

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 2024 aufzählen und Ihnen einen Überblick der Inhalte geben, die Sie in den folgenden Artikeln erwarten.

Wir freuen uns sehr, dass wir uns mit Ihnen wieder bei gemeinsamen Veranstaltungen wie Tagungen, Projekttreffen oder der Mitgliederversammlung des VdF HLK im November persönlich austauschen konnten.

Das Hermann-Rietschel-Colloquium (HRC) fand im März wieder im Kleinwalsertal statt, nachdem es 2022 ausfallen musste. Hier tauschen sich Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus dem Fachgebiet der Heiz- und Raumlufttechnik der RWTH Aachen, TU Berlin, TU Dresden und Universität Stuttgart alle zwei Jahre aus. Wir waren dort mit 14 Mitarbeitern vertreten.

Im September wurde ich gemeinsam mit Dr.-Ing. Yuanchen Wang von der Fakultät für Maschinenbau der Tongji-Universität in Shanghai eingeladen. Wir besuchten den Jiading-Campus der Tongji-Universität, um mehr als zehn Hauptlabore des Instituts im

Bereich der Gebäudeenergetik zu besichtigen, darunter Adsorptionsteststand, Teststand für die Öl- und Rauchreinigung, Teststand für chinesische Küchen, Teststand für Temperaturregelung, Doppelkammer-Teststand, Filterteststand. Wir tauschten uns intensiv mit dem stellvertretenden Direktor des Sino-German Center for Mechanical Engineering, Associate Professor Ye sowie mit Doktoranden und Masterstudierenden der Fachrichtung Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik aus. Dabei diskutierten wir uns über laufenden Forschungsarbeiten und stellten entsprechende Forschungsaktivitäten in Deutschland vor.

Unter der Organisation von Associate Professor Ye besuchten wir die Lianfeng Environmental Technology (Shanghai) Co., Ltd. sowie die Vaillant Group (China) Heating, Cooling and Environmental Technology Co., Ltd. Fa. Lianfeng organisierte zudem eigens ein „Sino-German Seminar zum Austausch über Wohnungslüftungstechnologie“.

Im November fand die Jahrestagung des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins e.V. (DKV) in Dresden statt – wie auch im letzten Jahr in Präsenz. Dort präsentierten unser Student Louis Tafelmaier die Ergebnisse seiner Masterarbeit „Experimentelle Untersuchung des Hilfgaskreislaufes einer Diffusions-Absorptionskältemaschine“, unsere wis-

senschaftlichen Mitarbeiter ihre Forschungsvorhaben: Peer Huber: „Solare kalte Nahwärme mit zentraler Wärmepumpe“, Luisa Haak: „NH₃/H₂O-Absorptionswärmefransformator - Erhöhung der Betriebsstabilität“ und Tim Jourdan seine Erkenntnisse zum Entwurf von raumweisen Temperaturreglern“ dem interessierten Fachpublikum.

Es freut mich, Ihnen mitteilen zu dürfen, dass uns in 2024 sechs Forschungsvorhaben neu bewilligt wurden:

- TurboKon-H₂O: Entwicklung eines innovativen energieeffizienten Verfahrens zur kontinuierlichen Wassergewinnung aus feuchter Luft durch heterogene Kondensation an Aerosolpartikeln mit Hilfe von Turbomaschinen
- SolKaN 2.0: Solare kalte Nahwärme der zweiten Generation
- HEELP: Verbesserung der Energieeffizienz und der Behaglichkeit in Wohngebäuden durch die Integration von energetischen Modellen in eine interoperable Smart Home-Plattform
- EKUS hoch i: Energieeinsparung und Klimaschutz mit intelligenten Einzelraumlösungen an der Universität Stuttgart
- fronTherm: Fassadenheiz- und -kühleinheit zur seriellen Sanierung von Bestandsgebäuden

- HoVAG: Hochleistungsrohre für die Verdampfung von Ammoniak in Großwärmepumpen

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

270. Personelle Veränderungen sowie Bachelor-, Studien-, Forschungs- und Masterarbeiten 2023/24

271. Heinz-Bach-Preis 2023

272. Einfluss der Konstruktion von Temperatur-Messköpfen auf die Messunsicherheit sowie den Strömungswiderstand

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

274. Machbarkeitsuntersuchung zur Erweiterung des Schichtlüftungskonzepts um eine vertikale Komponente

275. Energieeinsparpotential regelbarer Dämmelemente

277. Integration von energetischen Modellen in einer Smart Home-Plattform für Energieeffizienz und Behaglichkeit

278. Systemübergreifende Regelstrategien für Wohnungslüftungs- und Heizungssysteme

279. Energieeffiziente Wassergewinnung durch heterogene Kondensation mit Hilfe von Turbomaschinen

280. Raumkühlung von Nichtwohngebäuden mit Wärmerohren, Fokus: Thermische Behaglichkeit

281. Hocheffiziente Wärmedämmungen für Warmwasserspeicher

282. Highlights der IEA SHC Task 66 SolarEnergyBuildings

283. Definition generischer Heizungsanlagen für den ökonomischen und ökologischen Vergleich

284. Prüfung von Luft-Sole-Kollektoren für den Einsatz als alleinige Wärmequelle für Wärmepumpen

285. Entwicklung einer kompakten Anlage zur unabhängigen und kontinuierlichen solar-sorptiven Wassergewinnung aus der Luft

286. Thermischer Bauartnachweis für Schaltanlagen: Die DIN EN 61439 auf dem Prüfstand

287. Absorptionswärmetransformator zur Abwärmenutzung

288. Netzdienlicher Betrieb von Nichtwohngebäuden durch modellgestützte prädiktive Regelung des Gebäudeenergiesystems

Gerne möchte ich auch darauf hinweisen, dass im Jahre 2024 mehrere Studierende und ein Mitarbeiter des IGTE für ihre Forschungsarbeiten ausgezeichnet wurden.

So belegte Oliver Pfrommer für seine Masterarbeit den ersten Platz, Joeline Büttner für ihre Bachelorarbeit den zweiten Platz und Dr.-Ing. Yuanchen Wang für seine Dissertation den dritten Platz beim Otto F. Scharr-Preis für Energietechnik.

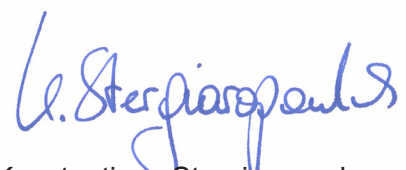
Der Heinz-Bach-Preis wurde zum vierten Mal im Rahmen der VdF-Mitgliederversammlung 2024 vergeben. Im Anschluss werden die Arbeiten sowie die Preisträgerinnen und Preisträger in Artikel 271 vorgestellt.

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 2025.

Bleiben Sie weiterhin gesund!

Herzlichst



Konstantinos Stergiaropoulos

Personelle Veränderungen sowie Bachelor-, Studien-, Forschungs- und Masterarbeiten 2023/2024

Personelle Veränderungen

Daniela Gille, B.A. ist seit Juni 2024 am IGTE als Assistenz von Prof. Dr.-Ing. Stergiaropoulos tätig und ist zusätzlich im Sekretariat im Pfaffenwaldring 35 Ansprechperson für studentische Angelegenheiten. Zuvor hat sie Linguistik an der Universität Stuttgart studiert und als gelernte Buchhändlerin in verschiedenen Buchhandlungen gearbeitet.

Raffaella Helf, M.Sc. ist seit September 2024 als wissenschaftliche Mitarbeiterin am IGTE tätig und beschäftigt sich mit Themen der Gebäude- und Quartierssimulation. An der Universität Stuttgart absolvierte sie den Bachelorstudiengang „Umweltschutztechnik“ sowie anschließend den Masterstudiengang „Energietechnik“.

Dipl.-Ing. (FH) Martin Huber, ist seit 01.03.2024 in der Arbeitsgruppe Komponenten- und Systemprüfung. Er führt die Prüfungen für Kollektoren und Systeme an den Prüfständen in der Halle Gebäude 10 und auf dem Dach (3. Stock) durch und ist für die Feldtestanlage mit solarthermischen Luft-Sole-Kollektoren als Wärmequelle für Wärmepumpen zuständig.

Peer Huber, M. Sc. ist seit Februar 2024 am IGTE als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig und beschäftigt sich zum einen mit der Modellierung von Wärmenetzen inklusive verschiedener Bestandteile, wie Wärmepumpen, erdvergrabenen Rohrleitungen oder saisonaler thermischer Energiespeicher. Zum anderen arbeitet er experimentell an der Verbesserung von Eisspeichern. Seinen Bachelorstudiengang „Erneuerbare Energien“ und den Masterstudiengang „Umweltschutztechnik“ mit Fokus auf Gebäudeenergetik absolvierte er an der Universität Stuttgart.

Svetlana Rudi ist seit April 2024 bei uns am IGTE im Sekretariat im Pfaffenwaldring 6 tätig. Zuvor war sie in Elternzeit und hat danach als Verwaltungsfachangestellte an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg gearbeitet.

Nermeen Abdelnour, M.Sc. befasste sich mit der Untersuchung von Luft-Sole-Kollektoren als Wärmequelle für Wärmepumpen und verließ das Institut Ende November 2024.

Dr.-Ing. Christian Karczewski war seit Juli 2020 Stipendiat der Graduierten- und Forschungsschule für „Effiziente Energienutzung“ Stuttgart (GREES). Nach erfolgreichem Abschluss seiner Dissertation verließ er im Mai 2024 das Institut und ist jetzt Testingenieur Entwicklung, bei der Endress und Hauser GmbH + Co. KG, Gerlingen.

Frédéric Sansonnens war seit 2009 in der Arbeitsgruppe Komponenten- und Systemprüfung als Prüftechniker tätig. Er verließ das Institut Ende März 2024.

Joschka Seiz, M.Sc war in der Arbeitsgruppe Nachhaltige Gebäude und Quartierskonzepte tätig und befasste sich mit Energieversorgungskonzepten für Gebäude, Quartiere und Kommunen. Er verließ das Institut Ende Oktober 2024.

Dipl.-Ing. Sven Stark, war seit 2012 in der Arbeitsgruppe Nachhaltige Gebäude und Quartierskonzepten und verließ das Institut Ende Februar 2024.

Dissertationen

Über den VdF HLK erhältlich

Wang, Yuanchen

Impact of Occupant Behavior on the Energy Efficiency Measures for Residential Buildings in Hot and Humid Climates

Universität Stuttgart Mitteilung Nr. 33, 2024

ISBN 978–3–9811996–2–8

Karczewski, Christian

Flexibilisierungspotenziale von raumluftechnischen Anlagen zur netzdienlichen Lastverschiebung, Stuttgart 2024

Universität Stuttgart Mitteilung Nr. 34, 2024

ISBN 978–3–9811996–3–5

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 besonders,

dass bei der diesjährigen Vergabe drei am IGTE erstellte Arbeiten ausgezeichnet wurden.

Den ersten Platz belegte unser Student Oliver Pfrommer mit seiner Masterarbeit „Verbesserung eines Durchflussskalorimeters durch Ankopplung eines Wärmeübertrager-Bypasses für die Wärmekapazitäts- und Wärmeübertragungsmessungen mit einer silikonbasierten Wärmeträgerflüssigkeit bis zu 430 °C für Anwendungen der konzentrierten Solarenergie“, der mit 5.000 € dotiert ist. Unsere Studentin Joeline Büttner folgte mit ihrer Bachelorarbeit „Weiterentwicklung eines Simulationsmodells zur Wassergewinnung aus feuchter Luft über heterogene Kondensation an Aerosolpartikeln“ auf dem zweiten Platz und erhielt ein Preisgeld in Höhe von 3.000 €. Die Dissertation von Dr.-Ing. Yuanchen Wang mit dem Thema „Impact of Occupant Behavior on the Energy Efficiency Measures for Residential Buildings in Hot and Humid Climates“ (Einfluss des Nutzerverhaltens auf Energieeffizienzmaßnahmen in Wohngebäuden in heißen und feuchten Klimazonen) belegte den dritten Platz, dotiert mit 2.000 €. Unser Dank gilt der Otto F. Scharr-Stiftung für die Förderung!



v.l.n.r.: Rainer Otto F. Scharr, (geschäftsführender Gesellschafter der Friedrich Scharr KG), Oliver Pfrommer, Joeline Büttner, Dr.-Ing. Yuanchen Wang, Prof. Dr.-Ing. Kai Hufendiek, (Dekan der Fakultät 4 Energie-, Verfahrens- und Biotechnik)

Emre Bas: Entwicklung einer Entscheidungsgrundlage für die Auswahl von Trinkwassererwärmungssystemen im Gesundheitssektor unter Berücksichtigung von Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit (Masterarbeit)

Florian Frey: Aufbau und Inbetriebnahme eines Teststands zur optischen Vermessung des Wachstums strömender Tropfen auf Basis der Laserextinktion (Masterarbeit)

Kai Haasis: Ökologische und ökonomische Analyse verschiedener Transportprozesse und -routen für Wasserstoff (Masterarbeit)

Simon Haasis: Vergleichende Lebenszyklusanalyse einer funk- bzw. kabelbasierten Gebäudeautomation im Neubau und Bestand (Masterarbeit)

Lea Häufel: Experimentelle Untersuchung eines solar-sorptiven Verfahrens zur Wassergewinnung aus Umgebungsluft (Masterarbeit)

Raffaella Helf: Vergleich von kommerziellen und open-source Gebäude und Anlagensimulationsprogrammen für urbane Gebiete (Masterarbeit)

Isabell Hirscher: Aufbau und Validierung eines Simulationsmodells für den optimierten Betrieb eines Labordemonstrators zur sorptiven Wassergewinnung aus der Luft (Masterarbeit)

Sebastian Hochradner: Numerische Untersuchung der thermischen Leistungsfähigkeit eines luftdurchströmten Feststoffspeichers für solare Heizungssysteme (Forschungsarbeit)

Tristan Holly: Leistungsberechnung eines neuentwickelten PVT-Vakuum-Röhrenkollektors auf der Basis von Raytracing-Simulationen (Masterarbeit)

Peer Huber: Entwicklung eines dynamischen Simulationsmodells für innovative kalte Nahwärmesysteme mit Wasser als Wärmeträgermedium sowie energetischer und ökologischer Vergleich mit konventionellen kalten Nahwärmesystemen (Masterarbeit)

Danial Khaleghi: Ökologischer und ökonomischer Vergleich von thermischen und photovoltaischen Kühltssystemen für den Einsatz im Iran (Studienarbeit)

Jonathan Koch: Wirtschaftliche Optimierung von Lüftungsmaßnahmen in Bürogebäuden im Hinblick auf Infektionsschutz und Energieaufwand (Masterarbeit)

Jannik Lenz: Integration eines thermischen Kollektor-Emulators in eine Anlage zur solar sorptiven Wassergewinnung aus Umgebungsluft (Forschungsarbeit)

Florian Meyer: Optimierung und Demonstration einer Absorptionswärmepumpe für die hydraulische Kopplung mit flexiblem Wärmeerzeuger (Masterarbeit)

Nils Oppenländer: Aufbau und Inbetriebnahme eines Ammoniak/Wasser-Absorptionswärmetransformators (Masterarbeit)

Till Pritzke: Numerische Untersuchung des Wärmetransports in einer direkt durchströmten PVT-Vakuumröhre (Bachelorarbeit)

Benedikt Reinert: Entwicklung und Charakterisierung einer Wasserstoffkonditioniereinheit für PEMFC-Stackmodule hoher Leistungsklassen (Masterarbeit)

Mario Sauter: Erarbeitung von Lösungsstrategien zur Dekarbonisierung der Wohnungswirtschaft anhand der Umweltkriterien der EU-Taxonomie (Masterarbeit)

Monika Schankweiler: Aufbau eines Simulationsmodells zur Potentialabschätzung eines Wärmepumpensystems mit Adsorptions-Vereisungsschutz (Forschungsarbeit)

Patrick Scherer: Untersuchung des Einflusses der Wärmerückgewinnung von Wohnungslüftungsgeräten auf die Nutzenübergabe und Regelgüte des Heizsystems (Masterarbeit)

Marlene Schmalzried: Optimierung der optischen Vereisungsmessung am Verdampfer einer Luftwärmepumpe zur Bestimmung der Eismenge mittels einer Skalierungsgröße (Masterarbeit)

Oliver Schützdeller: Vergleichende Lebenszyklusanalyse verschiedener Varianten zur Stromversorgung von funk- und kabelbasierten Gebäudeautomationskomponenten (Bachelorarbeit)

Julian Strobel: Betrachtung und Vergleich verschiedener Konstruktionsprinzipien der Gebäudehülle hinsichtlich Ökobilanz und Lebenszykluskosten bei Neubauten (Masterarbeit)

Yuting Sun: Model-Based Off-line control for cooling Tower Systems (Studienarbeit)

Louis Tafelmaier: Optimierung und Analyse einer Diffusions-Absorptionskältemaschine (Forschungsarbeit)

Nour Tamim: Untersuchung verschiedener Detaillierungsstufen des regelbaren Wärmedurchgangs schaltbarer Membrankissenkonstruktionen (Masterarbeit)

Chia-Hsuan Tsai: Conceptual Design of a CO₂ Refrigerant Circuit Distributer for Automotive Air Conditioning Systems (Masterarbeit)

Adrian Vollmer: Inbetriebnahme und Schwachstellenanalyse eines Ammoniak-/Wasser-Absorptionswärmetransformators (Masterarbeit)

Simon Woog: Emulation von einem Vereisungsmodell an einer Luft/Wasser-Kompressionswärmepumpe (Masterarbeit)

Wanqing Xu: Analyse des Nutzungsverhaltens von Klimageräten in Wohngebäuden in heißen und feuchten Klimazonen (Masterarbeit)

Katharina Zimmer: Erarbeitung treibhausgasneutraler Wärmeversorgungskonzepte für ein Fernwärmeverbundnetz (Forschungsarbeit)

Heinz-Bach-Preis 2023

Am 11. November 2024 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 2023 ihre Studien- 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 Matthias Ender wurde mit dem 1. Preis für seine Studienarbeit zum Thema „Optimierung einer Austreibereinheit für Diffusions-Absorptionskältemaschinen im Hinblick auf Wärmeübertragung und Förderfähigkeit“ ausgezeichnet.

Der 2. Preis ging an Herrn René Schaaf für seine Masterarbeit zu „Experimentelle Untersuchung der Verlustkennwerte und druckseitigen Schallabstrahlung von Einbauventilatoren in unterschiedlichen Einbaubedingungen in Klimazentralgeräten“.

Der 3. Preis wurde in diesem Jahr an zwei Studierende verliehen: Frau Joeline Büttner erhielt die Auszeichnung für ihre Bachelorarbeit „Weiterentwicklung eines Simulationsmodells zur Wassergewinnung aus feuchter Luft über heterogene Kondensation an Aerosolpartikeln“ und Herr Marc Mühlen für seine Masterarbeit über die „Entwicklung einer modellprädiktiven Regelung für die energieoptimierte Beheizung eines bestehenden Nichtwohngebäudes“.



Von links nach rechts: Bernd Baasner (stellvertretender Vorsitzender VdF HLK), Dr.-Ing. Tobias Henzler (Geschäftsführer VdF HLK), René Schaaf, Joeline Büttner, Marc Mühlen, Matthias Ender, Prof. Dr.-Ing. Konstantinos Stergiaropoulos (Institutsleiter IGTE), Steffen Hild (Vorsitzender VdF HLK und stellvertretender Vorstandsvorsitzender ITGA BW), Prof. Dr.-Ing. Michael Bauer (Schatzmeister VdF HLK)

1. Preis: Herr Matthias Ender

Optimierung einer Austreibereinheit für Diffusions-Absorptionskältemaschinen im Hinblick auf Wärmeübertragung und Förderfähigkeit

Diese Arbeit ist Teil eines Projektes, das das Ziel verfolgt, eine Diffusions-Absorptionskältemaschine für die Gebäudeklimatisierung nutzbar zu machen. Dafür muss der Kälteprozess hin zu größeren Leistungen skaliert werden, weshalb ein neuartiges Austreiberkonzept bestehend aus einem Plattenwärmeübertrager und angeschlossenem Förderrohr erprobt wird. An einem eigens entworfenen Austreiberprüfstand werden verschiedene Parameter experimentell untersucht, um Möglichkeiten zur Leistungssteigerung und deren Auswirkungen auf das Förderverhalten und die Wärmeübertragung zu analysieren. Ferner werden Experimente zur Beurteilung der Betriebsstabilität bei Regelstörungen durchgeführt. Der Prüfstand wird mit dem Zweistoffgemisch Ammoniak/Wasser betrieben und arbeitet nach dem zweiphasigen Thermosiphonprinzip. Die Ergebnisse zeigen, dass sich ein kleinerer Förderrohrdurchmesser, ein hoher Reservoirfüllstand und ein geringerer Systemdruck positiv auf das Förderverhalten auswirken. Insbesondere kann mit einem 10 mm-Förderrohr der Minstdampfmassenstrom gegenüber einem mit 12 mm Durchmesser gesenkt werden, wodurch eine stabile Förderung schon bei geringeren Temperaturen möglich ist. Die Qualität der Wärmeübertragung im Plattenwärmeübertrager weist eine hohe Korrelation mit dem Förderverhalten hinsichtlich der Wärmeübertragungsfähigkeit und Entropieproduktion auf. Regelstörungen, die die Wärmeabgabe des Prozesses beeinträchtigen, führen zum Einbrechen der Förderung.

2. Preis: Herr René Schaaf

Experimentelle Untersuchung der Verlustkennwerte und druckseitigen Schallabstrahlung von Einbauventilatoren in unterschiedlichen Einbaubedingungen in Klimazentralgeräten

Die gegenwärtige Entwicklung des globalen Klimas und unbeständige Energiepreise verdeutlichen die Relevanz eines verantwortungsbewussten Ressourcenmanagements. Um dem gerecht zu werden, sind im Bereich der Gebäudetechnik zunehmend energieeffiziente Raumluftechnische (RLT-) Anlagen erforderlich. RLT-Anlagen bestehen aus vielen verschiedenen Komponenten zur Förderung, Reinigung und Konditionierung der Luft. Um ein möglichst effizientes Gesamtsystem zu erhalten ist es notwendig, die Einzelkomponenten in Bezug auf das vorhandene Gesamtsystem zu optimieren und auszulegen. In Klimazentralgeräten nimmt das Ventilatorsystem diesbezüglich eine Schlüsselstellung ein. Die Einbausituation von Ventilatoren weicht hier in der Regel deutlich von den Normbedingungen ab, unter denen die technischen Kenndaten der Ventilatoren ermittelt wurden. Um die gesamtheitlichen Einflussfaktoren bereits bei der Auslegung von Ventilatoren möglichst genau zu berücksichtigen, sind Kenntnisse über die Beeinträchtigung des Ventilators durch solche Faktoren erforderlich. Dabei hat der druckseitige Bauraum des Ventilators einen entscheidenden Einfluss auf die dort auftretenden sogenannten druckseitigen Einbauverluste. Zur Quantifizierung der aerodynamischen Verluste aufgrund der druckseitigen Einbaubedingungen, wurden in der Masterarbeit sowohl Messungen mit einem Ventilator, als auch mit zwei Ventilatoren in verschiedenen Einbaubedingungen durchgeführt. Dadurch können bestehende Berechnungsverfahren validiert und bei Bedarf ergänzt und verfeinert werden. Zudem wurden die Schallemission der Ventilatoren bei verschiedenen Einbausituationen gemessen und ausgewertet.

3. Preis: Frau Joeline Büttner

Weiterentwicklung eines Simulationsmodells zur Wassergewinnung aus feuchter Luft über heterogene Kondensation an Aerosolpartikeln

In einer Zeit, in der weltweit Schwere und Häufigkeit von Dürreperioden zunehmen, bietet die Wassergewinnung aus der Umgebungsluft einen vielversprechenden Ansatz. Die gängigen Methoden erfordern jedoch einen hohen Energieaufwand. Diese Arbeit untersucht die Möglichkeit der Wassergewinnung durch heterogene Kondensation an Aerosolpartikeln. Dieser Ansatz bietet den Vorteil, dass die Kondensation volumendeckend stattfindet, weil durch die eingebrachten Aerosolpartikel Kondensationskeime im gesamten Strom feuchter Luft vorhanden sind. Die feuchte Luft wird durch adiabate Expansion in einer Turbine übersättigt.

Für theoretische Untersuchungen des Wärme- und Stofftransports sowie der Kondensationsprozesse ist am IGTE ein Simulationmodell entwickelt worden. In der vorliegenden Arbeit erfolgt die entscheidende Integration von Modellen der Strömungsmaschinen. Die Entwicklung eines eigenen Algorithmus ermöglicht die Identifikation des optimalen Betriebspunktes, bei dem der Gesamtwirkungsgrad von Turbine und Verdichter am höchsten ist.

Dieser Ansatz erweist sich im Referenzfall als erfolgreich und ist universell an verschiedene Kennfelder und Umgebungsbedingungen anpassbar. Der Energiebedarf pro Liter flüssigem Wasser ist mit dem der Kältekondensation an der Oberfläche eines Kühlturms vergleichbar. Für eine präzise Aussage sind jedoch die Kennfelder speziell auf diesen Prozess ausgelegter Strömungsmaschinen erforderlich, die zum Zeitpunkt der Arbeit noch nicht verfügbar sind.

3. Preis: Herr Marc Mühlen

Entwicklung einer modellprädiktiven Regelung für die energieoptimierte Beheizung eines bestehenden Nichtwohngebäudes

Vor dem Hintergrund des energieoptimierten Betriebs gebäudetechnischer Anlagen besteht das zentrale Ziel der vorliegenden Arbeit in der Entwicklung einer modularen Applikation in Python, die als Grundlage für modellprädiktive Betriebsoptimierungen dient. Die Optimierung basiert dabei auf einer Prädiktion des Gebäudeverhaltens, in welche prognostizierbare Störgrößen (Wetter und Belegung) eingebunden werden.

Die Entwicklung wird mithilfe der Toolbox do-mpc vorgenommen und erfolgt in Bezug auf einen Besprechungsraum eines bestehenden Nichtwohngebäudes. Zur Abbildung des dynamischen Systemverhaltens wird ein R-C-Netzwerk mit fünf Widerständen (R) und vier Kapazitäten (C) verwendet, das mithilfe der vorliegenden Bauteilinformationen und Gebäudepläne parametrisiert wird.

Im Zuge der Arbeit wird die modellprädiktive Regelung (MPR) von Heizkörperthermostatventilen zur optimierten Einzelraumbeheizung unter idealisierten Bedingungen simulativ untersucht. Durch die Gegenüberstellung mit einem vereinfachten Abbild eines Thermostatventils (Proportionalregler) mit einer konstanten Sollwertverschiebung von 1,5 K lassen sich Einsparungen des Heizwärmebedarfs in Höhe von 17 kWh/m²a nachweisen, was einer Reduktion von 7,8 % entspricht. Gleichzeitig wird eine Steigerung des Nutzerkomforts erreicht.

Es wird ein Konzept zur MPR realer elektronischer Thermostatventile aufgezeigt und in diesem Zusammenhang ein Zustandsschätzer nach dem Prinzip der Schätzung auf bewegtem Horizont (en: Moving Horizon Estimation) entwickelt. Aufgrund der messtechnischen Einschränkungen im Realfall stellt dieser eine wesentliche Komponente für die praktische Umsetzung der MPR dar.

Einfluss der Konstruktion von Temperatur-Messköpfen auf die Messunsicherheit sowie den Strömungswiderstand

Jörg Schmid, Bing Gu

Einleitung

Temperaturmessköpfe spielen eine zentrale Rolle bei der Prüfung von Komponenten in der Heizungs- und Raumlufttechnik. Diese spezifischen Bauteile dienen dazu, mehrere Temperatursensoren – typischerweise drei – so anzuordnen, dass eine präzise und reproduzierbare Bestimmung der Temperatur des Heiz- oder Kühlmittels (meist Wasser) gewährleistet ist.

Dabei ist es von entscheidender Bedeutung, dass die Konstruktion des Messkopfes mögliche Einflüsse, wie etwa Temperaturunterschiede im Medium oder Wärmeverluste, minimiert, um eine Verfälschung der Messergebnisse zu vermeiden. Für die genaue Leistungsbewertung der zu prüfenden Komponenten ist die exakte Ermittlung der kalorischen Mitteltemperatur unabdingbar.

In der Laborpraxis kommen derzeit verschiedene Bauformen von Messköpfen zum Einsatz. Diese Vielfalt ergibt sich aus unterschiedlichen Anforderungen, insbesondere in Bezug auf den Strömungswiderstand. Es hat sich gezeigt, dass der ursprüngliche Typ, der auf einer Konstruktion gemäß DIN EN 442 [1] (Prüfnorm für Heizkörper) basiert, bei größeren Massenströmen ($> 300 \text{ kg/h}$), wie sie insbesondere in der Klimatechnik auftreten, erhebliche Nachteile aufweist. Diese Bauart zeichnet sich durch einen vergleichsweise hohen Strömungswi-

derstand ($> 5 \text{ kPa}$) aus und neigt zudem zur Verschmutzung, wodurch der Strömungswiderstand weiter ansteigt.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, wurde ein alternativer Messkopf entwickelt, der speziell auf größere Massenströme ausgelegt ist und seit einigen Jahren erfolgreich eingesetzt wird. Zusätzlich wurden am ursprünglichen Messkopf kleinere Modifikationen vorgenommen – etwa aufgrund nicht mehr verfügbarer Bauteile. Diese Änderungen wurden jedoch nur teilweise dokumentiert, was die Nachverfolgbarkeit erschwert.

