

Vorwort

Meine Damen und Herren,

gerne möchte ich auch dieses Jahr gemeinsam mit Ihnen zur Weihnachtszeit auf die zurückliegenden zwölf Monate blicken.

Mit dem HLK-Brief möchte ich die aus meiner Sicht wichtigsten Ereignisse des Jahres 2023 aufzählen und Ihnen einen Überblick der Inhalte geben, die Sie in den folgenden Artikeln erwarten.

Im Jahr 2023 hatten wir in Lehre und Forschung nur noch geringe Einschränkungen durch die Coronapandemie. So werden z.B. die Lehrveranstaltungen mittlerweile wieder in Präsenz abgehalten. Hierdurch nimmt erfreulicherweise auch der persönliche Kontakt und Austausch mit unseren Studierenden wieder zu. Ähnlich sieht es auch beim Austausch zu Forschungsinhalten aus, der in Präsenz sowie hybrid erfolgt.

Wir freuen uns sehr, dass wir uns mit Ihnen wieder bei gemeinsamen Veranstaltungen wie Tagungen, Projekttreffen oder der Mitgliederversammlung des VdF HLK persönlich austauschen konnten. Das wichtigste Ereignis für uns fand im März statt. Am 30. März durften wir interessierte Gäste aus Wirtschaft und Wissenschaft zu unserem 2. IGTE-Forum begrüßen. Nach 2019 konnten wir die Arbeits- und Forschungsbereiche des IGTE sowie aktuelle Projekte und Highlights unserer nationalen und internationalen Forschungsaktivitäten präsentieren.

Projektvorstellungen erfolgten zu den Schwerpunktthemen: Gebäudeenergetik und Digitalisierung, Kühl- und Kältetechnik, Raumklimatechnik, Sorptionstechnik, Solartechnik, Energiespeicherung und innovative Quartierskonzepte. Anschließend durften wir über unsere Prüftätigkeiten und Dienstleistungen aus den Bereichen Wärmepumpen, Heiz- und Raumlufttechnik, Solartechnik sowie Inspektionen, Machbarkeitsstudien, Energiekonzepte und Gutachten berichten. Im Schlussvortrag „Forschen für die Energiewende“ wurden unsere Forschungsfelder und Kernkompetenzen zusammengefasst. Danach luden wir unsere Gäste zum gemütlichen Beisammensein ein, mit der Möglichkeit unsere Labore zu besichtigen.

Auf dem TGA-Kongress im Mai in Berlin haben unsere Mitarbeiter folgende Vorträge platzieren können. Michael Müller: „Mindestanforderung für den Außenluftstrom in Nichtwohngebäuden im europäischen Raum“; Christian Karczewski: „Direktes Lastmanagement energieflexibler Gebäude durch den Einsatz von Zustandsbeobachtern“; Tim Jourdan: „Systemübergreifende Regelung von Wohnungslüftungs- und Heizungssystemen“.

Zusammen mit dem Ministerium für Finanzen Baden-Württemberg, dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) und der Drees & Sommer SE veranstalteten wir im Oktober den Kongress „Grüne Wärmetransformation – Lösungen für Bestandsliegenschaften“ mit über 150 Teilnehmern.

Im November fand die Jahrestagung des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins (DKV) in Hannover statt – wie auch im letzten Jahr in Präsenz. Dort präsentierten Johannes Brunder seine Ergebnisse zu „Absorptionswärmepumpen für Ein- und Zweifamilienhäuser, angetrieben durch hydraulische Kopplung“, Yuanchen Wang sein Forschungsvorhaben „Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Kühlenergieverbrauch in Wohngebäuden“, Michael Müller sein Forschungsthema „Entwicklung regelbarer Vakuumdämmelemente zur bedarfsgerechten Anpassung des Wärmedurchgangs“ und Tim Jourdan seine Erkenntnisse zu „Regelstrategien für Wohnungslüftungs- und Heizungssysteme“ dem interessierten Fachpublikum.

Es freut mich, Ihnen mitteilen zu dürfen, dass uns in 2023 vier Forschungsvorhaben bewilligt wurden:

- HybridSolar: Entwicklung eines neuartigen Solarhybridkollektors auf Basis von Vakuumröhren zur Erzeugung von Wärme und Strom
- TESSA: Thermische und Energetische Schaltschrank-Analyse und Optimierung durch einen digitalen Zwilling
- RoBewEnt: Robuste Bewertung von Entrauchungssystemen in Hallen und Atrien unter unsicheren Randbedingungen
- DiTeNS: Discursive Transformation of Energy Systems – VR-basierte simulative Gestaltung eines gesellschaftlichen Dialogs zur Transformation urbaner Energiesysteme

Hier ein Überblick, welche Artikel Sie in diesem HLK-Brief erwarten:

253. Personelle Veränderungen sowie Bachelor-, Studien-, Forschungs- und Masterarbeiten 2022/23

254. Heinz-Bach-Preis 2022

255. Konzeptstudie über die Ausgestaltung der kalorischen Innenkammern des „Smart Climate Lab“

256. Studie zum Einsatz eines „Flex-Beobachters“ für die Quantifizierung der energetischen Flexibilität eines netzdienlich betriebenen Gebäudes

257. Studie über den Einfluss der Konstruktion (innerer Aufbau) von Temperaturmessköpfen auf die Messunsicherheit sowie den Strömungswiderstand

258. Vorstudie zur Optimierung von Lüftungsstrategien für Nichtwohngebäude im Hinblick auf Gesundheit und Energieaufwand

259. Entwicklung eines Simulationsmodells zur Untersuchung der Potenziale regelbarer Vakuumdämmelemente (ReVaD)

260. Systemübergreifende Regelstrategien für Wohnungslüftungs- und Heizungssysteme

261. Robuste Bewertung von Entrauchungssystemen in Hallen und Atrien unter unsicheren Randbedingungen

262. Über interaktive Verteilerstrukturen zur Strömungsoptimierung mittels additiver Fertigung

263. Antrieb einer Absorptionswärmepumpe mit marktverfügbarem Wärmeerzeuger

264. Große außenaufgestellte Warmwasserspeicher mit Vakuumwärmedämmung

265. Untersuchung von Spitzenlast- und Redundanzkonzepten für ein primär mit tiefeingeothermischer Wärme versorgtes Wärmenetz

266. Betriebsergebnisse einer solaren kalten Nahwärmeversorgung mit Eisspeicher

267. Vergleichskennzahlen für thermische Energiespeicher

268. Untersuchung einer dynamischen Regelung der Kühlkristemperaturen von Rechenzentren zur Effizienzsteigerung und Ableitung eines Leitfadens zur Umsetzung entsprechender Konzepte

Gerne möchte ich auch darauf hinweisen, dass im Jahre 2023 einige Studierende des IGTE für ihre studentische Arbeiten ausgezeichnet wurden. So belegte Mashhur Ghenni, M.Sc. mit seiner Masterarbeit den zweiten Platz beim Otto F. Scharr-Preis für Energietechnik. Der IVS-Award 2023 wird an Marc Mühlen, M.Sc. verliehen. Der Preis würdigt herausragende studentische Arbeiten mit klarem Bezug zur Informatik.

Der Heinz-Bach-Preis wurde zum dritten Mal im Rahmen der VdF-Mitgliederversammlung 2023 hierbei prämiert. Im Anschluss werden die Arbeiten sowie die Preisträgerinnen und Preisträger in Artikel 254 vorgestellt.

Ganz besonders freut es mich, Ihnen mitteilen zu dürfen, dass *THE SCHAUFLER FOUNDATION* eine Stiftungsprofessur für Kältetechnik und Wärmepumpen für die Universität Stuttgart ausgeschrieben hat. Diese Stiftungsprofessur wird bei uns am IGTE angesiedelt. Das Berufungsverfahren läuft und wird voraussichtlich im kommenden Jahr erfolgreich abgeschlossen.

Ich wünsche Ihnen nun viel Vergnügen und spannende Erkenntnisse beim Lesen und freue mich bereits jetzt auf Ihre Anregungen, Wünsche und Fragen.

Im Namen aller Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter wünsche ich Ihnen und Ihren Familien ein besinnliches Weihnachtsfest und einen guten Rutsch in das Jahr 2024.

Bleiben Sie weiterhin gesund!

Herzlichst



Konstantinos Stergiaropoulos

Personelle Veränderungen sowie Bachelor-, Studien-, Forschungs- und Masterarbeiten 2022/2023

Personelle Veränderungen

Nermeen Abdelnour, M.Sc. ist seit September 2023 am IGTE als wissenschaftliche Mitarbeiterin tätig und untersucht experimentell und simulativ Luft-Sole-Kollektoren als Wärmequelle für Wärmepumpen. Sie absolvierte an der Ain-Shams Universität Kairo ihren Bachelorstudiengang „Elektrotechnik“ und an der Universität Oldenburg den Masterstudiengang „Erneuerbare Technologien“.

Mashhur Gheni (Aini Maixiwuer), M.Sc. ist seit Februar 2023 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IGTE tätig und fokussiert sich auf die Erforschung von Kühlungssystemen für Rechenzentren. Er führt simulative Untersuchungen zu thermischen Systemen und deren Regelung durch. Sein Bachelorstudium absolvierte er im Bereich „Building Electricity and Intelligence“ an der Tongji Universität, gefolgt vom Master „Energietechnik“ an der Universität Stuttgart.

Xiaoyong Lang, M.Sc. ist seit Mai 2023 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IGTE tätig. Seine Forschung konzentriert sich auf Sorptionstechnik, thermische Wärmespeicherung und dynamische Simulationen. Er führt messtechnische Untersuchungen im Bereich der adsorptiven Kühlung durch und bewertet Energiesparpotenziale von Gebäuden mit dynamischen Simulationen. Er hat seinen Bachelor in Umweltschutztechnik an der Universität Tianjin erworben und seinen Master im gleichen Fach an der Universität Stuttgart abgeschlossen.

Andreas Hartnagel verstärkt seit Mai 2023 die HLK Stuttgart GmbH im Bereich Wärmepumpen- und Wohnungslüftungsgeräteprüfung.

Nils Bayer, M.Sc. war seit Januar 2018 am IGTE als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig und hat sich intensiv mit der Optimierung des Kühlsystems des Höchstleistungsrechenzentrums (HLRS) beschäftigt. In einem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Projekt hat er eine neuartige Regelstrategie unter Verwendung dynamischer Kühltemperaturen erprobt. Er verließ das Institut Ende

2022 und wechselte zur DAIKIN Manufacturing Germany GmbH.

Dipl.-Ing. Dominik Bestenlehner, der ab 2016 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IGTE sowie seit Mai 2005 bei SWT (Solar- und Wärmetechnik Stuttgart) als Wissenschaftler tätig war und sich primär mit solaren Gebäuden sowie innovativen, weitgehend auf der Nutzung von erneuerbaren Energien basierenden Quartierskonzepten sowie dem Bau und der Entwicklung von Prüfständen für solarthermische Produkte beschäftigte, verließ das Institut Ende Juni 2023 und wechselte als Leiter Forschung & Entwicklung zur Ritter Energie- und Umwelttechnik GmbH & Co. KG.

Dr.-Ing. Wolfgang Heidemann wurde Ende September 2023 in den wohlverdienten Ruhestand verabschiedet. Er engagierte sich über 30 Jahre lang in Forschung und Lehre an der Universität Stuttgart im Bereich der Thermodynamik und Wärmeübertragung. Hierbei prägte er mehrere Generationen von Ingenieuren, insbesondere durch seine Grundlagenvorlesung Technische Thermodynamik und unzählige betreute studentische Arbeiten in seinem Fachgebiet. Wir wünschen ihm für seinen (Un-)Ruhestand alles Gute.

Dr.-Ing. Winfried Juschka, der seit Oktober 2017 am Institut als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig war und sich mit Anlagen zur solaren Nahwärmeversorgung und der Untersuchung von Eisspeichern insbesondere auch im Hinblick auf die Entwicklung von Sensoren zur Detektion des Beladezustands beschäftigte, verließ das Institut Ende Juni 2023 und wechselte zur Stadt Stuttgart.

Christina Karagianni, M.Sc. folgte Prof. Dirk Schwede an die Hochschule Lübeck und bearbeitet weiterhin das Forschungsvorhaben Build4People.

Christa Kärcher verabschiedete sich in den wohlverdienten Ruhestand – nach vielen Jahren im Sekretariat im Pfaffenwaldring 6. Wir wünschen ihr alles Gute für diesen Lebensabschnitt.

Dissertationen

Über den VdF HLK erhältlich

Berg, Anders

Numerische Untersuchungen zur Tunnelgeothermienutzung für Gebäude, Stuttgart 2022

Universität Stuttgart Mitteilung Nr. 31, 2022

ISBN 978-3-9811996-9-7

Eydner, Matthias

Flexibilisierungspotenziale von raumluftechnischen Anlagen zur netzdienlichen Lastverschiebung, Stuttgart 2022

Universität Stuttgart Mitteilung Nr. 32, 2022

ISBN 978-3-9811996-9-7

Ehrungen und Preise

Der Otto F. Scharr-Preis für Energietechnik wird jährlich für herausragende wissenschaftliche Leistungen im Bereich der Energietechnik von der Otto F. Scharr-Stiftung verliehen. Wir freuen uns, dass bei der diesjährigen Vergabe eine am IGTE erstellte Arbeit ausgezeichnet wurde. Den zweiten Platz belegte Mashhur Ghani, M.Sc. mit seiner Masterarbeit „Untersuchung des Demand-Response-Verhaltens deutscher Nichtwohngebäude anhand vereinfachter Gebäudemodelle“, der mit 3.000 € dotiert ist. Unser Dank gilt der Otto F. Scharr-Stiftung für die Förderung!

Der IVS-Award für herausragende studentische Arbeiten mit klarem Bezug zur Informatik geht 2023 an Marc Mühlen, M.Sc. für seine Masterarbeit „Entwicklung einer modellprädiktiven Regelung für die energieoptimierte Beheizung eines bestehenden Nichtwohngebäudes“ und ist mit 500 € dotiert. Hier konnten wir erneut eine studentische Arbeit platzieren. Unser Dank gilt dem Informatik-Verbund Stuttgart (IVS).

Die Preisträgerinnen und Preisträger des in diesem Jahr zum dritten Mal vergebenen Heinz-Bach-Preis werden mit ihren ausgezeichneten Arbeiten auf den nächsten Seiten vorgestellt.

Elias Alami: Potentialanalyse zum Einsatz von thermischen Energiewandlern bei der CO₂-Abscheidung und Speicherung (Studienarbeit)

Lisa Anderer: Entwicklung eines Tools zur systematischen Generierung und Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen für Industrieunternehmen (Masterarbeit)

David Battran: Bestimmung der Messunsicherheit von Sensoren zur Erfassung des Beladezustandes von Eisspeichern (Masterarbeit)

Marco Blatter: Entwicklung eines ökonomischen Bewertungsansatzes zur objektiven Bewertung unterschiedlicher Heizungssysteme (Masterarbeit)

Viktoriya Bondus: Optimierung und Validierung eines Sichtfaktormodells zur Strahlungsberechnung in transparenten Medien (Bachelorarbeit)

Leon Breitenbücher: Entwicklung eines objektorientierten Knotenmodells zur thermischen Berechnung von Schaltschränken (Bachelorarbeit)

Magdalena Brombierstäudl: Entwicklung eines Verfahrens zur Untersuchung der Strömungsverteilung in Venturi-Verteilern mittels eines Ersatzsystems (Forschungsarbeit)

Joeline Büttner: Weiterentwicklung eines Simulationsmodells zur Wassergewinnung aus feuchter Luft über heterogene Kondensation an Aerosolpartikeln (Bachelorarbeit)

Natalie Domke: Entwicklung einer Bewertungsmethodik für Luft-Sole-Kollektoren als Wärmequelle für Wärmepumpen zur Aufnahme in die DIN V 18599 (Forschungsarbeit)

Wuxiao Dong: Numerische Untersuchungen von bauteilintegrierten Wärmerohren zur Wärmeabfuhr in Bürogebäuden (Masterarbeit)

Adnan Egrlic: Hardware-Simulation einer Luft-Wasser-Kompressionswärmepumpe (Masterarbeit)

Alicia Eisele: Untersuchung von Sanierungsvarianten zur Erreichung eines klimaneutralen Nichtwohngebäudes mit Mischnutzung (Masterarbeit)

Matthias Ender: Optimierung einer Austreibereinheit für Diffusions-Absorptionskältemaschinen im Hinblick auf Wärmeübertragung und Förderfähigkeit (Studienarbeit)

Erika Fixel: Konstruktion und Untersuchung einer hocheffizienten Wärmedämmung für Warmwasserspeicher (Studienarbeit)

Frederik Gold: Kostenanalyse zu grünem Prozessdampf aus lokaler Wasserstoffherzeugung für eine Biokäserei (Bachelorarbeit)

Immanuel Hakiki: Untersuchung von Maßnahmen zur Verringerung des Kühlenergiebedarfs von Wohngebäuden im heißen und feuchten Klima (Studienarbeit)

Raffaella Helf: Thermische Modellierung von Erdwärmesonden und des angrenzenden Erdreichs mit der Simulationssoftware COMSOL Multiphysics und Simulation von Erdsondenfeldern mit TRNSYS (Forschungsarbeit)

Simon Jung: Auslegung, Konstruktion und Aufbau eines Prüfstandes zur Wassergewinnung aus feuchter Luft anhand eines Tandems aus Turbine und Verdichter (Masterarbeit)

Danial Khaleghi: Untersuchung der Messunsicherheit bei der Bestimmung des Zugluftrisikos (Masterarbeit)

Simon Klug: Optimierung von Lüftungsmaßnahmen in Klassenräumen hinsichtlich des Infektionsschutzes und des Energieaufwands (Masterarbeit)

Sebastian Konanz: Untersuchung von Materialien für Latentspeicher zum Einsatz in Anergienetzen (Masterarbeit)

Jan Kowarsch: Auslegung eines neuartigen Systems zur Strom- und Wärmeerzeugung mit konzentrierendem Solarkollektor (Bachelorarbeit)

Jacques Robert Kuehn: Simulative Untersuchung des Verdichtersatzes von Kompressionswärmepumpen mit Economizer-Wärmeübertrager oder Mitteldruckflasche (Masterarbeit)

Xiaoyong Lang: Entwicklung von Algorithmen für die temperaturbasierte Ermittlung von Volumenströmen und Charakterisierung verschiedener Temperaturprofile im Hinblick auf ihre Auswertbarkeit (Masterarbeit)

Yan Liu: Entwicklung und Implementierung von KI-basierten energieeffizienten Lösungen für cloudgesteuerte Wohnklimaanlagen (Masterarbeit)

Nicolas Florian Lorenz: Aufbau eines Eisspeichers mit separatem Unterkühlungsspeicher (Bachelorarbeit)

Julius Loydl: Bewertung von Systemkombinationen der Nutzenübergabe mit elektrischen Strahlungsplatten nach strahlungsbezogenen Kriterien (Forschungsarbeit)

Aini Maixiwuer: Development of a dynamic simulation model to investigate the impact of occupant behavior on the indoor climate in a residential apartment (Forschungsarbeit)

Aini Maixiwuer: Investigating the demand response in German non-residential buildings using reduced-order models (Masterarbeit)

Manuel Marcks: Versuchsanlage zur Untersuchung der Kondensation in einem Platten-Wärmeübertrager (Forschungsarbeit)

Marc Mühlen: Entwicklung einer MPC-Applikation für die energieoptimierte Beheizung eines bestehenden Nichtwohngebäudes (Masterarbeit)

Oliver Pfrommer: Verbesserung eines Durchflusskalorimeters durch Ankopplung eines Wärmeübertrager-Bypasses für die Wärmekapazitäts- und Wärmeübertragungsmessungen mit einer silikonbasierten Wärmeträgerflüssigkeit bis zu 430°C für Anwendungen der konzentrierten Solarenergie (Masterarbeit)

Julia Pinzhoffer: Optimierung von Lüftungsmaßnahmen in Bürogebäuden hinsichtlich des Infektionsschutzes und des Energieaufwands (Masterarbeit)

Felix Pucher: Anforderungen an eine funk- bzw. cloudbasierte Gebäudeautomation für den Neubau bzw. zur Nachrüstung für Bestandsgebäude (Studienarbeit)

Manisha Rana: Genauigkeit von Sensoren zur Bestimmung des Beladungsgrades von Eisspeichern nach dem Energiebilanzverfahren (Masterarbeit)

Alexander Rath: Automatisierte Analyse von Felddaten für Luft-Wasser-Wärmepumpen (Masterarbeit)

Senta Reinbott: Erarbeiten eines Katalogs mit Standard-Hydrauliken für typische Versorgungsaufgaben zur Heizung und Kühlung von Nichtwohngebäuden (Bachelorarbeit)

Adrian Reißing: Entwicklung, Simulation und Vermessung von effizienten Wärmedämmkonzepten für Warmwasserspeicher (Masterarbeit)

Dominik Ruhdorfer: Analyse von Messdaten von Wärmepumpen mit solarthermischen Luft-Sole-Kollektoren als Wärmequelle zur Optimierung des solaren Beitrags (Bachelorarbeit)

René Schaaf: Experimentelle Untersuchung der Verlustkennwerte und druckseitigen Schallabstrahlung von Einbauventilatoren in unterschiedlichen Einbaubedingungen in Klimazentralgeräten (Masterarbeit)

Christian Scheffler: Simulative Entwicklung eines konzentrierenden Solarkollektors für ein neuartiges System zur Strom- und Wärmeerzeugung (Bachelorarbeit)

Julian Schell: Erarbeiten von Konzepten für interoperable Internet of Things (IoT)-Sensorik und übergreifende Schnittstellen für Smart Home-Systeme (Bachelorarbeit)

Patrick Scherer: Numerische Untersuchung energieflexibler Gebäude als Energiespeicher im Stromnetz (Forschungsarbeit)

Maria Scheuerlein: Entwicklung und Validierung einer Excel-Toolbox zur Identifikation geeigneter Sanierungsmaßnahmen für klimaneutrale Gebäude (Masterarbeit)

Daniel Schiller: Untersuchungen der wärme- und strömungstechnischen Vorgänge nach einer Strömungsverteilung und deren Messungen mittels Thermografie (Masterarbeit)

Marlene Schmalzried: Entwicklung einer Methodik zur Bewertung der Kondensationsleistung eines Luft-Luft-Wärmeübertragers für den Kondensationsprozess in einer Adsorptionsanlage (Forschungsarbeit)

David Schüsselin: Untersuchung innovativer Energiekonzepte für ein Gewächshaus (Masterarbeit)

Siavash Shanbedi: Simulation unterschiedlicher solar-basierter Energieversorgungskonzepte für Wohngebäude (Masterarbeit)

Patrick Straub: Herstellung von synthetischem Kerosin aus grünem Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid über die innovative Einbindung eines Fischer-Tropsch Verfahrens (Masterarbeit)

Louis Tafelmaier: Entwicklung eines Auswertungstools zur automatisierten Ermittlung des Smart Readiness Indicators aus Gebäudeinformationsmodellen (Bachelorarbeit)

Nour Tamim: Entwicklung zonenweiser Belegungs- und Lastprofile zur Ableitung charakteristischer Lastverläufe für Wohngebäude (Studienarbeit)

Alexander Trumpf: Untersuchung zur Integration von thermischen Speichern in Solartrocknern zur Reduzierung der Trocknungszeit (Studienarbeit)

Anh Tuan Tran: Untersuchung des Raumklimas und Nutzerverhaltens in Wohngebäuden im heißen und feuchten Klima (Masterarbeit)

Adrian Vollmer: Integration und Validierung von numerischen Geothermiemodellen in ein dynamisches Simulationsmodell für Energieversorgungskonzepte von Stadtquartieren mit Wärmepumpen (Forschungsarbeit)

Zheng Wie: Konstruktion, Aufbau und Inbetriebnahme eines Prüfstandes zur Wassergewinnung aus feuchter Luft über heterogene Kondensation an Aerosolpartikeln (Masterarbeit)

Simon Woog: Analyse und Optimierung einer Absorptionswärmepumpe für die hydraulische Kopplung mit flexiblem Wärmeerzeuger (Forschungsarbeit)

Mehrab Gholami Zangalani: Entwicklung von Sanierungsfahrplänen für die energetische Sanierung von Wohngebäuden mit Ziel der Klimaneutralität (Masterarbeit)

Heinz-Bach-Preis 2022

Am 23. Oktober 2023 wurde im Rahmen der Mitgliederversammlung des Vereins der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. (VdF HLK) der Heinz-Bach-Preis an vier Studierende verliehen, die im Jahr 2022 ihre Forschungs- und Abschlussarbeiten erfolgreich abgeschlossen haben.

Der Heinz-Bach-Preis wird vom VdF HLK und dem ITGA Baden-Württemberg e.V. in Zusammenarbeit mit dem Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart ausgelobt.

Ziel ist die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses in Erinnerung an das Wirken von Prof. Dr.-Ing. Heinz Bach, der das Fachgebiet der Technischen Gebäudeausrüstung an der Universität Stuttgart aufgebaut und als Wissenschaftler über Jahrzehnte geprägt hat.

Herr Mashhur Ghani (Aini Maixiwuer) wurde mit dem 1. Preis für seine Forschungsarbeit zum Thema „Erstellung eines dynamischen Simulationsmodells zur Untersuchung des Einflusses von Nutzerverhalten auf das Raumklima in Wohngebäuden“ ausgezeichnet.

Der 2. Preis ging an Herrn Heiner Steinacker für seine Masterarbeit zur „Entwicklung eines dynamischen Simulationsmodells zur Optimierung von wärmegekoppelten Wasserstoff-Konzepten für die klimaneutrale Quartiersversorgung“.

Der 3. Preis wurde in diesem Jahr an zwei Studierende verliehen: Frau Ronja Schweizer erhielt die Auszeichnung für ihre Bachelorarbeit „Untersuchungen und Weiterentwicklung von hocheffizienten Wärmedämmkonzepten für Warmwasserspeicher“ und Herr Louis Tafelmaier für seine Bachelorarbeit über die „Entwicklung eines Auswertungstools zur automatisierten Ermittlung des Smart Readiness Indicators aus Gebäudeinformationsmodellen“.



V.l.n.r.: Steffen Hild (Vorstandsvorsitzender VdF HLK), Jörg Staudenmayer (Geschäftsführer ITGA BW), Prof. Dr.-Ing. Konstantinos Stergiaropoulos (Institutsleiter IGTE), Heiner Steinacker, Dr.-Ing. Stephan Lang (Betreuer der Arbeit von Ronja Schweizer), Louis Tafelmaier, Mashhur Ghani, Dr.-Ing. Tobias Henzler (Geschäftsführer VdF HLK)

1. Preis Herr Mashhur Ghen (Aini Maixiwuer)

Erstellung eines dynamischen Simulationsmodells zur Untersuchung des Einflusses von Nutzerverhalten auf das Raumklima in Wohngebäuden

Das Nutzerverhalten gilt als einer der wichtigsten Faktoren, die den Energieverbrauch in Mixed-Mode-Gebäuden beeinflussen, in denen sowohl natürliche Belüftung als auch mechanische Kühlung eingesetzt wird. Obwohl es eine wachsende Anzahl von Forschungsarbeiten zur Interaktion zwischen dem Nutzerverhalten und dem thermischen Gebäudeverhalten von Mixed-Mode-Gebäuden gibt, konzentrierten sich die meisten Studien zum Nutzerverhalten auf gewerbliche Gebäude, während die Forschung zu Wohngebäuden noch begrenzt ist. Um die Auswirkungen des Nutzerverhaltens in Mixed-Mode-Wohngebäuden zu untersuchen, wird daher in dieser Arbeit ein Simulationsmodell für eine typische Mixed-Mode-Wohnung entwickelt. Das Modell wird anhand umfassender Daten über das Gebäude und seine Systeme detailliert aufgebaut. Das Mehrzonen-Luftströmungsmodell COMIS wird für die Luftströmungssimulation verwendet. Außerdem wird eine Schnittstelle erstellt, um die dynamische Interaktion zwischen dem Nutzerverhaltens-Modell und dem Simulationsmodell zu ermöglichen. Um die Simulationsgenauigkeit des entwickelten Modells zu verbessern, wird in dieser Arbeit ein neuer Kalibrierungsansatz vorgeschlagen. Anhand dieses Ansatzes werden die unsicheren Parameter des Simulationsmodells, wie z. B. Luftströmungsparameter und thermische Eigenschaften von Baumaterialien, in mehreren ausgewählten Szenarien schrittweise kalibriert und validiert, indem sie mit gemessenen Raumklimadaten verglichen werden. Infolgedessen erfüllt das kalibrierte Modell in mehreren Aspekten die Kriterien für ein hochpräzises Modell, mit dem höchsten Root Mean Square Error (RMSE) für die Raumtemperatur von 0,4 K. Darüber hinaus ist das Modell in der Lage, die Auswirkungen des Nutzerverhaltens auf das Gebäudeverhalten adäquat darzustellen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Machbarkeit des vorgeschlagenen Kalibrierungsansatzes aufgezeigt ist und für weitergehende Untersuchungen verwendet werden kann.

