

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 2025 aufzählen und Ihnen einen Überblick der Inhalte geben, die Sie in den folgenden Artikeln erwarten.

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

Für mich war der Besuch an der Tongji-Universität in Shanghai eines meiner persönlichen Highlights. Dort hielt ich mehrere Lehrveranstaltungen und Fachvorträge, unter anderem zu Themen der persönlichen Karriereentwicklung sowie zu „Research on Urban Decarbonization Technologies at IGTE“. Darüber hinaus hatte ich die Gelegenheit, mich mit Promovierenden über ihre aktuellen Forschungsarbeiten auszutauschen und am „Seminar on Innovation and Application of Building Ventilation and Energysaving Systems from a Sino-German Cooperation Perspective“ mitzuwirken. Inzwischen bin ich auch als Gastprofessor an der Tongji-Universität tätig. Dies bildet einen wichtigen Grundstein für eine weiter vertiefte deutsch-chinesische Zusammen-

arbeit zwischen dem IGTE und der Tongji-Universität.

Auch in diesem Jahr waren wir auf wissenschaftlichen Kongressen vertreten. Im Mai fand der TGA-Kongress in Berlin und im November die Jahrestagung des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins e.V. (DKV) in Magdeburg statt. Dort präsentierten unsere wissenschaftlichen Mitarbeitenden ihre Forschungsarbeiten dem interessierten Fachpublikum: Michael Müller: „Regelbare Dämmelemente für Fassadensysteme“ sowie „Building Monitoring, Smart Readiness Indicator, Life Cycle Assessment unter Anwendung der BIM-Methode“, Mostafa Barghash: „Dezentrale Ventilation für die Lüftung in Wohngebäuden“, Louis Tafelmaier: „NH₃-Sprühverdampfung in Rohrbündeln mit Hochleistungsrohren“, Peer Huber: „Eisspeicher als Wärmequelle für Wärmepumpen“ und Luisa Haak: „NH₃/H₂O-Absorptionswärmetransformator“,

Es freut mich, Ihnen mitteilen zu dürfen, dass uns in 2025 sieben Forschungsvorhaben neu bewilligt wurden:

Dem IGTE wurden folgende Forschungsvorhaben bewilligt:

- IntegraTE-XL: Initiative zur Marktabklärung und Verbreitung von Anlagen zur thermisch-elektrischen Energieversorgung mittels PVT-Kollektoren und Wärmepumpen für bestehende große Mehrfamilienhäuser und Gewerbeliegenschaften; Teilvor-

haben: Technologieimplementierung und Kommunikation

- innoBeLS: Entwicklung und Bewertung von innovativen Behälterkonzepten für Latentspeicher in solaren kalten Nahwärmenetzen
- WATmosfAir: Entwicklung einer Erschließungsstrategie für die solar-sorptive Trinkwassergewinnung aus der Atmosphäre in ariden Gebieten
- NGEE: Next Generation Energy Experience
- ProLuft: Entwicklung eines zukunftsfähigen Luftheizsystems mit Propan für eine energieeffiziente und flexible Wohngebäudeklimatisierung
- SKARK: Smarte Konzepte zur Integration von Abwärme und kosteneffiziente Kühlung von Rechenzentren: Synergien zwischen Rechenzentren, Kaltnahwärmenetzen und Eisspeichersystemen
- ATEX-WP: Entwicklung einer Wärmepumpe mit dem kältemittelfreien ATEX-Zyklus

Bei der FG HLK konnten folgende Forschungsvorhaben der Industriellen Gemeinschaftsforschungsbegonnen werden :

- KonTex: Weiterentwicklung von Konditionierungssystemen aus textilen Werkstoffen für die kosteneffiziente Klimatisierung von Räumen
- MonOptKir: Monitoringsystem zur energetischen Optimierung der Raumklimatisierung bei gleichzeitiger Vermeidung von biogenem Schadstoffbe-

fall zum Schutz von Kunst- und Kulturgütern am Beispiel von Kirchenräumen

- AlbeLueft: Ganzheitliche Analyse von kontinuierlich und alternierend betriebenen Lüftungsgeräten

Für die Industrielle Gemeinschaftsforschung hat der VdF HLK vor Kurzem die Autorisierung zur Antragstellung erhalten, sodass dieser weiterhin als Forschungsvereinigung in der Beantragung von vorwettbewerblichen Forschungsthemen mitwirken kann.

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

290. Personelle Veränderungen sowie Bachelor-, Studien-, Forschungs- und Masterarbeiten 2024/25

291. Heinz-Bach-Preis 2024

292. Machbarkeitsuntersuchung zur Erweiterung des Schichtlüftungskonzepts um eine vertikale Komponente

293. Vorstudie zur energetischen Optimierung der Reinraumtechnik hinsichtlich bedarfsge rechter Luftkonditionierung

294. HeatVentCon – Teil 1: Über ein dezentrales und ein übergreifendes Regeln der Raumtemperatur

295. HeatVentCon – Teil 2: Variabel-Volumenstrom-Systeme für die Lüftung in Wohngebäuden

296. Regelbare Dämmelemente – von der Simulationsstudie zum Anwendungsprüfstand

297. HEELP – über den Stand einer Software-Lösung und das Schätzen der Personenbelegung aus CO₂-Konzentrationen

298. Ganzheitliche Analyse von kontinuierlich und alternierend betriebenen Lüftungsgeräten

299. Monitoringsystem zur energetischen Optimierung der Raumklimatisierung bei gleichzeitiger Vermeidung von biogenem Schadstoffbefall an Kunst- und Kulturgütern

300. Weiterentwicklung von Konditionierungssystemen aus textilen Werkstoffen für die kosteneffiziente Klimatisierung von Räumen

301. Entwicklung einer Fassadenheiz- und -kühleinheit zur seriellen Sanierung von Bestandsgebäuden

302. Wärmegestehungskosten unterschiedlicher Wärmepumpensysteme im Einfamilienhaus Neubau

303. Untersuchung des Einflusses der Kühlwasservorlauftemperatur in einem wassergekühlten Rechenzentrum

304. Optimierung von Wärmeübertragern in Eisspeichern

305. Energieeinsparung und Klimaschutz mit intelligenten Ein-

zelraumlösungen im Gebäudebereich der Universität Stuttgart

306. Sprayverdampfer für Ammoniak Großwärmepumpen

Gerne möchte ich auch darauf hinweisen, dass im Jahre 2025 mehrere Studierende und Mitarbeitende des IGTE für ihre Forschungsarbeiten ausgezeichnet wurden. Mehr dazu im nächsten Artikel.

Ganz besonders freue ich mich über den Dienstantritt von Prof. Dr.-Ing. Simon Klink. Er wurde auf die neu am IGTE eingerichtete „THE SCHAUFLEER FOUNDATION Stiftungsprofessur Kältetechnik und Wärmepumpen“ berufen. Mehr darüber später.

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 2026.

Bleiben Sie weiterhin gesund!

Herzlichst



Konstantinos Stergiaropoulos

Personelle Veränderungen sowie Bachelor-, Studien-, Forschungs- und Masterarbeiten 2024/2025

Personelle Veränderungen

Neu am IGTE:

Christian Lodroner, M.Sc. ist seit 01.04.2025 in der Arbeitsgruppe Nachhaltige Gebäude und Quartierskonzepte tätig. Er hat einen Bachelor- (2019) und einen Masterabschluss (2022) in Maschinenbau an der Universität Stuttgart erworben. In dieser Zeit war er als studentische Hilfskraft bereits am Institut beschäftigt. Danach war er 3 Jahre in der Industrie tätig.

Louis Tafelmaier, M.Sc. ist seit 01.05.2025 in der Arbeitsgruppe Kältetechnik und Wärmepumpen tätig. Er hat an der Universität Stuttgart seinen Bachelor- und Masterabschluss im Maschinenbau erworben. Durch die Projektarbeit im Bachelorstudium ist er ans IGTE gekommen und war bis zum Abschluss des Studiums studentische Hilfskraft am Institut.

Ruben Leidel, B.Sc. ist seit 01.05.2025 in der Arbeitsgruppe Komponenten- und Systemprüfung tätig und prüft solarthermische Kollektoren. Er hat an der Universität Stuttgart den Bachelor-Studiengang Luft- und Raumfahrttechnik absolviert.

Matthias Ender, M.Sc. ist seit 01.06.2025 in der Arbeitsgruppe Raumklimatechnik tätig. Er hat einen Bachelorabschluss an der Technischen Hochschule Ulm und den Masterabschluss in Maschinenbau an der Universität Stuttgart erworben. In dieser Zeit war er bereits als studentische Hilfskraft am IGTE beschäftigt.

Prof. Dr.-Ing. Simon Klink wurde zum 01.10.2025 auf die „**THE SCHAUFLE FOUNDATION Stiftungsprofessur Kältetechnik und Wärmepumpen**“ berufen. Näheres hierzu später.

Katharina Zimmer, M.Sc. ist seit 01.11.2025 in der Arbeitsgruppe Nachhaltige Gebäude und Quartierskonzepte tätig. Sie hat einen Bachelorabschluss in Maschinenbau an der DHBW Mannheim und den Masterabschluss in Energietechnik an der Universität Stuttgart erworben.

Abgänge:

Torben Rathje, M.Sc. verließ zum 30.04.2025 das IGTE. Er war seit 01.03.2021 in der Arbeitsgruppe Raumklimatechnik beschäftigt und forschte im Bereich Aerosolausbreitung und Schalllüftung.

Daniel Haag, M.Sc. verließ das IGTE zum 30.06.2025. Er war seit 01.11.2019 in der Arbeitsgruppe Wärmeübertragung und Kältetechnik und forschte an der Schaltschrankklimatisierung.

Dipl.-Ing. (FH) Claus Twerdy war seit 01.05.2008 am Institut. Zum 31.07.2025 verabschiedete er sich nach 17 Jahren am Institut in den wohlverdienten Ruhestand.

Dipl.-Ing. (FH) Martin Huber verließ zum 31.08.2025 das IGTE. Er war seit 01.03.2024 in der Arbeitsgruppe Komponenten- und Systemprüfung tätig und prüfte solarthermische Kollektoren.

Dissertationen

Christ, Jan:

Development and Validation of an Equilibrium Thermodynamic Model for Scroll Compressors
(noch nicht veröffentlicht)

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 eine am IGTE erstellte Arbeit ausgezeichnet wurde. Den ersten Platz, der mit 5.000 € dotiert ist, belegte unser jetziger Mitarbeiter und zuvor Studierender Peer Huber mit seiner Masterarbeit „Entwicklung eines dynamischen Simulationsmodells für innovative kalte Nahwärmesysteme mit Wasser als Wärmeträgermedium sowie energetischer und ökologischer Vergleich mit konventionellen kalten Nahwärmesystemen“. Unser Dank gilt der Otto F. Scharr-Stiftung für die Förderung!

Die Josef Wund Stiftung vergibt seit 2022 unter dem Motto „Wasser für den Menschen“ den Undine Award. Der Preis wird jährlich mit einem Preisgeld von insgesamt 60.000 Euro in den drei Kategorien Lebensquelle, Lebensraum und Lebensfreude an Institutionen, Projekte oder Unternehmen vergeben. Die Ausschreibung und Bewerbung erfolgt über nationale und internationale Experten aus dem weiten Themenfeld Wasser. Unsere Mitarbeiterin Tama-

ra Theimel ist stellvertretend für die Arbeitsgruppe Sorptionstechnik am IGTE mit ihrem Forschungsvorhaben WATmosfAIR (Entwicklung einer Erschließungsstrategie für die solar-sorptive Trinkwassergewinnung aus der Atmosphäre in ariden Gebieten) mit 20.000 € ausgezeichnet worden. Unser Dank gilt den Stiftern.

Der IVS-Award wird für herausragende studentische Arbeiten (Studien-, Bachelor- und Masterarbeiten) sowie Dissertationen mit klarem Bezug zur Informatik verliehen. Unser Studierender Pierre Grimm hat für seine Masterarbeit mit dem Thema „Numerische Untersuchung der heterogenen Kondensation an Aerosolpartikeln bei Relativgeschwindigkeiten der Phasen“ einen der beiden studentischen Preise für 2025 verliehen bekommen. Herzlichen Dank für die Auszeichnung.

Der Heinz Trox-Förderpreis wird zur Nachwuchsförderung verliehen und ist mit insgesamt 10.000 € dotiert. Der Preis wird in jedem Jahr an bis zu drei Hochschulabsolventinnen und -absolventen für herausragende Abschlussarbeiten im Bereich der Klima- und Lüftungstechnik vergeben. Wir freuen uns, dass unsere Studierende Yasmin Rettkowski in 2025 mit ihrer Bachelorarbeit „Bewertung von Modellierungsansätzen zur Rauchausbreitung am Beispiel einer Industriehalle“ zu den Preisträgern gehört.

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



Preisverleihung Otto F. Scharr-Preis für Energietechnik
Rainer Otto F. Scharr (geschäftsführender Gesellschafter der Friedrich Scharr KG), Peer Huber, Prof. Dr.-Ing. Konstantinos Stergiaropoulos (Institutsleiter IGTE)



Preisverleihung Undine Award
Dr. Robert Hanea (CEO Therme Group), Tamara Theimel, Christoph Sonntag (Moderation), Sabeth Flaig (Senior Project Managerin Josef Wund Stiftung)

Serhat M. Alasahan: Messdatenerfassung und numerische Analyse zur thermischen Regeneration von Abwasserkanälen nach Wärmeentzug (Forschungsarbeit)

Clemens Baumeister: Experimentelle Untersuchung der hydrothermalen Alterung von Zeolith NAY und 13X und deren Auswirkungen auf den Adsorptionsprozess (Bachelorarbeit)

Gunnar Benesch: Entwicklung einer Regelung für einen Ammoniak/Wasser-Absorptionswärmeformator (Studienarbeit)

Daniel Bock: Simulation eines Ammoniak/Wasser-Absorptionswärmeformators (Forschungsarbeit)

Rebecca Eileen Boger: Entwicklung einer Spurengas-Messmethode zur Ermittlung der Strömungsverhältnisse an Innentüren (Masterarbeit)

Viktoriya Bondus: Untersuchung der Entrauchung eines typischen Atriums im Brandfall anhand von numerischen Strömungssimulationen (Forschungsarbeit)

Viktoriya Bondus: Numerische Modellierung und Validierung der Reifbildung mit Anwendung auf handelsübliche Wärmeübertrager (Masterarbeit)

Julius Brunner: Kostenbetrachtung der Solarfeldbeheizung für Parabolrinnenkollektoren mit Salzsäure (Forschungsarbeit)

Haowen Chen: Numerische Untersuchung der Entrauchung in einem typischen Atrium unter Berücksichtigung verschiedener Brandherd-Modelle (Masterarbeit)

Poria Esmaeili: Modellprädiktive Regelungsstrategien für ein zentrales Lüftungsgerät mit einem variablem Volumenstrom System (Masterarbeit)

Lisa Fröschle: Erarbeitung von Bewertungskriterien für die suffiziente Flächennutzung der Gebäudehülle in Kommunen und Quartieren (Studienarbeit)

Amir Hossein Ghasedi: Untersuchung zu Energieeinsparpotentialen durch Gebäudeautomationskomponenten für Nichtwohngebäude (Studienarbeit)

Pierre Grimm: Numerische Untersuchung der heterogenen Kondensation an Aerosolpartikeln bei Relativgeschwindigkeiten der Phasen (Masterarbeit)

Amélie Sophie Heinen: Energetischer Vergleich von Gaswäscheverfahren mit Ansätzen der heterogenen Kondensation an Aerosolpartikeln durch expandierende Verfahren (Forschungsarbeit)

Max Hönig: Regelung eines Absorptionswärmeformators – Optimierung des Hochdrucks hinsichtlich maximaler Effizienz und Nutzwärmeleistung (Forschungsarbeit)

Kalojan Koch: Erweiterung eines Simulationsmodells einer solarsorptiven Wassergewinnungsanlage zur Optimierung der Wasserdampfkondensation (Masterarbeit)

Julius Loydl: Entwicklung von modellgestützten Algorithmen zur Optimierung der Raumklimatisierung mittels Smart Home-Komponenten und Nutzerinteraktion (Masterarbeit)

Daniel Mayringer: Entwicklung eines Strömungssimulationsmodells für heterogene Kondensationsprozesse an Aerosolpartikeln in Kanälen (Studienarbeit)

Vincent Mercado: Entwicklung eines Simulationsmodells zur energetischen Bewertung für die Raumtechnik (Forschungsarbeit)

Frederik Mörlins: Weiterentwicklung eines Kapazitäten-Modells für innenliegende Speichermassen mit regelbarer Wärmedämmung (Forschungsarbeit)

Doreen Nothacker: Luftkonditionierung für einen Prüfstand zur Wassergewinnung durch heterogene Kondensation (Masterarbeit)

Jung Jae Park: Developing a deep reinforcement learning framework for the control optimization of a cooling tower system (Bachelorarbeit)

Yasmin Rettkowski: Bewertung von Modellierungsansätzen zur Rauchausbreitung am Beispiel einer Industriehalle (Bachelorarbeit)

Richard Riedlinger: Auslegung, Montage und Inbetriebnahme einer Modellfassade für Anwendungstests regelbarer Dämmelemente (Forschungsarbeit)

Noah Scharf: Bewertung und Entwicklung von Behälterkonzepten für Eisspeicher (Bachelorarbeit)

Mohammad Saad Shahid: Intelligente Steuerung zur Steigerung der Effizienz der Warmwasserbereitstellung durch eine Wärmepumpe (Masterarbeit)

Joannis Skempes: Entwicklung einer skriptbasierten Durchführung von CFD-Simulationen und automatisierten Ergebnisauswertung eines Raumlufstromungsmodells (Masterarbeit)

Louis Tafelmaier: Entwicklung eines Simulationsmodells zur Berechnung des Wärmeübergangs bei der Sprühverdampfung von Ammoniak (Masterarbeit)

Martin Tsvetkov: Investigating energy and cost-saving potential through optimal control in liquid cooling systems of data centers (Masterarbeit)

Constantin-Cristian Valceanu: Auslegung und Aufbau eines Modellraums für einen Demonstrator-Prüfstand (Bachelorarbeit)

Tom Werneck: Auslegung der Peripherie und Versuchskonzeptionierung für eine Schulungs-RLT-Anlagen (Bachelorarbeit)

Pan Xu: Vergleich von TRNSYS-Modellen für erdvergrabene Rohrleitungen zur Modellierung von kalten Nahwärmenetzen (Masterarbeit)

Emil Zimon: Entwicklung eines Wärmepumpen-Demonstrationsstands für lehrtechnische Zwecke an Schulen (Bachelorarbeit)

THE SCHAUFLEER FOUNDATION Stiftungs- professur Kältetechnik und Wärmepumpen

Zum Wintersemester 2025/26 wurde Dr.-Ing. Simon Klink auf die neu eingerichtete „THE SCHAUFLEER FOUNDATION Stiftungsprofessur für Kältetechnik und Wärmepumpen“ berufen. Diese Professur ist am Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart mit angesiedelt.

Prof. Dr.-Ing. Klink hat an der Universität Karlsruhe Mechatronik studiert und dort an der Fakultät für Maschinenbau promoviert. Anschließend sammelte er Erfahrungen in der Industrie im Bereich der Wärme-, Kälte- und Klimatechnik, zuletzt als Entwicklungsverantwortlicher für Luft/Wasser-Wärmepumpen bei Bosch Home Comfort in Wernau.

Diesen Erfahrungsschatz an Kontakten und Technologien wird Prof. Klink nun einbringen, um die

Energiewende zu beschleunigen – einerseits über geeignete Forschungsthemen – andererseits über die Ausbildung von Studierenden. Hierbei wird ein breites Themengebiet bearbeitet, wobei der Fokus insbesondere auf Kompressions- aber auch Sorptionskältemaschinen mit einem Leistungsbereich von Einfamilienhäusern bis hin zur Industrieanwendung liegt. Hierbei sind simultan Laboruntersuchungen sowie theoretische Arbeiten im Bereich der Simulation vorgesehen, um das erarbeitete Wissen greifbar und generisch verwendbar zu machen.

Langfristig soll damit eine Keimzelle der Kälte- und Wärmepumpentechnik an der Universität Stuttgart als Lernstätte für Studierende und attraktiver Partner für die Industrie entstehen.



Prof. Dr.-Ing. Simon Klink (links), Prof. Dr.-Ing. Peter Middendorf,
Rektor der Universität Stuttgart (rechts)

Heinz-Bach-Preis 2024 und Undine Award

Am 20. Oktober 2025 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 drei Studierende verliehen, die im Jahr 2024 ihre Studien-, Forschungs-, Bachelor- oder Masterarbeiten erfolgreich abgeschlossen haben.

Der Heinz-Bach-Preis wird vom VdF HLK und der HLK Stuttgart GmbH 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.

Der 1. Preis ging an Herrn Julius Loydl für seine Forschungsarbeit zu „Bewertung von Systemkombinationen der Nutzenübergabe mit elektrischen Strahlungsplatten nach strahlungsbezogenen Kriterien“.

Frau Viktoriya Bondus wurde mit dem 2. Preis für ihre Forschungsarbeit zum Thema „Untersuchung der Entrauchung eines typischen Atriums im Brandfall anhand von Strömungssimulationen“ ausgezeichnet.

Der 3. Preis wurde Herr Peer Huber für seine Masterarbeit über die „Entwicklung eines dynamischen Simulationsmodells für innovative kalte Nahwärmesysteme mit Wasser als Wärmeträgermedium sowie energetischer und ökologischer Vergleich mit konventionellen kalten Nahwärmesystemen“ verliehen.



Von links nach rechts: Dr.-Ing. Stephan Herrmann, Bernd Baasner (stellvertretende Vorsitzende VdF HLK), Dr.-Ing. Tobias Henzler (Geschäftsführer VdF HLK), Peer Huber, Viktoriya Bondus, Julius Loydl, Prof. Dr.-Ing. Konstantinos Stergiaropoulos (Institutsleiter IGTE), Nora Novak (Schriftführerin VdF HLK), Prof. Dr.-Ing. Michael Bauer (Vorsitzender VdF HLK)

1. Preis: Herr Julius Loydl

Bewertung von Systemkombinationen der Nutzenübergabe mit elektrischen Strahlungsplatten nach strahlungsbezogenen Kriterien

Durch den steigenden Anteil erneuerbarer Energien im Strommix sowie der veränderten Lastsituation in hochgedämmten Wohngebäuden – insbesondere durch die rein konvektiv wirksame Wärmerückgewinnung – wird der Einsatz von Systemkombinationen mit elektrischen Strahlungsplatten motiviert. In dieser Arbeit werden simulationsgestützte Analysen zur Bewertung von Systemkombinationen mit elektrischen Strahlungsplatten gegenüber Systemkombinationen nach Stand der Technik (Heizkörper und Fußbodenheizung) durchgeführt. Hierzu werden zum einen ein rechentechnisches Modell zur Simulation elektrischer Niedertemperatur-Strahlungsplatten (NT) in TRNSYS und zum anderen Algorithmen zur numerischen Berechnung und räumlichen Abbildung strahlungsbezogener Kriterien entwickelt.

Zusammenfassend lässt sich der Einsatz von NT-Strahlungsplatten im Neubau und sanierten Gebäudebestand mit Blick auf die lokale thermische Behaglichkeit und den Energieaufwand der Nutzenübergabe als zweckmäßig begründen. Dies gilt insbesondere bei zeitlich fluktuierenden Nutzenanforderungen. Darüber hinaus ist eine Optimierung der lokalen thermischen Behaglichkeit durch die Auslegung (Anzahl und Anordnung) der elektrischen NT-Strahlungsplatten möglich. Bei der Bewertung von Heizsystemen ist konsequent zwischen dem Strahlungsanteil der Wärmeleistung (in den Raum eingebrachte Heizleistung) und dem Strahlungswirkungsgrad (in Richtung Aufenthaltsbereich wirkende Heizleistung) zu unterscheiden. Beim verwendeten Heizkörper-Modell (Type362) wird eine Überschätzung der radiativen Anteile bei niedrigen Übertemperaturen vermutet.

2. Preis: Frau Viktoriya Bondus

Untersuchung der Entrauchung eines typischen Atriums im Brandfall anhand von Strömungssimulationen

Die vorliegende Arbeit untersucht anhand numerischer Strömungssimulationen ein Brandereignis in einem typischen offenen Atrium. Diese Bauform stellt aufgrund der fehlenden Trennung der Ebenen eine besondere Herausforderung für den baulichen Brandschutz dar, da giftige Rauchgase unkontrolliert aufsteigen, die Sichtverhältnisse beeinträchtigen und die Evakuierung erheblich behindern können. Um dies zu verhindern, werden Rauchabzugsanlagen eingesetzt. Im deutschsprachigen Raum fehlen jedoch spezifische Normen zur Auslegung solcher Anlagen für Atrien. Daher wird in dieser Arbeit ein Simulationsmodell in der Software ANSYS Fluent entwickelt, das künftig zur numerischen Untersuchung von Brandszenarien verwendet werden kann, um fundierte Vorhersagen für die Auslegung von Rauchabzugsanlagen zu ermöglichen.

Zunächst wird das typische Atrium auf Basis einer Geometriestudie modelliert, in der mehrere Bestandsgebäude mit Atrien untersucht werden. Anschließend wird im Rahmen einer Netzstudie eine geeignete Netzstruktur ermittelt, gefolgt von einer transienten Large Eddy Simulation des Brandereignisses. Die Ergebnisse sind plausibel und weitgehend vergleichbar mit den Resultaten einer Simulation, die mit der Software Fire Dynamics Simulator erstellt wurde. Das entwickelte Simulationsmodell erweist sich somit als zuverlässig und bietet eine solide Grundlage für die zukünftige Forschung.

3. Preis: Herr Peer Huber

Entwicklung eines dynamischen Simulationsmodells für innovative kalte Nahwärmesysteme mit Wasser als Wärmeträgermedium sowie energetischer und ökologischer Vergleich mit konventionellen kalten Nahwärmesystemen

Kalte Nahwärmesysteme dienen zur Deckung von Wärme- und Kältebedarfen von Verbrauchern und bestehen im Wesentlichen aus Wärmequellen, einem thermischen Energiespeicher, Wärmepumpen und einem kalten Nahwärmenetz zur Verteilung. Die Besonderheit in einigen dieser Systeme ist die Nutzung von Wärmequellen mit Temperaturen, die teilweise unterhalb des Gefrierpunktes von Wasser liegen. Dies bedingt in bisherigen konventionellen kalten Nahwärmesystemen die Verwendung eines Wasser-Frostschutzmittel-Gemisches als Wärmeträgermedium. Da der Einsatz von Frostschutzmitteln jedoch mit ökologischen und ökonomischen Nachteilen verbunden ist, ist die Motivation dieser Arbeit das Wärmeträgermedium im kalten Nahwärmenetz durch reines Wasser zu ersetzen. Ein aus dieser Idee resultierendes neues Versorgungskonzept wird erarbeitet und ein dynamisches Simulationsmodell erstellt, mit dessen Ergebnissen ein energetischer, ökologischer und ökonomischer Vergleich mit einem konventionellen kalten Nahwärmesystem durchgeführt wird. Im Ergebnis hat das untersuchte innovative kalte Nahwärmesystem im Vergleich eine höhere Gesamtsystemeffizienz im Heizbetrieb und eine niedrigere im Kühlbetrieb. Im ökologischen Vergleich bedingt das innovative System weniger Treibhausgas-Emissionen und hat keine negativen Umweltauswirkungen durch das Wärmeträgermedium. Im ökonomischen Vergleich zeigen sich leichte Kostenvorteile im Vergleich zum konventionellen System.

Undine Award

Auszeichnung der Forschung zur solar-sorptiven Trinkwassergewinnung aus der Luft durch den Undine Award der Josef Wund- Stiftung

Die Versorgung der wachsenden Weltbevölkerung mit ausreichend sauberem Trinkwasser ist eine der größten Herausforderungen der Gegenwart und Zukunft. Die Arbeitsgruppe Sorptionstechnik des IGTE beschäftigt sich daher bereits seit 2018 mit solar-sorptiven Prozessen zur (Rück-) Gewinnung von Trinkwasser aus der Luft.

Der Grundstein für die technische Entwicklung wurde in dem von der Vector Stiftung geförderten Projekt Koss-WaL (Kontinuierliche solar-sorptive Trinkwassergewinnung aus Luft in ariden Gebieten) durch den erfolgreichen Aufbau und Test eines Labordemonstrators gelegt. Im nächsten Schritt wurde daraufhin im Rahmen des durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Projektes AirWater (Entwicklung einer kompakten Anlage zur unabhängigen und kontinuierlichen solar-sorptiven Wassergewinnung aus der Luft in ariden Gebieten) gemeinsam mit mehreren Projektpartnern ein Realgrößendemonstrator auf dem Dach des IGTE errichtet und unter verschiedenen Randbedingungen getestet. Somit wurde der proof of concept unter den klimatischen Bedingungen von Stuttgart erbracht.

Seit dem 01.01.2025 läuft das durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) unterstützte Folgeprojekt WATmosfAIR (Entwicklung einer Erschließungsstrategie für die solar-sorptive Trinkwassergewinnung aus der Atmosphäre in ariden Gebieten). In diesem Rahmen soll das Konzept nun an die klimatischen Bedingungen des Nordens von Kamerun als repräsentative Region angepasst und optimiert werden. Das Ziel ist es, in Kooperation mit Partnern der Universität Maroua erstmals einen Demonstrator vor Ort aufzubauen und das Konzept auf Übertragbarkeit in andere aride Regionen zu prüfen.

