

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 2022 aufzählen und Ihnen einen Überblick der Inhalte geben, die Sie in den Artikeln erwarten.

Das Jahr 2022 ist immer noch geprägt von den Einschränkungen durch die Pandemie. So werden z.B. die Lehrveranstaltungen überwiegend im hybriden Format abgehalten. Dafür können wir auf die während der letzten Semester entwickelten und an das Lehrformat angepassten Vorlesungsunterlagen zurückgreifen. Mit dem hybriden Angebot nimmt erfreulicherweise auch der persönliche Kontakt und Austausch mit unseren Studierenden wieder zu.

Ähnlich sieht es auch beim Austausch zu Forschungsinhalten aus, der überwiegend hybrid erfolgt. Wir freuen uns sehr, dass wir uns mit Ihnen wieder bei gemeinsamen Veranstaltungen wie Tagungen, Projekttreffen oder der Mitgliederversammlung des VdF HLK in Präsenz austauschen konnten. Leider musste das traditionell alle 2 Jahre stattfindende „Hermann-Rietschel-Colloquium“ kurzfristig abgesagt werden; bei diesem tauschen wir uns mit wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Universitäten in Aachen, Berlin und Dresden auf dem Arbeitsgebiet der Heiz- und Raumlufttechnik aus.

Im November fand die Jahrestagung des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins (DKV) in Magdeburg statt – wie auch im letzten Jahr in Präsenz. Dort präsentierten Johannes Brunder sein Forschungsvorhaben „Diffusions- und Absorptionskältemaschine mit Plattenaustreiber“ und Jan Christ seine Erkenntnisse zu „Modellbasierte Analyse von Scroll-Verdichtern“ dem interessierten Fachpublikum. Bei der Studierendenveranstaltung hat Frau Helena Käppeler mit dem Vortrag zu ihrer Studienarbeit „Austreibereinheit für Diffusions-Absorptionskältemaschinen zur Steigerung der Heizleistung“ den zweiten Platz erreicht.

Es freut mich, Ihnen mitteilen zu dürfen, dass uns in 2022 neun Forschungsvorhaben bewilligt wurden:

- AWT: Untersuchung von zwei Energiewandlern mit geringem Strombedarf zur Versorgung von Hochtemperaturverbrauchern aus Niedertemperatur-Fernwärmenetzen
- Effi-Heiz: Erarbeitung von parametrisierbaren Modellen zur ökologischen und wirtschaftlichen Bewertung von Systemen und Komponenten für die Wärmebereitstellung im Wohnbau über den gesamten Lebenszyklus ausgehend von den Grundmaterialien bis hin zur Entsorgung
- AbsorpTherm: Effizientes und klimaneutrales Heizkonzept durch neuartigen Antrieb einer Absorptionswärmepumpe mittels marktverfügbarer Gastherme

- SolAirHX: Entwicklung eines Prüfverfahrens für solarthermische Luft-Sole-Wärmeübertrager als Wärmequelle für Wärmepumpen
- SolWaAG: Innovatives und hocheffizientes solares Wasserrückgewinnungssystem zur Reduzierung des Wasserbedarfs bei der Bewässerung von Kulturpflanzen in der Agrarwirtschaft – angetrieben durch 100 % erneuerbare Energie
- ReVaD: Entwicklung regelbarer Vakuumdämmelemente zur bedarfsgerechten Anpassung des Wärmedurchgangs von Gebäudehüllen und -strukturen sowie der thermischen Aktivierung von Speichermassen
- DiTEoS: Stuttgart Research Initiative „Discursive Transformation of Energy Systems“
- TESSA: Thermische und energetische Schaltschrankanalyse und -optimierung
- Sol2Power: Solarthermische Anlage zur Stromerzeugung für kleine bis mittlere Leistungen

Über einen Teil dieser Forschungsprojekte werden wir ausführlich im nächsten HLK-Brief berichten.

Unsere aktuellen Forschungsschwerpunkte und -themen möchten wir Ihnen gerne am 30. März 2023 beim 2. IGTE-Forum präsentieren. Die Einladung hierzu erhalten Sie in Kürze.

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

235. Personelle Veränderungen sowie Studien-, Bachelor- und Masterarbeiten 2021/22

236. Heinz-Bach-Preis

237. Konzeptstudie für einen Prüfstand für VRF-Systeme

238. Ausgestaltung der kalorischen Innenkammern des Versuchsstandes zur Untersuchung von VRF-Systemen

239. Implementierung eines Vorhersage- und Optimierungsalgorithmus in eine Datenschnittstelle für Smart Meter Gateways

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

241. Entwicklung und Erprobung von textilen Temperiersystemen für die kosteneffiziente Klimatisierung von Räumen

242. Systemübergreifende Regelstrategien für einen energetisch optimierten Betrieb von Wohnungslüftungs- und Heizungssystemen

243. Rücklauftemperaturabsenkung im Wärmenetz 4.0

244. Technologiemarketing von PVT-Gebäudeenergieversorgungssystemen im Projekt „IntegraTE“

245. Innovatives Wärmeversorgungskonzept mittels Tiefengeothermie, Solarthermie und saisonaler Wärmespeicherung

246. Energiewandler mit geringem Strombedarf zur Versorgung von Hochtemperaturverbrauchern aus Niedertemperatur-Wärmenetzen

247. (Weiter-)Entwicklung von Methoden und Bereitstellung von Daten für die ökologische und ökonomische Lebenszyklusanalyse

248. Entwicklung regelbarer Vakuumdämmelemente zur bedarfsgerechten Anpassung des Wärmedurchgangs

249. Untersuchungen zur Lüftungseffektivität bei solaren Luftheiz- und Luftkühlssystemen in Wohngebäuden

250. Heat2Share – Integration eines thermochemischen Speichers in das Nahwärmenetz in Barenthin

251. Optimierung von Lüftungsstrategien für Nichtwohngebäude im Hinblick auf Gesundheit und Energieaufwand

Gerne möchte ich auch darauf hinweisen, dass im Jahre 2022 ein Mitarbeiter und ein Studierender des IGTE für ihre Forschungsarbeiten ausgezeichnet wurden. So belegte Joel Kimmich, M.Sc. für seine Masterarbeit den ersten Platz und Dr.-Ing. Stephan Lang für seine Dissertation den zweiten Platz beim Otto F. Scharr-Preis für Energietechnik.

Der Heinz-Bach-Preis wurde zum zweiten Mal im Rahmen der VdF-Mitgliederversammlung 2022 vergeben. Im Anschluss werden die Arbeiten und die Preisträger vorgestellt.

Neben der Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses war Heinz Bach stets der sprachliche Ausdruck bei den Studierenden und Doktoranden ein großes Anliegen. Deshalb hat er bis kurz vor seinem Tode die Veröffentlichung „Verfassen ingenieurwissenschaftlicher Texte“ überarbeitet. Diese haben wir in ein neues Format gebracht. Die 2. Auflage veröffentlichen wir in Kürze.

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 2023.

Bleiben Sie weiterhin gesund!

Herzlichst



Konstantinos Stergiaropoulos

Personelle Veränderungen sowie Studien-, Bachelor- und Masterarbeiten 2021/2022

Personelle Veränderungen

Joel Kimmich, M.Sc. ist seit März 2022 am IGTE als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig und untersucht experimentell und simulativ Strömungsverhältnisse in additiv gefertigten Wärmeübertragern. An der Universität Stuttgart absolvierte er zuerst den Bachelorstudiengang und anschließend den Masterstudiengang „Maschinenbau“.

Benjamin Walz, M.Sc. ist seit Mai 2022 am IGTE als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig und beschäftigt sich hauptsächlich mit der Erforschung von Raumluftströmungen. Er führt messtechnische sowie simulative Untersuchungen in der Raumlufttechnik durch. An der Universität Stuttgart absolvierte er sowohl den Bachelorstudiengang „Umweltschutztechnik“ als auch den Masterstudiengang „Energietechnik“.

Mostafa Barghash, M.Sc. ist seit Juli 2022 bei der FG HLK Stuttgart mbH als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig und beschäftigt sich hauptsächlich damit, experimentelle und simulative Untersuchungen in der Raumklimattechnik durchzuführen. Zuvor war er bei der Viessmann SE tätig. In Ägypten hat er den Bachelorstudiengang „Maschinenbau“ an der Ain-Shams Universität Kairo absolviert und anschließend an der Universität Stuttgart den Masterstudiengang „Energietechnik“ abgeschlossen.

Lavinia Ruf, M.Sc., die seit Januar 2021 am IGTE als wissenschaftliche Mitarbeiterin tätig war und sich vorwiegend mit der Ökobilanzierung von Materialien, der Erstellung von BIM-Modellen sowie der Nachhaltigkeitsbewertung von Baukonstruktionen beschäftigte, verließ das Institut Ende Dezember 2021 und wechselte zur Werner Sobek AG.

Dr. Dirk Schwede (PhD), der seit September 2019 die Arbeitsgruppe Systemintegration und nachhaltige Gebäude leitete, folgte dem Ruf an die Technische Hochschule Lübeck, Fachbereich Bauwesen in dem Gebiet Energie- und Gebäudetechnik.

Dr.-Ing. Rebecca Weber, die seit 2009 am Institut als wissenschaftliche Mitarbeiterin tätig war und in ihrer Dissertation sowie in mehreren Forschungsprojekten das Thema thermochemische Energiespeicherung bearbeitet hat, verließ das Institut Ende November 2022 und ist nun bei den Stadtwerken Stuttgart tätig.

Dissertationen

[Online Publikationen Universität Stuttgart \(OPUS\)](#)

Stephan Lang

Messung und Modellierung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffschüttungen für vakuumwärmegedämmte Warmwasserspeicher. Stuttgart 2022

Ehrungen und Preise

Der Otto F. Scharr-Preis für Energietechnik wird jährlich für herausragende wissenschaftliche Leistungen im Bereich der Energietechnik von der Otto F. Scharr-Stiftung verliehen. Wir freuen uns, dass bei der diesjährigen Vergabe gleich zwei am IGTE erstellte Arbeiten ausgezeichnet wurden. Den ersten Platz belegte Joel Kimmich, M.Sc. mit seiner Masterarbeit „Implementierung eines Vorhersage- und Optimierungsalgorithmus in eine Datenschnittstelle für Smart Meter Gateways“, der mit 4.000 € dotiert ist. Unser wissenschaftlicher Mitarbeiter Dr.-Ing. Stephan Lang folgte mit seiner Dissertation „Messung und Modellierung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffschüttungen für vakuumwärmegedämmte Warmwasserspeicher“ auf dem dritten Platz und erhielt ein Preisgeld in Höhe von 2.000 €. Unser Dank gilt der Otto F. Scharr-Stiftung für die Förderung!