2. Preis Herr Heiner Steinacker

Entwicklung eines dynamischen Simulationsmodells zur Optimierung von wärmegekoppelten Wasserstoff-Konzepten für die klimaneutrale Quartiersversorgung

Der für eine zukünftig klimaneutrale Energieversorgung notwendige Ausbau der erneuerbaren Energien im Stromsektor erfordert ein hohes Maß an Flexibilität bei den Nutzenden von elektrischer Energie. Neuartige wasserstoffbasierte Power-to-Gas-and-Heat-Systeme (PtG&H) mit Hochtemperatur-Wärmepumpen und Langzeitwärmespeichern können bei netzdienlichem Betrieb einen wichtigen Beitrag zu dieser Flexibilität leisten. Durch die Verwendung der Abwärme wird außerdem ein hoher Systemnutzungsgrad erzielt. Die Kopplung der Sektoren Strom, Wärme und je nach Wasserstoffverwertung auch des Mobilitäts- und Industriesektors kann neben einem Beitrag zu einer klimaneutralen Wärmeversorgung von urbanen Neubau- und Bestandsquartieren auch die Dekarbonisierung anderer Sektoren ermöglichen. In dieser Arbeit wird die Entwicklung eines in Python implementierten dynamischen Simulationsmodells beschrieben, mit dem verschiedene wasserstoffbasierte PtG&H-Systeme simuliert und hinsichtlich mehrerer Zielgrößen optimiert werden können. Die Bedienung wird durch die Bereitstellung von Standard-Eingabedaten mit verschiedenen Zukunftsszenarien über Excel vereinfacht. Die mit dem entwickelten Simulationsmodell berechenbaren Ergebnisse und die automatisiert durchführbaren Parametervariationen geben bereits in der frühen Konzeptphase Aufschluss darüber, unter welchen ökonomischen, ökologischen, energetischen und technischen Bedingungen ein PtG&H-Konzept sinnvoll realisierbar ist. Neben einer Energiebilanz wird dabei auch eine Treibhausgasemissionsbilanz sowie eine Kostenbilanz nach VDI 2067 berechnet. Eine exemplarische Auswertung erfolgt anhand des neuen Freiburger Stadtteils Dietenbach.

3. Preis Frau Ronja Schweizer

Untersuchung und Weiterentwicklung von hoch-effizienten Wärmedämmkonzepten für Warmwasserspeicher

In der vorliegenden Arbeit werden Wärmedämmkonzepte für Warmwasserspeicher untersucht und simulativ weiterentwickelt. Es handelt sich dabei um Speicher mit Speichervolumina von 400 bis 2.000 l, die mithilfe eines geeigneten Wärmedämmkonzepts die Energieeffizienzklasse A gemäß EU-Verordnung Nr. 812/2013 nach einer Betriebsdauer von 25 Jahren erreichen sollen. Die Ermittlung dieser Energieeffizienzklasse findet anhand der sogenannten Warmhalteverluste eines Speichers statt. Zur Validierung eines existierenden Simulationsmodells in COMSOL Multiphysics wird ein Speicher mit Variationen einer Wärmedämmung aus Polyesterfaservlies und z. T. Vakuumisulationspaneelen gemäß DIN EN 15332:2020 geprüft. Die Vakuumisulationspaneele direkt an der Speicherwand verringern die Warmhalteverluste von 135,4 W (Wärmedämmung aus ausschließlich Polyesterfaservlies) auf 110,4 W und das Abdämmen des gesamten Bodenbereichs verringert die Warmhalteverluste um 7,1 W. Diese Maßnahmen haben damit einen wesentlichen Einfluss auf die Warmhalteverluste. Der Vergleich zwischen Simulation und Messung zeigt Unsicherheiten auf, insbesondere durch die vereinfachte Modellierung der Hohlräume als Festkörper mit einer Wärmeleitfähigkeit von 1.000 W/(m·K). Das Modell kann jedoch unter der Annahme einer höheren Unsicherheit weiterverwendet werden. Mithilfe einer Simulationsstudie wird eine Wärmedämmung entwickelt, die die gewünschten Anforderungen größtenteils erfüllt. Dabei handelt es sich um ein Konzept mit einem abnehmbaren biegbaren Dämmmantel aus grafithaltigem expandiertem Polystyrol, Polyesterfaservlies und Vakuumisulationspaneelen, einer Deckeldämmung aus grafithaltigem expandiertem Polystyrol, Polyurethan-Hartschaum oder Polyesterfaservlies mit jeweils einem aufgelegten Vakuumisulationspaneel und einer Bodendämmung aus Polyesterfaservlies.

3. Preis Herr Louis Tafelmaier

Entwicklung eines Auswertungstools zur automatisierten Ermittlung des Smart Readiness Indicators aus Gebäudeinformationsmodellen

Der Intelligenzfähigkeitsindikator (Smart Readiness Indicator, SRI) ist eine 2018 von der Europäischen Union eingeführte Kennzahl, die zur Zertifizierung der intelligenten Bereitschaft von Gebäuden dient. Ziele sind dabei die Senkung des Energiebedarfs in Gebäuden, die Steigerung der Energieeffizienz und das Schaffen von Anreizen zur Implementierung intelligenter Technologien. In dieser Arbeit wird ein Auswertungstool zur automatisierten Identifikation des Intelligenzfähigkeitsindicators aus Gebäudeinformationsmodellen (Building Information Modelling, BIM) entwickelt. Um eine Grundlage für die automatisierte Auswertung zu schaffen, müssen zunächst Datenaustauschformate entwickelt werden, die relevante Informationen der digitalen Gebäudemodelle darstellen. Eine solche Möglichkeit der standardisierten, herstellernerutralen Darstellung von Informationen im Gebäudesektor bieten die Industry Foundation Classes (IFC). Aufgrund der derzeit lückenhaften Informationsdarstellung der Industry Foundation Classes, wird in dieser Ausarbeitung eine Kennzeichnungssystematik nach VDI 3814 Blatt 4.1 weiterentwickelt. Auf Basis detaillierter Informationsdarstellungen wird eine Methodik erarbeitet, die eine möglichst automatisierte Auswertung des SRI zulässt. Anhand des durch einen Projektpartner zur Verfügung gestellten Versuchsmodells (dem Mockup), wird während der praktischen Erprobung ein Nachweis der möglichst automatisierten Auswertung des Intelligenzfähigkeitsindicators durch diese Methodik erbracht. Im Fokus der Ergebnisse stehen primär die ausgearbeitete Methodik und der Nachweis einer prinzipiell umsetzbaren automatisierten Auswertung, durch das in der Ausarbeitung entwickelte Softwaretool. Neben der ausführlichen Aufbereitung der Ergebnisse in Übersichtsblättern erfolgt die Identifikation zukünftig zu untersuchender Kritikpunkte.

Konzeptstudie über die Ausgestaltung der kalorischen Innenkammern des „Smart Climate Lab“

Bernd Klein,
Matthias Hartnagel

Hintergrund

Im Rahmen der „Konzeptstudie über den Aufbau eines Versuchstandes zur Untersuchung von VRF-Systemen“ (FKZ: VdF 2021-2) [1] wurde der Aufbau eines Prüfstandes für Luft-/Luft-Wärmepumpen in VRF- und Multi-Split-Bauweise bis 50 kW Leistung beschrieben (siehe Bild 1).

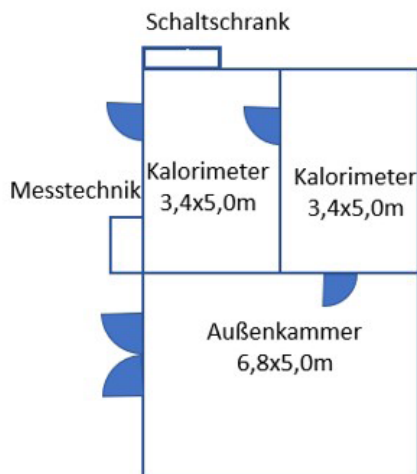


Bild 1: Grundriss VRF-Prüfstand mit einer Außenkammer und zwei kalorischen Innenkammern

Der Luftzustand in den Kammern soll mit Umluftkonditionierern bereitgestellt werden. Voraussetzung für eine zuverlässige und reproduzierbare Messung von Leistungen und Effizienzen ist hierbei unter anderem, dass die Innenwärmeübertrager der Prüflinge homogen konditionierte Luft ansaugen. Der Luftzustand und die Homogenität an den Prüflingen sind maßgeblich von der resultierenden Raumluftrömung abhängig, wel-

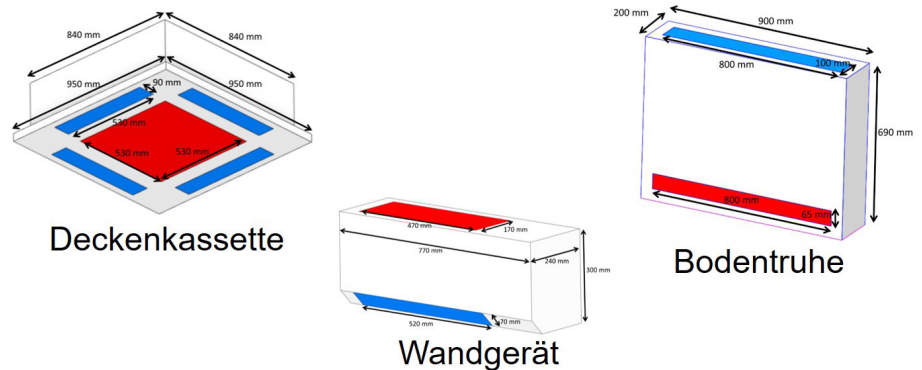


Bild 2: Modellierter Innenwärmeübertrager mit Ein- (rot) und Austrittsquerschnitt (blau)

che aus dem Zusammenspiel der Ansaug- und Ausblasvolumenströme der Prüflinge und der Umluftkonditionierer resultiert. Ziel für den täglichen Betrieb sollte es sein, die Umluftkonditionierer an einer ortsfesten Position installieren zu können, wohingegen die Prüflinge so positioniert werden, dass sich eine geeignete Raumluftrömung einstellt.

Untersuchung

Um geeignete Positionen für die Umluftkonditionierer und die Prüflinge zu ermitteln, wurde die Raumluftrömung für verschiedene Varianten und Anordnungen der strömungsrelevanten Komponenten untersucht und bewertet. Hierzu wurden die Umluftkonditionierer, der Prüfraum sowie ausgewählte Prüflinge dreidimensional modelliert und in ANSYS Fluent implementiert.

Für die Untersuchung wurden drei typische Bauformen von Prüflingen betrachtet: das Wandgerät, die Deckenkassette sowie die Bodentruhe (siehe Bild 3).

Aufgrund der Symmetrie des Prüfstandaufbaus wurde in der Simulation nur eine kalorische Innenkammer betrachtet. Für jede Innenkammer sind fünf Umluftkonditionierer mit einer Leistung von jeweils 5 kW (insg. 25 kW) vorgesehen, was mit einer mittleren Leistung der zu untersuchenden Prüflinge korreliert. Gedanklich wurde die Prüfraumkammer hierzu in fünf nebeneinanderliegende Zonen unterteilt, in denen jeweils ein Prüfling einem Konditionierer zugeordnet werden kann. Bild 3 zeigt das für die numerische Strömungssimulation aufbereitete Simulationsmodell der kalorischen Innenkammer. Anschließend wurde die resultierende Raumluftrömung für die einzelnen Prüflinge bei unterschiedlicher Anordnung des Umluftkonditionierers sowie bei verschiedenen Lastfällen simuliert und bezogen auf die Homogenität der Lufttemperatur am Eintrittsquerschnitt des Prüflings bewertet.

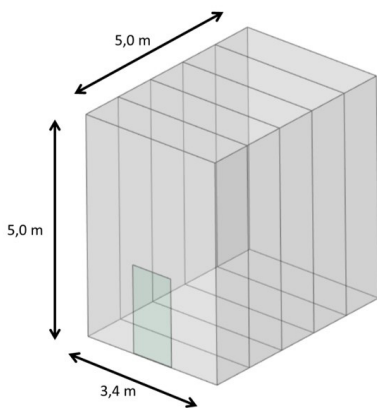


Bild 3: Unterteilung der kalorischen Innenkammer in fünf nebeneinanderliegende Zonen

In Bild 4 sind exemplarisch Ergebnisse der Strömungssimulation dargestellt.

Hierbei ist die sich einstellende Lufttemperatur- (links) sowie die Luftgeschwindigkeit (rechts) für ein Wandgerät (1) im Zusammenspiel mit dem Umluftkonditionierer (2) für eine Zone dargestellt. Die Abbildung zeigt hierbei Ergebnisse für sowohl den Kühlfall (oben) als auch den Heizfall (unten):

Zu sehen ist, dass sich innerhalb der Zone eine Raumlufthalze bildet, wobei die durch den Prüfling abgekühlte bzw. aufgeheizte Luft vollständig durch den Umluftkonditionierer erfasst wird. Der anschließend durch den Umluftkonditionierer ausgeblasene Luftvolumenstrom wird mit einer solchen Temperatur ausgeblasen, dass sich mittels Mischung mit der Raumlufthalze die jeweils geforderte Lufttemperatur einstellt (Winterfall 20°C / Sommerfall 27°C).

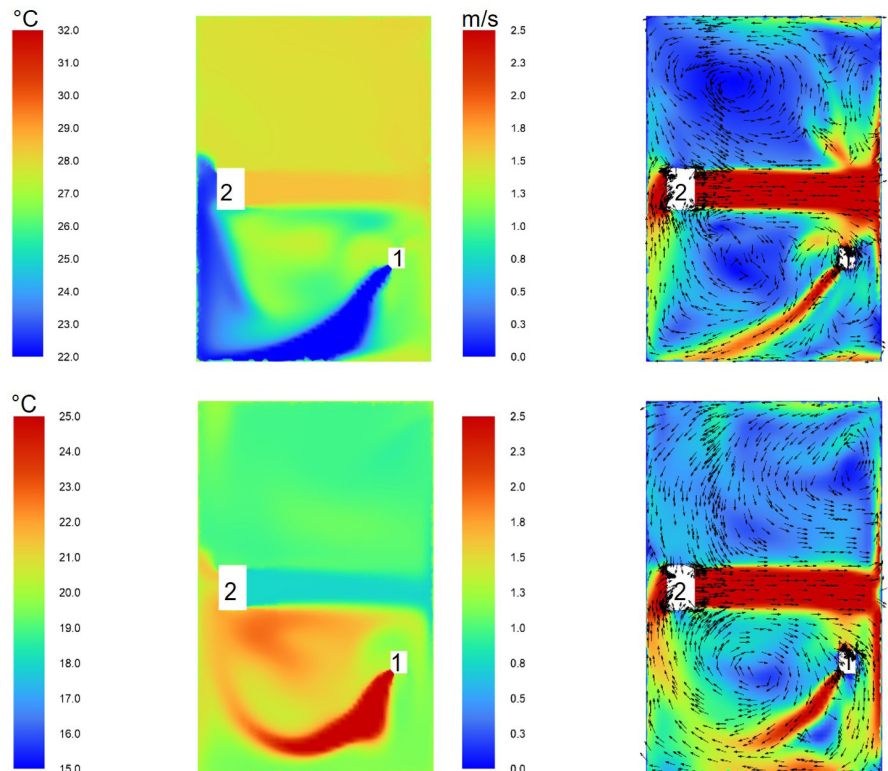


Bild 4: Exemplarische Simulationsergebnisse für ein Wandgerät im Zusammenspiel mit dem Umluftkonditionierer im Kühl- (oben) und Heizfall (unten)

Ergebnis

Die Durchführung der Variantenstudie ergab, dass eine ortsfeste Montage der Konditionierer grundsätzlich möglich ist. Bei einer Montage der Umluftkonditionierer nebeneinander auf halber Höhe an einer Kammerwand gibt es für jede Art von Prüfling einen geeigneten Aufstellort, so dass die gewünschten Randbedingungen an den Eintrittsöffnungen der Innenwärmeübertrager eingehalten werden können.

Danksagung

Die Studie [2] wurde vom Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. unter dem

Kennzeichen VdF-2022-01 gefördert und von der Forschungsgesellschaft Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart mbH (FG HLK) bearbeitet. Die Autoren danken für die Unterstützung.

Literatur

- [1] Bernd Klein, Armin Ruppert, Konzeptstudie über den Aufbau eines Versuchsstandes zur Untersuchung von VRF-Systemen, Endbericht, Dezember 2021.
 [2] Bernd Klein, Matthias Hartnagel, Konzeptstudie über die Ausgestaltung der kalorischen Innenkammern des Versuchsstandes zur Untersuchung von VRF-Systemen „Smart Climate Lab“, Endbericht, Dezember 2022.

Studie zum Einsatz eines „Flex-Beobachters“ für die Quantifizierung der energetischen Flexibilität eines netzdienlich betriebenen Gebäudes

Christian Karczewski,
Patrick Scherer, Tobias Henzler

Einleitung

Der Ausbau erneuerbarer Erzeuger rückt im zukünftigen Stromnetz das verbraucherseitige Lastmanagement in den Fokus. Gebäude und insbesondere deren heiz- und raumluftechnische Anlagen können durch Ausnutzung der thermischen Speicherfähigkeit der Gebäudemasse sowie der Toleranzbänder der raumklimatischen Sollwerte flexibel betrieben werden. Hierdurch sind Gebäude in der Lage, energetische Flexibilität als Dienstleistung für das Stromnetz anzubieten und somit einen Beitrag zur Netzstabilität sowie zum weiteren Ausbau erneuerbarer Erzeuger zu leisten. Das Ziel dieser Studie ist die Untersuchung der Umsetzbarkeit eines neuartig eingesetzten regelungstechnischen Konzeptes – benannt als „Flex-Beobachter“ – zur Quantifizierung der energetischen Flexibilität eines Gebäudes mit netzdienlich betriebener Anlagentechnik.

Energieflexible Gebäude

Die Ausnutzung der Flexibilität auf der Verbraucherseite spielt eine entscheidende Rolle für die zukünftige Stabilität des Stromnetzes [1]. Die Bundesnetzagentur definiert Flexibilität als die Veränderung von Einspeisung oder Entnahme in Reaktion auf ein Preissignal, mit dem Ziel eine Dienstleistung im Energiesystem

zu erbringen. In einem energieflexiblen Gebäude kann durch den Einsatz einer intelligenten Regelung die Leistungsaufnahme der installierten Wärmepumpen oder Kälteanlagen in Zeiten hoher Einspeisung erneuerbarer Erzeuger erhöht werden. Auf diese Weise wird thermische Energie in der Gebäudemasse gespeichert, welche anschließend genutzt werden kann, um die Leistungsaufnahme der Wärme- und Kälteerzeuger in Zeiten geringer Einspeisung erneuerbarer Erzeuger zu senken. Durch die im Heizfall zeitweise höheren Temperaturen im Gebäude (bzw. niedrigeren Temperaturen im Kühlfall), führt dieses Vorgehen zu einem energetischen Mehraufwand gegenüber einem energieeffizienten rein bedarfsgeführten Betrieb. Da die Bereitstellung von Flexibilität eine Dienstleistung für das Stromnetz darstellt, ist davon auszugehen, dass Gebäudebetreiber dazu nur bereit sind, wenn ihnen für den Mehraufwand ein finanzieller Ausgleich angeboten wird [2].

Aktuelle Forschungsprojekte, wie das europäische Projekt Smart-Built4EU [3] und der Annex 82 „Energy Flexible Buildings Towards Resilient Low Carbon Energy Systems“ der Internationalen Energieagentur [4], verdeutlichen, dass sich energieflexible Gebäude noch auf dem Stand der Forschung befinden. Insbesondere das unbekannte Verhalten energieflexibler Gebäude und die Auswirkungen einer flexiblen ge-

genüber einer bedarfsgeführten Betriebsweise sind wesentliche Hürden für die Integration energieflexibler Gebäude in das Stromnetz.

Konzept „Flex-Beobachter“

Die Ausgangslage für diese Studie ist ein energetisch flexibel betriebenes Gebäude mit einer erweiterten Regelung der Anlagentechnik (siehe Bild 1). Das Stellsignal des Raumtemperaturreglers wird um eine flexible Heizleistung \dot{Q}_{Fix} überlagert. Diese flexible Heizleistung wird von einem Flex-Regler umgesetzt und erfolgt beispielsweise als Lastmanagementeingriff durch den Strommarkt. Der Lastmanagementeingriff wirkt wie eine Störung auf die Regelung und hat eine Veränderung der Raumlufttemperatur zur Folge. Durch den geschlossenen Wirkungsablauf des Regelkreises beeinflusst die gestörte Raumlufttemperatur $\vartheta_{\text{R,Fix}}$ auch die Arbeitsweise des Raumtemperaturreglers. Die Raumtemperatur $\vartheta_{\text{R,Nutz}}$ und der Bedarf der Anlagentechnik, die sich ohne den Lastmanagementeingriff eingestellt hätten, sind unbekannt.

In der Regelungstechnik werden Zustandsbeobachter eingesetzt, um nicht messbare Größen eines geregelten Systems zu rekonstruieren. Der Flex-Beobachter ist eine besondere Form des Zustandsbeobachters, der anhand eines mathematischen Modells eines Gebäudes die Temperaturänderung $\Delta\vartheta_{\text{Fix}}$ der Raumluft sowie der Gebäudemasse infol-

ge des Lastmanagementeingriffs schätzt. Hierdurch ist es möglich, die ungestörte Raumlufttemperatur $\vartheta_{R,Nutz}$ zu rekonstruieren. Wird die rekonstruierte Temperatur dem Raumtemperaturregler als Messgröße übergeben, arbeitet dieser wieder wie im ungestörten Fall.

Umsetzung der Studie

Die Umsetzbarkeit des Flex-Beobachters wird anhand von Simulationsstudien untersucht, wobei ein Büroraum als Untersuchungsgegenstand dient. Im ersten Schritt erfolgt eine mathematische Formulierung des Flex-Beobachters, wie in Bild 1 dargestellt. Im zweiten Schritt wird der Proof-of-Concept unter der idealisierten Annahme erbracht, dass das verwendete Gebäudemodell im Flex-Beobachter fehlerfrei ist. Hierzu wird die Gebäudezone in drei Teilsysteme, die in Wechselwirkung miteinander stehen, zerlegt. Ausgehend von einer Energiebilanz wird ein vereinfachtes Gebäudemodell mit drei Systemzuständen hergeleitet. Als Systemzustände werden die Temperaturen

der Raumluft ϑ_R , der inneren Bauteile ϑ_{IB} (Boden, Decke und innere Wände) sowie der Außenwand ϑ_H gewählt. Anhand dieses Gebäudemodells wird das wärmetechnische Verhalten des Gebäudes während eines netzdienlichen Betriebs simuliert, wobei der Flex-Beobachter die Auswirkungen eines Lastmanagementeingriffs bestimmt.

Die weiteren Untersuchungen stellen den praxisnäheren Fall nach, bei dem das verwendete Modell fehlerbehaftet ist. Hierdurch soll untersucht werden, wie robust der Flex-Beobachter ist, sodass eine Aussage über einen möglichen Einsatz in einem realen Gebäude getroffen werden kann. Da für die Untersuchungen kein reales Gebäude zur Verfügung steht, wird das Gebäudes anhand eines detaillierten Gebäude- und Anlagenmodells mit dem Simulationsprogramm TRNSYS abgebildet. Die Konditionierung der Raumluft erfolgt mittels eines Heizkörpers und einer Lüftungsanlage, die mit einer Wärmerückgewinnung und einem Heizregister ausgerüstet ist. Als Wärmeerzeuger

wird eine elektrisch angetriebene Wärmepumpe betrachtet. Die Entwurfsparameter des zuvor hergeleiteten vereinfachten Gebäudemodells werden in einem Optimierungsverfahren adaptiert. Als Referenzverläufe für die Parameteradaption dienen die simulierten Verläufe der Raumlufttemperatur und thermischen Leistungen der Anlagentechnik aus der Gebäudesimulation. Das adaptierte Gebäudemodell wird im Flex-Beobachter eingesetzt, um die Systemzustände des emulierten Gebäudes zu rekonstruieren. Anschließend werden – analog zur idealisierten Betrachtung – Simulationsstudien des netzdienlichen Gebäudebetriebs durchgeführt. Dabei werden das wärmetechnische Verhalten in TRNSYS simuliert und die Regler mitsamt dem Flex-Beobachter simultan in MATLAB berechnet.

Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Simulationsstudien des energieflexibel betriebenen Büroraums beschrieben. In den Simulationen wird der Heizfall betrachtet, bei dem der Raum zwei Stunden vor Nutzeranwesenheit aufgeheizt wird. Zusätzlich erfolgt ein vom Day-Ahead-Strompreis abgeleiteter Lastmanagementeingriff: Die Leistung des Raumheizsystems wird vier Stunden vor Nutzeranwesenheit erhöht, um thermische Energie, die bei einem günstigen Strompreis bezogen wird, im Raum einzuspeichern. Diese eingespeicherte Energie wird anschließend während der Nutzeranwesenheit genutzt, um die Leistung des Raumheizsystems zu senken.

Bild 2 zeigt die Verläufe der Raumlufttemperaturen und ther-

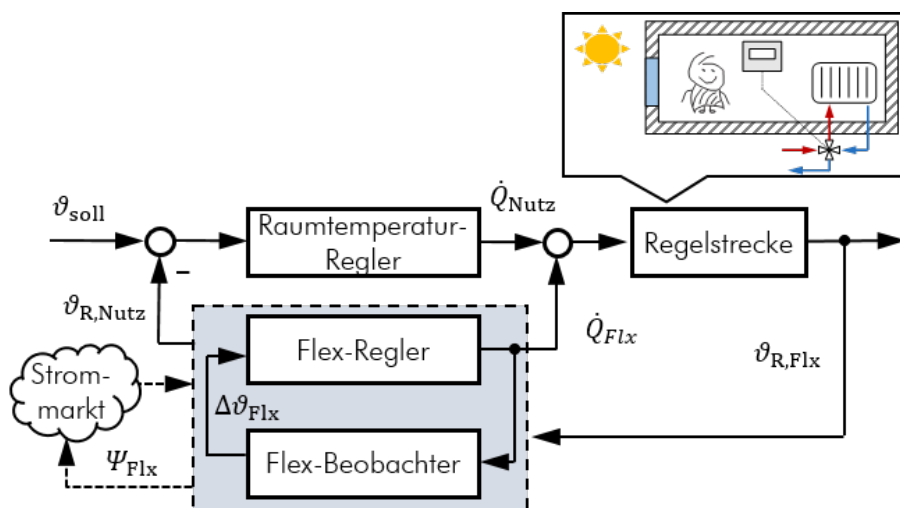


Bild 1: Erweiterter Regelkreis eines energetisch flexibel betriebenen Gebäudes mit Flex-Beobachter

mischen Leistungen des Raumheizsystems für einen exemplarischen Tag. Im oberen Diagramm sind die Raumlufttemperatur des energieflexiblen Betriebs $\vartheta_{R,Flx}$ und die rekonstruierte Raumlufttemperatur des bedarfsgeführten Betriebs $\vartheta_{R,Nutz}$ sowie die Solltemperatur ϑ_{soll} dargestellt. Im mittleren Diagramm ist die gesamte Leistung des Raumheizsystems \dot{Q}_{Ges} , die sich aus dem flexiblen Teil \dot{Q}_{Flx} und dem bedarfsgeführten Teil \dot{Q}_{Nutz} zusammensetzt, dargestellt. Infolge der flexiblen Heizleistung \dot{Q}_{Flx} (grüne Linie im mittleren Diagramm) wird die Raumlufttemperatur $\vartheta_{R,Flx}$ im energieflexiblen Betrieb (orangene Linie im oberen Diagramm) frühzeitig angehoben. Die im unteren Diagramm dargestellten Verläufe $\Delta\hat{\vartheta}_R$, $\Delta\hat{\vartheta}_{IB}$ und $\Delta\hat{\vartheta}_H$ entsprechen der Differenz zwischen dem Verlauf der Systemzustände beim flexiblen und bedarfsgeführten Betrieb. Durch den Flex-Beobachter ist es möglich diese Zustände zu schätzen und die Raumlufttemperatur des bedarfsgeführten Betriebs (blaue

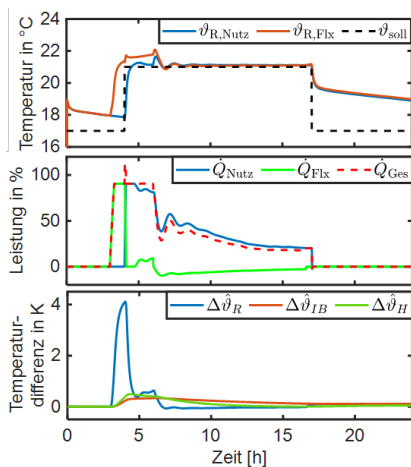


Bild 2: Erweiterter Regelkreis eines energetisch flexibel betriebenen Gebäudes mit Flex-Beobachter

Linie im oberen Diagramm) zu rekonstruieren.

Insgesamt zeigt sich in den durchgeführten Simulationen, dass durch den Einsatz des Flex-Beobachters die Auswirkungen eines energieflexiblen Betriebs ermittelt werden können. In den Studien wird eine Lastverschiebung simuliert, bei der rund 30% des täglichen Heizenergiebedarfs in den Zeitraum niedriger Strompreise verschoben werden. Trotz der zeitweise zusätzlichen Erwärmung des Gebäudes, die mit einem Mehraufwand von bis zu 28% verbunden ist, wird eine Kostenersparnis von 37% erzielt und die thermische Behaglichkeit durchgehend eingehalten.