Machbarkeitsuntersuchung zur Erweiterung des Schichtlüftungskonzepts um eine vertikale Komponente

Matthias Hartnagel

Einleitung

In Produktionsbetrieben werden durch verfahrenstechnische Prozesse luftfremde Stoffe wie Partikel, Aerosole und Gase freigesetzt. Für die Einhaltung der Anforderungen an die Luftbeschaffenheit am Arbeitsplatz sind nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik lufthygienische Maßnahmen in Form geeigneter Lüftungssysteme erforderlich, die sowohl die Schadstoffkonzentrationen im Aufenthaltsbereich begrenzen als auch thermische Behaglichkeitskriterien erfüllen.

Dies wird unter anderem in VDI 2262 Blatt 3 [1] (Luftbeschaffenheit am Arbeitsplatz) und VDI 3802 Blatt 1 [2] (Raumluftechnische Anlagen für Fertigungsstätten) formuliert.

Gleichzeitig werden durch das Gebäudeenergiegesetz (GEG 2024) [3] hohe Anforderungen an die Energieeffizienz von Nichtwohngebäuden gestellt. Für Neubauten sind Niedrigstenergiegebäude mit vergleichsweise geringem Jahres-Primärenergiebedarf und baulichem Wärmeschutz nach GEG Teil 2 auszuführen. Vor diesem Hintergrund stellen raumluftechnische Anlagen in Industriehallen einen wesentlichen Hebel zur Reduktion von Energieaufwand und CO₂-Emissionen dar.

Motivation

In der Praxis kommen in Industriehallen überwiegend Misch- oder Schichtlüftungssysteme nach VDI 3802 Blatt 1 zur Anwendung. Um die geforderten lufthygienischen und thermischen Anforderungen an die Luftbeschaffenheit im Arbeitsbereich zu erfüllen, werden im Falle einer Mischlüftung das gesamte Hallenvolumen und im Falle einer Schichtlüftung die gesamte Grundfläche bis zu einer festgelegten Schichthöhe konditioniert. Dabei müssen auch Bereiche ohne regelmäßigen Personenaufenthalt (z.B. hinter und in Maschinen, Lagerbereiche) berücksichtigt werden. Dies führt zu hohen Außenluftvolumenströmen und entsprechendem Energieaufwand für den Lufttransport sowie die Luftkonditionierung.

Die zentrale Hypothese des Forschungsvorhabens VertKom ist, dass sich durch eine gezielte räumliche Fokussierung der konditionierten Außenluft auf die Anforderungszonen (Aufenthalts-/Arbeitsbereiche) ein erheblicher Anteil des Hallenvolumens als Restzone mit reduzierten Anforderungen an die Luftbeschaffenheit betreiben lässt. Hierdurch können Außenluftbedarf, Heiz- und Kühlenergie sowie Transportenergie deutlich gesenkt werden, ohne die Kriterien an die Innenraumluftqualität und die thermische Behaglichkeit im tatsächlichen Aufenthaltsbereich von Personen zu verletzen.

Vorgehen

Die zugrunde gelegte Hallennutzung orientiert sich an einer typischen mechanischen Fertigung mit lokalen Wärme- und Stoffquellen (z. B. Werkzeugmaschinen) nach VDI 3802 Blatt 1. Für den Aufenthaltsbereich werden Raumlufttemperatur und Luftqualität so ausgelegt, dass die Kategorie II-Kriterien nach DIN EN 16798-1 [4] bzw. die Stoffbelastungsgrade nach VDI 3802 Blatt 1 für Schichtströmungen eingehalten werden. Für die Restzone werden keine spezifischen Anforderungen an die Stoffkonzentration gestellt. Es wird jedoch eine maximale Lufttemperatur von 30 °C als oberer Grenzwert festgelegt.

Lüftungskonzepte und Simulationsvarianten

Als Referenz dient eine Schichtlüftung nach VDI 3802 Blatt 1: Impulsarme, leicht untertemperierte Zuluft wird bodennah in die Halle eingebracht, durchströmt den Aufenthaltsbereich und steigt im Bereich der thermischen Lasten (Personen, Maschinen, Beleuchtung) zur Decke auf, wo die belastete Luft über Abluftöffnungen erfasst und als Fortluft abgeführt wird.

Im Projekt werden zwei Varianten numerisch untersucht:

- Variante A – Schichtlüftung (Quelllüftung): Die Zuluft wird ausschließlich bodennah in den Aufenthaltsbereich eingebracht, ohne zusätzliche ver-

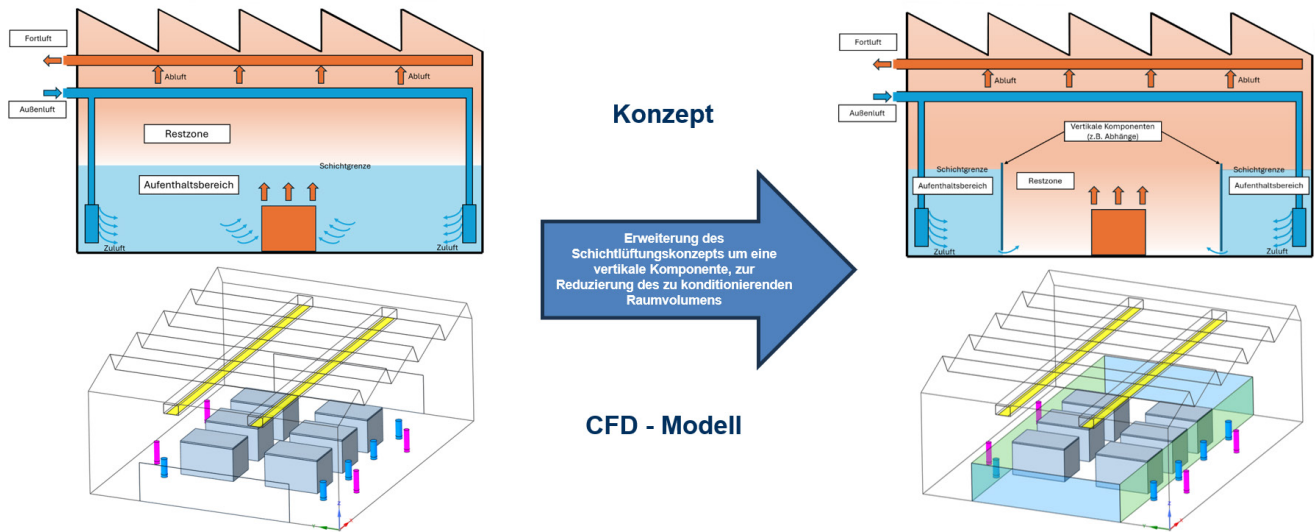


Bild 1: Vergleich Schichtlüftungskonzept A (links) vs. Schichtlüftung mit vertikaler Zonierung Konzept B (rechts)

tionale Begrenzung zwischen Aufenthalts- und Restzone. Dieses Konzept entspricht dem Stand der Technik für Schichtlüftung in hohen Räumen und Industriehallen.

- Variante B – Schichtlüftung mit vertikaler Zonierung (VertKom): Zusätzlich zur horizontalen Schichtung werden vertikale Komponenten (z.B. Abhängungen) eingesetzt, um einzelne Aufenthaltsvolumina

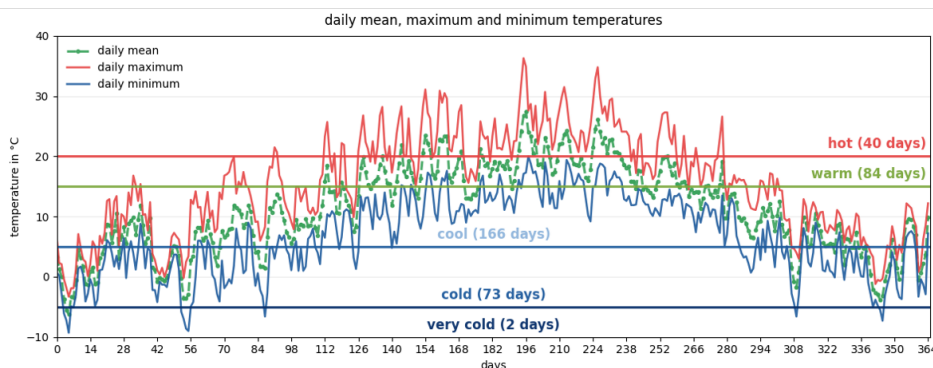
innerhalb der Halle „scharf“ gegen die Restzone abzugrenzen. Die konditionierte Außenluft wird gezielt in diese Anforderungszonen eingebracht, die Restzone wird mit freier Lüftung über Nachströmöffnungen in den Wänden (z.B. Hallentor, Fenster, Nachströmgitter) versorgt.

Bild 1 zeigt schematisch das Schichtlüftungskonzept A (links) gegenüber dem erweiterten

Schichtlüftungskonzept (B) mit vertikaler Zonierung (rechts) sowie die zugrunde gelegten Simulationsmodelle.

Numerische Bewertung und energetische Einordnung

Die Luftströmung sowie die Temperatur- und Stoffverteilung in der Modellhalle werden mit dreidimensionalen numerischen Strömungssimulationen (CFD) untersucht. Hierbei werden unter Verwendung



Typtag	Temperaturbereich	Mittelwert	Taganzahl je Jahr	Datum	Tag	Zähltag
very cold	< -5 °C	-5,87	2	05. Jan	Fr	5
cold	-5 °C bis 5 °C	1,06	73	11. Feb	So	42
cool	5 °C bis 15 °C	9,78	166	15. Oct	Mo	288
warm	15 °C bis 20 °C	17,53	84	26. May	Sa	146
hot	> 20 °C	22,56	40	11. Jun	Mo	162

Bild 2: Typtage VertKom – TT00 (very cold) bis TT04 (hot)

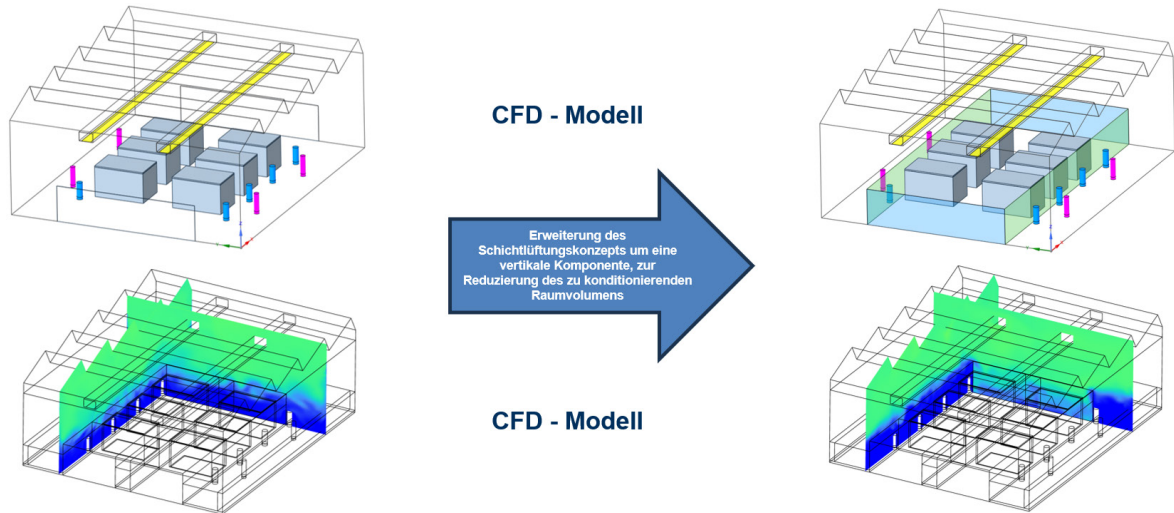


Bild 3: Stoffausbreitung TT04

von Typtagen gemäß DIN EN 16798-1 (Nutzungsprofile und Klimarandbedingungen) – basierend auf dem Testreferenzjahr 2010 und dem Standort Stuttgart – fünf Typtage definiert und diese als Simulationsvarianten festgelegt.

Bild 2 zeigt die zugrunde gelegten Typtage. Diese umfassen TT00 (very cold), TT01 (cold), TT02 (cool), TT03 (warm) und TT04 (hot).

Bild 3 zeigt die resultierende Stoffausbreitung der beiden Luftführungskonzepte für den Typtag

TT04 (hot). Links wird hierbei das Schichtlüftungskonzept A und rechts das erweiterte Schichtlüftungskonzept B mit vertikaler Zonierung dargestellt.

Ergebnisse

Auf Basis der CFD-Ergebnisse werden unter Verwendung der Typtage und der daraus resultierenden Gewichtung der Simulationsvarianten der saisonale Heiz- bzw. Kühlenergiebedarf, die Ventilatorarbeit, sowie der Stoff- und Wärmebelastungsgrad

für die beiden zu vergleichenden Lüftungskonzepte ermittelt. Bild 4 zeigt die Typtag-gewichteten prozentualen Einsparungen/Erhöhungen des erweiterten Schichtlüftungskonzeptes mit vertikaler Zonierung (Konzept B) gegenüber der Schichtlüftung (Konzept A).

Die Typtag-gewichtete Auswertung zeigt, dass das erweiterte Schichtlüftungskonzept mit vertikaler Zonierung die Luftqualität im Aufenthaltsbereich deutlich verbessert: Die Schadstoffkonzentration in der Aufenthaltszo-

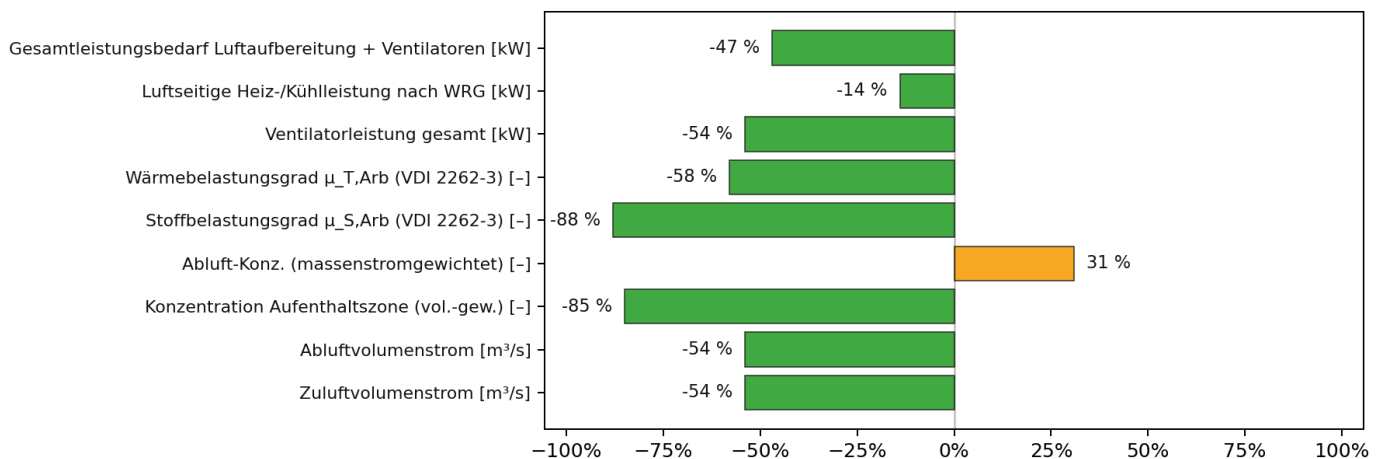


Bild 4: Ergebnisse – Typtag-gewichteter Mittelwert der Abweichungen (Konzept B vs. A)

ne und der zugehörige Stoff- und Wärmebelastungsgrad ($\mu_{(S, Arb)}$ und $\mu_{(T, Arb)}$) liegen deutlich unter den Werten der Referenzvariante, während die höhere Abluftkonzentration auf eine gezieltere Erfassung der verunreinigten Luft in der Restzone hinweist. Der Belastungsgrad μ gibt das Verhältnis des im Aufenthaltsbereich wirksamen Massen-/Wärmestroms zum in den Raum freigesetzten Massenstrom luftfremder Stoffe bzw. zum Gesamtwärmestrom an. Gleichzeitig können die Zu- und Abluftvolumenströme sowie der Gesamtleistungsbedarf für die Konditionierung und Ventilatoren Typtag-gewichtet um rund die Hälfte reduziert werden. Damit erreicht die vertikal zonierende Schichtlüftung (Konzept B) bei signifikant niedrigerem Energieeinsatz einen deutlich verbesserten lufthygienischen Raumzustand als die Schichtlüftung (Konzept A).

Ausblick

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass die Erweiterung der etablierten Schichtlüftung um eine vertikale Komponente grundsätzlich geeignet ist, die nach den einschlägigen Richtlinien geforderte Luftqualität im Aufenthaltsbereich sicherzustellen und gleichzeitig das energetisch zu konditionierenden Luftvolumen deutlich zu reduzieren. Weitere energetische Potenziale könnten insbesondere an

kalten Typtagen durch eine optimierte Regelung gehoben werden.

In einem Folgeprojekt sollen unter anderem folgende Fragestellungen vertieft untersucht werden:

- Durchführung einer Sensitivitätsanalyse hinsichtlich Hallengeometrie, Lastverteilung, Ausgestaltung der vertikalen Komponenten sowie geeigneter Regelstrategien.
- Konzeption und Realisierung eines Versuchsaufbaus mit reduziertem Maßstab im Raumluftrömungslabor zur Validierung der Simulationsergebnisse.
- Implementierung des Vert-Kom-Lüftungskonzept in einer bestehenden Industriehalle zur In-situ-Untersuchung unter realen Betriebsbedingungen.

Danksagung

Diese Vorstudie wird vom Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. gefördert (FKZ: VdF-2024-01). 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] VDI 2262 Blatt 3: Luftbeschaffenheit am Arbeitsplatz; Minderung der Exposition durch luftfremde Stoffe; Lufttechnische Maßnahmen
- [2] VDI 3802 Blatt 1: Raumluftechnische Anlagen für Fertigungsstätten
- [3] Gebäudeenergiegesetz (GEG 2004)
- [4] DIN EN 16798-1: Energetische Bewertung von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden - Teil 1: Eingangsparemeter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumlufqualität, Temperatur, Licht und Akustik

Vorstudie zur energetischen Optimierung der Reinraumtechnik hinsichtlich bedarfsgerechter Luftkonditionierung

Lukas Siebler, Vincent Mercado

Einleitung

An die Raumluftechnik für Reinräume werden hinsichtlich deren Luftreinheit, Temperatur und Feuchte hohe Anforderungen gestellt. Die Aufrechterhaltung dieser Bedingungen gemäß DIN EN ISO 14644-1 [1] erfordert einen kontinuierlichen Luftaustausch mit insbesondere hohen Umluftströmen, was in Kombination mit energieintensiven Filter- und Kühlsystemen zu einem hohen Energiebedarf führt. Zusätzlich gibt es in Reinräumen einen Aufbau unterschiedlicher Druckstufen. Hierbei wird durch Überdruck in höher klassifizierten Bereichen verhindert, dass verunreinigte Luft aus angrenzenden Räumen eindringen kann.

Im Betrieb bleiben variable Größen wie Personenzahlen, Maschinenbetrieb oder Materialbewegungen in der Regel unberücksichtigt, obwohl sie ausschlaggebend für stoffliche Lasten und damit auch die Partikelkonzentrationen sind. Dadurch werden die Lüftungsanlagen meist als Konstant-Volumenstrom-System (KVS) betrieben, was zu ineffizientem Energieeinsatz und erhöhten Betriebskosten führt. Vor dem Hintergrund nationaler und europäischer Klimaziele sowie steigender Anforderungen an die Ressourcenschonung rückt daher die energetische Optimierung des Gebäudebetriebs zunehmend in den Fokus. Insbesondere für die Konditionierung von

Reinräumen fallen aufgrund der hohen Umluftwechsel bzw. des damit verbundenen Lufttransports hohe absolute Energieaufwände an, wodurch Einsparungen in diesem Bereich besonders wirksam sind.

Methodik

Im Rahmen der Vorstudie wird ein Simulationsmodell entwickelt, mit dem Reinraumszenarien hinsichtlich der Raumlufqualität und des Energieaufwands bewertet werden können. Modelliert wird dabei neben dem stofflichen Haushalt für Substanzen wie CO₂, Wasserdampf und Feststoffpartikel die thermisch-energetische Bilanzierung für die Konditionierung der Reinräume. Im Modell müssen insbesondere die Filterelemente und die Druckkaskaden berücksichtigt werden, über die die Kontamination der Räume hoher Reinheitsklasse durch jene geringerer Klassen vermieden wird.

Im Simulationsmodell wird ein Referenzszenario für einen typischen Produktionsablauf unter Reinraumbedingungen definiert und aufgebaut. Die Kooperation mit auf Reinräumen spezialisierten Planern ermöglicht die Einbeziehung tatsächlicher Betriebsdaten von Reinraumprojekten. Hierbei kann der Energieaufwand für einen Betrieb nach Stand der Technik mit konstanten Volumenströmen quantifiziert werden. Zur Ermittlung der energetischen Einsparpotentiale wird nachfolgend eine Betriebsweise entwickelt, die

sowohl die Belegungs- und Bewegungsprofile von Mitarbeitern als auch der Halbzeuge durch eine Echtzeitmessung der Partikelkonzentration im Reinraum berücksichtigt und dementsprechend zeitlich bedarfsgerechte Luftströme bereitstellt. Der energetische Vergleich beider Ansätze dient als Grundlage für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsschritte mit dem Simulationsmodell.

Potentiale einer Umluftregelung

Insbesondere von der zeitlichen Regelung des Umluftstroms wird ein erhebliches energetisches Einsparpotential erwartet. Eine Echtzeit-Messung der Partikelkonzentration an relevanten Positionen des Reinraums würde demnach einen bedarfsgerechten Umluftstrom ermöglichen. In Bild 1 sind qualitative zeitliche Verläufe der Personenbelegung, der Luftmassenströme sowie der Partikelkonzentrationen im Raum für einen Betrieb ohne (links) und mit Umluftregelung (rechts) dargestellt. Ist aufgrund fehlender Sensorinfrastruktur keine Umluftregelung möglich (links), werden Umluftströme (schwarze gestrichelte Linie) gewöhnlich auf einem konstanten Level betrieben, so dass die Vorgabe der Reinheitsklasse auch dann eingehalten wird, wenn die maximale Personen- und Halbzeugbelegung im Raum vorliegt. Durch eine kontinuierliche Messung der Partikelkonzentration hingegen wäre idealisiert eine

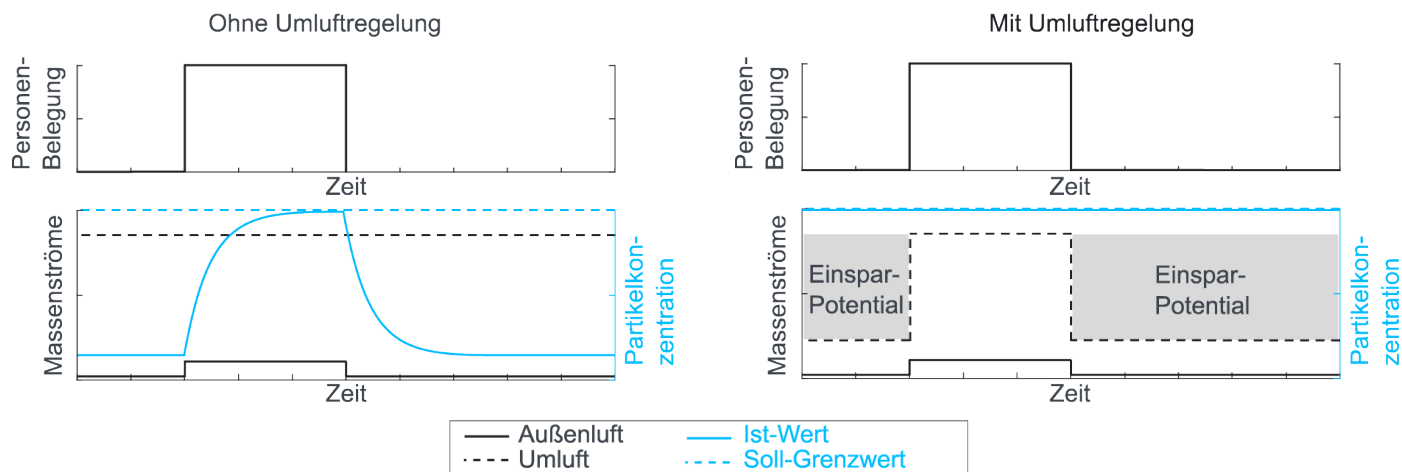


Bild 1: Qualitative zeitliche Verläufe der Personenbelegung, der Luftmassenströme sowie der Partikelkonzentrationen im Raum für einen Betrieb ohne (links) und mit Umluftregelung (rechts)

Umluftbetriebsstrategie (rechts) denkbar, die dauerhaft den Ist-Wert der Partikelkonzentration (blaue durchgezogene Linie) an dessen Soll-Grenzwert (blaue gestrichelte Linie) anlegt. Hierdurch können zeitweise erheblich geringere Umluftströme gefördert werden, wodurch entsprechende Einsparpotentiale resultieren (graue Rechtecke). Unter der Annahme kubischer Zusammenhänge zwischen Luftstrom und energetischem Aufwand für dessen Transport wird dieses Potential bei den vorliegenden hohen Umluftanteilen signifikant.

Ausblick

In den nächsten Schritten wird das untersuchte Reinraumszenario um realistische Belegungsprofile von Halbgütern und Personen erweitert. Zudem sind Modellerweiterungen geplant, die eine raumweise Lüftungswirksamkeit berücksichtigen können. Die Ergebnisse des energetischen Einsparpotentials der Umluftregelung aus dieser Vorstudie sollen in ein umfangreiches Forschungsvorhaben zu weitergefassten Einsparpotentialen in der Reinraumtechnik fließen. In diesem wäre die Wirksamkeit der Strategien auch mit experimentellen Untersuchungen im praktischen Betrieb zu bestätigen.

Danksagung

Diese Vorstudie wird vom Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. gefördert (FKZ: VdF-2025-01). 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] DIN EN ISO 14644-1: Reinräume und zugehörige Reinraumbereiche, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.

HeatVentCon – Teil 1: Über ein dezentrales und ein übergreifendes Regeln der Raumtemperatur

Tim Jourdan

Projektabschluss

Das Forschungsvorhaben HeatVentCon wurde Ende 2024 abgeschlossen, sodass im Folgenden über die Ergebnisse berichtet wird.

Das Vorhaben ist auf die Untersuchung von Regelungsaufgaben in der Nutzenübergabe und die zentrale, maschinelle Lüftung in hochgedämmten Wohngebäuden ausgerichtet. Es handelt sich damit um Gebäude, bei denen sowohl Heizungssysteme als auch maschinelle Lüftung für die Konditionierung der Räume notwendig sind. Diese Systemkombination löst dabei die Aufgabe, behagliche und lufthygienische Bedingungen sowie die Sicherstellung des Luftaustausch zum Feuchteschutz einzuhalten, unter der Prämisse der Anforderungen an neue Gebäude nach dem Gebäudeenergiegesetz (GEG).

Das Forschungsprojekt ist vom BMWF im Rahmen der Industriellen Gemeinschaftsförderung (IGF) gefördert und vom Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. (VdF HLK) begleitet. Es wird in Kooperation zwischen dem Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart und der Forschungsgesellschaft Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart mbH (FG HLK) bearbeitet.

Einleitung

Die Untersuchungen im Projekt lassen sich in zwei Schwerpunkte gliedern. Der erste Teil des Beitrags beschäftigt sich mit dem Themenbereich von übergreifenden und dezentralen Regelungskonzepten für die Nutzenübergabe des Heizens. Im zweiten Teil (Artikel 295) liegt der Fokus auf den Aspekten zu Variabel-Volumenstrom-Systemen (VVS) für die Lüftung in Wohngebäuden, insbesondere mit dem Konzept dezentraler Ventilation.

Ein- und Mehrgrößenregler

Eine wichtige Leitfrage, die zu den folgenden Erkenntnissen geführt hatten, ist die Frage, wann die Wechselwirkung zwischen Regelstrecken zur Raumtemperaturregelung zu groß werden, um einschleifige Regelkreise verwenden zu können und damit übergreifende Regler notwendig sind.

Der Begriff übergreifende Regelung steht für Konzepte, in denen mehrere einzelne Regelungsaufgaben mit gekoppelter Regelung gelöst werden. Im Allgemeinen handelt es sich um Mehrgrößenregelungen, die sich damit gegenüber einschleifigen Reglern bzw. Eingrößenregelungen abgrenzen. Letztere werden auch dezentrale Regler genannt – aufgrund der unabhängigen Betriebsweise je Regelungsaufgabe und da diese typischerweise dezentral verteilt bei den jeweiligen Regelorganen verortet sind [1].