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

Personelle Veränderungen sowie Studien-, Bachelor- und Masterarbeiten 2021/2022

Yunus Abaygil: Entwicklung und Erprobung eines Verfahrens für beschleunigte Lebensdauertests von Pumpen (Masterarbeit)

Elias Almojahed: Quantifizierung der energetischen Flexibilität deutscher Nichtwohngebäude (Studienarbeit)

Omar Ben Salem: Modellgestützte Untersuchung der Lebensdauer elektrischer Komponenten in Schaltschränken (Bachelorarbeit)

Rebecca Boger: Erstellung von charakteristischen Typräumen für Nichtwohngebäude zur Untersuchung der Wärmeabfuhr durch Wärmerohre (Bachelorarbeit)

Patrick Böhringer: Untersuchung der Auswirkungen verschiedener Wärmeversorgungskonzepte für Wohngebäude auf die Privat- und die Volkswirtschaft (Masterarbeit)

Tim Bottlang: Ökologischer und ökonomischer Vergleich von Behälterkonzepten für Eisspeicher (Bachelorarbeit)

Raphael Burkart: Untersuchung der Raumluftrömung und Aerosolverteilung in Innenräumen beim Einsatz von Luftreinigungsgeräten anhand von CFD-Simulationen (Masterarbeit)

Chung-Sheng Chang: Entwicklung eines standardisierten Prüfverfahrens für die raumseitige Wirksamkeit von Luftreinigungsgeräten (Studienarbeit)

Pengxu Chen: Simulation einer Partikelströmung und einer überlagerten heterogenen Kondensation (Studienarbeit)

Daniel Draxler: Untersuchungen und Weiterentwicklung unterschiedlicher Wärmedämmkonzepte für Warmwasserspeicher (Bachelorarbeit)

Konrad Empacher: Experimentelle Untersuchungen der heterogenen Kondensation an aschehaltigen Aerosolen (Bachelorarbeit)

Lars Felder: Simulation und Bewertung von Energieversorgungskonzepten für autarke Berghütten (Studienarbeit)

Daniel Götte: Optimierung von Kühlkonzepten für Schaltschränke in Kompaktbauweise (Bachelorarbeit)

Jens Heiermann: Entwicklung eines Simulationsmodells zur Untersuchung eines strombasierten Wärmeversorgungskonzepts für Wohngebäude mit Elektrospeicherheizungen (Masterarbeit)

Raffaella Helf: Simulation von Konzepten zur Wärmeversorgung von Wohngebäuden mittels eines Wärmetransformators (Bachelorarbeit)

Max Henle: Prozessorientierte Modellierung eines Kompressionskälte-Kühlgeräts zur Kopplung mit einer OpenFOAM-Simulation durch dynamische Randbedingungen (Studienarbeit)

Isabell Hirscher: Simulation und Konstruktion von effizienten Wärmedämmkonzepten für Warmwasserspeicher (Bachelorarbeit)

Ahmed Inan: Untersuchung zu Verfahren der additiven Fertigung und Design for Additive Manufacturing für den Einsatz in der Thermotechnik (Studienarbeit)

Sebastian Jagfeld: Konzeptentwicklung und numerische Systemsimulation eines Energieversorgungssystems für Einfamilienhäuser mit der Zielsetzung der Erreichung eines hohen Eigenversorgungsgrades (Studienarbeit)

Helena Käppeler: Austreibereinheit für Diffusions-Absorptionskältemaschinen zur Steigerung der Heizleistung (Studienarbeit)

Joel Kimmich: Implementierung eines Vorhersage- und Optimierungsalgorithmus in eine Datenschnittstelle für Smart Meter Gateways (Masterarbeit)

Sebastian Konaz: Simulation einer Kaskadenschaltung zwischen einer Absorptions-Kälteanlage und einer Kompressions-Kälteanlage (Studienarbeit)

Robert von Langen: Untersuchungen zum Vereisungsverhalten am Entzugswärmeübertrager von Ice-on-coil-Eisspeichern mittels CFD-Simulationen (Masterarbeit)

Teng Li: Vergleich von Modellierungsansätzen zur Bewertung der Aerosolverteilung in Innenräumen beim Einsatz von Luftreinigungsgeräten (Masterarbeit)

Yichen Li: Untersuchung und Bewertung mathematischer Funktionen zur parametrisierbaren Darstellung von Wärmeübertrageroberflächen (Bachelorarbeit)

Personelle Veränderungen sowie Studien-, Bachelor- und Masterarbeiten 2021/2022

Anke Lotko: Untersuchung der Potentiale einer automatisierten Ermittlung des „Smart Readiness Indicators“ aus Gebäudeinformationsmodellen (Masterarbeit)

Sven Mindel: Numerische Modellierung und Simulation des Wärmeversorgungsnetzes Barenthin mit integriertem Sorptionsspeicher (Masterarbeit)

Peter Notter: Erstellung einer modellprädiktiven Regelung von Gebäudeenergiesystemen durch multiple neuronale Netze (Masterarbeit)

Ba Hieu Nguyen: Inbetriebnahme eines Prüfstands zur Ermittlung von Tropfen-Trajektorien mittels optischer Messtechnik (Bachelorarbeit)

Christos Ossas: Optimierung der Herstellung von Vakuumwärmedämmungen für doppelwandige Warmwasserspeicher (Bachelorarbeit)

Samer Rabah: Experimentelle und numerische Untersuchung und techno-ökonomische Bewertung einer offen betriebenen Adsorptionsanlage zur Gebäudekühlung (Masterarbeit)

Hossein Rahmati: Beobachterbasierte Bestimmung der Flexibilität netzdienlicher Gebäude (Studienarbeit)

Alexander Rath: Untersuchungen von monoenergetischen Wärmeversorgungsanlagen mit und ohne Eisspeicher (Studienarbeit)

Tobias Rentschler: Aufbau einer strömungsmechanischen Simulation des Hilfsgaskreislaufs einer Diffusions-Absorptionskältemaschine (Studienarbeit)

Lukas Reuss: Vergleich des Wärmeschutzes von Plusenergiehäusern in monolithischer Bauweise und mit Wärmedämmverbundsystem (Masterarbeit)

Marco Schiele: Experimentelle Untersuchung der heterogenen Kondensation an Aerosolen einer Biomasseverbrennung (Studienarbeit)

Ruben Schumacher: Untersuchungen zur beschleunigten Evakuierung von Vakuumwärmedämmungen für Warmwasserspeicher (Studienarbeit)

Johannes Schwaiger: Entwicklung eines Prüfverfahrens für thermische Sonnen-Luft-Kollektoren als Wärmequelle für Wärmepumpen (Studienarbeit)

Samuel Schwamm: Mehrdimensionale Simulation des Wärme- und Stofftransports gekoppelt mit Strömungsvorgängen in einem Warmwasserspeicher (Studienarbeit)

Ronja Schweizer: Untersuchung und Weiterentwicklung von hocheffizienten Wärmedämmkonzepten für Warmwasserspeicher (Bachelorarbeit)

Rubin Sieber: Lebenszyklus und -kostenanalyse von funkbasierten Datenübertragungswegen für die Gebäudeautomation (Masterarbeit)

Heiner Steinacker: Entwicklung eines dynamischen Simulationsmodells zur Optimierung von wärmegekoppelten Wasserstoff-Konzepten für die klimaneutrale Quartiersversorgung (Masterarbeit)

Nadine Thiele: Experimentelle Untersuchung und Modellentwicklung von Rohrbündelverflüssigern (Masterarbeit)

Marcel Traub: Implementierung einer modellprädiktiven Regelung für ein Anergienetz (Masterarbeit)

Lu Wan: Semantic Modeling for Multizone Building Simulation (Masterarbeit)

Congrui Wang: Umsetzung einer Strategie zur Erzeugung von Temperaturgradienten in einer Rohrströmung mittels eines elektrischen Heizstabs (Masterarbeit)

Alexander Weh: Orts- und zeitaufgelöste Messungen zur Bestimmung der Wirksamkeit einer Partikelkonzentrationsenkung von Luftreinigungsgeräten in der Anforderungszone (Masterarbeit)

Markus Weiß: Konzeption und simulationsbasierte Untersuchung von innovativen Energieversorgungskonzepten für ein bestehendes Wohnquartier (Masterarbeit)

Zehao Ye: Entwicklung eines stofflichen und thermisch-energetischen Simulationsmodells zur Optimierung von Lüftungsmaßnahmen (Bachelorarbeit)

Heinz-Bach-Preis 2021

Am 24.10.2022 wurde im Rahmen der Mitgliederversammlung des VdF HLK Stuttgart e.V. der Heinz-Bach-Preis zum 2. Mal an drei Studierende verliehen, die im Jahr 2021 ihre Studien- bzw. Abschlussarbeit fertiggestellt haben. Der Heinz-Bach-Preis wird vom VdF HLK Stuttgart e.V. und dem ITGA Baden-Württemberg e.V. in Zusammenarbeit mit dem Institut für Gebäudeenergetik, Thermo-technik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart ausgelobt. Ziel ist die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses in Erinnerung an das Wirken von Prof. Dr.-Ing. Heinz Bach, der das Fachgebiet der Technischen Gebäudeausrüstung an der Universität Stuttgart aufgebaut und als Wissenschaftler über Jahrzehnte geprägt hat.

Herr Michael Müller konnte mit seiner Masterarbeit zur „Konzeption und Konstruktion eines Prüfstandes für eine elektrostatische Tropfenabscheidung“ die Jury überzeugen und wurde mit dem 1. Preis ausgezeichnet. Daneben erhielt Frau Svenja Both für ihre Masterarbeit zur „Analyse des Wärmeübergangs zwischen Kältemitteln und Phasenwechselmaterialien in einer neuartigen Wärmepumpenanwendung mittels numerischer Strömungssimulation“ den 2. Preis sowie Frau Julia Schuler für ihre Masterarbeit „Entwicklung einer Methodik zur Untersuchung der Auswirkungen verschiedener Wärmeversorgungs-konzepte für Wohngebäude auf die Volkswirtschaft“ den 3. Preis.

1. Preis: Herr Michael Müller

Konzeption und Konstruktion eines Prüfstandes für eine elektrostatische Tropfenabscheidung

Kurzfassung

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit der Konzeption und Konstruktion eines Prüfstandes zur experimentellen Validierung des elektrostatischen Wirkprinzips eines neuartigen Tropfenabscheiders. Dieses Wirkprinzip wird Dielektrophorese genannt und bezeichnet die Kraft, die auf Dipolmoleküle (z.B.: Wasser) in inhomogenen E-Feldern wirkt.

Der Prüfstand wird in Göttinger Bauweise konstruiert, das heißt, dass die Luft angetrieben durch einen Ventilator in dem nach außen geschlossenen Prüfstand zirkuliert. Die Soll-Luftfeuchte von 95 ... 98 % kann bei geschlossener Bauform einfacher erreicht werden. Eine hohe Luftfeuchte minimiert wiederum die Verdunstung von gezielt in den Prüfstand eingebrachten monodispersen Tropfen (Tropfen gleichen Durchmessers). Die Tropfen werden mit dem Luftstrom im Bereich der Teststrecke durch ein inhomogenes E-Feld geleitet, das durch eigens dazu entwickelte Elektroden erzeugt wird. Die Ablenkung der Tropfen durch die Dielektrophorese wird mittels optischer Messtechnik durch das so genannte Schattenlichtverfahren aufgenommen, sodass die Auswirkung von gezielt veränderbaren Einflussparametern auf die Tropfenbewegung quantifizierbar wird. Damit auch der Einfluss der Schwerkraft untersucht werden kann, ist es möglich, den Prüfstand mittels Hebezug in horizontaler und vertikaler Ausrichtung zu positionieren.

Die gewonnenen Erkenntnisse liefern die Grundlage zum Bau eines Demonstrators des Abscheiders. Der Prüfstand wird so konzipiert, dass der Demonstrator an Stelle der Teststrecke eingebaut und mit dem gleichen Prüfstand getestet werden kann. Der konstruierte Prüfstand und die Auslegung der Einzelkomponenten werden im Zuge dieser Arbeit beschrieben und ergeben letztlich ein vollständiges CAD-Modell des Prüfstands.

Heinz-Bach-Preis 2021

2. Preis: Frau Svenja Both

Analyse des Wärmeübergangs zwischen Kältemitteln und Phasenwechselmaterialien in einer neuartigen Wärmepumpenanwendung mittels numerischer Strömungssimulation

Kurzfassung

Im Kontext der Effizienzsteigerung im Gebäudesektor beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit einem neuartigen Wärmepumpenkonzept, in dem ein Latentwärmespeicher mit Phasenwechselmaterial (engl.: phase change material (PCM)) zwischen Kompressor und Kondensator integriert ist.