Ausblick

Die Schätzung der Temperaturänderung innerhalb des Gebäudes, welche aus einem Lastmanagementeingriff resultiert, ist eine wesentliche Voraussetzung für weitergehende Untersuchungen des Verhaltens energieflexibler Gebäude. In einer auf dieser Studie aufbauenden Folgearbeit könnten Geschäftsmodelle mit dem Kerngedanken ausgearbeitet werden, dass Gebäudenutzer ihr Gebäude als virtuellen Energiespeicher für das Stromnetz anbieten. Dabei ist allerdings anzumerken, dass in der aktuellen Situation für den Gebäudebetreiber kein Anreiz besteht, eine Lastverschiebung durchzuführen, wenn der schwankende Börsenstrompreis nicht an den Endverbraucher weitergegeben wird.

Danksagung

Die Studie wurde von der Forschungsgesellschaft Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart mbH (FG HLK) sowie dem Institut für Gebäudeenergetik, Thermo-technik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart als assoziiertem Projektpartner bearbeitet und vom Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. unter dem Förderkennzeichen VdF-2022-01 gefördert. Die Autoren danken für die Unterstützung.

Literatur

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Öffentliche Infrastruktur in Deutschland: Probleme und Reformbedarf: Gutachten des Wissenschaftlichen Beirats beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin, 2020.
- [2] C. Karczewski, T. Henzler, K. Stergiaropoulos Increasing the Energy Flexibility of Buildings controlled by Model Predictive Control, CLIMA2022 14th REHVA HVAC World Congress 22-25 Mai 2022 (www.clima2022.org).
- [3] O. Genest, F. Garzia, SmartBuilt4EU White Paper Task Force 3: Interactions with the external environment: Topic A: Smart buildings as flexibility providers to the electricity grids, 2021.
- [4] O. M. Jensen, Factsheet Energy Flexible Buildings towards Resilient Low Carbon Energy Systems: EBC Annex 82.

Studie über den Einfluss der Konstruktion (innerer Aufbau) von Temperaturmessköpfen auf die Messunsicherheit sowie den Strömungswiderstand

Jörg Schmid, Bing Gu

Einleitung

Temperaturmessköpfe werden im Bereich der Prüfung von Komponenten der Heiz- und Raumlufttechnik eingesetzt. Diese speziellen Bauteile haben die Aufgabe, die Temperatursensoren (zumeist 3 Stück) so aufzunehmen, dass mit diesen sicher und reproduzierbar die tatsächliche Temperatur des Heiz- oder Kühlmittelstroms (zumeist Wasser) gemessen werden kann.

Die Konstruktion dieser Messköpfe muss sicherstellen, dass weder Temperaturunterschiede im Medium (z.B. Strahlenbildung) noch Ableitverluste das Messergebnis verfälschen. Für die korrekte Ermittlung der Leistung der zu prüfenden Komponenten wird die so genannte kalorische Mitteltemperatur benötigt.

Bisher werden im täglichen Laborbetrieb verschiedene Bauarten dieser Messköpfe verwendet. Der Hintergrund hierfür ist der jeweilige Strömungswiderstand der verschiedenen Bauarten.

Es hat sich in der Vergangenheit gezeigt, dass der ursprüngliche Typ (basierend auf einer Zeichnung in DIN EN 442 – Heizkörperprüfung [1]) bei größeren Massenströmen (> 300 kg/h), wie diese z. B. in der Klimatechnik vorkommen, einen vergleichsweise großen Strömungswiderstand hat (> 5 kPa). Weiterhin wurde festgestellt, dass diese Bauart des Messkopfes leicht verschmutzt, was wiederum den Strömungswi-

derstand weiter erhöht. Für größere Massenströme wurde daher ein abweichender Messkopf entwickelt und seit einigen Jahren verwendet.

Hinzu kommt, dass an der ursprünglichen Bauart des „Urmesskopfes“ kleinere Änderungen (z.B. aufgrund nicht mehr lieferbarer Teilkomponenten) vorgenommen wurden, welche nur unvollständig dokumentiert sind.

Ziele

Ziel des Vorhabens ist die systematische Aufarbeitung des aktuellen Standes bei Aufbau (Konstruktion), Messgenauigkeit bzw. Wiederholpräzision, Einsatzgrenzen (Massenströme) sowie Strömungswiderstand.

Im Rahmen des Vorhabens ist weiterhin geplant, einen neuen Typ („Messkopf 2.0“) zu entwi-

ckeln, welcher im Idealfall einen Kompromiss zwischen den verschiedenen Einflussgrößen darstellt: Ein innerer Aufbau, welcher die Strömung hinreichend genug verwirbelt, um Strahlenbildung zu vermeiden, weniger anfällig gegen Verschmutzungen ist sowie einen möglichst niedrigen Strömungswiderstand aufweist.

Die Untersuchungen werden an konkreten Messköpfen im Labor bzw. in mehreren Laboren (Wiederholpräzision) experimentell durchgeführt. Diese Untersuchungen werden mit Simulationen der Strömung in den Messköpfen ergänzt. Gelingt eine hinreichende Abbildung und eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulationsergebnis, so können Änderungen an den Messköpfen zukünftig ohne Musterbau vorgenommen und bewertet werden. Die Hauptziele dieser Studie sind daher:

- systematische Aufarbeitung des aktuellen Standes (Bauarten an verwendeten Messköpfen)
- messtechnische Untersuchungen zu Messgenauigkeit / Wiederholpräzision, Einsatzgrenzen (Massenströme) sowie Strömungswiderstand
- numerische Abbildung der Strömung im aktuellen Messkopf
- Weiterentwicklung der aktuell verwendeten Messköpfe („Messkopf 2.0“)
- Simulation des weiterentwickelten Messkopfes („Messkopf 2.0“)



Bild 1: Aktueller Messkopf mit Dämmung und Messfühlern



Bild 2: Messkopf zerlegt ohne Dämmung und Messfühler

Simulationsmodell des aktuellen Messkopfes

Bild 1 zeigt den aktuellen Messkopf mit Dämmung und Messfühlern. Bild 2 zeigt ihn zerlegt ohne die eigentlichen Messfühler und die zusätzliche Dämmung. Je nach gewählter Anschlussvariante strömt das Heizmittel die „Gewindgänge“ des links dargestellten Kupferkerns nach oben und dann durch die Mittelbohrung nach unten zum Austritt oder umgekehrt. Die Aufgabe dieser Konstruktion ist zum einen das Eliminieren eventueller Temperaturstrahlen und zum anderen das Ausgleichen eventueller örtlicher Temperaturunterschiede. Bild 3 zeigt das Simulationsmodell des Temperaturmesskopfes. Die CFD-Simulation des Messkopfes liefert unter anderem folgende Informationen:

- Druckabfall
- Abkühlung des Heizmittels im Messkopf von der Messstelle bis zum Austritt
- Wärmeabgabe
- Strömungsverlauf

Im Folgenden soll exemplarisch ein Aspekt bei der Heizkörperprü-

fung vorgestellt werden: Besonders wichtig im Hinblick auf die Messunsicherheit ist der Temperaturabfall von der eigentlichen Messstelle der Pt100-Tempersensoren bis zum Austritt aus dem Messkopf respektive dem Eintritt in den Heizkörper. Diese Feststellung gilt für den im Vorlauf angeordneten Messkopf; für die Anordnung im Rücklauf gilt sie vice versa. Sie sollte nach Möglichkeit so gering sein, dass sie im Rahmen der insgesamt angestrebten Messunsicherheit der Vor- und Rücklaufemperatur akzeptiert

werden kann. Andernfalls wären aufwendige experimentelle Untersuchungen erforderlich, um für verschiedene Massenströme und Heizmitteltemperaturen diesen Einfluss in Kennfeldern zu erfassen und als systematische Abweichungen später bei jeder Messung zu berücksichtigen.

In diesem Zusammenhang ist auch der Einfluss auf die Messunsicherheit von praktischer Bedeutung, der entsteht, wenn die Messfühler nicht vollständig bis zum Anschlag eingetaucht sind. Trotz sorgfältiger Vorgehensweise gegen ein Herausrutschen stellt dies im täglichen Messbetrieb ein gewisses Problem dar. Bild 4 zeigt unter anderem diesen Einfluss. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass die dargestellte Temperatur am Mantel des Messfühlers im Bereich des eigentlichen Messfühlers (ca. 10 mm lang) dem ausgegeben Messwert entspricht. Für die Untersuchung wird angenommen, dass der Messfühler um bis zu 10 mm „herausgerutscht“ ist. Zunächst zeigt Bild 4, dass sich das Heizmittel bei einer Eintrittstemperatur von 75,00 °C

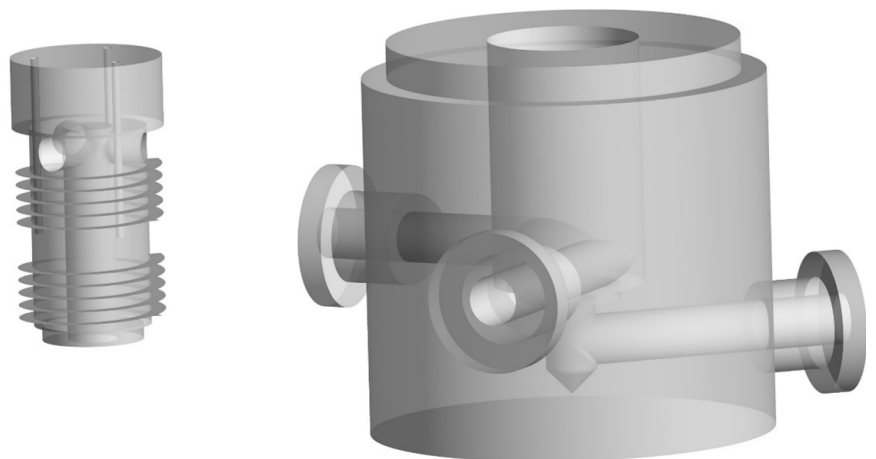


Bild 3: Messkopf im Simulationsmodell

auf 74,955 °C (blaue Diagrammbalken), also um 0,045 K abkühlt. Der Messwert (grauer Balken) beträgt 74,962 °C, weicht also um 0,007 K von der tatsächlichen Austrittstemperatur, also der tatsächlichen Vorlauftemperatur des Heizkörpers, ab.

Unter der zunächst vereinfachten Annahme, dass die Abweichungen am Rücklauf ebenso sind und bezogen auf die Normspreizung von 10 K bei der Heizkörperprüfung als Beispiel ergibt sich hier ein Messfehler von 0,14%.

Es ist bemerkenswert, dass der Messfehler bei leicht herausgerutschtem Messfühler (≤ 2 mm) sogar kleiner wird, weil sich der Messwert dabei der tatsächlichen Austrittstemperatur annähert. In die Praxis wäre diese Erkenntnis aber kaum umsetzbar, weil ein Eintauchabstand vom Anschlag von z.B. 2 mm gewissermaßen undefiniert ist im Unterschied zum

klar definierten Eintauchen bis zum Anschlag.

Ausblick

Die bisherigen Untersuchungen zeigen unter anderem, dass die Umströmung des Kupferkerns nur bedingt funktioniert und der Effekt deutlich von den Maßtoleranzen abhängt. Bei größeren Toleranzen nimmt das Heizwasser eher den direkten Weg zur Mittelbohrung, was die gewünschte Vermischung eventueller Strähnen beeinträchtigt. Insofern soll zum einen die Steigung des Gewindes vergrößert und zum anderen die Maßtoleranz kleiner gehalten werden, damit das Heizwasser den gewünschten Strömungsweg auch tatsächlich nimmt und der Druckabfall reduziert wird.

Die Auswirkungen dieser und ggfs. weiterer Maßnahmen können mit dem vorgestellten Simulationsmodell gut analysiert und erforderlichenfalls die Konstruktion

darauf basierend verbessert werden. Anhand experimenteller Untersuchungen sollen die Ergebnisse vor allem im Hinblick auf den Druck- aber auch auf den Temperaturabfall des Heizmittels überprüft werden.

Danksagung

Die Studie wird vom Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. (VdF HLK) unter dem Förderkennzeichen VdF-2023-1 gefördert und von der Forschungsgesellschaft Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart mbH (FG HLK) bearbeitet. Die Autoren danken für die Unterstützung.

Literatur

[1] DIN EN 442-2, Radiatoren und Konvektoren – Teil 2: Prüfverfahren und Leistungsangabe; März 2015

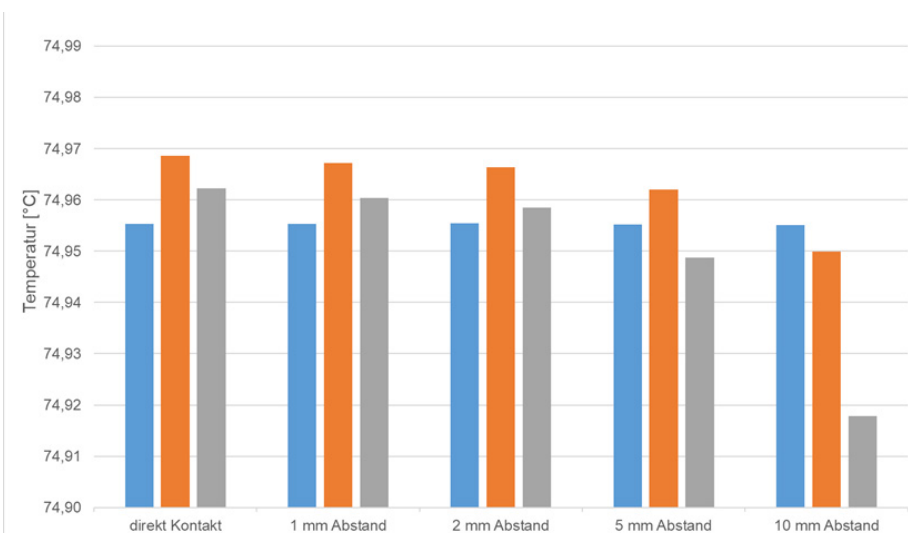


Bild 4: Einfluss der Sensor-Eintauchtiefe

In den Blättern des HLKBRIEFes wird über die Aktivitäten des Instituts für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart, der Forschungsgesellschaft HLK Stuttgart mbH, der HLK Stuttgart GmbH und des Vereins der Förderer der Forschung im Bereich HLK Stuttgart e.V. (Herausgeber) berichtet.

VdF HLK Stuttgart e.V., Pfaffenwaldring 6A, 70569 Stuttgart, www.vdf.hlk-stuttgart.de, E-Mail: info@vdf.hlk-stuttgart.de

Vorstudie zur Optimierung von Lüftungsstrategien für Nichtwohngebäude im Hinblick auf Gesundheit und Energieaufwand

Lukas Siebler

Einleitung

Zur Eindämmung des Klimawandels hat Deutschland sich das Ziel gesetzt, bis 2045 einen CO₂-neutralen Gebäudebestand zu erreichen [1]. Gleichzeitig hat die langanhaltende SARS-CoV-2-Pandemie sowohl gesellschaftliche als auch volkswirtschaftliche Spuren hinterlassen, aber auch gelehrt, dass hohe Außenluftwechsel in Gebäuden ein probates Mittel bei künftigen luftgetragenen Infektionskrankheiten sind [2–6]. Die dafür erforderlichen hohen Luftströme gehen allerdings nicht nur wegen des Lufttransports, sondern auch aufgrund der entstehenden thermischen Verluste mit erheblichen energetischen Mehraufwänden und damit höheren CO₂-Emissionen einher. Die Gesundheit der Menschen und die Energieaufwände für den Gebäudebetrieb stehen daher im Zielkonflikt. Diese vom Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. geförderte Vorstudie befasst sich anhand thermisch-energetischer sowie stofflicher Simulationen von Alltagsszenarien in Nichtwohngebäuden (NWG) mit der Lösung dieses Konfliktes durch eine Optimierungsaufgabe. Hierbei steht die Frage im Vordergrund, wie sich die menschliche Gesundheit und die aus dem Betrieb resultierenden CO₂-Emissionen miteinander vergleichen lassen.

Methodik

Bislang ist ein an unterschiedliche Anforderungen und Untersuchungsaufgaben anpassbares Simulationsmodell entwickelt worden, mit dem ein Schulalltag in einem Stockwerk einer Schule mit sechs Klassenräumen simuliert werden kann. Dabei werden sowohl die stofflichen als auch die thermisch-energetischen Bilanzen der Räume analysiert. Neben maschinellen Lüftungssystemen sollen auch Maßnahmen der Fensterlüftung bewertet werden. Die Modellierung für die Lüftungsmaßnahmen bezieht sich sowohl auf die erforderlichen Hilfsenergien als auch auf die auftretenden Lüftungswärmeverluste. Um reale Szenarien nachbilden zu können, werden Regelungsstrategien nach Stand der Technik in die Simulationsmodelle implementiert. Um sowohl die Gesundheit als auch den Energieaufwand (trotz verschiedener physikalischer Einheiten) gemeinsam bewerten zu können, wird im ersten Schritt eine fiktive Zielgröße entwickelt, über die bei unterschiedlichen Gewichtungen der Gesundheit und des Energieaufwands dann theoretisch optimale Parameter für Lüftungsmaßnahmen bestimmt werden können. Je kleiner diese ist, desto besser ist der spezifisch gewichtete Zielkonflikt Gesundheit vs. Energie gelöst. Diese Zielgröße Φ wird in Gleichung (1) beschrieben:

$$\Phi = x \cdot \frac{\mu_i}{\bar{\mu}} + (1-x) \cdot \frac{W_i}{\bar{W}} \quad (1)$$

Mit der gesundheitlichen Gewichtung x , dem Energieaufwand bei bestimmten Parametern (z.B. einer bestimmten CO₂-Obergrenze oder Zeiten der Fensterlüftungszyklen) W_i , dem gemittelten Energieaufwand über die Variation der Parameter \bar{W} , sowie dem statistischen Erwartungswert an Neuinfektionen μ_i bei bestimmten Parametern und dem Mittelwert dieser Größe über alle Parameter $\bar{\mu}$. Alle Größen werden im Szenario der Schule an einem ganzen Schultag für die sechs Klassenräume des Stockwerks erhoben.

Anhand der Ergebnisse für verschiedene Nutzungsvarianten sollen konkrete Muster identifiziert werden, welche am Ende der Studie in Handlungsempfehlungen für Planungsprozesse zur Belüftung von Nichtwohngebäuden überführt werden können. Auf diese Weise könnte der Zielkonflikt zwischen Gesundheit und Energieaufwand künftig bereits bei der Planung geeigneter Anlagentechnik berücksichtigt werden.

Bisherige Ergebnisse

Nachfolgend werden Simulationsergebnisse für eine paritätische Gewichtung von Gesundheit und Energie aufgezeigt. Hierbei werden Lüftungsstrategien gegenübergestellt, deren Parameter in zuvor durchgeführten Simulationen bereits für diese Gewichtung ideal eingestellt worden sind. In Bild 1 ist anhand der wesentlich geringeren gewichteten Zielgröße eindeutig zu erkennen, dass maschinelle Lüftungen der Fens-

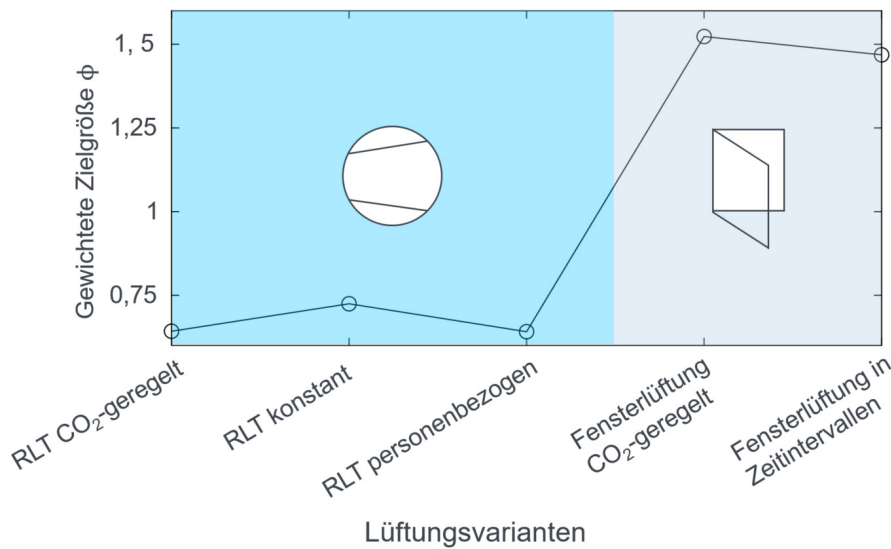


Bild 1: Bewertung unterschiedlicher Lüftungsvarianten anhand einer paritätischen Gewichtung von Gesundheit und Energie

terlüftung sowohl im energetischen als auch im gesundheitlichen Kontext deutlich überlegen sind. Die Erkenntnisse sind zwar nicht überraschend, zeigen allerdings einmal mehr, wie kritisch es zu bewerten ist, dass in deutschen Schulen maschinelle Lüftungen noch immer kaum vertreten sind. An dieser Stelle soll auf die Herausforderung hingewiesen werden, in einer solchen Optimierung geeignete Gewichtungen der Gesundheit und Energie zu identifizieren. Hierbei sind gesellschaftliche und ethische Fragen zu klären, die anhand von einfachen Kennzahlen nicht zu beantworten sind.

Ausblick

Im weiteren Verlauf der Vorstudie soll daher geprüft werden, ob es möglich ist, die beiden im Konflikt zueinander stehenden Größen auf eine gemeinsame zu reduzieren. Denkbar wäre beispielsweise eine ausschließlich monetäre

Bewertung. Hier müsste sowohl berücksichtigt werden, welche Kosten luftgetragene Krankheiten verursachen (Behandlungskosten, aber auch der Ausfall von SchülerInnen oder ArbeitnehmerInnen) als auch welche direkten oder indirekten finanziellen Mittel für die Kompensationen der CO₂-Emissionen aufgebracht werden müssen. Eine Bewertung dieser Art kann es tatsächlich erlauben, ideale Lüftungsstrategien für NWG abzuleiten.

Danksagung

Diese Vorstudie wird vom Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. gefördert (FKZ: VdF-2023-2). Das Institut für Gebäudeenergetik, Thermo-technik und Energiespeicherung der Universität Stuttgart und die Forschungsgesellschaft Heizung Lüftung Klimatechnik Stuttgart mbH danken herzlich für die Unterstützung.

Literatur

- [1] Bundesregierung Deutschland, *Klimaschutzgesetz: Generationenvertrag für das Klima*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/bregde/schwerpunkte/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672> (Zugriff am: 20. Oktober 2023).
- [2] L. Siebler et al., „A coupled experimental and statistical approach for an assessment of SARS-CoV-2 infection risk at indoor event locations“ (eng), *BMC public health*, Jg. 23, Nr. 1, S. 1394, 2023, doi: 10.1186/s12889-023-16154-0.
- [3] L. Siebler, M. Calandri, T. Rathje und K. Stergiaropoulos, „Experimental Methods of Investigating Airborne Indoor Virus-Transmissions Adapted to Several Ventilation Measures“, *medRxiv*, Jg. 2022, 2022.
- [4] C. Redder und C. Fieberg, „Sensitivity analysis of SARS-CoV-2 aerosol exposure“ (eng), *GMS hygiene and infection control*, Jg. 16, Doc28, 2021, doi: 10.3205/dgkh000399.
- [5] T. Hussein et al., „Indoor Model Simulation for COVID-19 Transport and Exposure“ (eng), *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Jg. 18, Nr. 6, 2021, doi: 10.3390/ijerph18062927.
- [6] Deutsche Welle, *Bundesregierung hilft Firmen mit 500-Milliarden-Paket*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dw.com/de/bundesregierung-hilft-firmen-mit-500-milliarden-paket/a-52757943> (Zugriff am: 16. November 2023).

Entwicklung eines Simulationsmodells zur Untersuchung der Potentiale regelbarer Vakuumdämmelemente (ReVaD)

Maurizio Calandri,
Michael Müller, Tobias Henzler

Hintergrund

Das Gebäudeenergiegesetz (GEG) [1] fordert für Neubauten und sanierte Gebäude eine hohe Luftdichtheit und niedrige Wärmedurchgangskoeffizienten der Gebäudehülle, wodurch jedoch auch die Wärmeabgabe an die Umgebung minimiert wird. Dadurch treten in den Sommermonaten und in der Übergangszeit aufgrund der inneren und äußeren Wärmeeinträge vermehrt erhöhte Raumtemperaturen auf. Bei Einhaltung von normativen Sollvorgaben der Raumtemperatur führt dies zu einem steigenden Kühlenergiebedarf. Eine Möglichkeit, den Gesamtenergiebedarf sowohl für Heizen als auch Kühlen zu senken, bieten so genannte regelbare Gebäu-

dehüllen. Diese haben den Vorteil, dass sie den Wärmedurchgang durch die Gebäudehülle variabel an die thermische Last im Gebäude sowie die Außenbedingungen anpassen können. Neben der Reduzierung des Energiebedarfs für die Gebäudeklimatisierung soll der Anteil erneuerbarer Energien erhöht werden, um die Ziele der Energiewende zu erreichen [2]. Hierzu sind Maßnahmen zur zeitlichen Entkopplung von Erzeugung und Verbrauch essenziell. In diesem Kontext sollen durch regelbare Dämmelemente massive Bauteile als thermisch aktivierbare Speichermassen erschlossen und mit zeitlichem Versatz zur Gebäudekühlung oder -heizung genutzt werden. Bild 1 zeigt die beiden angedachten Anwendungsfelder für regelbare Dämmelemente.

Projektziele

Die Regelung der Wärmeleitfähigkeit von Dämmelementen soll im Forschungsvorhaben ReVaD über den Zusammenhang von Gasdruck und Wärmeleitfähigkeit in porösen Materialien erreicht werden. Dazu soll Wasserstoff in die im Projekt zu entwickelnden Dämmpaneele eingeleitet werden. Wird das Paneel vakuumiert, ist die Wärmeleitfähigkeit gering (Erfüllung des GEG-Standards), mit zunehmendem (Wasserstoff-) Gasdruck steigt die Wärmeleitfähigkeit des Dämmelements und damit auch der Wärmestrom durch das Bauteil. Die Druckänderung im Paneel wird durch Variation der Temperatur von angeschlossenen Metallhydridreaktoren zur Speicherung des Wasserstoffs erreicht. Wesentliche Ziele im Vorhaben

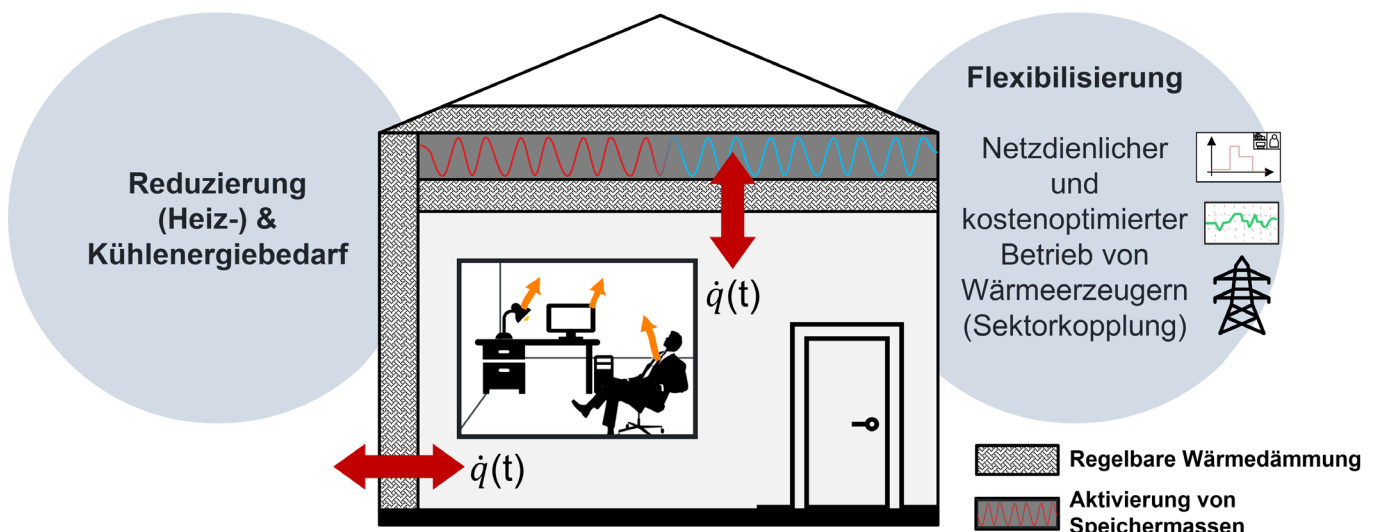


Bild 1: Mögliche Einsatzbereiche für regelbare Dämmelemente

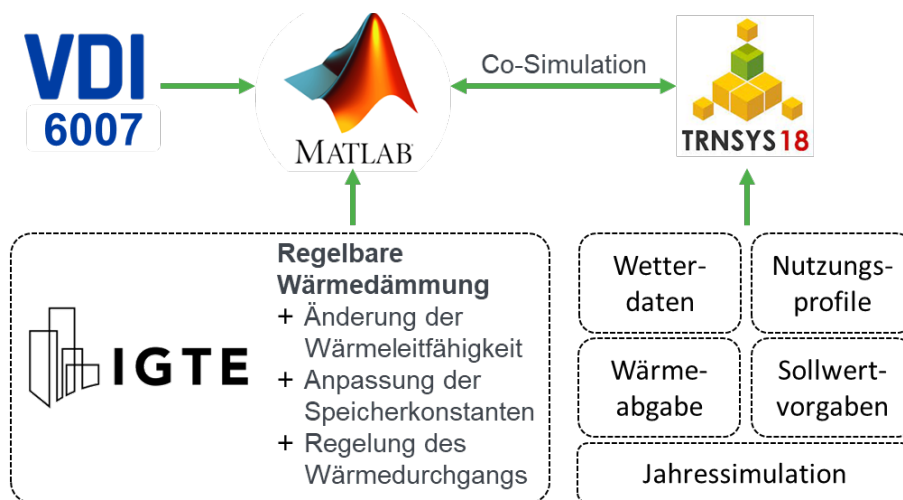


Bild 2: Modellentwicklung auf Basis von VDI 6007

sind die Entwicklung eines wasserstoffdichten Paneels sowie die Charakterisierung dafür geeigneter textiler Füllmaterialien, die Entwicklung und Erprobung von Metallhydridreaktoren sowie die modellbasierte Abbildung regelbarer Wärmedämmschichten in Simulationsumgebungen und die Entwicklung von Regelungsalgorithmen.