Simulationsgestützte Analysen

Die theoretischen Untersuchungen sind von simulationsgestützten Analysen begleitet, bei denen eine Co-Simulationsumgebung die Basis bildet, wie sich dies in Bild 1 dargestellt findet. Die Gebäudephysik und Randbedingungen sind mit thermisch-energetischer Simulation in TRNSYS abgebildet, wobei die verschiedenen Varianten der Temperaturregelung in MATLAB implementiert sind. Die Bewertung stützt sich auf die Bedarfsentwicklungsmethode, ergänzt um Kenngrößen, die den Grad der Erfüllung von Anforderungen an die Anlagentechnik angeben, in Anlehnung an die Methodik der Wertanalyse [2]. Der gebildete Erfüllungsgrad gibt hier den Zeitanteil für eingehaltene Nutzenanforderungen an. Das Ausmaß der Über- oder Unterschreitung wird zusätzlich durch so genannte Über- und Untertemperaturstunden quantifiziert, indem über den Untersuchungszeitraum die negative und positive Regelabweichung integriert werden und beispielsweise in der Einheit Kh angegeben sind.

Ein charakteristischer Ausschnitt (09.02.-10.02. im Testreferenzjahr TRY 2015) der Ergebnisse ist in Gegenüberstellung von dezentralen Reglervarianten und Mehrgrößen-Reglervarianten anhand von sechs Diagrammen exemplarischer Reglervarianten in Bild 2 angegeben. Die Verläufe sind für das Wohnzimmer einer Beispiel-

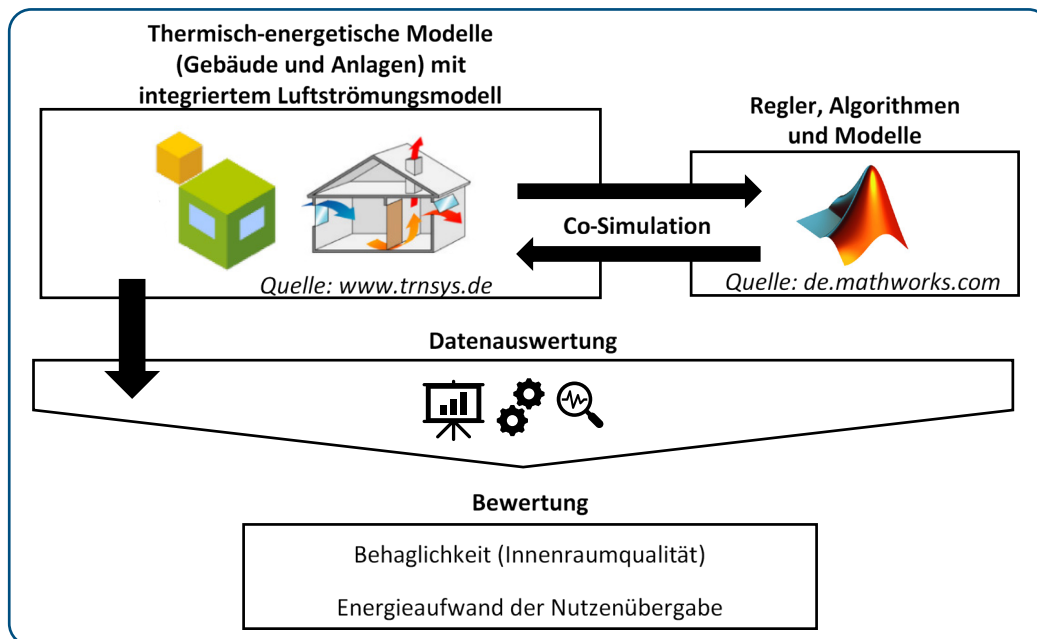


Bild 1: Framework aus Co-Simulationsumgebung, Auswertung und Bewertung

wohnung (siehe auch Artikel 295) berechnet. Es zeigt sich, dass sich die Varianten hier vor allem anhand der Temperaturverläufe im Bereich der zeitweise erhöhten Solltemperaturen charakterisieren lassen, indem die Reaktion der Regler auf die sprungförmige Anhebung beurteilt wird. Der modellprädiktive Regler weist eine frühere Reaktion auf, da diesem zukünftige Informationen über den Sollwertverlauf zur Verfügung stehen. Zudem fällt auf, dass bei den geringen erforderlichen momentanen Heizleistungen die nicht präzisierenden Regler davon profitieren, dass deren Aufheizen zeitgleich mit dem Auftreten des Fremdwärmeeintrags durch die Wärmeabgabe der dann anwesenden Person auftritt. Alle Varianten geben darüber Aufschluss, dass im Falle des Absenkens der

Solltemperatur, selbst bei geringer Trägheit des Heizsystems (schneller Abfall der eingebrachten Heizleistung) das transiente Verhalten der Temperatur im Raum träge ist. Auch am Ende der Phasen mit erhöhten Solltemperaturen wirkt sich der simultane Wegfall des Fremdwärmeeintrags aus internen Wärmequellen aus.

Im Weiteren sind die Ergebnisse der Untersuchungen des Projekts ganzheitlich zusammengefasst, sodass daraus insbesondere Schlüsse aus dem Vergleich der dezentralen und übergreifenden Regelung der Raumtemperatur, d.h. im Bereich der Nutzenübergabe, abgeleitet werden.

Raumtemperaturregelung

In den durchgeführten Untersuchungen bewähren sich fortgeschrittene Regelstrategien

(Mehrgrößen-PI-Regler, Modellprädiktive Regler) vor allem mit sehr guten Möglichkeiten dafür, beispielsweise durch wiederkehrendes Optimieren von Stellgrößen auch anspruchsvolle Nutzenanforderungen zu erreichen. Dabei gilt es zu betonen, dass dies nur im Rahmen der physikalischen Grenzen möglich ist, die das dynamische Verhalten des Gebäudes für die Optimierung festlegt. Insbesondere die Abklingkurve der Temperatur zeigt aufschlussreich, dass das typischerweise träge dynamische Verhalten der Gebäude nach Untersuchungsgegenstand eine relevante Ursache für Zeiten überschrittener Solltemperaturen ist. Das auftretende Verhalten kann hohe Basiswerte für Übertemperaturstunden nach sich ziehen.

Übertemperaturstunden in hochgedämmten Gebäuden

Ein großer Teil der Zeiten, in denen die Raumtemperaturen über den geforderten Sollwerten liegen, geht auf das dynamische Verhalten der hochgedämmten Gebäude an sich zurück und ist durch die Regelung nicht beeinflussbar. Dennoch gewinnt ein danach ausgerichteter Entwurf der Regelung an Bedeutung. Dies folgt daraus, dass es besonders darauf zu achten gilt, Regler zu wählen und zu entwerfen, die Überspringen und eine bleibende Regelabweichung vermeiden. Pragmatisch und damit als Handlungsempfehlung zu nennen, ist die Auswahl von Reglern mit Inte-

gralanteil (z.B. PI-Regler). Diese können gegenüber P-Reglern bereits wesentliche Anteile der Einsparpotentiale erschließen, die durch das Regelverhalten beeinflusst sind. Die Einsparpotentiale hinsichtlich vermiedener bleibender Regelabweichung finden sich allgemein auch dadurch belegt, dass Aufwandszahlen von PI-Reglern gegenüber analogen Thermostatventilen im Bereich kleiner mittlerer Belastungen in der Größenordnung von 10 % niedriger sind (bei einer mittleren Belastung von $\beta=0,04$) [3]. Die niedrigen mittleren Belastungen sind dabei besonders für hochgedämmte Gebäude nach dem Untersuchungsgegenstand typisch.

Diese Beobachtung stellt jedoch kein allgemeines Argument gegen fortgeschrittene Regler, wie Mehrgrößenregelungen und Optimalregler (prädiktiv und ohne Berücksichtigung zukünftig erwarteter Signale) dar, sondern ist gebunden an die Rand- und Rahmenbedingungen, wie im Folgenden näher ausgeführt wird.

Fortgeschrittene Regelungsansätze

Insbesondere Optimalregler bringen Vorteile mit sich, um anspruchsvollen Nutzenanforderungen bzw. Regelungsaufgaben gerecht zu werden, da diese explizit in Beschränkungen der Lösung eingehen können und da-

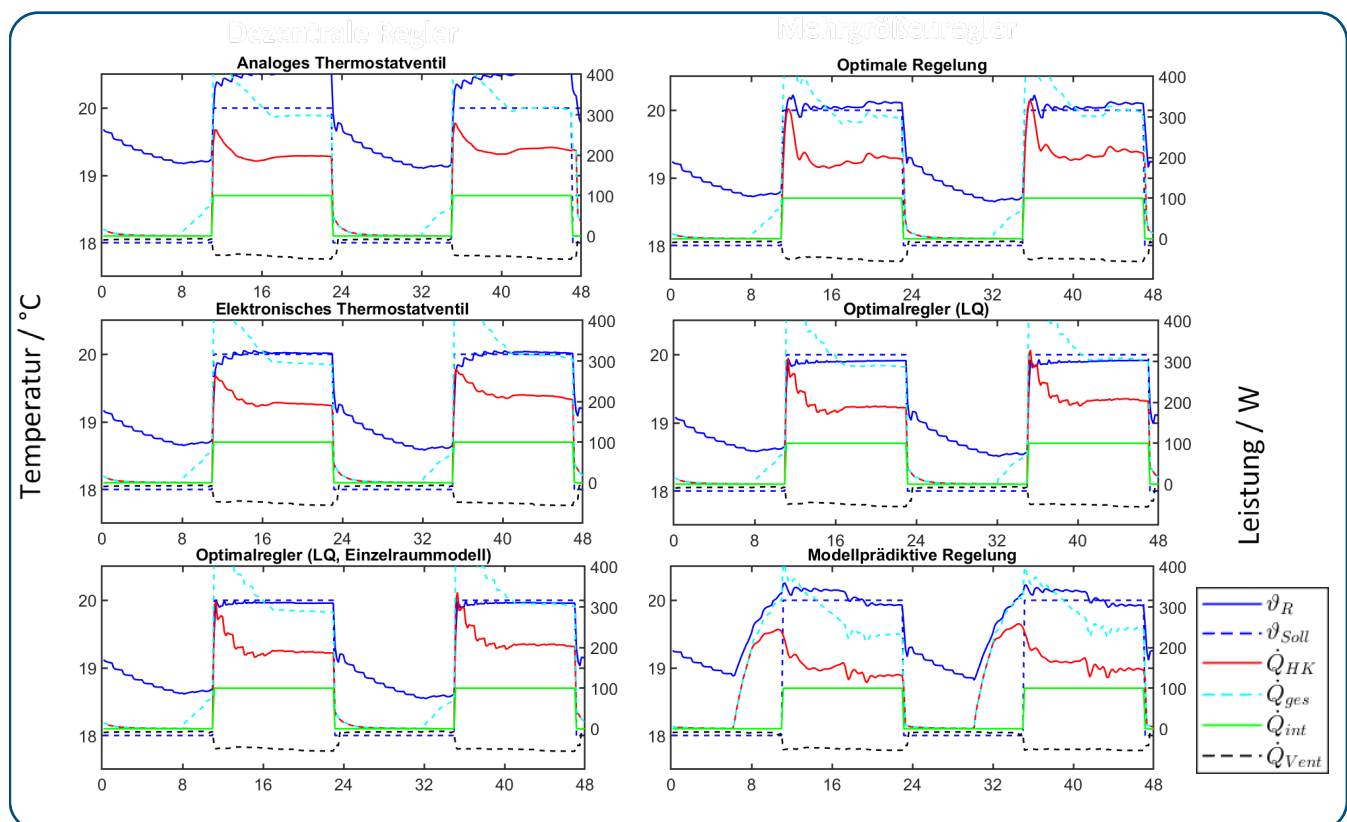


Bild 2: Vergleich einer Auswahl von dezentralen Reglern (links) und übergreifenden Reglern (rechts). Darunter ein analoges Thermostatventil (links, oben), ein dezentraler PI-Regler (links, mittig und unten) sowie ein optimierender Regler (reglerinternes Modell der gesamten Wohnung; rechts, oben), ein Mehrgrößen-LQ-Regler (rechts, mittig) und ein modellprädiktiver Regler (rechts, unten)

bei dem das dynamische Verhalten der Regelstrecke direkte Berücksichtigung findet. Übergreifende Regler sind komplexer, weil diese prinzipbedingt informations-technisch vernetzt realisiert werden müssen. Eine Empfehlung für dezentrale PI-Regler statt fortgeschrittener Regelungsansätze unterliegt dem konservativen Vorbehalt, dass die Vorteile von optimierenden bzw. modellprädiktiven Reglern eine genaue Kenntnis der Nutzenanforderungen voraussetzen und dies bisher in der Praxis oftmals nicht gegeben ist. In diesen Fällen kann auch mit komplexeren Reglern deren genannter Vorteil nicht zum Tragen kommen.

Dies zeigt ausblickend auf eine näher zu erörternde Problemstellung, wonach erhebliche Einsparpotentiale der Regelungsansätze mit Optimierung verborgen hinter den im Konkreten häufig unbekannten Nutzenanforderungen erwartet werden müssen – prinzipbedingt können die Einsparpotentiale in der Größenordnung erwartet werden, wie auch die Nutzungsrandbedingungen bekanntermaßen einen großen Einfluss auf den Energiebedarf haben.

Auswirkungen interzonaler Strömungen auf den Reglerentwurf

Den stärksten Bezug zur genannten Leitfrage hinsichtlich einer Notwendigkeit für übergreifen-

de Regelung haben schließlich die Erkenntnisse zu den Auswirkungen von hohen luftgebundenen Wechselwirkungen bei interzonalen Strömungen, wie z.B. bei offenen Türen zwischen beheizten Räumen mit eigenständigen Nutzenanforderungen. In diesen Fällen kann die dadurch bedingte Kopplung gegen dezentrale Regler sprechen und damit übergreifende Regelungsansätze erforderlich machen. Die damit verbundenen energetischen und betriebsseitigen Auswirkungen geöffneter Türen bei Variation der Regelung sind Aspekte, die in künftigen Untersuchungen bzw. Folgevorhaben näher betrachtet werden sollen.

Danksagung

Das Forschungsvorhaben HeatVentCon wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages im Rahmen der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF-Projekt-Nr. 01IF22051N) gefördert und vom Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. (VdF HLK) als Forschungsvereinigung begleitet.

Der ausführliche Schlussbericht [4] kann beim Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. (VdF) bezogen werden.

Literatur

- [1] J. Lunze, Regelungstechnik 2. Aufl. 9. Berlin/Heidelberg, Springer Vieweg, 2016.
- [2] H. Bach, „Aufgaben, Anforderungen, Anlagenfunktionen: A“ in Raumklimatechnik: Band 3: Raumheiztechnik, Fitzner, Hg., 16. Aufl. Berlin: Springer, 2005, S. 1–18.
- [3] VDI 2067 Blatt 20:2018-04, Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Energieaufwand der Nutzenübergabe bei Warmwasserheizungen.
- [4] Systemübergreifende Regelstrategien für einen energetisch optimierten Betrieb von Wohnungslüftungs- und Heizungssystemen (HeatVentCon) https://vdf.hlk-stuttgart.de/fileadmin/Redaktion/Forschung/IGF-Bericht/Schlussbericht_HeatVentCon_20250630.pdf

HeatVentCon – Teil 2: Variabel-Volumenstrom-Systeme für die Lüftung in Wohngebäuden

Mostafa Barghash

Einleitung

Hochgedämmte, luftdichte Wohngebäude nach dem Gebäudeenergiegesetz (GEG) weisen nur einen sehr geringen Luftaustausch über Infiltration auf. Um den Feuchteschutz und die Luftqualität sicherzustellen, ist daher eine maschinelle Be- und Enlüftung der Räume nötig. In der Praxis dominieren zentrale Wohnlüftungsgeräte (WLG) mit Konstant-Volumenstrom-Systemen (KVS) gegenüber Variabel-Volumenstrom-Systemen (VVS). KVS können die Luftströme je Raum nicht an den jeweiligen Bedarf anpassen, wodurch Abweichungen zwischen Planung und tatsächlicher Nutzung zu Unter- oder Überversorgungen führen – mit der möglichen Folge verringerter Luftqualität oder erhöhten Energieverbrauchs. Eine bedarfsan-

gepasste Regelung mit VVS kann hier Vorteile bringen. Allerdings sind VVS im Wohnungsbau selten, da Volumenstromregel-Klappen (VRK) zusätzliche Kosten verursachen. Einen alternativen Ansatz hierfür stellen dezentrale Ventilatoren dar, die direkt in den Zu- und Abluftkanälen der einzelnen Räume installiert werden. Die üblicherweise für VVS erforderlichen VRK entfallen dabei, sodass drosselungsbedingte Druckverluste vermieden werden.

Im Forschungsvorhaben HeatVentCon (Industrielle Gemeinschaftsforschung) wird dieser Ansatz numerisch und experimentell untersucht. Beteiligt sind die Forschungsgesellschaft Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart mbH und das Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart. Die experimentellen Untersuchungen erfolgen unter

realitätsnahen Bedingungen an einem neu entwickelten Luftverteilstand.

Luftverteilstand - in - the - Loop (HiL)-Prüfstand

Der Luftverteilstand-HiL-Prüfstand wird für die folgenden Untersuchungen so eingestellt, dass eine Wohnung mit 64 m² nach DIN 1946-6 mit drei Zulufräumen (Kinderzimmer (ZU1), Wohnzimmer (ZU2), Schlafzimmer (ZU3)) und zwei Ablufträumen (Küche (AB1), Bad (AB2)) emuliert wird. Er ermöglicht den direkten Vergleich zentraler und dezentraler Lüftungskonzepte ohne bauliche Änderungen am Prüfstand. Die Bilder 1 und 2 veranschaulichen die beiden Lüftungskonzepte mit den jeweiligen Komponenten des Kanalnetzes der Beispielwohnung.

Im zentralen Luftverteilstrang (rechter Strang im Bild 3) werden pro Zone eine VRK zur An-

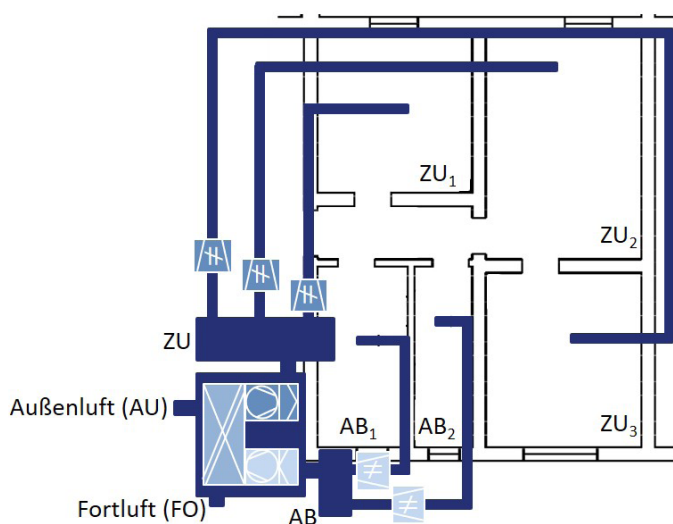


Bild 1: Schematische Darstellung der Luftverteilung - zentrale Ventilation

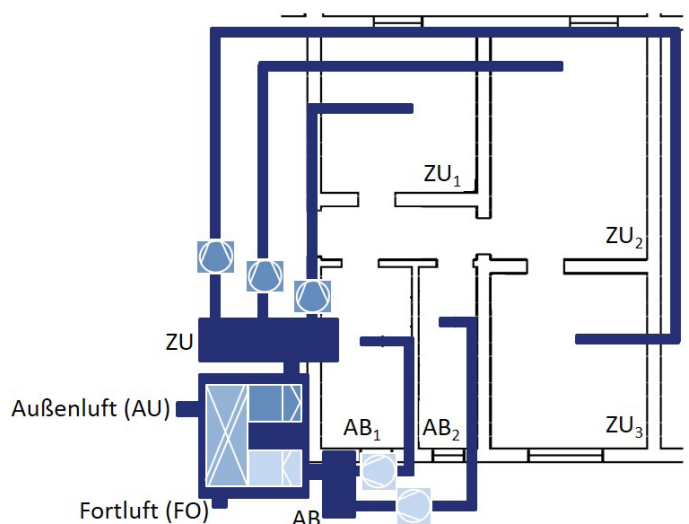


Bild 2: Schematische Darstellung der Luftverteilung - dezentrale Ventilation

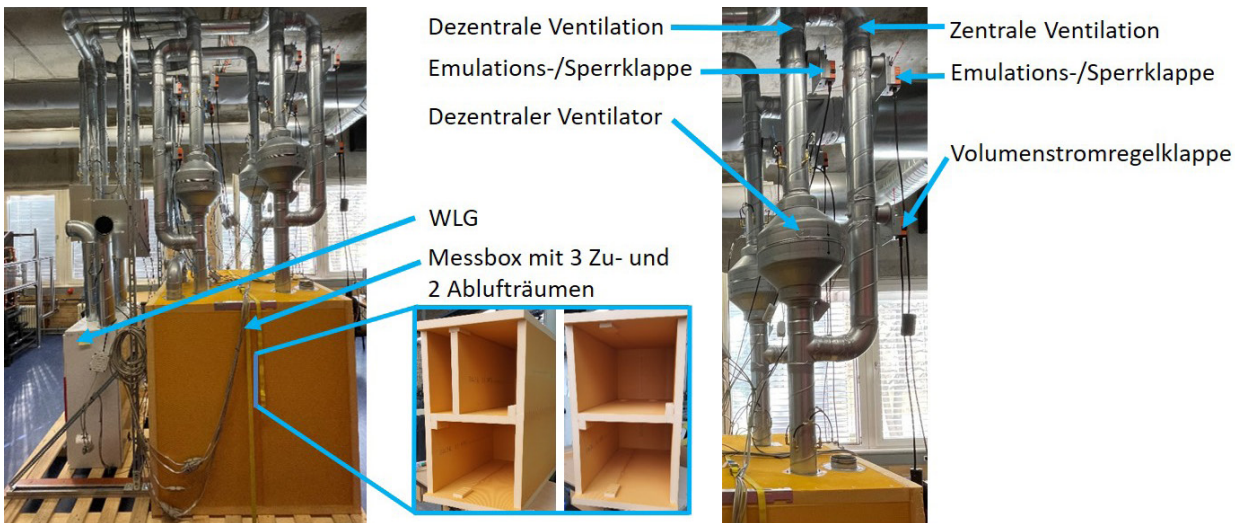


Bild 3: Aufbau des Hardware-in-the-Loop (HiL)-Prüfstands zur Untersuchung der Luftverteilung

passung der Luftströme und eine Emulationsklappe zur Nachbildung von Druckverlusten des Kanalnetzes eingesetzt. In der dezentralen Variante (linker Strang) übernehmen drehzahlgeregelte Radialventilatoren sowohl die Anpassung der Luftströme als auch den Lufttransport. Auch hier ist zusätzlich eine Emulationsklappe integriert, um die Druckverluste des Kanalnetzes abzubilden.

Randbedingungen

Für die Untersuchungen wird eine Nennbelegung mit drei Personen angenommen. Durch deren systematische Verteilung auf fünf Räume resultieren 35 Szenarien als Randbedingungen. Die Lüftung der einzelnen Räume er-

folgt nach zwei Prinzipien: belegte Räume werden bedarfsgerecht belüftet, unbelegte erhalten einen Mindestvolumenstrom zum Feuchteschutz. Die Zu- und Abluftströme richten sich nach DIN 1946-6 [1] und berücksichtigen sowohl nutzungsabhängige Stufen als auch Mindestwerte. Zusätzlich wird die zentrale Ventilation so betrieben, dass immer mindestens eine Zu- und eine Abluftklappe vollständig geöffnet bleibt, um Drosselungsverluste zu vermeiden.

Ergebnisse

Für jedes Szenario wird zur Überprüfung die relative Abweichung der Volumenströme berechnet (siehe Bild 4). In nahezu allen 35

Szenarien bewegen sich die Abweichungen innerhalb von $\pm 2\%$. Größere Abweichungen treten nur in Szenario 4 und 19 auf, weshalb diese in der energetischen Analyse ausgeschlossen werden. Ursachen sind unter anderem die Ventilatorauswahl und die Parametrierung der Volumenstromklappen.

Das energetische Einsparpotenzial der dezentralen gegenüber der zentralen Ventilation wird anhand von drei Kennwerten für alle 35 Szenarien bewertet:

1. Gesamte Luftleistung für den jeweiligen Betriebsfall
2. Absolute Differenz der Luftleistung:

$$\Delta P_{Abs.} = P_{zentral} - P_{dezentral}$$

3. Relative Differenz der Luftleistung:

$$P_{(Rel.)} = \left(\frac{\Delta P_{(Abs.)}}{P_{dezentral}} \right) 100\%$$

Diese drei Kennwerte werden für jedes Szenario berechnet und in Bild 5 dargestellt. In den meisten Fällen liegt die Luftleistung der dezentralen Ventilation niedriger als die der zentralen Ventilation. Besonders in den Szenarien 5 und 6 zeigen sich beispielsweise Einsparungen von ca. 1 W

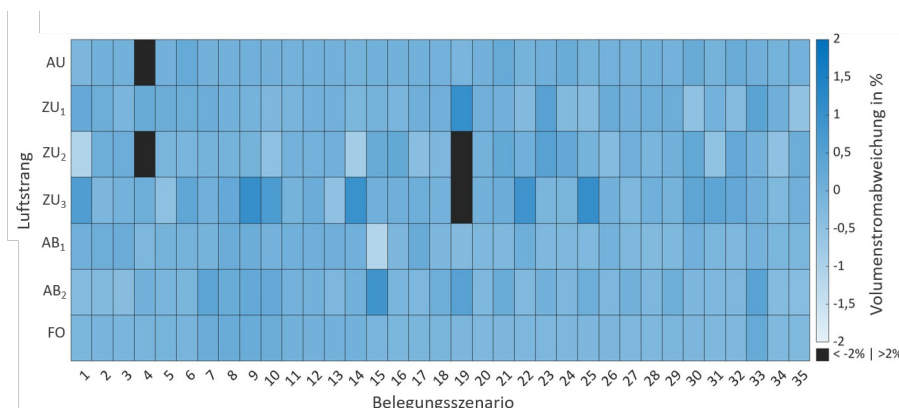


Bild 4: Vergleich der Volumenströme in unterschiedlichen Belegungsszenarien der Beispielwohnung

bzw. 14 %, da die zentrale Variante durch gedrosselte Klappen höhere Verluste verursacht. Dezentrale Ventilatoren regeln direkt die erforderliche Druckerhöhung und vermeiden somit Drosselungen. In den Szenarien 15 und 16 ist das Einsparpotenzial gering, da die zentrale Ventilation bei weit geöffneten Volumenstromregelklappen arbeitet und damit ähnliche Bedingungen wie das dezentrale Konzept erreicht.

Fazit

Im Forschungsvorhaben Heat-VentCon wird mit einem Luftverteil-Prüfstand der Vergleich zentraler und dezentraler VVS-Konzepte für eine Beispielwohnung mit fünf Räumen und drei Personen durchgeführt. Dabei wird

das Einsparpotenzial dezentraler Ventilatoren gegenüber einem zentralen System mit Volumenstromklappen untersucht. Da bei der dezentralen Variante keine durch Klappen verursachten Druckverluste entstehen, sind zusätzliche Einsparungen möglich. In einzelnen Szenarien sinkt die Luftleistung um bis zu 18 %. Bei geringen Unterschieden im Luftbedarf für die einzelnen versorgten Räume bestehen jedoch kaum Unterschiede zwischen beiden Lüftungskonzepten, wenn die zentrale Ventilation nur bei geringen Drosselungen arbeitet.

Danksagung

Das Forschungsvorhaben Heat-VentCon wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft

und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages im Rahmen der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF-Projekt-Nr. 01IF22051N) gefördert und vom Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. (VdF HLK) als Forschungsvereinigung begleitet.

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: Beispielberechnungen für ausgewählte Lüftungssysteme, Sep. 2012.