Ziele

Das Ziel dieses Projekts besteht darin, die bestehenden Messkopfsysteme systematisch zu analysieren und zu optimieren. Dabei sollen insbesondere die Konstruktion, die Messgenauigkeit, die Wiederholpräzision, die Einsatzgrenzen (z. B. bezüglich Massenstrom) und der Strömungswiderstand detailliert untersucht werden.

Ein weiteres Kernziel ist die Entwicklung eines neuen Messkopftyps, der eine optimale Balance zwischen den verschiedenen Einflussfaktoren bietet. Die Konstruktion dieses Messkopfes soll gewährleisten, dass die Strömung im Inneren ausreichend verwirbelt wird, um Strähnenbildung zu vermeiden, während gleichzeitig die Anfälligkeit für Verschmutzungen reduziert und der Strömungswiderstand so gering wie möglich

gehalten wird.

Geplant ist, die bestehenden und neuen Messkopftypen experimentell in einem oder mehreren Laboren zu untersuchen, um insbesondere die Wiederholpräzision und Messgenauigkeit zu überprüfen. Zusätzlich sollen die Strömungsverhältnisse in den Messköpfen mittels numerischer Simulationen modelliert werden. Wenn eine gute Übereinstimmung zwischen den experimentellen Daten und den Simulationsergebnissen erreicht wird, könnten zukünftige Anpassungen effizienter und ohne aufwändige Prototypenfertigung durchgeführt werden.

Die Hauptziele des Vorhabens lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Detaillierte Analyse bestehender Messköpfe: Untersuchung der aktuell genutzten Bauarten hinsichtlich Konstruktion, Einsatzgrenzen und Strömungsverhalten.
2. Experimentelle Validierung: Analyse der Messgenauigkeit, Wiederholbarkeit sowie der Grenzen hinsichtlich Strömungswiderstand und Massenstrom.
3. Numerische Strömungsmodellierung: Simulation der Strömungsverhältnisse in den aktuellen Messkopftypen.
4. Entwicklung eines neuen Messkopfes: Konzeption und Optimierung.
5. Simulation und Validierung des neuen Designs: Bewertung der Leistungsfähigkeit des neuen Messkopfes.

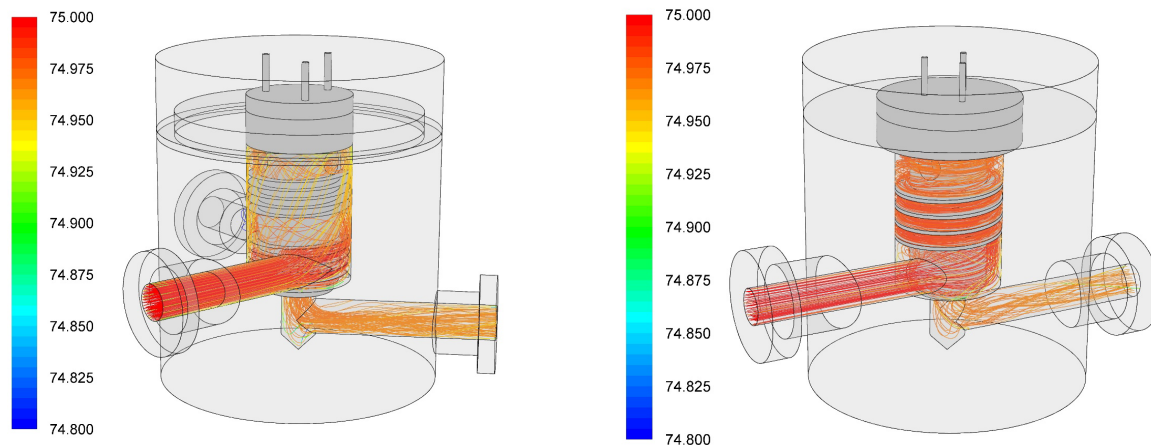


Bild 1: Vergleich der Durchströmung alt (links) vs. neu (rechts)

Ergebnisse

In ihrer bisherigen Ausführung hatten die Messköpfe drei Anschlussmöglichkeiten ($3 \times 120^\circ$), um auch unter schwierigen räumlichen Verhältnissen die Köpfe am Vor- und Rücklauf anschließen zu können. Ein Anschluss führte radial zur Mittelachse des Kopfes, während die beiden anderen Anschlüsse tangential dorthin führten, und zwar leicht versetzt zur Mittelachse. Einer der beiden tangentialen Anschlüsse führt das Heizmittel passend zur Steigung über die Kupferwendel; beim anderen ist genau dies nicht der Fall, weshalb dieser Anschluss in der Praxis gar nicht mehr verwendet wurde. Insofern war es nur konsequent, diesen zweiten tangentialen Anschluss bei der Überarbeitung des Messkopfes entfallen zu lassen und die beiden Anschlüsse nunmehr um 180° zueinander zu versetzen. Für das Handling bei schwierigen Anschlusssituationen werden nun kompakte gehaltene selbst hergestellte 45° -Winkelstücke eingesetzt.

Im Betrieb hatte sich die Steigung der Wendel als zu gering erwiesen, weil sie einen unerwünscht hohen Druckabfall verursacht hat. Um dem entgegenzuwirken, hatte man bei späteren Ausführungen einen kleinen Ringspalt zwischen der Wendel und der Gehäusebohrung zugelassen. Dies hat zwar den Druckabfall reduziert, aber die Umströmung des Kupferkerns war dann nicht mehr so definiert wie zuvor. Aus diesen Gründen hat man die Steigung der Wendel nunmehr verdoppelt, deren Positionierung verändert und den oben genannten Ringspalt minimiert. Bild 1 zeigt, dass sich damit wieder eine geordnete Umströmung des Kupferkerns ergibt. Der neue Messkopf hat nach ersten Erfahrungen mit Prototypen auch keine unerwünschte Schmutzfängereigenschaft mehr, sodass die Wartungsintervalle verlängert werden können.

Da Messing im Hinblick auf den Metallkern des Temperaturmesskopfes und die Wendel für dessen Umströmung günstiger und

besser zu verarbeiten ist, hat man auch die Auswirkungen dieses Materialwechsels untersucht. Es zeigt sich, dass der deutlich kleinere Wärmeleitkoeffizient von Messing gegenüber Kupfer keine nachteiligen Auswirkungen auf den Temperaturabstand zwischen den Sensoren und den maßgeblichen Ein- bzw. Austrittstemperaturen hat.

Danksagung

Die Studie wurde 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.

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

Lukas Siebler, Jonathan Koch und Armin Ruppert

Einleitung

Der Klimawandel stellt eine der größten Herausforderungen unserer Zeit dar, weshalb Deutschland das Ziel verfolgt, bis 2045 einen klimaneutralen Gebäudebestand zu erreichen [1]. Parallel dazu hat die COVID-19-Pandemie gezeigt, wie essenziell hohe Außenluftwechsel in Gebäuden sind, um die Ausbreitung luftgetragener Infektionskrankheiten zu verhindern [2–5]. Allerdings stehen die zur Gewährleistung der Gesundheit erforderlichen hohen Luftvolumenströme im Widerspruch zu den Zielen der Energieeffizienz, da sie zu erhöhtem Energieverbrauch und steigenden CO₂-Emissionen führen – nicht nur durch den Betrieb der Lüftungsanlagen selbst, sondern auch durch die damit verbundenen thermischen Verluste. Dieser Konflikt zwischen Gesundheitsanforderungen und Energieeffizienz im Gebäudebetrieb macht deutlich, dass innovative Lüftungsstrategien erforderlich sind, die beide Aspekte in Einklang bringen.

Diese vom Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. geförderte Vorstudie hat sich anhand thermisch-energetischer sowie stofflicher Simulationen von Alltagsszenarien in Nichtwohngebäuden (NWG) mit der Lösung dieses Konfliktes durch eine Optimierungsaufgabe be-

fasst. Hierbei werden unterschiedliche Szenarien wie bspw. ein Alltag in einer Schule oder in einem Bürogebäude betrachtet und unterschiedliche Lüftungsstrategien gegenübergestellt. Für eine Vergleichbarkeit von Energieaufwand und Gesundheit wird eine rein monetäre Betrachtung gewählt. [6]

Methodik

Im Rahmen dieser Studie wird das wirtschaftliche Optimum verschiedener Lüftungsstrategien in unterschiedlichen Szenarien ermittelt. Exemplarisch soll hier auf die Untersuchungen in einem Stockwerk eines typischen Bürogebäudes eingegangen werden. Hierbei werden sowohl die Kosten durch Arbeitsunfähigkeiten infolge von Infektionen im Büro als auch die

Energiekosten für Lüftung, Heizung, Kühlung und Befeuchtung berücksichtigt. Die Simulation bezieht sich auf das Jahr 2022 und auf eine Belegschaft von 41 Personen. Zur Abbildung realistischer Infektionsszenarien werden Inzidenzdaten des Robert Koch-Instituts (RKI) herangezogen und anhand instationärer Simulationen der Luftinhaltsstoffe und der Personenaufenthalte Infektionsketten modelliert. Als Virusvariante wird SARS-CoV-2 in der Omikron-Variante betrachtet. Anhand der Variation des Lüftungsbetriebs (bspw. Sollwerte für CO₂-Raumluftkonzentration) sollen ideale Maßnahmen in beispielhaften Szenarien abgeleitet werden.

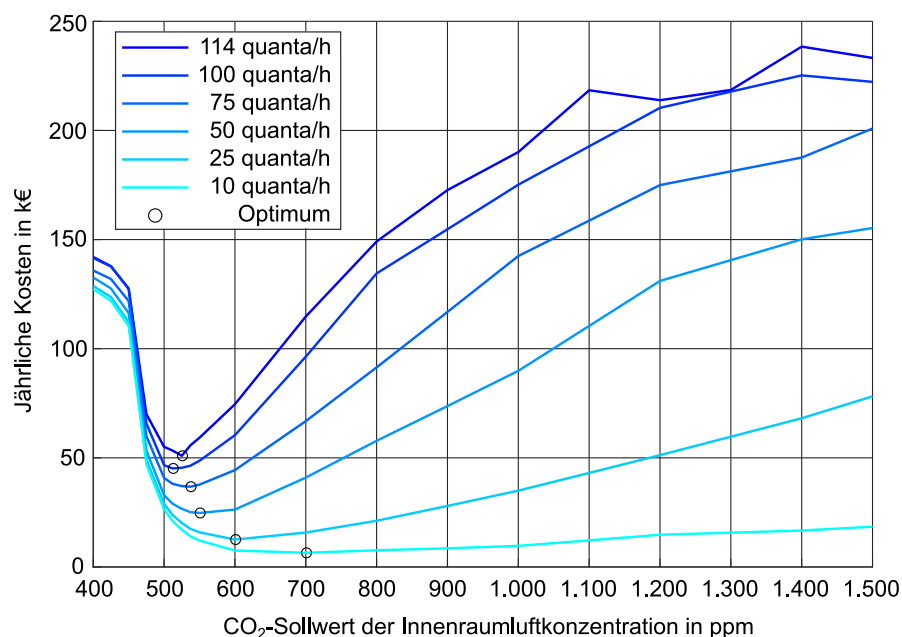


Bild 1: Optimierung des Sollwertes der CO₂-Raumluftkonzentration in Bezug auf jährliche Kosten für Arbeitsausfälle und den Betrieb der Anlagentechnik

Ergebnisse

Die jährlichen Gesamtkosten setzen sich aus den Kosten für den energetischen Lüftungsaufwand sowie den Arbeitsausfallkosten des Personals zusammen. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Variation der CO₂-Sollwerte in den Lüftungsstrategien zu erheblichen Schwankungen dieser Gesamtkosten führt (siehe Bild 1). Anhand variierender Quanta-Emissionsraten, die unterschiedliche Infektiositäten repräsentieren, werden die Ergebnisse als Kurvenschar dargestellt: Eine Emissionsrate von 114 Quanta/h entspricht der Omikron-Variante von SARS-CoV-2 im Jahr 2022, während Emissionsraten unter 10 Quanta/h typischen jährlichen Grippewellen nahekommen.

Für jede betrachtete Infektiosität lässt sich ein wirtschaftliches Minimum identifizieren (in den Diagrammen durch schwarze Kreise markiert). Auffällig ist, dass diese Minima bei CO₂-Sollwerten deutlich unterhalb der Pettenkofer-Zahl von 1.000 ppm und den in DIN EN 16798-1 [7] empfohlenen Auslegungswerten liegen. Bei einem CO₂-Sollwert von 1.000 ppm können vereinzelt erhebliche Mehrkosten auftreten.

Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass Lüftungsstrategien sowohl die Infektionsrisiken als auch die Energieaufwände berücksichtigen sollten. Eine geeignete Abwägung kann dazu beitragen, Gesundheitsrisiken zu minimieren und gleichzeitig die wirtschaftlichen Kosten durch Energieaufwände und Arbeitsausfälle zu reduzieren.

Ausblick

Für ein vollumfängliches Verständnis, welche Gebäudebetriebsmaßnahmen für Optimierungen sowohl der Gesundheit als auch des Energieaufwands geeignet sind, sollen weitere gesellschaftliche Szenarien in üblichen Gebäuden simuliert werden. Ein langfristiges Ziel wäre zudem, auch die Interaktion der Nutzer über die Gebäudegrenzen hinaus abzubilden, damit im gesellschaftlichen Alltag geeignete Maßnahmen zur Infektionsprävention getroffen werden können.

Danksagung

Diese Vorstudie wurde vom Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. unter dem Kennzeichen VdF-2023-02 gefördert [6]. Die Forschungsgesellschaft Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart mbH und das Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung der Universität Stuttgart 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: 28. Oktober 2024).
- [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] 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.

[4] 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.

[5] 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: 28. Oktober 2024).

[6] Koch et al. (2024): Vorstudie zur Optimierung von Lüftungsstrategien für Nichtwohngebäude im Hinblick auf Gesundheit und Energieaufwand. Hg. v. Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung Lüftung Klimatechnik Stuttgart e.V.. Online verfügbar unter <https://vdf.hlk-stuttgart.de/forschung/default-00af86c7c9>, zuletzt geprüft am 13.11.2024.

[7] Deutsches Institut für Normung. DIN EN 16798-1, Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik. Berlin: Beuth.

Machbarkeitsuntersuchung zur Erweiterung des Schichtlüftungskonzepts um eine vertikale Komponente

Matthias Hartnagel

Einleitung

In Produktionsbetrieben werden durch die jeweiligen verfahrenstechnischen Prozesse Schadstoffe innerhalb von Industriehallen freigesetzt. Um die maximal zulässigen Schadstoffkonzentrationen einzuhalten, ist es erforderlich, die Schadstoffe direkt am Entstehungsort zu erfassen und abzuführen sowie einen entsprechenden Außenluftstrom bereitzustellen. Dies erfordert meist maschinelle Zu- und/oder Abluftsysteme, die somit in Industriehallen wesentliche Energieverbraucher darstellen. Neben dem elektrischen Aufwand für den Lufttransport (Ventilatoren) kann auch ein thermischer Aufwand für die Luftkonditionierung (Heizen, Kühlen) notwendig werden. Aufgrund von Unsicherheiten hinsichtlich der Hallennutzung werden raumluftechnische Anlagen derzeit häufig überdimensioniert und mit konstanten Luftströmen betrieben, was zusätzlichen Energieaufwand verursacht. Lokale Unterschiede in der Luftqualität, die aus einer inhomogenen Schadstoffverteilung im Raum resultieren, bleiben oft unberücksichtigt. Da Schadstoffe bei einer Vielzahl an Produktionsprozessen freigesetzt werden, liegt in der Verbesserung der Energieeffizienz bei der Industrielüftung ein großes Potential zur Energieeinsparung sowie zur Verringerung der Emissionsbelastung im Arbeitsbereich.

Motivation

Nach dem Stand der Technik werden in Industriehallen Mischlüftungs- oder Schichtlüftungskonzepte eingesetzt, um in Aufenthaltsbereichen die zulässigen Schadstoffgrenzwerte einzuhalten. Dies erfordert jedoch häufig auch die Belüftung von Bereichen ohne regelmäßigen Personenaufenthalt (z. B. hinter Maschinen oder Lagerflächen). Eine lokale Einhaltung der lufthygienischen und thermischen Anforderungen nur in den Anforderungszonen könnte den benötigten Außenluftstrom erheblich reduzieren. Hierfür muss ein geeignetes Luftführungskonzept entwickelt und das Luftvolumen gezielt in Anforderungs- und Restzonen unterteilt werden (z. B. durch raumtrennende Abhängungen), um eine Schichtlüftung auch in kleineren Teilbereichen der Halle zu erreichen. Infolgedessen könnten Bereiche ohne regulären Personenaufenthalt mit einem verringerten Mindestaußenluftwechsel betrieben werden.

Ziele

Im Rahmen Forschungsvorhaben VertKom soll eine Machbarkeitsstudie zur Erweiterung der horizontalen Schichtlüftung um eine vertikale Komponente anhand von Strömungssimulationen durchgeführt werden. Untersucht wird, ob eine zusätzliche vertikale Zonierung und damit eine Unterteilung der Anforderungszone innerhalb einer horizontalen Schichtlüftung

umsetzbar ist. Ziel ist es, das bisherige Konzept der Schichtlüftung um eine vertikale Abgrenzung einzelner Anforderungsvolumina (Aufenthaltsbereiche) in einem Nichtwohngebäude, wie etwa einer Industriehalle, zu erweitern. Zudem wird die Möglichkeit einer Kombination der maschinellen Luftführung mit freier Lüftung für die Restzonen geprüft, um den Energieaufwand weiter zu reduzieren.

Vorgehen

Es soll ein allgemeines, skalierbares Simulationsmodell für ein Nichtwohngebäude entwickelt werden, das die Untersuchung des Lüftungskonzepts in unterschiedlichen Industriehallen sowie mit variierender Anzahl an Schadstoffquellen ermöglicht. Die Hauptziele dieses Projekts umfassen:

- Entwicklung eines Lüftungskonzeptes zur Erweiterung der horizontalen Schichtlüftung um eine vertikale Komponente
- Entwicklung eines verallgemeinerten, skalierbaren Simulationsmodells zur Untersuchung des zu entwickelnden Lüftungskonzeptes für Nichtwohngebäude
- Bewertung der Raumluftzustände im Aufenthaltsbereich sowie der Lüftungseffektivität und des Schadstoffbelastungsgrades mittels Strömungssimulation
- Bilanzierung der potenziellen Energieeinsparung

Bild 1 zeigt das grundlegende Konzept der Schichtlüftung. Hierbei wird die Zuluft impulsarm, mit Untertemperatur und bodennah in die Anforderungszone (Aufenthaltsbereich) eingebracht. Die Luft erwärmt sich in der Aufenthaltszone lokal durch innere Lasten wie Personen, Beleuchtung oder Maschinenabwärme und steigt in die Restzone auf, wobei sie Schadstoffe (z. B. Partikel oder CO_2) aus dem Aufenthaltsbereich mitführt. Die belastete Raumluft wird im Deckenbereich abgesaugt und als Fortluft abgeführt.

Dieses Luftführungskonzept soll um vertikale Komponenten erweitert werden, um die Anforderungszonen (Aufenthaltsbereiche) weiter zu unterteilen und das zu konditionierende Gesamtvolumen zu reduzieren. Bild 2 zeigt den Ansatz des zu entwickelnden Lüftungskonzepts.

Durch die Unterteilung des Aufenthaltsbereichs in mehrere voneinander unabhängige Anforderungszonen, die mit konditionierter Außenluft versorgt werden, wird das restliche Raumvolumen als Restzone definiert, in der keine spezifischen Anforderungen an die Raumluft bestehen. Die notwendige Außenluftzufuhr in der Restzone kann hier maschinell oder durch freie Lüftung mit unkonditionierter Außenluft erfolgen. Diese Aufteilung reduziert das konditionierte Raumvolumen und senkt so den Energieaufwand für die Luftkonditionierung und den Außenlufttransport. Denkbare Lösungsansätze für die vertikalen Komponenten sind separate Luftschleier, Abhängungen oder gezielt ausgerichtete Luftdurchlässe.

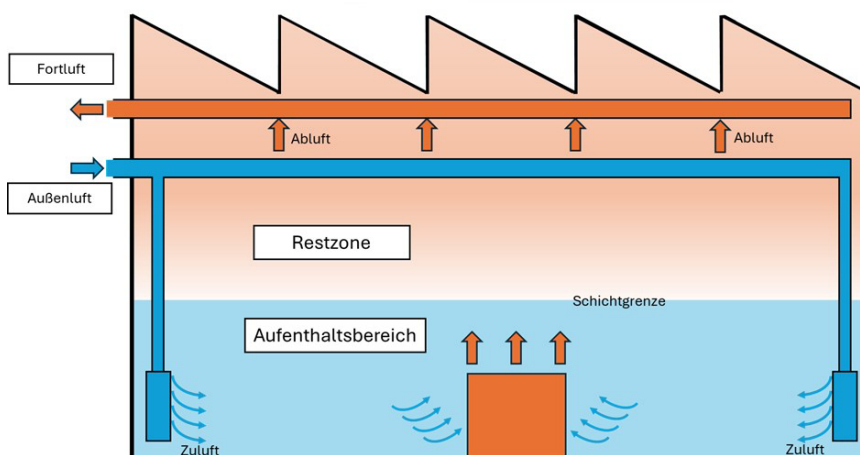


Bild 1: Konzept der Schichtlüftung

Weiteres Vorgehen und Ausblick

Im Anschluss an die Erarbeitung des Lüftungskonzeptes sowie der Überprüfung anhand numerischer Strömungssimulationen erfolgt eine Untersuchung des Energieaufwands und der CO_2 -Emissionen mittels thermisch-energetischer Simulationen. Zudem wird ein Vergleich mit bestehenden Lüftungskonzepten durchgeführt, um potenzielle Energie- und CO_2 -Emissionseinsparungen aufzuzeigen. In der Folge ist die Erstellung eines Konzepts zur labortechnischen sowie in-situ-Untersuchung

des Lüftungskonzepts vorgesehen, welches der Validierung der Simulationsergebnisse dient.

Danksagung

Diese Vorstudie wird vom Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. gefördert (FKZ: VdF-2024-1). Die Forschungsgesellschaft Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart mbH und das Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung der Universität Stuttgart danken herzlich für die Unterstützung.

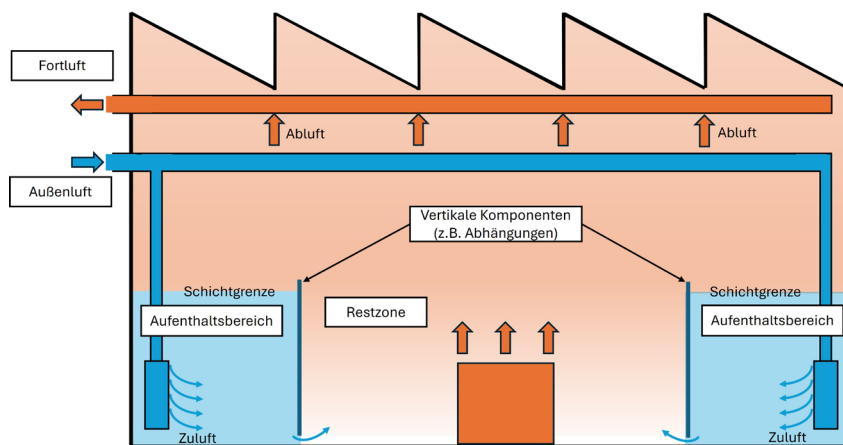


Bild 2: Konzept der Schichtlüftung erweitert um vertikale Komponenten

zwischen niedrigster und höchster einstellbarer Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht) und andere Rahmenbedingungen wie die Regelung der Dämmelemente untersucht werden.

Thermisch-energetische Simulationsprogramme nach dem Stand der Technik, die die Anforderungen an Algorithmen und Randbedingungen von Berechnungsverfahren für die instationäre thermisch-energetische Jahressimulation nach VDI 6020 [3] berücksichtigen, definieren den Wandaufbau bzw. die thermischen Kennwerte der Wände explizit als zeitunabhängige Größen. Das hat zur Folge, dass diese während eines Simulationsdurchlaufs nicht verändert werden können.

Daher wird ein 2-Kapazitäten-Modell nach VDI 6007 in Matlab aufgebaut, in dem die Veränderung der Materialkonstanten (speziell die Wärmeleitfähigkeit der Wand) integriert wird.

Abgebildeter Beispielraum

Für die Simulation wird ein nach Süden ausgerichtetes 1-Personen-Büro in Stuttgart modelliert (siehe auch Bild 1). Gemäß des Testraums nach VDI 6020 [3] bzw. VDI 6007 [2] werden für den Beispielraum die Abmessungen $3,5 \times 5 \times 3$ m (BxLxH) (Grundfläche $17,5 \text{ m}^2$) verwendet. Der Fensterflächenanteil der nach Süden ausgerichteten Fassadenseite, an der die regelbaren Dämmelemente angebracht sind, wird in Simulationsvarianten zwischen 0 und 80 % angepasst.

Gemäß GEG wird der minimale U-Wert der Außenwand mit $0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ festgelegt. Dies entspricht beim gewählten Wandaufbau einer minimalen Wärmeleit-

fähigkeit der Dämmschicht von $0,032 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Bei einer festgelegten minimalen Wärmeleitfähigkeit bestimmt die Wahl des Schaltfaktors gleichzeitig auch die in der Simulation angesetzte maximale Wärmeleitfähigkeit der Dämmelemente.

In der Simulation werden für die interne Wärmeabgabe eine Person, elektrische Geräte und Beleuchtung berücksichtigt, wobei ein für Büroräume typisches Belegungsprofil hinterlegt wird. Es wird mit einem außenliegenden, geschlossenen Sonnenschutz der Südseite ab einer Einstrahlung von größer $200 \text{ W}/\text{m}^2$ gerechnet und der Außenluftwechsel wird mit 1 h^{-1} angenommen. Die Solltemperatur für Heizen liegt bei 20°C , für Kühlen bei 26°C .

Ergebnisse der Simulationsstudie

Bild 2 zeigt den über die Jahressimulation berechneten flächenbezogenen Kühlenergiebedarf aufgetragen über dem Schaltfaktor und unter Berücksichtigung verschiedener Fensterflächenanteile. Jeder der im Diagramm dargestellten Punkte stellt das Resultat aus einer Jahressimulation mit dazugehörigem Schaltfaktor und Fensterflächenanteil dar. Geringfügige Abweichungen von einem theoretisch bzw. idealisiert zu erwartenden Verlauf lassen sich mit Grenzfällen im simulierten Regelverhalten über den Jahresverlauf erläutern. Die Ergebnisse zeigen, dass durch den Einsatz von regelbaren Dämmelementen eine deutliche Reduzierung des Kühlenergiebedarfs erreicht werden kann. Dies ist in Bild 3 quantifiziert, indem die berechneten Kühlenergiebedarfe auf eine Fassade mit

Schaltfaktor 1 (entspricht einer nicht regelbaren Gebäudehülle nach Stand der Technik) bezogen und genau wie in Bild 2 über dem Schaltfaktor und unter Variation der Fensterfläche aufgetragen werden.

Bei Betrachtung von Fensterflächenanteilen zwischen 10 und 20 % ist zu erkennen, dass bereits bei einem Schaltfaktor von 10, Einsparungen von $> 50 \%$ erreicht werden können. Wird ein Schaltfaktor der Wand von 25 erreicht, steigt das Einsparpotential bereits auf über 60 %. Bei Fensterflächenanteilen bis 40 % ist der Einsatz von regelbaren Dämmelementen energetisch sinnvoll. Bei Fassaden mit Fensterflächenanteilen von 60 % und höher, sind die Einsparpotentiale durch die Anbringung regelbarer Dämmelemente deutlich reduziert.

In beiden Diagrammen zeigt sich außerdem, dass der Kühlenergiebedarf mit steigendem Schaltfaktor gegen einen minimalen Kühlenergiebedarf konvergiert, da der maximale Wärmedurchgang der gesamten Wand durch das tragende Mauerwerk sowie den Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Wand und Luft sowohl auf der Innen- als auch der Außenseite nach oben begrenzt ist. Eine weitere Erhöhung der maximalen Wärmeleitfähigkeit des regelbaren Dämmelements hat dann keinen weiteren Einfluss auf den gesamten Wärmedurchgang der Wand. Die Simulationsergebnisse und insbesondere die damit als technisch sinnvoll ermittelten Schaltfaktoren können als Zielgrößen für die Entwicklung und experimentelle Untersuchung regelbarer Dämmelemente herangezogen werden.