Zusammenfassend werden die Einzelkomponenten in einen Demonstrator überführt und dessen Funktionsfähigkeit in Laborversuchen untersucht. Am Institut für Gebäudeenergetik, Thermo-technik und Energiespeicherung (IGTE) werden geeignete Einsatzbereiche von regelbaren Dämmelementen und deren Energieeinsparpotentiale anhand eines inhouse entwickelten Simulationsmodells untersucht, mit dem das thermisch-energetische Verhalten regelbarer Gebäudehüllen abgebildet und mit Gebäudehüllen nach dem Stand der Technik verglichen werden kann.

Modellanforderungen

Die Anforderungen an thermisch-energetische Simulationsprogramme zur Abbildung des Leis-

tungsbedarfs für Heizen und Kühlen bzw. der Raumtemperaturverläufe basieren auf den Mindestanforderungen in VDI 6020 [3]. Hierbei werden klimatische Bedingungen, innere Wärmeeinträge sowie die Nutzungs- und Betriebszeiten berücksichtigt und daraus Lastganglinien für unterschiedliche Zustandsgrößen in stündlicher Auflösung ermittelt (z.B. Raumlufttemperatur, Heiz- und Kühlleistung). Diese ermöglichen es, ein Gebäude oder einen Raum hinsichtlich des thermisch-energetischen Verhaltens zu bewerten.

Derzeit verfügbare Programme zur Durchführung thermisch-energetischer Simulationen berechnen vor Simulationsbeginn für die Abbildung von Außen- oder Innenwänden einen unveränderlichen Wärmedurchgangskoeffizienten, da deren Materialeigenschaften gemäß VDI 6020 als zeitunabhängige Größe definiert werden. Daher wird am IGTE eine Simulationsumgebung weiterentwickelt, die die Abbildung regelbarer Dämmelemente ermöglicht und gleichzeitig die Mindestanforderungen an ein Raummodell nach VDI 6020 erfüllt (siehe Bild 2).

Das von [4] entwickelte Modell für instationäre thermische Raumsimulationen unter Berücksichtigung veränderlicher Bauteileigenschaften basiert auf dem Rechenkern nach VDI 6007 [5] (siehe Bild 2). Dabei wird auf ein 2-Kapazitäten-Modell (2-K-Modell) zurückgegriffen, welches anhand einer elektrischen Ersatzschaltung die Materialeigenschaften der Bauteile über Wärmewiderstände und -kapazitäten berücksichtigt und in Bauteilkennwerte und Speicherkonstanten überführt. Das angepasste Modell, das im Projekt entwickelt werden soll, ermöglicht es, die variable Wärmeleitfähigkeit der Wandschicht innerhalb eines Bauteils für die Abbildung eines regelbaren Dämmelements zu jedem Zeitschritt zu verändern. Mit diesem Modell können das thermisch-energetische Verhalten regelbarer Gebäudehüllen abgebildet, ein Vergleich mit Gebäudehüllen nach dem Stand der Technik durchgeführt sowie Regelungsstrategien und Energieeinsparpotentiale abgeleitet werden.

Potentialabschätzung regelbarer Gebäudehüllen

Mit dem bisher verfügbaren Modell ist bereits eine Abschätzung des Energieeinsparpotentials regelbarer Dämmelemente in Außenfassaden möglich. Dabei wird unter anderem der Energiebedarf für Heizen und Kühlen eines Einzelbüroraums in Stuttgart sowohl mit einer Gebäudehülle nach den Anforderungen des GEG als auch mit einer regelbaren Gebäudehülle in Jahressimulationen untersucht.

In der Untersuchung wird der Heiz- und Kühlenergiebedarf für

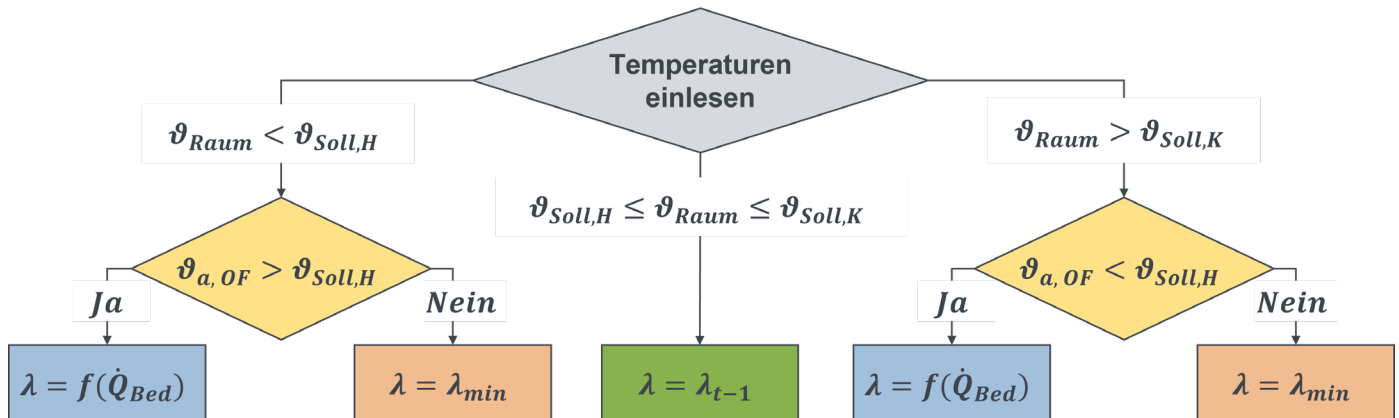


Bild 3: Berechnungsalgorithmus für den Wärmedurchgang der regelbaren Gebäudehülle

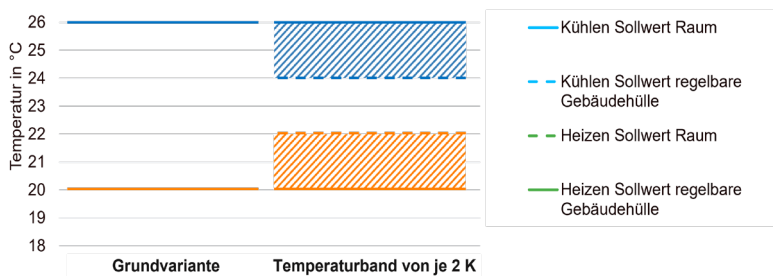


Bild 4: Solltemperaturen bzw. -bänder für die Raumtemperatur

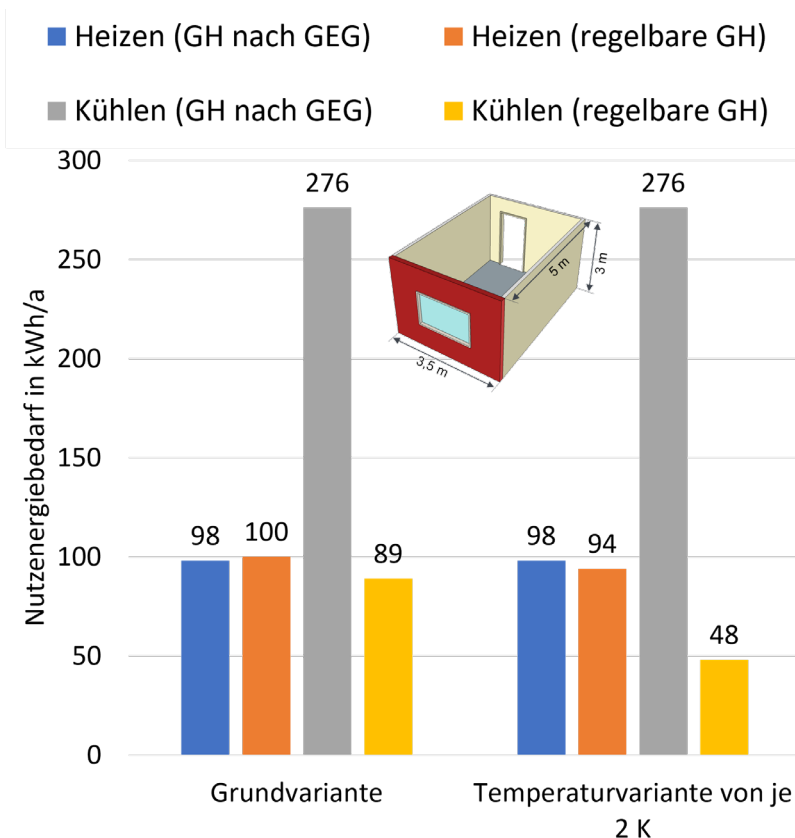


Bild 5: Ergebnisse von exemplarischen Berechnungen für einen Einzelbüroraum

einen typischen Einzelbüroraum ermittelt, dessen Außenwand als Wärmedämmverbundsystem ($U = 0,23 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) ausgeführt ist. Diesem wird eine Gebäudehülle mit einem Wärmedurchgangskoeffizient von minimal $0,23$ und maximal $2,27 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ als regelbare Gebäudehülle gegenübergestellt. Deren regelbare Dämmschicht wird hierbei anhand der äußeren Oberflächentemperatur der Fassade geregelt. Dadurch wird bei Raumtemperaturen über dem Sollwert durch eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht Wärme abgeführt, wenn auf der Außenseite geeignete thermische Bedingungen zur Lastabfuhr herrschen (Bild 3). Beim Einsatz von Temperaturbändern (Bild 4) für die Regelung, wird die Raumtemperatur weiter abgesenkt als die eigentliche Solltemperatur des Innenraums (bspw. um 2 K), sofern dies bei vorherrschender äußerer Oberflächentemperatur möglich ist. Dadurch kann die thermische Speichermasse des Raums bei Einhaltung des thermischen Komforts mitgenutzt werden. Die Ergebnisse (Bild 5) zeigen, dass regelbare Gebäudehüllen

deutliche Potentiale zur Reduktion des Kühlenergiebedarfs von Büroräumen aufweisen, während beim Heizenergiebedarf aufgrund der vergleichsweise hohen inneren und äußeren Wärmeeinträge keine Potentiale vorliegen. Im Projekt sollen diese Potentiale durch die oben beschriebene technische Umsetzung über eine Regelung des Gasdrucks in Paneelen der Fassade gehoben werden.

Ausblick

Neben regelbaren Gebäudehüllen sollen im Modell zukünftig massive Innenbauteile thermisch aktiviert werden können, sodass strukturell notwendige Massen im Gebäude als regelbare Speichermasse dienen können. Auf Grund der hohen Dämmwirkung des regelbaren Vakuumdämmelements lassen sich massive Gebäudeteile nahezu thermisch entkoppeln, so dass sie in Zeiten hoher Verfügbarkeit elektrischer – oder auch thermischer Energie – erwärmt oder gekühlt und anschließend bedarfsorientiert entladen werden können. Dadurch können die regelbaren Dämmelemente nicht nur für eine Reduzierung des Energiebedarfs, sondern auch zur Verbesserung der Speicherfähigkeit von Gebäuden und somit zur Verschiebung von Lasten (Flexibilisierung) eingesetzt werden. Dafür wird das inhouse entwickelte Simulationsmodell um Algorithmen zur Abbildung thermisch aktivierter Speichermassen erweitert, sodass Flexibilisierungspotentiale für Räume unterschiedlicher Nutzung quan-

tifiziert werden können. Hierzu werden für unterschiedliche Anwendungsbereiche geeignete Regelungskonzepte entwickelt.

Danksagung

Das Forschungsvorhaben ReVaD (FKZ: 22617 N) wird im Rahmen des Programms für Industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF) durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) gefördert und vom Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. (VdF HLK) in Kooperation mit dem Forschungskuratorium Textil e.V. begleitet. Das Forschungsvorhaben wird vom Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart in Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) e.V. und den Deutschen Instituten für Textil- und Faserforschung Denkendorf (DITF) bearbeitet. Die Autoren danken für die Unterstützung.

Literatur

- [1] Bundesministerium der Justiz und Verbraucherschutz, Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz - GEG). Bonn: Bundesanzeiger Verlag, 13. August 2020.
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Die Energie der Zukunft, 8. Moni-

toring-Bericht zur Energiewende – Berichtsjahre 2018 und 2019. Berlin: Februar 2021.

[3] VDI Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik. VDI 6020 – Anforderungen an thermisch-energetische Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation. Beuth Verlag, Berlin, 2022

[4] T. Henzler, Adaptive Gebäudehüllen und ihr Potential zur Energieeinsparung im Gebäudebereich, 2017.

[5] VDI Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik. VDI 6007 – Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden. Beuth Verlag, Berlin, 2015

Systemübergreifende Regelstrategien für Wohnungslüftungs- und Heizungssysteme

Mostafa Barghash,
Tim Jourdan

Hintergrund und Zielsetzung

Zentrale Wohnungslüftungsgeräte (WLG) werden gemäß dem Stand der Technik üblicherweise mit fest eingestellten Volumenstromklappen ausgestattet, um die Zu- und Abluftströme auslegungsgemäß auf verschiedene Bereiche (Zonen) zu verteilen. Daraus folgt, dass diese Einstellungen im laufenden Betrieb nicht angepasst werden können. Diese Konstant-Volumenstrom-Systeme (KVS) führen dazu, dass Räume je nach Nutzung häufig mit Luftströmen versorgt werden, die entweder über oder unter den tatsächlichen Belüftungsanforderungen liegen. Eine zonenweise Regelung der Luftströme könnte hingegen einzelne Räume bedarfsgerecht belüften und somit den Energieaufwand für den Lufttransport und die Lüftungswärmeverluste im Heizfall reduzieren. Dieses Konzept wird auch als Variables-Volumenstrom-System (VVS) bezeichnet. Eine Möglichkeit, diese zonenweise Regelung zu realisieren, besteht in der Verwendung von Volumenstromregelklappen und zentralen Ventilatoren, wie es bereits in Nichtwohngebäuden üblich ist. Alternativ dazu kann eine dezentrale Ventilation verfolgt werden, bei der mehrere Ventilatoren in den jeweiligen Luftkanalsträngen positioniert werden, während die übrigen Komponenten des WLG – einschließlich des Wärmerückgewinnungssystems (WRG)

und der Filter – zentral angeordnet bleiben. Dabei können die zentralen Ventilatoren und die Volumenstromregelklappen entfallen. Die energetischen Einsparungen würden in diesem Fall durch das Wegfallen der dissipativen Energieverluste bei der Drosselung erreicht. Um das Einsparpotential einer solchen dezentralen Ventilation unter verschiedenen Nutzungsszenarien zu quantifizieren, wird ein Luftverteiler-Hardware-in-the-Loop-Prüfstand (HiL) entwickelt. Dieser Prüfstand ist mit entsprechenden Sensoren und Aktoren ausgestattet, um u.a. den Volumenstrom für jeden Raum zu regeln und die elektrische Aufnahmeleistung der Ventilatoren zu messen.

Konzeptionierung

Die Auslegung des Luftverteiler-HiL-Prüfstands erfolgt anhand einer Beispielwohnung gemäß der exemplarischen Angaben aus DIN 1946-6 Beiblatt 1 [1]. Die Referenzwohnung umfasst drei Zuluft Räume (Wohnzimmer, Schlafzimmer, Kinderzimmer) und zwei Abluft Räume (Bad, Küche) mit einer gelüfteten Wohnfläche von 63,8 m². Jeder Zuluft- und Abluftstrang am HiL-Prüfstand ist mit zwei Klappen ausgestattet, nämlich einer Volumenstromregelklappe und einer Emulationsklappe (s. Bild 1). Bei dezentraler Belüftung werden die Volumenstromregelklappen durch Radialventilatoren ersetzt. Ein wesentlicher Aspekt bei der Konzeptionierung und der Wahl geeigneter Annahmen stellt das Kanalnetz dar, dessen Dimen-

sionierung (z.B. Kanalquerschnitt, Druckverlustberechnung) mit üblichen Auslegungstools vorgenommen und ein geeignetes WLG gewählt wird. Am Prüfstand werden die bei der Dimensionierung ermittelten Druckverluste über entsprechende Emulationsklappen eingestellt.

Der HiL-Prüfstand ermöglicht es, die tatsächlichen Bedingungen in einer Umgebung praxisnah zu emulieren und die Aufnahmeleistung der Wohnungslüftung zu bewerten. Dies erlaubt eine Analyse



Bild 1: Luftverteiler-HiL-Prüfstand

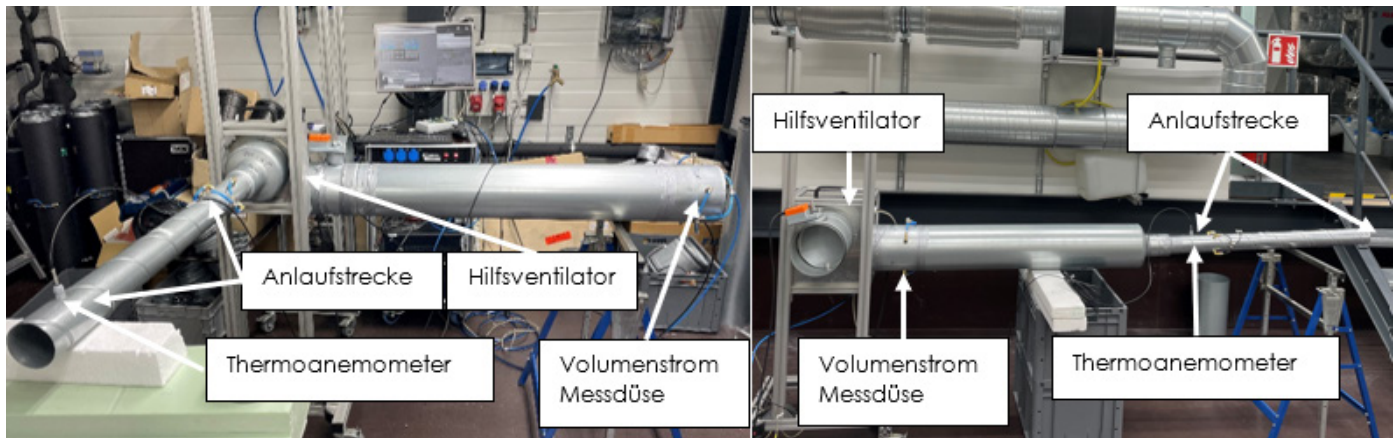


Bild 2: Thermoanemometer-Prüfstand (links: Abluft-Anemometer, rechts: Zuluft-Anemometer)

unterschiedlicher Regel- bzw. Belüftungsstrategien und die Bewertung des Energieeinsparpotentials bei der Verwendung von mehreren dezentralen Ventilatoren im Vergleich zu zentralen Ventilatoren.

Anemometer-Kalibrierung

Zur Messung der Luftgeschwindigkeit in jeder Zu- und Abluftstrecke werden Thermoanemometer eingesetzt. Die Strömungsgeschwindigkeit kann hiermit nur punktuell erfasst werden. Um trotz des vorliegenden Strömungsprofils belastbare Rückschlüsse auf den Volumenstrom vornehmen zu können, erfolgt eine Kalibrierung unter Einsatz von Volumenstromdüsen und Hilfsventilatoren (s. Bild 2). Mittels linearer Regression wird der Zusammenhang von Luftgeschwindigkeit und Volumenstrom ermittelt.

Da die Kalibrierung nicht direkt am HiL-Prüfstand erfolgen kann, liegt ein besonderer Fokus auf der Reproduzierbarkeit der Messungen, weshalb Kabelverschraubungen, eine hinreichende Anlaufstrecke und der Einfluss der Einbausituation berücksichtigt sind. In Bild 3 sind ex-

emplarische Ergebnisse der Kalibrierung für das Anemometer im „Raum Wohnzimmer“ dargestellt. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung der einzelnen Kalibrierungen, sodass die Zuverlässigkeit und die Reproduzierbarkeit der Kalibrierung sichergestellt sind.

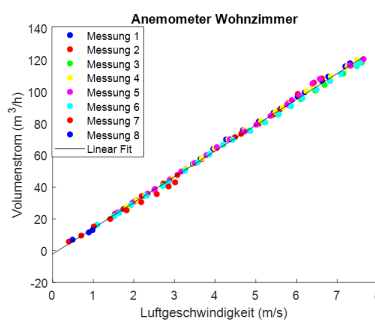
Druckmessung und Druckverlustemulation

Am HiL-Prüfstand werden geeignete Positionen für die Druckmessung identifiziert, um den Druckverlust in jeder Strecke –

beginnend beim WLG bis hin zu den jeweiligen Räumen (Messbox) – zu erfassen. In Bild 4 sind die Positionen der Druckmessungen dargestellt, wobei sich die jeweiligen Messstellen stets unmittelbar im Kanal vor den Verteilern und der Messbox befinden. Die Druckverluste in den Außen- und Fortluftrohren sind aufgrund deren kurzer Länge vernachlässigt. Zudem wird der gesamte statische Druck je Geräteventilator (AU/ZU bzw. AB/FO) gemessen (s. Δp_2 und Δp_3 in Bild 4).

Ergebnisse

Gegenwärtig werden Funktionstests am HiL-Prüfstand durchgeführt. Im Rahmen dieses Prozesses wird zunächst ein KVS für die zentrale Ventilation untersucht. Damit wird die Funktionsfähigkeit der Kommunikation zwischen der LabVIEW-Benutzeroberfläche und allen Sensoren sowie Aktoren nachgewiesen. Beim KVS werden sämtliche Zu- und Abluftklappen vollständig geöffnet und der Sollvolumenstrom für jeden Ventilator (AU/ZU bzw. AB/FO) in der Benutzeroberfläche festgelegt. In der Regel werden alle Volumenstromklappen mit Nennlüf-



Messung 1	Kalibrierung gegen DN 50 Messdüse
Messung 2	Kalibrierung gegen DN 50 Messdüse (wiederholt)
Messung 3	Kalibrierung gegen DN 30 Messdüse
Messung 4	Kalibrierung gegen DN 50 Messdüse mit 90° Bogen am Rande der Messstrecke
Messung 5	Kalibrierung gegen DN 50 Messdüse (wiederholt) mit 90° Bogen am Rande der Messstrecke
Messung 6	Kalibrierung gegen DN 30 Messdüse mit 90° Bogen am Rande der Messstrecke
Messung 7	Kalibrierung gegen DN 17 Messdüse
Messung 8	Kalibrierung gegen DN 10 Messdüse

Bild 3: Thermoanemometer-Kalibrierung gegenüber Volumenstromdüse

Tabelle 1: Soll- und Ist-Volumenstrom für jede Lüftungsstufe in den Zulufräumen am HiL-Prüfstand

Lüftungsstufe	Volumenstrom in m ³ /h					
	Wohnzimmer		Schlafzimmer		Kinderzimmer	
	Soll	Ist	Soll	Ist	Soll	Ist
IL	41	41,1	41	40,4	26	26,5
NL	32	31,9	32	31,7	20	20,3
RL	22	22,5	22	22,3	14	13,4
LFS	9,6	9,4	9,6	10,2	6	5,6

tungseinstellung (NL) betrieben. Diese Position bleibt bei den anderen Lüftungsstufen (Intensivlüftung (IL), reduzierte Lüftung (RL) und Lüftung zum Feuchteschutz (LFS)) unverändert. In Tabelle 1 sind die Soll- und Ist-Volumenströme für die Zulufräume am HiL-Prüfstand bei den verschiedenen Lüftungsstufen im quasi-stationären Zustand dargestellt. Es zeigt sich, dass die Ist-Werte näherungsweise den Soll-Werten entsprechen.

Ausblick

Die Untersuchung in diesem Projekt umfasst eine Funktionserprobung verschiedener Regelstrategien für die Ventilation der Referenzwohnung. Im nächsten Schritt werden unterschiedliche Lastprofile am HiL-Prüfstand aufgeprägt, um den Energieaufwand der zentralen Lüftungsanlage zu untersuchen. Diese Lastprofile werden auch bei der Untersuchung der dezentralen Ventilation verwendet, um das Energieeinsparpotential gegenüber einer

zentralen Lüftungsanlage durch die dort angeordneten Ventilatoren quantitativ zu erfassen.

Danksagung

Das Forschungsvorhaben (FKZ: 22051 N) wird im Rahmen des Programms für Industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF) durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) gefördert und durch den Verein der Förderer der Forschungen im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. getragen. Die Bearbeitung erfolgt durch das Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart in Kooperation mit der Forschungsgesellschaft Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart mbH (FG HLK). Die Autoren danken für die Unterstützung.

Literatur

[1] DIN 1946-6 Beiblatt 1: Lüftung von Wohnungen - Allgemeine Anforderungen, Anforderungen zur Bemessung, Ausführung und Kennzeichnung, Übergabe/Übernahme (Abnahme) und Instandhaltung - Beiblatt 1: Beispielergebnisse für ausgewählte Lüftungssysteme, Sep. 2012.

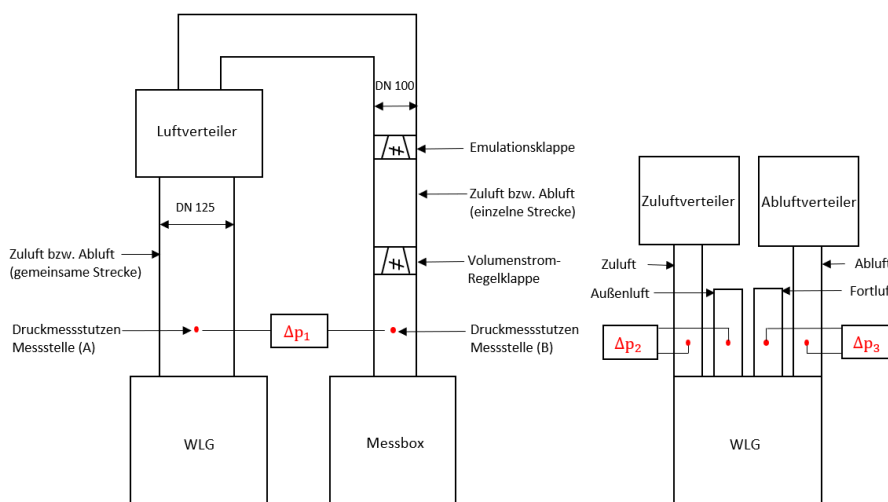


Bild 4: Druckmessstutzen-Positionen für die Druckdifferenz-Messung (links: für jeden Raum (einzelne Strecke), rechts: für die Ventilatoren)

Robuste Bewertung von Entrauchungssystemen in Hallen und Atrien unter unsicheren Randbedingungen

Yuanchen Wang

Einleitung

Etwa 90% aller Opfer von Gebäudebränden erleiden keine Verbrennungen, sondern Vergiftungen durch toxisch wirkende Rauchgase [1]. Bereits in der Schwelphase tritt eine signifikante Rauchentwicklung auf, die die Sicht reduziert und so die Selbstrettung der Personen im Gebäude und die Fremdrettung durch die Feuerwehr behindert. Im weiteren Brandverlauf verhindert die Rauchbildung die Flucht und wird für Gebäudenutzer zur Lebens-

gefahr. Bei der Entwicklung von Brandschutzkonzepten stehen somit neben der Eindämmung des Brandes sichere Entrauchungsmaßnahmen im Vordergrund [2]. Bei bisherigen Berechnungsverfahren zur Auslegung von Entrauchungssystemen wird i.d.R. die Höhe der raucharmen Schicht (RS) als Hauptbewertungsgröße verwendet [3], wie in Bild 1 dargestellt. Die Berechnungsverfahren sind stark vereinfacht und verlieren bei komplexeren Raumgeometrien ihre Gültigkeit. Dabei wird auch nicht berücksichtigt, ob überhaupt eine Rauchschichtung im Raum vorliegt. Auch weitere Parameter, die für die Entrauchungsmaßnahmen wichtig sind – wie beispielsweise die Sichtweite im Aufenthaltsbereich der Personen oder die Robustheit des Entrauchungssystems – können nicht bewertet werden [4].

zwei Berechnungsansätze (analytisch mit Kennzahlen sowie stochastisch mit Monte-Carlo-Simulationen) zur Beschreibung der Rauchausbreitung und Rauchschichtung in typischen Gebäudegeometrien untersucht. Die Erkenntnisse werden als Grundlage für die Entwicklung des Berechnungstools dienen, deren Anwendungsbereich auf Gebäude mit komplexer Geometrie ausgeweitet werden soll. Neben der Höhe der raucharmen Schicht werden weitere relevante Kriterien wie Sichtweite und Temperatur im Aufenthaltsbereich sowie die Strömungsrichtung über die Entrauchungsöffnung berücksichtigt – insbesondere unter unsicheren Randbedingungen. Ein weiterer Fokus liegt auf der Bewertung, ob überhaupt eine stabile Temperatur- bzw. Rauchgasschichtung im Raum vorliegt. Mit dem Ansatz soll eine hohe Robustheit der zu entwickelnden Berechnungsansätze und damit eine verbesserte Planungssicherheit für die Anwender (überwiegend kleine und mittlere Unternehmen) erreicht werden.