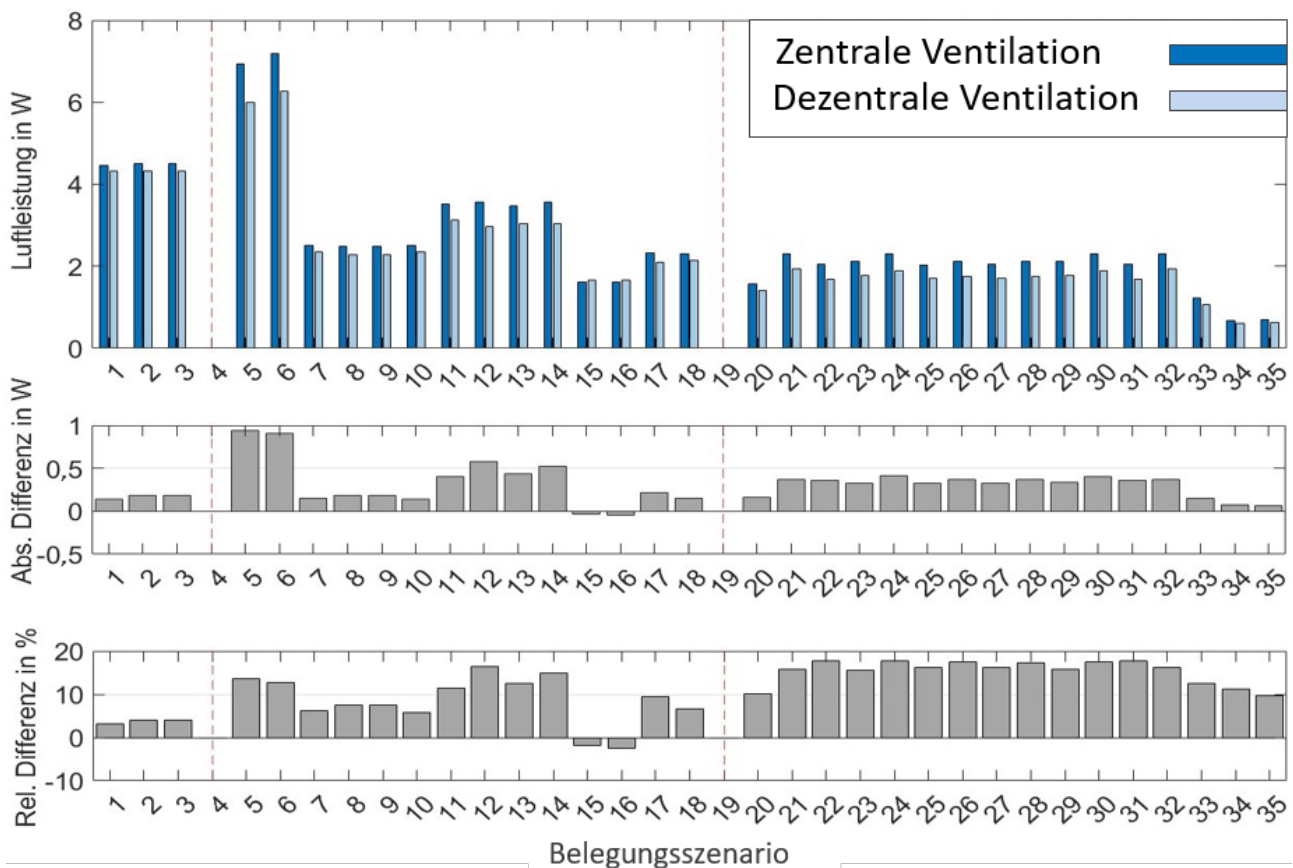


Bild 5: Vergleich der Luftleistung in unterschiedlichen Belegungsszenarien der Beispielwohnung

Regelbare Dämmelemente — von der Simulationsstudie zum Anwendungsprüfstand

**Michael Müller,
Maurizio Calandri**

Hintergrund

Die energetischen Vorgaben für Gebäudehüllen sind sowohl für Sanierungen als auch für Neubauten im Gebäudeenergiegesetz (GEG) [1] festgelegt. Durch die Reduzierung des Wärmedurchgangskoeffizienten wird das Gebäudeinnere zunehmend von den äußeren klimatischen Bedingungen entkoppelt. Liegen jedoch hohe interne Wärmebelastungen vor, etwa durch eine hohe Personendichte oder zahlreiche elektrische Geräte, kann zur Einhaltung der gewünschten Innenraumtemperatur ein erhöhter Kühlenergiebedarf erforderlich werden. Dieser zusätzliche Kühlbedarf würde zumindest bei moderaten Außentemperaturen nicht auftreten, wenn die Wärmelasten bei geringerer Dämmwirkung über die Fassade nach außen abgeführt werden könnten. Solche günstigen Außentemperaturen unterhalb der Solltemperatur im Innenraum treten besonders in den Über-

gangsmonaten sowie – abhängig von geografischer Lage und Orientierung des Raums – während der Sommermonate am Morgen, Abend oder in der Nacht auf.

Eine Außendämmung mit hohem Wärmewiderstand ist jedoch für sehr kalte und sehr warme Tage erforderlich, um die Heiz- und Kühllasten im Auslegungsfall zu minimieren und selbst unter Extrembedingungen behagliche Innenraumzustände sicherzustellen.

Eine Verringerung des jährlichen Gesamtenergiebedarfs lässt sich damit jedoch nicht erreichen, wie die vorangegangenen Überlegungen zeigen. Hier können regelbare Gebäudehüllen einen Beitrag leisten, indem bei geeigneten Außentemperaturen deren Wärmedurchgang erhöht werden kann und dadurch interne Wärmelasten wirkungsvoll über die Fassade abgeführt werden können. Bei ungünstigen, also zu hohen oder zu niedrigen Außentemperaturen, wird die Wärmeleitfähigkeit der Dämmung wieder reduziert, so dass hier die Vorteile einer hoch-

gedämmten Hülle erhalten bleiben.

Neben der Reduktion des Energiebedarfs über das Jahr hinweg lassen sich regelbare Gebäudehüllen auch in Verbindung mit den im Gebäude vorhandenen Speichermassen nutzen. Im Unterschied zur üblichen zeitverzögerten, aber nicht steuerbaren Wärmeabgabe aktivierter Bauteile, ermöglicht die regelbare Dämmung eine genauere Steuerung des Zeitpunkts, zu dem Wärme aus dem Speichermedium abgegeben oder umgekehrt Wärme aus dem Innenraum aufgenommen wird (Kühlung).

Auf diese Weise tragen regelbare Dämmelemente nicht nur zur Energieeinsparung bei, sondern unterstützen durch die gezielte Nutzung von Speichermassen auch die Energieflexibilisierung, einen netzdienlichen Betrieb (Demand Side Management) und die Sektorkopplung.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens ReVaD werden die Potenziale solcher regelbarer Dämmelemente am Institut für Gebäudeenergetik, Thermotech-

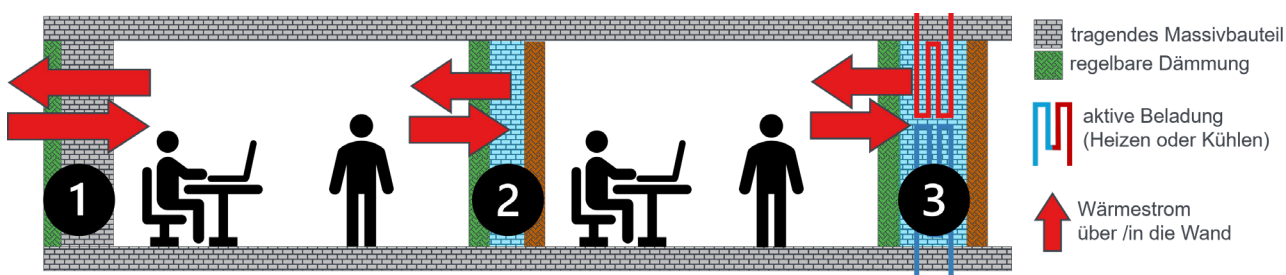


Bild 1: Anwendungsfälle regelbarer Dämmelemente, die im Forschungsvorhaben simulativ untersucht werden

nik und Energiespeicherung der Universität Stuttgart (IGTE) sowohl simulativ als auch gemeinsam mit zwei Projektpartnern experimentell untersucht.

Um die bestehenden Energieeinsparpotentiale bei Nutzung regelbarer Dämmelemente abschätzen zu können, werden thermisch-energetische Simulationsstudien durchgeführt. Dafür wurde im Forschungsvorhaben eine Simulationsumgebung geschaffen, die es ermöglicht, bei laufender Jahres-simulation Parameter der Wände bzw. Materialien, wie die Wärmeleitfähigkeit zu verändern. Dieser Schritt war nötig, weil dies in Simulationsmodellen nach Stand der Technik nicht möglich ist. Für weitere Informationen zum dabei verfolgten Vorgehen sei auf den HLK-Brief 2024 [2] verwiesen.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass skaliert über den Schalfaktor (Faktor zwischen niedrigster und höchster Wärmeleitfähigkeit) und abhängig vom Fensterflächenanteil ein Einsparpotential des jährlichen Kühlenergiebedarfs von bis zu 70 % besteht. Beim Heizenergiebedarf sind keine signifikanten Einsparungen möglich.

Mit den Projektpartnern Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf (DITF) und Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) wird im Forschungsvorhaben ReVaD neben den zunächst technologieoffenen Simulationen auch ein konkreter experimenteller Ansatz für die technische Realisierung regelbarer Dämmelemente verfolgt.

Technologische Untersuchung regelbarer Dämmelemente

Die Wärmeleitfähigkeit von Vakuumdämmelementen mit porösem Füllkern ändert sich mit dem Gasdruck. Während dieser Effekt in üblichen Vakuumdämmelementen für die Realisierung einer hocheffektiven Dämmung durch ein hohes Vakuum verwendet wird, kann er durch Variation des Gasdrucks auch für die Umsetzung einer regelbaren Dämmung nutzbar gemacht werden.

Wasserstoff weist die höchste Wärmeleitfähigkeit unter den Gasen auf. Die Einstellung des Gasdrucks erfolgt durch den Einsatz thermochemischer Reaktionssysteme, im speziellen reversible Gas-Feststoff-Reaktionen. Wasserstoff als Arbeitsgas erlaubt den Einsatz von Metallhydriden zur Druckeinstellung: Durch gezielte Temperierung des Metallhydridsystems kann der Wasserstoffdruck im Dämmpaneel geregelt werden.

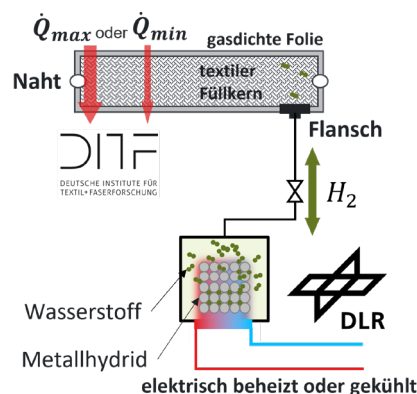


Bild 2: Prinzipskizze des Aufbaus mit Metallhydrid-Modul und Dämmpaneel aus gasdichter Folie und textilen Füllkern

Die Projektpartner DITF und DLR entwickeln im Forschungsvorhaben die Einzelkomponenten und untersuchen im gekoppelten System die Einstellbarkeit der Wärmeleitfähigkeit des textilbasierten Dämmpaneels infolge des thermochemisch geregelten Wasserstoffdrucks.

Der gesamte Aufbau ist in der Prinzipskizze in Bild 2 vereinfacht dargestellt.

Am IGTE soll dieses System gemeinsam mit den Projektpartnern in einem anwendungsnahen Prüfstand untersucht werden, an dem die entwickelten regelbaren Dämmelemente als Gesamtsystem aus Reaktoreinheit und Paneelen getestet werden.

Für reproduzierbare Messungen wird dafür statt eines Realraums ein verkleinerter Modellprüfstand verwendet, der soweit möglich in zentralen thermischen Eigenschaften einem Realraum ähnelt.

Auslegung eines skalierten Modellprüfstands für die anwendungsnahen Erprobung

Die Funktion der regelbaren Dämmelemente wird auf einem verkleinerten Demonstratorprüf-

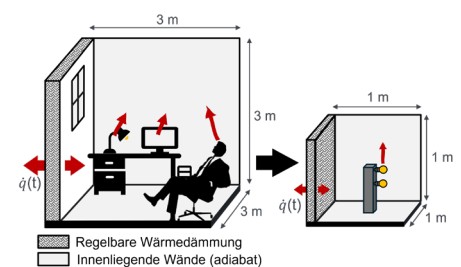


Bild 3: Skalierung und Abstraktion eines Realraums

stand getestet, der in zentralen thermischen Eigenschaften einem realen Beispielraum ähnelt, dessen Größe jedoch auf 1 x 1 x 1 m skaliert wird.

Wird ein Raum hinsichtlich seiner thermischen Eigenschaften stark vereinfacht, bleiben der Wärmedurchgangskoeffizient der Wände sowie die Kapazität der Raumluft und der Wände als charakteristische Größen erhalten. Beide definieren zu einem signifikanten Anteil den Wärmestrom über die Fassade sowie die thermische Dynamik des Raumes.

Ein Raum nach dem GEG-Standard mit den Maßen 3 x 3 x 3 m wird bei der Auslegung des Modellprüfstands als Referenz herangezogen und fortfolgend als Realraum (ggü. dem Modellraum) bezeichnet. Die Annahme des Realraums als Würfel vereinfacht die Übertragung auf das skalierte, ebenfalls kubische Modell. Es wird weiterhin davon ausgegangen, dass der Realraum über 3 adiabate Innenwände, sowie Boden und Decke (beheizte, angrenzende Räume) verfügt. Idealisiert findet der gesamte Wärmeaustausch folglich zwischen der verbleibenden, als Außenwand angenommenen Raumwand, und der Umgebung statt. Wird diese mit einem U-Wert von 0,24 W/m²K angenommen, resultiert bei 9 m² Außenfläche ein Wärmestrom von 2,16 W/K.

Diese Vorgaben für den Realraum werden nun auf den Modellprüfstand übertragen. Unter der Hypothese, dass für ein ähnliches thermisches Verhalten (z.B. stationäre Temperaturen) der Wär-

mestrom über die Fassade gleich sein muss, wird der U-Wert der Modellfassade angepasst.

Die Auslegung des dynamisch-thermischen Verhaltens ist komplexer. Da der Realraum deutlich mehr Masse und damit effektive Kapazität (vgl. EN ISO 13786 [2]) als der skalierte Modellraum aufweist, kann der Anspruch dynamisch-thermischer Ähnlichkeit nur darin liegen, das Raumverhalten des Modellraums in Bezug auf das des Realraums zu beschreiben. Die bei der Versuchsauslegung verfolgte Hypothese ist dementsprechend, dass die Anregung des Modellraumes über ein zeitlich verkürztes Tagesprofil stattfinden muss, damit der Modellraum eine mit dem Realraum vergleichbare Temperaturänderung erfährt (siehe Bild 4).

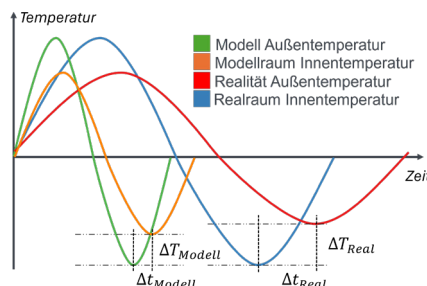


Bild 4: Prinzipdarstellung unterschiedlicher Temperaturänderungen und ihrer Auswirkungen auf die Raumtemperatur für das Modell und den Realraum

Während der Inbetriebnahme sind Versuchsreihen mit dem Modell und dazu passende Simulationen des Realraums geplant.

Nach abgeschlossener Auslegung wird der Modellraum am IGTE aufgebaut. Die als adiabatisch

angenommenen Wände, die Decke und der Boden des Modellraums sind mehrlagig aus XPS aufgebaut. Das Material bietet neben einer guten Dämmwirkung gleichzeitig ausreichende Stabilität, damit auf weitere Stützstrukturen verzichtet werden kann. Um annähernd adiabate Wände zu erreichen, werden diese knapp 30 cm dick ausgeführt. In die sechste Seite (Modell-Außenwand) können die regelbaren Dämmelemente eingebaut werden. Dafür wird ein Rahmen aus Holz und XPS gebaut, in den die 4 einzelnen Elemente (je 500 x 500 mm) eingelegt werden können. Der Aufbau ist damit so ausgeführt, dass der Wärmestrom zu einem dominierenden Anteil über die regelbaren

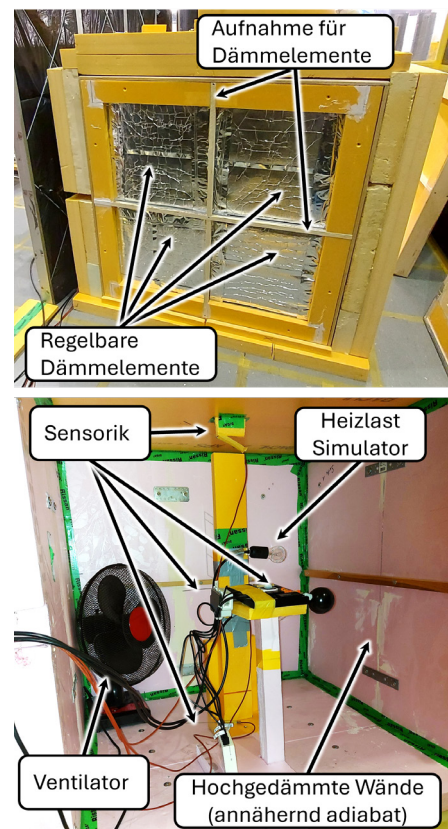


Bild 5: Bild des Modellraums (aktueller Stand des Aufbaus)

Dämmelemente stattfindet.

Im Inneren des Aufbaus wird eine Heizquelle in Form regelbarer Glühbirnen platziert. Diese können auf eine Heizleistung von 0 bis 140 W eingestellt werden und können so die Wärmeabgabe von 1 bis 2 Personen emulieren. Die Außenluftzustände können über die Luftzustände im Raumluftrömungslabor, in dem der Modellraum platziert wird, emuliert werden. Über temperierbare Wände und die Lüftungsanlage können Temperaturen zwischen 10 °C und 30 °C eingestellt werden. Undichtigkeiten können über eine Wärmebildkamera identifiziert und durch Dämmmaterial bzw. Abdichtung (gegen Konvektion) minimiert werden.

Während der Inbetriebnahme werden verschiedene Versuche hinsichtlich der thermischen Charakterisierung im stationären und dynamischen Fall gefahren und mit Simulationsergebnissen abgeglichen.

Fazit und Ausblick

In der Versuchsphase soll gezeigt werden, dass die Innenraumtemperatur des Modellraums wirkungsvoll über die regelbaren Dämmelemente beeinflusst werden kann.

Der Abgleich der Messergebnisse mit Simulationen des Realraums wird außerdem zeigen, inwieweit die Ziele der dynamisch-thermischen Ähnlichkeit zum Realraum eingehalten werden können.

Für die messtechnische Untersu-

chung des Einsatzes regelbarer Dämmelemente in Kombination mit Speichermassen des Gebäudes wird der Modellraum so ausgeführt, dass speziell konstruierte und temperierbare Speichermassen aus Beton an die Modellfassade angebracht werden können. Die bislang als Außenfassade festgelegte Seite des Modellraums kann dann zu innenliegenden, regelbaren Dämmelementen an den Speichermassen umgebaut werden.

Mit diesem modifizierten Aufbau können die regelbaren Dämmelemente für den zweiten Anwendungsfall der regelbaren Dämmung in Kombination mit innenliegenden Speichermassen getestet werden. Hierbei mit dem Ziel, die Rauminnentemperatur des Modells über das Zusammenspiel aus der Beladung der Speichermassen und der regelbaren Dämmung in Abhängigkeit von inneren Lasten und äußeren Einflüssen einzustellen.

Danksagung

Das Forschungsvorhaben ReVaD (FKZ: 01IF22617N) wird im Rahmen des Programms für Industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF) durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) gefördert und vom Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. (VdF HLK) in Kooperation mit dem Forschungsinstitut Textil e.V. begleitet.

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] HLK-Brief 2024. Artikel 275: Energieeinsparpotential regelbarer Dämmelemente in Gebäuden Veröffentlicht unter: <https://vdf.hlk-stuttgart.de/veroeffentlichungen/hlk-briefe/2023-1>.
- [3] DIN EN ISO 13786:2018-04, Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen - Dynamisch-thermische Kenngrößen - Berechnungsverfahren (ISO 13786:2017); Deutsche Fassung EN ISO 13786:2017

HEELP – über den Stand einer Software-Lösung und das Schätzen der Personenbelegung aus CO₂-Konzentrationen

**Tim Jourdan, Michael Müller,
Joel Kimmich**

Einleitung

Im IGF-Vorhaben HEELP werden Möglichkeiten zur Verbesserung des Betriebs von Wohngebäuden mit installierten Smart Home-Systemen untersucht und entwickelt.

Neben den über das Smart Home-System bereitgestellten Daten zu Raumklima, Regel-, Führungs- und Stellgrößen der Regelkreise sowie typischen Betriebszuständen wird als zentraler methodischer Ansatz Wissen in Form von Modellen einbezogen. Das Ziel ist ein energieeffizientes und der Behaglichkeit wie auch Lufthygiene zuträgliches Heizen sowie Lüften. Die hierfür zu entwickelnden und zu untersuchenden Algorithmen werden in eine Smart Home (SH)-Plattform integriert.

Die Nutzenden sind die zentrale Bedingung und Begründung für den Betrieb der Systeme in Wohngebäuden, sodass auf der Schätzung der momentanen Personenbelegung in diesem Beitrag der Fokus gelegt ist.

Integration modellbasierter Algorithmen

Ein Schwerpunkt in der Bearbeitung von Seiten des Instituts für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart liegt auf modellbasierten Algorithmen, die Modellwissen aus physikalischen und empirischen Zusammenhängen zur weiterreichenden Analyse von Daten einsetzen. Die Funkti-

onen der Algorithmen sind innerhalb von HEELP auf die Bereiche der Regelung, Interaktion mit Nutzenden und Analyse des Betriebs der Systeme oder des Nutzendenverhaltens ausgerichtet – an dieser Stelle kurz unter dem Begriff Analyse zusammengefasst.

Elemente der ganzheitlichen Software-Lösung

Als übergeordnete SH-Plattform, für SH-Systeme und Komponenten unterschiedlicher Hersteller wird im Projekt OpenHAB [1] verwendet, eine von der OpenHAB Foundation getragene Opensource Lösung. Darin unterstützte SH-Komponenten werden mit so genannten Bindings in die Plattform integriert. Damit wird es zum einen möglich Eingriffe in das SH-System vorzunehmen und zum anderen werden deren Daten für das Monitoring informationstechnisch zugänglich. Eingriffe, die mangels Aktorik nicht automatisiert durchgeführt werden können, sollen im Projekt beispielsweise über eine App und Nutzendeninteraktion realisiert werden. Die Daten des Monitorings werden aus OpenHAB in eine InfluxDB (Version 2) geschrieben. Hierfür wird in OpenHAB ein sogenanntes Persistence verwendet, das die Kopplung zu dem Server realisiert, auf dem eine entsprechende Zeitreihen-Datenbank gehostet ist. In der Folge wird diese InfluxDB zur Quelle und Schnittstelle für Eingangsgrößen der Analyse. Die Ausgaben der Analyse an das SH-System werden über das Protokoll MQTT

in die OpenHAB Plattform und die InfluxDB zurückgespielt und können so beispielsweise in anderen Algorithmen Verwendung finden, oder an den Nutzenden zur Interaktion übermittelt werden. Das hiermit skizzierte Framework wird in HEELP aufgebaut, implementiert und auch für eine realitätsnahe Demonstration zur Anwendung gebracht. Die konkret gewählten Elemente spiegeln die Software-Lösung zum Demonstrationszweck in HEELP wider. Dies beschränkt nicht die Allgemeinheit der Erkenntnisse, die über den Nutzen der Kombination von erhobenen Datenpunkten und modellbasierten Algorithmen aufgezeigt werden. Dieser Nutzen soll potentiell auch mit anderen SH-Plattformen oder SH-Systemen, Datenbanken und Kommunikationsstandards gehoben werden können, solange die nötigen eingehenden Informationen und ausgebenden Rückkanäle der Analyse zur Verfügung stehen.

Im Folgenden wird anhand des Beispiels der Belegungsdetektion näher auf modellbasierte Algorithmen eingegangen.

Virtualisierung von Belegungssensoren

Der Begriff der Personenbelegung meint hier die Anzahl von Personen in einem Raum und ist für den Gebäudebetrieb aufschlussreich zur Schätzung der momentanen Stofflast und damit für den Lüftungsbedarf. Präsenz ist gegeben, wenn mindestens eine Person in konditionierten Räumen an-

wesend ist. Diese Information ist essentiell für die bedarfsgeführte Regelung allgemein, weil Nutzenanforderungen (z.B. Soll-Raumtemperatur) typischerweise davon abhängen, ob sich momentan Personen in einem Raum aufhalten. Physische Sensoren, die die Personenbelegung ermitteln, sind im Stand der Technik selten vorhanden, jedoch kann nach Stand des Wissens anhand von gemessenen CO_2 -Konzentrationen in Verbindung mit modellbasierten Algorithmen die Personenbelegung als virtueller Datenpunkt geschätzt werden.

Ein Ansatz nach Cali et al. basiert

im Kern auf dem dynamischen Modell der Stoffkonzentration in einem Raum bei angenommener idealer Mischströmung [2].

Hierzu wird ein Modell zur Beschreibung der Dynamik der CO_2 -Konzentration herangezogen, das mit Volumenströmen und CO_2 -Konzentrationen gebildet und abhängig von der Zeit t ist. Die Abhängigkeit der Dichte von der Temperatur und bei Gemischen von der Konzentration wird an dieser Stelle vernachlässigt. Der Ansatz für einen Raum sieht N Volumenströme jeweils mit einer Stoffkonzentration (volumetrisch) C_i vor, die in den Raum einströ-

men, beispielsweise von außen (Infiltration, Fenster) oder von benachbarten Räumen über Türen. Zudem ist ein Quellterm für Personen mit deren Anzahl n_P und ausgestoßenem Volumenstrom CO_2 über die Atemluft $\dot{V}_{\text{CO}_2P}$ angenommen:

$$\begin{aligned} \frac{dC_R}{dt} V_R &= f_i(C_R, \text{Eingangsgrößen}) \\ &= \sum_{i=1}^N (\dot{V}_i(t) C_i(t) - \sum_{i=1}^N \dot{V}_i(t) C_R(t) \\ &\quad + n_P(t) \dot{V}_{\text{CO}_2P} \end{aligned}$$

In der obigen Gleichung ist C die Konzentration, C_R stellt als Konzentration im Raum die Zustandsgröße dar. V_R ist das Raumvolu-

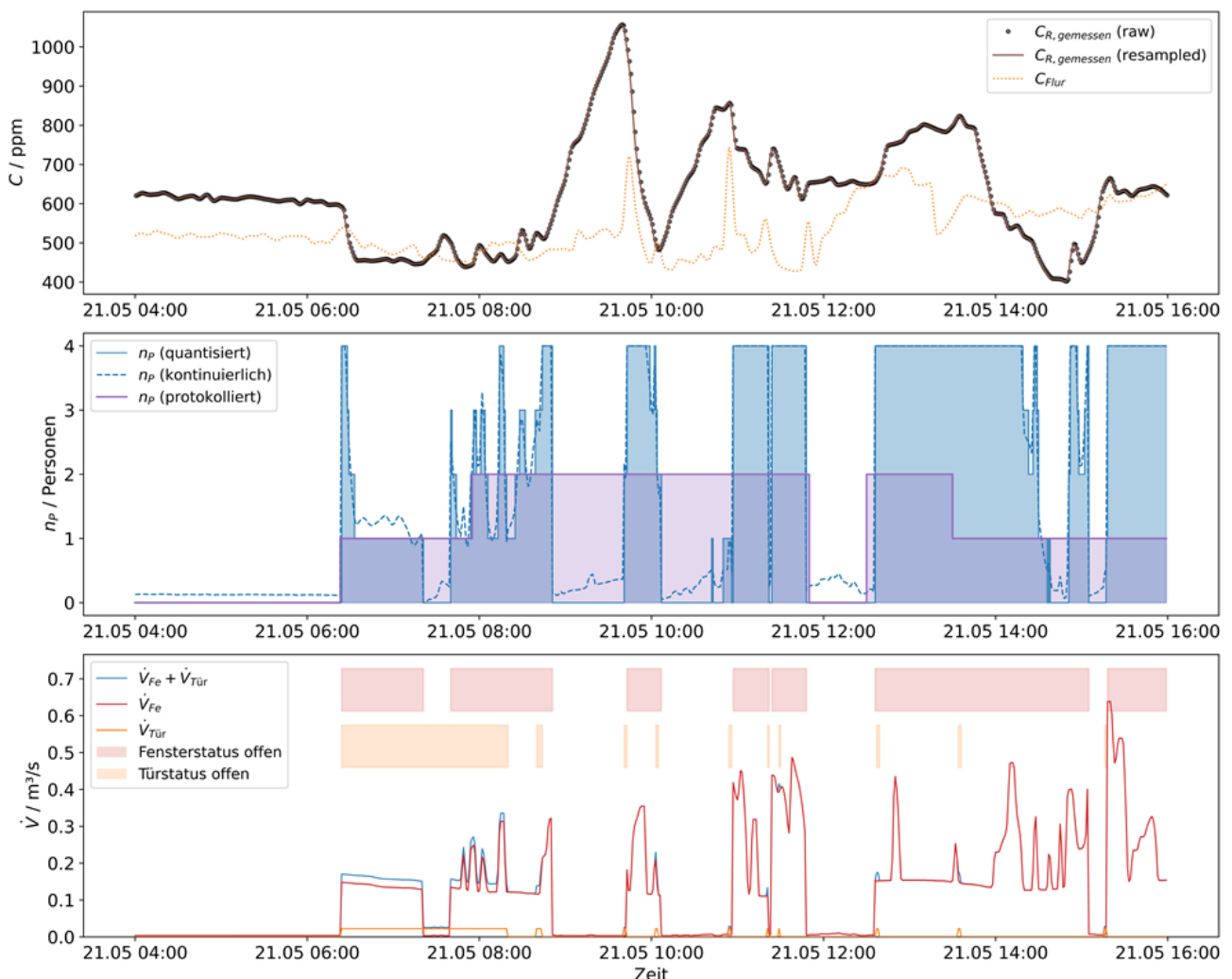


Bild 1: Gemessene CO_2 -Konzentrationen (oben) sowie daraus geschätzte neben protokollierter Personenbelegung

men bei Annahme einer idealen Mischströmung. Die Bilanzierung (rechte Seite der DGL) ist an die Gegebenheiten und Randbedingungen anzupassen. Anhand der hierfür notwendigen Terme für Luftströme über Fenster oder Türen lässt sich der potentielle Nutzen erkennen, den beispielsweise typische SH-Komponenten wie Fenster- und Türkontakte sowie weitere Messwerte wie Temperatur und CO_2 -Konzentrationen bieten, um die Eingangsgrößen des Modells genauer anzugeben. Für die Luftströme über Fenster ist ein statischer Modellansatz in Abhängigkeit der lichten Maße der Fensteröffnung (h_{Fe}, b_{Fe}), dem Durchflussverhältnis ϕ , der Windgeschwindigkeit v_w und der Temperaturdifferenz ΔT zwischen den verbundenen Lufträumen nach Maas [3] gewählt:

$$\dot{V}_{Fe} = f(h_{Fe}, b_{Fe}, \phi, v_w, \Delta T)$$

Auf die Werte der Randbedingungen und die Modelle im Detail wird

hier nicht näher eingegangen, da der Fokus auf den vorgeschlagenen methodischen Ansätzen liegt und dafür die Modellbeschreibungen in der gegebenen Form hinreichend sind. Entsprechend exemplarisch und rein zur Anschaulichkeit sind die Diagramme einzuordnen.

