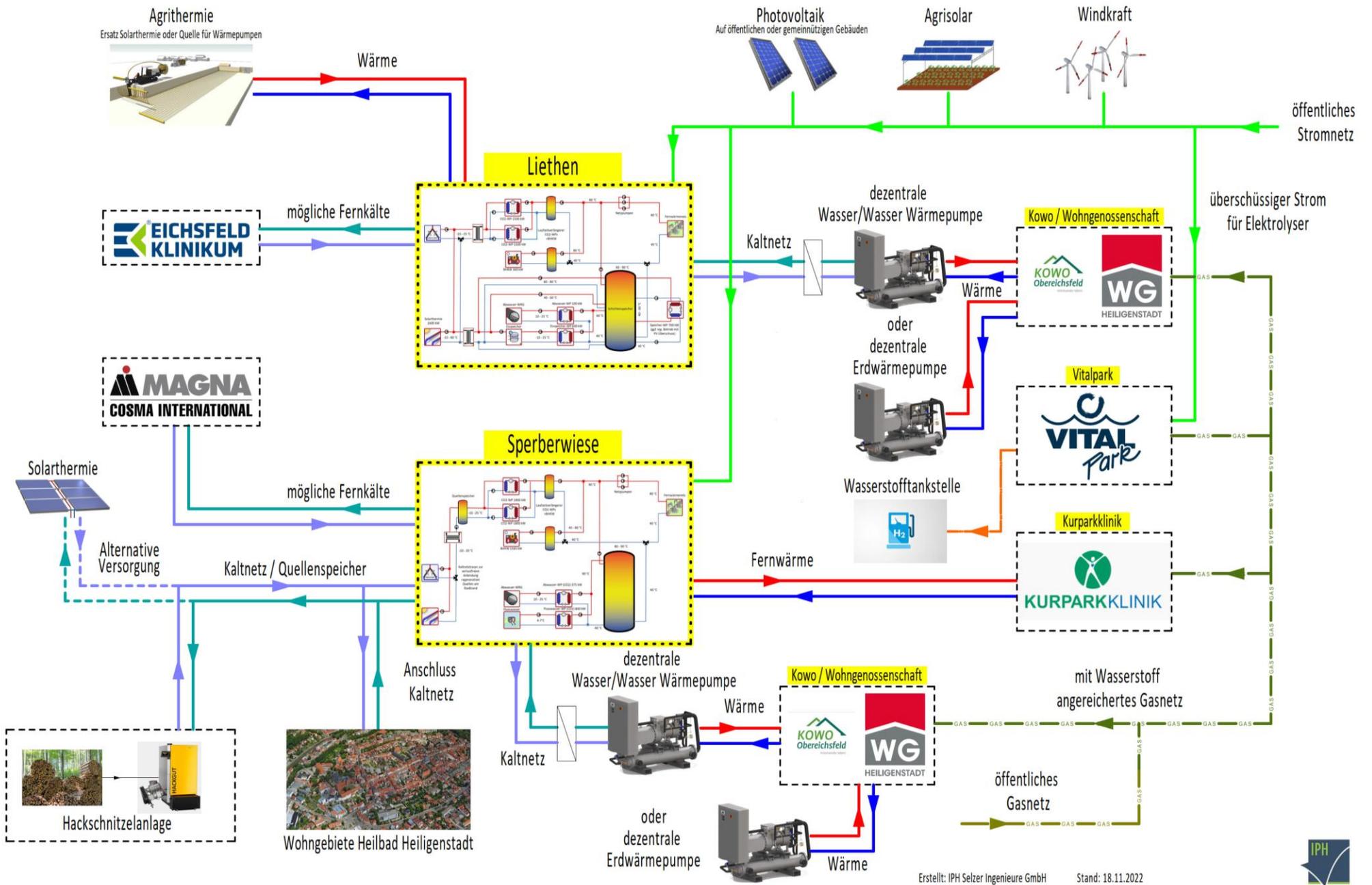
Der Fokus der Umstellung muss zuallererst auf den Fernwärmenetzen liegen. Erst durch ihre erfolgreiche Transformation lassen sich positive energetische Effekte auf weitere Wärmenutzungsbereiche der Stadt Heilbad Heiligenstadt bewirken. Die Bestandsaufnahme zeigt, dass die Fernwärmenetze derzeit der größte Abnehmer von Biogas sind und dabei bereits zu 60 % mit grüner Energie betrieben werden. Durch eine Reduktion des absoluten Gasverbrauchs ist es möglich, das eingesparte Biogas übergangsweise in anderen Teilbereichen, innerhalb derer sich eine Umstellung komplizierter gestalten würde, einzusetzen. Damit das gelingen kann, müssen allerdings erhebliche Eingriffe in den Fernwärmenetzen vorgenommen werden.