Dieser besteht aus PCM-Passagen mit integrierten Aluminiumlamellen, die abwechselnd von Kältemittel und Wasser durchströmt werden. Daher fungiert er sowohl als Energiespeicher als auch als Wärmeübertrager zwischen Kältemittel (refrigerant), PCM und Wasser (water) und wird daher auch RPW-HEX abgekürzt. Im Winterbetrieb kann sensible Energie aus dem überhitzten Kältemittel im PCM gespeichert werden, um zu einem späteren Zeitpunkt bei Wasserdurchfluss zur Warmwasserbereitung im Gebäude genutzt zu werden. Die restliche thermische Energie des Kältemittels im Winterbetrieb kann als Heizleistung im Kondensator bereitgestellt werden. Dadurch kann die Wärmepumpe bei einem günstigen COP (≈ 4) arbeiten und gleichzeitig Warmwasser erzeugen.

Im Sommerbetrieb soll die gesamte thermische Energie des Kältemittels genutzt werden und das Kältemittel dabei im RPW-HEX kondensieren.

Zur Auslegung des RPW-HEX kommen unterschiedliche Geometrien in Frage. Variiert werden kann u.a. der Abstand der Kältemittelpassagen, die Dicke der eingebrachten Lamellen in die PCM-Passagen oder die Orientierung der Lamellen. Zur Untersuchung werden repräsentative minisamples des RPW-HEX numerisch simuliert, die aus einer begrenzten Anzahl von Schichten bestehen.

Ziel ist es dabei, quantitative Aussagen zu den übertragenen Wärmeströmen zwischen Kältemittel und Phasenwechselmaterial treffen zu können. Die-

se sollen später als Basis für reduzierte 1D-Modelle dienen, um den gesamten RPW-HEX auszulegen und zu optimieren.

In dieser Arbeit werden zur PCM-Modellierung die Enthalpie-Porositäts-Methode und die „Apparent Heat Capacity“ method (AHC) verglichen und anhand von Experimenten validiert. Mittels AHC konnten die Temperatur und die Phasenfrontposition in einem PCM mit Lamellen mit einer maximalen Abweichung von 1 K und 1 mm reproduziert werden. Im reinen PCM bei Auftreten von natürlicher Konvektion konnte mittels AHC die Temperatur mit einer maximalen Abweichung von ≈ 3 K abgebildet werden.

Die Simulation der RPW-HEX Geometrien zeigt, dass vor allem die Orientierung der Lamellen in Bezug zur Strömungsrichtung einen erheblichen Einfluss auf den übertragenen Wärmestrom haben kann. Bezogen auf die Zeit zum Erreichen eines Ladezustands von 90 % resultiert eine parallele Orientierung der Lamellen in einer Verlängerung zwischen 1,6 % (V4) und 6,6 % (V2) im Vergleich zur senkrechten Orientierung im Fall 1 (erzwungene Konvektion mit RT64HC). Wird die Anzahl der Kältemittelpassagen verringert und dadurch ihr Abstand erhöht, steigt die benötigte Zeit für parallele Lamellen sogar um ca. 100 % (V3), was auf eine Limitierung des Wärmestroms durch die geringe Wärmeleitfähigkeit in den PCM-Zwischenräumen der Lamellen zurückgeführt wird.

Bei gleichem Abstand der Kältemittelpassagen führt eine Halbierung der Lamellendicke zu einer Verzögerung um ca. 10 % (V2 zu V1, Fall 1) für beide Lamellenorientierungen, wobei aber ca. 6 % Aluminium eingespart werden kann.

Zusammenfassend wurde im Zuge dieser Arbeit eine Methode entwickelt, verschiedene Geometrievarianten der RPW-HEX numerisch zu untersuchen und quantitativ zu vergleichen. Diese wurde umfassend validiert und kann auf verschiedene Randbedingungen und Phasen des Kältemittels angewendet werden. Die erzielten Resultate dienen als Grundlage für die weitere Entwicklung und Optimierung des RPW-HEX.

Heinz-Bach-Preis 2021

3. Preis: Frau Julia Schuler

Entwicklung einer Methodik zur Untersuchung der Auswirkungen verschiedener Wärmeversorgungs-konzepte für Wohngebäude auf die Volkswirtschaft

Kurzfassung

Während die direkten, vom Eigentümer zu tragenden Kosten verschiedener Wärmeversorgungs-konzepte für Wohngebäude in zahlreichen Veröffentlichungen untersucht wurden, existieren praktisch keine Ansätze für deren Vergleich aus einem volkswirtschaftlichen Blickwinkel.

Diese Arbeit stellt eine gemischt quantitativ-qualitative Methodik zur Untersuchung der volkswirtschaft-

lichen Kosten und Nutzen verschiedener Wärmeversorgungskonzepte für Wohngebäude vor. In den quantitativen Untersuchungen werden sechs verschiedene Wärmeversorgungskonzepte für ein Einfamilienhaus hinsichtlich ihrer makroökonomischen Auswirkungen monetär bewertet.

Ergänzend erfolgen qualitative Betrachtungen, in denen Möglichkeiten zur Weiterentwicklung der quantitativen Untersuchungen hinsichtlich schwer quantifizierbarer Kosten- und Nutzenaspekte, relevanter zukünftiger Entwicklungen und Auswirkungen bei der Skalierung des betrachteten Systems von einem einzelnen hin zu vielen Gebäuden aufgezeigt werden.



Konzeptstudie für einen Prüfstand für VRF-Systeme

Bernd Klein

Einleitung

Die Marktentwicklung zeigt, dass die Bedeutung von Luft/Luft-Wärmepumpen im Rahmen der Energiewende steigen wird. Hiervon profitieren auch VRF-Systeme (Variable Refrigerant Flow), deren Inneneinheiten an einem Kältemittelverteilnetz angeschlossen sind und die individuell geregelt werden können. Sind die Inneneinheiten mit mehr als zwei kältemittelgefüllten Leitungen mit der Außeneinheit verbunden, kann an jeder Inneneinheit individuell wahlweise geheizt oder gekühlt werden. Interessant wird diese Möglichkeit insbesondere dann, wenn in einem Gebäude in unterschiedlichen Zonen gleichzeitig ein Heiz- und ein Kühlbedarf entsteht. Hier kann ein solches System – bei richtiger Auslegung – die Energiemengen im Gebäude verschieben und so zur Energieeffizienz des gesamten Gebäudes beitragen. In der Normprüfung nach EN 14511 [1] wird die Effizienz von VRF-Systemen entweder für die Heiz- oder die Kühlfunktion an einem festen Punkt statisch geprüft. Aus dieser Normmessung lässt sich nur bedingt eine Aussage über eine jahreszeitliche Effizienz des Systems ableiten, eine Bewertung bei gleichzeitigem Heizen und Kühlen ist nur rudimentär vorgesehen. Genauere Aussagen über die Effizienz bei gleichzeitigem Heizen und Kühlen könnten durch ein „Hardware in the loop“-Verfahren (HiL) gewonnen werden, bei dem das System in einer dynamisch aufgeprägten Umgebung betrieben wird. Die Anforderungen an den Prüfstand gehen hierbei über die für die in EN 14511

notwendigen Anforderungen hinaus, insbesondere muss hier auch die Dynamik der Regelung berücksichtigt werden. Ziel der vom Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. (VdF HLK) geförderten und von der FG HLK Stuttgart mbH bearbeiteten Studie (FkZ: VdF 2021-2) ist daher die Konzeptionierung eines Prüfstandes für VRF-Systeme [2]. Dieser soll die Messung der Energierückgewinnung durch gleichzeitiges Heizen und Kühlen sowohl als statische Normprüfung als auch durch Einbindung einer dynamischen Simulationsumgebung für ein HiL-Verfahren ermöglichen.

In der Studie werden dafür folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- Erhebung von Marktdaten zur Charakterisierung von verbreiteten Leistungsgrößen und Bauformen
- Analyse von Normen zur Festlegung von Anforderungen für die Normprüfung
- Identifikation von Leistungsanforderungen an eine Versuchseinrichtung
- Identifikation von Voraussetzungen für eine HiL-Kopplung
- Konzeptionierung eines Prüfstandes unter besonderer Berücksichtigung der Messung der Energierückgewinnung.

Ergebnisse der Marktanalyse

In einem ersten Schritt wird der Markt an VRF-Geräten gesichtet sowie typische Baugrößen, deren Spezifikationen und übliche Bauformen von Innen- und Außengeräten identifiziert. Diese Marktanalyse zeigt, dass mit einer leistungsseitigen Dimensionierung von 50 kW ein Großteil der

am Markt verfügbaren Gerätevarianten abgedeckt werden kann. Für die Innengeräte sind hier Ausführungen als Wandgeräte, Deckengeräte, Kanalgeräte und Truhengeräte auf dem Markt zu finden, sodass sich die Lastabfuhr in den Innenkammern innerhalb kurzer Aufbauzeiten flexibel an deutlich abweichende Positionierungen der einzelnen Geräte anpassen lassen muss.

Konzept für den Prüfstand

Um die Energierückgewinnung von VRF-Systemen zu untersuchen, wird im Konzept ein Dreikammerprüfstand beschrieben. Dieser besteht aus einer konditionierbaren Außenkammer sowie zwei kalorischen Innenkammern (siehe Bild 1), in denen jeweils eine Heiz- und eine Kühllastsituation gleichzeitig simuliert werden können. Auf Basis der Marktanalyse wird abgeschätzt, dass jede Innenkammer für eine Heiz- oder Kühllastleistung von 25 kW ausgelegt werden muss. Im Folgenden sind die Anforderungen an die Außen- und Innenkammer zusammengefasst, für die im Weiteren die Dimensionierung vorgenommen wird.

Außenkammer:

- Temperatur $-20\text{ °C} \dots +50\text{ °C}$ mit hoher Regelgüte (Ausgleich von Abtauvorgängen an der Wärmepumpe)
- Befeuchtung bis nahe 100%, 0,3... 25 kg/h
- Heiz-/Kühllast 50 kW

Innenkammer:

- Temperatur $+15\text{ °C} \dots +35\text{ °C}$ mit hoher Regelgüte ($\pm 0,3\text{ K}$)
- Befeuchtung bis nahe 100%, 0,3... 10 kg/h
- Heiz-/Kühllast 25 kW

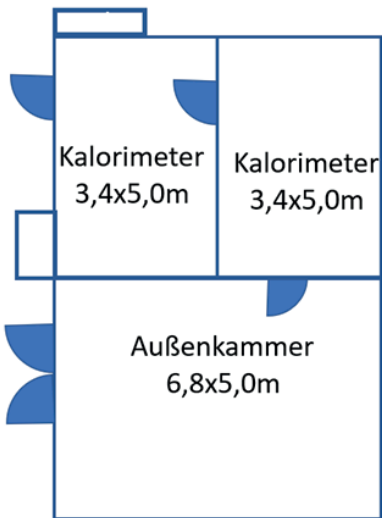


Bild 1: Aufbau des Dreikammerprüfstands

Eine Entfeuchtung ist nicht notwendig.

Mit Erfahrungswerten von bestehenden Prüfständen zur Leistungsermittlung von heiz- und raumluftechnischen Komponenten werden für diese Leistungsklassen die Dimensionen und notwendigen Komponenten des Prüfstandes beschrieben. Die Kammern werden mit Umluftkonditionierern temperiert und die Feuchte mit Dampfluftbefeuchtern geregelt. In den kalorischen Innenkammern werden jeweils fünf Umluftkonditionierer vorgesehen, die in Abhängigkeit von der Luftströmung des Prüflings mobil positioniert werden können. Die Messung der Nutzenergie erfolgt anhand eines kalorischen Verfahrens, daher muss für die Innenkammern die zu- bzw. abgeführte Energie genau bilanziert werden, während die Außenkammer nicht bilanzierbar sein muss. Die für die Messungen notwendige Hard- und Software wird im Konzept detailliert beschrieben, ebenso wie die

Versorgungstechnik sowie die Mess-, Steuer- und Regeltechnik. Aufgrund der begrenzten räumlichen Ressourcen muss bei der Konzeptionierung des Prüfstandes speziell der zur Verfügung stehende Raum mitberücksichtigt werden. Innerhalb des Projektes wird daher ein Prüfstand mit den in Bild 1 dargestellten Maßen vorgeschlagen.