Der Lösungsansatz nach Cali et al. ermittelt die Personenanzahl, indem die kontinuierliche Systembeschreibung in eine zeitdiskrete Form transformiert und nach der Personenanzahl umgestellt wird, sodass die erhobenen Messwerte unter Annahme der übrigen Eingangsgrößen eingesetzt werden können.

In Bild 1 ist ein exemplarisches Ergebnis dieses Vorgehens angewendet auf reale Daten (CO_2 -Messung, Fenster- und Türkontakte sowie protokollierte Belegung) eines Büroraums (ca. 25 m² Grundfläche) über 12 h eines beliebig gewählten Tages dargestellt. Die Luftströme als weitere Eingangsgrößen sind mit dem Modell für

den Luftstrom über das Fenster sowie konstanten Werten für offene und geschlossene Türen geschätzt. Fehler in den Modellannahmen und -eingangsgrößen können sich in falschen Schätzergebnissen für die Personenanzahl auswirken. Hinweis: die protokollierte Personenbelegung muss wegen des händischen Verfahrens als Näherung betrachtet werden. Da es an dieser Stelle nicht um eine quantitative Bewertung der Algorithmen gehen soll, wird im Folgenden das Belegungsprofil als korrekt zutreffend behandelt. Die algorithmische Schätzung zeigt sich in Bild 1 wenig genau, sodass im Folgenden Bedingungen für die Schätzbarkeit untersucht werden.

Unterscheidbarkeit der Personenanzahl anhand von CO_2 -Messwerten

Es wird diskutiert, inwiefern die Hypothese für eine hinreichende Sensitivität einer CO_2 -Messung gegenüber anwesenden

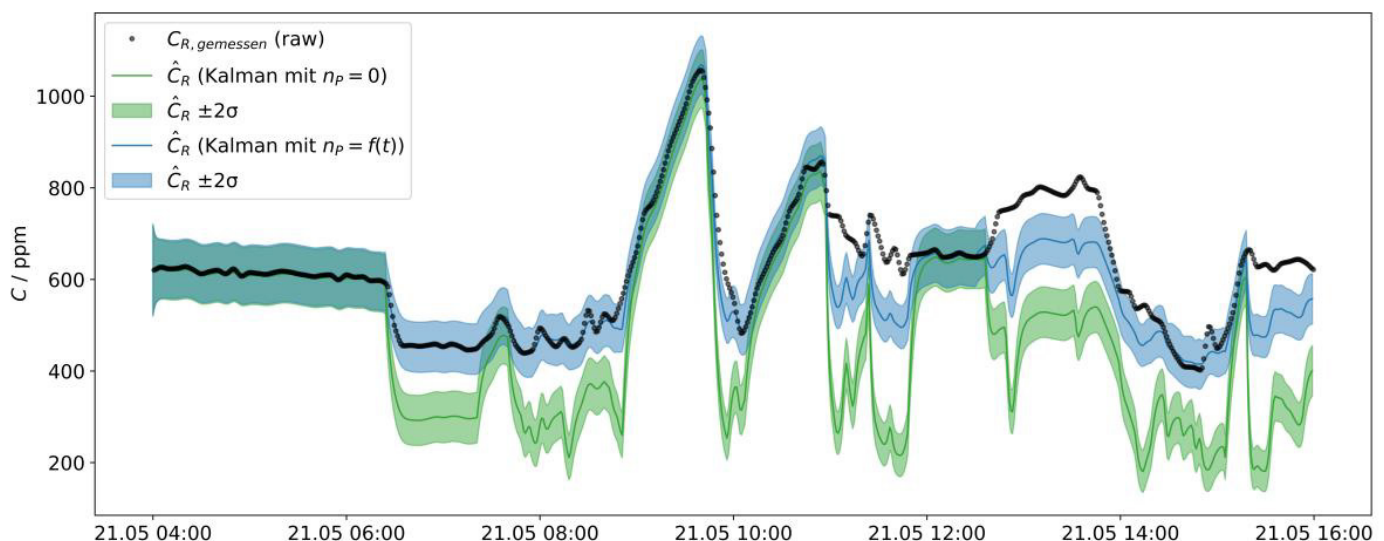


Bild 2: Gemessene CO_2 -Konzentration und zwei Filter parametrisiert mit niedrigem Prozessrauschen

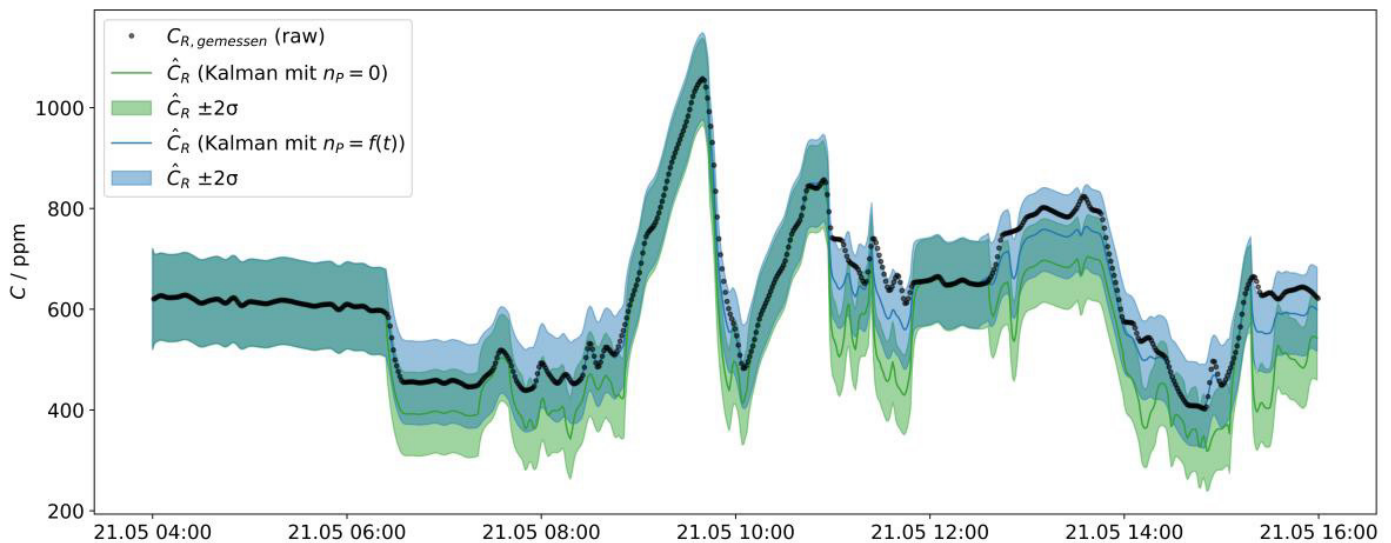


Bild 3: Gemessene CO₂-Konzentration und zwei Filter parametrisiert mit erhöhtem Prozessrauschen

Personen gegeben ist. Dies erfolgt durch eine Abstraktion auf die zentrale Prämisse einer Unterscheidbarkeit der Personenanzahl bei einer mit Unsicherheit behafteten Messung der CO₂-Konzentration. Hierfür werden zwei Kalman Filter auf die Daten der CO₂-Konzentration angewendet. Ein solches Filter erweitert im typischen Fall die Zustandsgleichung der CO₂-Dynamik um ein Prozessrauschen, welches beispielweise Modellfehler abbildet. Die Systembeschreibung wird zudem um eine Messgleichung mit Messrauschen erweitert.

$$\frac{dC_R}{dt} = f_1(C_R, \dots) + \text{Prozessrauschen}$$

$$C_{R, \text{ gemessen}} = f_2(C_R) + \text{Messrauschen}$$

Die Rauschterme sind als mittelwertfreie Gauß'sche Normalverteilungen angenommen. Ein Kalman Filter ist bei verrauschten Daten das optimale lineare Filter [4].

Im Diagramm zeichnet das Band um die mittlere Schätzung (Linie) des Kalman Filters die doppelte momentane Standardabweichung, wie diese im Zuge der

Filterung als Unsicherheit der Schätzung ermittelt wird.

Die beiden angewendeten Filter unterscheiden sich darin, dass im Modell des einen Filters (grün) keine Personenbelegung angenommen ist ($n_P = 0$) und im anderen Filter (blau) die Belegung entsprechend des protokollierten Belegungsprofils ($n_P = f(t)$) eingeht, siehe Bild 2 und 3. Für das Datenset soll eine Unterscheidbarkeit dann als gerechtfertigt gelten, wenn die beiden Schätzungen unter der Bedingung der gegebenen, gemessenen CO₂-Konzentration innerhalb folgender Fälle bewertet sind. Vier Fälle können als Konstellationen zwischen den Messdaten und den beiden Schätzungen einschließlich Vertrauensintervall, hier gewählt 95%-Vertrauensintervall, der Kalman Filter unterschieden werden:

1. Beide Filter weisen eine Überlappung zwischen Messdaten und Vertrauensintervall auf.
→ keine Unterscheidbarkeit
2. Nur das Filter (blau) mit Kenntnis des Belegungsprofils weist eine Überlappung zwischen Messdaten und Vertrauensin-

tervall auf.

→ Unterscheidbarkeit gegeben

3. Nur das Filter (grün) ohne Belegung weist eine Überlappung zwischen Messdaten und Vertrauensintervall auf, oder
4. kein Filter weist eine Überlappung zwischen Messdaten und Vertrauensintervall auf.
→ Keine Unterscheidbarkeit und Modellfehler mindestens in Filter mit Kenntnis der Belegung zu vermuten.

Fall 3 und Fall 4 deuten darauf hin, dass trotz der Kenntnis des Belegungsprofils und Eingang der gemessenen CO₂-Konzentration in das Filter der Modelleinfluss die Schätzung so stark von den Messdaten wegbewegt, dass keine Überlappung mehr gegeben ist. Daran werden Parameter- bzw. Modellfehler (des Modells im Kalman Filter) erkennbar, da das Filter die Messdaten nicht mit der Schätzung vereinbaren kann. Im vorliegenden Beispiel ist die These, dass dies vor allem an einer falschen Schätzung der luftstrombedingten Stoffströme liegt, d. h.

die berechneten Luftströme zu stark von der Realität abweichen. Beispielsweise scheinen die Luftströme bei offenem Fenster und Tür tendenziell zu hoch und bei geschlossenem Fenster und Tür zu niedrig angenommen.

Adaption der Filter

In Anlehnung an Simon [4] wird das Auftreten des Falls 4 in Bild 2 zum Anlass genommen, um das angenommene Prozessrauschen zu erhöhen, da Modellfehler als Ursache vermutet sind. Dies erfolgt soweit bis das erste Filter mit Kenntnis der Personenbelegung mit den gemessenen CO₂-Konzentrationen vereinbar ist unter der gegebenen Unsicherheit der Schätzung. An dieser Stelle wird das Prozessrauschen als konstanter Parameter gesetzt und zum Zwecke der Anschaulichkeit hier von der Möglichkeit zeitvarianter Parameter abgesehen. Mit dem erhöhten Prozessrauschen wird der Fall 4 eliminiert. Um den Parameter des Prozessrauschens vom einen auf das andere Filter zu übertragen, wird unterstellt, dass das Prozessrauschen für beide Filter durch die Ähnlichkeit der erwarteten Modellgenauigkeit in gleicher Weise angenommen wird.

Die Standardabweichung des Prozessrauschens ist in Bild 3 gegenüber Bild 2 von 20 ppm auf 45 ppm erhöht und auf beide Filter übertragen. Anhand der Messunsicherheit ist die Standardabweichung des Messrauschens zu 60 ppm angenommen.

Mit diesem Vorgehen werden fol-

gende Voraussetzungen für den Algorithmus auf Basis der CO₂-Konzentration für eine vertrauenswürdige Belegungsschätzung erwartet, insbesondere im Hinblick auf das Schätzen von Präsenz: die Unsicherheit in den Annahmen des Modells sollten durch Modellvalidierung soweit reduziert werden können, dass eine Vereinbarkeit zwischen Messwerten und Schätzung des Filters mit bekanntem Belegungsprofil feststellbar ist. Zudem sollten hinreichende Zeiten vorliegen, in denen eine Unterscheidbarkeit zwischen dem Filter mit und ohne Kenntnis der tatsächlichen Belegung auftritt. Dieses Kriterium lässt sich für Daten mit bekanntem Belegungsprofil prüfen.

Ausblick

Die vorgeschlagenen Methoden finden Eingang in Algorithmen, die im Zuge der Arbeiten am Forschungsprojekt HEELP entwickelt, untersucht und demonstriert werden. Dadurch soll neben dem direkten Schätzergebnis der Personenbelegung das Kriterium für die Schätzbarkeit in den Algorithmen mitberücksichtigt und damit die Aussage des Schätzergebnisses verbessert werden.

Danksagung

Das Forschungsvorhaben HEELP wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages im Rahmen der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF-Projekt-Nr. 01IF22051N) gefördert und

vom Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. (VdF HLK) als Forschungsvereinigung begleitet. Die Bearbeitung erfolgt in Kooperation des IGTE und des Instituts für Mikro- und Informationstechnik, Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.

Literatur

- [1] openHAB Foundation, <https://www.openhabfoundation.org/>.
- [2] D. Calì, P. Matthes, K. Huchtemann, R. Streblow, and D. Müller, „CO₂ based occupancy detection algorithm: Experimental analysis and validation for office and residential buildings,” *Building and Environment*, vol. 86, pp. 39–49, 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.12.011.
- [3] A. Maas, „Experimentelle Quantifizierung des Luftwechsels bei Fensterlüftung“. Dissertation. Universität Gesamthochschule Kassel, 30. Okt. 1995.
- [4] D. Simon, „Optimal State Estimation: Kalman, H_∞, and Nonlinear Approaches“. Wiley, 2006. doi: 10.1002/0470045345.

Ganzheitliche Analyse von kontinuierlich und alternierend betriebenen Lüftungsgeräten

Mostafa Barghash, Bernd Klein

Einleitung

Bei der Belüftung von Wohngebäuden mit dezentralen Lüftungsgeräten wird zwischen zwei grundsätzlichen Prinzipien unterschieden: alternierend und kontinuierlich arbeitende Geräte. Alternierende Geräte gewinnen Wärme über regenerative Speicher mit periodischer Richtungsumkehr zurück, während kontinuierliche Geräte einen rekuperativen Wärmeübertrager bei parallelem Zu- und Abluftstrom nutzen. Kontinuierlich arbeitende Geräte führen die Zu- und Abluftbetrieb meist über einen Plattenwärmeübertrager und sind in der Regel mit Radialventilatoren ausgerüstet. Alternierende Geräte wechseln zyklisch zwischen der Zu- und Abluft und nutzen einen Wärmespeicher zur Wärmerückgewinnung. Hierbei werden meist Axialventilatoren eingesetzt. Bei alternierenden Geräten erfolgen systembedingt kurze Unterbrechungen des Luftstroms, wohingegen kontinuierlich arbeitende Geräte eine durchgängige Versorgung sicherstellen. Aufgrund der sehr flachen Kennlinien der Axialventilatoren reagieren alternierende Systeme windempfindlicher, während kontinuierliche Systeme mit höherem Druckaufbau robuster gegenüber Windanfälligkeit sind. Das Forschungsvorhaben AlbeLueft bewertet die Praxistauglichkeit beider Gerätekonzepte im Betrieb. Auf Basis von Labor- und Feld-

messungen werden die Systeme unter variablen Randbedingungen verglichen und hinsichtlich Energiebedarf, Komfort und Betriebssicherheit eingeordnet. Bearbeitet wird das Vorhaben in enger Kooperation dreier Forschungseinrichtungen: des Instituts für Gebäude- und Raumklimatechnik (EBC) der RWTH Aachen, des Instituts für Hörtechnik und Akustik (IHTA) der RWTH Aachen sowie der Forschungsgesellschaft Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart mbH (FG HLK). Begleitet wird das Vorhaben durch die Forschungsvereinigung für Luft- und Trocknungstechnik (FLT) und den Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. (VdF HLK).

Der Fokus der Untersuchungen liegt auf den in Bild 1 dargestellten Bereichen, die die wesentlichen Herausforderungen von dezentralen Lüftungssystemen adressieren:

- Wie lässt sich die Winddruck-

anfälligkeit dezentraler Systeme verlässlich bewerten und reduzieren, um Betriebssicherheit und Energieeffizienz zu gewährleisten?

- Welche Maßnahmen gewährleisten einen wirksamen Vereisungsschutz und wie kann dieser energetisch bewertet werden?
- Wie kann die psychoakustische Wirkung (über den Schallpegel hinaus) erfasst, bewertet und verbessert werden, um subjektive Wahrnehmung und Akzeptanz zu erhöhen?
- Welche Filterstrategien sichern dauerhaft eine hohe Luftqualität und einen hygienisch einwandfreien Betrieb?

Vorgehensweise

Das Forschungsvorhaben verbindet experimentelle Untersuchungen mit numerischer Modellierung und theoretischer Analyse. Ziel ist es, wissenschaftliche Grundlagen für eine systematische Bewer-

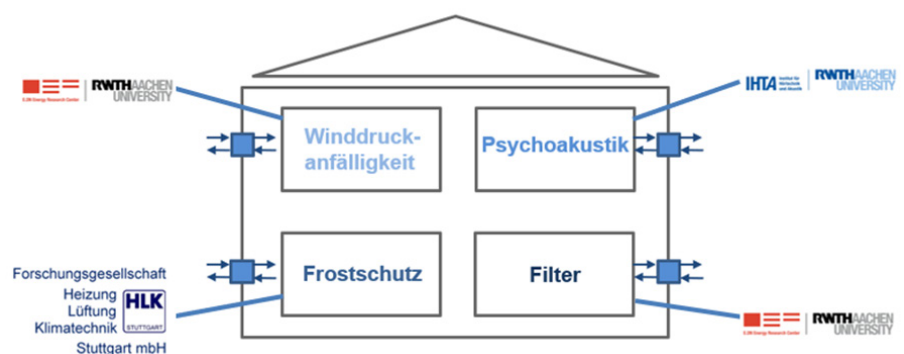


Bild 1: Schwerpunkte des Forschungsvorhabens AlbeLueft

tung raumweise betriebener dezentraler Lüftungsgeräte zu schaffen. Methodisch kombiniert das Forschungsvorhaben eine Bestandsaufnahme aktueller Gerätetechnik und Bewertungsansätze aus relevanter Normenprüfung (bspw. EN 13141-8 und EN 13142) mit Laboruntersuchungen (strömungsmechanische, thermische und akustische Messungen), der Berücksichtigung des Nutzerverhaltens, validierten numerischen Modellen (u.a. CFD-Modelle) und anschließenden Feldtests unter realen Betriebsbedingungen.

Die FG HLK trägt im Forschungsvorhaben zur systematischen Untersuchung und Bewertung von Frostschutzstrategien für dezentrale Geräte bei. Im Gegensatz zum bisherigen statischen Verfahren, das lediglich die Funktionsfähigkeit beurteilt, soll ein dyna-

misches Prüfverfahren basierend auf realitätsnahen Außentemperatur- und Feuchteverläufen entwickelt werden (vgl. Bild 2). Anhand der Messergebnisse werden unterschiedliche Frostschutzverfahren (z.B. Volumenstromreduktion, Bypass-Betrieb, Vorheizung) vergleichend bewertet, ihr Einfluss auf den Ganzjahresbetrieb analysiert, die erforderliche Hilfsenergie zur Frostvermeidung quantifiziert und der jährliche Aufwand mittels einer Jahressimulation abgeschätzt. Dabei werden energetische und betriebliche Kennwerte ausgewertet wie z.B. Dauer und Häufigkeit von Abtauphasen, Volumenstromabbau und Wärmebereitstellungsgrad während Frostschutzaktivität sowie die elektrische Zusatzenergie (z.B. durch Vorheizung oder Ventilator-Mehraufwand). Begleitend werden Feldtests durchge-

führt, um das Systemverhalten unter realen Bedingungen zu untersuchen.

Danksagung

Das Forschungsvorhaben AlbeLuft wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages im Rahmen der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF-Projekt-Nr. 01IF23802N) gefördert und von der Forschungsvereinigung Luft- und Trocknungstechnik (FLT) sowie vom Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. (VdF HLK) begleitet.

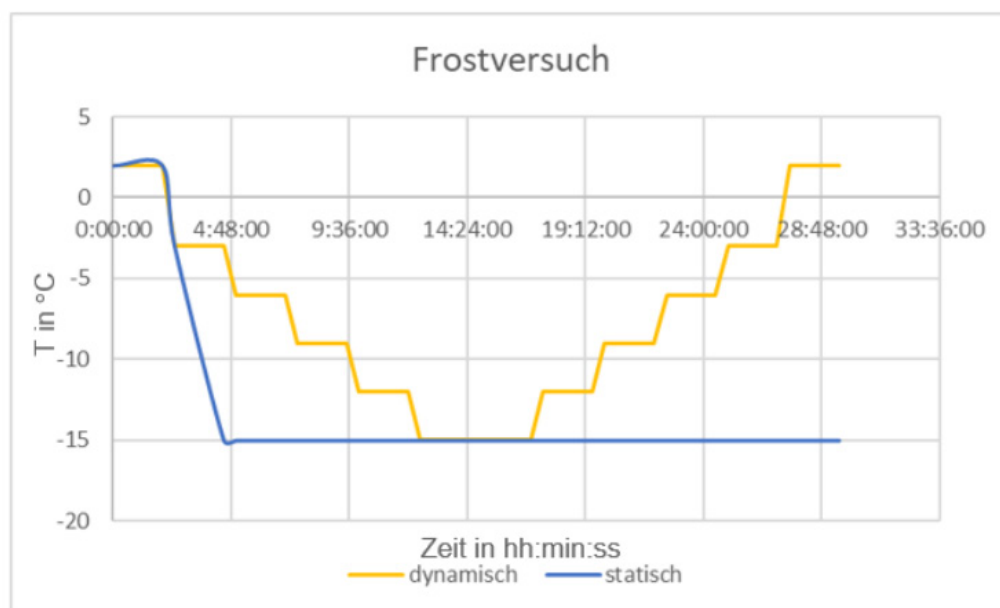


Bild 2: Frostversuch - dynamische und statische Messung

Monitoringsystem zur energetischen Optimierung der Raumklimatisierung bei gleichzeitiger Vermeidung von biogenem Schadstoffbefall an Kunst- und Kulturgütern

Armin Ruppert

Einleitung

In Kirchenräumen befindet sich häufig eine Vielzahl unterschiedlicher Kunst- und Kulturgüter in Form von Orgeln, Skulpturen, Gemälden und Mobiliar, sodass diese ein besonderes Beispiel für Kunst- und Kulturstätten darstellen. Kirchen werden üblicherweise nicht durchgehend, sondern nur an einigen Tagen in der Woche genutzt, sodass prinzipiell längere Zeiträume vorliegen, in denen die Heizung abgeschaltet oder zumindest die Solltemperatur deutlich reduziert wird. Veränderungen des Heizverhaltens und der Wärmeübergabesysteme zur Beheizung haben einen wesentlichen Einfluss auf Warmluftströmungen sowie Oberflächentemperaturen. Durch eine häufig aufgrund von hohen Energiekos-

ten verringerte Temperierung des Kirchenraums und in Folge deutlich schwankender Temperaturen verändert sich das Mikroklima im Kirchenraum, wodurch je nach örtlichen Gegebenheiten zusätzliche kritische Stellen für Schimmelpilzbefall zu erwarten sind. Dies kann sich negativ auf den Zustand von Mobiliar, Einbauten und Kunstwerken auswirken und stellt bei nicht frei zugänglichen, verbauten und stark gegliederten Objekten wie Orgeln oder Hochaltären eine erhebliche Herausforderung dar. Der eng bebaute und verwinkelte Orgelraum bzw. das Orgelwindsystem (Luftversorgung der Orgelpfeifen) ist ohne großflächiges Öffnen der einzelnen Kanalbauteile nur bedingt einsehbar. Daher liefern die routinemäßig durchgeführten Sichtprüfungen üblicherweise erst Hinweise auf einen Schimmelpilzbefall, wenn dieser

bereits fortgeschritten ist und sich bis in die leicht einsehbaren Bereiche ausgebreitet hat.

Zielsetzung

Im Forschungsvorhaben MonOpt-Kir wird vor diesem Hintergrund ein umfassendes Monitoringsystem zur Vermeidung von Wertverlusten und Reduzierung von Sanierungskosten entwickelt. Ziel ist hierbei die energetische Optimierung der Raumklimatisierung, insbesondere der Beheizung sowie die langfristige Überwachung und Identifikation von energetischen Einsparpotentialen, wobei gleichzeitig einem biogenen Befall vorgebeugt werden soll. Das Monitoringsystem wird aufgrund der begrenzten Zugänglichkeit und der damit verbundenen komplexen Problemstellung exemplarisch für eine Kirchenorgel entwickelt sowie an mehreren Objekten validiert, wobei eine Übertragbarkeit auf weitere zu schützende Objekte in anderen Kunst- und Kulturstätten sichergestellt werden soll. Das zu entwickelnde Monitoringsystem (siehe Bild 1) beinhaltet folgende Module: Kartierung, Energie- und Klimamonitoring, Befallsmonitoring und Nutzerhinweise zu möglichen Maßnahmen. Das Forschungsvorhaben wird gemeinschaftlich von drei Forschungseinrichtungen bearbeitet: Forschungsgesellschaft Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart mbH (FG HLK), Institut für Holz-

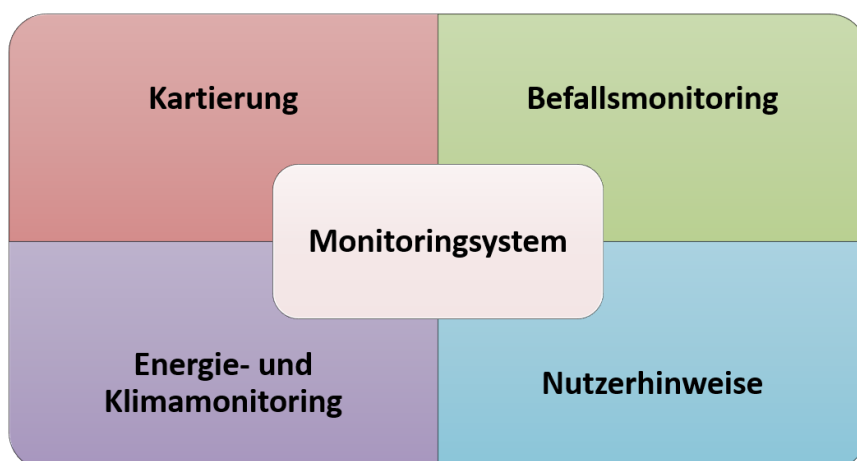


Bild 1: Module des Monitoringsystems

technologie Dresden (IHD) und Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. (IDK). Begleitet wird das Vorhaben durch den Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. (VdF HLK).

Eine wesentliche Voraussetzung für die Modellbildung und Simulation ist die möglichst präzise und generalisierbare Erfassung und Abbildung der neuralgischen, d. h. der schimmelpilzkritischen Bereiche. Die Detektion von Schimmelpilzbefall soll durch erstmalige Anwendung von optisch-forensischen Verfahren auch in schwer einsehbaren Bereichen deutlich genauer möglich sein als durch rein visuelle Inspektion und insbesondere die Detektion in sehr frühen Stadien ermöglichen. Die Dokumentation der befallenen Bereiche erfolgt mit einer einfach anwendbaren Klassifizierungsmethodik (Kartierung), die im Forschungsvorhaben zu entwickeln ist und sich auf unterschiedliche Kunst- und Kulturgüter übertragen lässt. Dieses digitale Kartierungssystem soll eine möglichst einfache Erfassung von Schimmelpilzbefall oder Schäden an Oberflächen ermöglichen, ohne aufwendige Messtechnik in den häufig engen Orgelräumen einsetzen zu müssen.

Die zu untersuchenden Objekte werden saisonal messtechnisch erfasst (Energie- und Klimamonitoring, Befallsmonitoring), wobei das Klima im Kirchenraum und die lokalen Verhältnisse in der Orgel detailliert untersucht

werden. Zudem bieten die saisonalen Messungen die Grundlage für die Validierung eines numerischen Strömungsmodells für den Kirchen- und Orgelraum. Anhand von weiterführenden Strömungssimulationen sollen variierende Beheizungssituationen im Kirchenraum abgebildet und deren Auswirkungen hinsichtlich des Schimmelpilzrisikos auf das Mikroklima im Orgelraum sowie das Orgelwindsystem (Temperaturen, Feuchte, Luftgeschwindigkeiten) aufgezeigt werden.