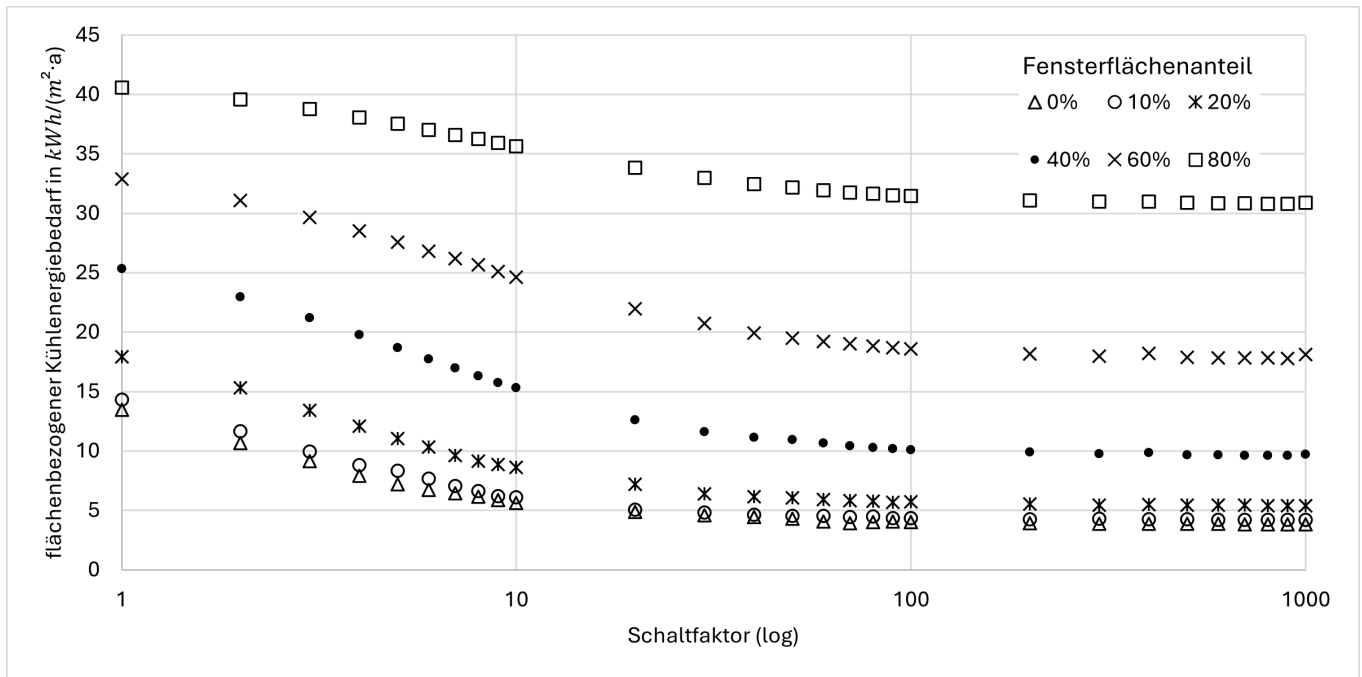


Bild 2: Flächenbezogener Kühlenergiebedarf über Schaltfaktoren der Dämmelemente bei Variation des Fensterflächenanteils der Südseite.

Experimentelle Untersuchung regelbarer Dämmelemente

Während die Simulationsstudie das energetische Potential regelbarer Dämmelemente technologiefrei untersucht, wird im Projekt auch experimentell an einer technischen Entwicklung gearbeitet.

Die Wärmeleitfähigkeit von Vakuumdämmelementen mit porösem Füllkern ändert sich mit dem Gasdruck. Unter den einsetzbaren Gasen hat Wasserstoff eine der höchsten Wärmeleitfähigkeiten und kann zudem in Metallhydrid-Reaktoren gespeichert werden. Im Projekt wird daher die Mög-

lichkeit untersucht, den Wasserstoffdruck in porösen, textilen Dämmelementen und damit deren Wärmeleitfähigkeit gezielt zu verändern. Über eine thermische Regelung des angeschlossenen Metallhydrid-Reaktors, kann eingestellt werden, wie viel Wasserstoff frei im System, bzw. im Met-

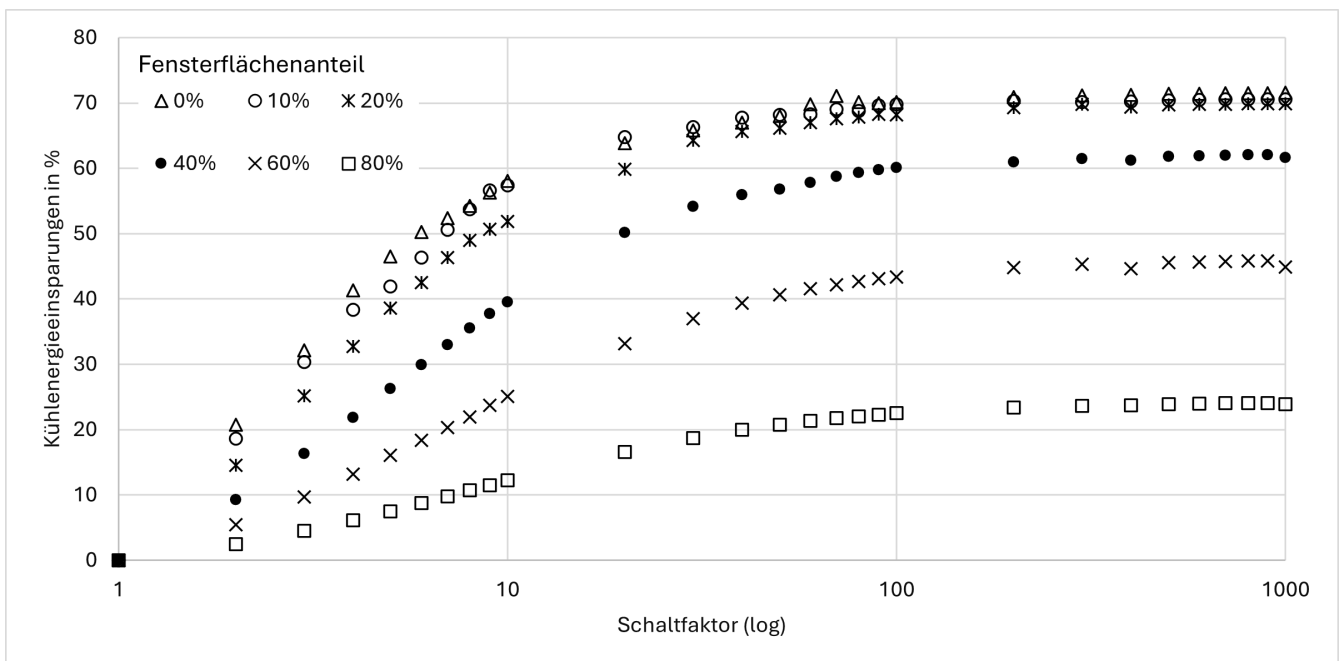


Bild 3: Prozentuales Einsparpotential an Kühlenergie bezogen auf eine Fassade nach GEG (Schaltfaktor = 1)

hallhydrid gespeichert vorliegt. Die textilen Dämmelemente werden von den Deutschen Instituten für Textile Forschung (DITF) entwickelt. Die Expertise für Wasserstoffspeicherung über Metalhydrid-Reaktoren liegt beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR).

Die Demonstratoren der Paneele werden am IGTE an der 2-Platten-Apparatur hinsichtlich ihrer Wärmeleitfähigkeit vermessen. Daraufgehend sollen die Dämmelemente in Klimakammern und dem Raumluftrömungslabor untersucht werden.

Fazit und Ausblick

Momentan werden die Simulationsmodelle zur Abbildung des energetischen Flexibilisierungspotentials im Gebäude enthaltener Speichermassen aufgebaut. Dafür wird das vorliegende Simulationsmodell auf ein n-Kapazitätenmodell erweitert.

Dieses wird verwendet, um die einzelnen Umschließungsflächen des Innenraums separat — mit ihren unterschiedlichen Widerständen und Kapazitäten — abbilden zu können. Jede Umschließungsfläche kann dabei unterschiedlich schnell reagieren. Damit kann das Modell auch kurzfristige Änderungen der Wärmeströme realistischer abbilden als es beim 2-Kapazitätenmodell möglich ist.

Die Ergebnisse der Simulationen fließen in die Entwicklung der regelbaren Dämmelemente ein und die am IGTE folgenden Messungen zum Schaltfaktor der entwickelten Paneele sowie dem

Verhalten in der Klimakammer können wiederum zur verfeinerten Parametrisierung des Modells herangezogen werden.

Danksagung

Das Forschungsvorhaben ReVaD (FKZ: 01IF22617N) wird im Rahmen des Programms für Industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF) durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 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 e.V. (DLR) 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] VDI 6007, Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden – Raummodell, Verein Deutscher Ingenieure, Juni 2015

[3] VDI 6020, Anforderungen an thermisch-energetische Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation, Verein Deutscher Ingenieure, Dezember 2022

Systemübergreifende Regelstrategien für Wohnungslüftungs- und Heizungssysteme

**Mostafa Barghash,
Tim Jourdan**

Hintergrund und Zielsetzung

Zentrale Wohnungslüftungsgeräte (WLG) in Wohngebäuden sind oft mit fest eingestellten Volumenstromklappen ausgestattet, die die Luftströme gemäß den Auslegungsanforderungen auf verschiedene Zonen verteilen. Da diese Einstellungen während des Betriebs nicht angepasst werden können, entsteht bei diesen Konstant-Volumenstrom-Systemen (KVS) aufgrund von variierender Personenbelegung häufig eine Über- bzw. Unterversorgung der einzelnen Räume. Mit einem Variablen-Volumenstrom-System (VVS) könnten die Luftströme hingegen bedarfsgerecht angepasst werden und dadurch sowohl der Energieaufwand für den Lufttransport als auch die Lüftungswärmeverluste im Heizbetrieb verringert werden.

Die Umsetzung eines solchen Systems kann entweder zentral über Volumenstromregelklappen und zentrale Ventilatoren (zentrale Ventilation) oder dezentral durch Ventilatoren in einzelnen Luftkanalsträngen (dezentrale Ventilation) erfolgen. Beim dezentralen Ansatz bleiben zentrale Elemente wie das Wärmerückgewinnungssystem (WRG) und die Filter erhalten, während zentrale Ventilatoren und Regelklappen entfallen, was Energieeinsparungen durch Vermeidung dissipativer Verluste ermöglicht.

Zur quantitativen Analyse des Ein-

sparpotentials der dezentralen Ventilation unter verschiedenen Nutzungsbedingungen wurde im Forschungsvorhaben HeatVent-Con ein Luftverteil-Hardware-in-the-Loop-Prüfstand (HiL) entwickelt. Dieser ist mit Sensoren und Aktoren ausgestattet, um die Volumenströme raumweise zu steuern und die elektrische Leistungsaufnahme der Ventilatoren zu messen.

Randbedingungen

Der Luftverteil-HiL-Prüfstand wurde basierend auf einer Beispielwohnung gemäß DIN 1946-6 Beiblatt 1 [1] entwickelt. Die Referenzwohnung mit einer Fläche von ca. 64 m² umfasst drei Zu- sowie zwei Ablufträume. Am Prüfstand sind jedem Zu- und Abluftstrang eine Volumenstromregelklappe und eine Emulationsklappe zugeordnet. Bei dezentraler Ventilation ersetzen Radialventilatoren die Volumenstromregelklappen. Der HiL-Prüfstand ermöglicht praxisnahe Emulationen und die Analyse der elektrischen Leistungsaufnahme der Ventilatoren, um das Energieeinsparpotenzial einer dezentralen gegenüber einer zentralen Anordnung von Ventilatoren zu untersuchen.

Im Rahmen der Untersuchung des Variablen-Volumenstrom-Systems (VVS) am HiL-Prüfstand werden insgesamt 35 Belegungsfälle bei Nennlüftung (NL) analysiert, die alle möglichen Kombinationen der Anwesenheit von drei Personen in der Wohnung abbilden. Diese Fälle sind in vier Klas-

sen unterteilt, wie in Bild 2 dargestellt. So beschreibt bspw. Klasse (A) den Zustand, bei dem zwei der drei Zulufräume belegt sind, während maximal ein Abluftraum belegt ist. Der ermittelte Gesamtvolumenstrom beträgt in diesem Fall 62,3 m³/h bzw. 69,7 m³/h, wobei diese Werte auf simulationsbasierten Berechnungen basieren. Im Vergleich zur Nennlüftung ohne zonenweise Ventilation, bei welcher der Außenluftvolumenstrom 91,7 m³/h beträgt, bedeutet dies eine Reduktion des Volumenstroms um 24 % bzw. 32 %.

In diesem Beitrag werden exemplarisch zwei Untersuchungsfälle präsentiert - Fall (A) und Fall (B). Fall (A) umfasst die 35 Belegungsfälle bei Nennlüftung (NL) mit einer Anordnung der 35 Belegungsfälle gereiht nach abneh-



Bild 1: Luftverteil-HiL-Prüfstand

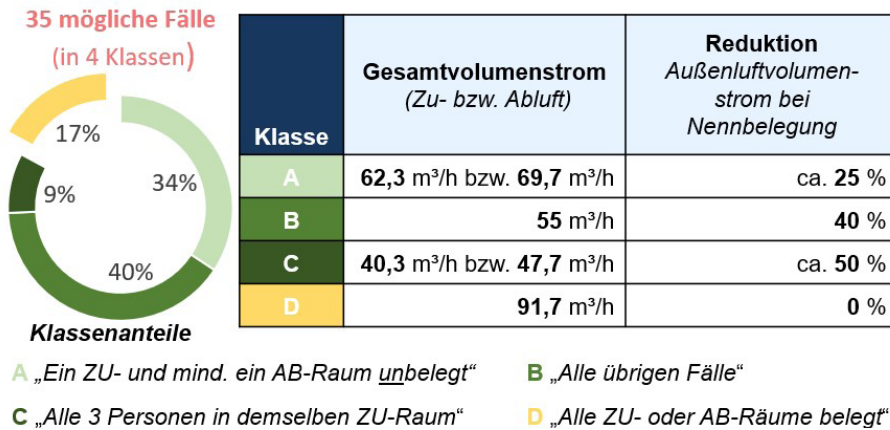


Bild 2: Mögliche Belegungsfälle bei Nennlüftung (35 Fälle)

menden Gesamtvolumenströmen (Zuluft bzw. Abluft), während Fall (B) nach zunehmenden Gesamtvolumenströmen gereiht ist. Jeder der 35 Betriebsfälle wird über eine Dauer von 30 Minuten betrieben, um sicherzustellen, dass ein quasi-stationärer Zustand erreicht wird. Diese Vorgehensweise ist entscheidend für die Bewertung der elektrischen Leistungsaufnahme der VVS-Systeme (zentrale und dezentrale Ventilation), da die

Übergangseffekte zwischen den Betriebsfällen und deren Einfluss auf die Messungen dadurch nicht relevant sind.

Ergebnisse

Die Luftleistung wird herangezogen, um das Energieeinsparpotenzial verschiedener Ventilortypen bei zentraler und dezentraler Ventilation darzustellen. Sie berechnet sich aus dem Produkt des geförderten Volumenstroms und

der statischen Druckdifferenz an jedem Ventilator. In Bild 3 und 4 wird exemplarisch der Volumenstrom für die zentrale und dezentrale Ventilation sowie der Volumenstromunterschied bei einem gegebenen Gesamtvolumenstrom der Zuluft dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Volumenstromunterschiede zwischen zentraler und dezentraler Ventilation in den 35 Fällen im Allgemeinen vernachlässigbar sind. Eine Ausnahme bildet der Betriebsfall 4, bei dem ein Volumenstromunterschied von ca. 6 m³/h festgestellt wird. Dies ist darauf zurückzuführen, dass einer der fünf dezentralen Ventilatoren trotz maximaler Drehzahl den erforderlichen Soll-Volumenstrom nicht erreichen konnte.

Die Untersuchung der Luftleistung bei dezentraler Ventilation für alle Betriebsfälle in Fall (A) zeigt eine signifikant geringere Leistungsaufnahme im Vergleich zur zentralen Ventilation (siehe Bild 5). Der

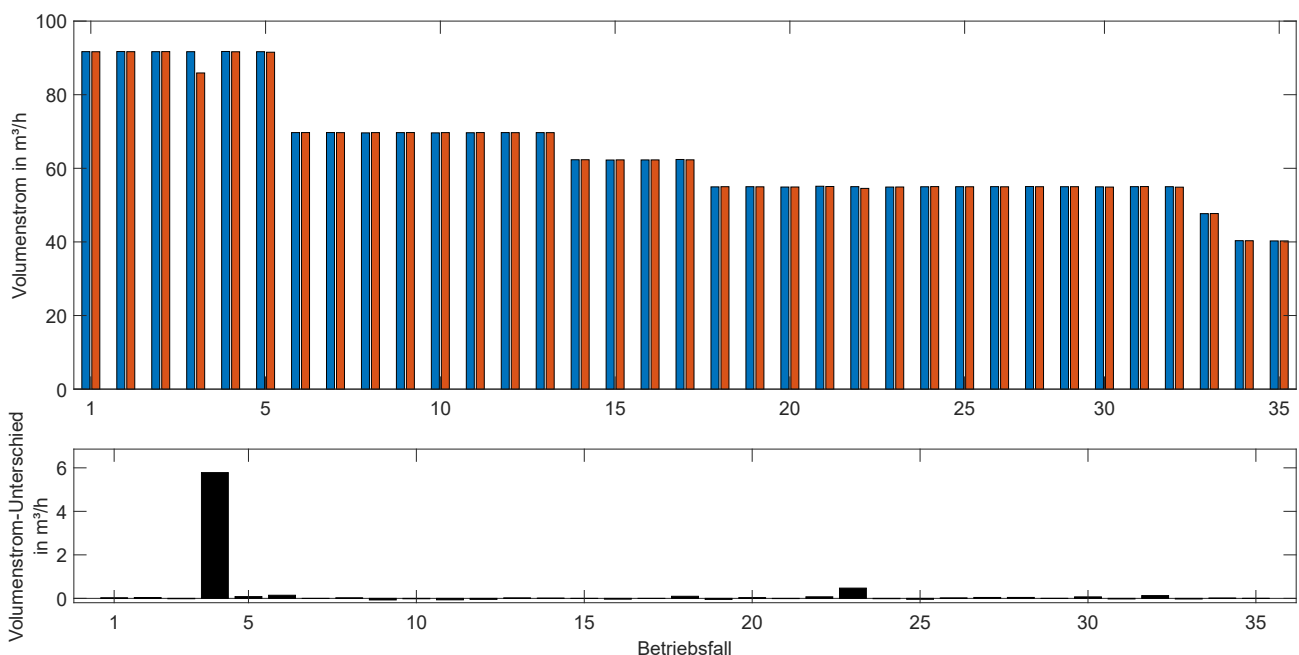


Bild 3: Fall (A) - oben: Gesamtvolumenstrom der Zuluft, unten: Volumenstromunterschied zwischen zentraler und dezentraler Ventilation

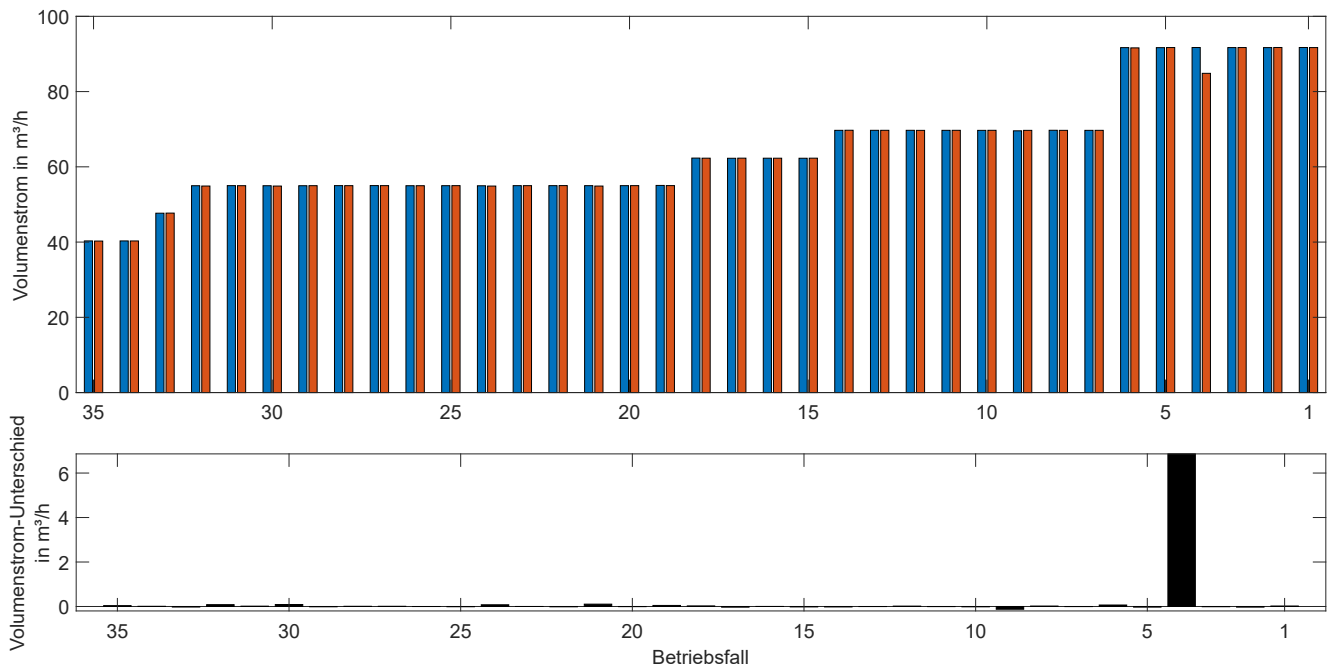


Bild 4: Fall (B) - oben: Gesamtvolumenstrom der Zuluft, unten: Volumenstromunterschied zwischen zentraler und

absolute Unterschied der Luftleistung zwischen zentraler und dezentraler Ventilation beträgt in den meisten Fällen ca. 1,5 W. Der relative Unterschied, bezogen auf die zentrale Ventilation, zeigt Einsparungen von bis zu 70 % auf.

Eine fehlende übergreifende Regelung in der zentralen Ventilation führt dazu, dass die Volumenstrom-Regelklappen nicht miteinander arbeiten können. Dadurch ist nicht gewährleistet, dass mindestens eine Volumenstrom-

Regelklappe in den Zu- bzw. Abluftsträngen bei jedem Betriebsfall vollständig geöffnet ist. Das bedeutet, dass bei zentraler Ventilation keine energieoptimierte Luftverteilung sichergestellt werden kann. Im Fall (B) sind die Volu-

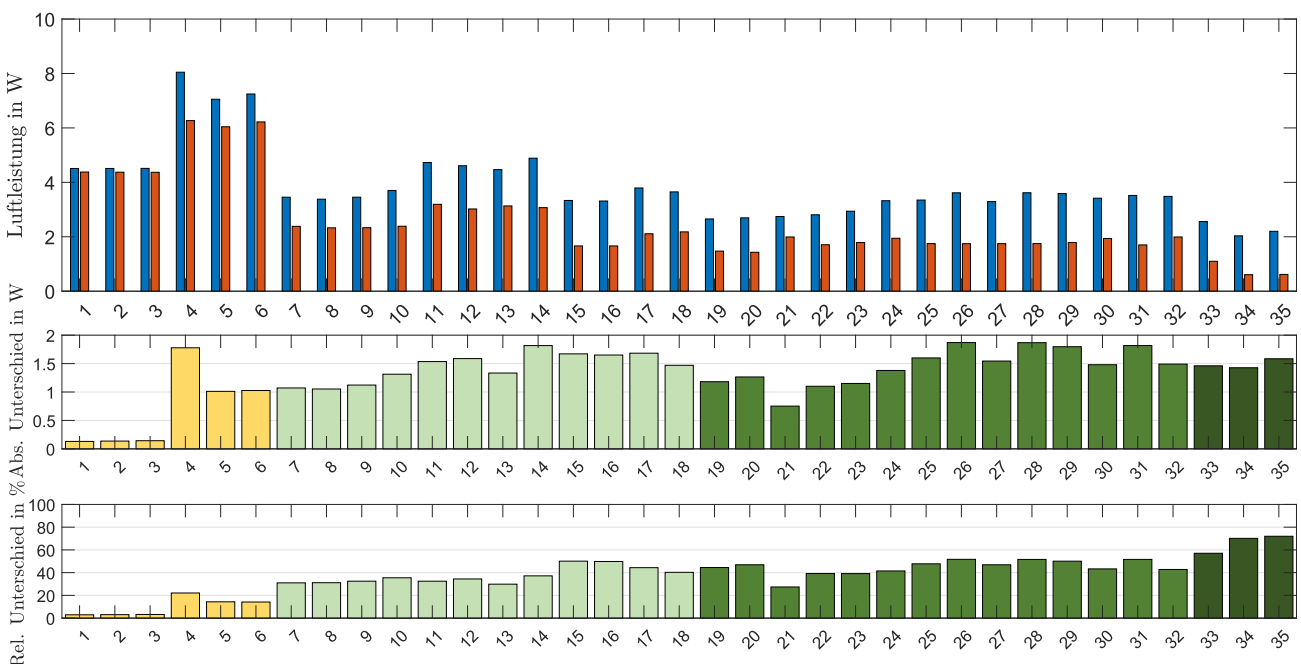


Bild 5: Fall (A) – Vergleich der Luftleistung

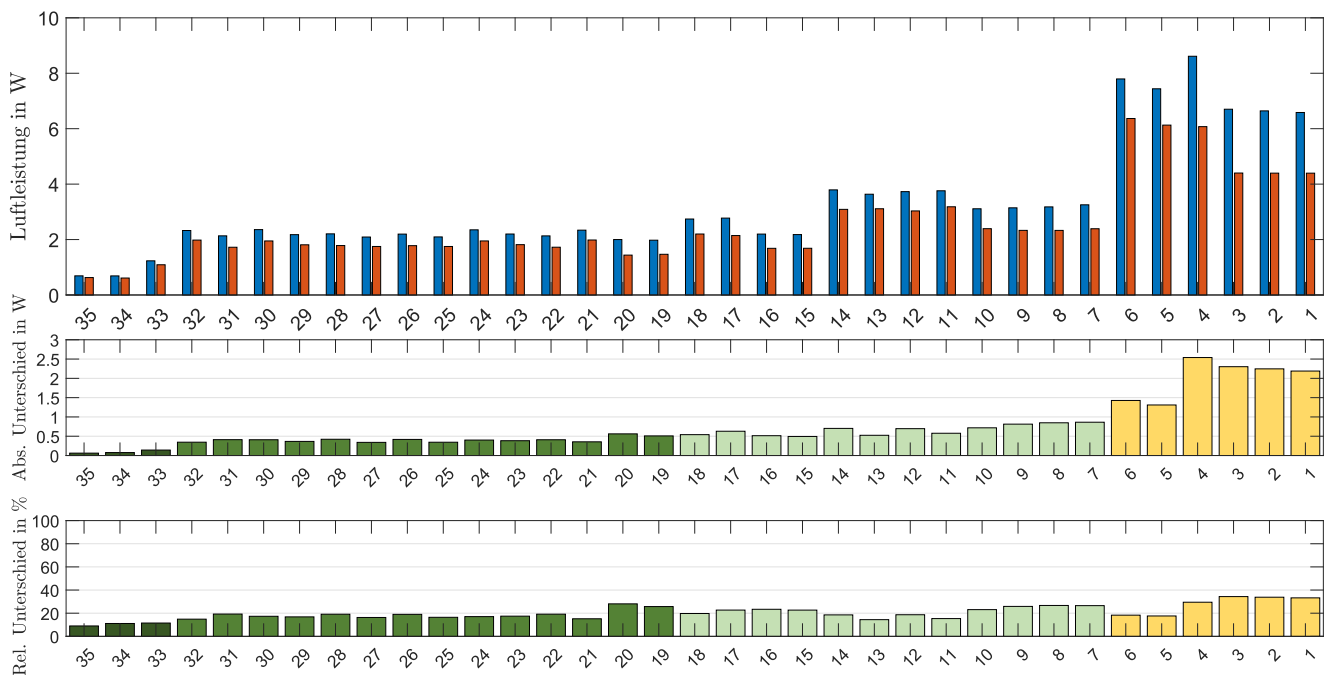


Bild 6: Fall (B) – Vergleich der Luftleistung

menstrom-Regelklappen bei zentraler Ventilation weiter geöffnet als in Fall (A). Hier beträgt der absolute Unterschied der Luftleistung in den meisten Betriebsfällen etwa 0,75 W, während die relativen Einsparungen bei bis zu 35 % liegen (siehe Bild 6).

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Projekts HeatVentCon wird die Ventilation einer Referenzwohnung unter Einsatz eines Variablen-Volumenstrom-Systems (VVS) umfassend untersucht. Dabei werden verschiedene Lastprofile sowie unterschiedliche Regelstrategien am HiL-Prüfstand analysiert. In diesem Beitrag werden exemplarisch zwei Fälle dargestellt und diskutiert. Erste Erkenntnisse zeigen, dass dezentral angeordnete Ventilatoren im Vergleich zu zentralen VVS deutliche

Energieeinsparpotentiale aufweisen. Im Weiteren soll eine übergeordnete Regelung für die optimierte zentrale Ventilation untersucht werden, bei der die Volumenstrom-Regelklappen miteinander arbeiten. Das bedeutet, dass bei jedem Betriebspunkt der zentralen Ventilation sichergestellt wird, so dass mindestens eine Volumenstrom-Regelklappe im Zuluft- und Abluftstrang vollständig geöffnet ist. Dadurch kann das Potenzial für die Mindest-Energieeinsparungen der dezentralen Ventilation gegenüber einer optimal betriebenen VVS quantifiziert werden.