Ausblick

Anhand des vorgestellten Konzepts für den Prüfstand sollen weitergehende Detailuntersuchungen erfolgen und anschließend der Prüfstand geplant werden. Eine bei der Konzepterstellung aufgetretene Frage betrifft die Ausgestaltung der Innenkammern. Aufgrund der erforderlichen Installation von mehreren (ggf. mobilen) Inneneinheiten muss die Ausgestaltung der Strömungsführung genauer analysiert werden. Dies erfolgt in einem durch den VdF HLK geförderten Folgevorhaben durch numerische Untersuchungen der Raumluftrömung bei unterschiedlicher Positionierung der Umluftkühlgeräte (siehe Artikel 238 des HLK-Briefes).

Literatur

- [1] DIN EN 14511: Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen für die Raumbeheizung und -kühlung und Prozess-Kühler mit elektrisch angetriebenen Verdichtern, 2018.
- [2] Klein, B., Ruppert, A.: Konzeptstudie über den Aufbau eines Versuchsstandes zur Untersuchung von VRF-Systemen, Abschlussbericht 2021.

Ausgestaltung der kalorischen Innenkammern des Versuchsstandes zur Untersuchung von VRF-Systemen

Bernd Klein, Matthias Hartnagel

Einleitung

Da die Bedeutung von Luft/Luft-Wärmepumpen im Rahmen der Energie-wende steigen wird, wurde im Projekt „Konzeptstudie über den Aufbau eines Versuchsstandes zur Untersuchung von VRF-Systemen“ (FKZ: VdF 2021-2) [1] das Konzept eines Prüf-labors entwickelt. In der Studie wurde der Prüfstand im Wesentlichen dimensioniert und konzeptioniert. Die Konzeptionierung ergab, dass bei der Ausführung der kalorischen Innenkammern weiterer Untersuchungsbedarf in Bezug auf die optimale Raumluftrömung in den Innenkammern besteht. Ziele der vom Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. (VdF HLK) geförderten und von der FG HLK Stuttgart mbH bearbeiteten Studie (FKZ: VdF 2022-2) sind:

- Simulation der Temperaturverteilung im Raum bei verschiedenen Anordnungen von Prüfling und Konditionierer
- Bewertung von unterschiedlichen Montageorten der Konditionierer
- Empfehlung für einen optimalen Montageort von Prüfling und Konditionierer.

Für eine gute Reproduzierbarkeit der Messung ist neben der genauen Messung der zugeführten Energie auch

eine homogene Konditionierung des Raumes elementar. Insbesondere am Eintritt der Innenwärmeüber-träger müssen die vorgegebenen Konditionen in einem engen Toleranzband eingehalten werden. Die Herausforderung ist dabei, dass verschiedene Bauformen von Innen-wärmeübertragern berücksichtigt werden müssen. Je nach Bauform entstehen sich unterschiedliche Aus-trittsströmungen im Raum, die durch die Konditioniereinrichtung so kompensiert werden müssen, dass am Eintritt in die Innenwärmeübertrager wieder homogene definierte Bedingungen herrschen.

Eine Marktanalyse ergab die in den Bildern 1 bis 5 dargestellten Haupt-formen von Innenwärmeübertra-gern, die es zu berücksichtigen gilt. In diesem Projekt soll nun ein Kon-zept für die Strömungsführung in der Innenkammer erstellt und hinsicht-lich der Homogenität am Eintritt der Wärmeübertrager bewertet werden.

Vorgehen

Die Bewertung erfolgt anhand von Strömungssimulationen. In einem ersten Schritt sollen dazu der Prüf-raum sowie typische Bauformen von Prüflingen hinsichtlich Strömungs- und Temperaturverhalten in ANSYS Fluent mit einem dreidimensionalen Modell abgebildet werden. Die Mo-dellierung erfolgt zunächst basierend auf Katalogdaten der Hersteller.



Bild 1: Wandgerät [2]



Bild 2: Deckengerät [2]



Bild 3: Deckenkassette [2]



Bild 4: Gebläsekonvektor bzw. Truhe [2]



Bild 5: Kanalgerät [2]

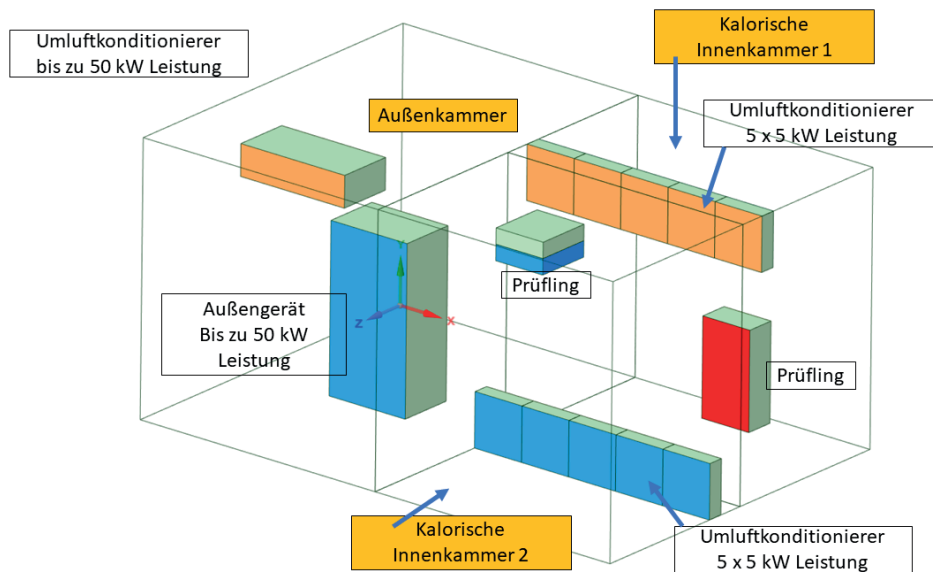


Bild 6: Aufbau der Außen- und Innenkammern mit Positionierung der Prüflinge und Umluftkonditionierer

Für die relevanten Bauformen werden anschließend Konzepte für die Strömungsführung entwickelt und mit Hilfe der Strömungssimulation für unterschiedliche Lastzustände bewertet. Um die Temperaturverteilung im Raum für verschiedene Anordnungen von Prüflingen und Konditionierern bei variierten Lastzuständen abschätzen zu können, werden mehrere der o.g. Hauptformen der Innenwärmeübertrager betrachtet. Hierzu werden in den Raummodellen die Anordnungen der Prüflinge und die Leistungsstufen variiert und die hierbei erreichte Homogenität der Temperaturverteilung bewertet. Basierend auf diesen Varianten soll eine Empfehlung für die optimale Anordnung von Prüfling und Konditionierer im Prüfraum für unterschiedliche Leistungsstufen und Bauformen erarbeitet werden. Bild 6 zeigt beispielhaft eine mögliche Anordnung von Umluftkonditionierern und Prüflingen in den kalorischen Innenkammern.

Hierbei werden die Umluftkonditionierer in fünf Achsen an der Innenwand der kalorischen Kammer positioniert. Ziel ist es, eine Raumwalze zu erzeugen, die die angeforderten Ansaugbedingungen der Prüflinge am Lufteintritt gewährleistet.

Ausblick

Ergebnis des Vorhabens soll eine konkrete Empfehlung für die Ausgestaltung der Konditionierung in den Innenkammern sein. Hierbei ist insbesondere die Anzahl, die Größe und die Position der Umluftkonditionierer festzulegen. Eventuelle weitere notwendige Maßnahmen zur Strömunglenkung sollen beschrieben werden.

Literatur

- [1] Klein, B., Ruppert, A.: Konzeptstudie über den Aufbau eines Versuchsstandes zur Untersuchung von VRF-Systemen, Abschlussbericht 2021.
- [2] Daikin, Katalog 2021, VFR.

Implementierung eines Vorhersage- und Optimierungsalgorithmus in eine Datenschnittstelle für Smart Meter Gateways

Joel Kimmich, Matthias Eydner

Einleitung

In Zukunft muss die aus erneuerbaren Quellen wie Wind und Sonne gewonnene Energie deutlich erhöht werden, um klimaschädliche CO₂-Emissionen zu minimieren und die internationalen Abhängigkeiten bei der Energieträgerbeschaffung zu verringern. Beim derzeit durchgeführten Umstieg von fossilen Energieträgern auf Windkraft- und Photovoltaik-Anlagen verändert sich die Energieerzeugung grundlegend, weil das Angebot nicht mehr der Nachfrage folgt, sondern Tages- und Wetterzyklen die Energieerzeugung bestimmen. Trotzdem muss vor allem im Stromnetz zu jeder Zeit gewährleistet werden, dass Angebot und Nachfrage ausgeglichen sind. Um hierbei den Energiebedarf an ein schwankendes Angebot anzugleichen, können Energiespeicher verwendet werden, die bei hohem Angebot beladen und bei geringem entladen werden. Ein Werkzeug für die Realisierung neuer Regelungen im Netzbetrieb sollen Smart Meter Gateways (SMGW) sein, die eine Kommunikation zwischen allen Akteuren der Energieversorgung ermöglichen und Rechenoperationen ausführen können.

Vor diesem Hintergrund wird ein Applikationsmodell zur Lastumverteilung mittels Energiespeicher erstellt und dessen Funktionsfähigkeit durch Model-in-the-Loop-(MiL)-Simulationen validiert. Die Untersuchungen erfolgen in einem vom Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. geförderten (FKZ: VdF

2021-1) und von der FG HLK Stuttgart mbH in Zusammenarbeit mit der Tecomon GmbH bearbeiteten Forschungsvorhaben [1].

Modellfunktionsweise

Die Funktionsweise des gesamten Applikationsmodells ist in Bild 1 dargestellt. Mittels eines neuronalen Netzes (NN) und entsprechender Mess- und Wetterdaten wird eine Heizlastvorhersage erstellt. Diese wird von einem Optimierer mit der Kostenfunktion verglichen, die z.B. den erwarteten CO₂-Ausstoß für die Stromerzeugung in einer Zeitperiode oder vorgegebene Sollwerte beinhalten kann. Entsprechende Strommarktdaten werden von den Übertragungsnetzbetreibern anhand der Wettervorhersage und geplanter Lasten der Industrie berechnet und online unter anderem als Day-Ahead-Vorhersage zur Verfügung gestellt. Durch einen Vergleich von Heizlastvorhersage und Kostenfunktion plant der Optimierer eine Beladung bzw. Entladung des

Energiespeichers, sodass die Kosten (bzw. die CO₂-Emissionen) minimiert werden. Durch periodisches, bspw. stündliches Wiederholen, wird die Vorhersage und damit der optimierte Beladungsplan aktuell gehalten sowie sichergestellt, dass zu jeder Zeit ausreichend Energie vorhanden ist, um das Gebäude zu beheizen.