Nutzen und geplanter Einsatz des Monitoringsystems

Die Zusammenführung der Schadstoffbefallsklassifizierung sowie der Ergebnisse aus den strömungs- und lufttechnischen Untersuchungen im Kirchen- und Orgelraum – auch aus einem vorausgegangenen IGF-Forschungsvorhaben [1] ermöglicht nun die Entwicklung eines Monitoringsystems, um geeignete Maßnahmen zur Vermeidung von biogenem Befall frühzeitig aufzuzeigen. Ziel ist es, mit Hilfe von wenigen Messpunkten und geeigneten Grenzwerten frühzeitig auf kritische Zustände bzw. gefährdete Bereiche hinzuweisen und somit vorbeugende, vergleichsweise einfache und kostengünstige, Maßnahmen zu ermöglichen.

Das Monitoringsystem soll Orgelbauern und Nutzern bzw. Verantwortlichen für die Kirchenorgeln, die über die verringerte Beheizung von Kirchenräumen entscheiden müssen, eine Möglichkeit zur langfristigen Energiebedarfsverringerung bei gleichzeitiger Risikomi-

nimierung eines Befalls bieten. Zudem lässt sich das Monitoringsystem auch zur Einschätzung von Maßnahmen bei befallenen Orgeln einsetzen. Die erarbeitete Methodik bzw. das Monitoringsystem soll basierend auf der exemplarischen Anwendung für Orgeln auf weitere Anwendungsfelder im kulturellen Bereich – mit integrierten schützenswerten kulturellen Objekten (z. B. Bibliotheken, Archive, Museen, Kunstgalerien) – übertragen werden und somit für einen großen Gebäudebestand eine Lösungsmöglichkeit zur energetischen Optimierung bzw. Energiekostenreduktion bieten.

Danksagung

Das Forschungsvorhaben MonOptKir wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages im Rahmen der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF-Projekt-Nr. 01IF24101N) gefördert und vom Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. (VdF HLK) als Forschungsvereinigung begleitet.

Literatur

[1] IGF-Forschungsvorhaben 18891 BG Entwicklung technischer Verfahren zur Vermeidung der biogenen Schadstoffbelastung in Kirchenorgeln. Abschlussbericht 2018. https://www.tihd-dresden.de/fileadmin/user_upload/pdf/Traegerverein/Projekte/IGF18891BG_TIHD.pdf

Weiterentwicklung von Konditionierungssystemen aus textilen Werkstoffen für die kosteneffiziente Klimatisierung von Räumen

Mostafa Barghash

Einleitung

Im abgeschlossenen Forschungsvorhaben TexTemp [1] sind Funktionsmuster für textile Temperiersysteme als Lamellenvorhänge sowie in einen Rahmen integrierte Flächenelemente für die Raumbeheizung und -kühlung entwickelt sowie messtechnisch und simulativ untersucht worden. Die Ergebnisse zeigen, dass diese grundsätzlich konfektions- und anlagentechnisch beherrschbar und die erreichbaren Heiz- und Kühlleistungen für die personen-nahe Installation an Arbeitsplätzen geeignet sind. In Bild 1 ist die Anordnung der Lamellen vor dem

Fenster eines Büroraums mit entsprechender hydraulischer Einbindung und Sensorik während eines praxisnahen Langzeitversuchs dargestellt.

Im Folgeprojekt „KonTex“ (Weiterentwicklung von Konditionierungssystemen aus textilen Werkstoffen für die kosteneffiziente Klimatisierung von Räumen) steht insbesondere die Kombination textiler Temperiersysteme als Raumteiler und Deckenelemente mit weiteren Funktionalitäten zur Sicherstellung bzw. Verbesserung der Raumluftqualität und der thermischen Behaglichkeit im Fokus der Untersuchungen. Entsprechend sollen die vorhandenen Funktionsmuster um weitere funktiona-

le Eigenschaften ergänzt werden. So ist beabsichtigt, die Funktionsmuster mit Lüftungs- und Akustikfunktionen auszustatten, um sie als textile Konditionierungssysteme für eine lokale Arbeitsplatzkonditionierung zu entwickeln.

Das Forschungsvorhaben wird gemeinschaftlich von drei Forschungseinrichtungen bearbeitet: Am Institut für Energietechnik (IET) der TU Dresden erfolgen Simulationen zum thermischen Verhalten und der Luftverteilung. Das Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM) der TU Dresden verantwortet die material- und textiltechnischen Entwicklungen sowie die Fertigung der Funktionsmuster. Die experimentelle Prüfung und Bewertung der heiz-, kühl- und lufttechnischen Funktionen erfolgt durch die Forschungsgesellschaft Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart mbH (FG HLK).

Vorgehen

Zunächst werden relevante Einsatzszenarien, zu berücksichtigende Raumtypen und charakteristische Lastfälle analysiert. Auf dieser Grundlage werden die funktionalen, konstruktiven und anlagentechnischen Anforderungen an das textile Konditionierungssystem festgelegt und geeignete Funktionsmuster abgeleitet. Es folgt die textiltechnische Entwicklung der Systeme einschließlich der Materialauswahl und Gestaltung der Medienkanäle für Wasser

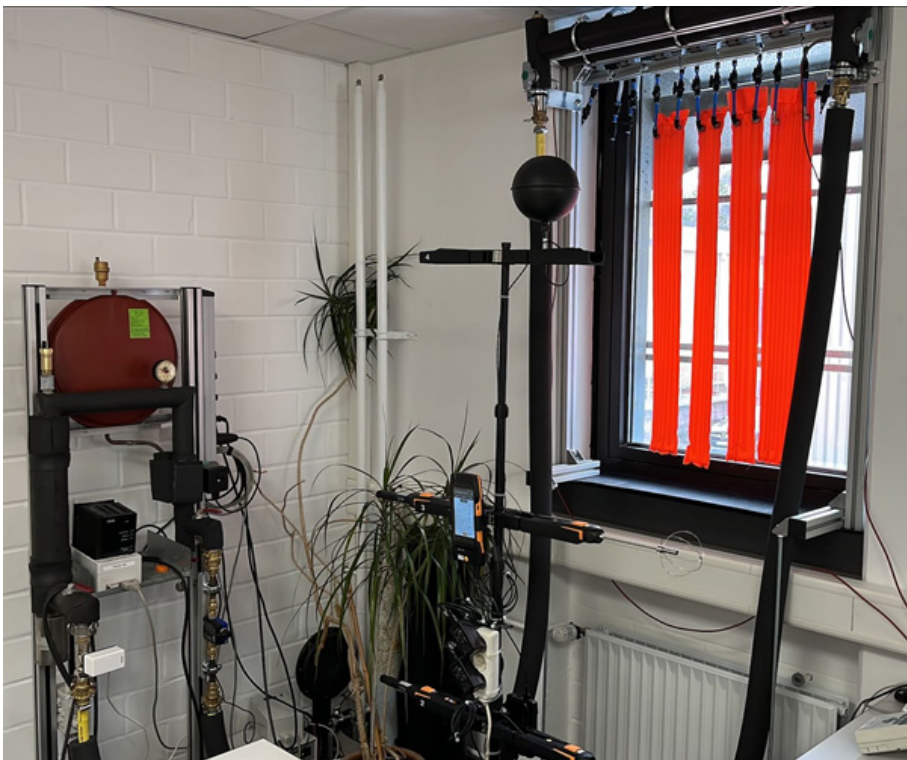


Bild 1: Praxisnahe Untersuchungen im Forschungsvorhaben TexTemp

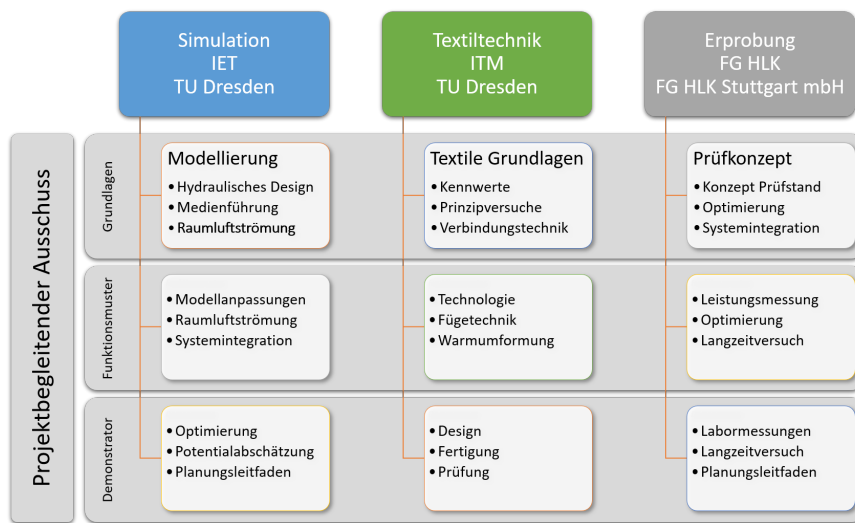


Bild 2: Aufgabenbereiche der Forschungseinrichtungen in KonTex

und Luft sowie die Ausarbeitung geeigneter Füge-, Verbindungs- und Fertigungsverfahren.

Parallel dazu werden thermisch-energetische und Strömungssimulationen durchgeführt, um die Luftführung sowie die Wärmeübertragung an den Raum zu optimieren. Ergänzend wird ein modularer Versuchsstand konzipiert, der thermische, hydraulische und lufttechnische Messungen ermöglicht. Weiterhin werden die mechanischen, hydraulischen und regelungstechnischen Anforderungen definiert und basierend darauf die Einbindung des textilen Konditionierungssystems in Gebäude und deren Anlagentechnik konzipiert. Anschließend werden die entwickelten Funktionsmuster messtechnisch hinsichtlich unterschiedlicher Parameter luft- und wasserseitig geprüft: Dazu gehören unter anderem die Heiz- und Kühlleistung, der Druckabfall, das Strömungsverhalten sowie die thermische und lufthygienische

Behaglichkeit im Aufenthaltsbereich von Personen. Die Funktionsmuster werden auf Basis der Erkenntnisse aus den messtechnischen und simulativen Untersuchungen überarbeitet und anschließend in einen praxisnahen Demonstrator überführt. Dieser wird in einem Büroraum installiert und in einem Langzeitversuch erprobt, um das Gesamtsystem hinsichtlich Leistung, Komfort, Stabilität und Regelverhalten zu verifizieren. Abschließend werden die Erkenntnisse in einem praxisorientierten Planungsleitfaden zusammengeführt, der Planungsgrößen, Integrationsanforderungen, Dimensionierungskenngrößen und empfohlene Prüf- und Qualitätskriterien für zukünftige Anwendungsfelder bereitstellt.

Danksagung

Das Forschungsvorhaben KonTex wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des

Deutschen Bundestages im Rahmen der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF-Projekt-Nr. 01IF23804N) gefördert und vom Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. (VdF HLK) als Forschungsvereinigung begleitet.

Literatur

[1] Entwicklung und Erprobung von textilen Temperiersystemen für die kosteneffiziente Klimatisierung von Räumen (TexTemp). Abschlussbericht 2023 https://vdf.hlk-stuttgart.de/fileadmin/Redaktion/Forschung/IGF-Bericht/Schlussbericht_TexTemp_21073_BG.pdf

Entwicklung einer Fassadenheiz- und Fassadenkühleinheit zur seriellen Sanierung von Bestandsgebäuden

Sebastian Asenbeck

Hintergrund

Der Gebäudesektor erreicht seine Zielsetzung hinsichtlich der Klimaneutralität seit mehreren Jahren nicht [1]. Notwendig ist eine weitreichende Sanierung des Gebäudebestands – Reduktion des Wärmebedarfs (Maßnahmen an der Gebäudehülle) und Dekarbonisierung der Wärmeerzeugung –, was Sanierungsraten erfordert, die mit den verfügbaren Handwerkskapazitäten heute nicht vorstellbar erscheinen. Ein weiteres großes Hindernis dabei ist, dass beide Investitionen i. d. R. zusammen getätigt werden müssen, und dass sowohl Arbeiten an der Gebäudehülle (Dämmung) als auch in den Technik- sowie Wohn- bzw. Nutzräumen (Wärmeerzeuger, Heiz- und ggf. Kühlflächen) erforderlich sind. Dies führt in der Praxis oft zu einem Verschleppen der Sanie-

rungsmaßnahmen oder nur des Austausches des Wärmeerzeugers, verbunden mit für die kommenden Jahrzehnte weiterhin unerwünscht hohen CO₂-Emissionen.

Bei der Transformation der Energieversorgung im Gebäudebestand wird neben erneuerbar erzeugter Nah- und Fernwärme der Einsatz von Wärmepumpen eine entscheidende Rolle spielen [2]. Wärmepumpen benötigen für einen hocheffizienten Betrieb Niedertemperatur-Heizflächen (Fußboden-, Wand- oder Deckenheizungen), die im Gebäudebestand i. d. R. nicht vorhanden sind. Weiterhin haben Wärmepumpen heute i. d. R. Außenluft oder das Erdreich als Wärmequelle. Beide Systeme scheiden speziell in innerstädtischen Lagen, insbesondere bei Mehrfamilienhäusern, oft aus wegen der Geräuschbelastung und eingeschränkter Platz-

verhältnisse (Luft-Wärmepumpe) oder nicht gegebener räumlicher oder geologischer Voraussetzungen für Erdsonden.

fronTherm-Konzept, Funktionsweise und Zielsetzung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens fronTherm wird deshalb ein neuartiges System entwickelt, das die gleichzeitige Sanierung von Gebäudehülle und Heizsystem ermöglicht, ohne größere Arbeiten im Inneren des Gebäudes zu verursachen. Es soll den effizienten Einsatz von Solar- und Wärmepumpentechnologie ermöglichen und auch von angelerntem Personal fehlerfrei eingesetzt werden können.

Es könnte damit auf disruptive Weise eine deutliche Steigerung der Sanierungsraten ermöglichen und so einen wesentlichen Beitrag zur Energiewende im Gebäudesektor leisten. Das Lö-

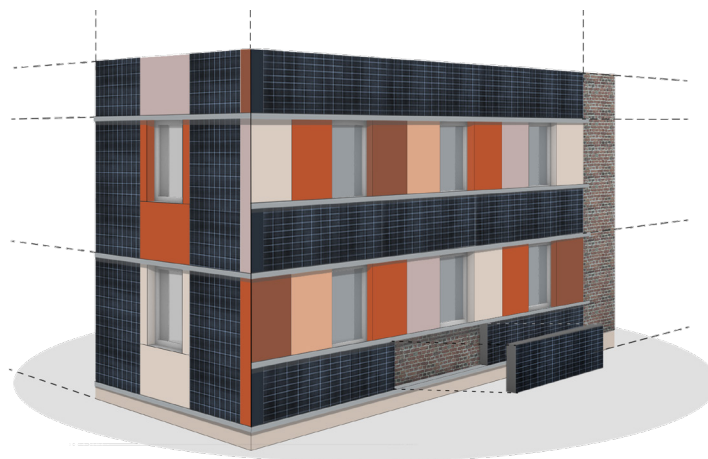


Bild 1: Sanierungskonzept mit den neuartigen Fassadenheiz- und -kühleinheiten (links) und erstes Funktionsmuster (rechts)

sungskonzept beruht auf Fassadenheiz- und -kühleinheiten (sog. fronTherm-Module), die in Serie produziert und außen auf die Fassade aufgebracht werden (siehe Bild 1). Jedes Modul beinhaltet eine Kleinst-Wärmepumpe mit einer Kondensatorfläche zur Wärmeabgabe auf der Innenseite zur Gebäudewand hin, und eine Verdampferfläche auf der Außenseite zur Umgebungsluft und Sonne hin (Heizfall). Diese Fläche ist bei geeignet exponierten Fassaden auch mit PV-Modulen ausgestattet. Im Kühlfall wird die Kondensator- zur Verdampferfläche und umgekehrt. Die Fassadenheiz- und -kühleinheiten dienen als einzige Wärme- und Kältequelle für das Gebäude. Auf diese Weise sind mit einer Sanierungsmaßnahme gleichzeitig vier Schritte in Rich-

tung Klimaneutralität möglich:

- Reduzierung des Heizwärmebedarfs durch Dämmung der Fassade,
- Installation von PV zur Erzeugung der in der Jahresbilanz nötigen elektrischen Energie zum Betrieb der Wärmepumpen und somit bilanzielle Deckung des Heizwärmebedarfs,
- Ersetzen alter Heizsysteme durch effiziente Wärmepumpentechnik,
- Kühlen im Sommer.

In Bild 2 ist das Funktionsprinzip für den Heizfall schematisch dargestellt. Da für energetisch sanierte Gebäude die Lüftungswärmeverluste einen zunehmenden Teil der Heizlast verursachen, beinhaltet das Konzept einen Lösungsansatz für eine maschinelle Wohnungslüftung, der auch in Be-

standsgebäuden mit vergleichsweise geringem Aufwand umgesetzt werden kann. Dieser ist angelehnt an ein klassisches Abluftsystem. Die hierfür zentrale Komponente ist die Abluft-Wärmepumpe zur Trinkwassererwärmung, die zentral in jeder Wohneinheit – typischerweise im Bad – die Abluft ansaugt, abkühlt und über einen Wanddurchlass an die Umgebung abführt. Gleichzeitig strömt über die Fassadeneinheiten der Wohnräume entsprechend Außenluft nach, die im Winter mit der integrierten Wärmepumpe auf Temperaturen bis zu etwa 50 °C vorgewärmt werden kann. Die vorgewärmte Zuluft unterstützt darüber hinaus die Beheizung der mit Fassadeneinheiten belegten Außenwände.

Der Einsatz einer Abluft-Wärme-

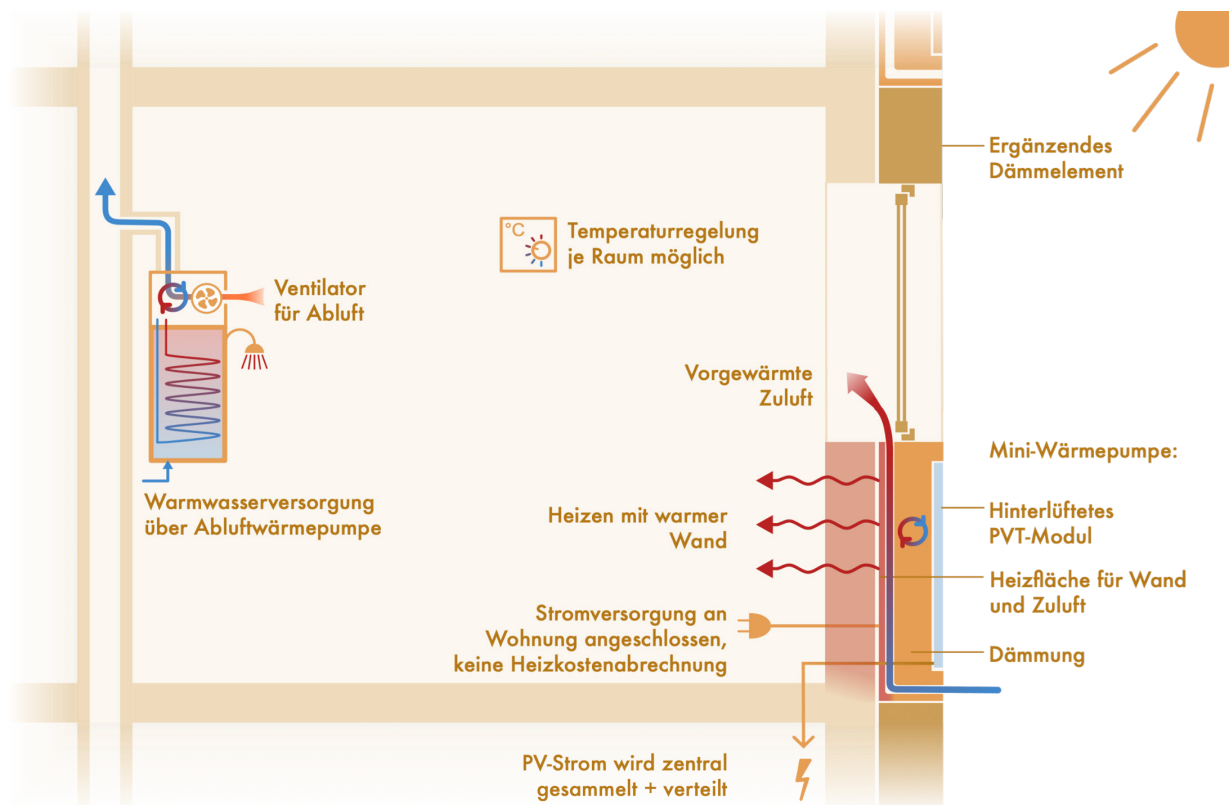


Bild 2: Funktionsprinzip Heizung und Lüftung

pumpe ermöglicht parallel zur Trinkwassererwärmung die Versorgung eines wassergeführten Badheizkörpers oder weniger ergänzender Heizkörper in Räumen, die nicht oder nicht ausreichend mit Fassadeneinheiten belegt werden können.

Umsetzung und Partner

Leitung und Koordination der Entwicklungsarbeiten liegen bei der Firma Consolar, die auch die Konstruktion und den späteren Vertrieb der Fassadeneinheit übernimmt. Hier kann auf umfangreiche Erfahrungen in der Solar- und Heiztechnik zurückgegriffen werden, insbesondere auch im Zusammenhang mit dem speziell für Wärmepumpensysteme entwickelten Photovoltaisch-Thermischen-Kollektor (PVT-Kollektor) [3].

Am Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung der Universität Stuttgart (IGTE) werden sämtliche Arbeiten in Zusammenhang mit Simulation, Regelung, Modellierung, Auslegung und messtechnische Untersuchung des Fassadenheiz- und -kühlsystems durchgeführt. Außerdem werden Planungswerkzeuge entwickelt und Fragestellungen bezüglich Zulassung und Normung bearbeitet.

Bauphysikalische Fragen, Themen im Zusammenhang mit der architektonischen und bautechnischen Integration sowie der Potentialermittlung im Gebäudebestand werden am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) be-

arbeitet. Ein weiterer Partner, die ME Wohnungsverwaltung GmbH unterstützt mit Erfahrungen aus der Baupraxis und stellt ein Bestands-Mehrfamilienhaus, an dem die Sanierung mit dem entwickelten Fassadenheiz- und -kühlsystem demonstriert werden kann.

Die Firma Eberspächer übernimmt als assoziierter Produktionspartner die Auslegung des Kältekreises, die Fertigung der Modul-Prototypen sowie im Anschluss an das Projekt den Aufbau der Produktionslinie. Aktuell erfolgt die finale Abstimmung des B-Musters hinsichtlich Konstruktion, Fertigung und Lieferanten, das ab Ende 2025 in Klimakammern des IGTE vermessen und charakterisiert werden soll.

Zusätzlich wurde ein projektbegleitendes Umsetzungskonsortium aus Akteuren unterschiedlicher beteiligter Branchen aufgebaut, das den gesamten Entwicklungsprozess in regelmäßigen Abständen mit erweiterter fachspezifischer Einschätzung und Praxis-Feedback begleitet.

Danksagung

Das Forschungsvorhaben frontTherm wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages über den Projektträger Jülich (PTJ) unter dem Förderkennzeichen 03EN6036D gefördert.

Literatur

- [1] Loga, Tobias et al.: Deutsche Wohngebäudetypologie – Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. 2., erw. Auflage, IWU, 2015.
- [2] Walberg, Dietmar et al.: Wohnungsbau: Die Zukunft des Bestandes – Studie zur aktuellen Bewertung des Wohngebäudebestands in Deutschland und seiner Potenziale, Modernisierungs- und Anpassungsfähigkeit. Bauforschungsbericht Nr. 82 der Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V., 2022.
- [3] Asenbeck, Sebastian; Fischer Stephan: Anlagen-Monitoring und Simulation eines Wärmepumpen-Heizsystems mit PVT-Kollektoren als Wärmequellen. HLK-Brief 2019, Artikel 202.

Wärmegestehungskosten unterschiedlicher Wärmepumpensysteme im Einfamilienhaus-Neubau

Stephan Bachmann,
Stephan Fischer

Einleitung

Bei der ökologischen und ökonomischen Bewertung von Systemen und Komponenten für die Wärmeversorgung in Wohngebäuden über den Lebenszyklus spielen zahlreiche Einflussfaktoren eine Rolle. Das Projekt „Effizientes Heizen“, initiiert vom Fraunhofer ISE, Fraunhofer IBP und dem Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart sowie mit Vertretern aus den Bereichen Heiztechnik, Immobilien und Planung durchgeführt, hat zum Ziel, die zugrunde liegenden komplexen Zusammenhänge zu erfassen, zu bewerten und technologieübergreifend vergleichbar zu machen.

Für einen objektiven Kostenvergleich verschiedener Heiztechnologien wurden ein standardisiertes Verfahren, Referenzgebäude, Kostenmodelle und Randbedingungen für die wirtschaftliche Berechnung definiert [1], [2], [3]. Darüber hinaus wurden verschiedene Heiztechnologien für Referenzgebäude in Jahressimulationen untersucht, um den jeweiligen Energiebedarf zu ermitteln [4], [5].

Referenzgebäude

Für den Vergleich verschiedener Heiztechnologien sind genau definierte Wärmebedarfe erforderlich. Um diese Anforderung zu erfüllen und einen großen Teil des Wohnungsmarktes in Deutschland abzudecken, wurde u. a. ein Einfamilienhaus am Standort Potsdam im Neubau mit dem entsprechenden Wärmebedarf für Raumheizung und Trinkwassererwärmung definiert. Zur Definition des Gebäudes, das als möglichst repräsentativ angesehen wird, wurde die IWU-Gebäudetypologie [6] verwendet, die auch die Grundlage der europäischen Gebäudedatenbank TABULA bildet. Das Gebäude hat eine Wohnfläche von 140 m² und einen Warmwasserbedarf von 10,2 kWh/(m²·a) sowie einen Raumwärmebedarf von 45 kWh/(m²·a) und einen Strombedarf für den Haushalt von 3.270 kWh/a.

Untersuchte Wärmepumpensysteme

Die Wärmegestehungskosten (LCoH: Levelised Cost of Heat) der folgenden Wärmepumpensysteme wurden über einen Zeitraum von 25 Jahren ermittelt:

1. Luft-Wasser-Wärmepumpe mit PV-Anlage (10,25 kWp)

2. Luft-Wasser-Wärmepumpe mit PV-Anlage (9,02 kWp) und Solarthermieanlage (6 m² Flachkollektoren)
3. Sole-Wasser-Wärmepumpe mit PVT-Kollektor (14,52 m²) und PV-Anlage (7,38 kWp)
4. Erdwärmepumpe mit PV-Anlage (10,25 kWp)

Die hydraulischen Schemata der Wärmepumpensysteme wurden auf Grundlage der Empfehlungen des Bundesverbands Wärmepumpe e.V. (BWP) und der Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz (FWS) entwickelt. Dies führt zu Systemen mit jeweils einem Speicher für Warmwasser und die Raumheizung. Das Volumen der Pufferspeicher für die Raumheizung beträgt 150 l, das Volumen der Warmwasserspeicher beträgt 250 l für Anlagen ohne Solarthermieanlage und 400 l mit Solarthermieanlage. Die analysierten Wärmepumpen sind invertergesteuert und verwenden Propan als Kältemittel. Sie wurden gemäß VDI 4645 [7] ausgelegt.

Wärmegestehungskosten (LCoH)

Die Wärmegestehungskosten sind auf den Wärmebedarf des Gebäudes bezogen und erfolgten über einen Betrachtungszeitraum von 25 Jahren, mit einem

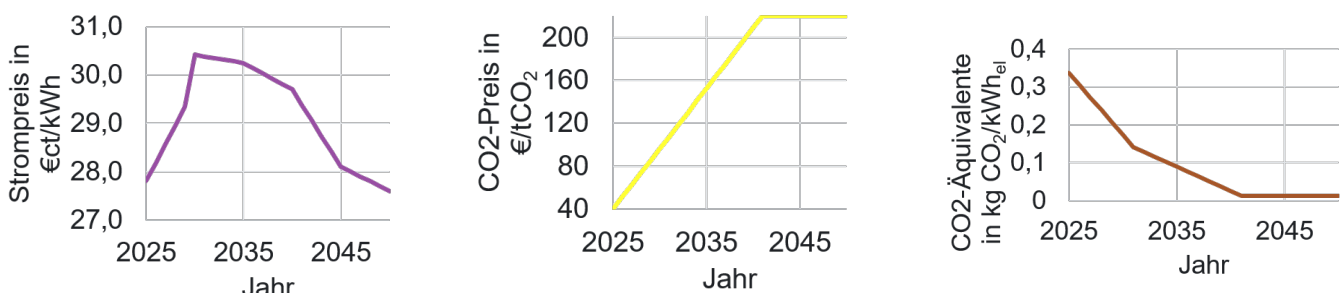


Bild 1: Randbedingungen für die ökonomische Betrachtung

Tabelle 1: Ergebnisse aus den Jahressimulationen und Wärmegestehungskosten (LCoH)

	Luft/Wasser-Wärmepumpe	Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Solarthermie	Sole/Wasser-Wärmepumpe mit PVT-Kollektor	Erdwärmepumpe
JAZ Wärmepumpe [-]	3,80	3,71	3,95	4,54
Netzstrombedarf Wärmepumpe [kWh/a]	2.243	2.271	2.190	1.852
LCoH [€/kWh]	0,250	0,277	0,365	0,358

Kalkulationszins von 2 % und einer Einspeisevergütung des PV-Stroms von 7,94 €/kWh. Bild 1 zeigt weitere Randbedingungen in Abhängigkeit der Zeit wie den Strompreis (ohne CO₂-Kosten), den CO₂-Preis und die CO₂-Äquivalente. Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse aus den Jahressimulationen und die Wärmegestehungskosten der Anlagen.