Danksagung

Das Forschungsvorhaben HeatVentCon wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz im Rahmen der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF-Projekt-Nr. 01IF22051 N) ge-

fördert und vom Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. (VdF HLK) als Forschungsvereinigung begleitet. Die Bearbeitung erfolgt durch das vom Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart sowie die Forschungsgesellschaft Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V.

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: Beispielerrechnungen für ausgewählte Lüftungssysteme, Sep. 2012.

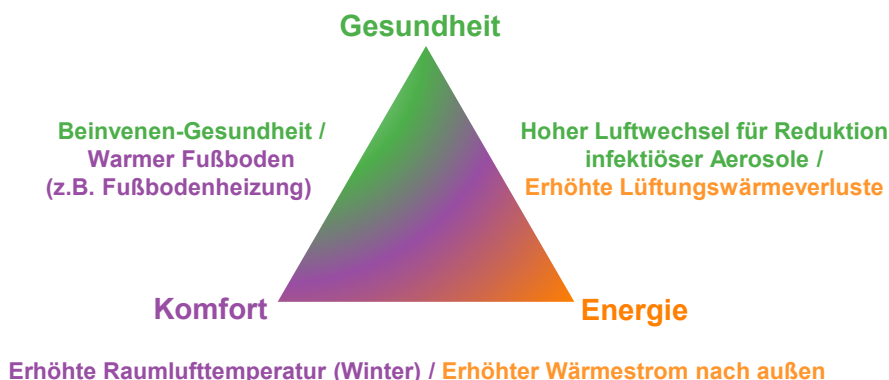


Bild 2: Beispiele für den Zielkonflikt „Energie – Komfort – Gesundheit“ bei einer Optimierung in diesen drei Dimensionen

bewertet werden. In Bild 2 wird exemplarisch skizziert, inwiefern diese Dimensionen bei der Optimierung in Zielkonflikt stehen. Ein Lösungsansatz hierbei ist, abzufragen wie ein Nutzer seine Ziele und Anforderungen einschätzt und auf Basis der genannten Analysen die tatsächliche Einordnung in derselben Metrik vorzunehmen und rückzumelden (siehe Bild 3). Anhand der datengetriebenen

Analysemodelle können so Optimierungspotenziale aufgedeckt werden, bei gleichzeitiger Einbindung der Nutzenden. Neben der Möglichkeit der Einbindung unterschiedlicher Smart Home-Systeme als Datenlieferant bietet HEELP damit die Möglichkeit, die Analyse- und Entscheidungskomponenten modular einzubinden und soll über interaktive bzw. übersichtliche Datenvisualisie-

rungsmethoden zur Erstellung der Nutzungsberichte ergänzt werden.

Projektablauf

Die Bearbeitung startet mit der Definition nötiger Funktionen und Anwendungsszenarien unter Berücksichtigung des aktuellen Stands der Technik. Zur realen Demonstration der Methodik werden Testräume, die eine nutzerabhängige Fensterlüftung und Heizkörper aufweisen, mit der erforderlichen Messtechnik ausgestattet und Daten erfasst. An die entsprechende Monitoring-Phase gliedert sich die Installation und die Demonstration der HEELP-Lösung an.

Danksagung

Dank gilt dem BMWK für die Förderung im Rahmen der Industriellen Gemeinschaftsforschung (FKZ: 01IF23208N), sowie dem Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. (VdF HLK), welcher als Forschungsvereinigung das vom Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart und der Hahn-Schickard-Gesellschaft bearbeitete Forschungsvorhaben begleitet. Das Forschungsvorhaben wird im Rahmen der IGF von etwa 20 Unternehmen (überwiegend kleinere und mittlere Unternehmen, KMU) mit Erfahrung und Expertise aus der industriellen Praxis unterstützt, u.a. aus den Bereichen Planung, Beratung, ausführende Gewerke, Anbieter und der Wohnungswirtschaft.

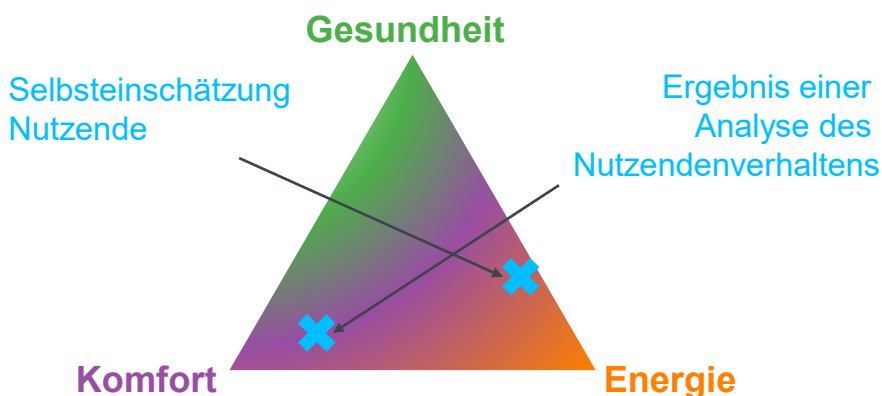


Bild 3: Schematisches Beispiel für die Einordnung des Nutzendenverhaltens durch Selbsteinschätzung und durch modell-basierte Analyse innerhalb einer einheitlichen Metrik

Numerische Untersuchung der Rauch- und Wärmeausbreitung in Ansys Fluent

**Yuanchen Wang,
Yasmin Rettkowski**

Einleitung

Brände in geschlossenen Räumen stellen eine große Gefahr für die Sicherheit der Gebäudenutzer dar, da die Ausbreitung von Rauch und Wärme die Sichtverhältnisse und die Atemluftqualität beeinträchtigt sowie die Evakuierung behindern kann. Um diese Risiken besser abschätzen und effektive Brandschutzmaßnahmen entwickeln zu können, wird häufig numerische Simulationssoftware wie beispielweise Fire Dynamics Simulator (FDS) [1] eingesetzt. FDS verwendet die Finite-Differenzen-Methode (FDM) und eignet sich für die Modellierung einfacher Geometrien, stößt jedoch bei komplexeren Gebäudestrukturen aufgrund begrenzter Anpassungsfähigkeit des Gitters an seine Grenzen.

Ansys Fluent [2] bietet im Vergleich dazu durch die Finite-Volumen-Methode (FVM) eine höhere Flexibilität für komplexe Geometrien, die in heutigen Gebäuden häufig vorkommen. Der höhere Rechenaufwand und die Tatsache, dass Fluent ursprünglich nicht für die Brandsimulation konzipiert wurde, stellen jedoch Herausforderungen dar. Insbesondere fehlt es an anerkannten Vorgehensweisen bei der Modellierung von Bränden, z. B. bei der Abbildung von Brandherden und der Berücksichtigung von Strahlungseffekten, was zu Unsicherheiten bei der Erstellung

von Simulationsmodellen führt. Um geeignete Simulationsparameter und Modellierungsmethoden zu identifizieren und zu validieren, sind Vergleichsstudien mit experimentellen Daten erforderlich.

Diese Studie ist Teil des Forschungsvorhabens RoBewEnt [3] und zielt darauf ab, ein geeignetes Modell in Ansys Fluent zu erstellen und zu untersuchen, wie verschiedene Einstellungen die Simulationsergebnisse beeinflussen. Der Simulationsaufbau wird durch den Vergleich mit experimentellen Daten optimiert, um die gewonnenen Erkenntnisse für zukünftige Brandsimulationen in komplexen Gebäuden anwenden zu können.

Simulationsaufbau

Da Vollmaßstab-Brandversuche in der Realität äußerst aufwändig sind, basiert diese Studie auf den experimentellen Daten von Ayala et al. [4]. Die für die Brandsimulation verwendete Geometrie ist in Bild 1 dargestellt. An der Decke der Halle befinden sich vier Abluftventilatoren mit einem Durchmesser von 0,9 m und einem Gesamtabluftvolumenstrom von 18,3 m³/s. An der Unterseite der Wände befinden sich vier Nachströmöffnungen mit Wetterschutzgittern. Die Wände und die Decke bestehen aus 6 mm verzinktem Stahl und der Boden aus 0,8 m Beton. Die Umgebungstemperatur ist auf 18 °C eingestellt.

Im Versuch von Ayala et al. [4]

diente eine zylinderförmige Schale in der Mitte der Versuchshalle als Brandherd, wobei Heptan als Brennstoff verwendet wurde. Um den Simulationsaufwand in dieser Studie zu reduzieren, wird der Brandherd in Ansys Fluent als volumetrische Wärme- und Massenquelle anstatt als chemische Reaktionen modelliert. Basierend auf der experimentellen Brandleistung von 2,3 MW wird der Brandherd als Zylinder mit einem Durchmesser von 1,9 m und einer Höhe von 1,6 m angenommen, damit die spezifische Brandleistung dem typischen Wert von 0,5 MW/m³ [5] entspricht.

Für die Netzgenerierung wird der Gittertyp „poly-hexcore“ gewählt, da er sowohl die Rechenzeit reduziert als auch die Qualität der Simulation gewährleistet [5]. Die maximale Gittergröße des verwendeten Simulationsmodells beträgt 0,16 m, während die Ventilatoren sowie die Nachströmöffnungen als Bereiche mit einer verfeinerten Gittergröße von 0,02 m vorgegeben werden. Die Gesamtanzahl der Zellen liegt bei etwa 2,8 Millionen. Die Qualitätsbewertung des Netzes zeigt eine durchschnittliche Orthogonalität von 0,98 und eine durchschnittliche Schiefe von 0,004, was auf eine hohe Netzqualität hinweist [2].

In der Simulation wird das Large Eddy Simulation (LES)-Turbulenzmodell [2] verwendet, da es eine hohe Genauigkeit bei der Auflösung der großskaligen turbulenten Strukturen und eine gute zeit-

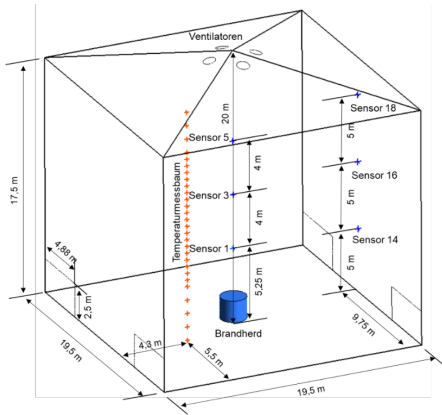


Bild 1: Geometrie der Versuchshalle basierend auf Ayala et al. [4]

liche Auflösung der transienten Strömungen bietet. Der LES-Auflösungsqualitätswert liegt bei 0,97, was auf eine zuverlässige Netzgenerierung für eine effektive Turbulenzauflösung hinweist.

Das Strahlungsmodell wird aus Gründen der Rechenzeit in der Voruntersuchung nicht aktiviert. Bei Bränden spielt die Strahlung jedoch eine bedeutende Rolle in der Wärmefreisetzung, wobei Studien einen Einfluss von 20...40% auf die Wärmefreisetzungsraten zeigen [6,7]. Daher werden in dieser Studie zwei Szenarien untersucht: eines mit einer Brandleistung von 100% und eines mit 70%, wobei die restlichen 30% als durch Strahlung von der Umschließung absorbiert betrachtet werden, ohne dass dies die Raumlufthströmung beeinflusst. Die Simulationsergebnisse für beide Szenarien werden mit den experimentellen Daten verglichen. In dieser Studie liegt der Fokus auf der Rauch- und Wärmeausbreitung in der frühen Phase der

Brandentwicklung, die zur Validierung des Modells herangezogen wird. Daher ist die Simulationszeit zunächst auf 200 s begrenzt.

Ergebnisse und Diskussion

In der Studie von Ayala et al. [4] wurden 59 Thermoelemente installiert, um die Temperaturentwicklung während des Brandes an verschiedenen Messpunkten zu ermitteln. Die Mess- und Simulationsergebnisse für die Sensoren 3, 5 und 7 in verschiedenen Höhen über dem Brandherd und die Sensoren 14, 16 und 18 in der Nähe der Wand (vgl. Bild 1) sind in Bild 2 dargestellt.

Es ist erkennbar, dass die Simulationsergebnisse mit 70% Brandleistung näher an den Messdaten der Referenzstudie liegen, mit Ausnahme der Sensoren 1 und 14, die beide als bodennah positionierte Sensoren niedrigere Temperaturen als die Referenzwerte aufweisen. Für die Messpunkte im mittleren und oberen Bereich liegen die Temperaturwerte der Simulation mit 100% Brandleistung deutlich über den Messdaten, da der Strahlungseinfluss nicht berücksichtigt und die gesamte Wärmefreisetzung ausschließlich als Konvektion betrachtet wird.

Zur Abschätzung der Höhe der raucharmen Schicht basierend auf der Temperaturverteilung wurde in der Studie von Ayala et al. [4] ein Messbaum mit 28 Temperatursensoren (siehe Bild 1) verwendet. Ein Vergleich der simulierten und gemessenen Temperaturverteilungen entlang des Messbaums zu drei verschiedenen Brandzeitpunkten (0 s; 100 s und 200 s) ist in Bild 3 dargestellt. Die durchgezo-

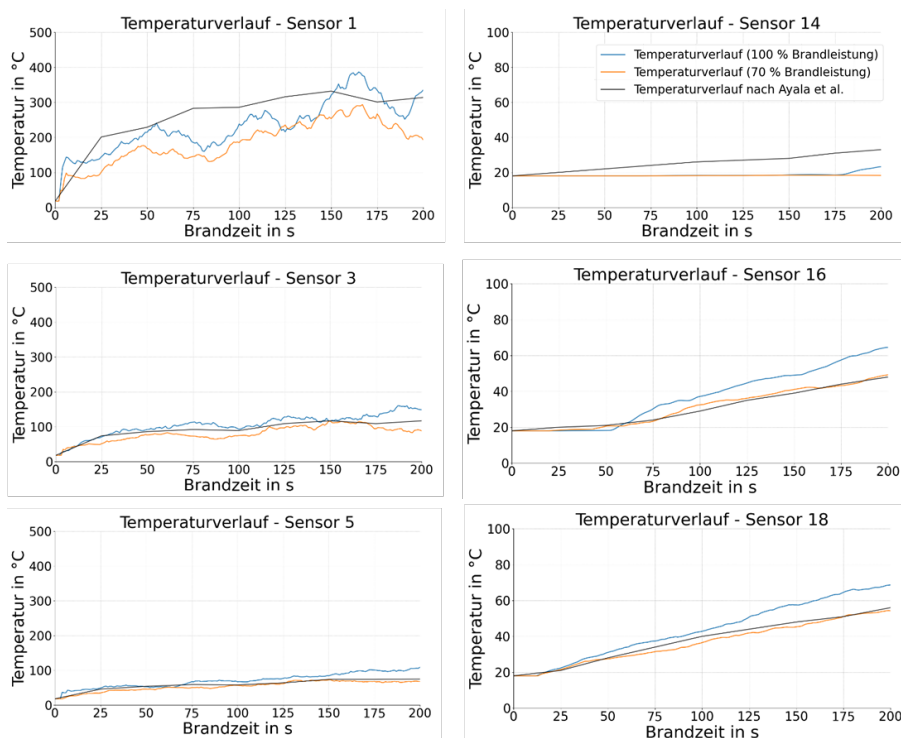


Bild 2: Temperaturverläufe an ausgewählten Messpunkten

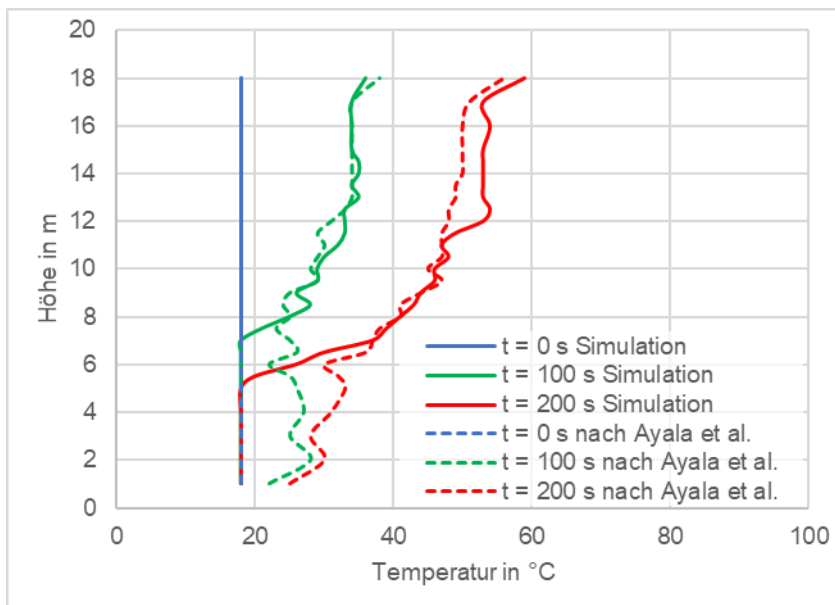


Bild 3: Vergleich der Temperaturverteilung entlang des Messbaums

gene Linie stellt die Simulationsergebnisse mit 70 % der Brandleistung dar, während die gestrichelte Linie die entsprechenden Messwerte aus der Studie von Ayala et al. [4] zeigt. Ab einer Höhe von 7,5 m über dem Boden nähern sich die Simulationsergebnisse den Messdaten an. In niedrigeren Höhen treten im Simulationsergebnis keine Temperaturänderungen gegenüber der Umgebungstemperatur auf. Dieses Verhalten könnte auf die deaktivierte Strahlung zurückzuführen sein und sollte in zukünftigen Arbeiten weiter untersucht werden.

Schlussfolgerung

Ziel dieser Studie ist es, ein Simulationsmodell zur Untersuchung der Rauch- und Wärmeausbreitung in Ansys Fluent zu entwickeln und die geeigneten Einstellungen anhand von experimentellen Daten zu ermitteln. Ohne Einbeziehung der Strahlung

kann das vereinfachte Modell mit 70% Brandleistung die Temperaturentwicklung im oberen Bereich der Versuchshalle während eines Brandes plausibel abbilden. Die Abweichungen zwischen dem experimentellen und simulierten Ergebnissen im unteren Bereich könnten jedoch auf die fehlende Berücksichtigung der Strahlung zurückzuführen sein und werden in zukünftigen Arbeiten weiter untersucht.

Danksagung

Die vorliegende Studie ist Teil des Forschungsvorhabens RoBewEnt (FKZ: 01IF22842 N), das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz mit Mitteln der Industriellen Gemeinschaftsforschung IGF gefördert und durch die Forschungsvereinigung für Luft- und Trocknungstechnik e.V. begleitet wird. Die Bearbeitung erfolgt durch das Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und

Energiespeicherung IGTE (Universität Stuttgart) und das E.ON Energy Research Center (RWTH Aachen).

Literatur

- [1] McGrattan, K., McDermott, R., Vanella, M., Mueller, E., Hostikka, S., Floyd, J.: 'Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide: Volume 1: Mathematical Model' (2024)
- [2] ANSYS, Inc.: 'Ansys Fluent Theory Guide' (2024)
- [3] Wang, Y.: 'Robuste Bewertung von Entrauchungssystemen in Hallen und Atrien unter unsicheren Randbedingungen', HLK-Brief 2023, Artikel 261, 2023
- [4] Ayala, P., Cantizano, A., Rein, G., Vigne, G., Gutiérrez-Montes, C.: 'Fire Experiments and Simulations in a Full-scale Atrium Under Transient and Asymmetric Venting Conditions', Fire Technol, 2016, 52
- [5] Wróblewski, A., Macek, A., Bansiewicz, A., Wodecki, J.: 'Comparison of Hexcore and Poly-Hexcore computational meshes in the aspect of air flow modeling based on the actual geometry of mining excavations', IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 2024, 1295
- [6] Markatos, N.C., Malin, M.R., Cox, G.: 'Mathematical modelling of buoyancy-induced smoke flow in enclosures', International Journal of Heat and Mass Transfer, 1982, 25
- [7] Yue, Z., Reitz, R.D.: 'Numerical investigation of radiative heat transfer in internal combustion engines', Applied Energy, 2019, 235

Energieeffiziente Wassergewinnung durch heterogene Kondensation mit Hilfe von Turbomaschinen

Benjamin Walz

Hintergrund

Der Zugang zu sauberem Wasser ist weltweit eine wachsende Herausforderung und unverzichtbar für die soziale und ökonomische Entwicklung, die Nahrungsmittelproduktion und den Erhalt von Ökosystemen. Die Verfügbarkeit von Wasser wird in ariden und semiariden Regionen zunehmend knapp und die Intensität von Dürreperioden nimmt zu. Forschende entwickeln innovative Ansätze zur Wassergewinnung, um diesen Problemen zu begegnen und das Nachhaltigkeitsziel der Vereinten Nationen zu erreichen: „Verfügbarkeit und nachhaltige Bewirtschaftung von Wasser für alle.“ [1] Neben dem Projekt „AirWater“ (siehe Artikel 284), das die solar-sorptive Wassergewinnung in trockenen Klimazonen erforscht, wird am IGTE das Forschungsprojekt „TurboKon-H₂O“ bearbeitet. Das Ziel dieses Projekts ist die Entwicklung eines atmosphärischen Wassergenerators, der mit Hilfe von Turbomaschinen Wasser möglichst effizient aus der Umgebungsluft gewinnt. Mit einem Demonstrator sollen die Funktionsweise veranschaulicht und Optimierungsmöglichkeiten des Konzepts identifiziert werden.

Technologisches Konzept und Funktionsweise

Die Idee hinter TurboKon-H₂O besteht darin, Turbomaschinen einzusetzen, um Luft effizient ab-

zukühlen und durch heterogene Kondensation Wasser zu gewinnen. In Bild 1 ist der Aufbau des Demonstrators schematisch dargestellt: Umgebungsluft wird vorab auf eine bestimmte Temperatur und Feuchte konditioniert, um verschiedene Standortbedingungen zu emulieren. Anschließend durchläuft die konditionierte Luft eine Turbine, die den Druck auf bis zu 0,5 bar Absolutdruck reduziert. Dieser Expansionsprozess kühlt die Luft ab, wodurch sie sich hinter der Turbine unterhalb des Taupunkts und im übersättigten Zustand befindet. Im Gegensatz zur homogenen

Kondensation, bei der Wassermoleküle aus der reinen Gasphase kondensieren, benötigt die heterogene Kondensation Oberflächen, die als Kondensationskeime dienen. Durch das Einbringen winziger Tropfen als Keime hinter der Turbine kondensiert der Wasserdampf an deren Oberfläche. Dasselbe Wirkprinzip wird bei der Hagelabwehr durch Ausbringen von Silberjodid in Wolken oder bei der Erzeugung von Kunstsnow in Schneekanonen angewandt. Die Kondensationsstrecke ist zusätzlich mit einem optischen Messsystem ausgestattet, das das Wachstum der Tropfen ent-

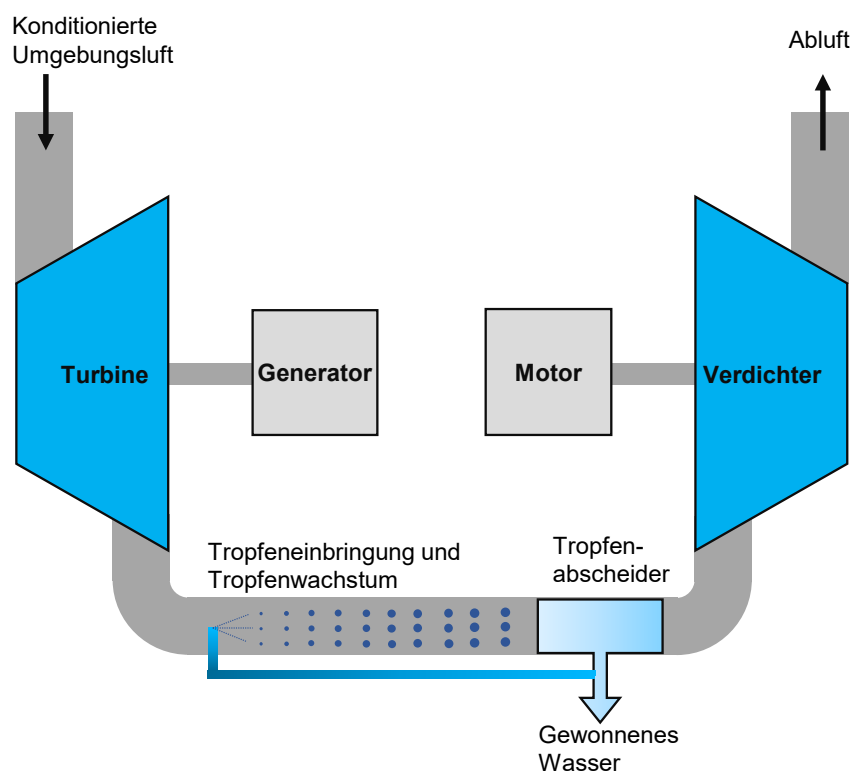


Bild 1: Schematische Darstellung des Aufbaus

lang der Strömung überwacht. Die Tropfengröße und -konzentration werden dabei systematisch variiert und analysiert, um die Wasserausbeute zu maximieren. Ein Tropfenabscheider sammelt die kondensierten Tropfen und speichert sie in einem Sammelbehälter. Ein nachgeschalteter Verdichter sorgt für eine Druckerhöhung, sodass die Luft kontrolliert auf Umgebungsdruck abgegeben wird und eine kontinuierliche Strömung durch die Anlage gewährleistet ist.

Diese Form der Wassergewinnung verspricht Vorteile gegenüber herkömmlichen Methoden, die zum Beispiel mit einer Kältemaschine energieintensiv Umgebungsluft unter den Taupunkt abkühlen und außerdem Kältemittel mit entsprechendem Global Warming Potential verwenden. Erste rechnerische Abschätzungen zeigen, dass bei einer Lufttemperatur von 20 °C, einer relativen Luftfeuchte von 50 % und einem Luftmassenstrom von etwa 300 kg/h eine tägliche Wasserausbeute von rund 20 bis 50 Litern erreicht werden kann. Eine geplante Skalierung der Anlage soll es ermöglichen, bis zu 10.000 Liter Wasser pro Tag bei einem Energieaufwand von 500 bis 1.000 Wh/l zu gewinnen.

Umsetzung und technische Herausforderungen

Der Demonstrator befindet sich derzeit in der Aufbauphase. Die erste Auslegung der Strömungsmaschinen, des Tropfenabscheiders und der Tropfenwachstumsstrecke ist abgeschlossen und die Installation der Luftkonditionierung fertiggestellt. Bild 2 zeigt ein CAD-Modell des Kernelements der Versuchsanlage. Auf

der rechten Seite befindet sich die Turbine mit nachgelagerten Wasseranschlüssen für die Tropfeneinbringung. Die eigentliche Wachstumsstrecke beginnt nach einem Reduzierungsstück und ist mit Kollimatoren zur optischen Messung der Tropfengrößen entlang des Strömungswegs ausgestattet. Kollimatoren sind optische Bauelemente, die der Erzeugung von Licht mit parallelem Strahlengang dienen. Am Ende der Strecke folgt der Tropfenabscheider mit einem nachgeschalteten Verdichter.

Ein Schwerpunkt der bisherigen Forschung lag auf der Entwicklung eines Simulationsmodells, das die thermodynamischen und strömungstechnischen Prozesse abbildet. Die Kombination von

gen rechnerisch abzuschätzen. Eine technische Herausforderung besteht darin, den Prozess unter variierenden Umgebungsbedingungen stabil zu halten. Die Strömungsmaschinen müssen dabei so ausgelegt werden, dass sie bei wechselnden Außenluftbedingungen hohe Energieausbeuten erzielen. Eine präzise Auslegung der Schaufelgeometrie und der Druckverteilung ist notwendig, um Turbulenzen zu minimieren und den Luftstrom gleichmäßig zu verteilen. CFD-Simulationen (Computational Fluid Dynamics) werden genutzt, um das Strömungsverhalten und die Druckverhältnisse detailliert zu analysieren und die Effizienz zu steigern. Bild 3 zeigt beispielhaft die Druckverteilung im Laufrad der Turbine.