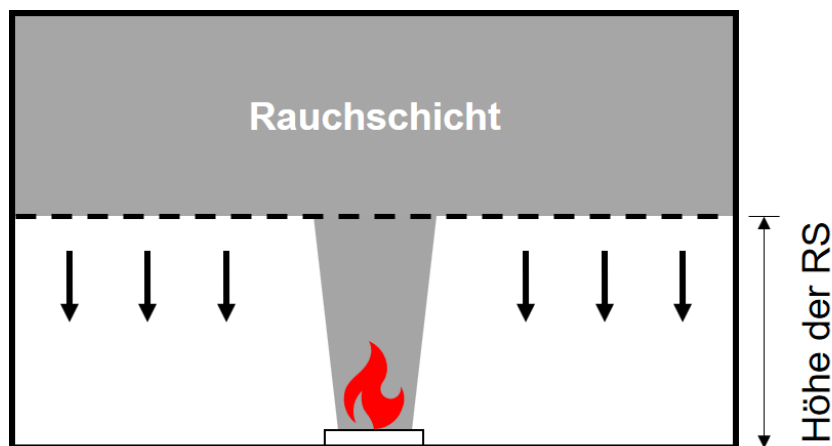


Bild 1: Rauchverteilung in einem Raum

gefahr. Bei der Entwicklung von Brandschutzkonzepten stehen somit neben der Eindämmung des Brandes sichere Entrauchungsmaßnahmen im Vordergrund [2]. Bei bisherigen Berechnungsverfahren zur Auslegung von Entrauchungssystemen wird i.d.R.

Ziel und Vorgehen

Ziel des Forschungsvorhabens RoBewEnt ist es, ein einfach anwendbares Berechnungstool für die ganzheitliche Bewertung von natürlichen und maschinellen Entrauchungssystemen zu entwickeln. Dazu werden parallel

Die Bearbeitung des Forschungsvorhabens erfolgt in Kooperation zwischen dem Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart und dem Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik (EBC) der RWTH Aachen.

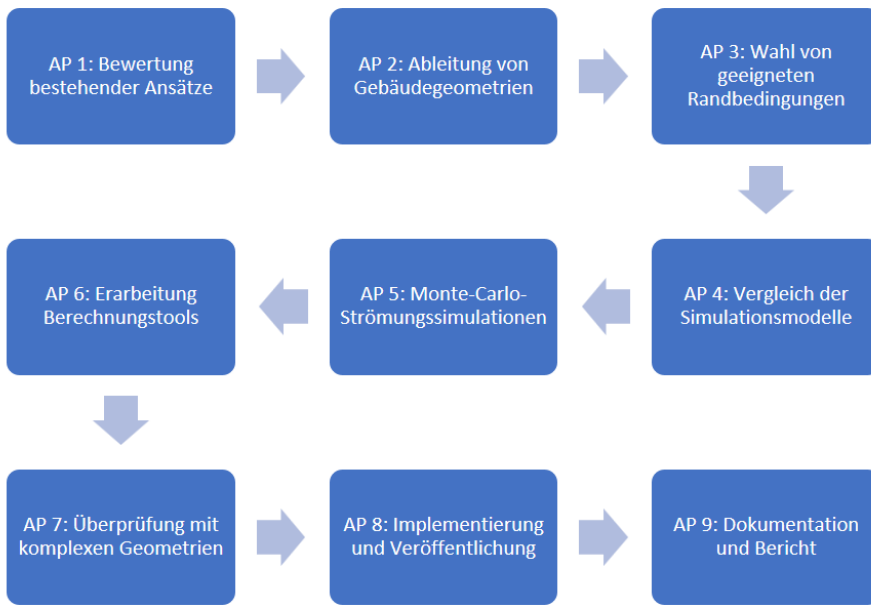


Bild 2: Projektablauf

Arbeitsinhalte des IGTE

Der Projektablauf ist in Bild 2 dargestellt. Die Hauptaufgaben des IGTE sind wie folgt:

- Bewertung bestehender Berechnungsansätze
- Durchführung einer Literaturstudie zum Gebäudebestand in Deutschland, Erstellung typischer Gebäudegeometrien für Hallen und Atrien und Identifikation von Merkmalen für komplexe Geometrien
- Auswahl repräsentativer Typen sowie kritischer Tage im Jahr
- Durchführung von Simulationen mit ANSYS Fluent und Vergleich der Ergebnisse mit Fire Dynamics Simulator (FDS)
- Entwicklung analytischer Ansätze für das Berechnungstool (anhand bestehender Ansätze und dimensionsloser Kennzahlen)

- Durchführung von Simulationen mit komplexeren Gebäudegeometrien, Modeller-gänzung und -überprüfung sowie Festlegung der Gültigkeitsbereiche
- Unterstützung bei der Programmierung und Implementierung des Berechnungsmodells

Danksagung

Das Forschungsvorhaben (FKZ: 22842 N) wird im Rahmen des Programms für Industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF) durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) gefördert und durch die Forschungsvereinigung für Luft- und Trocknungstechnik e.V. (FLT) getragen. Der Autor dankt für die Unterstützung.

Literatur

- [1] Berufsgenossenschaft Holz und Metall: BGI 560. Arbeitssicherheit durch vorbeugenden Brandschutz. Mainz: Berufsgenossenschaft Holz und Metall (BGHM). 2013
- [2] DIN 18232-1:2002-02. Rauch- und Wärmefreihaltung. Teil 1: Begriffe, Aufgabenstellung
- [3] ISO 24678-4:2023-06. Brandschutzingenieurwesen - Anforderungen an algebraische Gleichungen. Teil 4: Rauchgas-schichten
- [4] Wesseling, M. (2022). Probabilistische Bewertung von Entrauchungsanlagen. Dissertation. RWTH Aachen University. <https://doi.org/10.18154/RWTH-2021-03977>

Über iterative Verteilerstrukturen zur Strömungsoptimierung mittels additiver Fertigung

Joel Kimmich

Einleitung

Die additive Fertigung – besser bekannt als 3D-Druck – erweitert die Möglichkeiten im Design von Bauteilen. Im Bereich von Wärmeübertragern wird hierzu an innovativen wärmeübertragenden Flächen geforscht, die Leistung und Druckabfall verbessern sollen. Ein Beispiel sind Triply Periodic Minimal Surfaces (dreifach periodische Minimalflächen), die bereits zwei getrennte Volumina erzeugen. Die komplexe Form (siehe Bild 1) ist erst durch additive Fertigung herstellbar. Ein weitgehend unbeachtetes Feld ist jedoch die Strömungsverteilung auf solche komplexen Strukturen. Diese Verteiler sind nicht trivial, bieten durch die gewonnene Flexibilität der additiven Fertigung jedoch gleichzeitig die Chance, die Strömung auch während der Verteilung zu beeinflussen. Am Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) Stuttgart werden diese additiv gefertigten, anpassbaren Verteiler erforscht.

Mathematischer Hintergrund

Eine erste Machbarkeitsstudie nutzt mathematische Geometrien, die iterativ erstellt werden. Diese Idee beruht auf einem Verteiler, der von Noack et al. [1] entwickelt wurde. Entscheidend hierbei ist, dass jede Iterationsstufe eine

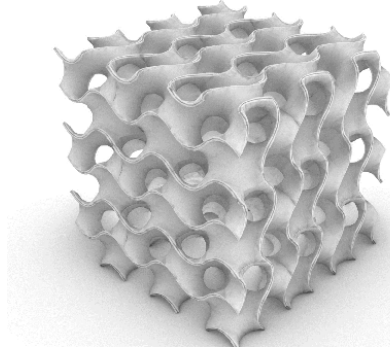


Bild 1: Triply Periodic Minimal Surface

weitere Stufe der Strömungsverteilung darstellen kann. Zusätzlich wird die Geometrieerstellung durch die mathematisch eindeutige Definition erleichtert. Eine Gruppe solcher mathematischer Geometrien sind flächenfüllende Kurven. In der Mathematik dienen diese – bildlich gesprochen – der „Übersetzung eines 1D-Wertes in eine 2D-Koordinate“, wenn die Iterationsstufen gegen unendlich gehen. Diese Eigenschaft, die für diese Arbeit als gegeben angesehen werden kann, macht flächenfüllenden Kurven geeignet für die Verteilung einer Strömung während den ersten Iterationsstufen.

Hilbert-Kurve

Die Hilbert-Kurve, eine flächenfüllende Kurve, wird bis einschließlich der 3. Iteration verwendet, um einen ersten Verteiler zu konstruieren und zu drucken. Ein Gehäuse um diese Struktur dient zur Verteilung des zweiten Fluids auf die wärmeübertragende Struktur. Die Struktur aus Kunststoff und Me-

tall lässt sich wie geplant fertigen. Die während des Designs vorgegebenen Winkel können bei der Fertigung eingehalten werden, um überhängende Flächen und ein resultierendes Zusammenbrechen der Geometrie während des Drucks zu verhindern. Das ermöglicht es, auch einen Wärmeübertrager bestehend aus wärmeübertragender Schicht, Verteiler und Sammler zu erstellen. Dieser besteht aus einer extrudierten Hilbert-Kurve als wärmeübertragende Fläche und einem gespiegelten Verteiler als Sammler. Bild 2 zeigt einen gedruckten Verteiler (erstellt bis Iteration 2) und den Wärmeübertrager mit wärmeübertragender Schicht.

Erkenntnisse

Die Verteilung einer Strömung in Wärmeübertragern hat neben der Aufteilung der Volumenströme auf die wärmeübertragende Schicht auch die Aufgabe, diese Aufteilung möglichst gleichmäßig durchzuführen. Im Falle des Verteilers mittels Hilbert-Kurve ist dies nicht gegeben, weil die Spiegelung des Verteilers für den Sammler einen hydraulischen Kurzschluss erzeugt; die Strömung kann annähernd ungehindert gerade durch den Wärmeübertrager strömen. Dies könnte verhindert werden, wenn anstatt einer Spiegelsymmetrie eine Punktsymmetrie des Verteilers genutzt werden könnte, um jeden Strömungsweg durch

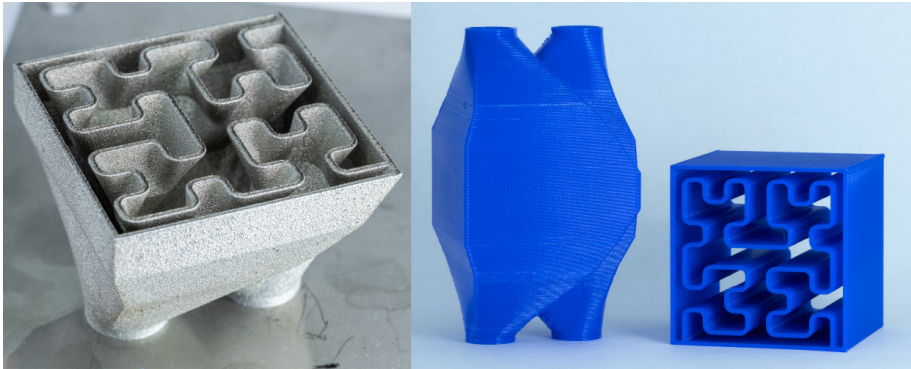


Bild 2: Gedruckter Hilbert-Verteiler (links), Hilbert-Wärmeübertrager (Mitte) und wärmeübertragende Schicht (rechts)

den Wärmeübertrager in seiner Länge aneinander anzugleichen. Die Form der Hilbert-Kurve macht eine punktsymmetrische Spiegelung des Verteilers jedoch unmöglich.

Auch die Erstellung des Verteilers hat Verbesserungspotential: Die dafür genutzte Software AutoCAD Inventor stößt bei komplexen Geometrien an ihre Grenzen. Der Volumenkörper des Verteilers ist nicht wie bei klassischen Produktionsverfahren aus mehreren, einfachen Geometrien aufgebaut. Stattdessen muss für den Druck ein einziger Volumenkörper erstellt werden. Der Inventor-CAD-Kern ist für die dafür erforderlichen booleschen Operationen bei den komplexen Geometrien des additiven Verteilers nicht ausgelegt und beendet viele Befehle ohne erkennbare Logik mit einem Fehler. Es wird sich daher dazu entschieden, für die Geometrieerstellung weiterer Verteiler eine eigene Methodik zu entwickeln. Diese soll es außerdem ermöglichen, Optimierungen durchzuführen. Diese Software wird selbst in

der Programmiersprache Python unter Verwendung des Paketes „cadquery“ geschrieben.

Neue Methodik

In Python wird unter Verwendung objektorientierter Programmierung eine geometrieoffene Software zur Erstellung quasi-fraktaler Verteiler geschrieben. Diese quasi-fraktalen Verteiler basieren weiterhin auf dem iterativen Ansatz, wie auch der Hilbert-Kurven-Verteiler. Jedoch wird in die Software ein Algorithmus implementiert, der unter Angabe der Grundform und deren Iterationsschritte in fraktaler Weise den Verteiler generiert. Dadurch kann eine Punktsymmetrie zur Erstellung des Sammlers erreicht werden. Der erstellte Verteiler ist nicht aus perfekt fraktalen Iterationen aufgebaut, weil konstruktionsbedingt einige Sonderregeln implementiert sind, was in der Benennung „quasi-fraktal“ resultiert. Die geschriebene Software enthält mehrere Algorithmen zur automatischen Geometrieangepassung innerhalb und zwischen den Iterationsstufen wie auch zur

Einhaltung aller Winkel, um Überhang zu vermeiden.

Der automatisch erstellte Verteiler ist vollständig parametrisiert. Dadurch kann jede Grundform innerhalb der Iterationen in der Größe variiert werden. Dies ermöglicht eine Optimierung der Strömung, indem CFD-Simulationen genutzt werden, um die Verteilung in der wärmeübertragenden Schicht zu bestimmen und die Verteilergeometrie anzupassen. Darum ist eine Schnittstelle zur quelloffenen Simulationssoftware OpenFOAM in die Software implementiert, die es ermöglicht, den erstellten Verteiler hinsichtlich seiner strömungstechnischen Eigenschaften zu simulieren und die Ergebnisse einem Optimierer zur Verfügung zu stellen.

Fazit und Ausblick

Ein iterativer Aufbau von Verteilern erleichtert die Verteilung seiner Strömung auf komplexe Geometrien. Die eigenentwickelte Software zur Erstellung iterativer quasi-fraktaler Verteiler ermöglicht die Untersuchung und automatische Optimierung additiv gefertigter Verteiler. In Zukunft können so neue Verteilergeometrien und Wärmeübertrager entwickelt und optimiert werden.

Literatur

[1] Noack et al., Additive Fertigung von Hochleistungswärmetauschern unter Verwendung fraktaler Strukturen, 2018

Antrieb einer Absorptionswärmepumpe mit marktverfügbarem Wärmeerzeuger

Johannes Brunder,
Florian Meyer

Einleitung

Die Verfügbarkeit von derzeit als klimaneutral eingestuftem Brennstoffen wie Biogas oder Holzpellets ist begrenzt, weshalb für diese in Zukunft deutlich höhere Preise zu erwarten sind. Daher besteht ein großer Bedarf an Konzepten zur sparsamen Verwendung von solchen Brennstoffen. Werden diese zur Bereitstellung von Wärme genutzt, bieten Absorptionswärmepumpen (AWP) die Möglichkeit, die Brennstoffausnutzung gegenüber der bisherigen Brennwert-

technik deutlich zu erhöhen. Eine AWP wird hauptsächlich mit Wärme auf hohem Temperaturniveau angetrieben, nimmt zusätzlich Umweltwärme auf und hebt diese auf ein zur Beheizung nutzbares Temperaturniveau an. So kann bei gleicher eingesetzter Brennstoffmenge mehr Heizwärme zur Verfügung gestellt werden.

Bisherige Anstrengungen mehrerer Hersteller, Gasabsorptionswärmepumpen auf den Markt zu bringen sind nicht gelungen. Diese Konzepte sahen vor, den Gasbrenner direkt in die AWP zu integrieren. Dieses Konzept ermöglicht

zwar eine gute exergetische Ausnutzung der Flammentemperatur, zieht allerdings auch Probleme nach sich. Herausforderungen hierbei sind: Korrosion durch sehr hohe lokale Temperaturen und hohe Kosten für Sonderbauteile. In diesem Forschungsvorhaben wird ein anderes Konzept verfolgt – eine hydraulische Kopplung der AWP über einen Wasserkreis, was zudem den Vorteil bietet, dass der hierfür genutzte Wärmeerzeuger flexibel gewählt werden kann (z.B. Gastherme, Biomassekessel, Fernwärmeanschluss).

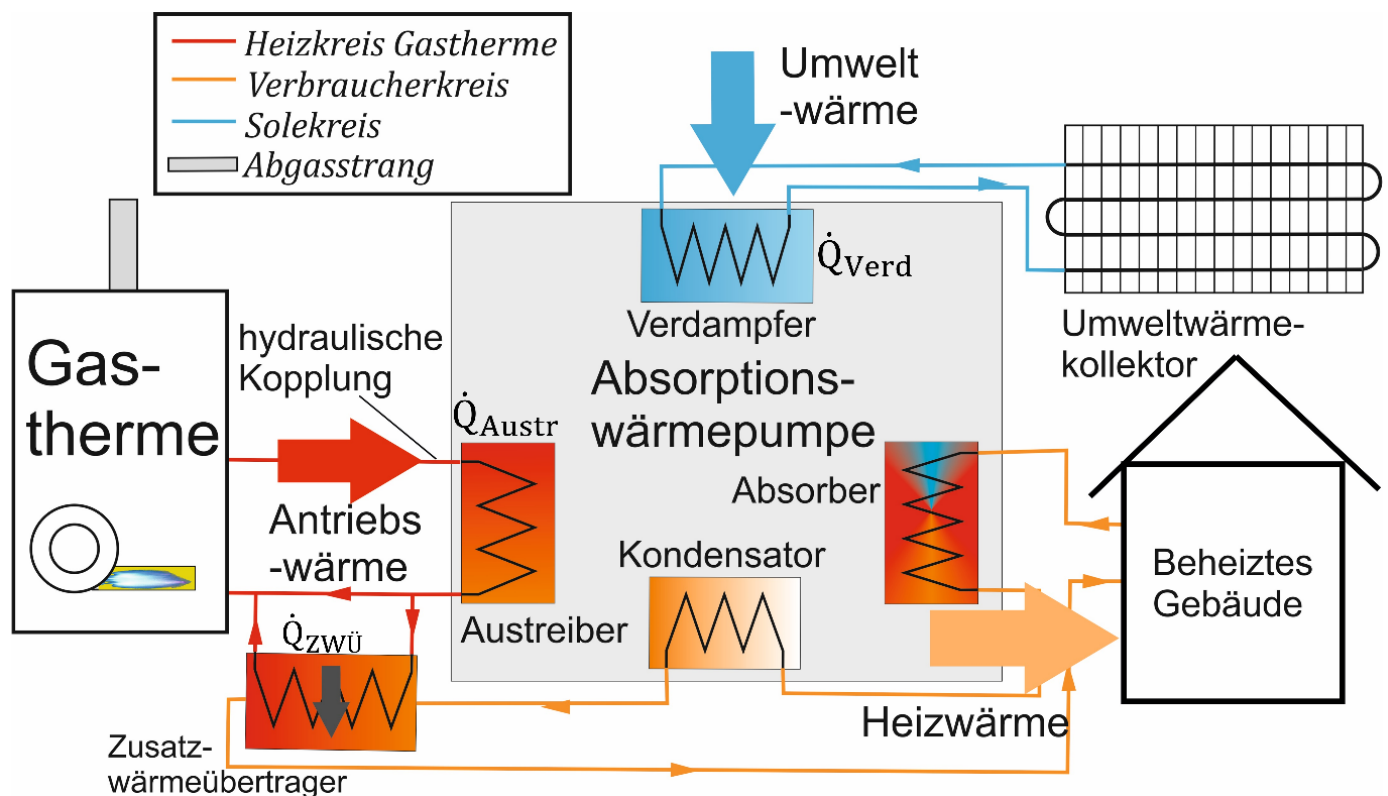


Bild 1: Schema der hydraulischen Kopplung der Absorptionswärmepumpe mit einer Gastherme

Anlagenkonzept und Prüfstands-aufbau

Bild 1 zeigt schematisch die hydraulische Kopplung der Absorptionswärmepumpe mit einer Gastherme. Der Austreiber der AWP wird extern von einem wasserführenden Heizkreis durchströmt, welcher von der Gastherme erwärmt wird. Die dem Austreiber von der Gastherme zugeführte Heizleistung \dot{Q}_{Austr} stellt die Antriebsenergie in Form von Wärme für die AWP dar. Zusätzlich wird eine geringe elektrische Pumpenleistung benötigt.

Daneben ist ein weiterer Wärmeübertrager in dem von der Gastherme beheizten Wasserkreislauf vorgesehen, der diesen direkt mit dem Heizkreis des Gebäudes koppelt. So kann dem Heizkreis optional ein zusätzlicher Wärmestrom $\dot{Q}_{\text{ZWÜ}}$ zugeführt werden. In Normalfall wird dieser Wärmeübertrager im Bypass umströmt und nur durchströmt, wenn die Leistung der AWP nicht ausreicht, um die Heizlast zu decken. Am Verdampfer der AWP wird ein Umweltwärmestrom \dot{Q}_{Verd} aufgenommen. Der Verdampfer wird von einem mit Glykol gefüllten Fluidkreis durchströmt. Dieser nimmt an einem beliebig ausführbaren Umweltwärmekollektor

Wärme auf. Wärmequellen können beispielsweise die Umgebungsluft, das Erdreich oder auch Photovoltaisch-Thermische Kollektoren (PVT) sein. Die der AWP am Austreiber und Verdampfer zugeführte Leistung wird am Absorber und Kondensator an das Heiznetz des Gebäudes abgegeben. Die Regelung der Leistung erfolgt sowohl durch die Drosselung des Volumenstroms im Austreiberkreis als auch durch die Variation der Vorlauftemperatur im Austreiberkreis. Ein solches Verfahren wurde bereits beim Einsatz der AWP in Fernwärmenetzen erprobt [1].

Die AWP verfügt über weitere innere Wärmeübertrager zur Effizienzsteigerung. Dazu gehören ein Dephlegmator, ein Kältemittelwärmeübertrager sowie ein Lösungsmittelwärmeübertrager. Die AWP verwendet Ammoniak/Wasser als Arbeitsstoffgemisch. Die Gesamfüllmenge beträgt weniger als 10 kg Ammoniak, was die nötigen Sicherheitsbestimmungen auf ein Minimum reduziert. Der detaillierte Aufbau der AWP ist in [2] beschrieben. Als Wärmeerzeuger wird eine Gasbrennwerttherme mit 22 kW Leistung verwendet, die Vorlauftemperaturen von bis zu 110 °C bereitstellen kann. Im

Labor wird als Umweltwärmekollektor ein elektrisches Heizthermostat verwendet, das dem Glykolkreis Wärme zuführt. Ein außen aufgestelltes trockenes Rückkühlwerk stellt die Wärmeabnahme des Heizsystems dar. Die Wärmeaufnahme bzw. -abnahme der externen Kreisläufe wird mittels Massenstrom und Temperaturdifferenz bilanziert. In der Absorptionswärmepumpe werden kontinuierlich über 20 lokale Temperaturen gemessen, die detaillierte Analysen jeder Komponente ermöglichen. Zudem werden Hoch- und Tiefdruck sowie die Massenströme und Dichten des Arbeitsmediums an drei verschiedenen Stellen erfasst. Aus Temperaturen, Drücken und Dichten kann mittels einer Zustandsgleichung die Zusammensetzung der Ammoniak/Wasser-Lösung an verschiedenen Stellen der Anlage kontinuierlich bestimmt werden.

Ergebnisse

Die Effizienz der AWP in dieser Anwendung kann mit dem Wärmeverhältnis ζ_{AWP} ausgedrückt werden, das die dem Gebäude zur Verfügung gestellte Heizleistung ins Verhältnis zu der von der Gastherme abgegebenen Heizleistung setzt (Gleichung 1).

Tabelle 1: Tabelle relativer Wärmeleistung, Außenlufttemperatur sowie Vor- und Rücklauftemperaturen für verschiedener Heiznetze

Relative Wärmeleistung	Heizleistung in kW	Außenlufttemperatur bei Norm-Außentemperatur $t_{a,N} = -10^\circ\text{C}$ in °C	Heiznetz 35/28 in °C/°C	ζ_{AWP} von Heiznetz 35/28	Heiznetz 55/45 in °C/°C	ζ_{AWP} von Heiznetz 55/45	Heiznetz 65/50 in °C/°C	ζ_{AWP} von Heiznetz 65/50
0,13	1,95	16,2	22,2/21,3	-	26,0/24,8	1,52	28,8/26,8	1,58
0,30	4,50	10,9	24,9/22,8	1,63	32,6/29,6	1,63	37,1/32,6	1,53
0,39	5,85	8,4	26,2/23,5	1,62	35,6/31,7	1,61	41,1/35,2	1,37
0,48	7,20	5,7	27,5/24,2	1,68	38,5/33,8	1,49	44,9/37,7	-
0,63	9,45	1,2	29,7/25,3	1,56	43,4/37,2	1,18	51,0/41,6	-

$$\zeta_{AWP} = \frac{\dot{Q}_{Verd}}{\dot{Q}_{Austr} + \dot{Q}_{ZWÜ}} + 1 \quad (1)$$

Dieses Wärmeverhältnis kann für beliebige Betriebspunkte gemessen werden. Um aus Einzelbetriebspunkten eine zu erwartende Jahreseffizienz zu ermitteln, kann die VDI-Richtlinie VDI 4650 Blatt 2 [3] herangezogen werden. Zur Ermittlung des Jahresnutzungsgrads gibt diese für verschiedene Heizungssysteme (VL/RL: 35/28; 55/45; 65/50) jeweils fünf Betriebspunkte mit Vorlauf- und Rücklauftemperaturen bei unterschiedlichem Anteil der maximalen Heizleistung vor. Diesen Betriebspunkten sind für eine Norm-Außentemperatur des Standorts entsprechende Außenlufttemperaturen zugeordnet. Für die Messungen wurde die Norm-Außentemperatur -10 °C verwendet und eine Grädigkeit zwischen Außenlufttemperatur und Glykol im Umweltwärmekollektor von 4 K angenommen. Die Vorlauftemperatur der Gastherme ist eine freie Variable und wird mit dem Ziel eines möglichst hohen

Wärmeverhältnisses zwischen 90 °C und 110 °C variiert. Tabelle 1 zeigt die in VDI 4650 vorgegebenen Betriebspunkte sowie die erzielten Wärmeverhältnisse (in grün markierten Spalten). Mit Gleichung 2 werden die Wärmeverhältnisse der einzelnen Betriebspunkte in einen zu erwartenden Jahresnutzungsgrad ζ_a für die jeweiligen Heizungssysteme umgerechnet. Die Berechnung nach VDI 4650 wurde in diesem Projekt so modifiziert, dass die von der Gastherme abgegebene Heizleistung anstatt der Brennstoffleistung verwendet wird.

$$\zeta_a = \frac{5}{\sum_{i=1}^5 \zeta_{AWP,i}} \quad (2)$$

Bild 2 zeigt den Jahresnutzungsgrad für verschiedene Heizungssysteme. Dieser erreicht Werte zwischen $1,62$ und $1,25$ ($1,44$). Je niedriger die Auslegungstemperaturen des Heizsystems sind, desto höher ist der Jahresnutzungsgrad. Somit können auf Jahressicht je nach Heizungs-

system zwischen 62% und mindestens 25% der von der Gastherme bereitgestellten Wärme zusätzlich aus der Umgebung aufgenommen werden.

Die beiden Betriebspunkte mit den höchsten Vor- und Rücklauftemperaturen des Heizsystems $65/50$ konnten aufgrund der Witterung nicht aufgezeichnet werden. Die Wärmeverhältnisse werden zwischen $1,37$ und 1 erwartet und sind als Unsicherheitsbereich in Bild 2 einzeichnet.