Model-in-the-Loop-Simulation

Zur Validierung des Applikationsmodells werden MiL-Simulationen durchgeführt. Diese umfassen ein Jahr, wobei der Vorhersage- und Optimierungsprozess stündlich neu ausgeführt wird. Auf Basis der letzten 24 Stunden wird eine Vorhersage für die nächsten 24 Stunden erstellt. Beide Werte sind im Programm frei wählbar und der Verfügbarkeit der Wetter- und Strommarktdaten angepasst. Das thermisch-energetische Gebäudeverhalten wird mit TRNSYS simuliert (auf Bedingungen aus DIN EN 16798-1:2019 basierend). Als Beispielgebäude wird ein Einfamilienhaus am Standort Stuttgart mit

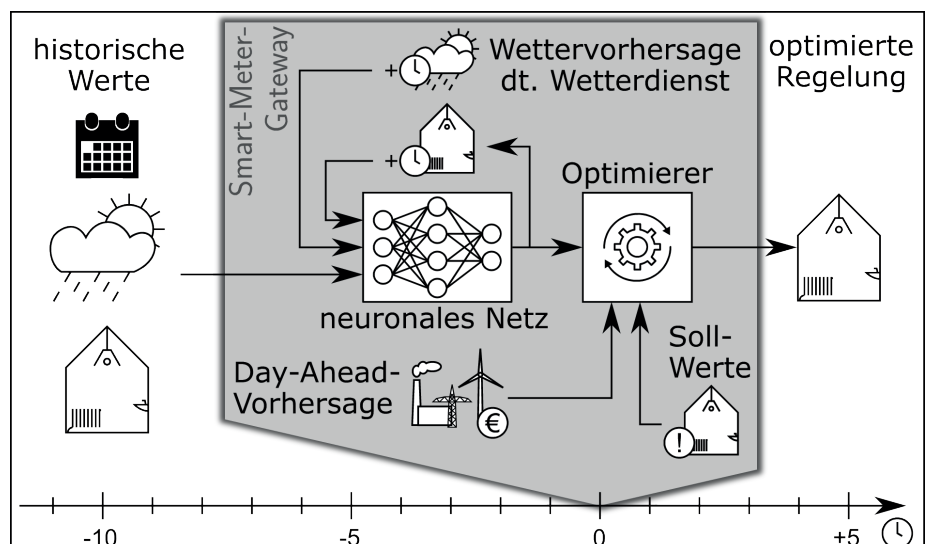


Bild 1: Schematische Darstellung des Applikationsmodells

197 m² und einer Normheizlast von 6,8 kW betrachtet. Die Wetter- und Strommarktdaten können aus historischen Daten der letzten Jahre beim Deutschen Wetterdienst und European Network of Transmission heruntergeladen werden. Ungenauigkeiten der Wettervorhersage werden folglich nicht in den MiL-Simulationen berücksichtigt, da Werte der nächstgelegenen Wetterstation verwendet werden. Auch ein zeitlicher/geographischer Versatz von Umgebungsdaten zwischen Wetterstation und Beispielgebäude existiert nicht. Darum werden zusätzlich Messdaten eines Einfamilienhauses für eine MiL-Simulation verwendet, um einen Vergleich zwischen Simulation und Realität zu ermöglichen. Es werden MiL-Simulationen zur Beurteilung des Einflusses auf die CO₂-Emission, den Strompreis und verschiedene Trainingsparameter durchgeführt. Eine bedarfsorientierte Rechnung ohne Zwischenspeicherung dient als Vergleichsbasis.

Ergebnisse und Diskussion

Durch das Applikationsmodell kann im Jahr 2019 simulativ der gebäudebedingte Ausstoß von CO₂ durch die Stromerzeugung um 9,5% auf 14,3 kg CO₂/(m²a) verringert werden. Bei einem Durchreichen des Börsenstrompreises an den Verbraucher können außerdem 19% der Stromkosten im Jahr (entspricht 180 €) eingespart werden. Die Simulationsergebnisse zeigen eine Korrelation zwischen CO₂-Emissionen durch die Stromerzeugung und den Strompreisen (s. Bild 2). Wird hinsichtlich des einen Parameters optimiert, verringert sich der andere um ca. den halben Betrag seines Einsparpotentials. Hiermit lassen

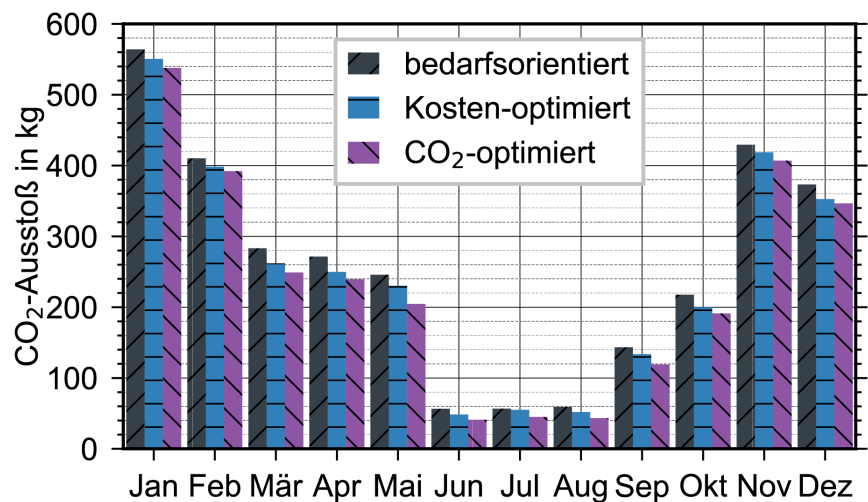


Bild 2: CO₂-Emissionen bei unterschiedlichen Optimierungszielgrößen

sich Ziele der Wirtschaftlichkeit und der CO₂-Emissionreduktion vereinen.

Es zeigt sich, dass die Vorhersage einen geringen Einfluss auf die Simulationsergebnisse hat. Das bedeutet, dass der Optimierer das wichtigste Glied im Applikationsmodell ist und in der Praxis weniger Daten als ursprünglich erwartet benötigt werden, um das neuronale Netz zu trainieren. Die Realdatensimulationen bestätigen die zuvor erläuterten Ergebnisse. Bei der Stromkostenoptimierung steigt die Einsparung signifikant auf 34%. Untersuchungen zeigen, dass die im Realgebäude aktive Nachtabsenkung in einem hohen Lastumverteilungspotential resultiert und sich dadurch die Einsparungen erklären lassen. Der geringe Einfluss der Vorhersagegenauigkeit wird ebenfalls bestätigt.

Fazit und Ausblick

Die dargestellten Simulationsergebnisse zeigen die Funktionsfähigkeit des entwickelten Applikationsmodells auf. Das betrachtete Beispiel der Verringerung von CO₂-Emissionen bzw. Stromkosten beim Heizen eines Einfamilienhauses erreicht Ein-

sparungen von 10% bis 34%. Selbst mit einer vergleichsweise geringen Datenmenge von vier Monaten sind qualitativ teils genauere Ergebnisse zu erzielen als mit Daten von vier Jahren, was vermutlich von der Wahl des Zeitraums des Trainingsdatensatzes abhängt, der in den Bereich hohen Energiebedarfs gelegt werden sollte. Die Realdatensimulation zeigt, dass eine Nachtabsenkung das Potential zur Lastumverteilung für Kosteneinsparungen signifikant steigert. Das Applikationsmodell eignet sich für einen Einsatz in der Praxis, der durch die Tecomon GmbH bereits in Planung ist. Andere Szenarien bezüglich Lastumverteilung sollten zur Abschätzung weiterer Potentiale in nachfolgenden Betrachtungen simuliert werden, wie zum Beispiel das Laden eines Elektroautos bis hin zur völligen Autarkie eines Gebäudes mit einem Stromspeicher.

Literatur

[1] Kimmich, J., Hartnagel, M., Ruppert, A.: Implementierung eines Vorhersage- und Optimierungsalgorithmus in eine Datenschnittstelle für Smart Meter Gateways (SmartMin-CO₂), Abschlussbericht 2022.

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

Christian Karczewski, Tobias Henzler

Stuttgart e.V. unter dem Förderkennzeichen VdF 2022-1 gefördert.

Einleitung

Durch den Ausbau erneuerbarer Erzeuger rückt im zukünftigen Stromnetz das Lastmanagement in den Fokus. Hiervon ist auch der Gebäudesektor betroffen, der für einen erheblichen Anteil des Primärenergieverbrauchs verantwortlich ist.

Die thermische Speicherfähigkeit der Gebäudemasse und die Toleranzbänder der raumklimatischen Sollwerte ermöglichen einen flexiblen und netzdienlichen Betrieb der heiz- und raumluftechnischen Anlagen. Damit sind Gebäude in der Lage, energetische Flexibilität als Dienstleistung für das Stromnetz anzubieten und einen Beitrag zur Netzstabilität und zum weiteren Ausbau erneuerbarer Erzeuger zu leisten.

Das Ziel dieser Studie ist die Untersuchung der Umsetzbarkeit eines neuartigen regelungstechnischen Konzeptes zur Quantifizierung der energetischen Flexibilität eines Gebäudes mit netzdienlich betriebener Anlagentechnik. Dieses Beobachter-Konzept wird im Folgenden als „Flex-Beobachter“ bezeichnet.

Die Studie wird von der Forschungsgesellschaft Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart mbH (FG HLK) sowie dem Institut für Gebäudeenergetik Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart als assoziiertem Projektpartner bearbeitet und vom Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik

Energieflexible Gebäude

Die Ausnutzung der verbraucherseitigen Flexibilität ist von großer Bedeutung für die zukünftige Stabilität des Stromnetzes [1]. Die Bundesnetzagentur definiert Flexibilität als die Veränderung von Einspeisung oder Entnahme in Reaktion auf ein Preissignal, mit dem Ziel eine Dienstleistung im Energiesystem zu erbringen. In einem energieflexiblen Gebäude können in Zeiten hoher Einspeisung erneuerbarer Erzeuger die installierten Wärmepumpen oder Kälteanlagen unter erhöhter Last betrieben werden, sodass thermische Energie in der Gebäudemasse gespeichert wird. Diese kann anschließend genutzt werden, um die stromseitige Leistungsaufnahme der Wärme- und Kälteerzeuger in Zeiten geringer Verfügbarkeit erneuerbarer Energiequellen zu senken. Ein solcher flexibler Betrieb, der eine Lastverschiebung in Zeiten geringer Preise durchführt, kann durch eine intelligente Regelung erreicht werden, die den Strompreis berücksichtigt. Durch die zeitweise höheren Temperaturen im Gebäude (Heizfall), führt dieses Vorgehen zu einem energetischen Mehraufwand gegenüber einem energieeffizienten rein bedarfsgeführten Betrieb. Da die Bereitstellung von Flexibilität eine Dienstleistung für das Stromnetz darstellt, ist davon auszugehen, dass Gebäudebetreiber dazu nur

bereit sind, wenn durch den energetischen Mehraufwand kein finanzieller Nachteil entsteht [2].

Insgesamt befinden sich Konzepte zur Lastflexibilisierung auf dem Stand der Forschung. Dies zeigt sich an aktuell initiierten Forschungsprojekten, wie dem europäischen Projekt SmartBuilt4EU [3] und dem Annex 82 „Energy Flexible Buildings Towards Resilient Low Carbon Energy Systems“ der Internationalen Energieagentur [4]. Eine der größten Hürden für die erfolgreiche Einbindung energieflexibler Gebäude in das Stromnetz ist das unbekannte Verhalten energieflexibler Gebäude und damit u.a. die Auswirkung einer flexiblen gegenüber einer bedarfsgeführten Betriebsweise.

Konzept „Flex-Beobachter“

Die Ausgangslage für diese Studie ist ein energetisch flexibel betriebenes Gebäude mit einer erweiterten Regelung der Anlagentechnik (siehe Bild 1). Das Stellsignal des Raumtemperaturreglers wird um eine flexible Heizleistung \dot{Q}_{flex} überlagert. Diese flexible Heizleistung wird von einem Flex-Regler umgesetzt und erfolgt als Lastmanagementeingriff durch den Strommarkt. Der Lastmanagementeingriff wirkt wie eine Störung auf die Regelung und hat eine Veränderung der Raumlufthtemperatur zur Folge. Durch den geschlossenen Wirkungsablauf des Regelkreises beeinflusst die gestörte Raumlufthtemperatur \bar{T}_{Raum} auch die Arbeitsweise des Raumtemperaturreglers.