Fazit

Die günstigsten Wärmegestehungskosten hat das System mit Luft/Wasser-Wärmepumpe mit 0,250 €/kWh, aber auch die Luft/Wasser-Wärmepumpe mit thermischer Solaranlage ist mit 0,277 €/kWh eine gute Alternative. Für die beiden anderen Systeme sind die Wärmegestehungskosten um ca. 30 % bis 40 % höher.

Der maßgebliche Kostenfaktor für die untersuchten Anlagen sind die Investitionskosten. Die restlichen Kosten bewegen sich für alle Systeme in einer ähnlichen Größenordnung. Die PV-Anlage hat einen deutlichen Einfluss auf die Wärmegestehungskosten durch die Eigenbedarfsdeckung und die Einspeisevergütung.

Danksagung

Das Forschungsprojekt „Syste-

matische 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 deutschen Bundestages vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) über den Projektträger Jülich (PTJ) unter dem Förderkennzeichen 03EN6014A und B gefördert, sowie durch die beteiligten Industriepartner finanziell und inhaltlich unterstützt.

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, ISBN 978-3-948176-22-8
- [2] Fischer, S.: Einheitliche Modellierung der Wärmegestehungskosten in Ein- und Mehrfamilienhäusern, Beitrag zum 33. Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme 2023, Bad Staffelstein, ISBN 978-3-948176-22-8
- [3] Fischer, S.: Definition der

Randbedingungen zum ökonomischen Vergleich von Heizungstechnologien in Ein- und Mehrfamilienhäusern, Beitrag zum 34. Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme 2024, Bad Staffelstein, ISBN 978-3-948176-26-6

[4] Bachmann, S., Fischer, S.: Definition generischer Heizungsanlagen für den ökonomischen und ökologischen Vergleich, Beitrag zum 34. Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme 2024, Bad Staffelstein, ISBN 978-3-948176-26-6

[5] Bachmann, S., Fischer, S.: Definition generischer Heizungsanlagen für den ökonomischen und ökologischen Vergleich – Teil 2, Beitrag zum 35. Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme 2025, Bad Staffelstein,

[6] Loga, Tobias; Stein, Britta; Diefenbach, Nikolaus; Born, Rolf (2015): Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden; ausgearbeitet im EU-Projekt TABULA

[7] VDI 4645: Heizungsanlagen mit Wärmepumpen in Ein- und Mehrfamilienhäusern Planung, Errichtung, Betrieb

Untersuchung des Einflusses der Kühlwasservorlauftemperatur in einem wassergekühlten Rechenzentrum

**Mashhur Gheni,
Henner Kerskes**

Einleitung

Angetrieben durch das starke Wachstum von Cloud-Diensten, KI-Workloads und digitalen Anwendungen steigt der Bedarf an energieeffizienten Rechenzentren. Die Wasserkühlung hat sich aufgrund der deutlich höheren Wärmekapazität von Flüssigkeiten gegenüber Luft als effiziente Lösung zur Abfuhr der Verlustwärme leistungsdichter Server etabliert. Es ist zu erwarten, dass bei Leistungsdichten in Standard-19-Zoll-Racks von etwa 1.000 W die Wasserkühlung zur dominierenden, gegebenenfalls alleinigen Kühlmethode wird.

Um das thermische Potenzial der Wasserkühlung zu erschließen, sind fortgeschrittene Regelungs- und Optimierungsstrategien erforderlich, die sich dynamisch an wechselnde Betriebs- und Umgebungsbedingungen anpassen. Eine zentrale Stellgröße im Wasserkühlkreis ist die Kühlwasservorlauftemperatur. Ein Anheben des Temperaturniveaus kann die Energieeffizienz von Kühltürmen und Kältemaschinen verbessern. Dem stehen jedoch zwei wesentliche Zielkonflikte gegenüber:

1. Höhere Bauteiltemperaturen erhöhen die elektrischen Leckströme in Halbleiterbauelementen und damit die Leakage-Leistung der IT.

2. Mit steigender Wassertemperatur nimmt die Wärmeabgabe an die Raumluft zu. Diese wird durch eine weniger effiziente Luftkühlung abtransportiert.

Wirksame Optimierungsstrategien erfordern daher regelungstechnische Modelle, die nicht nur das thermische und energetische Verhalten des Wasserkühlsystems selbst abbilden, sondern auch die Wechselwirkungen mit IT-Komponenten und dem Luftkühlsystem berücksichtigen.

Technische Infrastruktur am HLRS

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

Web-, Test-Systeme usw.) betrieben.

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

Vorgehen

Im Rahmen des Forschungsprojekts NaRezent [1] wurde für den wassergekühlten Höchstleistungsrechner HAWK ein numerisches Modell entwickelt, das erstmals eine ganzheitliche energetische und thermische Abbildung des Rechenzentrums ermöglicht. So können alle relevanten Teilsysteme eines Rechenzentrums einschließlich ihrer Wechselwirkungen abgebildet und damit eine umfassende Systembetrachtung erreicht werden. Anhand umfangreicher Messdaten konnten die Dynamiken der wesentlichen Teilsysteme identifiziert und mo-

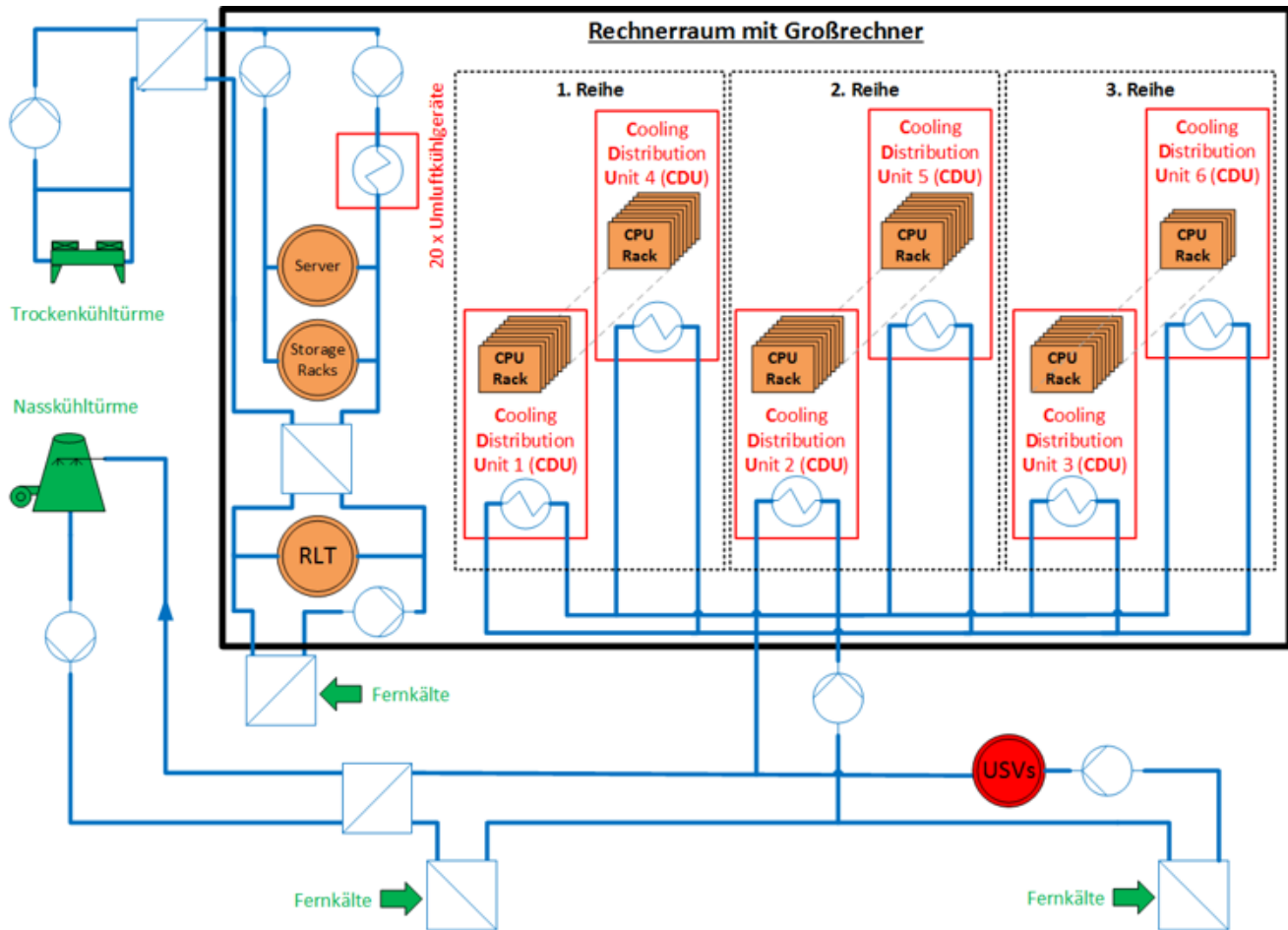


Bild 1: Vereinfachtes Kühlsystemschemas des Rechenzentrums

delliert werden. Der Abgleich mit Messungen zeigt eine hohe Vorhersagegenauigkeit.

Auf Basis dieses validierten Modells wird eine umfassende Bewertung des Einflusses der Kühlwasservorlauftemperatur auf das Systemverhalten der einzelnen Subsysteme (Wasserkühlung, Luftkühlung, IT) sowie auf den Gesamtenergie- und Ressourcenbedarf des Rechenzentrums durchgeführt.

Ergebnisse

Bild 2 zeigt, dass unterschiedliche Vorlauftemperaturen die elektrische Leistungsaufnahme der

einzelnen Komponenten deutlich beeinflussen. Eine höhere Vorlauftemperatur führt zu einer geringeren Leistungsaufnahme im Wasserkühlsystem, jedoch gleichzeitig zu einer höheren Leistungsaufnahme sowohl im Luftkühlsystem als auch insbesondere bei den IT-Komponenten. Bei allen drei untersuchten Vorlauftemperaturen steigt die gesamte elektrische Leistungsaufnahme mit zunehmender Außenluft-Feuchtkugeltemperatur an, jedoch mit unterschiedlichem Anstiegsverhalten. Keine der drei Vorlauftemperaturen ist über den gesamten Bereich der Außenbedingungen optimal.

Zudem zeigt sich, dass die optimale Vorlauftemperatur mit steigender Außentemperatur ebenfalls zunimmt.

So weist das System beispielsweise bei einer Feuchtkugeltemperatur von 5 °C und einer Vorlauftemperatur von 17 °C die niedrigste elektrische Leistungsaufnahme auf. Allerdings steigt die elektrische Leistungsaufnahme bei 17 °C Vorlauf mit zunehmender Außentemperatur schneller an als bei höheren Vorlauftemperaturen, sodass dieser Wert bei wärmeren Außenbedingungen (über etwa 13 °C Feuchtkugeltemperatur) die Leistungsaufnahme der Vorlauf-

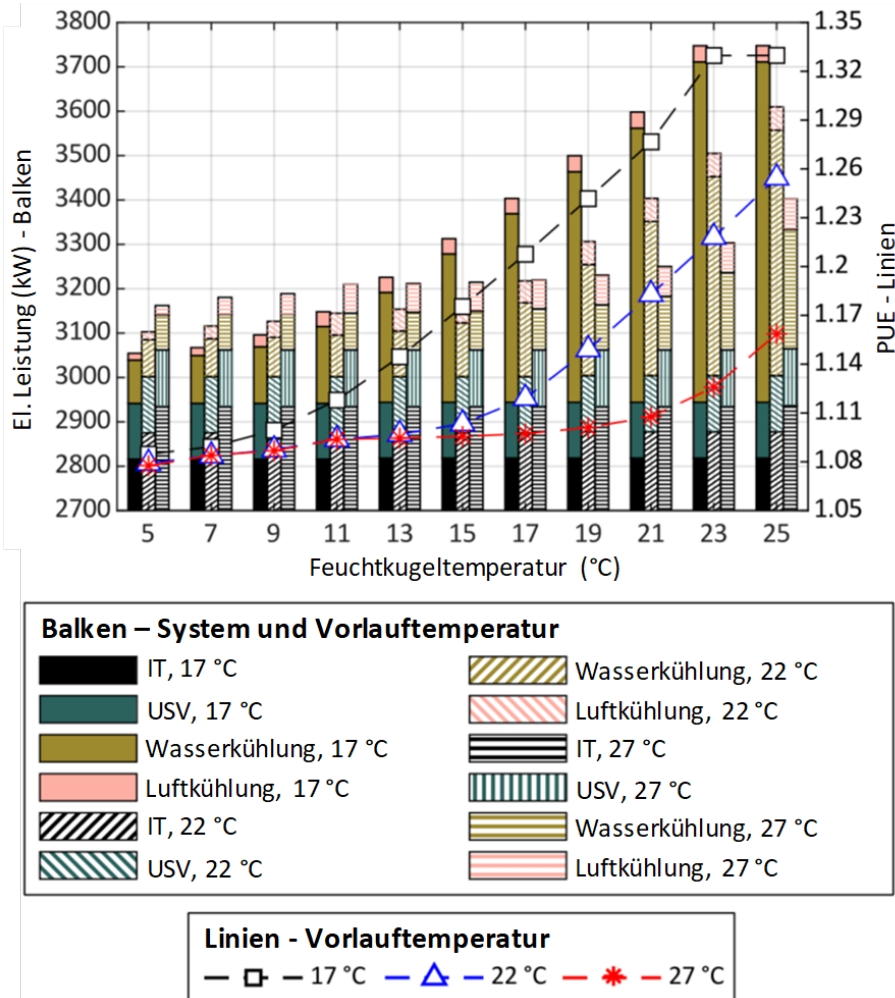


Bild 2: Leistungsaufnahme verschiedener Systemkomponenten (Balken) und PUE (Linien) bei drei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen (17, 22 und 27 °C) sowie variierender Außen-Feuchtkugelttemperatur (5 bis 25 °C) [2]

temperaturen von 22 °C und 27 °C übersteigt. Im Bereich zwischen 13 °C und 17 °C Feuchtkugelttemperatur ist es somit energieeffizienter, eine Vorlauftemperatur von 22 °C zu wählen, während bei noch höheren Außentemperaturen (über 17 °C Feuchtkugelttemperatur) eine Vorlauftemperatur von 27 °C vorteilhafter ist. Daraus wird deutlich, dass die optimale Vorlauftemperatur nur unter gleichzeitiger Berücksichtigung al-

ler Teilsysteme bestimmt werden kann.

Ein weiteres interessantes Ergebnis der Analyse zeigt sich bei Betrachtung der Power-Usage-Effectiveness (PUE). Die PUE beschreibt das Verhältnis des Gesamtenergiebedarfs eines Rechenzentrums zum Energiebedarf der IT-Systeme. Obwohl die optimale Vorlauftemperatur je nach Außenbedingungen unterschiedlich ist, führt eine höhere Vorlauf-

temperatur über den gesamten betrachteten Bereich der Außentemperaturen hinweg zu einem niedrigeren PUE-Wert. Dieses Ergebnis verdeutlicht, dass ein niedrigerer PUE-Wert allein nicht zwangsläufig mit einer insgesamt höheren Energieeffizienz des Systems einhergeht.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse das erhebliche Potenzial der Betriebsoptimierung der Wasserkühlung und motivieren zu weiterführenden Arbeiten an fortgeschrittenen Regelungs- und Optimierungsstrategien sowie zur Abwärmenutzung in wassergekühlten Rechenzentren.

Danksagung

Diese wissenschaftliche Arbeit wird durch ein Promotionsstipendium der Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) unter der Aktenzeichen-Nummer 20024/013 gefördert.

Literatur

- [1] Auf dem Weg zu nachhaltigen Rechenzentren: Modellgestützte Prädiktive Regelung von Flüssigkeitskühlsystemen zur Minimierung von Emissionen, Energieverbrauch und Betriebskosten. <https://www.dbu.de/promotionsstipendium/20024-013/>
- [2] Ghenni, M.; Kerskes, H. und K. Stergiaropoulos: Operational analysis of the cooling system in a direct liquid-cooled data center: a measurement and simulation study on the impact of supply water temperature, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.127061>

Optimierung von Wärmeübertragern in Eisspeichern

**Christian Lodroner,
Harald Drück, Peer Huber**

Einleitung

Eisspeicher sind eine Form von thermischen Energiespeichern, bei denen die verhältnismäßig große Schmelzenthalpie von Wasser dazu genutzt wird, Wärme in latenter Form zu speichern. Wird Wärme aus dem Speicher entzogen und dabei die Temperatur des Speichermediums auf Werte unterhalb von 0 °C abgesenkt, so kristallisiert das im Speicher be-

bei 0 °C stattfindet, werden Eisspeicher, die Bestandteil von Wärmeversorgungsanlagen sind, üblicherweise in Kombination mit Wärmepumpen betrieben, die die bei niedrigen Temperaturen verfügbare Wärme auf ein höheres Temperaturniveau anheben. Im Forschungsvorhaben SolKaN2.0 „Solare kalte Nahwärme der zweiten Generation“ bilden Eisspeicher ein wichtiges Element eines neuen Konzepts für kalte Nahwärmenetze, bei denen als Wärmeträgermedium Wasser anstatt

bene Wasser wird dann über ein kaltes Nahwärmenetz an die einzelnen Gebäude innerhalb des Quartiers verteilt und dient als Wärmequelle für die in den Gebäuden befindlichen dezentralen Wärmepumpen, welche die Wärme auf Nutztemperaturniveau anheben. Um dabei weiterhin eine hohe Gesamtsystemeffizienz zu gewährleisten, stellt die Optimierung der im Eisspeicher befindlichen Wärmeübertrager einen Schwerpunkt des Forschungsvorhabens SolKaN2.0 dar.



Bild 1: Links: Eisbildung im Eisspeicher (Quelle: Viessmann), Rechts: Eisspeicher im Bau (Quelle: Ulmer/IMAGO)

findliche Wasser zu Eis (s. Bild 1). Da bei dem Kristallisationsvorgang erhebliche Energiemengen freigesetzt werden, benötigen Eisspeicher kleinere Volumina als Wasserspeicher ohne Phasenwechsel, um die gleiche thermische Energie bereitzustellen. Da der Phasenübergang allerdings

wie bisher Gemische aus Wasser und Frostschutzmittel eingesetzt werden. Um dies zu ermöglichen, muss der Eisspeicher über eine zusätzliche zentrale Wärmepumpe entladen werden, die im Temperaturbereich von ca. -10 °C bis +10 °C arbeitet (s. Bild 2). Das auf dieses Temperaturniveau angeho-

Wärmeübertragungsvermögen der beiden Wärmeübertrager

Eine übliche Bauweise von Eisspeichern beinhaltet zwei Wärmeübertrager: einen innenliegenden Wärmeübertrager, der zur Entladung des Speichers dient (Entzugswärmeübertrager) sowie einen am Rand liegenden Wärme-

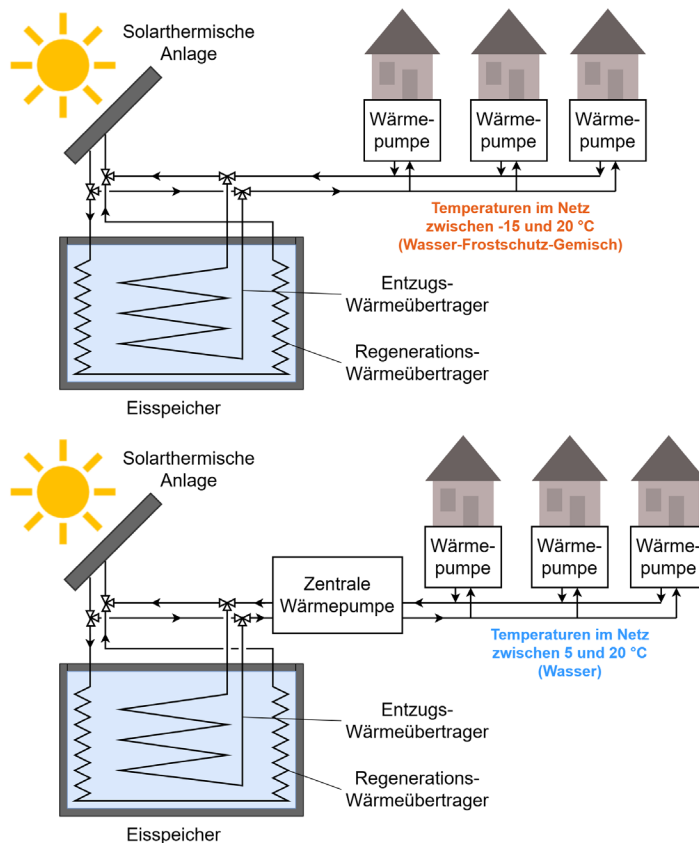


Bild 2: Prinzipskizze; Eisspeicher in Verbindung mit Wärmepumpen in einem kalten Nahwärmenetz. Oben: Stand der Technik, unten: Sol-Ka2.0-Konzept



Bild 3: Eisspeicher am IGTE im Bau, Dezember 2020

übertrager, der den Speicher mit Wärme aus einer Wärmequelle, z. B. einer solarthermischen Anlage belädt (Regenerationswärmeübertrager).

Für detaillierte Untersuchungen ist im Außenbereich des IGTE ein Eisspeicher mit einem Volumen von ca. 12 m³ vorhanden (s. Bild 3).

Im Forschungsvorhaben Sol-Ka2.0 wurden Messungen des Wärmeübertragungsvermögens der beiden Wärmeübertrager in diesem Eisspeicher durchgeführt. Dabei wurde auch die übliche Betriebsweise (Entladung über Entzugswärmeübertrager, Beladung über Regenerationswärmeübertrager) mit einem Betrieb verglichen, bei dem Ent- und Beladung jeweils über den Entzugswärmeübertrager erfolgen.

Bild 4 zeigt das Wärmeübertragungsvermögen der beiden Wärmeübertrager in Abhängigkeit des Eisanteils dieser beiden Betriebsweisen für die Beladung des Speichers. In den Versuchen wurde der Speicher jeweils auf einen Eisanteil von ca. 40 % entladen und anschließend über den Regenerations- bzw. Entzugswärmeübertrager wieder bis zu einem Eisanteil von 0 % beladen. Die kurze Unterbrechung in dem blau dargestellten Wärmeübertragungsvermögen des Regenerationswärmeübertragers ist auf einen temporären Ausfall des verwendeten Thermostats zurückzuführen und für die folgenden Betrachtungen ohne Relevanz.

Es ist deutlich zu sehen, dass die Beladung des Speichers über den innenliegenden Entzugswärmeübertrager ein signifikant höheres Wärmeübertragungsvermögen erreicht. Dabei ist einerseits zu berücksichtigen, dass die

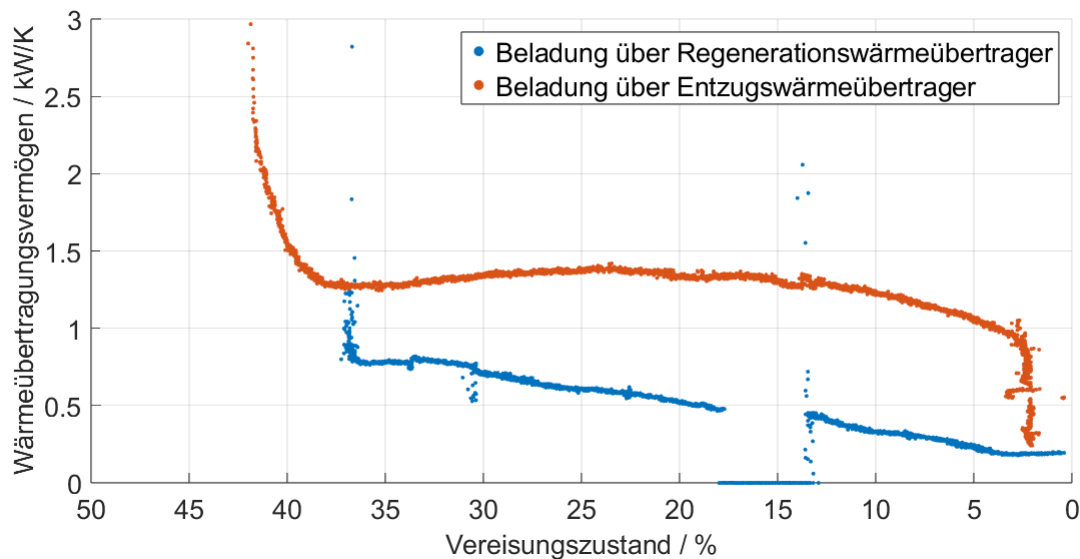


Bild 4: Wärmeübertragungsvermögen des Regenerations- und Entzugswärmeübertragers bei der Beladung des Eisspeichers

Wärmeübertrager unterschiedlich große Oberflächen haben (Regenerationswärmeübertrager: 15,5 m², Entzugswärmeübertrager: 27,8 m²). Andererseits sollte bei der Regeneration über den Entzugswärmeübertrager auch ein niedrigerer thermischer Widerstand im Speichermedium vorliegen, da die Wärme eine wesentlich kürzere Strecke an flüssigem Wasser durchqueren muss, als dies bei der Regeneration mit dem Regenerationswärmeübertrager der Fall ist. Ursächlich hierfür ist, dass nach dem Wärmeentzug bereits eine Eisschicht direkt auf der Oberfläche der Rohre der Wärme-

übertrager vorhanden ist.

Die bisher vorliegenden Ergebnisse deuten darauf hin, dass auf den außenliegenden Regenerationswärmeübertrager bei diesem Speichertyp möglicherweise verzichtet werden kann. Der ursprüngliche Grund für die Verwendung von zwei Wärmeübertragern ist die Vermeidung von unkontrollierter Bildung von Eis in Randbereichen nahe der Wand, wodurch der Einschluss von Wasser innerhalb einer geschlossenen Eisfläche verhindert werden sollte. Untersuchungen hierzu erfolgen derzeit im Forschungsvorhaben SolKaN2.0.

Einsatz einer Umwälzpumpe

Ein weiterer Ansatz, der im Forschungsvorhaben verfolgt wurde, ist der Einsatz einer Umwälzpumpe, die für eine bessere Durchmischung des Wassers im Speicher sorgt. Der Versuchsaufbau ist in Bild 5 dargestellt. Hierzu wurde eine relativ kleine Heizpumpe an einem im unteren Bereich des Speichers befindlichen Entleerventil angebracht. Über eine Leitung wurde das Wasser wieder nach oben gepumpt und dem Speicher zugeführt. Die Be- und Entladung des Speichers erfolgte jeweils nur über den Entzugswärmeübertrager.

Durch die Umwälzung des Wassers im Speicher und die daraus resultierende erzwungene Konvektion kann tendenziell ein wesentlich höheres Wärmeübertragungsvermögen erreicht werden, als dies ohne Umwälzung und somit freier Konvektion der Fall ist. Die elektrische Leistungsaufnahme der Pumpe betrug im Fall eines geförderten Volumenstroms von 1,2 m³/h nur 8 W. Über die Dauer der vollständigen Regene-

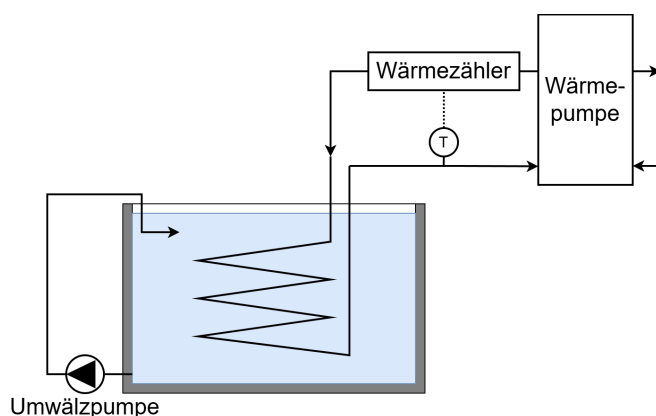


Bild 5: Versuchsaufbau des Eisspeichers in Kombination mit einer Umwälzpumpe

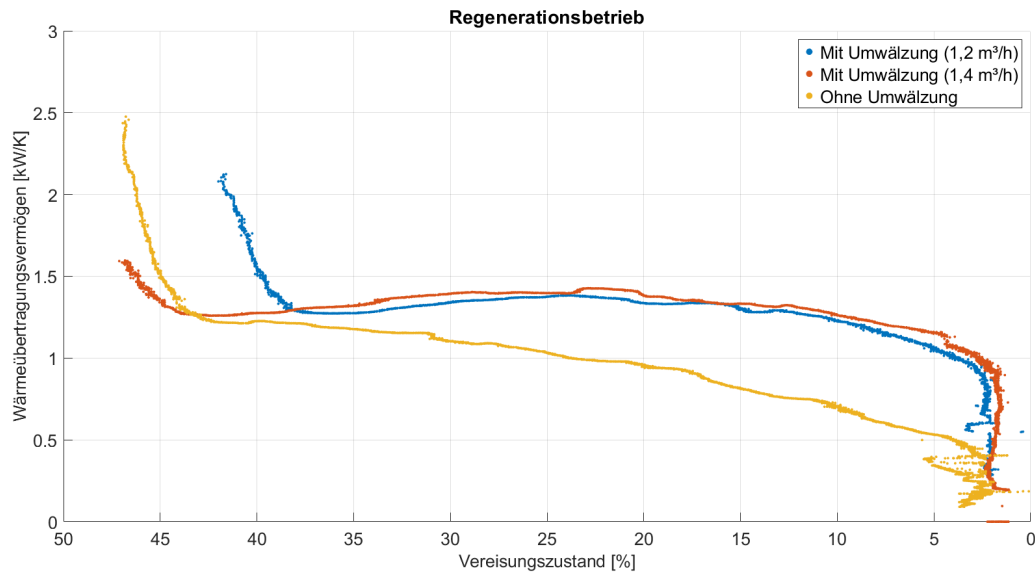


Bild 6: Erhöhung des Wärmeübertragungsvermögens durch Einsatz einer Umwälzpumpe

rationsphase von 72 h entspricht dies einem Stromverbrauch von 576 Wh. Eine Erhöhung der Pumpenleistung auf 19 W und ein damit einhergehender Volumenstrom von 1,4 m³/h führte dabei nur zu einer geringfügigen weiteren Erhöhung des Wärmeübertragungsvermögens (vgl. Bild 6).