Fazit und Ausblick

In diesem Projekt wurde gezeigt, dass eine Absorptionswärmepumpe durch konventionelle Wärmeerzeuger angetrieben werden kann, indem diese durch einen Heißwasserkreis hydraulisch gekoppelt werden. Es wurden Jahresnutzungsgrade für verschiedene Heizsysteme gemessen und gezeigt, dass die Wärmeausbeute durch Integration zusätzlicher Umweltwärme erheblich gesteigert werden kann. Im Demonstrationsprojekt wurde bisher nur der Austreiberkreis bi-

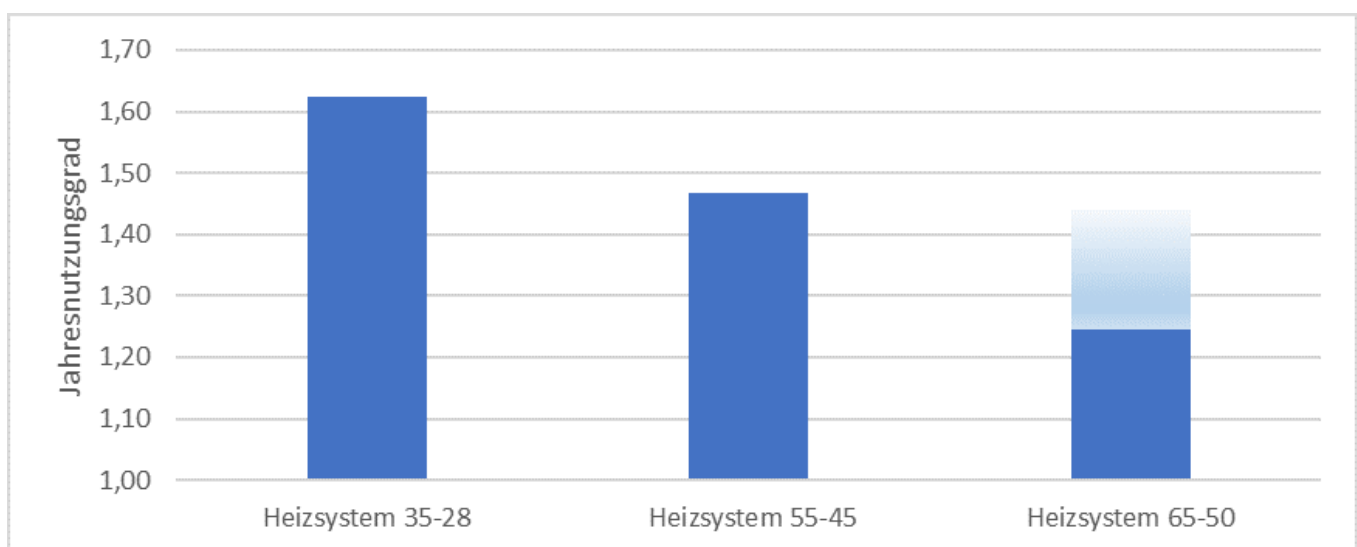


Bild 2: Jahresnutzungsgrad für verschiedene Heizsysteme angelehnt an VDI 4650 Blatt 2

lanziert und nicht der Brennstoffstrom und die Abgasverluste. Zusätzlich wurde die Temperatur des Abgases, welches die Gastherme verlässt, gemessen. Durch die im Vergleich zur direkten Erwärmung des Heizungsnetzes höheren Temperaturen des Heizkreises zur Beheizung der Absorptionswärmepumpe ist auch die Temperatur des Abgases deutlich höher, sodass kein Brennwerteffekt eintritt. Das Abgas weiter abzukühlen wäre ein erhebliches Potential, das gehoben werden sollte.

In einem angestrebten Folgeprojekt soll die Integration eines zusätzlichen Abgaswärmeübertragers zur Unterkühlung des Abgases untersucht werden. Dieser könnte entweder direkt mit dem Heizkreis oder – wahrscheinlich interessanter – mit dem Verdampferkreis gekoppelt werden. So könnte eine dauerhafte Abkühlung des Abgases unter die Heizkreistemperatur sichergestellt werden. Somit ist auch gegenüber der Brennwerttechnik eine deutliche Verstärkung des Brennwerteffekts erreichbar, da bei der Brennwerttechnik nur eine Abkühlung auf die Rücklauf-temperatur des Heizkreises möglich ist. Mit einer solchen Reduzierung der Abgasverluste erscheint eine Steigerung der jährlichen Wärmeausbeute aus dem gleichen Brennstoff von über 50 % für ein Heizsystem mit einer maximalen Vorlauf-/Rücklauf-temperatur von 55 °C / 45 °C als realistisch.

Danksagung

Das Projekt AbsorpTherm wurde unter dem Kennzeichen P2021-09-004 von der Carl-Zeiss-Stiftung im Programm „Prototypen“ gefördert. Die Autoren bedanken sich ganz herzlich für die Unterstützung.

Literatur

[1] Haak L., Brunder J.: Rücklauf-temperaturabsenkung im Wärmenetz 4.0, HLK-Brief 2022, Artikelnummer 243

[2] Haak L. et al.: Effizienzsteigerung einer NH₃/H₂O-Absorptionskältemaschine – Experimentelle Untersuchung eines Anlagenkonzepts mit Plattendesorber, Jahrestagung des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins, Dresden, 2021, AA II.1.11

[3] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 4650 Blatt 2 „Kurzverfahren zur Berechnung der Jahresheizzahl und des Jahresnutzungsgrads von Sorptionswärmepumpenanlagen“, Januar 2013

Große außenaufgestellte Warmwasserspeicher mit Vakuumwärmedämmung

Jens Ullmann, Stephan Lang,
 Claudia Scholl-Haaf,
 Harald Drück, Georg Röder*,
 Markus Sirch*

Einleitung

Ein großvolumiger Warmwasserspeicher mit Vakuumwärmedämmung zur Außenaufstellung stellt eine attraktive Möglichkeit dar, große Speicherkapazitäten zu realisieren, ohne dafür kostenintensiven Innenraum zu belegen und gleichzeitig die Wärmeverluste auf ein sehr niedriges Niveau zu reduzieren. Für die kostengünstige Realisierung eines solchen Speichers arbeiteten die Firma Sirch Tankbau-Tankservice Speicherbau GmbH aus Kaufbeuren und das IGTE im Forschungsprojekt StoEx2 "Weiterentwicklung, Prüfung, und Demonstration großvolumiger, preiswerter Warmwasserspeicher mit hocheffizienter Wärmedämmung zur Außenaufstellung" zusammen.

Speicheraufbau

Der Aufbau des Speichers ist in Bild 1 schematisch dargestellt. Ein wesentlicher Aspekt der entwickelten Vakuumwärmedämmung ist ein schüttfähiger, offenporiger Wärmedämmstoff der in den Zwischenraum (Bild 1, Nr. 1) des doppelwandigen Stahlbehälters eingebracht wird. Anschließend wird dieser Zwischenraum auf einen Restdruck von weniger als 1 mbar evakuiert. Dadurch wird – ähnlich wie bei einer Thermoskanne – die Konvektion unterbunden und die

Wärmeleitung über das verbleibende Restgas im Ringspalt sowie der Strahlungsaustausch zwischen den Behälterwänden stark reduziert. Je kleiner dabei die mittlere Porengröße des Wärmedämmstoffs ist, bei desto höheren Restdrücken kann die Wärmeleitung über das verbleibende Restgas unterbunden werden. Dieser Effekt wird nach seinen Erforschern Smoluchowski-Effekt oder Knudsen-Effekt genannt. Auf diese Weise wird der gesamte Wärmedurchgang durch die Wärmedämmung und damit die Wärmeverluste des Speichers im

Vergleich zu einem Speicher mit einer konventionellen Wärmedämmung deutlich reduziert. Eine Verbindung zwischen der inneren und äußeren Stahlwand besteht nur im Fußbereich des Speichers durch die sogenannte Standzarge (siehe Bild 1, Nr. 2).

Feldtest im Schlossbad in Neumarkt i. d. Oberpfalz

Von den Stadtwerken Neumarkt in der Oberpfalz (SWN) wurde einer dieser neu entwickelten, hocheffizienten Warmwasserspeicher im Rahmen der Erweiterung des dortigen Frei- und Hallen-

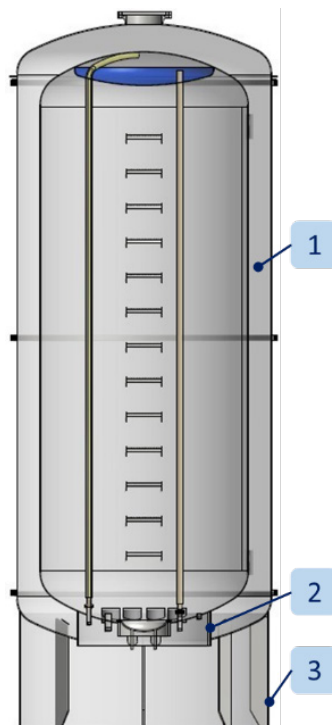


Bild 1: Schematische Darstellung eines doppelwandigen vakuumwärmedämmten Warmwasserspeichers mit Wandzwischenraum zur Befüllung mit schüttfähigem Wärmedämmstoff (1), Standzarge (2), und Standingring (3)



Bild 2: Warmwasserspeicher mit Vakuumwärmedämmung außen aufgestellt auf der Liegewiese des Schlossbads in Neumarkt i. d. Oberpfalz

*Sirch Tankbau-Tankservice Speicherbau GmbH

bads „Schlossbad“ eingesetzt [1]. Der Speicher hat ein Wasservolumen von 60 m³ und wurde von der Firma Sirch gefertigt. Die Aufstellung des in Bild 2 dargestellten Speichers im Bereich der Liegewiese erfolgte im Herbst 2020. Er wird über zwei durch den Boden des Speichers geführte Anschlüsse, die den oberen und unteren Bereich des Wasserraums mit der Anlagenhydraulik verbinden, thermisch be- und entladen. Der Wasserraum hat eine Höhe von 8,8 m und einen Durchmesser von 3 m. Als Wärmequelle dienen zwei BHKWs mit einer thermischen Leistung von je 250 kW. Ende November 2021 wurde der Speicher erstmalig mit Wärme beladen. Seitdem erfolgten zwei Langzeit-Stillstandsversuche zur messtechnischen Bestimmung der Wärmeverluste. Bei diesen wird der Speicher nach einer initialen Beladung für einen längeren Zeitraum nicht aktiv be- oder entladen. Aus der Temperaturänderung im Speichermedium kann dann die Änderung der inneren

Energie im Speicher und damit auch die aus dem Speicher an die Umgebung abgegebene Wärme bestimmt werden.

Bild 3 zeigt die gemessenen Temperaturen in unterschiedlichen Speicherhöhen über der Dauer des 1. Langzeit-Stillstandsversuchs, der den gesamten Monat Dezember 2021 umfasst. Die volumengewichtet gemittelte Speichertemperatur nimmt dabei um ca. 0,3 K pro Tag ab. Die daraus ermittelte Wärmeverlustrate des Speichers wurde zu 12 - 15 W/K bestimmt [1]. Das entspricht bei einer Speicheroberfläche von 94,25 m² einem mittleren Wärmedurchgangskoeffizient der gesamten Speicheroberfläche von 0,127 - 0,159 W/(m²K). Dieser Wert ist um bis zu den Faktor 5 geringer als bei anderen außen aufgestellten Warmwasserspeichern mit Speichervolumina zwischen 116 m³ und 4.500 m³ ohne Vakuumwärmedämmung [2], [3]. Ein typischer Warmwasserspeicher mit einem Volumen von 1 m³ darf für die Energieeffizienzklas-

se B, d. h. gute Standardwärmedämmung gemäß EU-Verordnung Nr. 812/2013, Anhang II, eine maximale Wärmeverlustrate von 2,36 W/K aufweisen. Bei einem angenommenen Speicherdurchmesser des zylindrischen Speichers von 0,85 m und einer Speicherhöhe von 1,8 m ergibt sich dafür ein Wärmedurchgangskoeffizient von 0,4 W/(m²K). Dieser übersteigt den Wärmedurchgangskoeffizienten des hocheffizienten, außenaufgestellten Speichers mit Vakuumwärmedämmung um ca. den Faktor 3. Die Vakuumwärmedämmung ermöglicht theoretisch eine um bis zu ca. den Faktor 10 geringere Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu Standardwärmedämmungen. Bei vergleichsweise gering ausgeprägten Wärmebrücken sind entsprechend auch ähnliche Reduktionen der Wärmedurchgangskoeffizienten bzw. der Wärmeverlustrate des vakuumwärmedämmten Speichers möglich. Die Gründe für die hier nur um bis zum Faktor 5 geringeren Wärmedurchgangskoeffizienten liegen u. a. in der Wärmebrücke durch die Standzarge und an dem als Wärmedämmstoff verwendeten Perlit, das nur eine um ca. den Faktor 5 geringere Wärmeleitfähigkeit als Standardwärmedämmungen ermöglicht. Wärmedämmstoffe mit thermisch günstigeren Eigenschaften sind allerdings teurer und benötigen häufig eine deutlich längere Evakuierungsdauer von bis zu einigen Wochen. Der hier verwendete Wärmedämmstoff resultiert aus einer im Rahmen des Forschungsvorhabens StoEx2 vorgenommenen technisch-wirtschaftlichen Optimierung.

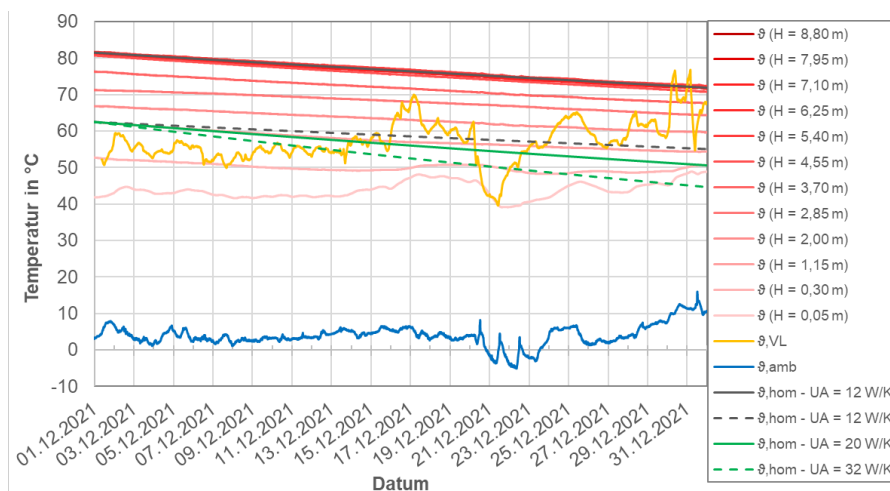


Bild 3: Speicherinnentemperaturen in unterschiedlichen Höhen im Wasserraum (Gesamthöhe 8,8 m) sowie die Umgebungs (ϑ_{amb})- und Vorlauftemperatur (ϑ_{VL}) und die berechneten Speichertemperaturen während der Abkühlung des vollständig durchmischten Speichers (ϑ_{hom}) bei unterschiedlichen Wärmeverlustraten (UA)

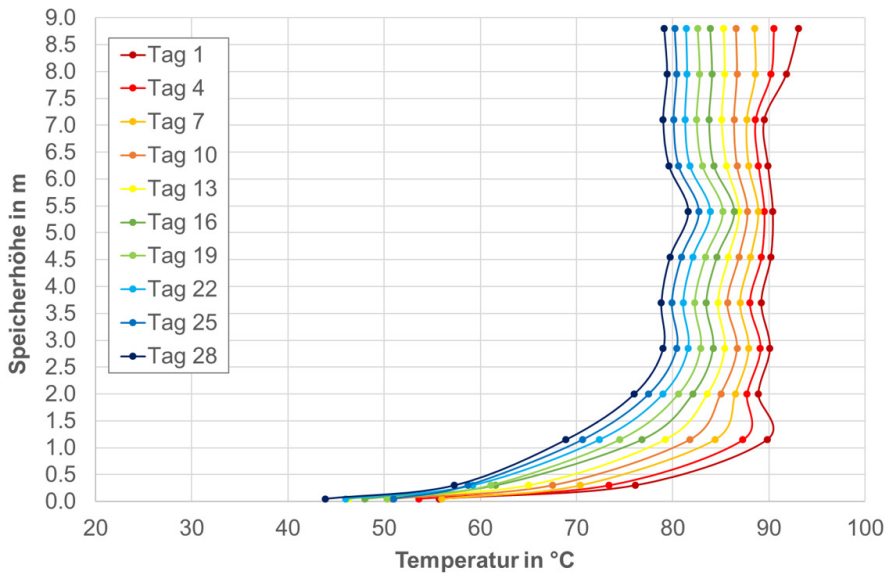


Bild 4: Veränderung der thermischen Schichtung mit der Zeit auf Basis der Speichertemperaturen in unterschiedlichen Speicherhöhen über den Zeitraum des Langzeit-Stillstandsversuchs von ca. 4 Wochen

In Bild 4 ist die thermische Schichtung des Speichers für einen Zeitraum von 27 Tagen im Verlauf des 2. Langzeit-Stillstandsversuchs dargestellt. Vor dem Beginn der Stillstandsperiode, d. h. am Tag 1 wurde der Speicher dadurch thermisch beladen, dass er von oben

nach unten mit 90-gradigem Wasser durchströmt wurde. Die Temperaturmischzone erstreckt sich am Tag 1 über eine Höhe von ca. 1 m und ist weitestgehend auf das Totvolumen im unteren Speicherbereich zurückzuführen. Die Temperaturmischzone breitet sich im

Laufe der dargestellten ca. 4 Wochen um nur weniger als 2 m nach oben aus. Diese geringe Ausbreitung ist auf die wenigen Einbauten im Speicher und die damit verbundene geringe vertikale Wärmeleitfähigkeit zurückzuführen.

Die im Rahmen des Monitorings der Demonstrationsanlage im Schlossbad in Neumarkt erzielten Ergebnisse zeigen deutlich, dass auch bei einer Außenaufstellung von Warmwasserspeichern sehr geringe Wärmeverluste erzielt werden können, wenn die Speicher über eine sehr effektive Wärmedämmung verfügen.

Architektonische Integration

Anders als im Gebäudeinneren aufgestellte Speicher verändern außenaufgestellte Speicher jedoch die Architektur und optische Anmutung des Gebäudes bzw. der unmittelbaren Umgebung. Des Weiteren benötigen die Speicher auch im Freien Platz, der dann nicht mehr für andere Zwecke genutzt werden kann. Aus diesen Gründen wurden im Projekte StoEX2 mehrere architektonisch-ästhetische und auch funktionelle Integrationsmöglichkeiten für die Speicher im Freien mit positivem optischem Einfluss auf die Umgebung des Aufstellungsorts entwickelt. Zum eigentlichen Zweck der Speicherung von thermischer Energie kommen somit weitere, durch die Speicheraufstellung möglich gewordene interessante Nutzungsmöglichkeiten hinzu, welche die Funktionalität und damit sowohl den Kundennutzen als auch die Akzeptanz erhöhen können. Bild 5 zeigt ausgewählte Varianten von Möglichkeiten für die architektonische Integration der

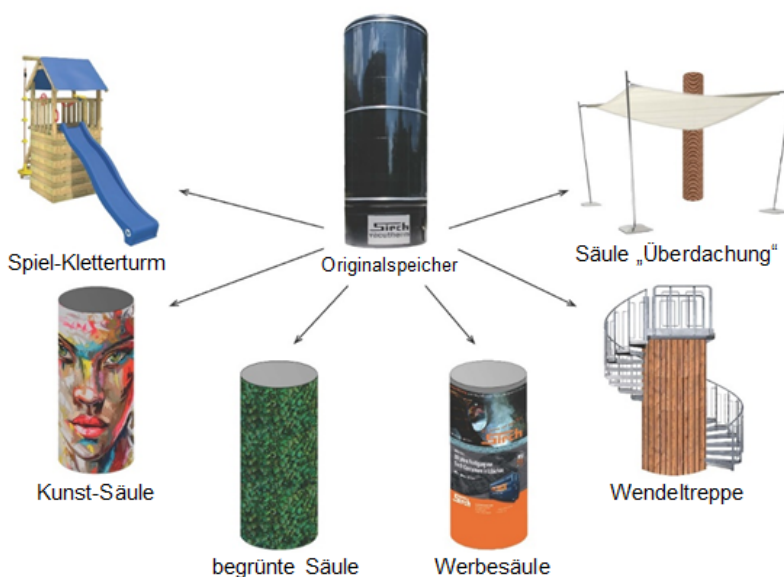


Bild 5: Möglichkeiten für die architektonische Integration außenaufgestellter Speicher

Speicher in den Außenbereich von Gebäuden. Im oben beschriebenen Feldtest ist der Speicher in die Liegewiese des Schlossbads integriert und dient sowohl als Werbesäule für die Stadtwerke Neumarkt (Aufschrift „sw“) als auch als weithin sichtbares Kennzeichen und Alleinstellungsmerkmal für das Schlossbad (Bild 2).

Danksagung

Das Forschungsvorhaben StoEx2 „Weiterentwicklung, Prüfung, und Demonstration großvolumiger, preiswerter Warmwasserspeicher mit hocheffizienter Wärmedämmung zur Außenaufstellung“ wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages durch den Projektträger Jülich (PTJ) unter dem Förderkennzeichen 03ET1667B gefördert. Die Autoren danken für die Unterstützung und übernehmen die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung.

Literatur

- [1] Ullmann, J., Lang, S., Drück, H., Gensbaur, M., Röder, G., Sirch, M.: Feldtest eines großvolumigen vakuumwärmege-
 dämmten Warmwasserspeichers, Tagungsband zum 32. Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme, 03. – 05. Mai 2022, Kloster Banz, Bad Staffelstein, ISBN 978-3-948176-17-4.
- [2] Urbaneck, T.; Findeisen, F.; Mücke, J.; Lang, S.; Gensbaur, M.; Bestenlehner, D.; Drück, H.;

Beyer, R.; Pieper, K.: Oberirdische Speicher in Segmentbauweise für Wärmeversorgungs-systeme – OBSERW, Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Professur Technische Thermodynamik (Hrsg.), Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (Hrsg.), farmatic tank systems (Hrsg.), Forschungsbericht 200 Seiten, 177 Abbildungen, 50 Tabellen, FKZ 03ET1230 A/B/C, 2018. - ISBN-10: 3-9811424-8-9, ISBN-13: 978-3-9811424-8-8, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa2-210713>.

[3] EINSTEIN project: “EFFECTIVE INTEGRATION OF SEASONAL THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEMS IN EXISTING BUILDINGS”, January 2012 – December 2015, EU-Grant agreement no.: 284932, Publishable report: Seasonal thermal energy storage in existing buildings, <https://cordis.europa.eu/docs/results/284/284932/final1-einstein-final-publishable-v2.pdf>.

Untersuchung von Spitzenlast- und Redundanzkonzepten für ein primär mit tiefengeothermischer Wärme versorgtes Wärmenetz

Sven Stark, Stefanie Lott,
Harald Drück

Einleitung

Das Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart hat für die im Landkreis München gelegene Gemeinde Gräfelfing unterschiedliche Konzepte für die Spitzenlast- und Redundanz-Wärmeversorgung eines neu aufzubauenden und primär durch tiefengeothermische Wärme zu versorgenden Wärmenetzes erarbeitet und bewertet. Gräfelfing ist eine Gemeinde mit etwa 14.000 Einwohnern, in der – wie im Großteil des Landkreises München – gute Randbedingungen für die Nutzung von Tiefengeothermie gegeben sind. Das Ziel der Gemeinde ist es, das vorhandene tiefengeothermische Potenzial zur Wärmeversorgung zu nutzen und hierfür ein Wärmenetz aufzubauen, um so die derzeitige, hauptsächlich auf Erdgas basierende Wärmeversorgung zu dekarbonisieren. Durch die tiefengeothermische Anlage kann dabei ganzjährig eine nahezu konstante thermische Leistung bereitgestellt werden. Wenn dieses Potenzial vollständig ausgenutzt werden soll, sind jedoch die im Winter auftretenden thermischen Spitzenlasten höher als die mit der tiefengeothermischen Anlage erzeugbaren thermischen Leistungen und müssen daher durch andere Wärmequellen bzw. -erzeuger gedeckt

werden. Außerdem muss die Wärmeversorgung auch bei einem Ausfall der tiefengeothermischen Anlage durch entsprechende Redundanz-Wärmeerzeuger sichergestellt werden.

Methodik

In einem ersten Arbeitsschritt wurden die vorliegenden Informationen und Randbedingungen zur derzeitigen sowie für eine zukünftige wärmenetzbasierte Wärmeversorgung in Gräfelfing unter Nutzung von Tiefengeothermie als primäre Wärmequelle analysiert. Darauf basierend wurden in Abstimmung mit dem Auftraggeber zwei Wärmeabnahme-Szenarien definiert und für diese beiden Wärmeabnahme-Szenarien die Wärmebedarfe in der Jahressumme sowie als zeitlich hochaufgelöste Lastprofile ermittelt.

In einem nächsten Arbeitsschritt wurden – basierend auf dem Vergleich der Wärmebedarfe in den beiden Wärmeabnahme-Szenarien und der verfügbaren Wärme aus der Tiefengeothermie sowie weiterer Randbedingungen – vier Wärmeversorgungs-Varianten für die Spitzenlast- und Redundanz-Wärmeversorgung erarbeitet. Diese vier Varianten unterscheiden sich hauptsächlich durch die Art der zusätzlich zur Tiefengeothermie eingesetzten Wärmeerzeuger, wie einerseits Wärmepumpen und andererseits Blockheizkraftwerke (BHKWs). Zusätzlich weisen die Wärmepumpen-Vari-

ten Unterschiede im Hinblick auf die verwendeten Wärmequellen auf, da als Wärmequelle für die Wärmepumpe(n) einerseits der Rücklauf der Tiefengeothermie (Thermalwasser-Kreislauf) und andererseits ein als saisonaler Wärmespeicher zu nutzender Wasser-Erdbecken-Wärmespeicher betrachtet werden.

Nach der Erarbeitung der vier Wärmeversorgungs-Varianten wurden diese zum einen aus technischer Sicht analysiert und bewertet, d.h. es erfolgte beispielsweise eine Dimensionierung der Wärmeerzeuger und Wärmespeicher sowie eine Ermittlung der jährlichen Wärmemengen und Deckungsanteile der einzelnen Wärmeerzeuger. Basierend darauf wurde zum anderen eine wirtschaftliche Bewertung der vier erarbeiteten Wärmeversorgungs-Varianten anhand der zu erwartenden Wärmegestehungskosten für den Betrachtungszeitraum der ersten 20 Betriebsjahre des Wärmenetzes vorgenommen, wobei auch eine Förderung nach dem Förderprogramm „Bundesförderung für effiziente Wärmenetze“ (BEW) [1] entsprechend berücksichtigt wurde.

Als Ergebnis der Variantenanalyse wurde in Abstimmung mit dem Auftraggeber eine favorisierte Wärmeversorgungs-Variante ausgewählt und diese bzgl. ausgewählter Aspekte, z.B. hinsichtlich der zu erwartenden Temperaturniveaus im Wärmenetz, in der

tiefengeothermischen Anlage, im Wärmespeicher und den Wärmepumpen mittels dynamischer Systemsimulationen mit der Software TRNSYS [2] detaillierter untersucht. Abschließend wurde für die favorisierte Wärmeversorgungs-Variante eine ökologische Bewertung durchgeführt.

Ergebnisse

Als Ergebnis der Definition von zwei Wärmeabnahme-Szenarien inkl. einer entsprechenden Wärmebedarfsermittlung wurde gemeinsam mit dem Auftraggeber folgender zeitlicher Verlauf des Auf- und Ausbaus eines Wärmenetzes in Gräfelfing festgelegt: Im Jahr 2025 soll der Aufbau des Wärmenetzes sowie der Wärmeversorgungs-Infrastruktur für das Wärmeabnahme-Szenario 1 erfolgen. Wobei das Wärmeabnahme-Szenario 1 im Jahr 2028 erreicht werden soll und einen Wärmebedarf von 60 GWh/a inkl. der Wärmeverluste des Wärmenetzes aufweist. Im Jahr 2025 soll dabei noch keine Wärme über das Wärmenetz geliefert werden. In den beiden ersten Betriebsjahren 2026 und 2027 wird von einem linearen Anstieg der Wärmeabnahme, d.h. von einem vorliegenden Wärmebedarf von ca. 20 bzw. 40 GWh/a inkl. der Wärmeverluste des Wärmenetzes, ausgegangen. Mit Erreichen des Wärmeabnahme-Szenarios 1 im Jahr 2028 sollen das Wärmenetz sowie die Wärmeversorgungs-Infrastruktur weiter ausgebaut werden. So wird angenommen, dass der Wärmebedarf in den Folgejahren weiter linear ansteigt, bis im Jahr 2035 das Wärmeabnahme-Szenario 2 mit einem Wärmebedarf von ca. 93 GWh/a inkl. der Wärmever-

luste des Wärmenetzes erreicht wird. Die jährliche Wärmeabnahme soll anschließend konstant bei 93 GWh/a bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes im Jahr 2045 bleiben.

Am vorgesehenen Standort kann mit einer tiefengeothermischen Bohrung nach den derzeit vorliegenden Informationen eine thermische Entzugsleistung von ca. 12 MW realisiert werden, wobei die durchschnittliche Fördertemperatur etwa 90 °C beträgt. Da diese Wärme ganzjährig zur Verfügung steht, kann somit theoretisch ein jährlicher Wärmebedarf von ca. 105 GWh gedeckt werden. Aus den ebenfalls berechneten zeitlich hochaufgelösten Lastprofilen ist jedoch bekannt, dass im Winter thermische Spitzenlasten von bis zu 25,8 MW im Wärmeabnahme-Szenario 1 bzw. 40,3 MW im Wärmeabnahme-Szenario 2 auftreten. Aus einem Vergleich von viertelstündlichen Werten des Wärmebedarfs und der verfügbaren Wärme aus der Tiefengeothermie wurde ermittelt, dass ohne den Einsatz von Wärmespeichern der Wärmebedarf im Wärmeabnahme-Szenario 1 zu etwa 91 % und im Wärmeabnahme-Szenario 2 zu etwa 75 % direkt durch die Tiefengeothermie gedeckt werden kann.