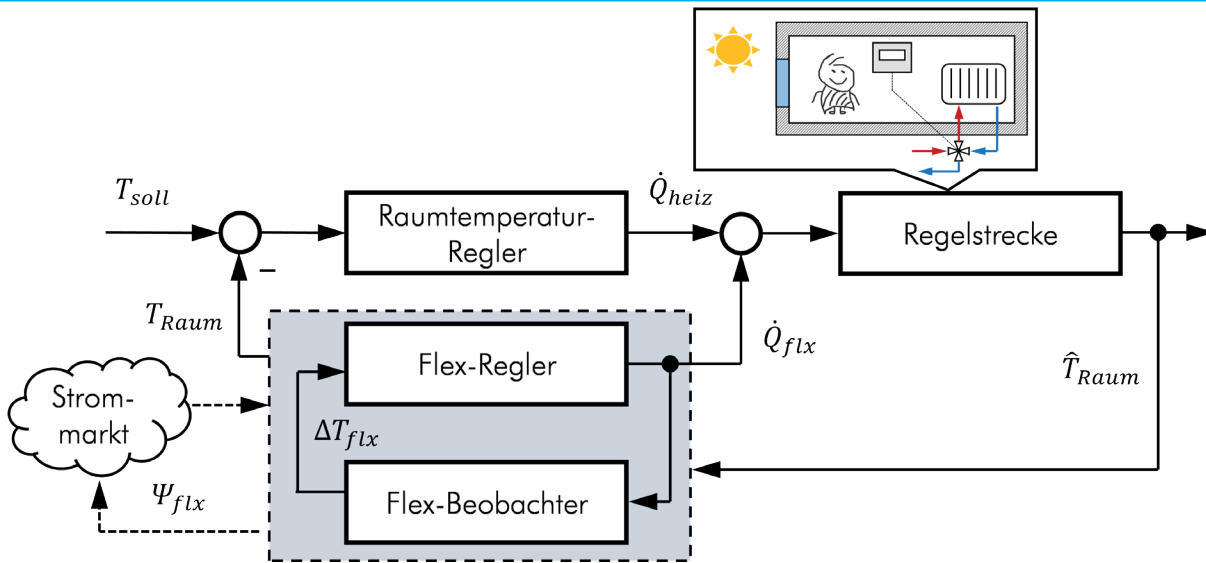


Bild 1: Erweiterter Regelkreis eines energetisch flexibel betriebenen Gebäudes mit Flex-Beobachter

Die Raumtemperatur T_{Raum} und der Bedarf der Anlagentechnik, die sich ohne den Lastmanagementeingriff eingestellt hätten, sind unbekannt. In der Regelungstechnik werden Zustandsbeobachter eingesetzt, um nicht messbare Größen eines geregelten Systems zu rekonstruieren. Der Flex-Beobachter ist eine besondere Form des Zustandsbeobachters, der anhand eines mathematischen Modells eines Gebäudes die Temperaturänderung ΔT_{flx} der Raumluft sowie der Gebäudemasse infolge des Lastmanagementeingriffs schätzt. Hierdurch ist es möglich, die ungestörte Raumlufttemperatur T_{Raum} zu rekonstruieren. Wird die rekonstruierte Temperatur dem Raumtemperaturregler als Messgröße übergeben, arbeitet dieser wieder wie im ungestörten Fall.

Umsetzung der Studie

Die Umsetzbarkeit des Flex-Beobachters wird anhand von Simulationsstudien untersucht. Im ersten Schritt erfolgt eine mathematische Formulierung und Implementierung des Flex-Beobachters, wie in Bild 1 dargestellt. Im zweiten Schritt wird

der Proof-of-Concept unter der idealisierten Annahme erbracht, dass das verwendete Gebäudemodell im Flex-Beobachter fehlerfrei ist. Die weiteren geplanten Untersuchungen stellen den realistischeren Fall nach, bei dem das verwendete Modell fehlerbehaftet ist. Hierdurch soll untersucht werden, wie robust der Flex-Beobachter ist, sodass eine Aussage über einen möglichen Einsatz in einem realen Gebäude getroffen werden kann.

Ausblick

Die Schätzung der Temperaturänderung innerhalb des Gebäudes infolge eines Lastmanagementeingriffs ermöglicht aufbauende Untersuchungen des unbekanntem Verhaltens energieflexibler Gebäude und somit den Abbau einer Hürde für die Einbindung energieflexibler Gebäude in das Stromnetz. Weiterhin ermöglicht diese Methodik, die im Gebäude gespeicherte Energie zu bestimmen, welche in den Folgezeiträumen für die Lastflexibilisierung (noch) zur Verfügung steht. In einer auf dieser Studie aufbauenden Folgearbeit könnten Geschäftsmodelle

mit dem Kerngedanken ausgearbeitet werden, dass Gebäudenutzer ihr Gebäude als virtuellen Energiespeicher für das Stromnetz anbieten.

Literatur

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Öffentliche Infrastruktur in Deutschland: Probleme und Reformbedarf: Gutachten des Wissenschaftlichen Beirats beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin, 2020.
- [2] C. Karczewski, T. Henzler, K. Stergiaropoulos, Increasing the Energy Flexibility of Buildings controlled by Model Predictive Control, CLIMA2022 14th REHVA HVAC World Congress 22-25 Mai 2022 (www.clima2022.org).
- [3] O. Genest, F. Garzia, Smart-Built4EU White Paper Task Force 3: Interactions with the external environment: Topic A: Smart buildings as flexibility providers to the electricity grids, 2021.
- [4] O. M. Jensen, Factsheet Energy Flexible Buildings towards Resilient Low Carbon Energy Systems: EBC Annex 82.

Entwicklung und Erprobung von textilen Temperiersystemen für die kosteneffiziente Klimatisierung von Räumen

Matthias Hartnagel

Hintergrund

Neue Lösungskonzepte für die Raumkonditionierung sind essentiell, um den in der „Energieeffizienzstrategie Gebäude“ der Bundesregierung angestrebten, nahezu klimaneutralen Gebäudebestand zu erreichen [1]. Die funktionale Kombination von Raumtextilien und Heiz-/Kühlflächen zu „thermoaktiven Raumtextilien“ bietet hierbei eine innovative Möglichkeit.

Das im Rahmen der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) geförderte Forschungsvorhaben wird von drei Forschungseinrichtungen (IGF-Vorhabennummer 21073 BG) in enger Kooperation mit im Projektbegleitenden Ausschuss vertretenen Praxispartnern bearbeitet.

- FE 1: Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik, Professur für Gebäudeenergie-energie-technik und Wärmeversorgung (IET)
- FE 2: Technische Universität Dresden, Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM)
- FE 3: Forschungsgesellschaft HLK Stuttgart mbH (FG HLK)

Das Forschungsvorhaben wird vom Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. (VdF HLK) begleitet.

Im Rahmen des Projekts werden Erkenntnisse aus Voruntersuchungen zu thermoaktiven Textilien in textilen

Temperiersystemen überführt und deren Eigenschaften sowohl simulativ als auch messtechnisch detaillierter untersucht.

Ziele

Die messtechnischen Ziele des Forschungsvorhabens bei der FG HLK sind hierbei die Leistungsmessungen und Druckabfallbestimmung der Funktionsmuster sowie die Untersuchung typischer Lastfälle in Laborräumen. Diese Ergebnisse dienen als Randbedingungen für die durch FE1 durchgeführten Strömungssimulationen. Zusätzlich werden auf Basis dieser Erkenntnisse die Systemeigenschaften und die Raumklimawirkung bewertet sowie Vorschläge zur Systemprüfung abgeleitet.

Vorgehen und Ergebnisse

Zur Beurteilung der thermischen Eigenschaften der textilen Temperiersysteme werden Leistungsmessungen an Funktionsmustern, welche durch FE2 gefertigt werden, durchgeführt. Hierbei wird für den Heizfall angelehnt an das Vorgehen bei der Heizkörperleistungsprüfung nach DIN EN 442-2 [2] die Wärmeabgabe im stationären Zustand (konstante Raumlufttemperatur) bei variierenden Randbedingungen ermittelt.

Zur Erstellung eines Betriebskennfelds werden bei gleichbleibendem Massenstrom unterschiedliche Vorlauftemperaturen eingestellt und über die Messung der Rücklauftemperaturen die Wärmeabgabe bestimmt. Analog zum Heizfall werden

die Kühlleistungen des Temperiersystems in einer Messkammer in Anlehnung an DIN EN 14240:2004 [3] gemessen.

Bild 1 zeigt hierbei eine Thermografieaufnahme des textilen Temperiersystems, die im Zuge einer Leistungsmessung vor einem Außenfenster im Kühlfall aufgenommen worden ist.

Neben den thermischen Leistungen des Systems werden auch die hydraulischen Eigenschaften hinsichtlich des Druckabfalls bei der Durchströmung der Kanäle für verschiedene Betriebspunkte messtechnisch untersucht. Die hierbei ermittelten Kennfelder der Leistungsmessung und Druckabfallbestimmung gehen anschließend als Randbedingungen in

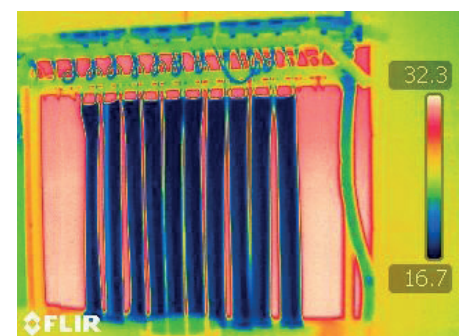


Bild 1: Thermografieaufnahme des textilen Temperiersystems im Kühlfall

die numerischen Untersuchungen ein.

Zusätzlich werden in den Prüfkammern mit temperierbaren Umfassungsflächen und innerer Wärmefreisetzung z.B. durch Personen-Dummys typische Lastverläufe aufgebracht und das Systemverhalten

des textilen Temperiersystems sowie die thermische Behaglichkeit im Raum untersucht.

Bild 2 zeigt beispielhaft den Temperaturverlauf der Raumluft in einem untersuchten Heizfall mit dynamischen Randbedingungen.

In diesem Szenario befinden sich 10 thermisch aktive Lamellen vor einem Außenfenster. Die Temperatur des Außenfensters, der Wandoberflächen sowie die Vorlauftemperatur werden dabei tageszeitabhängig variiert.

Als Ergebnis ist festzustellen, dass die Raumlufttemperatur, insbesondere in der Nacht, signifikant erhöht werden kann. Dies wirkt einem Auskühlen des Raums entgegen.

Analog hierzu werden dynamische Szenarien für den Kühlfall untersucht. Auch hierbei werden die innere Wandoberflächentemperatur, die Vorlauftemperatur sowie die inneren Lasten tageszeitabhängig variiert.

Bild 3 zeigt die resultierende Raumlufttemperatur in Abhängigkeit der variierenden Randbedingungen im Kühlfall.

Das aus mehreren Szenarien zusammengefasste Systemverhalten des textilen Temperiersystems im Kühlfall wird in Bild 4 aufgezeigt. Zwischen den Szenarien wurde die Vorlauftemperatur zwischen 15 °C bzw. 17 °C sowie die innere Last zwischen 10 W/m² und 20 W/m² variiert.

Als Ergebnis ist festzustellen, dass die maximale Raumtemperatur bei geringerer Last (10 W/m²) und Reduzierung der Wasservorlauftemperatur (15 °C) auf ca. 28 °C (gegenüber 33 °C ohne aktive Lamellen) reduziert werden kann.

Zur Erprobung des textilen Raumtemperiersystems wurde ein Demonstrator entwickelt und in einen realen Büroraum eingebracht. Der

Demonstrator besteht dabei aus einer Übergabestation und einem Prüfaufbau zur Aufnahme der Funktionsmuster.

Die Übergabestation setzt sich dabei aus einem Membranausdehnungsgefäß, einer Umwälzpumpe sowie einem Heizstab zusammen. Zur Leistungsmessung und Regelung werden ein MID (Magnetisch-Induktiver-Durchflussmesser) zur Anzeige des Massenstroms in den Rücklauf

und ein regelbares Ventil im Vorlauf angeordnet.