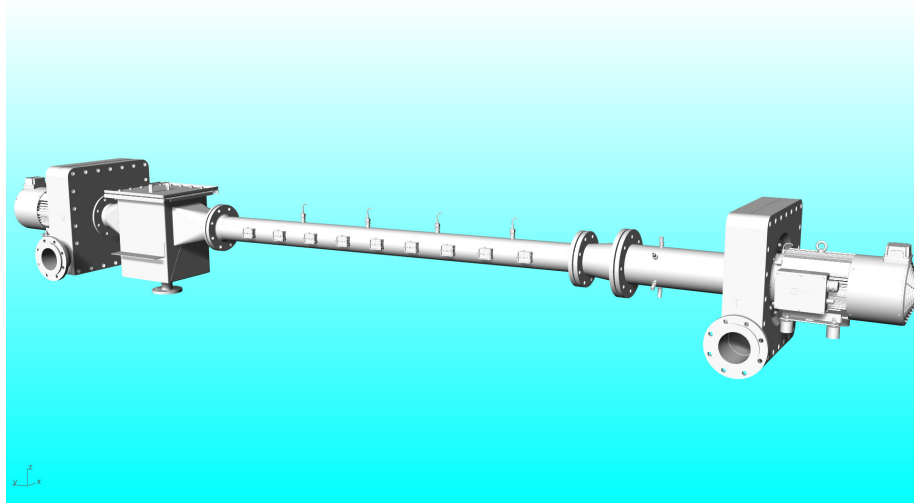


Bild 2: CAD-Modell der Versuchsstrecke, von links nach rechts: Verdichter, Tropfenabscheider, Tropfenwachstumsstrecke mit optischem Messsystem und Sensorik, Wassertropfeneinbringung, Turbine; die Luft strömt von rechts ein

numerischen Strömungssimulationen, Modellen zur Wärme- und Stoffübertragung sowie Kennzahlen des Tropfenabscheiders ermöglicht es, die Wasserausbeute unter variierenden Randbedingun-

Offener Forschungsgegenstand ist außerdem, wie die Tropfen optimal eingebracht werden können. Eine Möglichkeit stellen Ultraschallbefeuchter dar, die sehr feine Tropfen mit einem Durch-

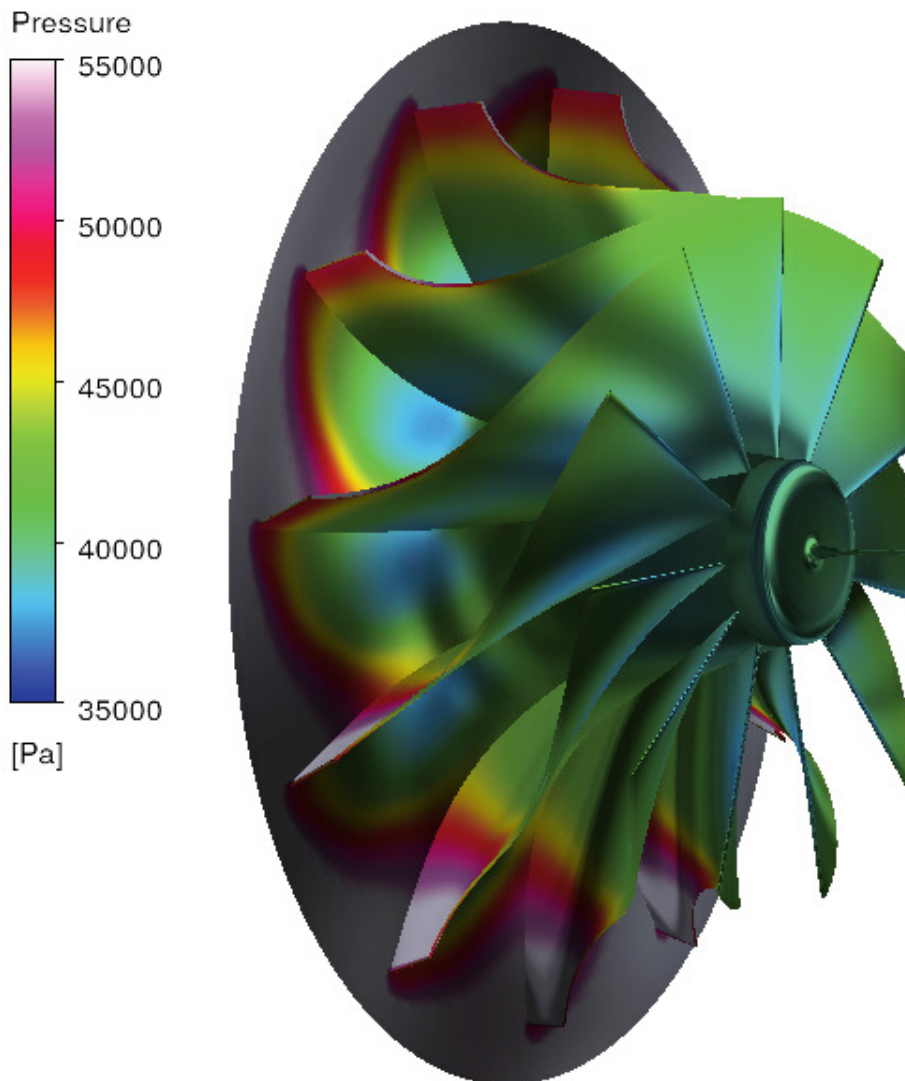


Bild 3: Druckverteilung im Turbinenlaufrad

messer von etwa 4 μm erzeugen. Alternativ könnten Zwei- oder Einstoffdüsen verwendet werden, die zwar größere Tropfen erzeugen, jedoch leichter in den Kanal zu integrieren sind. Die Wahl des Befeuchtungssystems wirkt sich direkt auf das optische Messsystem aus. Dieses arbeitet nach der Laserextinktionsmethode, bei der ein Laserstrahl quer durch den Strömungskanal geführt wird und aus drei Hauptkomponenten besteht:

Kollimatoren als Laserquelle, einem Detektor und einem Auswertesystem. Die durch Streuung und Absorption an den Tropfen verursachte Lichtabschwächung liefert Informationen zu Anzahl und Größe der Tropfen in der Strömung. Sind die Tropfen des Befeuchtungssystems zu groß, bleibt das relative Wachstum entlang des Strömungswegs gering und kann vom Messsystem möglicherweise nicht erfasst werden.

Ausblick und nächste Schritte

Die nächsten Schritte im Projekt umfassen den Aufbau eines vollständigen Demonstrators im Labormaßstab. In den kommenden Monaten wird das Zusammenspiel zwischen Turbine, Verdichter und Kondensationsstrecke getestet und optimiert. Ein besonderer Fokus liegt auf der Validierung der Simulationsergebnisse durch experimentelle Daten, um die Skalierbarkeit der zu gewährleisten. Ziel ist es, den Demonstrator unter verschiedenen klimatischen Bedingungen zu testen und die Energieeffizienz zu steigern, sodass das System langfristig eine wettbewerbsfähige und umweltfreundliche Alternative zu konventioneller Wassergewinnung darstellt.

Danksagung

Das Forschungsvorhaben TurboKon-H₂O wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) gefördert (Förderkennzeichen: KK5010909GM3). Es wird gemeinsam von den Instituten für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung sowie für Thermische Strömungsmaschinen und Maschinenlaboratorium der Universität Stuttgart und den Industriepartnern Karl Hopf GmbH und Antewa GmbH bearbeitet.

Literatur

[1] Vereinte Nationen, Ziele für nachhaltige Entwicklung, Bericht 2024.

Hocheffiziente Wärmedämmungen für Warmwasserspeicher

**Stephan Lang,
Harald Drück**

Einleitung

Im Verbundprojekt Sol4City¹, das vom IGTE gemeinsam mit der Viessmann Werke GmbH & Co. KG durchgeführt wurde, wurde u. a. ein Simulationsmodell eines Warmwasserspeichers mit Wärmedämmung im Programm COMSOL Multiphysics entwickelt, um die Prüfung der Warmhalteverluste nach den Normen DIN EN 12897:2020 und DIN EN 15332:2020 zu simulieren. Dieses wurde letztlich verwendet um Wärmedämmungen zu konstruieren und zu dimensionieren, mit welchen ein Warmwasserspeicher auch nach 25 Jahren Betriebszeit noch die Energieeffizienzklasse A

gemäß EU-Verordnung 812/2013 erreicht. In diesem Beitrag werden Validierungsergebnisse des Simulationsmodells, anhand unterschiedlicher ungealterter Wärmedämmungen gezeigt.

Methodik und Simulationsmodell

Die stationären Simulationen wurden mit dem „Heat Transfer Module“ des Simulationsprogramms COMSOL Multiphysics 5.6 durchgeführt, welches zur Lösung die Finite Elemente Methode (FEM) verwendet. Eine 3D-Darstellung der Geometrie des Modells eines beispielhaften Warmwasserspeichers mit einem Speichervolumen von 950 L und acht hydraulischen Anschlüssen mit einer Nennweite von jeweils 1¼“ ist in Bild 1 ab-

gebildet. Daneben ist in Bild 1 der Warmwasserspeicher gezeigt, welcher für die Validierungsmessungen verwendet wurde und für welchen Prototypen der konstruierten Wärmedämmungen gefertigt wurden. Der reale Speicher besitzt ebenfalls ein Volumen von 950 L, acht hydraulische Anschlüsse, von welchen sieben durch die Wärmedämmung ragen, und eine Muffe zum Anschluss eines Heizstabs. Diese Anschlüsse unterschiedlicher Durchmesser wurden im Simulationsmodell vereinfachend durch acht hydraulische Anschlüsse mit einer Nennweite von 1¼“ modelliert.

Die bei den Speicherprüfungen gemäß DIN EN 12897:2020 eingestellte Speichertemperatur von 65 °C in den oberen 85 % des

¹ Informationen zum Projekt sind in der Danksagung am Ende des Beitrags enthalten

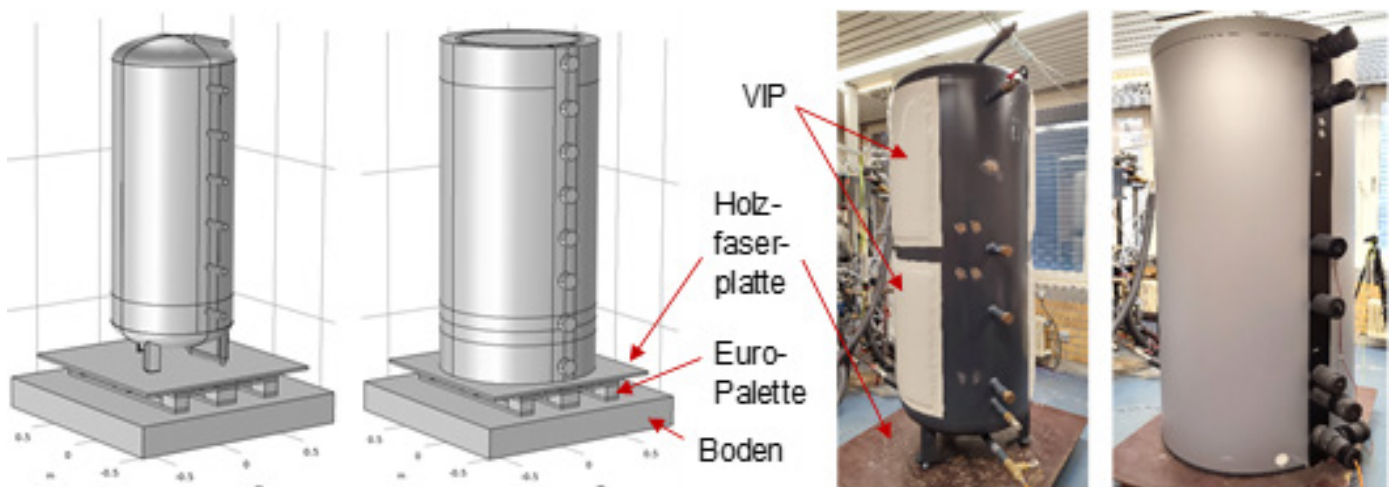


Bild 1: Abbildung 1: Warmwasserspeicher. Links: Modell ohne Wärmedämmung; 2. v. li.: Modell mit Wärmedämmung. 3. v. li: Realer Warmwasserspeicher für Speicherprüfungen inkl. aufgeklebte Vakuumisulationspaneele (VIP); rechts: Speicher inklusive gesamter Wärmedämmung

Speichervolumens, sowie die unterschiedlichen Temperaturen in den unteren 15 % des Speichervolumens² wurden im Simulationsmodell an der Oberfläche der Speicherwand aufgeprägt, wo sie auch während der Speicherprüfung gemessen wurden. Für den Wärmestrom durch die Wärmedämmung, die Speicherfüße und die hydraulischen Anschlüsse wurde reine Wärmeleitung angenommen. Für die verwendeten Wärmedämmstoffe wurde die temperaturabhängige effektive Wärmeleitfähigkeit gemessen und im Simulationsmodell eingesetzt. Diese beinhaltet bereits die Anteile der Wärmestrahlung, die in den Poren der Wärmedämmstoffe auftreten. Von der Außenoberfläche zur Umgebung wird sowohl Wärmestrahlung als auch freie und erzwungene Konvektion angenommen. Als Luftgeschwindigkeit wurden 0,25 m/s gewählt, was dem zulässigen Maximalwert gemäß DIN EN 15332:2020 entspricht. Der Wärmewiderstand von Hohlräumen zwischen Speicherhülle und Wärmedämmung wird vernachlässigt. Wenn nach der Validierung des Speichermodells Simulationen von Speichern inkl. Wärmedämmung nach einer Betriebsdauer von bis zu 25 Jahren durchgeführt werden sollen, dann wird dies durch die Implementierung der effektiven Wärmeleitfähigkeiten der entsprechend gealterten Wärmedämmstoffe realisiert. Diese effektiven Wärmeleit-

Tabelle 1: Untersuchte Wärmedämmungen

Nr.	Manteldämmung	Deckeldämmung	Bodendämmung
1	Polyesterfaservlies (PFV); Gesamtdicke: 140 mm	PFV; Mindestdicke: 110 mm (Mitte)	PFV; Mindestdicke: 110 mm (Mitte)
2	PFV, Vakuumisulationspaneele (VIP; 15 mm); Gesamtdicke: 140 mm	PFV; Mindestdicke: 110 mm (Mitte)	PFV; Mindestdicke: 110 mm (Mitte)
3	Grafithaltiges expandiertes Polystyrol (GEPS; 125 mm), VIP (30 mm), PFV; Gesamtdicke: 170 mm	PFV + VIP; Mindestdicke gesamt: 180 mm (Mitte)	PFV; Mindestdicke: 135 mm (Mitte)
4	Polyurethanhartschaum (PUR); VIP (15 mm); PFV; Gesamtdicke: 170 mm	PFV; Mindestdicke: 180 mm (Mitte)	PFV; Mindestdicke: 135 mm (Mitte)

Tabelle 2: Gemessene und berechnete Warmhalteverluste

Wärmedämmung Nr	Warmhalteverluste gemessen	Warmhalteverluste berechnet	Differenz	Relative Abweichung
1	135,4 W	137,0 W	1,6 W	1,2 %
2	110,4 W	113,0 W	2,6 W	2,4 %
3	66,2 W	65,4 W	-0,8 W	-1,2 %
4	56,3 W	60,9 W	4,6 W	8,2 %

fähigkeiten wurden durch Mess- und Literaturwerte gewonnen.

Ergebnisse

Zur Prüfung der Warmhalteverluste des in Bild 1 gezeigten Speichers nach DIN EN 12897:2020 wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Wärmedämmungen angebracht. Die in Tabelle 1 genannten Wärmedämmungen wurden ebenso im Speichermodell implementiert wie die bei den Speicherprüfungen gemessenen Temperaturen. Die Mess- und Simulationsergebnisse sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Fazit und Ausblick

Es zeigt sich, dass mit dem Simulationsmodell weitgehend sehr genaue Vorhersagen der Warmhalteverluste eines Warmwasserspeichers mit unterschiedlich ausgeführten Wärmedämmungen möglich sind. Die verbleibenden Abweichungen zeigen sich aufgrund von konservativen Annahmen im Simulationsmodell, meist in einer leichten Überschätzung der Wärmeverluste durch die Simulation. Zusätzlich führen Messunsicherheiten der Wärmeleitfähigkeiten und Modellvereinfachungen zu Abweichungen zwischen den berechneten und

² Lediglich die oberen 85 % des Speichervolumens auf 65 °C zu temperieren, kann in der Realität durch ein Heizelement realisiert werden, welches sich im Speicher an der Grenze des oberen und unteren Speichervolumens befindet. Durch Konvektion kann das Wasser im oberen Speichervolumen dadurch auf konstanter Temperatur gehalten werden und somit auch die Speicherwand. Im unteren Speicherbereich kann die Wärme hingehend nur durch Wärmeleitung durch das stehende Wasser transportiert werden. Dadurch kommt es dort zu geringeren Temperaturen, die u. a. auch von der dortigen Wärmedämmung abhängen. Für die Validierungssimulationen wurden die bei der Speicherprüfung gemessenen Temperaturen verwendet

gemessenen Werten. Diese Modellvereinfachungen ermöglichen wiederum eine vergleichsweise kurze Rechenzeit.

Bei den Wärmedämmungen 3 und 4 handelt es sich um Prototypen, welche mithilfe des Simulationsmodells entwickelt und dimensioniert wurden, um auch nach 25 Jahren Betriebszeit noch die Energieeffizienzklasse A gemäß EU-Verordnung 812/2013 zu erreichen. Die Validierungsergebnisse zeigen, dass das entwickelte Simulationsmodell geeignet ist auch weitere Wärmedämmungen zu dimensionieren bzw. diese an geänderte Anforderungen anzupassen.

Der Abschlussbericht zum Projekt „Sol4City“ ist über folgenden Link erhältlich:

<https://www.igte.uni-stuttgart.de/forschung/abgeschlossene/sol-4city/>

Danksagung

Das Forschungsprojekt Sol4City (Entwicklung integrierter solarer Energieversorgungskonzepte für klimaneutrale Gebäude der „Stadt der Zukunft“) wurde als deutsch-österreichisches Verbundvorhaben vom IGTE der Universität Stuttgart und der Viessmann Werke GmbH & Co KG auf deutscher Seite sowie u. a. der AEE INTEC und mehreren Firmen auf österreichischer Seite durchgeführt. Die deutschen Partner im Projekt Sol4City wurden durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages durch den Projektträger Jülich (PTJ) unter dem Förderkennzeichen 03ETW019A/B gefördert. Die Autoren danken für die Unterstützung und übernehmen die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung.

Highlights der IEA SHC Task 66 SolarEnergyBuildings

Harald Drück,
Claudia Scholl-Haaf

Einleitung

Die IEA SHC Task 66 „SolarEnergy Buildings“ wurde mit dem Ziel gegründet, ganzheitliche solare Energieversorgungskonzepte für klimaneutrale Gebäude und Quartiere für die „Stadt der Zukunft“ zu entwickeln und deren Bedeutung und Potenziale aufzuzeigen. In einem internationalen Team arbeiteten Expertinnen und Experten aus rund 50 Ländern zusammen. Die Laufzeit der Task 66 umfasste einen Zeitraum von mehr als drei Jahren und endete im September 2024. In diesem Beitrag werden die wesentlichen Ergebnisse der Task 66 zusammengefasst und Empfehlungen für zukünftige Aktivitäten im Bereich von SolarEnergy Buildings gegeben.

Überblick

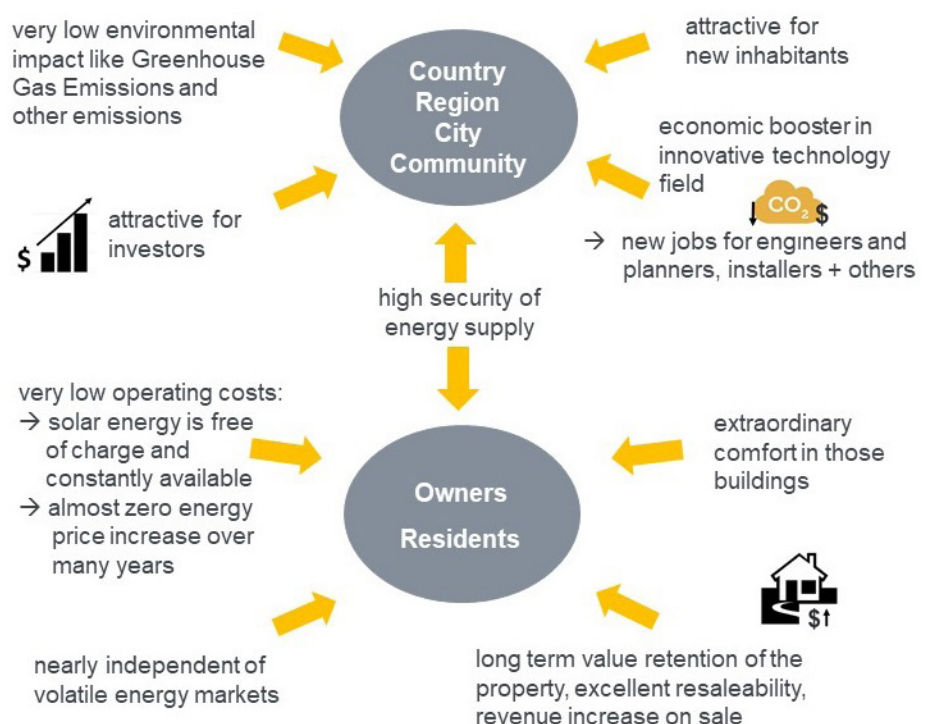
Weltweit entfallen rund 40 % des Primärenergieverbrauchs und etwa 25 % der Treibhausgasemissionen auf den Betrieb von Gebäuden. Daher ist eine deutliche Verringerung des Verbrauchs fossiler Energieträger ein wichtiges Ziel. Eine hervorragende Möglichkeit, einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen für den Betrieb von Gebäuden zu leisten, ist die Nutzung von Solarenergie. Vor diesem Hintergrund wurde die Task 66 „Solar

EnergyBuildings“ (deutsch: Solarenergiegebäude) mit dem Ziel gegründet, ökonomisch und ökologisch attraktive Energieversorgungskonzepte mit hohen solaren Deckungsanteilen¹ zu entwickeln und deren Marktdurchdringung zu erhöhen. Es wurden Einfamilienhäuser, Mehrfamilienhäuser und Quartiere betrachtet und dieses sowohl im Hinblick auf neue als auch auf bestehende Gebäude. Von der Task 66 wurden „Solar EnergyBuildings“ als Gebäude definiert, bei denen der thermische Energiebedarf für Heizung und Kühlung sowie der elektrische Energiebedarf für Haushaltsstrom und ggf. Elektromobilität weitgehend durch die Nutzung von Solarenergie gedeckt wird. Um einen wesentlichen Beitrag zur Reduzie-

rung der Treibhausgasemissionen zu leisten, sollten neue Gebäude daher so konzipiert und bestehende Gebäude energetisch so saniert werden, dass hohe solarthermische und solarelektrische Deckungsanteile im Bereich von 60 bis 100% erreicht werden können.

Ziele und Struktur der Task 66

Das Hauptziel der Task 66 war die Entwicklung von ökonomisch und ökologisch attraktiven solaren Energieversorgungskonzepten für Wärme und Strom mit hohen solaren Deckungsanteilen für neue und bestehende Gebäude und Quartiere. Die Arbeiten beinhalteten u. a. eine detaillierte Analyse von Demonstrations-Gebäuden mit hohem solaren Deckungsan-



¹ Der solare Deckungsanteil ist der Anteil der genutzten Solarenergie im Verhältnis zum Gesamtenergieverbrauch des Gebäudes, der für Heizung, Kühlung und Strom benötigt wird.

Bild 1: Ausschnitt aus der Broschüre für politische Entscheidungsträger mit Informationen bezüglich der Vorteile von SolarEnergyBuildings

teilen und eine Darstellung der verschiedenen Technologieoptionen sowie des verfügbaren Technologieportfolios für „Solar EnergyBuildings“ unter Berücksichtigung bestehender und neuer bzw. zukünftiger Technologien. Die von Dr. Harald Drück geleitete Task 66 bestand aus drei Arbeitsgruppen, sogenannten Subtasks: Die Subtask A „Randbedingungen, Bewertungsgrößen, Definitionen und Öffentlichkeitsarbeit (engl.: Boundary Conditions, Key Performance Indicators (KPIs), Definitions and Dissemination) wurde von Prof. Frank Späte von der OTH-AW (Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden) in Deutschland geleitet und konzentrierte sich auf die Definition von Bewertungsgrößen und Öffentlichkeitsarbeit. Durch diese Subtask wurden u.a. fünf Industrie-Workshops und eine Veranstaltung zur Präsentation der Task-Abschlussergebnisse mit insgesamt ca. 320 Teilnehmern durchgeführt und zwei Videos aufgenommen: Das Task 66-Informationvideo und Task 66-Ergebnisvideo. Ebenso wurden innerhalb der Subtask A Broschüren bzgl. „Informationen für Investoren“ und bzgl. „Informationen für politische Entscheidungsträger“ erstellt. In diesen Broschüren werden unter anderem die Vorteile von „Solar EnergyBuildings“ hervorgehoben, siehe Bild 1.

Neue und bestehende Gebäude und Quartiere“ (engl.: New and existing buildings and building blocks/communities) lautete der Titel von Subtask BC, welche von Dr. Elisabet Nielsen von der Technical University of Denmark (DTU), zusammen mit Dr. Xinyu Zhang und Wenbo Cai von der China Academy of Building

Research (CABR) in Peking geleitet wurde. Die Aktivitäten dieser Subtask bezogen sich hauptsächlich auf die Analyse von Energieversorgungskonzepten sowie deren Modellierung und Simulation. Die Subtask D „Aktuelle und zukünftige Technologien und Komponenten“ (engl.: Current and future technologies and components) wurde von Michael Gumbhalter und Thomas Ramschak, beide von AEE INTEC aus Österreich, geleitet und konzentrierte sich auf die Definition aktueller und zukünftiger Technologien und die techno-ökonomische Bewertung neuer Entwicklungen für Solarenergiegebäude.

In Europa sind die folgenden Technologien weit verbreitet.

- Thermische Solaranlagen für die Trinkwassererwärmung und Raumheizung
- Photovoltaikanlagen, die häufig mit Batterien als Stromspeicher kombiniert werden
- Photovoltaisch-thermische (PVT) Kollektoren. Solarthermische Luft-Sole-Kollektoren werden primär in Kombination mit Eisspeichern, aber auch als Wärmequelle für Wärmepumpen eingesetzt.
- Wärmepumpen in Kombination mit solarthermischen und photovoltaischen Systemen werden in mehr als 60 % der analysierten Solar Energy Buildings eingesetzt.

In Asien sind folgende Technologien üblich:

- Solarthermische Anlagen zur Trinkwassererwärmung
- Photovoltaikanlagen, die überwiegend zur Stromerzeugung für den Antrieb von Kältemaschinen eingesetzt werden.
- In einem besonderen Fall, in der Hochgebirgsregion des

Himalaya, wird ein solares Luftheizungssystem für die Raumheizung und die Trinkwassererwärmung eingesetzt.

Highlights der Task 66

In der Task 66 wurden 21 Demonstrationsobjekte von Solarenergiegebäuden analysiert und in der Publikation „Demonstration Cases of Solar Energy Buildings“ beschrieben.

Der Begriff Solarenergiegebäude umfasst sowohl Ein- und Mehrfamilienhäuser als auch gewerbliche Gebäude in verschiedenen Klimazonen. Die Demonstrationsobjekte (siehe Bild 2) zeigen Gebäude die sowohl über Wärmenetze, als auch dezentral mit thermischer Energie versorgt werden. Mit Ausnahme eines Gebäudes in Indien sind alle Demonstrationsobjekte jedoch an ein Stromnetz angeschlossen. „SolarEnergyBuildings“ zeichnen sich durch einen hohen solaren Deckungsanteil für Heizung, Kühlung und Strom aus. Die Demonstrationsprojekte in Europa befinden sich in Österreich, Deutschland, Polen, Portugal und Dänemark, diejenigen außerhalb Europas in China, Indien und Australien.

Für die Realisierung von „Solar EnergyBuildings“ steht ein relativ umfangreiches Technologieportfolio zur Verfügung. Die in der Task 66 durchgeführten Arbeiten haben gezeigt, dass das Spektrum der verschiedenen Technologien in den europäischen Demonstrationsgebäuden stärker ausgeprägt ist als in den asiatischen. Während in den 13 europäischen Gebäuden im Durchschnitt fünf und in australischen Objekten sechs verschiedene Technologien eingesetzt werden, um relativ hohe solare De-



Bild 2: In der Task 66 analysierte Demonstrationsgebäude bzw. SolarEnergyBuildings

ckungsanteile zu erreichen, sind es bei den asiatischen Gebäuden durchschnittlich drei. Dies ist u. a. auf die Tatsache zurückzuführen, dass die asiatischen Solar Energy Buildings meist über keine Raumheizung verfügen. Bei der Analyse der Gebäude wurde außerdem festgestellt, dass der Einsatz der verschiedenen Technologien stark regional geprägt ist.

Ein weiteres Highlight der Task 66: Das Technologie-Radar

In der Task 66 wurden in einer weiteren Analyse von 150 europäischen Solar Energy Buildings neue und innovative Technologien identifiziert. Die Ergebnisse dienten als Grundlage für die Erstellung eines Technologie-Radars. Das Technologie-Radar für Solarenergie-Gebäude umfasst über 50 verschiedene Maßnahmen, die hinsichtlich ihrer Marktverfügbarkeit und ihres Marktpotenzials

bewertet wurden. Michael Gumhalter vom österreichischen Institut AEE INTEC hat diese Arbeit geleitet. Die vielversprechendsten Technologien werden zusätzlich in Factsheets beschrieben, die im Bericht "New Technologies and Components for Solar Energy Buildings" zusammengestellt sind, der Anfang 2025 veröffentlicht wird.