Fazit und Ausblick

Aus den Ergebnissen der durchgeführten Versuche wurde ersichtlich, dass bei einer Beladung des Speichers über den Entzugswärmeübertrager für diesen Speichertyp ein deutlich höheres Wärmeübertragungsvermögen vorhanden ist als beim Einsatz des Regenerationswärmeübertragers. Somit ist es denkbar, dass auf den Einbau des außenliegenden Regenerationswärmeübertragers möglicherweise zukünftig verzichtet werden kann. Derzeit erfolgen weitere Versuche, bei

denen insbesondere der dynamische Betrieb, also der häufige Wechsel zwischen Be- und Entladung, mit nur einem Wärmeübertrager untersucht wird.

Die Versuche mit der Umwälzpumpe haben gezeigt, dass sich bereits bei einer relativ kleinen elektrischen Leistungsaufnahme ein deutlich erhöhtes Wärmeübertragungsvermögen bei der Beladung des Speichers über den Entzugswärmeübertrager erzielen lässt. Dies ist besonders bei der Beladung des Speichers durch eine solarthermische Anlage oder im Sommer bei Nutzung des Eisspeichers als Wärmesenke für eine Wärmepumpe von Vorteil. Die sich durch den Einsatz einer Umwälzpumpe ergebenden Vorteile werden in weiteren Untersuchungen sowohl im Hinblick auf technologische als auch ökonomische Aspekte untersucht.

Danksagung

Das Forschungsvorhaben Sol-KaN2.0 „Solare kalte Nahwärme der zweiten Generation“ wird aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) durch den Projektträger Jülich (PtJ) unter dem Förderkennzeichen 03EN6033A/B/C gefördert. Die Autoren danken für diese Unterstützung und übernehmen die Verantwortung für den Inhalt dieses Beitrags.

Energieeinsparung und Klimaschutz mit intelligenten Einzelraumlösungen im Gebäudebereich der Universität Stuttgart

Raffaella Goldschmidt, Jens Ullmann, Harald Drück, (alle IGTE), Peter Lierhammer (IER), Pascal Häbig (IER), Matthias Leger (ZIRIUS)

Einleitung

Die Universität Stuttgart verfolgt das Ziel, bis zum Jahr 2030 klimaneutral zu werden. Im Forschungsvorhaben EKUS hoch i (EKUS) wird daher u. a. untersucht, wie intelligente Steuerungstechnik den Wärmeverbrauch in öffentlichen Nichtwohngebäuden senken kann, ohne den Nutzen- und Komfort zu beeinträchtigen. Neben technologischen Ansätzen stehen dabei die Einbindung relevanter Stakeholder und nicht-technische Maßnahmen im Fokus. Der Beitrag präsentiert die in der Heizperiode 2024/2025 ermit-

telten Wärmeverbräuche während unterschiedlicher angewandter Regelstrategien, im Projekt auch Steuerungsexperiment genannt, und setzt diese in Beziehung mit den Ergebnissen komfortbezogener Befragungen der Gebäudenutzenden.

Umsetzung des Steuerungsexperiments in einem Institutsgebäude

Das Steuerungsexperiment wurde im Institutsgebäude des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart, in Bild 1 gezeigt, durchgeführt. Das 1989 errichtete Gebäude mit rund 50 Mitarbeitenden diente als Real-labor; 33 Personen beteiligten sich aktiv an den Umfragen. In allen Büroräumen wurden per Funk

steuerbare Thermostate, Infrarotbewegungsmelder und Multisensoren zur Erfassung von Temperatur, Luftfeuchte und Helligkeit installiert und über ein Gateway miteinander vernetzt. Die Datenerfassung erfolgte im Fünf-Minuten-Intervall. Ergänzt wurde das Experiment durch tägliche browserbasierte Befragungen der Nutzenden, in denen die subjektive Einschätzung des Raumkomforts und der Raumtemperatur abgefragt wurden.

In der Versuchsreihe im Winter 2024/2025 wurde der Wärmeverbrauch einer präsenzabhängigen Einzelraumregelung (ERR) im Vergleich zu einer nicht bedarfsgeführten Regelung (Ref) untersucht. Zur Erhöhung des Komforts während der ERR-Betriebsphase, wurden zusätzlich unterschiedliche Varianten der morgendlichen Aufheizzeit getestet (als ERR+ bezeichnet). Dabei wurden sowohl die Vorlauftemperatur (50 °C, 60 °C, 70 °C) als auch die Aufheizdauer variiert. Das 3. Obergeschoss (OG) diente als Referenz (Ref), im 2. OG kam eine präsenzabhängige ERR ohne Aufheizzeit zum Einsatz und im 1. OG wurde eine erweiterte Variante (ERR+) mit drei unterschiedlichen Aufheizdauern (90, 60 und 30 Minuten) untersucht. Eine Übersicht der Versuchskonfigurationen und Zeiträume ist in Tabelle 1 dargestellt.



Bild 1: Institutsgebäude des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart. Das Steuerungsexperiment wurde in den Stockwerken eins bis drei durchgeführt. Foto: Pascal Häbig.

Tabelle 1: Übersicht über die implementierten und getesteten Betriebsmodi

Benennung	Zeitraum (Arbeitstage)	Vorlauf- temperatur	Aufheizzeit		
			OG1	OG2	OG3
Ref1	04.11. – 01.12.24 (20)	50 °C	ab 5 Uhr		
ERR1	02.12. – 20.12.24 (15)	50 °C	Keine Aufheizzeit (--)		ab 5 Uhr
Ref2	27.01. – 03.02.25 (4)	50 °C	ab 5 Uhr		
ERR+	03.02. – 25.02.25 (16)	+ 0 K → 50 °C	90 min	--	ab 5 Uhr
ERR+/60	25.02. – 18.03.25 (15)	+ 10 K → 60 °C	60 min	--	ab 5 Uhr
ERR+/70	18.03. – 31.03.25 (9)	+ 20 K → 70 °C	30 min	--	ab 5 Uhr
ERR2	31.03. – 30.04.25 (18)	50 °C	--		ab 5 Uhr

Ergebnisse

Bild 2 zeigt die witterungsbereinigten Wärmeverbräuche der Obergeschosse 1 und 2 im Verhältnis (RQ1/3 und RQ2/3) zum Referenzstockwerk OG 3. Außerdem gezeigt ist die mittlere Bewertung der Raumtemperatur (R_{tm}) durch die Raumnutzenden jeweils

im Verhältnis zum Referenzstockwerk (3. OG), wobei ein Verhältnis > 1 anzeigt, dass die R_{tm} kälter bewertet wird als im Referenzstockwerk. Ebenfalls dargestellt ist die flächengewichtete mittlere Raumtemperatur T_m. Umfragedaten liegen erst ab der Phase Ref2 vor. Aufgrund der geringen An-

zahl teilnehmender Personen in den Phasen ERR+/70 und ERR2 sowie technischer Störungen in Phase Ref2, konnten nur für die Phasen ERR+ und ERR+/60 aussagekräftige Ergebnisse bei den Umfragen ermittelt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass in allen Phasen, selbst bei identischer Aufheizzeit, die Stockwerke OG1 und OG2 im Vergleich zu OG3 deutliche Energieeinsparungen aufweisen. Dies ist erwartbar, da OG3 als Dachgeschoss über die größte Hüllfläche verfügt und damit größere Wärmeverluste als bei den anderen Stockwerken auftreten. Werden die Büroräume morgens nicht vorgeheizt (ERR-Phasen in OG1 und OG2), ergeben sich deutlich größere Energieeinsparungen im Vergleich zu einem Beginn der Aufheizung um 5:00 Uhr morgens. Ebenso plausibel ist, dass in den experimentellen Phasen mit verkürzter Aufheizzeit (ERR+ in OG1) geringere Einsparungen erzielt werden. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass sich ohne morgendliche Auf-

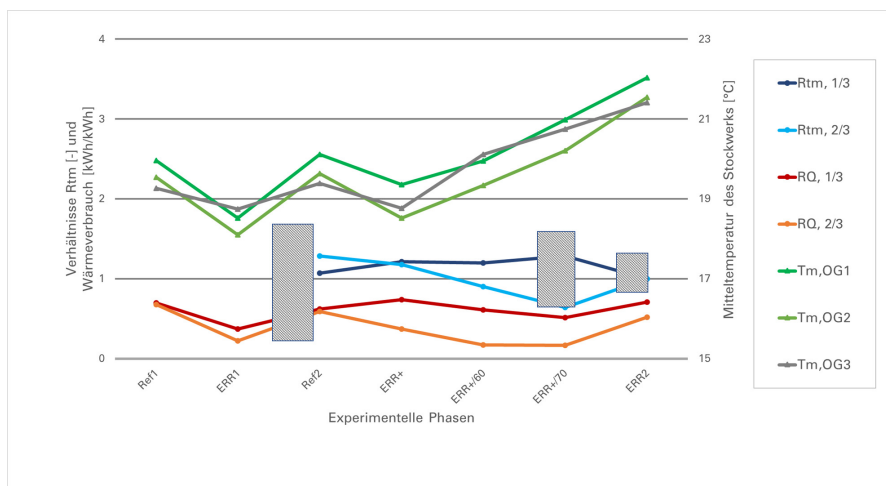


Bild 2: Wärmeverbrauch von OG1 (dunkelrot) und OG2 (hellrot) im Verhältnis zum Referenzstockwerk (OG3) und Bewertung der Raumtemperaturen in OG1 (dunkelblau) und OG2 (hellblau) im Verhältnis zum Referenzstockwerk (OG3) sowie mittlere Stockwerkstemperaturen (grün) in OG1 (dunkel), OG2 (hell) und OG3 (grau). Schraffiert hinterlegt sind Datenpunkte, die auf einer unzureichenden Datenmenge beruhen.

heizphase Einsparungen von bis zu 40 % und mit verkürzter Aufheizzeit Einsparungen zwischen 11 % und 32 % jeweils bezüglich der Wärmeverbrauchsverhältnisse erzielen lassen. Bezogen auf die gemessenen Wärmeverbräuche entspricht dies Einsparungen von bis zu 40 % ohne Aufheizphase sowie zwischen 8 % und 25 % mit verkürzter Aufheizphase. Die erzielten Einsparungen spiegeln sich auch in der mittleren Raumtemperatur wider, die in OG2 zwischen 0,4 K und 0,8 K unter jener in OG1 liegt.

Mit abnehmender Aufheizzeit wird die Raumtemperatur in OG 1 trotz erhöhter Vorlauftemperatur wie erwartet als kühler empfunden als in OG3 (Verhältnis >1: eher „zu kalt“). Die Unterschiede der Bewertungen der Raumtemperatur zwischen den Phasen bleiben aber gering. In OG 2 zeigt sich ein gegenläufiger Trend, der vermutlich auf die geringe Stichprobengröße und Umwelteinflüsse wie z. B. eine stärkere Sonneneinstrahlung in den oberen Stockwerken zurückzuführen ist. Zudem korrelieren die Bewertungen von Raumtemperatur und Raumkomfort stark, was darauf hinweist, dass die Nutzenden beide Aspekte häufig nicht getrennt bewerten.

Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass durch die praktische Umsetzung intelligenter Steuerungstechnik erhebliche Energieeinsparungen realisierbar sind. In einem nächsten Schritt sollen diese Messergebnisse unter vergleichbaren Ausgangsbedingungen mit detaillierten dynamischen Simu-

lationen des thermischen Verhaltens des Gebäudes abgeglichen werden, um sie im Vergleich zum theoretischen Einsparpotential zu bewerten.

Eine Weiterentwicklung der Messmethodik könnte zudem darin bestehen, an verschiedenen Positionen im Raum, insbesondere dort, wo sich häufig Personen aufhalten, die operative bzw. empfundene Temperatur genauer zu erfassen, also die Temperaturen sämtlicher einzelner Flächen des Raumes zu berücksichtigen. Der für die beschriebenen Experimente verwendete, zuvor erwähnte Multisensor verfügt über eine zweidimensionale Empfängerfläche, die je nach Anordnung des Multisensors im Strahlungsaustausch mit bestimmten Flächen des Raumes steht und somit nur ansatzweise die operative bzw. empfundene Raumtemperatur ermittelt.

Aus Sicht der Nutzenden haben sowohl die Dauer der Aufheizphase als auch die Höhe der Vorlauftemperatur nur einen geringen Einfluss auf den wahrgenommenen Raumkomfort. Somit kann die energetisch effizienteste Variante (ERR) bevorzugt werden. Die in Einzelfällen deutliche Unzufriedenheit mit den Raumtemperaturen sollte dabei jedoch nicht außer Acht gelassen werden. Hierzu sollten individuelle, von den Nutzenden benötigte Aufheizzeiten erfasst werden, um eine bedarfsgerechte, zeitlich abgestimmte Aufheizung zu ermöglichen. Dabei gilt es, ergänzend nichttechnische Maßnahmen zu prüfen, etwa eine stärkere Individualisierbarkeit der Steuerung oder Maßnahmen

zur Förderung der Akzeptanz reduzierter Raumtemperaturen am Morgen. Schon wenn einzelne Personen geringfügige Komforteinbußen akzeptieren, kann dadurch bereits ein messbarer Beitrag zur Energieeinsparung erzielt werden.

Danksagung

Der vorliegende Beitrag basiert auf den Ergebnissen des Verbundprojekts „EKUS hoch i - Energieeinsparung und Klimaschutz mit intelligenten Einzelraumlösungen im Gebäudebereich der Universität Stuttgart“. Das Verbundprojekt EKUS hoch i wird vom Ministerium für Wirtschaft, Forschung und Kunst (MWK) des Bundeslands Baden-Württemberg gefördert. Die Autorin und die Autoren danken für die gewährte Unterstützung und übernehmen die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung.

An dem Vorhaben sind die folgenden Institute bzw. Institutionen der Universität Stuttgart beteiligt: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Zentrum für Interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung (ZIRIUS), Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE), Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB) sowie Green Office.

Sprayverdampfer für Ammoniak-Großwärmepumpen

Johannes Brunder,
 Louis Tafelmaier, Luisa Haak

Hintergrund

Großwärmepumpen gewinnen für die klimaneutrale Wärmeversorgung in Industrie und Fernwärmenetzen zunehmend an Bedeutung. Eine Studie des Fraunhofer IEG prognostiziert, dass bis zum Jahr 2045 etwa 70% der Wärmeanwendungen bis 200 °C durch Großwärmepumpen gedeckt werden können [1].

Geeignete Kältemittel für Großwärmepumpen stellen eine Herausforderung dar. Durch die F-Gase-Verordnung und ein mögliches PFAS-Verbot verlieren viele synthetische Kältemittel ihre Perspektive, sodass nur natürliche Kältemittel als zukunftssicher gelten. Ammoniak ist ein weit verbreitetes natürliches Kältemittel mit sehr guten thermodynamischen Eigenschaften und einem attraktiven Temperaturbereich für Großwärmepumpen. Aufgrund der Toxizität von Ammoniak besteht ein großes Interesse daran, die Füllmengen zu reduzieren, was auch den Genehmigungsaufwand reduziert [2].

In Großwärmepumpen werden in der Regel Rohrbündelwärmeübertrager als Verdampfer eingesetzt. Eine Möglichkeit, die Füllmenge zu reduzieren stellt die Sprühverdampfung dar. Hierbei wird das Kältemittel unter Druck in den Mantelraum des Rohrbündelwärmeübertragers injiziert. Dabei entsteht eine disperse Partikelwolke, die die wärmeübertragenden Oberflächen benetzt. Dünne Flüssigkeits-

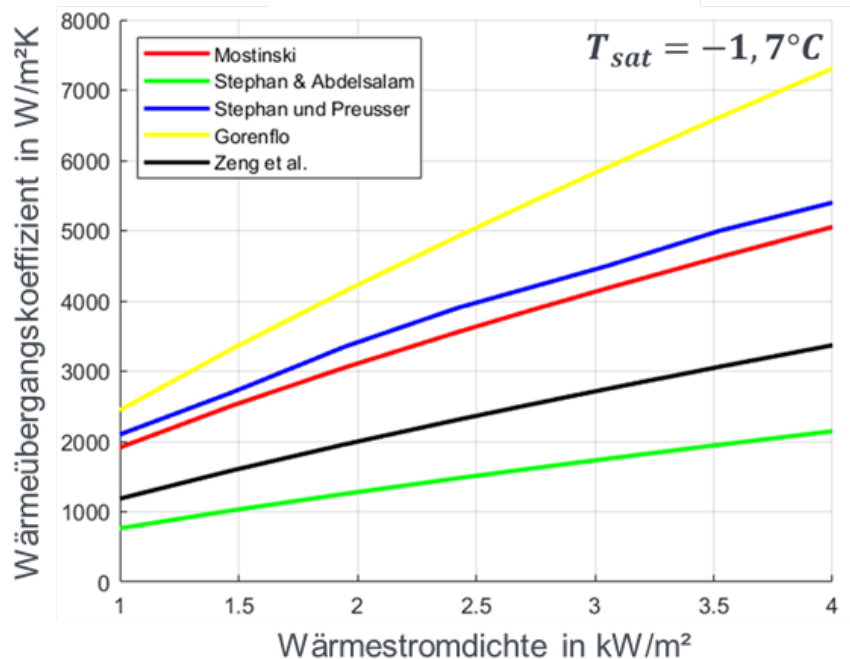


Bild 1: Vergleich verschiedener Korrelationen zur Vorhersage des Wärmeübergangskoeffizienten bei der Verdampfung von Ammoniak auf einer Rohroberfläche [3-7]

sigkeitsfilme auf den Rohroberflächen beschleunigen die Verdampfung des Ammoniaks und steigern den äußeren Wärmeübergang im Vergleich zum Blasensieden. Dies kann allerdings nur bei einer vollständigen Benetzung der Rohroberflächen gelingen.

Der äußere Wärmeübergang beim Verdampfen von Ammoniak ist bislang mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Bild 1 zeigt den Vergleich verschiedener Korrelationen für den Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte bei einer



Bild 2: Exemplarische Hochleistungsrohre von Wieland [8]

Siedetemperatur von $-1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die prognostizierten Werte variieren dabei um einen Faktor von bis zu 3,5, was keine zuverlässige Auslegung eines solchen Verdampfers ermöglicht. Während für viele Kältemittel spezialisierte Hochleistungsrohre verfügbar sind (siehe Bild 2), gibt es bislang keine entsprechenden Lösungen für Ammoniak. Das Forschungsvorhaben HoVAG – „Hochleistungsrohre für die Verdampfung von Ammoniak in Großwärmepumpen“ hat daher zum Ziel, in Kooperation des Instituts für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung der Universität Stuttgart (IGTE) mit der Wieland-Werke AG neuartige Hochleistungsrohre für die Ammoniakverdampfung zu entwickeln und darauf aufbauend belastbare Korrelationen für den äußeren Wärmeübergang zu erarbeiten.

Prüfstandkonzeption

Am IGTE wird ein Prüfstand zur Untersuchung des Wärmeübergangs bei der Verdampfung von Ammoniak auf Rohrbündeln aufgebaut, der im Folgenden vorgestellt wird. Das R+I-Schema des Prüfstands mit seinen Hauptkomponenten ist in Bild 3 dargestellt, das Kernstück bildet der Verdampfer (siehe Detailansicht in Bild 4). Der Wärmestrom für die Verdampfung wird über einen Heizwasserkreis zugeführt, der zuvor durch einen Trennwärmeübertrager und ein elektrisches Heizthermostat aufgeheizt wird. Das Kältemittel Ammoniak wird vor dem Eintritt in den Verdampfer in einem Vorverdampfer vorkonditioniert, sodass unterschiedliche Dampfanteile am Eintritt eingestellt werden können. Damit kann

der Zustand nach dem Expansionsventil einer Wärmepumpe nachgestellt werden. In den Verdampfer gelangt das Ammoniak über verschiedene Sprühsysteme, die im Vergleich untersucht werden können. Nicht verdampftes Kältemittel kann aus dem Sumpf über eine Rezirkulationspumpe zurückgeführt werden. Auf diese Weise lassen sich unterschiedliche Rezirkulationsraten gezielt untersuchen.

Nach der Verdampfung strömt gasförmiges Ammoniak bei gleichem Druck in den Kondensator, wo es durch Wärmeabgabe an einen Glykolkreis verflüssigt wird. Die im Glykolkreislauf aufgenommene Wärme wird anschließend über einen Tischkühler an die Umgebung abgegeben.

Bild 4 zeigt einen Querschnitt durch den Verdampfer. Durch die Rohre strömt das Heizwasser, so dass an der Außenoberfläche das Kältemittel verdampft. Die Rohre sind in zwei Gruppen aufgeteilt. Die in der Mitte befindlichen 24 Rohre dienen der Untersuchung der Sprühverdampfung. Sie sind in sechs Pässe gegliedert, deren Durchströmungsreihenfolge verändert werden kann. An Ein- und Austritt jedes Passes werden die Heizwassertemperaturen gemes-

sen, wodurch die Leistung und der Wärmeübergangskoeffizient für jeden Pass berechnet werden können. Die unteren 24 Rohre können mit flüssigem Kältemittel überflutet werden, sodass im Vergleich zur Sprühverdampfung das Blasensieden an baugleichen Rohrbündeln untersucht werden kann. In das Rohrbündel sind zwei unterschiedliche Sprühsysteme integriert: ein vertikales und ein horizontales System. Jedes Sprühsystem verfügt über sechs Düsen, die einzeln ausgetauscht werden können. Das vertikale Spray-System A ist mit Kegeldüsen ausgestattet und folgt bekannten Ansätzen aus der Literatur [9]. Das horizontale Spray-System B verwendet Flachdüsen und stellt eine bislang weniger bekannte Konfiguration dar. Durch in den Verdampfer integrierte Schaugläser können sowohl die Benetzung der Rohroberflächen als auch das Siedeverhalten direkt beobachtet werden.

Der Prüfstand ist mit entsprechender hochauflösender Messtechnik zur Erfassung von Temperaturen, Drücken und Massenströmen ausgestattet. Ziel ist es, den äußeren Wärmeübergangskoeffizient mit einer Messunsicherheit von $<10\%$ bestimmen zu können.

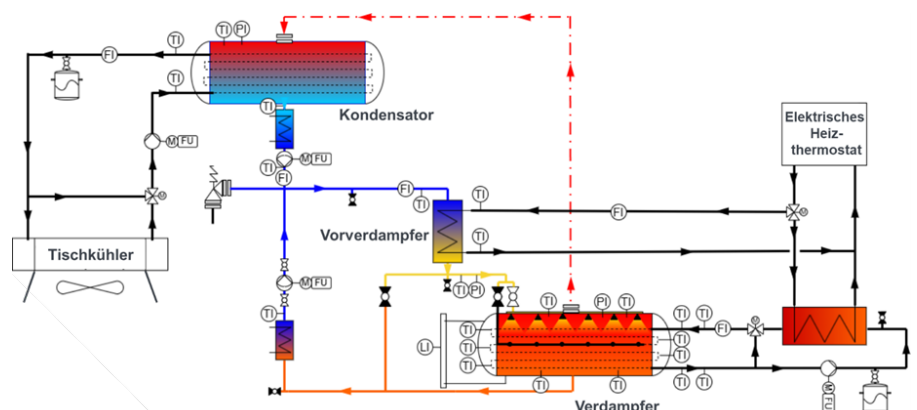


Bild 3: R+I Schema des Rohrbündelprüfstands

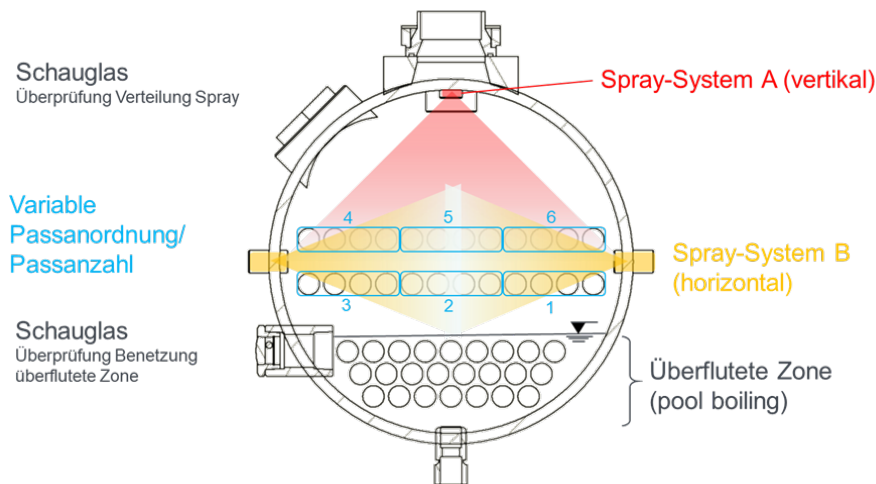


Bild 4: Schnitt durch den Verdampfer

Ausblick

In der Laufzeit des Forschungsvorhaben bis zum 31.03.2028 werden mehrere baugleiche Rohrbündel mit verschiedenen im Forschungsvorhaben vom Industriepartner Wieland-Werke AG entwickelten Hochleistungsrohren im Prüfstand untersucht. Aus den Messdaten werden verlässliche Korrelationen zur Vorhersage des Wärmeübergangs und einer sicheren thermischen Auslegung von Sprühverdampfern mit dem Kältemittel Ammoniak abgeleitet.

Danksagung

Das Forschungsvorhaben HoVAG „Hochleistungsrohre für die Verdampfung von Ammoniak in Großwärmepumpen“ wird aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) durch den Projektträger Jülich (PtJ) unter dem Förderkennzeichen 03EN4095A/B gefördert. Die Autoren danken für

diese Unterstützung, sowie dem Partner im Forschungsvorhaben Wieland-Werke AG und übernehmen die Verantwortung für den Inhalt dieses Beitrags.

Literatur

- [1] AGORA Energiewende, Fraunhofer IEG (2023): Roll-out von Großwärmepumpen in Deutschland. Strategien für den Markthochlauf in Wärmenetzen und Industrie.
- [2] TRAS 110 - Sicherheits-technische Anforderungen an Ammoniak-Kälteanlagen; Technische Regel für Anlagensicherheit (TRAS)
- [3] Mostinski, I.: Application of the rule of corresponding states for calculation of heat transfer and critical heat flux. Teploenergetika, 1963, (4), 66-71.
- [4] Stephan, K. und M. Abdelsalam: Heat-transfer correlations for natural convection boiling [online]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1980,

23(1), 73-87. ISSN 00179310. Verfügbar unter: doi:10.1016/0017-9310(80)90140-4

[5] VDI e.V., Hg. VDI-Wärmeatlas. Berlin: Springer Vieweg, 2013. VDI/-Buch. ISBN 978-3-642-19981-3.

[6] Kotthoff, S. und D. Gorenflo: Pool boiling heat transfer to hydrocarbons and ammonia: A state-of-the-art review [online]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31(4), 573-602. ISSN 01407007. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ijrefrig.2008.03.008

[7] Zeng, X., M.-C. Chyu und Z.H. Ayub: Experimental investigation on ammonia spray evaporator with triangular-pitch plain-tube bundle, Part II: evaporator performance [online]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(11), 2081-2092. ISSN 00179310. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0017-9310(00)00251-9

[8] Wieland-Werke AG. Produkte [online]. Verfügbar unter: <https://www.wieland.com/de/produkte/rippenrohre?company=wieland-werke-ag>

[9] Zhao, Shouzheng; Zhao, Songsong; Shi, Yaoguang; Zhu, Zongsheng; Liu, Jianyu (2024): Simulation study on the effect of liquid ammonia spray on the heat transfer performance of multiple heat exchange tubes. In: J. Phys.: Conf. Ser. 2791 (1), S. 12020. DOI: 10.1088/1742-6596/2791/1/012020.