Die zur Leistungsmessung erforderlichen Temperaturfühler befinden sich im Vor- sowie im Rücklauf. Mittels des Prüfaufbaus zur Aufnahme der Funktionsmuster wurde ein wechselseitiger hydraulischer Anschluss der einzelnen Lamellen realisiert. Bild 5 zeigt den in Betrieb befindlichen Demonstrator.

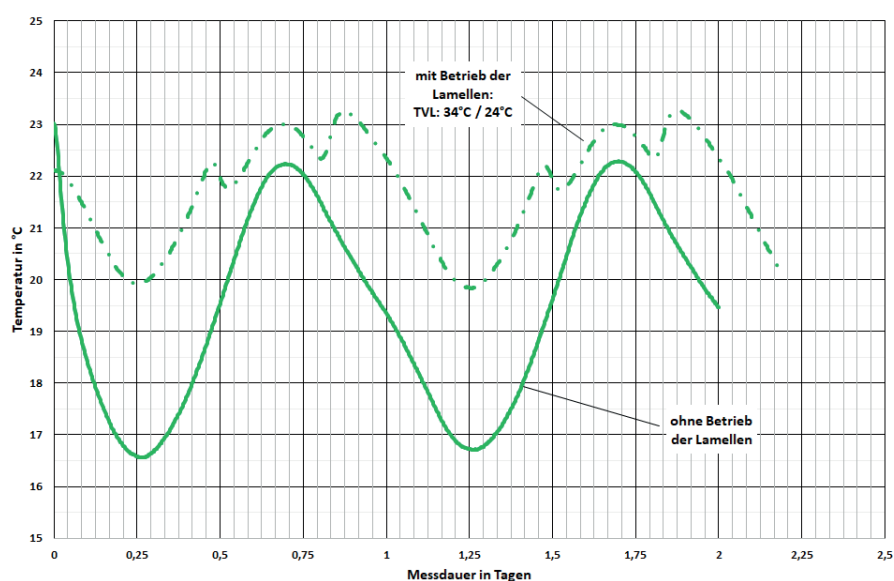


Bild 2: Heizfall - Dynamische Lastverläufe

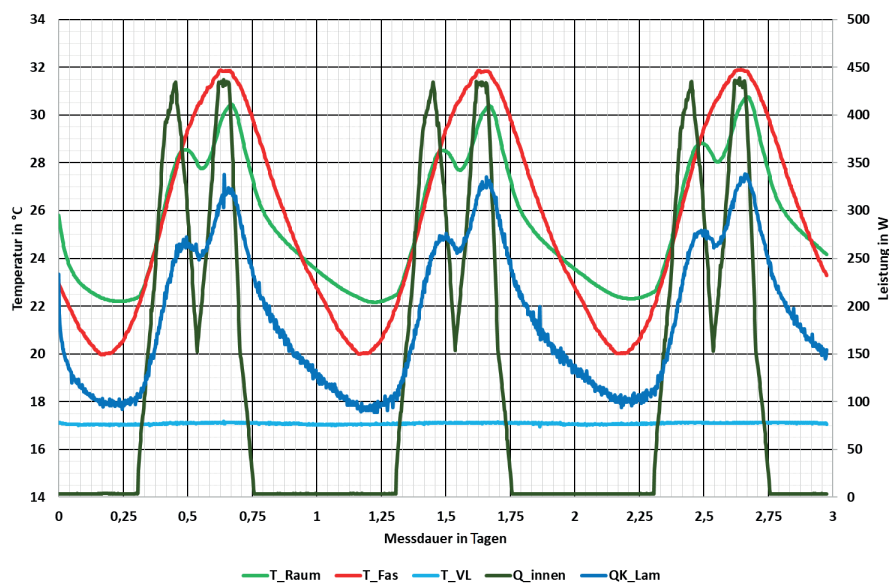


Bild 3: Kühlfall - Dynamische Lastverläufe

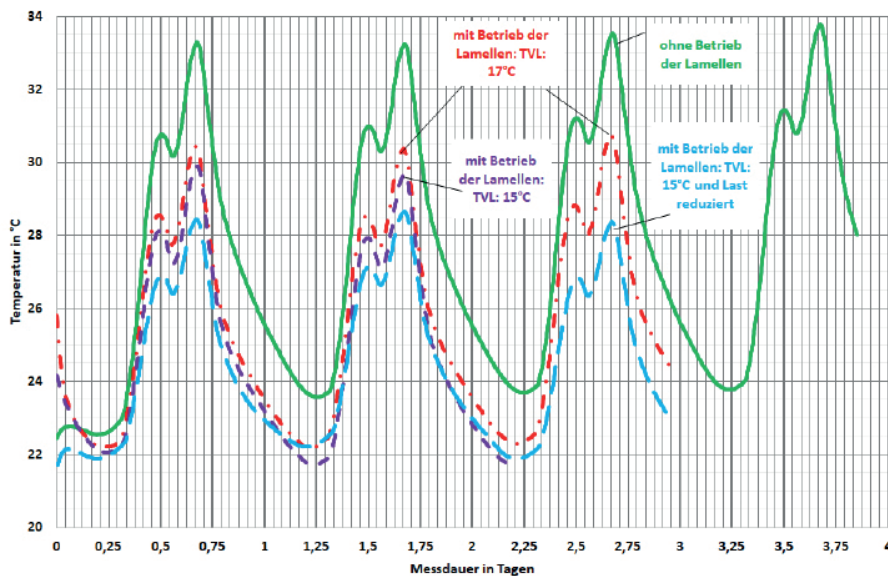


Bild 4: Kühlfall – Resultierende Innenraumtemperatur auf Basis dynamischer Lastverläufe



Bild 5: Demonstrator in realem Büroraum

Zu sehen sind (von links nach rechts) die Übergabestation mit dem Membranausdehnungsgefäß (rot), der Behaglichkeitsmessbaum zur Erfassung der thermischen Behaglichkeit im Raum sowie vor dem Fenster befindliche Prüfaufbau mit den thermisch aktiven Funktionsmustern. Die

Thermografieaufnahme in Bild 6 dient zur Veranschaulichung des Prüfaufbaus mit dem textilen Temperiersystem im heizenden Zustand.

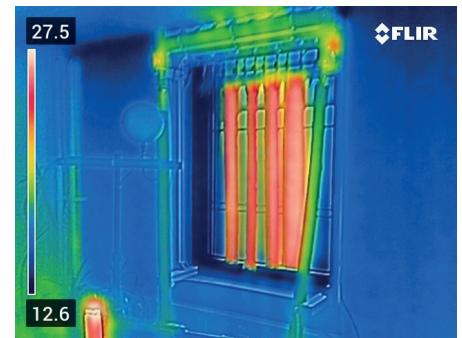


Bild 6: Thermografieaufnahme des textilen Temperiersystems in realem Büroraum

Literatur

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Energieeffizienzstrategie Gebäude - Wege zu einem nahezu klimaneutralen Gebäudebestand, 2015
- [2] Norm: DIN EN 442-2 März 2015, Radiatoren und Konvektoren - Teil 2: Prüfverfahren und Leistungsangabe (EN 442-2:2014).
- [3] Norm: DIN EN 14240 April 2004, Lüftung von Gebäuden – Kühldecken – Prüfung und Bewertung; Deutsche Fassung (EN 14240:2004).

Systemübergreifende Regelstrategien für einen energetisch optimierten Betrieb von Wohnungslüftungs- und Heizungssystemen

Tim Jourdan, Mostafa Barghash

Hintergrund und Zielsetzung

Ein fortgeschrittener Ansatz für die effiziente Raumkonditionierung sind übergreifende Regelstrategien der Systeme Wohnungslüftung und Heizung. Im Kontext zentraler Wohnungslüftungsgeräte (WLG) werden darüber hinaus dezentrale Ventilatoren bei ansonsten zentralen WLG-Komponenten als eine energieeffiziente Alternative gegenüber dem Stand der Technik mit zentralen Ventilatoren und Drosselorganen zur zonenweisen Luftverteilung eingeschätzt. Die Untersuchung dieser Ansätze sind zentraler Gegenstand des Forschungsprojekts HeatVentCon, mit dem Ziel für die zugehörigen Regelungsaufgaben bedarfsgeführte, zonenweise und systemübergreifende Regelstrategien

zu entwickeln, deren Potentiale aufzuzeigen und das Systemverhalten zu untersuchen. Das Projekt wird vom BMWK im Rahmen der Industriellen Gemeinschaftsförderung (IGF) gefördert (FKZ: 22051N) und vom Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. (VdF HLK) begleitet. Die Bearbeitung erfolgt in Kooperation zwischen dem Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart und der Forschungsgesellschaft Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart mbH (FG HLK).

Eine Forschungsfrage des Projekts zielt auf die Einsparpotentiale zonenweise geregelter Luftverteilung ab. Bei der Auslegung von WLG ist es etabliert, benötigte Außenluftvolumenströme zu bestimmen, wel-

che für verschiedene Lüftungsstufen definiert werden. Die Luftverteilung erfolgt über eine feste Annahme zur örtlichen Verteilung der stofflichen Last anhand von Aufteilungsfaktoren. Den Folgen von abweichenden Lastfällen im Betrieb kann ohne zonenweise Regelung der Luftverteilung nicht entgegengewirkt werden.

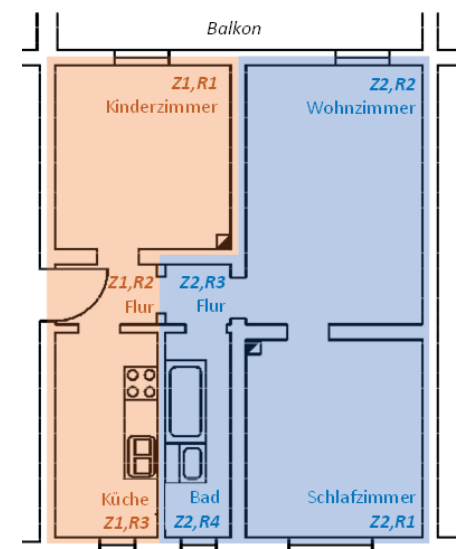


Bild 1: Grundriss in Anlehnung an die „MFH-Wohnung“ aus DIN 1946-6 Bl. 1 [1] und gewählte Zonierung

Tabelle 1: Raumbezeichnung, -größe und -art (Zuluft (ZU), Überströmen (Ü) und Abluft (AB))

Zone (Z), Raum (R)	Beschreibung	Art	Fläche	Volumen
Z1,R1	Kinderzimmer (KiZ)	ZU	14 m ²	36,3 m ³
Z1,R2	Flur links	Ü	3 m ²	7,8 m ³
Z1,R3	Küche	AB	8 m ²	20,7 m ³
Z2,R1	Schlafzimmer	ZU	14 m ²	36,3 m ³
Z2,R2	Wohnzimmer (WZ)	ZU	18 m ²	46,6 m ³
Z2,R3	Flur rechts	Ü	2 m ²	5,2 m ³
Z2,R4	Bad	AB	6 m ²	15,5 m ³
-	MFH-Wohnung	-	65 m ²	168 m ³

Tabelle 2: Lüftungsstufen der MFH-Wohnung

Lüftungsstufe	Außenluftvolumenstrom
Feuchteschutz (FS)	18,3 m ³ /h
Nenn (NL)	91,7 m ³ /h
Intensiv (IL)	119,2 m ³ /h

Untersuchung und Auswertung

Die Untersuchungen hinsichtlich resultierender Einsparpotentiale durch zonenweise angepasste Luftverteilung werden anhand einer Typ-Wohnung in Anlehnung an den Grundriss des Beispiels „Wohnung im Mehrfamilienhaus (MFH)“ aus DIN 1946-6 Bl.1:2012 [1] durchgeführt, die lediglich um eine Zwischentür im Flur ergänzt ist, um zwei Lüftungszonen abzutrennen (siehe Bild 1).