Die Factsheets enthalten eine Beschreibung der jeweiligen Technologie, Hinweise zur effektiven Integration in die Gebäudetechnik oder die Gebäudehülle, Anwendungsbeispiele und eine Bewertung bezüglich ihrer Relevanz für Solar Energy Buildings.

Das Technologie-Radar gruppiert die einzelnen Maßnahmen in die folgenden vier Bereiche: Erzeugung, Speicherung, thermische Netze sowie Gebäude & Quartiere. Wir haben mehr als 50 Technologien und Lösungen im Hin-

blick auf ihre Relevanz für Solar Energy Buildings bis 2026 bewertet", erklärt Gumhalter. Dabei wurden folgende Fragen diskutiert und bewertet:

- Gibt es Barrieren, die den aktuellen und zukünftigen Markteintritt behindern?
- Gibt es nationale und internationale Normen, die eine bestimmte technische Lösung unterstützen oder behindern?
- Ist eine Technologie leistungsfähig genug, um mit ihren Vorteilen, aber auch den Kosten auf dem Markt zu bestehen?
- Wie hoch ist der Gesamtwert der Technologie in Bezug auf das Integrationspotential in zukünftige Bauprojekte einzuschätzen und damit ihr Wachstumspotenzial?

Als Ergebnis dieser umfassenden Bewertung sind im Technologie-Radar (siehe Bild 3) 24 Maßnahmen mit hoher Marktrelevanz grün

Technology Radar for Solar Energy Buildings

Market Potential



Low Middle High

Total Rating



Low Middle High



Bild 3: Technologie Radar für Solarenergiegebäude

hervorgehoben.

Ergänzend zu den heute schon weit verbreiteten Technologien wie Photovoltaik, Solarthermie, Biomassekessel und verschiedener Arten von Wärmepumpen, werden auch innovativere Lösungen wie PVT-Kollektoren, thermische Bauteilaktivierung, Eisspeicher und Niedertemperatur-Wärmenetze aufgeführt.

Fazit

Es kann zusammenfassend festgestellt werden, dass ein großes Potenzial für die Realisierung kostengünstiger „SolarEnergyBuildings“ mit minimalen CO₂-Emissi-

onen vorhanden ist. Eine Vielzahl der hierfür benötigten Technologien ist bereits verfügbar, so dass die primäre Herausforderung die Marktetablierung von „SolarEnergyBuildings“ ist. Um dieses Ziel zu erreichen, ist die Schaffung geeigneter politischer, technischer und gesellschaftlicher Rahmenbedingungen erforderlich. Von entscheidender Bedeutung ist dabei die Sensibilisierung der Gesellschaft für die Vorteile von „SolarEnergyBuildings“. Von gleicher Relevanz ist auch die Etablierung von Normen und gesetzlicher Vorgaben für die Realisierung von „SolarEnergyBuildings“, d. h. die

Modifikation der nationalen Bauvorschriften in Richtung Nullemissionsgebäude.

Um das immense Potenzial von Solar Energy Buildings zu realisieren, ist es wichtig, dass alle Akteure gemeinsam daran arbeiten, Solar Energy Buildings als DEN neuen Gebäudestandard zu etablieren.

Weitere Informationen:

<https://task66.iea-shc.org>

<https://task66.iea-shc.org/task-66-final-results-video>

<https://www.iea-shc.org/solar-academy/webinar/solar-energy-buildings>

Definition generischer Heizungsanlagen für den ökonomischen und ökologischen Vergleich

**Stephan Bachmann,
Stephan Fischer**

Einleitung

Zur Ermittlung der Kosten und der ökologischen Wirkungen von Heizungsanlagen werden aktuell verschiedene Bewertungsansätze herangezogen, wodurch Vergleiche nicht belastbar sind. Diese Herausforderung will das Projekt „Effizientes Heizen“, welches gemeinsam vom Fraunhofer ISE, dem IGTE der Universität Stuttgart sowie dem Fraunhofer IBP bearbeitet wird angehen und die vorhandenen Methoden weiterentwickeln um die Analyse der ökologischen und ökonomischen Wirkungen der Bereitstellung von Wärme in Wohngebäuden zu ermöglichen. Da die eingesetzten Heizungssysteme in Wohngebäuden zunehmend verschiedene Technologien kombinieren, werden die gängigsten und die innovativsten Systeme bewertet. Neben der Auswahl der Heiz- und Warmwasserlastprofile [1], welche durch die betrachteten Referenzgebäude (Ein- und Mehrfamilienhaus im Neubau und im Bestand) bestimmt sind, wurden deshalb im nächsten Schritt zehn zu analysierende Heizungssysteme ausgewählt. Beispielhaft soll hier die solare Kombianlage im Mehrfamilienhaus vorgestellt werden.

Solare Kombianlage mit Gas-therme im Mehrfamilienhaus (MFH)

Die solare Kombianlage im Mehrfamilienhaus wurde entsprechend

dem Gebäudeenergiegesetz (GEG 2024, § 71h) „Anforderungen an eine Wärmepumpen- oder eine Solarthermie-Hybridheizung“ ausgelegt. Daraus ergibt sich eine Solaranlage mit 22 Flachkollektoren (55,44 m²) und einem Speichervolumen von 3000 l (siehe Hydraulikschema in Bild 1). Die Wärmedämmung der Spei-

cher wurde so gewählt, dass sie nach der Verordnung (EU) Nr. 812/2013, Anhang II die Klasse B erreicht. Sowohl im Kollektorkreis, als auch für die Trinkwassererwärmung werden bedingt durch die Aufteilung des Speichervolumens sowie das benötigte Wärmeübertragungsvermögen externe Wärmeübertrager eingesetzt.

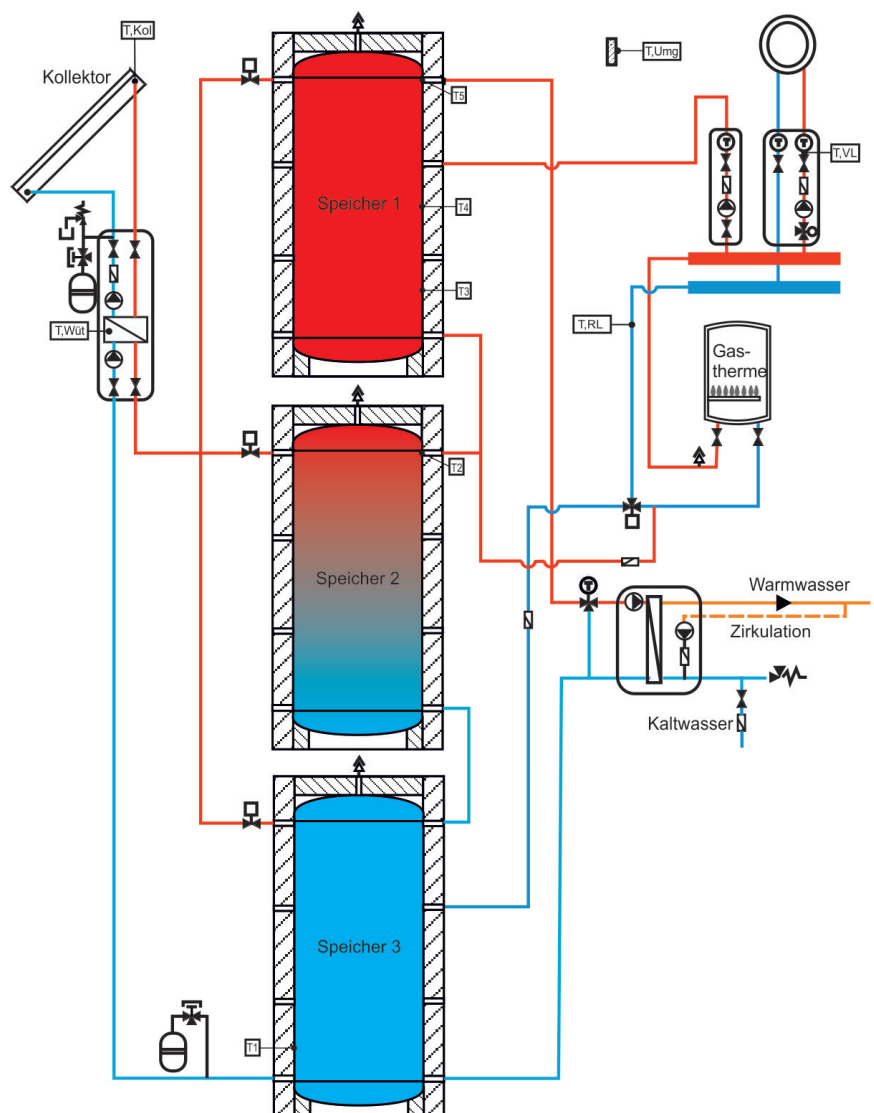


Bild 1: Q : tatsächlicher Wärmeinhalt; f_Q : Abminderungsfaktor; η : energetischer Speicherwirkungsgrad; ΔT : Temperaturdifferenz zwischen Be- und Entladung

Tabelle 1: Ergebnisse der messtechnischen und simulativen Untersuchungen

Brutto-Kollektorfläche [m²]	2,52
Konversionsfaktor $\eta_{0,b}$ [-]	0,760
Einfallswinkelkorrekturfaktor für die diffuse Strahlung K_d [-]	0,980
Wärmedurchgangskoeffizient a_1 [W/(m²K)]	3,500
temperaturabhängiger Wärmedurchgangskoeffizient a_2 [W/(m²K²)]	0,010
effektive spezifische Wärmekapazität a_5 [J/(m²K)]	8000

Die Speicher sind für eine gute thermische Schichtung in Reihe geschaltet. Das Wärmeübertragungsvermögen der Frischwasserstation wurde als Mittelwert verschiedener Herstellerempfehlungen zu 10,6 kW/K gewählt. Der externe Wärmeübertrager im Kollektorkreis ist nach VDI 6002 Blatt 1 ausgelegt. Hier wird ein

telt, welche sowohl zur Ökobilanzierung (Life Cycle Assessment, LCA) als auch zur Bestimmung der Wärmegestehungskosten (Levelised Costs of Heat, LCOH) [2] benötigt werden. Folgende weitere Heizungsanlagen werden im Projekt untersucht: Luft-Wasser-Wärmepumpe, Erdwärmepumpe, Luft-Wasser-Wärmepumpe

deutschen Bundestages vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz über den Projektträger Jülich (PTJ) unter dem Förderkennzeichen 03EN6014A und B gefördert, sowie durch die beteiligten Industriepartner finanziell und inhaltlich unterstützt. Die Autoren danken für die Unterstützung.

Tabelle 2: Gas- und Strombedarf der MFH-Gebäude mit Kombianlage

	Neubau	Bestand
Gasbedarf [m³]	5724	14606
erzeugte Wärmemenge [kWh]	56100	144000
Strombedarf [kWh](m²K)	412	691
solarer Deckungsanteil [%]	25	13

Wärmeübertragungsvermögen von 100 W/K pro Quadratmeter Kollektorfläche empfohlen.

Es wurde außerdem ein generischer Flachkollektor definiert, dessen thermische Leistungsfähigkeit im oberen Drittel der am Markt angebotenen Flachkollektoren liegt. Tabelle 1 zeigt die gewählten Parameter für diesen Flachkollektor.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Projekt „Effizientes Heizen“ werden für verschiedene Referenzgebäude generische Heizungsanlagen definiert und simulationstechnisch der Bedarf an Brennstoff und Strom ermit-

mit Gas-Brennwerttherme, Solarthermische Kombianlage mit Luft-Wasser-Wärmepumpe, Sole-Wasser-Wärmepumpe mit PVT-Kollektor als Wärmequelle, PV-Direktheizung, Pelletheizung, Brennstoffzellenheizung und Motor-BHKW.

Danksagung

Das Forschungsprojekt „Systematische Untersuchung und Bewertung der wirtschaftlichen und ökologischen Nachhaltigkeit von solarbasierten erneuerbaren Heizungssystemen im Vergleich mit alternativen Systemen“, Akronym „Effizientes Heizen“, wird aufgrund eines Beschlusses des

Literatur

- [1] Nienborg, B. et. al.: Repräsentative Lastprofile von Wohngebäuden für die ganzheitliche ökologische und ökonomische Bewertung von Heizungstechnologien, Beitrag zum 33. Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme 2023, Bad Staffelstein
- [2] Fischer, S.: Einheitliche Modellierung der Wärmegestehungskosten in Ein- und Mehrfamilienhäusern, Beitrag zum 33. Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme 2023, Bad Staffelstein

Prüfung von Luft-Sole-Kollektoren für den Einsatz als alleinige Wärmequelle für Wärmepumpen

Stephan Fischer

Einleitung

Luft-Sole-Kollektoren sind Sonnenkollektoren die neben der Solarstrahlung auch Umgebungswärme zur Wärmeerzeugung nutzen können. Somit können sie bei richtiger Dimensionierung als alleinige Wärmequelle für Sole-Wasser-Wärmepumpen genutzt werden. Luft-Sole-Kollektoren können zum einen als solarthermische Luft-Sole-Kollektoren ausgeführt sein. Hierbei wird die auftreffende Solarstrahlung ausschließlich in Wärme umgewan-

delt. Zum anderen können sie in Kombination mit PV-Modulen als PVT-Luft-Sole-Kollektoren ausgeführt sein, sodass die Solarstrahlung zur Erzeugung von Wärme und Strom genutzt werden kann. Für die richtige Auslegung des Kollektorfelds für eine gegebene Wärmepumpe ist die Kenntnis über die thermische Leistungsfähigkeit der Luft-Sole-Kollektoren notwendig. Um diese zuverlässig bestimmen zu können wurde im Projekt SolAirHX ein an die ISO 9806 [1] angelehntes Prüfverfahren entwickelt.

Prüfverfahren

Abweichend von [1] wurde folgendes Prüfverfahren festgelegt:

1. Bestimmung des Parameters a_1 in einer Innen- oder Außenprüfung bei Windstille und ohne Sonnenstrahlung. Alternativ kann zur Bestimmung von a_1 die EN 442-2 [2] herangezogen werden.
2. Durchführung einer Außenmessung nach ISO 9806, ergänzt durch Messungen ohne Sonneneinstrahlung und negativen Temperaturdifferenzen zwischen mittlerer Fluid- und Umgebungstemperatur.

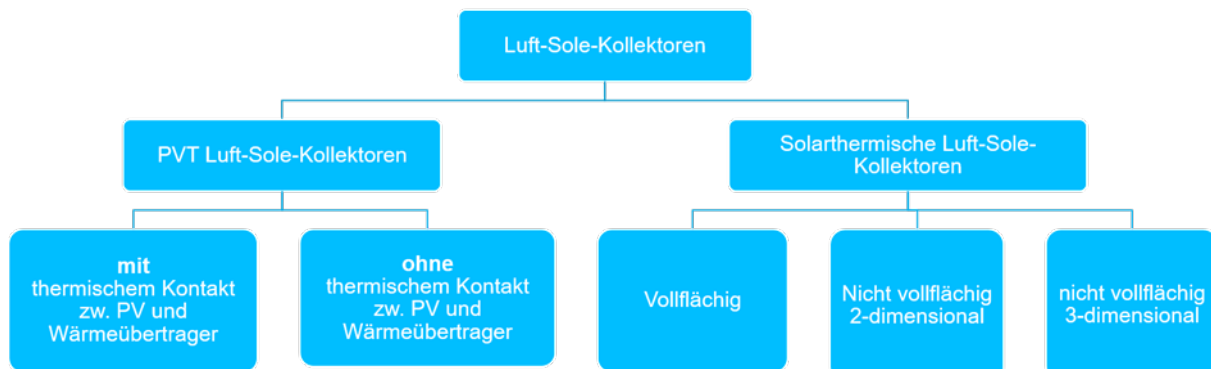


Bild 1: Klassifizierung von Luft-Sole-Kollektoren

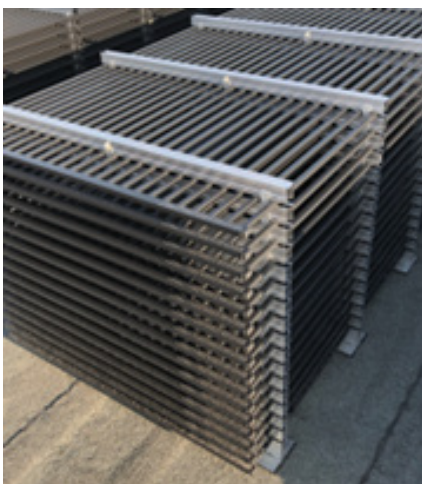


Bild 2: Beispiel für Luft-Sole-Kollektoren

Klassifizierung von Luft-Sole Kollektoren

Bild 1 zeigt die vollständige Klassifizierung von Luft-Sole-Kollektoren. In Abbildung 2 ist links ein PVT-Luft-Sole-Kollektor mit thermischem Kontakt zwischen PV-Modul und Wärmeübertrager zu sehen und rechts ein nicht vollflächig 3-dimensional ausgeführter solarthermischer Luft-Sole-Kollektor.

3. Die Parameteridentifikation erfolgt nach ISO 9806 unter folgenden Randbedingungen:

- der unter 1. Bestimmte Parameter a_1 wird fixiert
- $a_4 = 0.5$
- $a_6 = 0.05 \text{ s/m}$
- $K_d = 1$

Die für eine Prüfverfahren ungewöhnliche Festlegung von Parametern ist im vorliegenden Fall möglich da eine detaillierte Simulationsstudie zeigen konnte, dass

die Parameter a_4 , a_6 , und K_d eine untergeordnete Rolle für die Jahresarbeitszahl in der Simulation spielen.

Modellierung der thermischen Leistungsfähigkeit

Folgendes Modell, vgl. Gl. 1, für die Modellierung der thermischen Leistungsfähigkeit von Luft-Sole Kollektoren wurde festgelegt:

Zusammenfassung und Ausblick

Im Projekt „SolAirHX“ wurde ein Prüfverfahren zur Bestimmung der thermischen Leistungsfähigkeit von Luft-Sole-Kollektoren entwickelt. Die Vorteile gegen bisherigen Prüfverfahren sind:

- Unabhängige Bestimmung der Wärmeverluste aufgrund freier und erzwungener Konvektion führt zu deutlich reproduzierbaren Parametersätzen
- Festlegung der 3 Parameter a_4 , a_6 , und K_d führt zu einer deutlich kürzeren Prüfdauer

Das Prüfverfahren soll in die laufende Überarbeitung der ISO 9806 einfließen.

Danksagung

Das Forschungsprojekt „Entwicklung eines Prüfverfahrens für Luft-Sole-Kollektoren als Wärmequelle für Wärmepumpen“, Akronym „SolAirHX“, wird aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages vom Bundesministeri-

um für Wirtschaft und Klimaschutz über den Projektträger Jülich (PTJ) unter dem Förderkennzeichen 03TN0046 A gefördert, sowie durch die beteiligten Industriepartner finanziell und inhaltlich unterstützt. Die Autoren danken für die Unterstützung.

Literatur

- [1] ISO 9806:2017: Solar energy — Solar thermal collectors — Test methods, 2017, Genf, Schweiz
- [2] IEN 442-2:2014: Radiators and convectors – Part 2: Test methods and rating, Brüssel, Belgien

$$\dot{Q} = A_G \left[\eta_{0,b} K_b (\theta_L, \theta_T) G_b + \eta_{0,b} K_d G_d - a_1 (\vartheta_m - \vartheta_a) - a_3 u (\vartheta_m - \vartheta_a) + a_4 (E_L - \sigma T_a^4) - a_5 \left(\frac{d\vartheta_m}{dt} \right) - a_6 u G \right] \quad (1)$$

$\dot{Q}$	Kollektorleistung [W]
A_g	Bruttofläche [m ²]
$\eta_{0,b}$	Konversionsfaktor basierend auf der direkten Bestrahlungsstärke [-]
$K_b(\theta_L, \theta_T)$	Einfallswinkelkorrekturvermögen für die direkte Bestrahlungsstärke [-]
G_b	Direkte Bestrahlungsstärke [W/m ²]
K_d	Einfallswinkelkorrekturvermögen für die diffusen Bestrahlungsstärke [-]
G_d	Diffuse Bestrahlungsstärke [W/m ²]
a_1	Wärmedurchgangskoeffizient bei $\vartheta_{fl,m} - \vartheta_{amb} = 0$ [W/(m ² K)]
ϑ_m	Mittlere Fluidtemperatur als arithmetisches Mittel von Ein- und Austrittstemperatur
ϑ_a	Umgebungstemperatur [°C]
a_3	Koeffizient zur Beschreibung der Windabhängigkeit des Wärmedurchgangskoeffizienten
u	Windgeschwindigkeit in Kollektorebene [m/s]
a_4	Faktor zur Beschreibung der Strahlungsverluste des Kollektors [-]
E_L	Bestrahlungsstärke der Wärmestrahlung ($\lambda > 3 \mu\text{m}$) in Kollektorebene [W/m ²]
T_a	Umgebungstemperatur [K]
a_5	Effektive Wärmekapazität des Kollektors [J/(m ² K)]
$d\vartheta_m/dt$	Zeitliche Änderung der mittleren Fluidtemperatur [K/s]
a_6	Koeffizient zur Bestimmung der Windabhängigkeit der Kollektorleistung bei $\vartheta_m - \vartheta_a$

Entwicklung einer kompakten Anlage zur unabhängigen und kontinuierlichen solar-sorptiven Wassergewinnung aus der Luft

**Tamara Theimel,
Henner Kerskes**

Einleitung

Die Versorgung der wachsenden Weltbevölkerung mit ausreichend sauberem Wasser ist eine der größten Herausforderungen der Gegenwart und Zukunft. Etwa 33 % der Menschheit haben keinen oder nur sehr unzuverlässigen Zugang zu sauberem Trinkwasser [1]. In sehr ariden Regionen (r.F. <30 %) ist dies besonders kritisch. Mit 13.000 km³ bietet der Wassergehalt der Atmosphäre ein großes und überall zugängliches Potential für die Trinkwassergewinnung. Es existieren bereits kommerziell verfügbare Systeme, die dieses Potential nutzen [2–6]. Diese basieren überwiegend auf Technologien, die Wasser aus der Luft direkt kondensieren, indem die Umgebungsluft beispielsweise mittels Kompressionskältema-

schinen unter den Taupunkt der Luft abgekühlt wird.

In ariden Gebieten mit sehr niedrigem Taupunkt nahe oder unter dem Gefrierpunkt ist ein solches System – falls überhaupt umsetzbar – mit einem sehr hohen energetischen und apparativen Aufwand verbunden. Die Systeme benötigen ein Vielfaches der vom Hersteller bei Standardbedingungen angegeben elektrischen Energie [7].

Ziele

Die Arbeitsgruppe Sorptions-technik des Instituts für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart beschäftigt sich daher mit solar-sorptiven Prozessen zur Erzeugung und Rückgewinnung von Trinkwasser. Im Projekt AirWater hat das IGTE gemeinsam mit zwei Industriepartnern ein Verfahren zur Trink-

wassergewinnung aus der Luft in ariden Gebieten erarbeitet. Ziel ist die Entwicklung einer kompakten Kleinanlage zur von einem Strom- und Wassernetz unabhängigen und kontinuierlichen solar-sorptiven Wassergewinnung aus der Umgebungsluft. Des Weiteren beinhaltet das Projekt den Aufbau und Betrieb eines solchen Demonstrators am Standort Stuttgart.

Methodik

Um die Problematik des zu geringen Taupunktes zu umgehen, wird der Wassergehalt der Luft mittels eines Adsorptions-Desorptions-Prozesses erhöht. Dazu wird der geringe Wasseranteil der Luft an ein Sorptionsmaterial (aktuell Zeolith NaY) gebunden und anschließend mit einem geringeren Volumen solar erhitzter Luft wieder desorbiert. Dadurch ist der Wassergehalt wesentlich höher und

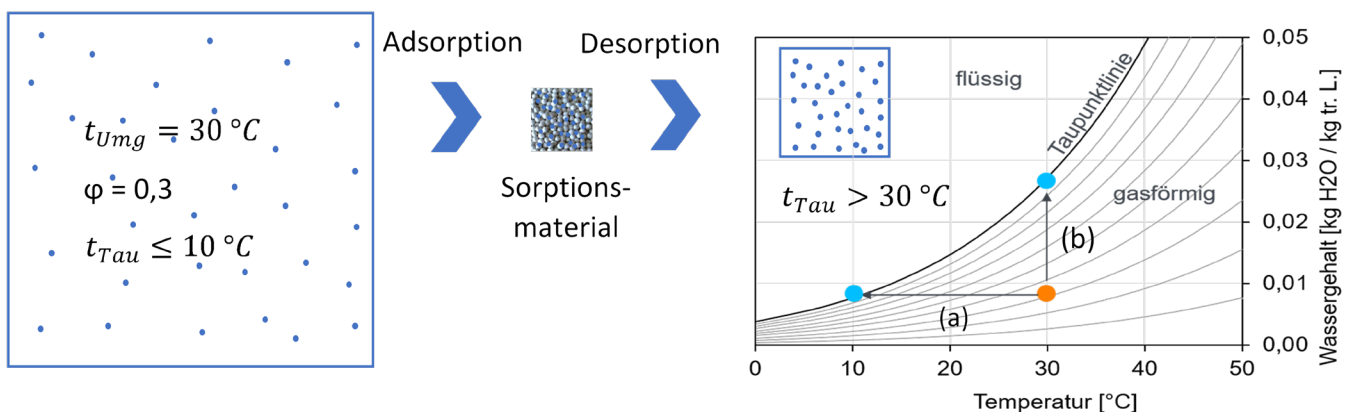


Bild 1: Erhöhung des Taupunktes durch Adsorptions-Desorptions-Prozess (b) im Vergleich zur direkten Kondensation (a) bei einer Umgebungstemperatur von 30 °C und 30% relativer Feuchte

die Taupunkttemperatur der Luft liegt statt beispielsweise zuvor bei 10,5 °C (bei Außentemperatur 30 °C und 30 % relative Feuchte) dann deutlich oberhalb der Umgebungstemperatur (vgl. Beispiel in Bild 1). Aufgrund dessen lässt sich das Wasser ohne zusätzlichen elektrischen Kühlbedarf durch Abkühlung der feuchten Luft auf Umgebungstemperatur kondensieren. In ariden Gebieten liegen die Taupunkttemperaturen der Umgebung eher unterhalb des gewählten Beispiels.

Die zwei wesentlichen Unterschiede zu den meisten bisher untersuchten Konzepten oder Systemen zur (solar-) sorptiven Wassergewinnung aus Umgebungsluft [8–11] sind zum einen der parallele Betrieb von Adsorption und Desorption und der geschlossene Desorptionskreis. Dadurch wird eine quasi-kontinuierliche Wassergewinnung ermög-

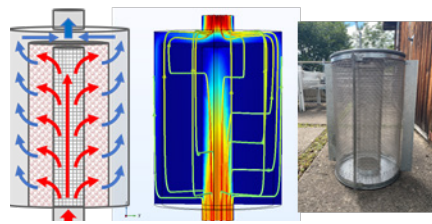


Bild 2: Radial durchströmtes Sorptionsbett im Sorptionsreaktor (Adsorber): links Schema, Mitte Simulation und rechts konstruktive Umsetzung

licht und desorbiertes Wasser, das nicht auskondensiert werden kann, wird nicht ungenutzt an die Umgebung abgegeben, sondern bleibt im Kreislauf. Außerdem kann eine Wärmerückgewinnung erfolgen. Beide Maßnahmen führen zu einem wesentlich höheren Taupunkt und erhöhen den täglichen Wasserertrag auch bei hohen Außentemperaturen. Zur Reduzierung des Druckverlustes und somit der benötigten Ven-

tilatorleistung wurde ein Reaktor-konzept mit radial durchströmtem Festbett entworfen (vgl. Bild 2). Für den parallelen Betrieb von Adsorption und Desorption wurden zwei mit einer Festbettschüttung gefüllte Sorptionsreaktoren umgesetzt (vgl. Bild 3 oben im Schema Adsorber 1 und 2 bzw. rechts unten im Bild).

Um die nach der Desorption mit Wasser angereicherte Prozessluft abzukühlen und das Wasser auszukondensieren, wurden drei parallel geschaltete Luft/Luft-Wärmeübertrager umgesetzt, die kühlseitig mit Umgebungsluft durchströmt werden (vgl. Bild 3 links unten).