Basierend darauf wurden insgesamt vier Varianten für die Spitzenlast- und Redundanz-Wärmeversorgung erarbeitet und wie eingangs erwähnt sowohl aus technischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht analysiert und bewertet. Hierbei zeigte sich, dass der Einsatz von Wärmepumpen dem Einsatz von BHKWs zur Spitzenlast-Wärmeversorgung vor allem aus wirtschaftlichen Gründen,

insbesondere unter Berücksichtigung der „Bundesförderung für effiziente Wärmenetze“ (BEW), vorzuziehen ist. Auch aus technischer Sicht ist der Einsatz von Wärmepumpen vorteilhaft, da durch die Nutzung von tiefengeothermischer Wärme als Wärmequelle für die Wärmepumpe(n) der Deckungsanteil der Tiefengeothermie am Wärmebedarf gesteigert werden kann. Die Wärmepumpe(n) können hierbei entweder direkt den Rücklauf der Tiefengeothermie oder aber einen saisonalen Wärmespeicher, der durch sommerliche Wärmeüberschüsse aus der Tiefengeothermie be-laden wird, als Wärmequelle nutzen. Aufgrund der im Verhältnis zum Aufwand nur geringen Vorteile des saisonalen Wärmespeichers wurden in der favorisierten Wärmeversorgungs-Variante eine bzw. mehrere Wärmepumpe(n) gewählt, welche direkt den Rücklauf der Tiefengeothermie als Wärmequelle nutzen. Die hier vorgeschlagene favorisierte Wärmeversorgungs-Variante besteht damit aus folgenden Komponenten:

- Tiefengeothermische Anlage als Grundlast-Wärmeerzeuger
- Pufferspeicher mit einem Volumen von 1.000 m³
- einer bzw. mehrerer Wärmepumpen mit einer thermischen Leistung von 1 x 3,6 MW_{th} im Betriebspunkt W55/W80, d.h. bei einer verdampferseitigen Wassereintrittstemperatur von 55 °C und einer kondensatorseitigen Wasseraustrittstemperatur von 80 °C, im Wärmeabnahme-Szenario 1 bzw. 3 x 3,6 MW_{th} im Betriebspunkt W55/W80 im Wärmeabnahme-Szenario 2 mit der Nutzung des Rücklaufs der

Tiefengeothermie als Wärmequelle

- einem Spitzenlast-Gaskessel mit einer thermischen Leistung von 10 MW im Wärmeabnahme-Szenario 1 und zwei Spitzenlast-Gaskesseln mit einer thermischen Leistung von jeweils 10 MW im Wärmeabnahme-Szenario 2
- einem Redundanz-Gaskessel mit einer thermischen Leistung von 15 MW in beiden Wärmeabnahme-Szenarien.

Des Weiteren werden noch bereits bestehende dezentrale BHKWs und Gaskessel mit einer thermischen Leistung von insgesamt 3,2 MW für die Wärmeversorgung über das neu zu errichtende Wärmenetz eingebunden. In Bild 1 ist die simulierte monatliche Gegenüberstellung von Wärmebedarf (äußere Säulen) und Wärmebereitstellung (innere Säulen) im Wärmeabnahme-Szenario 2 für die favorisierte Wärmeversorgungs-Variante dargestellt. In den Sommermonaten von Juni bis August wird demnach der gesamte Wärmebedarf durch die

Tiefengeothermie in Verbindung mit dem Pufferspeicher (innere gelbe Säulen) gedeckt. In den Frühlings-, Herbst- und Wintermonaten kann die Tiefengeothermie nur noch einen Teil des Wärmebedarfes direkt decken. Der Großteil der zusätzlich benötigten Wärme wird hierbei von den Wärmepumpen bereitgestellt, die hierfür den Rücklauf der Tiefengeothermie als Wärmequelle nutzen (innere hellgrüne Säulen) sowie elektrische Antriebsenergie (innere violette Säulen) benötigen. Der dann noch verbleibende Wärmebedarf wird von den bestehenden dezentralen BHKWs (innere rote Säulen – Anteil sehr gering) und bestehenden Gaskesseln (innere orangene Säulen) sowie von den beiden Spitzenlast-Gaskesseln (innere graue und schwarze Säulen – Anteil sehr gering) gedeckt. Für das hier dargestellte Wärmeabnahme-Szenario 2 ergibt sich ein jährlicher Deckungsanteil der Tiefengeothermie am Wärmebedarf von 71,4 % exkl. und 92,1 % inkl. der aus dem Rücklauf der Tiefengeothermie entnommenen

Wärme als Wärmequelle für die Wärmepumpen. Zusammen mit der elektrischen Antriebsenergie der Wärmepumpen decken Tiefengeothermie und Wärmepumpen insgesamt 96,5 % des Wärmebedarfs. Die bestehenden BHKWs und Gaskessel sowie die Spitzenlast-Gaskessel zusammen decken nur 3,5 % des Wärmebedarfs. Für die Wärmepumpen wurde eine Jahresarbeitszahl von 5,7 ermittelt.

In Bild 2 werden als Ergebnis der ökologischen Bewertung die mit der favorisierten Wärmeversorgungs-Variante über den gesamten Betrachtungszeitraum, d.h. die Jahre 2025 – 2045, resultierenden CO₂-Äquivalentemissionen für das Untersuchungsgebiet dargestellt. So werden die im Untersuchungsgebiet zu versorgenden Wärmeabnehmer im Jahr 2025 noch vollständig durch dezentrale Erdgas-Heizkessel und ab dem Jahr 2035 vollständig über das neu aufzubauende Wärmenetz mit Wärme versorgt. Die CO₂-Äquivalentemissionen betragen bei der Wärmeversorgung über dezentrale Erdgas-Heizkessel (Ist-Zustand der Wärmeversorgung) ca. 20.000 t/a. Mit dem Aufbau und dem zunehmenden Ausbau des Wärmenetzes werden immer mehr Wärmeabnehmer an das Wärmenetz angeschlossen und dementsprechend sinken die aus der Nutzung der dezentralen Erdgas-Heizkessel resultierenden CO₂-Äquivalentemissionen (orangene Säulen). Aus den in Bild 2 oberhalb der orangenen Säulen dargestellten, aus der Wärmeversorgung über das Wärmenetz resultierenden CO₂-Äquivalentemissionen, ist erkennbar, dass diese vor allem aus dem Strombedarf

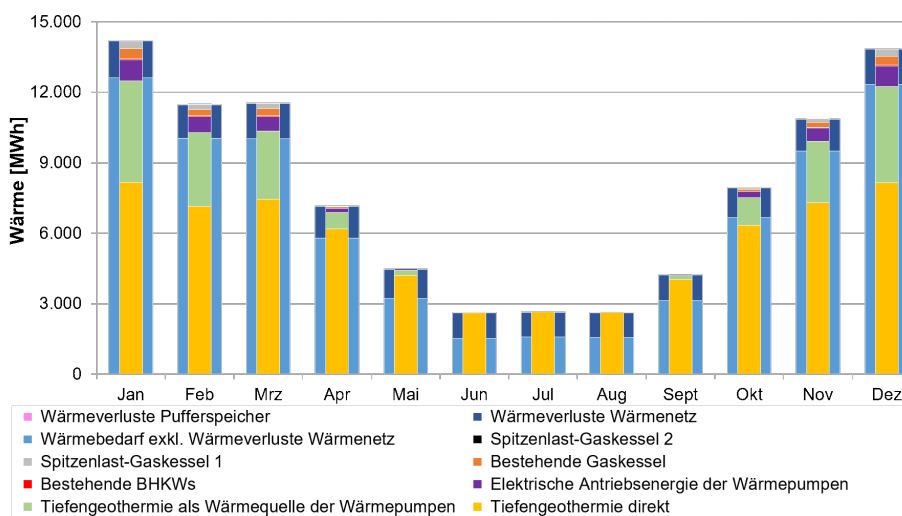


Bild 1: Simulierte monatliche Gegenüberstellung von Wärmebedarf und Wärmebereitstellung für die favorisierte Wärmeversorgungs-Variante im Wärmeabnahme-Szenario 2

der Förderpumpe für die Tiefengeothermie resultieren.

Im Jahr 2035 soll wie eingangs erwähnt der Wärmenetzausbau entsprechend des Wärmeabnahme-Szenarios 2 abgeschlossen sein und damit kein Wärmeabnehmer im Untersuchungsgebiet mehr durch dezentrale Erdgas-Heizkessel mit Wärme versorgt werden. In den folgenden Jahren bis 2045 bleiben zwar sowohl die Wärmeabnahme als auch die Wärmeversorgungs-Infrastruktur gleich, jedoch sind in Bild 2 trotzdem weiter sinkende CO₂-Äquivalentemissionen zu erkennen. Dies liegt daran, dass für den Bezug des Stroms für die Förderpumpe der Tiefengeothermie und für den Antrieb der Wärmepumpen sowie für die Pumpe(n) des Wärmenetzes, bedingt durch den weiteren Anstieg der erneuerbaren Stromerzeugung im deutschen Strommix, von sinkenden spezifischen CO₂-Äquivalentemissionen für

Strom ausgegangen wird. Da bei der Wärmeversorgung über das Wärmenetz der Brennstoff für die bestehenden dezentralen BHKWs sowie für sämtliche Gaskessel ab dem Jahr 2028 nach Angaben des Auftraggebers auf Bio-Erdgas umgestellt werden soll, wird mit der favorisierten Wärmeversorgungs-Variante ein Anteil erneuerbarer Energien von 100 % im Sinne der BEW-Förderrichtlinie erreicht.

Fazit

Durch die Wärme aus der Tiefengeothermie und der Wärmepumpen, welche als Wärmequelle den Rücklauf der Tiefengeothermie nutzen, sowie den Einsatz von Bio-Erdgas für den geringen, durch bestehende BHKWs und bestehende Gaskessel sowie weitere Spitzenlast-Gaskessel gedeckten Anteil des Wärmebedarfs, wird demnach für das aufzubauende Wärmenetz ein Anteil erneuerbarer Energien von

100 % und damit ein vollständig treibhausgasneutrales Wärmenetz im Sinne der BEW-Förderrichtlinie erreicht. Außerdem ergeben sich bei einer Umsetzung der favorisierten Wärmeversorgungs-Variante im Vergleich zu einem Fortbestehen der derzeitigen Wärmeversorgung über das bestehende Erdgasnetz in Verbindung mit dezentralen Heizkesseln sehr hohe Einsparungen an CO₂-Äquivalentemissionen von insgesamt 288.000 t sowie Einsparungen an Primärenergie von 1.660 GWh, kumuliert über den Betrachtungszeitraum der ersten 20 Betriebsjahre des Wärmenetzes von 2026 bis 2045.

Literatur

- [1] Merkblätter nach der Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW), https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Waermenetze/Effiziente_Waermenetze/effiziente_waermenetze_node.html
- [2] TRNSYS (Transient System Simulation) Software, <http://www.trnsys.com>

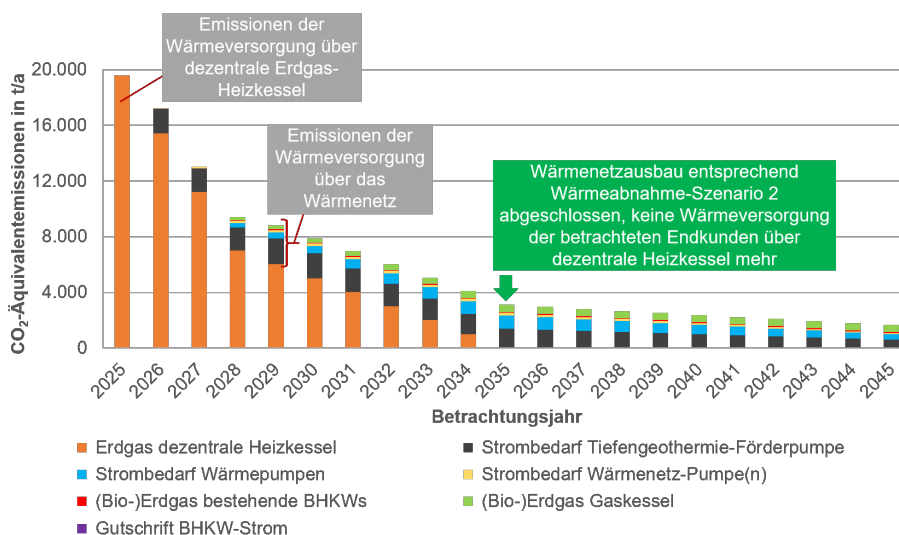


Bild 2: CO₂-Äquivalentemissionen der Wärmeversorgung des Untersuchungsgebietes über den gesamten Betrachtungszeitraum bei Umsetzung der favorisierten Wärmeversorgungs-Variante

Betriebsergebnisse einer solaren kalten Nahwärmeversorgung mit Eisspeicher

Stefanie Lott, Peer Huber,
Harald Drück

Einleitung

Um eine Dekarbonisierung der Wärme- und Kälteversorgung in gemäßigten Klimata, insbesondere in städtischen Gebieten zu erreichen, können zunehmend höhere Technisierungs- und Komplexitätsgrade der Wärme- und Kälteversorgungssysteme beobachtet werden. Ein Ziel der zunehmenden Technisierungs- und Komplexitätsgrade ist es beispielsweise hohe, erneuerbare Deckungsanteile bei einer geringen Flächenverfügbarkeit zu erreichen. Dafür wird eine heterogene Zusammensetzung aus zentralen und dezentralen erneuerbaren Energieerzeugungsanlagen, thermischen Speichern und Wärmepumpen als netzgebundene Wärme- und Kälteversorgungssysteme, in Kombination mit umfangreichen Regelstrategien eingesetzt. Insbesondere für diese komplexen Wärme- und Kälteversorgungssysteme ist ein hohes Maß an Transparenz durch ein technisches Monitoring notwendig, um die geplante energieeffiziente, funktions- und bedarfsgerechte und damit auch ökonomische Betriebsweise zu erreichen [1], [2].

Im Forschungsvorhaben „Entwicklung integrierter solarer Energieversorgungskonzepte für klimaneutrale Gebäude der ‚Stadt der Zukunft‘ (Sol4City), wird daher u. a. durch das Institut für Ge-

bäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart gemeinsam mit dem deutschen Projektpartner Viessmann Climate Solutions SE das technische Monitoring von insgesamt vier Versuchsanlagen durchgeführt. Die Versuchsanlagen bestehen aus Wärme- und Kälteversorgungssystemen mit Eisspeicher, zentralen oder dezentralen photovoltaisch-thermischen oder solarthermischen Luft-Sole-Kollektoren, welche als Wärmequellen und -senken für ein kaltes Nahwärmenetz bzw. für dezentrale Wärmepumpen zur Versorgung von Neubaugebäuden verwendet werden. Dabei steht neben dem Anlagenmonitoring, d.h. der Überprüfung der geplanten Betriebsweise einzelner zentraler Komponenten, wie dem Eisspeicher, insbesondere das Energiemonitoring als Teil des technischen Monitorings im Fokus. Beim Energiemonitoring werden die Planungsdaten, d.h. monatlich bilanzierte Wärme- und Kältebedarfe und die Zusammensetzung der Wärme- und Kältebereitstellung der jeweiligen Anlagen, mit den entsprechenden Monatsbilanzen der Messdaten verglichen. In diesem Beitrag werden erste Ergebnisse des Energiemonitorings der Versuchsanlage „Ludwigsburg“ vorgestellt und zusätzlich ein Überblick über die mit dem Monitoring in Zusammenhang stehenden Herausforderungen gegeben.

Versuchsanlage und Monitoringkonzept Neubaugebiet in Ludwigsburg

Bei der Versuchsanlage in Ludwigsburg handelt es sich um ein Neubauquartier mit neun Mehrfamilienhäuser (Haus 1 bis 9) und einem Kindergarten mit drei darüber liegenden Wohneinheiten (Haus 10). In den unbeheizten Untergeschossen befinden sich eine Tiefgarage sowie Keller- und andere Nebenräume. Insgesamt bietet das Quartier mit 107 Wohneinheiten eine beheizte Nutzfläche von 8.567 m².

Die Beheizung des Quartiers erfolgt über Fußbodenheizungen mit einer Vorlauftemperatur von 35 °C und einer Rücklauftemperatur von 28 °C, die Gebäudekühlung bzw. Temperierung erfolgt mit einer Vorlauftemperatur von 17 °C und einer Rücklauftemperatur von 20 °C. Die Bäder sind mit Niedertemperatur-Heizkörpern bzw. Handtuchheizkörpern ausgestattet. Das Trinkwarmwasser erzeugen elektrische Durchlauferhitzer. Das Wärme- und Kälteversorgungssystem besteht aus gebäudeweise dezentralen Sole-Wasser-Wärmepumpen mit einer durchschnittlichen thermischen Nennleistung von 45 kW im Betriebspunkt B0/W35. Wobei der Betriebspunkt definiert ist durch die Eintrittstemperatur der Sole (B für engl. brine) verdampferseitig in °C und der Austrittstemperatur des Wassers (W) kondensatorseitig in °C. Den dezentralen Wärmepumpen sowie den ebenfalls

gebäudeweise dezentralen Kühlungswärmeübertragern dienen ein zentraler Eisspeicher mit einem Volumen von 770 m³ und ein zentrales solarthermisches Luft-Sole-Kollektorfeld mit einer Gesamtfläche von 137 m² über ein kaltes Nahwärmenetz als Wärmequelle für die Wärmepumpen bzw. als Wärmesenke für die Kühlungswärmeübertrager. Das kalte Nahwärmenetz wird entsprechend dessen Wärmequellen und -senken mit Temperaturen zwischen -10 °C und +20 °C betrieben. Jede Wärmepumpe ist weiterhin über einen Pufferspeicher mit einem Volumen von je 1,5 m³ hydraulisch an den jeweiligen Verbraucherkreis für die Heizungen angebunden. In den Häusern 1 bis 9 sind in den Pufferspeichern elektrische Heizstäbe mit einer thermischen Leistung von je 18 kW integriert. Ebenfalls gebäudeweise dezentral sind Photovoltaik-Anlagen installiert, deren Strom für die Haushalte und die Heizungsanlage verwendet wird. Für die geplante energieeffiziente, funktions- und bedarfsgerech-

te Betriebsweise des Wärme- und Kälteversorgungssystems mit Eisspeicher können mit der zugehörigen Regelstrategie insgesamt 15 Betriebsmodi realisiert werden. Zwei davon, der so genannte Entzugsbetrieb, in welchem der Eisspeicher als Wärmequelle für die dezentralen Wärmepumpen dient und die so genannte Regeneration, in welcher das Kollektorfeld dem Eisspeicher als Wärmequelle dient, sind in Bild 1 in der schematischen Darstellung der Hydraulik durch die farbliche Kennzeichnung der hydraulischen Wege gekennzeichnet.

Für das Monitoring der Versuchsanlage in Ludwigsburg sind insgesamt 66 Messstellen im hydraulischen Wärme- und Kälteversorgungssystem verbaut. Über das Kommunikationsprotokoll Modbus werden je nach Messstelle mehrere Temperaturen, Wetterdaten, Zusatzinformationen wie Fehler- und Störungsmeldungen, aktuelle Mischer- oder Regelventilpositionen, Ein- und Ausschaltzustände oder Laufzeiten einer der Wärmepumpen in einer zeit-

lichen Auflösung von 5 Minuten übermittelt. Für die energetische Bilanzierung des Wärme- und Kälteversorgungssystems sind in der hydraulischen Verschaltung der zentralen Komponenten – Eisspeicher und solarthermisches Luft-Sole-Kollektorfeld – mit dem kalten Nahwärmenetz – mit dem kalten Nahwärmenetz – weiterhin insgesamt drei Wärmemengenzähler installiert (vgl. Bild 1, WMZ 1 bis 3). In jedem Haus, d.h. Haus 1 bis 10, sind zusätzlich jeweils ein Wärmemengenzähler zwischen Wärmepumpe und Pufferspeicher (vgl. Bild 1, WMZ H) und einer zwischen Kühlungswärmeübertrager und Verbraucher (vgl. Bild 1, WMZ K) installiert. Die Datenübermittlung der Wärmemengenzähler erfolgt in einer zeitlichen Auflösung von 10 Minuten. Von der Regelungssoftware wird weiterhin ein Betriebsmodus-Signal in einer zeitlichen Auflösung von 5 Sekunden bis zum 01.09.2023 und in einer zeitlichen Auflösung von 1 Minute seit dem 01.09.2023 gespeichert. Diese hohe zeitliche Auflösung wurde zunächst gewählt, um die im Projekt „Sol4City“ neu entwickelte Regelungssoftware und die darauf basierende Betriebsmoduswahl detailliert zu prüfen. Das Herunterladen der gespeicherten Messdaten erfolgt einmal pro Monat und die Datenübermittlung an das IGTE seit der Inbetriebnahme des Wärme- und Kälteversorgungssystems und einem Großteil der Messtechnik im Juni 2022. Das Ziel des technischen Monitorings war es, nach Inbetriebnahme der Versuchsanlage zunächst nachzuweisen, dass das Wärme- und Kälteversorgungssystem und die Messtechnik die entsprechend vorgesehene Funk-

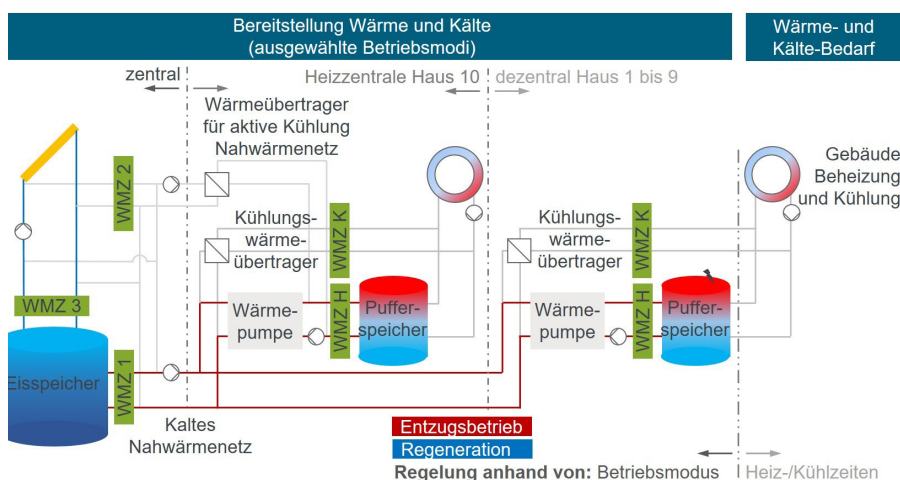


Bild 1: Schematische Darstellung der Hydraulik der Versuchsanlage in Ludwigsburg mit farblich gekennzeichneten ausgewählten Betriebsmodi, sowie Kennzeichnung der zentralen Messstellen

WMZ ... Wärmemengenzähler, H ... Heizen, K ... Kühlen

tionalität erfüllt. Dazu wurde durch das IGTE mit der Software MATLAB ein automatisierter Arbeitsablauf entwickelt, mit welchem die Rohmessdaten der einzelnen Messstellen zu einer Matrix mit einheitlichem Zeitstempel vorverarbeitet und gespeichert werden. Die vorverarbeiteten Rohmessdaten können mittels einer ebenfalls neu erstellten interaktiven Benutzeroberfläche für einen zu wählenden Betrachtungszeitraum geladen werden. Diese interaktive Benutzeroberfläche wird genutzt, um die gemessenen Temperaturen, Volumenströme, Leistungen und Wärmemengen, sowie die genannten Zusatzinformationen und das Betriebsmodus-Signal mittels Heatmaps und Detailansichten auf deren Plausibilität hin zu prüfen.

Bei Auffälligkeiten wie Datenlücken, unerwarteten Kurvenverläufen bzw. zu hohen oder zu geringen Messwerten, wird die Herkunft der Ursache geprüft. So sind Ursachen wie Datenübermitt-

lungsfehler, fehlerhafte Messstellenzuweisungen oder eine Diskrepanz zwischen erforderlichen Datenpunkten und dem Zeitraum des Datenabrufs, bei gleichzeitig nicht ausreichendem Datenspeicherplatz auf die Soft- und Hardware der Messtechnik bzw. deren benutzerdefinierten Konfiguration zurückzuführen. Werden dagegen Soll-Temperaturen in Pufferspeichern oder an Verbrauchern nicht vollständig erreicht, liegen jedoch gleichzeitig in plausiblen Temperaturbereichen, ist die Ursache im Wärme- und Kälteversorgungssystem zu suchen.

Ist die grundsätzliche Funktionalität der Versuchsanlage sichergestellt, kann das Energiemonitoring durchgeführt werden. So werden die Gebäude und das Wärme- und Kälteversorgungssystem inklusive der Regelstrategien hinsichtlich der in der Planung angestrebten Eigenschaften, wie Spitzenlasten, Wärme- und Kältebedarfe, sowie der Zusammensetzung der Wärme- und Kühlenergiebereit-

stellung durch die Komponenten [3] geprüft. Dazu wurde ebenfalls mit der Software MATLAB ein automatisierter Arbeitsablauf für die Nachverarbeitung, d.h. die Approximation fehlender Datenpunkte und die monatliche Bilanzierung der Wärmemengen erstellt.

Herausforderungen und Ergebnisse

Im ersten Schritt des Energiemonitorings werden die Wärmeverbräuche mit den, entsprechend der gemessenen Wetterdaten des Auswertungsjahrs, witterungsbereinigten Wärmebedarfe aus der Planung verglichen. Dieser Vergleich ist in Bild 2 dargestellt.

Da die gebäudeweise dezentralen Wärmemengenzähler „Heizen“ (vgl. Bild 1, WMZ H) zwischen Wärmepumpe und Pufferspeicher installiert sind, werden die Wärmemengen, die den Pufferspeichern durch die elektrischen Heizstäbe in Haus 1 bis 9 zugeführt werden, mittels deren Betriebszeit und einer mittleren Leistung abgeschätzt und auf die Monate Dezember 2022 bis Februar 2023 verteilt. Die Verteilung der Wärmemengen der Heizstäbe wurde so gewählt, da in diesen Monaten, im Gegensatz zu den anderen Monaten, der gesamte Wärmeverbrauch unterhalb des Wärmebedarfs liegt und gleichzeitig die Soll-Pufferspeichertemperaturen der einzelnen Gebäude durch die messtechnisch erfassten Ist-Pufferspeichertemperaturen eingehalten werden. Die abgeschätzten Wärmemengen der elektrischen Heizstäbe sind in Bild 2 als graue Balken dargestellt.

Während die Daten der Wärmemengenzähler „Heizen“ in den Häusern 1 bis 9 bereits im Juli

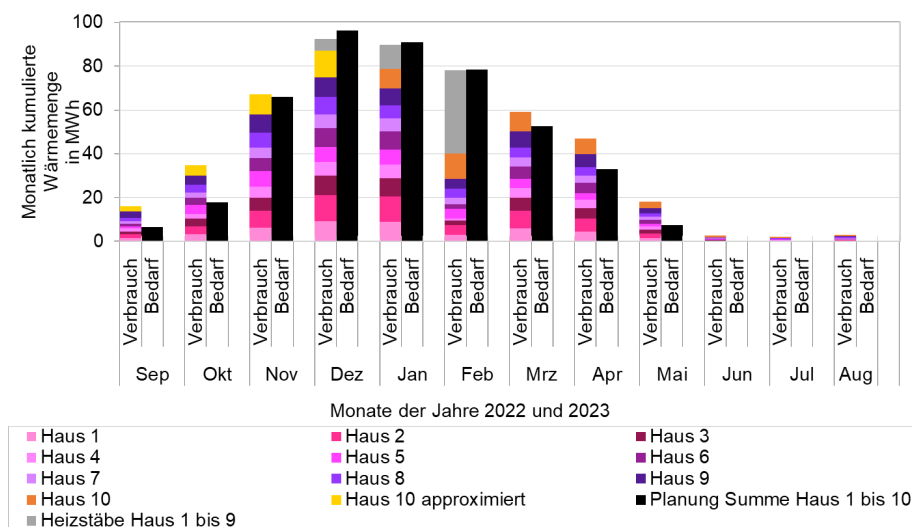


Bild 2: Monatliche Gegenüberstellung von Wärmeverbrauch inklusive Approximationen und witterungsbereinigtem Wärmebedarf der Versuchsanlage in Ludwigsburg

2022 messtechnisch erfasst wurden, konnten die Daten des Wärmemengenzählers Heizen im Haus 10 erst ab Januar 2023 messtechnisch erfasst werden. Daher wurden die durch die gelben Balken repräsentierten Wärmemengen für Haus 10 in Bild 2 von September bis Dezember 2022 in Abhängigkeit des durchschnittlichen Verhältnisses der gemessenen Wärmemenge der Summe der Häuser 1 bis 9 zu der insgesamt gemessenen Wärmemenge von Haus 10 in den repräsentativen Monaten März bis Mai 2023 approximiert

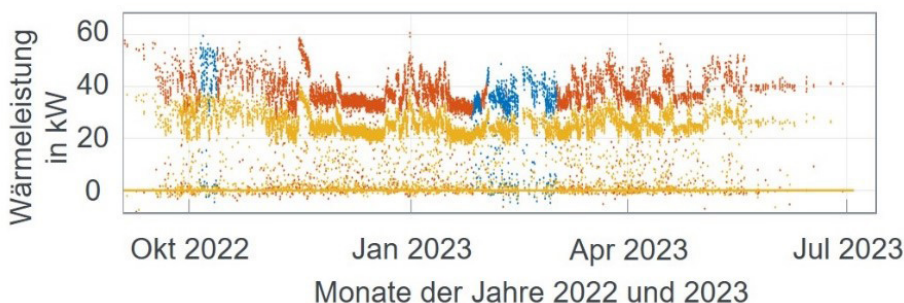
Mittels der eigens entwickelten interaktiven Benutzeroberfläche der Auswertesoftware wurde außerdem festgestellt, dass in den gebäudeweise dezentralen Wärmemengenzählern „Heizen“ und „Kühlen“ in Haus 2, 5, 7 und 8 zu verschiedenen Zeitpunkten Datenlücken aufgetreten sind. Die Datenlücken sind in diesem Fall durch eine Änderung an der Datenübermittlung entstanden. Um die Wärmemengen, welche den dezentralen Pufferspeichern durch die Wärmepumpen zugeführt werden, dennoch für

das gesamte Neubauquartier zu ermitteln, wurde in der Nachverarbeitung der Messdaten eine Approximation der fehlenden Datenpunkte anhand der Ähnlichkeit der zeitlichen Verläufe der bei den anderen Häusern gemessenen Wärmemengen berechnet. So ist in Bild 3 beispielhaft die Datenlücke des Wärmemengenzählers „Heizen“ von Haus 2 in Form von fehlenden roten Datenpunkten z.B. zwischen Januar und April 2023 dargestellt. Die Datenlücke ist in Bild 3 mit blauen approximierten Datenpunkten gefüllt. Diese wurden mittels der Ähnlichkeit des zeitlichen Verlaufs der Wärmemengen der Häuser 1 und 2 berechnet.