Besonders die hohen Investitionssummen zeigen, dass die Umstellung auf eine »grüne« und nachhaltige Wärmeversorgung eine enorme finanzielle Herausforderung darstellt. Hinzu kommt, dass sich die Betriebskosten bzw. der Wärmepreis trotz der hohen Investitionssumme nicht signifikant reduzieren lassen.

Diese Herausforderung lässt sich mit Fördergeldern nur teilweise lösen, da die Betriebskosten auch ohne kapitalgebundene Kosten bei den meisten Varianten höher als im Bestand oder nur minimal geringer sind. Eine Wirtschaftlichkeit konnte aufgrund der Energiepreise nur teilweise erreicht werden. Das liegt zum einen an der zu hohen Preisspanne zwischen Gas und Strom sowie den generell zu hohen Stromkosten. Hinzu kommen die starken Preisschwankungen bei Gas und Strom und die unvorhersehbare und nicht konsequente Entwicklung beim CO₂-Preis, welche eine langfristige Planung nahezu unmöglich machen.

Die Umstellung auf eine »grüne« Wärmeversorgung ist in jedem Fall technisch umsetzbar und aus ökologischen Gründen klar zu befürworten. Auch die Politik liefert die klare Vorgabe, dass die Wärmeversorgung sich grundlegend ändern muss und eine Wärmewende eingeleitet werden soll. Deshalb werden die Stadtwerke Heilbad Heiligenstadt langfristig den Umbau der Wärmeversorgung forcieren müssen. Mit der vorliegenden Machbarkeitsstudie wurden konkrete Möglichkeiten aufgezeigt, wie das gelingen kann.

Allerdings sind die derzeitigen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen nicht auf die geplanten Maßnahmen ausgelegt und so stützt sich die Empfehlung für die Umsetzung des vorliegenden



Erstellt: IPH Selzer Ingenieure GmbH Stand: 18.11.2022



Abbildung 1: innovatives ganzheitliches Energiekonzept Heilbad Heiligenstadt

Impressum

12. Bauphysiktage in Weimar · 06. und 07. März 2024

Tagungsleitung

Prof. Dr.-Ing. Conrad Völker
Professur Bauphysik
Bauhaus-Universität Weimar

Prof. Dr. Oliver Kornadt
Fachgebiet Bauphysik / Energetische Gebäudeoptimierung,
RPTU Kaiserslautern-Landau

Dr.-Ing. Albert Vogel
Professur Bauphysik
Bauhaus-Universität Weimar

Organisation

Bauhaus-Universität Weimar
Dr.-Ing. Albert Vogel
Coudraystraße 11A, 99423 Weimar
Telefon: +49 (0) 36 43 / 58 47 06
E-Mail: albert.vogel@uni-weimar.de

Bauhaus Weiterbildungsakademie Weimar e.V.
Carolin Rollnik
Coudraystraße 13A, 99423 Weimar
Telefon: +49 (0) 36 43 / 58 42 29
E-Mail: tagung@wba-weimar.de
www.wba-weimar.de

Kooperationspartner