Bisherige Ergebnisse

Der Demonstrator wurde erfolgreich aufgebaut und in Betrieb genommen. Der Proof of Concept ist unter in Stuttgart herrschenden klimatischen Randbedingungen

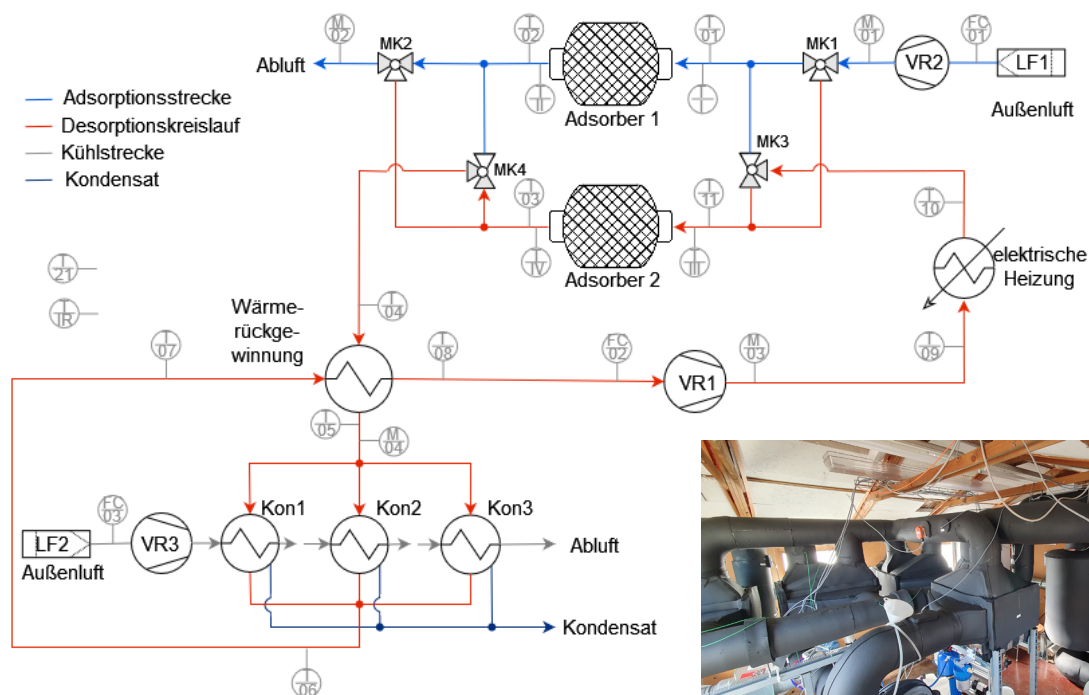


Bild 3: großes Bild: Fließschema der Gesamtanlage; rot: geschlossener Desorptions- und Kondensationskreislauf, blau: Adsorptionspfad, grau: Kühlluft, Rechts unten: Aufnahme des Realgrößendemonstrators; Adsorber 1 und 2

erfolgt. Es konnten bisher in einem Zeitraum von 10 Stunden bis zu 25 L gewonnen werden, was der Annahme der mittleren, nutzbaren Sonnenscheindauer in den geplanten Einsatzgebieten entspricht.

Auch bei hohen Umgebungstemperaturen von 30 bis 35 °C gelingt die Wassergewinnung. Durch eine spezielle Regelung konnte der Taupunkt bei 32 °C Umgebungstemperatur auf bis zu 60 °C angehoben werden.

Ausblick

Langfristiges Ziel ist es, einen Vor-Ort-Demonstrator in einem entsprechenden Gebiet mit aridem Klima und akuter Trinkwasserknappheit aufzubauen. Hierfür muss die Anlage noch optimiert und insbesondere der Aufbau kompakter gestaltet werden. Hierfür werden die Einbindung eines Wasserspeichers und Strahlungskühlung untersucht. Letzteres soll es ermöglichen, unter die Umgebungstemperatur abkühlen zu können — weiterhin ohne zusätzlichen elektrischen Energieaufwand — und so noch höhere Wassergewinnungsraten und höhere Effizienz des Systems zu erreichen.

Außerdem wird in der Arbeitsgruppe in weiteren Forschungsvorhaben die Kombination des bisherigen Wassergewinnungskonzeptes mit Gewächshäusern und Trocknungsprozessen untersucht. Beim Anbau in Gewächshäusern kann dadurch Gießwasser reduziert bzw. zurückgewonnen werden und bei Trocknungsprozessen eine schonende Trocknung bei

niedriger Temperatur und gleichbleibende Qualität des Trockengutes erreicht und als Zusatzprodukt sauberes Trinkwasser gewonnen werden.

Danksagung

Unser Dank gilt dem BMWK für die Förderung im Rahmen des Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) über den Projektträger AiF Projekt GmbH (FKZ: KK5010902RHO) ohne die das Forschungsvorhaben nicht umgesetzt werden konnte. Besonderer Dank gilt auch den Partnern HydroTec Gesellschaft für ökologische Verfahrenstechnik mbH und Richter & Stegner Steuerungstechnik GmbH, sowie der unterbeauftragten Firma SAMA Maschinenbau GmbH der SACMI Group.

Literatur

- [1] M. M. Mekonnen und A. Y. Hoekstra, „Four billion people facing severe water scarcity“ (eng), *Science advances*, Jg. 2, Nr. 2, e1500323, 2016, doi: 10.1126/sciadv.1500323.
- [2] Aidwater Global, AID770S: Technical Data Sheet. [Online]. Verfügbar unter: <http://aidwater.us/aid770.html>.
- [3] ATC Co., Ltd., Characteristics of ADpro1000. [Online]. Verfügbar unter: http://atwtec.com/?page_id=89.
- [4] AWG Contracting, AWG550. [Online]. Verfügbar unter: <https://awgcontractingus.com/product/awg550/>.
- [5] Rayagua, General Catalogue. [Online]. Verfügbar unter: https://www.rayagua.com/brochers/3.RAY%20AGUA_S%20

GENERAL%20CATALOGUE.pdf.

[6] Tsunami Products, Inc., Tsunami Products Product Brochure. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tsunamiproducs.com/downloads/Tsunami-Products-Product-Brochure.pdf>.

[7] F. Bagheri, „Performance investigation of atmospheric water harvesting systems“, *Water Resources and Industry*, Jg. 20, S. 23–28, 2018, doi: 10.1016/j.wri.2018.08.001.

[8] Farhad Fathieh et al., „Practical water production from desert air“, *Science advances*, Nr. 4, 2018.

[9] X. Zhou, H. Lu, F. Zhao und G. Yu, „Atmospheric Water Harvesting: A Review of Material and Structural Designs“, *ACS Materials Lett.*, Jg. 2, Nr. 7, S. 671–684, 2020, doi: 10.1021/acsmaterialslett.0c00130.

[10] N. Asim et al., „Sorbent-based air water-harvesting systems: progress, limitation, and consideration“, *Rev Environ Sci Biotechnol*, 2020, doi: 10.1007/s11157-020-09558-6.

[11] H. Kim et al., „Water harvesting from air with metal-organic frameworks powered by natural sunlight“ (eng), *Science (New York, N.Y.)*, Jg. 356, Nr. 6336, S. 430–434, 2017, doi: 10.1126/science.aam8743.

Zugriff am 20.11.2022

Thermischer Bauartnachweis für Schaltanlagen: Die DIN EN 61439 auf dem Prüfstand

Daniel Haag

Motivation

Schaltanlagen, oft auch als Schaltschränke bezeichnet, stellen eine wesentliche Komponente zahlreicher elektrischer Systeme in Industrie, Energieversorgung und Gebäudetechnik dar. Ihre Hauptfunktionen umfassen die Verteilung und Bereitstellung elektrischer Energie, die Steuerung und Regelung von Maschinen und Prozessen sowie die Überwachung und den Schutz der angeschlossenen Systeme [1]. Bild 1 zeigt eine typische in der Automobilindustrie eingesetzte Schaltanlage mit einem frontangebauten Kompressionskälte-Kühlgerät. Mit der fortschreitenden Digitalisierung industrieller Prozesse und der intensiveren Vernetzung von Maschinen und Anlagen kommt den Schaltanlagen als Schlüsselkomponenten der Automatisierungs-

technik eine zunehmend zentrale Rolle zu. Bestehende Maschinen und Anlagen lassen sich durch zusätzliche Hardware-Installationen in die digitale Infrastruktur integrieren. Schaltanlagen bilden im Produktionsumfeld die Schnittstelle zwischen der physischen und der digitalen Ebene und sind die Basis für die Umsetzung zahlreicher Industrie 4.0 Konzepte. Sensoren erfassen dabei große Datenmengen, die in den Schaltanlagen vorverarbeitet und an übergeordnete Steuerungs- oder Cloud-Systeme weitergeleitet werden. Mit Aktoren, die von den Schaltanlagen angesteuert werden, können Steuersignale aus diesen Systemen in die Produktion zurückgeführt werden. Durch die hohe Vernetzung aller beteiligten Systeme kann der Ausfall eines Subsystems, wie beispielsweise einer Schaltanlage, dazu führen, dass das gesamte Produktionssystem stillsteht. Die Kosten eines solchen Produktionsausfalls variieren je nach Unternehmen stark und sind branchenspezifisch, wodurch allgemeingültige Aussagen schwierig sind. Zwei nicht repräsentative Studien [2, 3] legen nahe, dass die durchschnittlichen Kosten eines Produktionsausfalls zwischen 650 Euro pro Minute in der Konsumgüterindustrie und 33.300 Euro pro Minute in der Automobilindustrie liegen können. Dies würde bei einer einstündigen Produktionsunterbrechung Schäden von etwa 39.000 Euro bzw. 2.000.000 Euro verursa-

chen. Dies verdeutlicht die Bedeutung einer hohen Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit von Schaltanlagen für die Wirtschaftlichkeit von Unternehmen. Wenn Ausfälle auftreten, sind diese nicht selten auf thermische Probleme zurückzuführen. Die elektrischen Komponenten in der Schaltanlage geben Wärme ab, die abgeführt werden muss, um die Betriebstemperatur der Komponenten unterhalb der zulässigen Grenzwerte zu halten. Die thermische Auslegung von Schaltanlagen ist daher ein zentraler Aspekt, um die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Schaltanlagen zu gewährleisten.

Bauartnachweis nach DIN EN 61439

Im industriellen Umfeld regeln Normen und Industriestandards den elektrischen und mechanischen Aufbau von Schaltschränken. Im Gegensatz zu gesetzlichen Vorgaben ist die Anwendung von Normen grundsätzlich freiwillig. Für alle Produkte, die in der Europäischen Union (EU) in Verkehr gebracht werden, besteht jedoch die Pflicht, eine CE-Kennzeichnung (Conformité Européenne) anzubringen. Diese Kennzeichnung stellt keine Zertifizierung dar, sondern eine eigenverantwortliche Konformitätserklärung des Herstellers. Mit der CE-Kennzeichnung bestätigt der Hersteller (bzw. Schaltanlagenbauer), dass die Mindestschutzziele der Niederspannungsrichtlinie 2014/35/EU – in der deutschen Rechtsübernah-



Bild 1: Typische Schaltanlage mit frontangebautem Kompressionskälte-Kühlgerät

me des 1. ProdSV (Verordnung über elektrische Betriebsmittel) – eingehalten werden. Diese Richtlinie verweist ihrerseits auf die entsprechenden EU-Normen der Reihe EN (IEC) 61439. In dieser Normenreihe sind die Anforderungen an den Bau und die Prüfung von Niederspannungs-Schaltanlagen festgelegt. Die Norm besteht aus mehreren Teilen, die sich mit unterschiedlichen Aspekten der Schaltanlagen befassen. Maßgeblich für den thermischen Bauartnachweis ist in der deutschen Übernahme der Norm die DIN EN 61439-1 [4]. Der Nachweis der zulässigen Erwärmung kann auf drei Arten erbracht werden:

Berechnung: Die Wärmeentwicklung und -abfuhr in der Schaltanlage werden vor dem Bau der Schaltanlage durch Berechnungen nachgewiesen.

Messung: Die zulässige Erwärmung wird bei Inbetriebnahme einer bereits gebauten Schaltanlage durch Messung bestätigt.

Verweis: Es wird auf eine bereits betriebene Schaltanlage gleicher Bauart verwiesen, deren zulässige Erwärmung bereits nachgewiesen ist.

Der Nachweis durch Messung wird in der Praxis wegen des hohen zeitlichen und finanziellen Aufwands kaum angewendet. Zudem ist es nicht praktikabel, nach dem Bau einer Schaltanlage noch Änderungen am Aufbau und am Kühlsystem vorzunehmen. Daher ist die Berechnung die am häufigsten angewandte Methode des thermischen Bauartnachweises. Dies bedeutet jedoch nicht, dass in der Praxis für jede Schaltanlage eine individuelle Berechnung

durchgeführt wird. Wie zuvor beschrieben, erlaubt es die Norm, auf eine ähnliche Anlage mit bereits nachgewiesener zulässiger Erwärmung zu verweisen. Dieses Vorgehen lässt in der praktischen Anwendung einigen Interpretationsspielraum. Die Verwendung gleicher elektrischer Komponenten ist zwar vorgeschrieben, wird aber in der Praxis nicht immer strikt eingehalten. Darüber hinaus können zwei baugleiche Schaltanlagen, die in unterschiedlichen Prozessen eingesetzt werden, unterschiedliche thermische Anforderungen und Betriebsbedingungen aufweisen. Im Extremfall hat die beschriebene Praxis zur Folge, dass ein Anlagenbauer eine Berechnung für einen Schaltanlagegehäusotyp durchführt und die Ergebnisse auf alle Schaltanlagen mit gleichen Außenabmessungen überträgt.

Diese Fehlinterpretation kann weniger auf eine Schwäche der Norm zurückgeführt werden als auf eine unzureichende Umsetzung in der Praxis. Schwerwiegender ist jedoch die Unklarheit über die Durchführung und den Umfang der Berechnung selbst. Die Norm schreibt nicht vor, wie die Berechnung durchzuführen ist, sondern nur, dass sie durchzuführen ist. Dies führt dazu, dass die Berechnung in der Praxis je nach handelnder Person sehr unterschiedlich ausfallen kann. In der DIN EN 61439-1 wird auf ein ergänzendes Beiblatt DIN EN 61439-1-Beiblatt 2 verwiesen, in dem ein mögliches Verfahren zur der Erwärmung beschrieben wird. Viele Anlagenplaner, -bauer und -betreiber gehen fälschlicherweise davon aus, dass

die Anwendung dieses Verfahrens verpflichtend ist, und setzen dieses mit dem thermischen Bauartnachweis gleich. Nachfolgend wird das zugrunde liegende Verfahren kurz erläutert und auf seine Anwendbarkeit und Aussagekraft hin diskutiert.

Berechnungsverfahren nach Beiblatt 2

Bei dem Berechnungsverfahren handelt es sich um ein Ein-Knotenmodell zur Berechnung der Übertemperatur der Luft in einem Schaltanlagegehäuse bei freier Konvektion. Das Berechnungsverfahren ist nicht physikalisch fundiert, sondern basiert auf empirischen Korrelationen. Ausgehend von einer Gesamtverlustleistung der elektrischen Komponenten P_v kann eine zentrale Übertemperatur der Luft im Schaltanlagegehäuse auf halber Höhe $\Delta t_{0,5}$ und durch Extrapolation eine zweite Übertemperatur unter dem Dach $\Delta t_{1,0}$ berechnet werden:

$$\Delta t_{0,5} = k \cdot P_v^x \quad (1)$$

$$\Delta t_{1,0} = c \cdot \Delta t_{0,5} \quad (2)$$

Bei den in Gleichungen (1) und (2) enthaltenen empirischen Größen handelt es sich um den Temperaturverteilungsfaktor c , die Gehäusesekstante k und den Verlustleistungsexponenten x . Diese sind basierend auf den Außenabmessungen des Schaltanlagegehäuses und der Aufstellungssituation den in Beiblatt 2 gegebenen Tabellen und Schaubildern zu entnehmen. Eine in der Industrie übliche, aber in der Norm nicht vorgesehene Erweiterung des Verfahrens ist

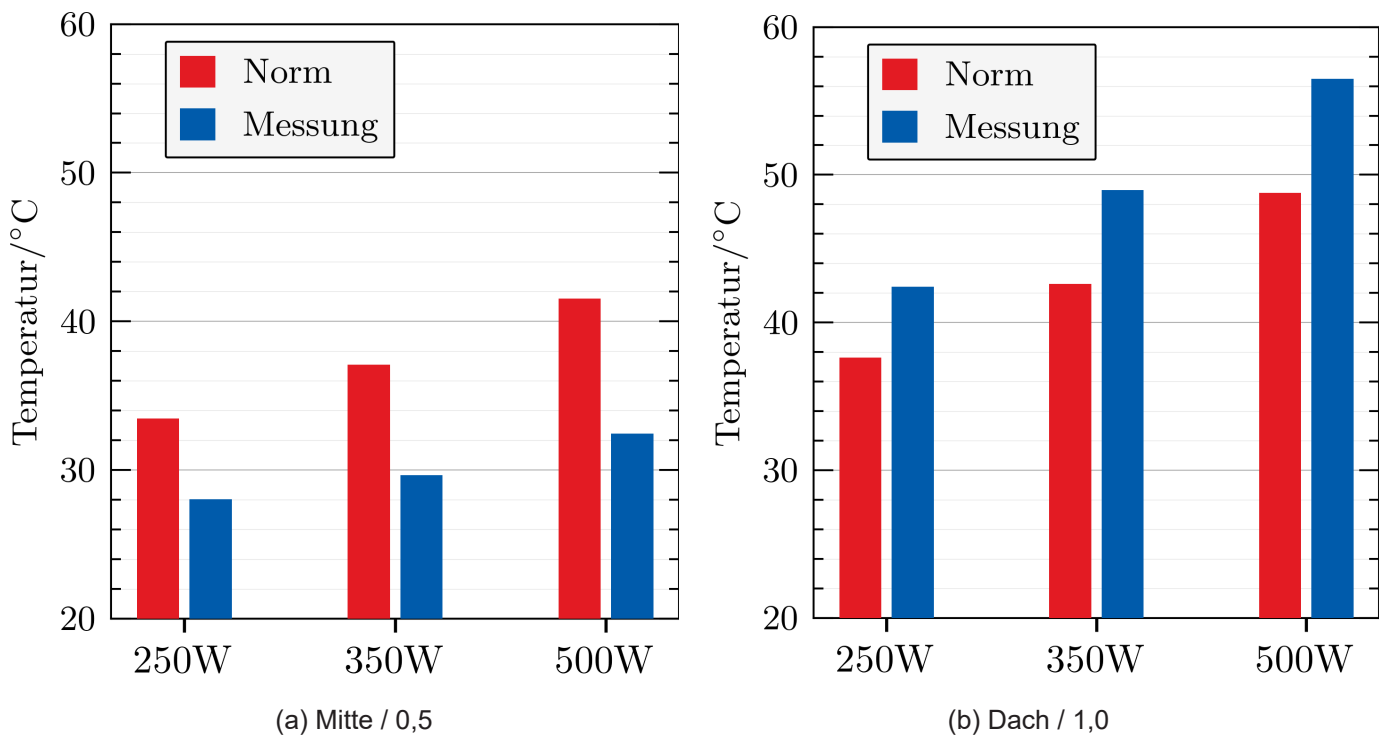


Bild 2: Vergleich der Lufttemperaturen im Schaltanlagegehäuse zwischen Norm und Messung für verschiedene Gesamtverlustleistungen

die Berücksichtigung von Kühlgeräten. Dabei wird eine Zieltemperatur im Schaltanlagegehäuse (typ. 40 °C) und eine Temperatur in der Produktionshalle (typ. 35 °C) festgelegt. Nun wird das Verfahren so angewandt, dass ein Teil der Verlustleistung über freie Konvektion an die Umgebung abgeführt wird. Dazu wird Gleichung (1) in Gleichung (2) eingesetzt und nach der Verlustleistung P'_V umgestellt, bei der die festgelegte Innenlufttemperatur erreicht wird. Die Differenz zwischen der ursprünglichen Verlustleistung P_V und der berechneten Verlustleistung P'_V wird als notwendige Kühlleistung $\dot{Q}_K$ definiert.

Es gilt laut Beiblatt 2: Die „[...] festgelegten Faktoren und Koeffizienten wurden von Messungen an einer Vielzahl von Schaltgerätekombinationen abgeleitet und das Nachweisverfahren durch den Vergleich mit Prüfergebnis-

sen bestätigt“. Aus Ingenieursicht regt sich hier schnell der Verdacht, dass das Berechnungsverfahren zu stark vereinfacht ist und die Komplexität der realen thermischen Verhältnisse in Schaltanlagegehäusen nicht abbilden kann. Oder weniger diplomatisch formuliert: Hat das Berechnungsverfahren überhaupt eine Aussagekraft? Ein exemplarischer Vergleich der Berechnungsergebnisse mit Messergebnissen an einer realen Schaltanlage soll im Folgenden eine Indikation für die Aussagekraft des Berechnungsverfahrens liefern.

Vergleich von Norm und Messung

In Bild 2 ist ein Vergleich der Lufttemperaturen im Schaltanlagegehäuse zwischen Norm und Messung für verschiedene Gesamtverlustleistungen dargestellt. Die Messungen wurden an einer

realen Schaltanlage bei deaktiviertem Kühlgerät, d.h. bei freier Konvektion, durchgeführt. Damit liegt die betrachtete Anlage im Gültigkeitsbereich des Berechnungsverfahrens nach Beiblatt 2. Es ist zu erkennen, dass die berechneten Übertemperaturen nach Beiblatt 2 die gemessenen Werte nicht reproduzieren können. Die Abweichungen nehmen mit steigender Gesamtverlustleistung zu. Für die größte betrachtete Gesamtverlustleistung von 500 W beträgt die Abweichung zwischen Norm und Messung in der Mitte des Schaltanlagegehäuses ca. +10 K und unter dem Dach ca. -8 K. Für elektronische Leistungskomponenten gilt im industriellen Umfeld die Faustregel, dass eine Temperaturerhöhung um 10 K (ausgehend von der typischen Arbeitstemperatur) die Lebensdauer der Komponenten halbiert. Abweichungen dieser Größenordnungen sind da-

her nicht vernachlässigbar. Da die Berechnungsgrundlage des Verfahrens nicht transparent ist, ist es schwierig, inhaltlich begründete Verfahrensverbesserungen vorzuschlagen. Das Verfahren ist in seiner jetzigen Form nicht geeignet, die thermische Auslegung von Schaltanlagen zuverlässig zu gewährleisten.

Fazit

Die thermische Auslegung von Schaltanlagen ist ein zentraler Aspekt, um die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Schaltanlagen sicherzustellen. Die DIN EN 61439-1 legt die Anforderungen an die Konstruktion und Prüfung von Niederspannungsschaltanlagen fest. Der Nachweis der zulässigen Erwärmung kann auf drei Arten erfolgen: Berechnung, Messung und Verweis. Wichtig ist hervorzuheben, dass die Norm nicht vorschreibt, wie die Berechnung durchzuführen ist, sondern nur, dass sie durchzuführen ist. Häufig wird hier der falsche Schluss gezogen, dass das Berechnungsverfahren nach DIN EN 61439-1 Beiblatt 2 zwingend ist. Dies ist nicht der Fall. Der Vergleich der Berechnungsergebnisse nach Beiblatt 2 mit Messungen an einer realen Schaltanlage zeigt, dass das Berechnungsverfahren für freie Konvektion nicht geeignet ist, zuverlässige Aussagen über die zu erwartenden Lufttemperaturen im Schaltanlagegehäuse zu treffen. Die zusätzliche Berücksichtigung von Kühlgeräten, die, wie oben erläutert, in der Industrie häufig durchgeführt wird, ist aus dieser Sicht keine sinnvolle Erweiterung

des Verfahrens. Da das Verfahren bei freier Konvektion nicht die erforderliche Vorhersagegenauigkeit erwarten lässt, ist eine Erweiterung auf Kühlgeräte weder vorgesehen noch sinnvoll. Es wird daher empfohlen, für die thermische Auslegung von Schaltanlagen andere Berechnungsverfahren zu verwenden. Diese müssen auf einer transparenten physikalischen Grundlage basieren und die Komplexität der realen thermischen Verhältnisse — wie z.B. den zunehmenden Einfluss der Wärmestrahlung bei höheren Temperaturen — abbilden können. Das IGTE forscht auf diesem Gebiet und entwickelt neue, innovative Berechnungsmethoden für die effiziente thermische Auslegung von Schaltanlagen.

Danksagung

Die Forschungsarbeiten des Instituts für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart auf dem Gebiet der thermo-energetischen Optimierung von elektrischen Schaltanlagen werden maßgeblich von der Friedrich Lütze GmbH aus Weinstadt gefördert. Der Autor dankt dem Unternehmen für die Unterstützung und die langjährige vertrauensvolle Zusammenarbeit.

Literatur

[1] I. Kasikci, Planung von Elektroanlagen: Theorie, Vorschriften, Praxis. Springer Berlin Heidelberg, 2018. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-56427-1>

[2] C. Scheuermann, F. Meissgeier, B. Bruegge, und S. Verclas, „Mobile Augmented Reality Based Annotation System: A Cyber-Physical Human System,“ in Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics. Springer International Publishing, 2016, S. 267–280. URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-40621-3_20

[3] „The True Cost of Downtime 2022 - How much do leading manufacturers lose through inefficient maintenance?“ Bericht Nr. DICS-B10153-00-7600, Siemens AG, 2023, Letzter Zugriff: 02.11.2024. URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:3d606495-dbe0-43e4-80b1-d04e27ada920/dics-b10153-00-7600truecostofdowntime2022-144.pdf>

[4] „DIN EN 61439-1: Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen - Teil 1: Allgemeine Festlegungen,“ Norm, Deutsches Institut für Normung (DIN), Berlin, Okt. 2021. URL: <https://www.vde-verlag.de/normen/0600335/din-en-iec-61439-1-vde-0660-600-1-2021-10.html>

[5] „DIN EN 61439-1 Beiblatt 2: Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen - Teil 1: Allgemeine Festlegungen; Beiblatt 2: Verfahren zum Nachweis der Erwärmung von Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen,“ Norm, Deutsches Institut für Normung (DIN), Berlin, Feb. 2016. URL: <https://www.vde-verlag.de/normen/0600110/din-en-61439-1-vde-0660-600-1-beiblatt-2-2016-02.html>

Absorptionswärmetransformator zur Abwärmennutzung

Luisa Haak,
Johannes Brunder

Einleitung

Absorptionswärmetransformatoren (AWT) sind thermische Energiewandler, welche Wärme von einem mittleren Temperaturniveau (ca. 70...100 °C) auf ein höheres Temperaturniveau, das Nutztemperaturniveau (ca. 90...120 °C), anheben. Dazu wird ein Teil der zugeführten Wärme auf ein niedrigeres Temperaturniveau abgewertet. Die Antriebsenergie beschränkt sich weitestgehend auf die auf mittlerem Temperaturniveau zugeführte Wärme (siehe schematische Darstellung in Bild 1). Der Strombedarf beträgt

wärmepumpen (HTWP) diskutiert. Hinsichtlich des Betriebsbereichs sind AWT weniger flexibel, da sie geringere Temperaturhübe als HTWP leisten. D.h. es ist ein höheres Temperaturniveau der Antriebs- bzw. Abwärme gefordert. Sind jedoch geeignete Abwärmequellen vorhanden, sind sowohl die CO₂-Emissionen als auch Wärmegestehungskosten sehr gering [1], [2]. Ein weiterer Vorteil von AWT ist, dass sie wegen ihrer geringen elektrischen Anschluss-

leistung im Gegensatz zu HTWP im großen Leistungsmaßstab unabhängig von den Gegebenheiten des elektrischen Energienetzes bzw. vorhandener elektrischer Transformatoren installiert werden können. Aus diesen Gründen stellen AWT eine vielversprechende Technologie für die Dekarbonisierung der Industrie dar. Außerdem könnten AWT die Integration von Abwärme in Fernwärmenetze erleichtern.

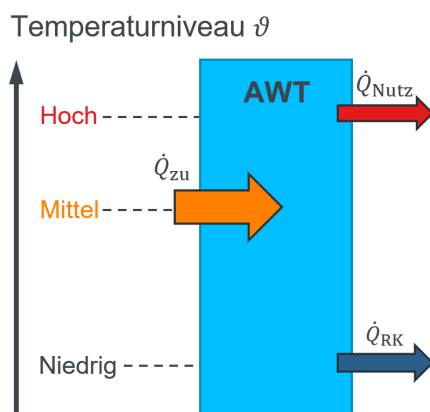


Bild 1: Schematische Darstellung Funktionsprinzip Absorptionswärmetransformator

nur wenige Prozent der thermischen Antriebsenergie. So werden AWT beispielsweise als Alternative zu Hochtemperaturkompressions-



Bild 2: Foto des am IGTE aufgebauten Absorptionswärmetransformators

Ziel und Vorgehen

Im Forschungsvorhaben „AWT“ (IGF-Vorhaben-Nr. 01IF22424 N) wird ein AWT mit Arbeitsstoffpaar Ammoniak/Wasser aufgebaut und experimentell untersucht. Ziel ist es, eine Regelung für den AWT zu entwickeln, Betriebsgrenzen aufzuzeigen und darüber hinaus ein besseres Verständnis für das Betriebsverhalten zu gewinnen.

Der entwickelte Demonstrator eines AWT ist auf eine Nutzwärmeleistung von ca. 10 kW ausgelegt und besteht weitestgehend aus Standardkomponenten (sieben Plattenwärmeübertragern, zwei Pumpen, einem Expansionsventil und einfach zu fertigenden Druckbehältern). Bild 2 zeigt ein Foto des am IGTE aufgebauten AWT.