Die in Bild 2 dargestellten monatlichen Wärmemengen enthalten bereits alle der beschriebenen Approximationen. Während unter Berücksichtigung der Unsicherheiten der beschriebenen Approximationen die Abweichung der monatlichen Wärmeverbräuche von den Wärmebedarfen in den Übergangsmonaten teilweise relativ groß ist, weicht der Jahreswärmeverbrauch der Heizperiode 2022/2023 mit 456 MWh um

weniger als 1 % von dem prognostizierten Jahreswärmebedarf mit 449 MWh ab. Die Gebäude und das Wärme- und Kälteversorgungssystem inklusive der implementierten Regelstrategie entsprechen damit im Hinblick auf ihr thermisches Verhalten den für die Planung angenommenen Eigenschaften.

In einem zweiten Schritt des Energiemonitorings werden die Zusammensetzung der Energiemengen für die Wärme- und Kältebereitstellung und die damit in Zusammenhang stehenden Leistungskennzahlen, wie die Monats- bzw. Jahresarbeitszahl der Wärmepumpen mit den geplanten Zielvorgaben verglichen. Dazu werden die Wärmemengen der drei zentralen Wärmemengenzähler (vgl. Bild 1, WMZ 1 bis 3) mittels dem Betriebsmodus-Signals eindeutig einzelnen Komponenten und spezifischen hydraulischen Wegen zugeordnet. Anhand der entwickelten interaktiven Benutzeroberfläche konnte im Austausch mit dem Projektpartner im Juli 2023 festgestellt werden, dass identifizierte Datenlücken im Betriebsmodus-Signal auf die bereits erwähnte Diskrepanz zwischen einer hohen zeitlichen Auflösung der Messdaten, dem hier nur monatlichen Datenabruf und auf den, daraus resultierend, nicht ausreichenden Datenspeicherplatz zurückzuführen sind. Dies ist der Grund für die bereits erwähnte Anpassung der zeitlichen Auflösung des Betriebsmodus-Signals auf eine Minute seit dem 01.09.2023. Die entsprechende Datenauswertung kann daher erst seitdem vollständig erfolgen.



- Wärmeleistung WMZ H Haus 2 approximiert
- Wärmeleistung WMZ H Haus 2 gemessen
- Wärmeleistung WMZ H Haus 1 gemessen

Bild 3: Beispielhafter Umgang mit Datenlücken bei automatisierter Nachverarbeitung der Messdaten

Fazit und Ausblick

Das hier beschriebene solare kalte Nahwärmenetz mit Eisspeicher stellt ein Wärme- und Kälteversorgungssystem mit einem hohem Komplexitäts- und Technisierungsgrad dar, mit dem Ziel hohe erneuerbare Deckungsanteile in urbanen Gebieten zu erreichen. Unter anderem zur Ermittlung der erzielten erneuerbaren Deckungsanteile und anderer charakteristischer thermischer Kenngrößen wie z.B. den Leistungskennzahlen der Wärmepumpen ist eine umfangreiche Datenbasis erforderlich, die nur mittels der Durchführung eines technischen Monitorings und insbesondere eines Energiemonitorings geschaffen werden kann.

Durch die dargestellten Herausforderungen und ersten Ergebnisse des durchgeführten technischen Monitorings wird deutlich, wie relevant die Erstellung eines ausführlichen und gesamtheitlichen Monitoringkonzepts, dessen sorgfältige Implementierung sowie die engmaschige Überprüfung der Plausibilität von Messdaten durch automatisierte Arbeitsabläufe direkt nach Inbetriebnahme und während des Betriebs ist. Nur auf Basis entsprechend aussagekräftiger Ergebnisse ist es möglich Optimierungsvorschläge für eine Verbesserung des Betriebsverhaltens abzuleiten. Weiterhin ist die Komplexität des Monitorings eines solchen Wärme- und Kälteversorgungssystems sowie der erforderliche zeitliche Vorlauf für aussagekräftige Ergebnisse bemerkenswert. So wurde in der

Versuchsanlage in Ludwigsburg beispielsweise über ein Jahr für die Einregulierung und die Fehlerbehebung insbesondere der Software und Hardware der Messtechnik und der entsprechenden benutzerdefinierten Konfiguration benötigt.

Für die Heiz- und Kühlsaison 2024/2025 werden voraussichtlich Wärmemengenzähler nach den Pufferspeichern nachgerüstet, sodass ein aussagekräftigeres Energiemonitoring möglich wird. Die dadurch geschaffene Transparenz ermöglicht quantitative Aussagen zur Erreichung von Ziel- bzw. Planungsvorgaben und zur Bewertung des thermischen Verhaltens der Anlage sowie zu Optimierungspotentialen hinsichtlich einer noch energieeffizienteren, funktions- und bedarfsgerechteren Betriebsweise.

Die Monitoringdaten werden bis zum Projektende Anfang 2024 auch für die Validierung eines Simulationsmodells für das Gesamtsystem inklusive zugehöriger Regelstrategie in den Simulationsumgebungen TRNSYS und Polysun verwendet. So können weitere Regelstrategien, wie beispielsweise prädiktive und adaptive Regelalgorithmen [4] zunächst simulativ ohne bauliche oder technische Eingriffe in das Versorgungssystem untersucht und erst im Erfolgsfall implementiert werden.

Danksagung

Das Projekt Sol4City wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK),

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages durch den Projektträger Jülich (PTJ) unter dem Förderkennzeichen 03ET-W019A/B gefördert. Die Autoren danken für die Unterstützung und übernehmen die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung.

Literatur

- [1] F. Bünning et al., Bidirectional low temperature district energy systems with agent-based control: Performance comparison and operation optimization, *Applied Energy* 209, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.072>
- [2] Verein Deutscher Ingenieure (VDI), VDI 6041 – Facility-Management – Technisches Monitoring von Gebäuden und gebäudetechnischen Anlagen, Beuth Verlag GmbH, 2017
- [3] S. Lott, S. Fischer, H. Drück, B. Hafner, Quasi-Dynamic Testing of Air-Brine-Collectors and Numerical Simulations of a Cold District Heating Network, *Conference Proceedings ISES and IEA SHC International Conference on Solar Energy for Buildings and Industry – EuroSun, 2022*, <https://proceedings.ises.org/paper/eurosun2022/eurosun2022-0027-Lott.pdf>
- [4] J. Ullmann, S. Lott, H. Drück, Entwicklung einer prädiktiven und adaptiven Regelung für die Wärme- und Kälteversorgung mittels eines kalten Nahwärmenetzes, *Conference Proceedings 33. Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme, 2023*

Vergleichskennzahlen für thermische Energiespeicher (Projekt VKTES)

**Stephan Bachmann,
Stephan Fischer**

Einleitung

Das Projekt „Vergleichskennzahlen für thermische Energiespeicher“ (VKTES) hat zum Ziel Kennzahlen und Prüfsequenzen zu erarbeiten, die beim technischen und wirtschaftlichen Vergleich verschiedener Bauarten und Prinzipien thermischer Energiespeicher unterstützen. Insbesondere für den Vergleich verschiedener Speicherprinzipien (Speicherung von fühlbarer und / oder latenter Wärme) fehlen vor allem für Puffer- bzw. Betriebswasser- und Kombispeicher bisher geeignete Kennwerte bezüglich ihrer thermischen Leistungsfähigkeit. Um die erforderliche Breitenwirkung und Akzeptanz im Markt zu erreichen, soll der Fokus auf einfach und kostengünstig zu ermittelnde Kennzahlen basierend auf der DIN 2384 [1] liegen.

Kennzahlen

Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene Kennzahlen zur Charakterisierung der thermischen Leistungsfähigkeit von Wärmespeichern definiert. Die theoretische Speicherkapazität der fühlbaren Wärme beschreibt für alle Speicherarten den pro Kelvin theoretisch speicherbaren, fühlbaren Wärmeinhalt und ist eine reine Rechengröße aus den verbauten Massen und deren

spezifischen Wärmekapazitäten. Der theoretische Wärmeinhalt eines Wärmespeichers ist ebenfalls eine reine Rechengröße und berechnet sich aus der theoretischen Speicherkapazität und der Temperaturdifferenz sowie bei Latentwärmespeichern oder chemischen Wärmespeichern zusätzlich aus der Masse des entsprechenden Materials und der spezifische Phasenwechsel-, oder Reaktionsenthalpie.

Der tatsächliche Wärmeinhalt gibt an, welche Wärmemenge der Speicher bei einer Temperaturdifferenz ΔT tatsächlich speichern kann und wird ausschließlich aus Messungen auf einem Prüfstand bestimmt. Er berücksichtigt Totvolumina im Speicher, Grädigkeiten an Wärmeübertragern oder inhomogene Temperaturverteilungen. Der Abminderungsfaktor beschreibt den prozentualen Anteil um den der tatsächliche Wärmeinhalt geringer ist als der theoretische Wärmeinhalt.

Der energetische Speicherwirkungsgrad stellt das Verhältnis aus Nutzen zu Aufwand dar und wird über die während der Messungen ein- bzw. ausgespeicherten Wärmemengen sowie der dabei benötigten Hilfsenergie (der Pumpe) bestimmt.

Prüfsequenzen

Zur Bestimmung der Kennwerte wird der Speicher auf einem Prüfstand entsprechenden Prüf-

sequenzen unterzogen. Jede Prüfsequenz beginnt mit der Konditionierung des gesamten Speichervolumens auf eine Temperatur von $\vartheta_{E}^{Er} = 25^{\circ}C$. Im Anschluss erfolgen die Beladung (mit konstanter Eintrittstemperatur) und unmittelbar danach die Entladung des Speichers (ebenfalls mit konstanter Eintrittstemperatur). Abhängig von der Speicherart werden die Eintrittstemperatur und der Volumenstrom variiert.

Virtuelle Prüfung

Zusätzlich zur Prüfung am Prüfstand wurde untersucht, inwiefern sich die Speicherkennzahlen auch simulationstechnisch in Verbindung mit einem Speichermodell bestimmen lassen. Voraussetzung hierfür ist ein mathematisches Speichermodell, das in der Lage ist, das thermische Verhalten des Speichers abzubilden. Hierzu wird das TRNSYS-Type 340 verwendet. Dazu wird der Speicher zunächst nach EN 12977-3/4:2018 [2] geprüft. Hierbei werden mit Hilfe eines Parameteridentifikationsverfahrens die Modellparameter ermittelt, sodass das thermische Verhalten des jeweiligen Speichers abgebildet werden kann. Anschließend wurden die entwickelten Prüfungen zur Bestimmung der Speicherkennzahlen mit dem gewonnenen Speichermodell nachsimuliert.

Tabelle 1: Ergebnisse der messtechnischen und simulativen Untersuchungen

	Prüfung 1 $\dot{V} = 470 \text{ l/h}$ $\Delta T = 25 \text{ K}$	Prüfung 2 $\dot{V} = 940 \text{ l/h}$ $\Delta T = 25 \text{ K}$	Prüfung 3 $\dot{V} = 470 \text{ l/h}$ $\Delta T = 65 \text{ K}$	Prüfung 4 $\dot{V} = 1410 \text{ l/h}$ $\Delta T = 20 \text{ K}$
Beladung:				
Q gemessen [kWh]	25,89	25,67	66,20	19,86
Q simuliert [kWh]	25,87	25,54	68,15	20,24
f_Q gemessen [%]	9,3	10,1	10,2	13,0
f_Q simuliert [%]	9,4	10,5	7,5	11,4
Entladung:				
Q gemessen [kWh]	-25,68	-25,44	-66,62	-20,13
Q simuliert [kWh]	-24,50	-24,28	-64,96	-19,23
f_Q gemessen [%]	10,0	10,9	9,6	11,8
f_Q simuliert [%]	14,2	15,0	11,9	15,8
η gemessen [%]	99,2	99,1	100,6	101,4
η simuliert [%]	94,7	95,1	95,3	95,0

mit:

Q: tatsächlicher Wärmeinhalt; f_Q : Abminderungsfaktor; η : energetischer Speicherwirkungsgrad; ΔT : Temperaturdifferenz zwischen Be- und Entladung

Tabelle 1 zeigt die am Prüfstand messtechnisch als auch die durch Simulation bestimmten Werte am Beispiel eines Kombispeichers (Nennvolumen 940 l) der hierzu vollständig direkt be- und entladen wurde.

Die Tabelle zeigt, dass teilweise größere Differenzen zwischen den durch Messung und Simulation gewonnenen Werten auftreten. Dies ist zum einen auf Messungenauigkeiten zurückzuführen, zum anderen aber auch darauf, dass am Prüfstand Temperaturen und Volumenströme nicht immer exakt eingehalten werden können. Dies führt z. B. dazu, dass bei der Entladung die Werte für den tatsächlichen Wärmeinhalt (gemessen) immer höher sind als die durch Simulation gewonnenen Werte.

Fazit

Die im Rahmen des Projekts „Vergleichskennzahlen für thermische Energiespeicher“ (VKTES) entwi-

ckelten Kennzahlen und Prüfsequenzen wurden für einen Kombispeicher erfolgreich mess- sowie simulationstechnisch ermittelt. Die Abweichungen zwischen den beiden Verfahren können im Rahmen von Planungsaufgaben toleriert werden. Vorteil der simulationstechnischen Ermittlung ist, dass Temperaturdifferenzen und Volumenströme exakt eingehalten werden können.

Die im Projekt erarbeiteten Kennzahlen und Prüfmethode fließen in die VDI-Richtlinie 4657 Blatt 2 "Planung und Integration von Energiespeichern in Gebäudeenergiesysteme – Thermische Energiespeicher" [3] ein.

Danksagung

Das Forschungsvorhaben VKTES wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages durch den Projektträger

Jülich (PTJ) unter dem Förderkennzeichen 03TN0028D gefördert. Die Autoren danken für die Unterstützung.

Literatur

- [1] DIN 2384 „Thermische Energiespeicher – Terminologie, Anforderungen, Kenngrößen, Prüfgrundlagen“, Oktober 2020.
- [2] EN 12977-3:2018: Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile – Kundenspezifisch gefertigte Anlagen – Teil 3: Leistungsprüfung von Warmwasserspeichern für Solaranlagen EN 12977-4:2018: Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile – Kundenspezifisch gefertigte Anlagen – Teil 4: Leistungsprüfung von Warmwasserspeichern für Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung und Raumheizung (Kombispeicher).
- [3] VDI-Richtlinie 4657 Blatt 2 "Planung und Integration von Energiespeichern in Gebäudeenergiesysteme – Thermische Energiespeicher", Entwurfsfassung vom 23.11.2022.

Untersuchung einer dynamischen Regelung der Kühlkreistemperaturen von Rechenzentren zur Effizienzsteigerung und Ableitung eines Leitfadens zur Umsetzung entsprechender Konzepte

**Mashhur Gheni,
Henner Kerskes**

Einleitung

Die Digitalisierung von Prozessen unterschiedlicher Art benötigt eine schnelle Übermittlung und Speicherung enorm großer Datenmengen via Internet. Dabei sind die zentralen Schaltstellen des Internets die Rechenzentren. Neben den Servern stellen die Kühlanlagen den zweitgrößten Verbraucher elektrischer Energie in Rechenzentren dar und sind oft für etwa ein Drittel des Gesamtenergiebedarfs verantwortlich. Eine äußerst energieeffiziente Kühlmethode ist die sogenannte „freie Kühlung“, bei der die Abwärme mittels Nass- oder Trockenkühltürmen ohne aktive Kälteerzeugung direkt an die Umgebung abgegeben wird. Dies funktioniert jedoch nur, wenn die Temperatur der abzuführenden Wärme über der Außentemperatur liegt. Daher tendiert die Entwicklung von Servern dazu, höhere Betriebstemperaturen zu ermöglichen, um den Anteil der freien Kühlung zu maximieren. Jedoch birgt die Erhöhung der Betriebstemperaturen potenziell negative Auswirkungen. Höhere Betriebstemperaturen führen zu einer verringerten Energieeffizienz und verkürzten Lebensdauer von IT-Komponenten im Rechenzentrum, insbesondere bei Halbleitern wie CPUs und Hauptspeichern. Zudem wird bei höhe-

ren Betriebstemperaturen mehr Wärme an die Luft im Serverraum übertragen, was zu einer zusätzlichen Belastung der Luftkühlsysteme führt. Die Luftkühlsysteme sind in der Regel weniger effizient als Wasserkühlsysteme. Diese Zielkonflikte sind grundsätzlicher Art und treten in allen wassergekühlten Rechenzentren auf. Diese Studie nimmt sich dieser Problematik im Spannungsfeld

zwischen möglichst niedrigen Betriebstemperaturen und maximaler Kühlungs-effizienz an. Dies soll durch die Entwicklung einer Methodik zur Implementierung von dynamischen Kühlkreis-Vorlauf-temperaturen erreicht werden. Sie soll am Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart (HLRS) beispielhaft umgesetzt und erprobt werden.

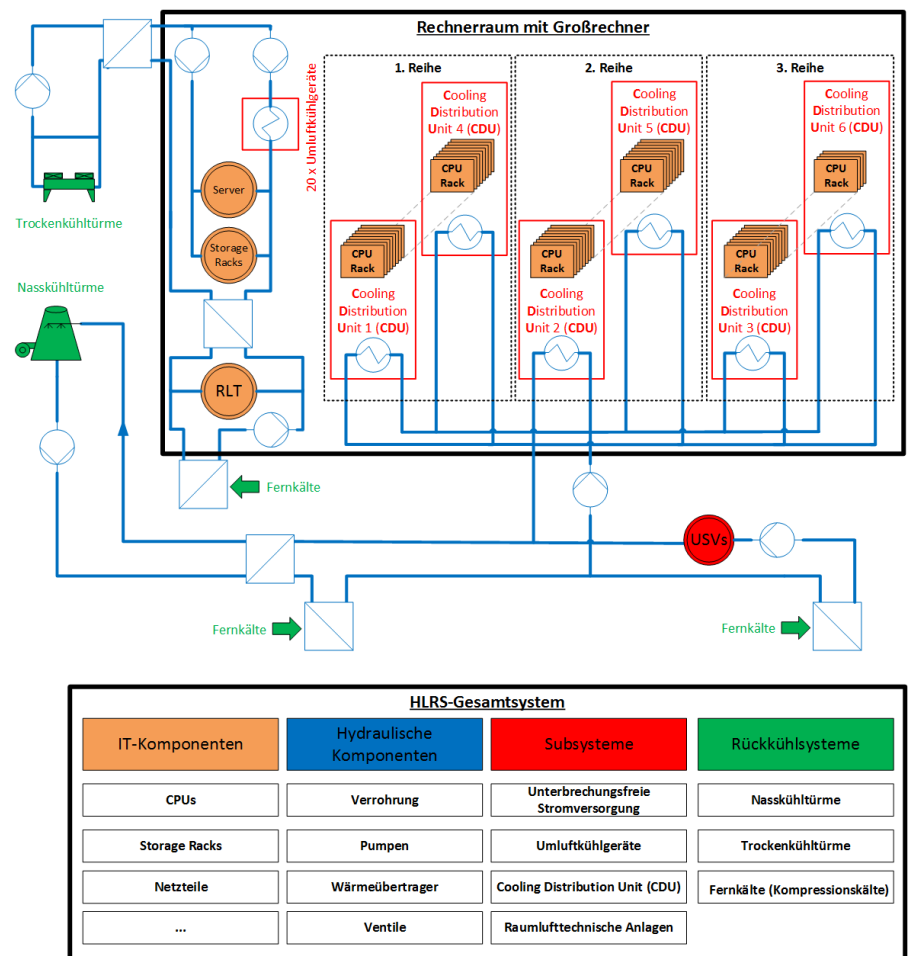


Bild 1: Vereinfachtes Kühlsystemschemas des Rechenzentrums

Technische Infrastruktur am HLRS

Eine vereinfachte Übersicht des Rechenzentrums am Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart (HLRS) ist in Bild 1 dargestellt. Das mit Abstand dominierende System ist der Höchstleistungsrechner HAWK mit einer elektrischen Leistungsaufnahme von 3,2 MW. Er besteht aus 44 wassergekühlten Serverschränken mit 5.632 Servern in drei Reihen, wobei pro Reihe zwei lokale geregelte Kälteunterverteilungen, die „Cooling Distribution Units“ (CDU), verbaut sind. Außerdem gehören zu HAWK weitere 11 Serverschränke mit den nötigen Speichersystemen („Storage Racks“) und weitere zum Betrieb notwendige IT-Komponenten. Daneben werden in diesem Raum noch ein kleineres, luftgekühltes Rechen-Cluster mit ca. 200 kW und diverse andere Server (Datenbank-, Mail-, Web-, Test-Systeme usw.) betrieben.

Die Kühlung des Rechenzentrums erfolgt über drei Kältequellen. Ein Freikühlsystem mit Nasskühltürmen versorgt die CDUs des Höchstleistungsrechners mit Kälte auf höherem Temperaturniveau. Ein zweites Freikühlsystem mit Trockenkühlern kühlt die Storage-Racks und versorgt 20 Umluftkühler (ULK) für die luftgekühlten Systeme im Raum. Wenn die Leistung der Freikühlungen bei hohen Außentemperaturen nicht ausreicht, wird Fremdkälte aus Kompressionskältemaschinen über einen Fernkälteanschluss zugeführt. Im Winter werden die Gebäude des HLRS über zwei Wärmepumpen mit der Rechnerabwärme beheizt.

Vorgehen und vorläufige Ergebnisse

Die Untersuchung ist in aufeinander aufbauende Schritte unterteilt. In Zusammenarbeit mit den Herstellern HPE und AMD wurden zunächst umfangreiche Leistungstests am neuen HAWK-Rechner durchgeführt, um die Temperaturabhängigkeiten der Rechenleistung zu bestimmen. Anschließend erfolgte die Bestimmung der Dynamik der Kühlsystemkomponenten. Beispielsweise wurden die Kühlleistung, der Stromverbrauch und der Wasserverbrauch der Nasskühltürme untersucht. Diese Größen sind von Umgebungsbedingungen, Volumenströmen und den Temperaturen des Kühlmediums abhängig. Die Bestimmung dieser Abhängigkeiten erfolgte anhand von Messdaten sowie Produktdatenblättern.

Eine detaillierte thermische Modellierung der CPUs sowie des Kühlsystems und seines Regelungssystems wurde unter Be-

rücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse durchgeführt. Des Weiteren wurden zwei neuartige datenbasierte Modellierungsmethoden entwickelt, um die Wärmeübertragung von Prozessoren auf Wasser und Luft sowie das thermische Verhalten der Nasskühltürme zu modellieren. Im Vergleich zu üblichen datenbasierten Modellierungsmethoden zeichnen sich die entwickelten Methoden durch ihre physikalische Grundlage aus, was sie extrapolierbar, interpretierbar, generalisierbar und weniger anfällig für Overfitting macht. Zudem können sie Vorhersagen unter unbeobachteten Bedingungen treffen. Das Modell wurde daraufhin mit Messdaten validiert. Die Ergebnisse zeigen einen Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error (CVRMSE) von 7,9% und Normalized Mean Bias Error (NMBE) von -2,0% für die stündliche Wärmeübertragung durch Nasskühltürme, was den Validierungskriterien

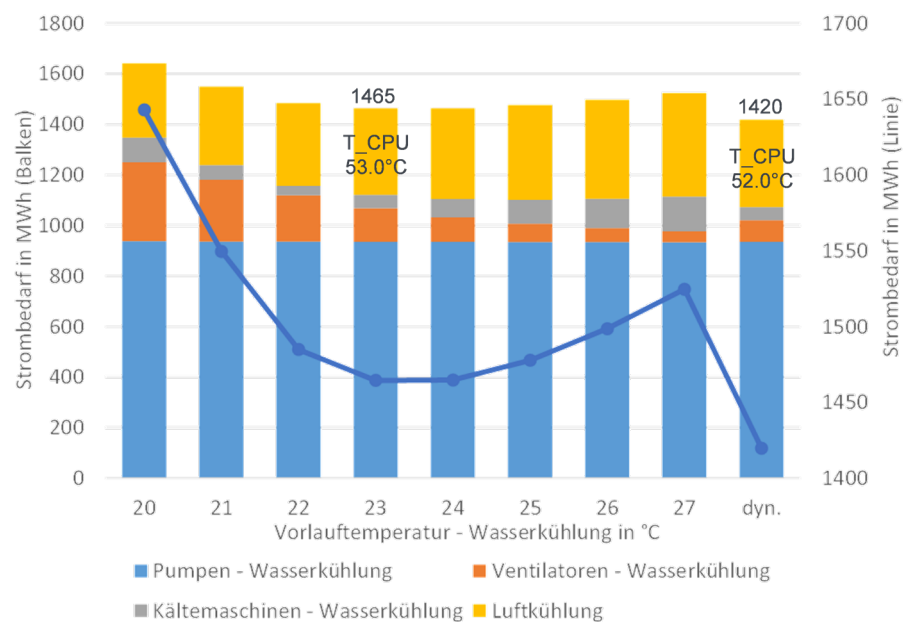


Bild 2: Jährlicher Stromverbrauch bei unterschiedlichen Betriebsstrategien

für Energiemodelle nach ASHRAE Guideline 14 [1] entspricht.

Im nächsten Schritt wurden der konstante Betrieb bei höheren Kühlwassertemperaturen numerisch untersucht, gefolgt von einer Analyse der Implementierung dynamischer Kühlkreis-Vorlauf-temperaturen. Diese Methoden wurden einer umfassenden energetischen, ökonomischen und ökologischen Analyse unterzogen, wobei die quantitative Bewertung anhand der entwickelten Modelle und Simulationsergebnisse erfolgte. Die vorläufigen Ergebnisse (siehe Bild 2) zeigen, dass bei einer konstanten Rechnerstromaufnahme von 3 MW die Kühlsysteme mit dynamischer Regelung (Spalte ganz rechts) jährlich 1.420 MWh Strom benötigen. Dies entspricht einer Reduktion von 3,1% im Vergleich zur besten konstanten Temperaturregelung (23 °C). Zudem ist mit dynamischer Regelung die durchschnittliche jährliche CPU-Temperatur (T_{CPU}) um 1 K niedriger als bei der Regelungsstrategie, die die Vorlauf-temperatur konstant auf 23 °C regelt. Dies wurde durch die Suche nach dem energetischen Optimum zwischen möglichst niedrigen Betriebstemperaturen und maximaler Kühlungseffizienz erreicht.

In der praktischen Umsetzung wurde eine ausgewählte Methodik am HLRS exemplarisch implementiert und getestet. Die gewonnenen Ergebnisse werden hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit und Potenziale evaluiert.

Die abschließenden Arbeitsschritte beinhalten die Analyse und

Beurteilung der Optimierungsmaßnahmen unter Verwendung dynamisch geregelter Temperaturen. Hieraus resultiert die Erstellung eines Leitfadens, der konkrete Handlungsempfehlungen und Betriebsstrategien für Rechenzentren enthält. Die gewonnenen quantitativen Ergebnisse sowie die technischen, hydraulischen und regelungstechnischen Anforderungen werden detailliert betrachtet und hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit und Potenziale bewertet. Zudem erfolgt eine Untersuchung des Einflusses des Standortfaktors, und es werden die dynamisierten Kühlsysteme mit anderen Kühlkonzepten verglichen.

Danksagung

Die wissenschaftlichen Arbeiten werden an der Universität Stuttgart durch das Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) und das Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart (HLRS) geleistet und von Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) unter dem Kennzeichen AZ 37006/01 gefördert. Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung.

Literatur

[1] ASHRAE, ASHRAE Guideline 14-2014: Measurement of Energy, Demand, and Water Savings