Ergebnisse

Der AWT ist wie geplant aufgebaut und wird messtechnisch untersucht. Im Folgenden werden die Ergebnisse von fünf unterschiedlichen Messreihen vorgestellt. Diese Messreihen decken Nutztemperaturniveaus von $96\text{ °C} \leq \vartheta_{\text{Nutz}} \leq 116\text{ °C}$ bei Temperaturen der zugeführten Antriebswärme von $84\text{ °C} \leq \vartheta_{\text{zu}} \leq 90\text{ °C}$ ab. Die Temperatur der Rückkühlung, d.h. des abgegebenen Wärmestroms auf niedrigem Temperaturniveau, variiert zwischen $17\text{ °C} \leq \vartheta_{\text{RK}} \leq 29\text{ °C}$. Für diesen Betriebsbereich wird eine geeignete Befüllung von 9,1 kg Ammoniakwasserlösung mit einem Ammoniakmassenanteil von 62 % ermittelt. Damit beträgt die eingefüllte Menge an Ammoniak 4,6 kg. Bei den vorgestellten Messungen ist die Drehzahl der internen Pumpen so gewählt, dass sich konstante Füllstände in den Pumpen-

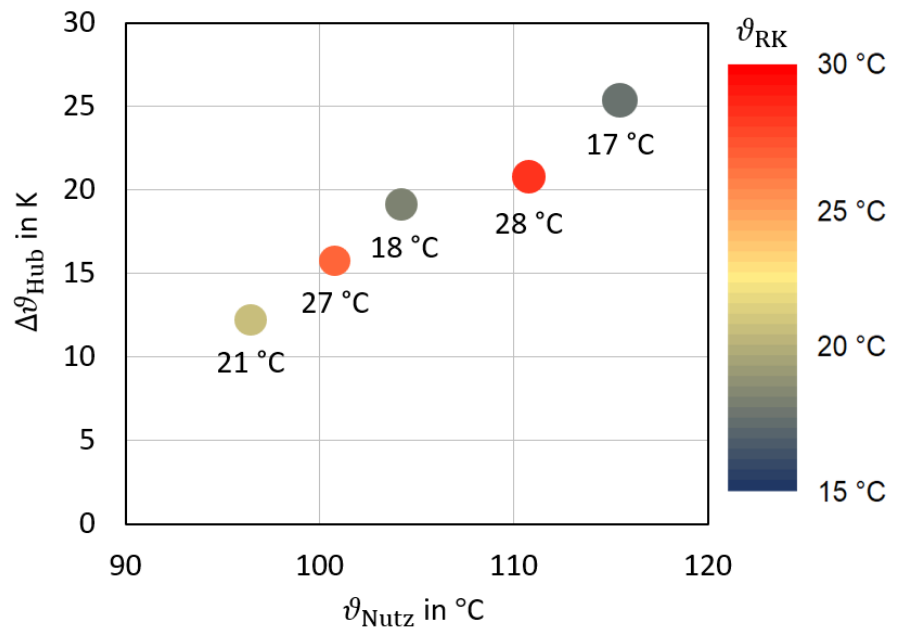


Bild 3: Temperaturhub $\Delta\vartheta_{\text{Hub}}$ über dem Temperaturniveau des Nutzwärmestroms ϑ_{Nutz}

vorlagebehältern einstellen. Der Öffnungsquerschnitt des Expansionsventils wird für je eine Temperatur ϑ_{zu} hinsichtlich des maximalen Nutzwärmestroms $\dot{Q}_{\text{Nutz}}$ eingestellt, aber nicht nach Variation der Rückkühltemperatur ϑ_{RK} angepasst.

In Bild 3 sind die erreichten Temperaturhübe $\Delta\vartheta_{\text{Hub}} = \vartheta_{\text{Nutz}} - \vartheta_{\text{zu}}$ über dem jeweiligen Nutztemperaturniveau der Messung dargestellt. Zusätzlich sind die Datenpunkte mit der jeweiligen Temperatur der Rückkühlung ϑ_{RK} beschriftet. Bei den Werten handelt es sich jeweils um zeitlich gemittelte Werte während eines stationären Betriebs.

Der größte Temperaturhub von $\Delta\vartheta_{\text{Hub}} = 25,4\text{ K}$ wird in Verbindung mit dem höchsten Temperaturniveau der Nutzwärme von $\vartheta_{\text{Nutz}} = 115,5\text{ °C}$ und der geringsten Rückkühltemperatur $\vartheta_{\text{RK}} = 17\text{ °C}$ erreicht. Für diesen Betriebspunkt ist die für den Antrieb verfügbare

Exergie, welche von der Differenz der Temperaturen von Wärmezufuhr und Rückkühlung abhängt, am größten.

Bild 4 zeigt die übertragenen Wärmeströme $\dot{Q}_{\text{Nutz}}$, $\dot{Q}_{\text{zu}}$ und $\dot{Q}_{\text{RK}}$ sowie den thermischen COP (Coefficient of Performance) als Verhältnis des Nutzwärmestroms zum zugeführten Wärmestrom:

$$COP_{th} = \frac{\dot{Q}_{\text{Nutz}}}{\dot{Q}_{\text{zu}}}$$

Die erzielten Nutzwärmeströme betragen minimal $\dot{Q}_{\text{Nutz}} = 7,1\text{ kW}$ und maximal $8,4\text{ kW}$. Der COP_{th} liegt für die fünf Messungen im Bereich von $0,38 \leq COP_{th} \leq 0,44$, wobei der höchste COP_{th} beim geringsten Temperaturniveau der Nutzwärme ϑ_{Nutz} sowie dem geringsten Temperaturhub $\Delta\vartheta_{\text{Hub}}$ erreicht wird.

Die elektrische Leistungsaufnahme der internen Pumpen beträgt in Summe $P_{el} \leq 350\text{ W}$. Wird der COP in Bezug auf die elektrische Antriebsleistung P_{el} betrachtet,

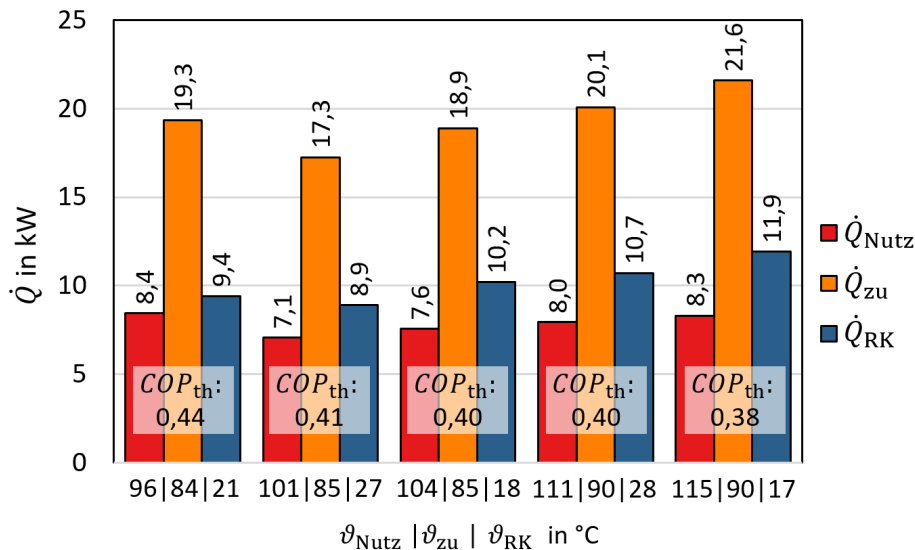


Bild 4: Auswertung der übertragenen Wärmeströme und COP_{th}

d.h.:

$$COP_{el} = \frac{\dot{Q}_{\text{Nutz}}}{P_{el}}$$

so werden Werte von $COP_{el} \approx 25$ erreicht. Im Vergleich dazu nimmt der COP_{el} von HTWP bei entsprechenden Temperaturhuben nur Werte von $COP_{el} \approx 6$ an [3]. Zu erwähnen gilt, dass die HTWP quellenseitig nur etwa ein Drittel der (Ab-)Wärme benötigt.

Zusammenfassung und Ausblick

Absorptionswärmetransformatoren (AWT) heben Wärme von einem mittleren Temperaturniveau (ca. 70...100 °C) auf ein höheres Temperaturniveau an und können somit z.B. (industrielle) Abwärme zu nutzbarer Prozesswärme aufwerten. Am IGTE wurde ein Demonstrator eines AWT im Technikumsmaßstab aufgebaut und erfolgreich in Betrieb genommen.

In einem nächsten Schritt soll eine automatisierte Regelung der internen Pumpen und des Expansionsventils mit dem Ziel der Maximierung des Nutzwärmestroms entwickelt werden. Anschließend sollen ein ausführlicheres Betriebskennfeld aufgezeichnet und die Betriebsgrenzen des Prozesses ermittelt werden.

Danksagung

Das Forschungsprojekt „AWT“ (IGF-Vorhaben-Nr. 01IF22424 N) wird im Rahmen des Programms für Industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF) durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert und vom Fernwärme-Forschungsinstitut in Hannover e.V. sowie vom Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. begleitet. Des Weiteren wird das

Forschungsprojekt in einer Kooperation mit dem Fernwärme-Forschungsinstitut (FFI) und dem Institut für Thermodynamik, Leibniz Universität Hannover bearbeitet. Die Autoren danken für die Unterstützung.

Literatur

- [1] Payá, J., Cazorla-Marín, A., Arpagaus, C., Corrales Ciganda, J.L., Hassan, A.H.: Low-Pressure Steam Generation with Concentrating Solar Energy and Different Heat Upgrade Technologies: Potential in the European Industry [online]. Sustainability, 2024, 16(5), 1733. Verfügbar unter: doi:10.3390/su16051733
- [2] Vieren, E., Demeester, T., Beyne, W., Magni, C., Abedini, H., Arpagaus, C., Bertsch, S., Artecconi, A., Paepe, M. de, Lecompte, S.: The Potential of Vapor Compression Heat Pumps Supplying Process Heat between 100 and 200 °C in the Chemical Industry [online]. Energies, 2023, 16(18), 6473. Verfügbar unter: doi:10.3390/en16186473
- [3] Arpagaus, C., Bless, F., Uhlman, M., Schiffmann, J., Bertsch, S.S.: High Temperature Heat Pumps: Market Overview, State of the Art, Research Status, Refrigerants, and Application Potentials. Energy (Oxford, U.K.), 2018, (152), 985-1010.

Netzdienlicher Betrieb von Nichtwohngebäuden durch modellgestützte prädiktive Regelung des Gebäudeenergiesystems

Christian Karczewski

Einleitung

Der Ausbau erneuerbarer, fluktuierend einspeisender Stromerzeuger und die Elektrifizierung der Wärmeversorgung führen zu größer werdenden Schwankungen der Residuallast. Bei negativen Residuallasten, entsprechend einem Überangebot an erneuerbarer Erzeugungsleistung, können erneuerbare Stromerzeuger abgeregelt werden. Bei positiven Residuallasten hingegen muss die fehlende Leistung durch elektrische Speicher oder fossile Kraftwerke gedeckt werden. Eine Möglichkeit, positive Residuallasten zu senken, besteht im Lastmanagement, bei dem die thermische Speicherfähigkeit der Gebäudemasse sowie die Toleranzbänder der raumklimatischen Sollwerte ausgenutzt werden, um heiz- und raumluftechnische Anlagen flexibel zu betreiben. Hierdurch können Gebäude energetische Flexibilität als Dienstleistung für das Stromnetz anbieten und somit einen Beitrag zur Netzstabilität sowie zum weiteren Ausbau erneuerbarer Erzeuger leisten.

Vor diesem Hintergrund werden in dieser Dissertation zwei Forschungsfragen beantwortet. Die erste Forschungsfrage umfasst die Abschätzung des Flexibilisierungspotentials deutscher Nichtwohngebäude, die mittels Wärmepumpen und Kälteanlagen beheizt

bzw. gekühlt werden. Dieses Potential resultiert aus den Leistungsreserven von Wärmepumpen und Kälteanlagen, welche anhand eines selten erreichten Auslegungspunkts dimensioniert sind, sowie aus dem Behaglichkeitsband der Raumlufttemperatur. Die zweite Forschungsfrage beschäftigt sich mit der Entwicklung einer flexiblen Regelung, welche einen netzdienlichen Gebäudebetrieb ermöglicht. Durch eine ganzheitliche Regelung der Energieströme innerhalb des Gebäudes wird die thermische Speicherfähigkeit der Gebäudemasse genutzt, um negative Flexibilität für das Stromnetz bereitzustellen.

Lastmanagement

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 (siehe Bild 1) [1]. Hierbei wird in zwei Arten von Flexibilität unterschieden. Positive Flexibilität beschreibt die Möglichkeit, die Last zu erhöhen und ist definiert als die Differenz zwischen maximaler Last und der Referenzlast. Negative Flexibilität hingegen beschreibt die Möglichkeit, die Last zu senken, also die Differenz zwischen Referenzlast und minimaler Last. Insbesondere kalte Dunkelflauten stellen eine Herausforderung für den Energiesektor dar. Nied-

rige Außenlufttemperaturen, geringe Windgeschwindigkeiten und solare Strahlungsintensitäten führen dazu, dass der Energiebedarf für Heizen hoch und die Einspeisung erneuerbarer Stromerzeuger niedrig ist. Netzdienlich betriebene Gebäude müssen daher negative Flexibilität anbieten, um ihre Leistungsaufnahme in ungünstigen Zeiten senken zu können.

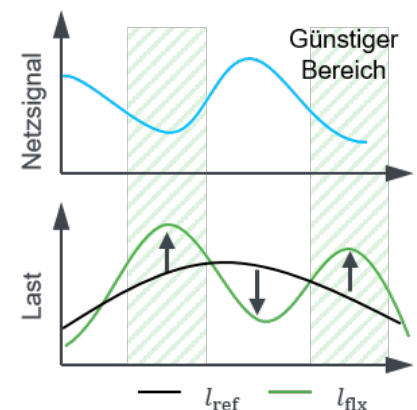


Bild 1: Grundprinzip des Lastmanagements: Die Last wird in günstigen Zeiten erhöht und in ungünstigen Zeiten reduziert.

Deutscher Nichtwohngebäudebestand

Der Gebäudesektor ist in Deutschland für etwa 40 % des Endenergieverbrauchs verantwortlich. Durch die zunehmende Elektrifizierung der Wärmeerzeugung und die steigenden Kühllasten, die zumeist durch elektrisch angetriebene Kälteanlagen abgeführt werden, ist davon auszuge-

hen, dass ein hohes Potential zum Lastmanagement vorliegt. Während für den Wohngebäudesektor bereits eine gute statistische Datenbasis vorhanden ist, besteht im Bereich der Nichtwohngebäude aufgrund einer bis vor kurzem mangelhaften Datenlage erheblicher Forschungsbedarf. Eine wesentliche Datengrundlage dieser Dissertation stellt die 2022 veröffentlichte Forschungsdatenbank EnOB:dataNWG dar, welche die wichtigsten Ergebnisse der erstmaligen statistischen Erhebung des deutschen Nichtwohngebäudebestands in Form einer Gebäudetypologie zusammenfasst [2]. Diese Gebäudetypologie gliedert den Nichtwohngebäudebestand in 33 Typgebäude mit statistisch gemittelten Eigenschaften, unterteilt in 11 Hauptfunktionen, wie z.B. Büro-, Forschungs- oder Handelsgebäude, und 3 Baualtersklassen. Insgesamt existieren in Deutschland rund 2 Millionen Nichtwohngebäude, die mindestens 3 Monate im Jahr beheizt oder gekühlt werden. 58 % dieser Gebäude wurden vor Inkrafttreten der ersten Wärmeschutzverordnung und nur 4 % der Gebäude nach dem Jahr 2010 errichtet. Im Fokus dieser Arbeit stehen elektrisch beheizte und gekühlte Gebäude, da nur diese Gebäude für die Lastflexibilisierung in Betracht kommen. Lediglich 6,7 % der deutschen Nichtwohngebäude sind elektrisch beheizt und von diesen nutzen etwa die Hälfte Wärmepumpen. Im Vergleich hierzu ist der Anteil von Klimaanlage größer: Rund 13 % der Gebäude werden aktiv gekühlt, wobei dies fast ausschließlich mit Kompressionskälteanlagen erfolgt.

Energiemanagement in Gebäuden

In Nichtwohngebäuden ist nach Stand der Technik eine Gebäudeautomation verfügbar und auch in älteren Nichtwohngebäuden wird diese aufgrund der Verpflichtungen des Gebäudeenergiegesetzes zukünftig nachgerüstet. Die Gebäudeautomation ist in der Regel zentral hierarchisch aufgebaut, bestehend aus der Managementebene an oberster Stelle, der unterlagerten Steuerungs- und Regelungsebene sowie der Komponentenebene an unterster Stelle (siehe Bild 2).

Diese Arbeit nutzt den Ansatz der modellgestützten prädiktiven Regelung (MPR), bei der auf Basis eines mathematischen Modells das zukünftige thermisch-energetische Verhalten des Gebäudes prädiziert und darauf aufbauend ein optimaler Betrieb der Anlagentechnik bestimmt wird. Eine effektive Einbindung der MPR in eine

Gebäudeautomation kann erreicht werden, indem die MPR als übergeordneter koordinierender Regler eingesetzt wird (vgl. Bild 2), der den unterlagerten Reglern optimale Führungsgrößen übergibt [3]. Eine so eingebundene MPR ist aufgrund des prädiktiven Charakters der MPR besonders für das Lastmanagement geeignet: In der Heizperiode werden in Zeiten niedriger Strompreise die Solltemperaturen der Raumluft und des Pufferspeichers und infolgedessen die Leistungsaufnahme der Wärmepumpen angepasst. In Zeiten hoher Preise hingegen werden die Solltemperaturen und hierüber die Leistungsaufnahme der Wärmepumpe gesenkt.

Methodisches Vorgehen

Die erste Forschungsfrage beschäftigt sich mit dem Flexibilisierungspotential deutscher Nichtwohngebäude. Dieses wird anhand der 33 Typgebäude aus der Gebäudetypologie nach ENOB:dataNWG bestimmt. Hierzu wird in einem ersten Schritt der Endenergiebedarf deutscher Nichtwohngebäude anhand der energetischen Bilanz nach DIN V 18599 berechnet und mit amtlichen Daten zum Energieverbrauch verglichen. Im Fokus steht die Abschätzung, wie genau der Energiebedarf auf Grundlage der Gebäudetypologie ENOB:dataNWG bestimmt werden kann. Im nächsten Schritt wird das Potential zur positiven Flexibilität berechnet, indem zuerst die Anlagentechnik ausgelegt und anschließend der Energiebedarf der Gebäude unter der Annahme bestimmt wird, dass das Behaglichkeitsband der raumklimatischen Sollwerte vollständig ausgenutzt wird.

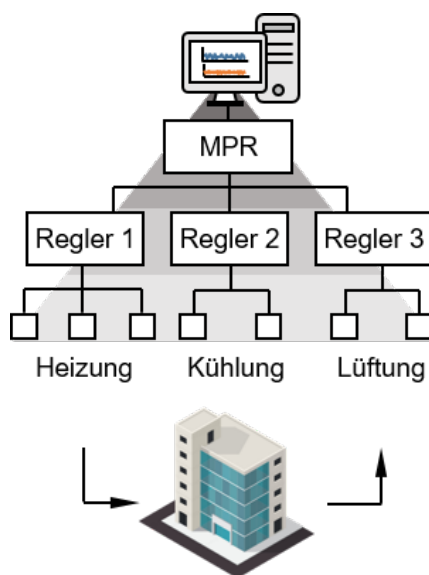


Bild 2: Hierarchisch aufgebautes Gebäudeenergiesystem mit systemübergreifender modellgestützter prädiktiver Regelung (MPR). Eigene Darstellung in Anlehnung an [3]

Die zweite Forschungsfrage adressiert zunächst die Entwicklung einer Regelstrategie, die einen netzdienlichen Gebäudebetrieb ermöglicht. Anschließend wird die neu entwickelte flexibilitätsgesteuerte Regelung durch Simulation des Lastverhaltens deutscher Nichtwohngebäude untersucht. Hierzu wird das thermisch-energetische Verhalten des Nichtwohngebäudebestands anhand vereinfachter Gebäudemodelle in Form von Widerstands-Kapazitäts-Netzwerken simuliert. In einer abschließenden Untersuchung wird anhand einer detaillierten thermisch-energetischen Gebäude- und Anlagensimulation eine Möglichkeit aufgezeigt, den entwickelten Regelungsalgorithmus in einem realen Gebäudeenergiemanagementsystem zu implementieren.

Flexibilitätsgesteuerter Gebäudebetrieb

Eine der am häufigsten vorgeschlagenen Strategien, um einen flexiblen und am Strompreis ausgerichteten Betrieb zu erreichen, ist die kostenoptimale Regelung [4]. Diese Form der MPR verfolgt das Betriebsziel, die Betriebskosten im Prädiktionshorizont zu minimieren. Bei einem kostenoptimalen Betrieb wird der Betrieb der Wärmepumpen oder Kälteanlagen in günstige Zeiträume verschoben. Die niedrigsten Betriebskosten werden je nach Heiz- oder Kühlfall durch möglichst niedrige bzw. hohe Raumlufttemperaturen erreicht, was zur Folge hat, dass eine Lastabsenkung kaum möglich ist.

Aus diesem Grund wird ein alternativer Ansatz entwickelt, der ebenfalls auf der MPR basiert, al-

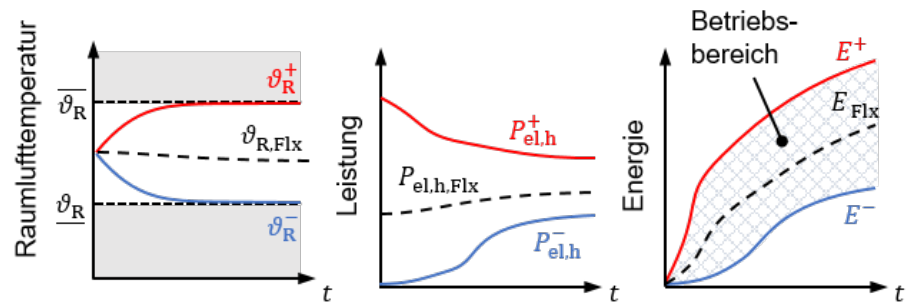


Bild 3: Verlauf der Raumlufttemperatur ϑ_R , der elektrischen Leistungsaufnahme der Wärmepumpe P_{el} sowie des Energiebandes, innerhalb dessen die Wärmepumpe flexibel betrieben werden kann

lerdings das Ziel verfolgt, die energetische Flexibilität des Gebäudes zu vergrößern. Dies wird erreicht, indem das Gebäude gezielt beladen und in einen Bereitschaftszustand mit einem hohen Anteil negativer Flexibilität versetzt wird. Für die flexibilitätsgesteuerte Regelung werden zuerst zwei Grenzfälle prädiert: das Aufheizen und das Abkühlen des Gebäudes (siehe Bild 3). Diese Grenzfälle umspannen einen Betriebsbereich, innerhalb dessen die Anlagentechnik flexibel betrieben werden kann. Der Betriebspunkt der Anlagentechnik wird so gewählt, dass das Gebäude ausgehend von einem Netzsignal sowohl positive als auch negative Flexibilität vorhält.

Ergebnisse

Die im Nichtwohngebäudebestand installierte Leistung in Form von Wärmepumpen beträgt 2 GW und entspricht rund 4,3 % der durchschnittlichen deutschen Netzlast aus dem Jahr 2022 in Höhe von 55 GW. Die Anschlussleistung der Kälteanlagen beträgt rund 5,5 GW. Im Dezember liegt die höchste Last infolge des Be-

triebs von Wärmepumpen bei durchschnittlich 1,7 GW. Im Sommer beträgt die monatlich gemittelte Last von Kälteanlagen 0,9 GW. Bezogen auf die monatlich gemittelte Last könnte die Leistungsaufnahme von Wärmepumpen im Dezember um 41 % erhöht werden. Im Kühlfall könnte die Leistungsaufnahme im Juli um 118 % erhöht werden. Das relativ gesehen höhere Flexibilisierungspotential im Kühlfall ist eine Folge des unterschiedlichen Vorgehens zur Dimensionierung der Wärme- und Kälteerzeuger. Während Kältemaschinen so ausgelegt werden, dass sie die anfallende Kühllast vollständig decken können, werden Wärmepumpen anhand eines Bivalenzpunkts ausgelegt und bieten somit geringere Leistungsreserven. Den größten Energiebedarf und das größte Potential zur Flexibilisierung bieten Gebäude mit Büro- und Industrienutzung. Um dieses Potential zu erschließen, ist ein flexibler Betrieb der Anlagentechnik in den Gebäuden notwendig. Durch eine Lastverschiebung in Zeiten niedriger Strompreise können im Heizfall bei einem kostenoptimalen Betrieb

der Anlagentechnik 20 % der Kosten eingespart werden, trotz eines energetischen Mehraufwands von 6,5 %. Der kostenoptimale Betrieb ist eng gekoppelt mit dem energieoptimalen Betrieb und es erfolgt nur dann eine Verschiebung der Last, sofern die Einsparungen die Kosten des energetischen Mehraufwands infolge einer temporären Anhebung bzw. Absenkung der Raumlufthtemperaturen überwiegen. Dementsprechend ist die negative Flexibilität des kostenoptimalen Betriebs zumeist nahe Null.

Im Gegensatz hierzu stellt die in dieser Arbeit entworfene flexibilitätsgesteuerte Regelung eine größere negative Flexibilität für das Stromnetz bereit und ermöglicht eine nennenswerte Lastverschiebung, indem bei negativen Residuallasten die Netzlast angehoben wird. Hierdurch wird elektrische Energie in Form von thermischer Energie in der Gebäudemasse gespeichert, wodurch der spätere Heiz- oder Kühlbedarf der Gebäude in Zeiten positiver Residuallasten sinkt, was den wesentlichen Mehrwert dieser Maßnahme darstellt. Während der Heizperiode wird durch die flexibilitätsgesteuerte Regelung die Möglichkeit einer Lastabsenkung von 14 % der elektrischen Anschlussleistung der Wärmepumpe über einen Zeitraum von 24 h angeboten. In der Kühlperiode beträgt das entsprechende Potential 8 %. Aus den höheren bzw. niedrigeren Raumlufthtemperaturen, die für den Bereitschaftsbetrieb not-

wendig sind, folgt ein energetischer Mehraufwand der flexiblen Regelung in Höhe von 33 % im Heizfall und 20 % im Kühlfall.

Ausblick

Für die Bereitstellung von negativer Flexibilität als Dienstleistung für das Stromnetz ist es erforderlich, dass Gebäude in einem Bereitschaftszustand gehalten werden. Dieser Bereitschaftszustand bedingt höhere oder niedrigere Raumtemperaturen im Heiz- bzw. Kühlfall, was zu einem energetischen Mehraufwand von bis zu einem Drittel führt. Seitens des Stromnetzes bietet sich zur Deckung dieses Mehraufwands insbesondere der sonst abgeregelte Überschussstrom an. Bereits heute, mit einem Anteil erneuerbarer Energien von knapp über 50 % am gesamten Stromverbrauch, kommt es regelmäßig zur Drosselung der erneuerbaren Erzeuger. Mit voranschreitendem Ausbau der Erzeugungskapazitäten ist davon auszugehen, dass auch die Ausfallarbeit und somit die ungenutzte Energie zunehmen werden. Seitens des Gebäudebetriebs bleibt jedoch die Frage unbeantwortet, wie der mit dem netzdienlichen Betrieb verbundene Mehraufwand in Echtzeit bestimmt werden kann. Diesen Mehraufwand korrekt zu rekonstruieren ist von entscheidender Bedeutung, da davon auszugehen ist, dass ein Gebäudebetreiber nur dann zu einer Flexibilisierung der Anlagentechnik bereit ist, wenn ihm daraus kein finanzieller Nach-

teil entsteht. Unter der Voraussetzung, dass der Mehraufwand bekannt ist, könnte ein mögliches Modell zur Vermarktung von Flexibilität so ausgestaltet sein, dass der Bereitschaftsbetrieb als solcher fix vergütet wird. Zusätzlich hierzu erfolgt eine variable Vergütung, wenn der Verbrauch auf ein Netzsignal hin tatsächlich gesenkt wird.

Danksagung

Ein besonderer Dank gilt der Graduierten- und Forschungsschule „Effiziente Energienutzung“ Stuttgart (GREES), deren finanzielle Unterstützung die vorliegende Dissertation ermöglicht hat.

Literatur

- [1] Bundesnetzagentur; Flexibilität im Stromversorgungssystem. Bestandsaufnahme, Hemmnisse und Ansätze zur verbesserten Erschließung von Flexibilität. Bonn, 2017.
- [2] Hörner, M. et al.; Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude. EnOB:dataNWG. Schlussbericht. Darmstadt, 2022.
- [3] Drgoňa J. et al.; All you need to know about model predictive control for buildings [online]. Annual Reviews in Control, 2020, (50), doi:10.1016/j.arcontrol.2020.09.001
- [4] T.Q. Péan et al; Review of control strategies for improving the energy flexibility provided by heat pump systems in buildings, Journal of Process Control, 2019, doi:10.1016/j.jprocont.2018.03.006.