Für die Wohnung wird ein thermisch-energetisches Simulationsmodell einschließlich Stoffbilanzen für die Luftverteilung im Programm TRNSYS und dessen Luftströmungsmodell TRNFlow erstellt. Für eine Reglerentwicklung mit dem Programm MATLAB ist eine Co-Simulationsumgebung mittels Client-Server-System aufgebaut, die eine gekoppelte Simulation der Regelung in MATLAB mit dem TRNSYS-Modell ermöglicht. Folgender Lastfall mit örtlicher Inhomogenität bezüglich stofflicher Lastquellen wird betrachtet: für die MFH-Wohnung ist nach DIN 1946-6:2021 [2] für die „Nenn-Lüftungsstufe“ (s. Tabelle 2), von drei Personen als Nennbelegung auszugehen. Eine entsprechende Lastquelle wird bezogen auf die Uhrzeit τ eines Tages sprunghaft um 8 Uhr, für Fall 1-KiZ im Kinderzimmer (Z1,R1) bzw. Fall 1-WZ im Wohnzimmer (Z2,R2) eingebracht. Das heißt, es liegt eine „unbelastete“ und eine „belastete“ Lüftungszone vor. In der Außenluft wird eine konstante CO_2 -Konzentration von 400 ppm angenommen. Es werden drei Strategien (Fall 1, 2 und 3) zur Lastabfuhr simuliert, jeweils in der Variante „Last im Kinderzimmer (-KiZ) oder Wohnzimmer (-WZ)“ (s. Tabelle 3) und hinsichtlich der CO_2 -Konzentrationen verglichen. Die Bilder 2 bis 7 zeigen je untersuchtem Fall die sich in jedem Raum einstellende CO_2 -Konzentration.

In der Simulation ist der Bezug zu den Auslegungs-Lüftungsstufen nach

DIN 1946-6 [2] enthalten, indem diese die Stellgrößenbeschränkung für den Außenluftvolumenstrom darstellen. Die Lastabfuhr nach Stand der Technik in Fall 1-KiZ wirkt sich bei der vorliegenden Nennbelegung in erhöhten CO_2 -Konzentrationen c_{CO_2} in Zone 1 aus, s. Bild 2. Die gleiche Last verortet im Wohnzimmer, verdeutlicht den Einfluss der Grundrissgestaltung und der Zonierung. Zone 2 hat definitionsgemäß zwei Zuluft-Räume (Schlafzimmer und Wohnzimmer), zur Vergleichbarkeit ist eine offene Tür zwischen den Zuluft-Räumen, d.h. effektiv ein einzelner Zuluft-Raum simuliert. Dies ist am gleichzeitigen Anstieg der CO_2 -Konzentration im Schlafzimmer (Z2,R1) in Bild 3 erkennbar.

Strategien nach Stand der Technik, um den erhöhten CO_2 -Konzentrationen entgegenzuwirken, sind (I) das Erhöhen von Nenn- auf Intensiv-Lüftungsstufe oder (II) eine ergänzende freie Lüftung, weil die Personen im belasteten Raum das Fenster öffnen. Eine idealisierte freie Lüftung, simulativ als zusätzlich aufgeprägter Außenluftvolumenstrom realisiert, führt bei beiden Strategien zu gleichen Stoffkonzentrationen. Dargestellt in Bild 4 ist Fall 2-KiZ und in Bild 5 Fall 2-WZ als Ergebnis der Simulation von Strategie (I).

Eine zonenweise geregelte Luftverteilung weist gegenüber den Strategien (I) und (II) ein Potential für ein verbessertes Stofflast-Niveau, thermisches Energieeinsparpotential

sowie Hilfsenergieeinsparung beim Lufttransport auf. Dies wird aufgezeigt, indem insgesamt derselbe Außenluftstrom wie in den Referenzfällen zonenweise angepasst aufgeteilt wird, sodass die „unbelastete“ Lüftungszone gerade noch nach anteiliger Feuchteschutz-Lüftungsstufe versorgt ist, während der „belasteten Lüftungszone“ die verbleibende Differenz zur Nenn-Lüftungsstufe zugeführt wird. Die sich einstellenden CO_2 -Konzentrationen sind für den Fall 3-KiZ in Bild 6 und für Fall 3-WZ in Bild 7 aufgetragen. In beiden Fällen kann bei Nenn-Lüftungsstufe etwa die Kategorie II nach DIN EN 16798-1:2021 [3] eingehalten werden. Es fällt auf, dass dies für die Last im Wohnzimmer bei der Aufteilung nach Stand der Technik erst bei Intensiv-Lüftungsstufe möglich ist (Fall 2-WZ), vgl. Bild 5. Für den Fall 2-KiZ in Bild 4 stellt sich trotz Intensiv-Lüftungsstufe eine CO_2 -Konzentration von etwa 2.000 ppm ein. Dieser Wert wird mit einer zonenweise angepassten Luftverteilung nicht nur verringert (s. Bild 6), sondern es ist dabei gleichzeitig lediglich die Nenn-Lüftungsstufe aufzubringen. Die Förderleistung der Ventilatoren bei Nenn-Lüftungsstufe anstatt Intensiv-Lüftungsstufe beträgt etwa die Hälfte. Wenn in Anbetracht des hohen Niveaus der CO_2 -Konzentration bei Fall 2-KiZ trotz Intensiv-Lüftungsstufe davon ausgegangen werden muss, dass zusätzlich zur maschinellen Lüftung mit Wärmerückgewinnung (WRG) auch frei gelüftet wird, ist für ähnliche CO_2 -Konzentrationen ein zusätzlicher Außenluftvolumenstrom über freie Lüftung in Höhe von 40 m^3/h erforderlich. Dies erhöht die Lüftungswärmeverluste bei einer Außenlufttemperatur von z.B. -12°C um ca. 100%, wenn für die WRG bei Intensivlüftungsstufe ein Temperaturänderungsgrad von 0,7 angenommen ist.

Tabelle 3: Untersuchte Fälle der Luftverteilung mit den Anteilen am Außenluftvolumenstrom für Zone 1 und 2 (Z1 und Z2) mit Nenn- oder Intensiv-Lüftungsstufe (NL oder IL)

Fall	Beschreibung	Lastquelle	Anteil Z1	Anteil Z2
1-KiZ	NL und feste Aufteilung	Z1,R1	30%	70%
1-WZ	NL und feste Aufteilung	Z2,R2		
2-KiZ	IL und feste Aufteilung	Z1,R1		
2-WZ	IL und feste Aufteilung	Z2,R2		
3-KiZ	NL und zonenweise	Z1,R1	86%	14%
3-WZ	NL und zonenweise	Z2,R2	6%	94%

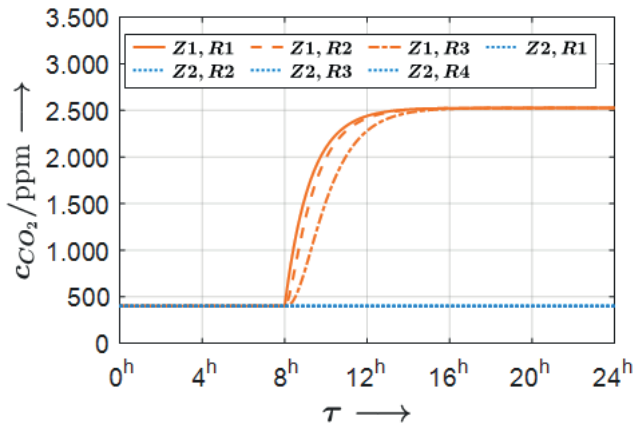


Bild 2: Verlauf der CO₂-Konzentrationen Fall 1-KiZ

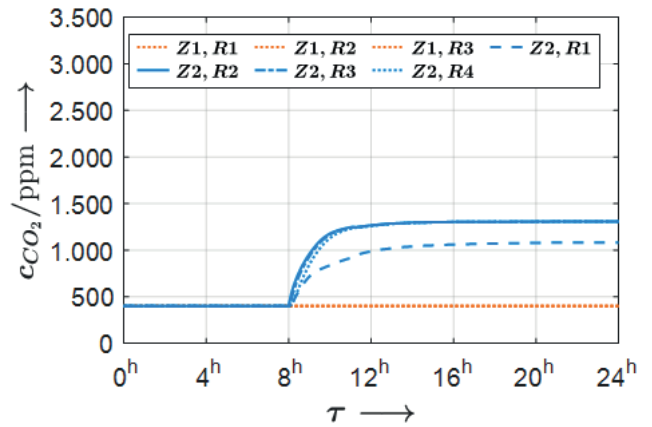


Bild 3: Verlauf der CO₂-Konzentrationen Fall 1-WZ

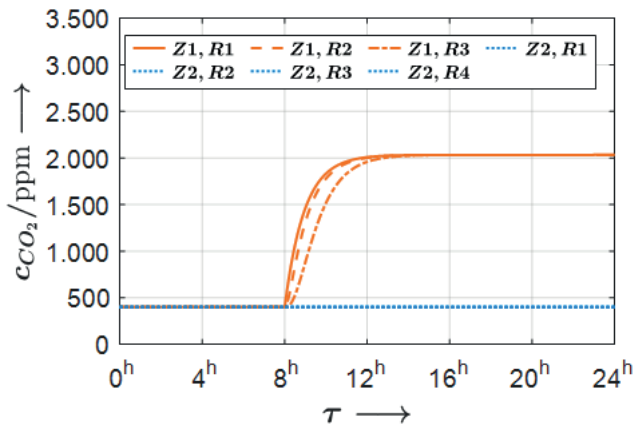


Bild 4: Verlauf der CO₂-Konzentrationen Fall 2-KiZ

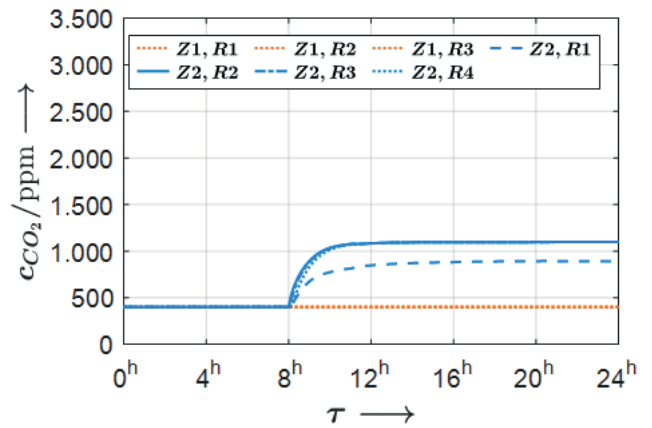


Bild 5: Verlauf der CO₂-Konzentrationen Fall 2-WZ

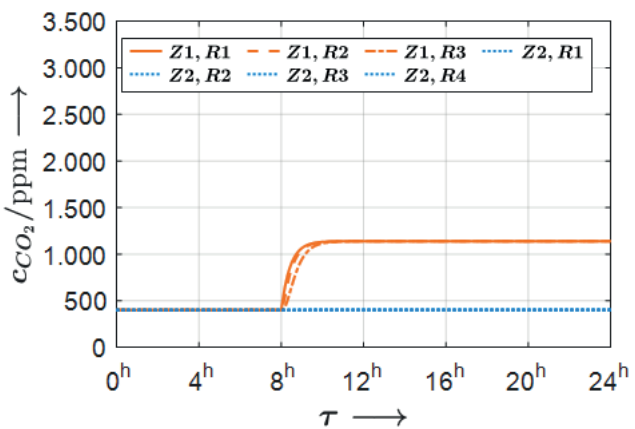


Bild 6: Verlauf der CO₂-Konzentrationen Fall 3-KiZ

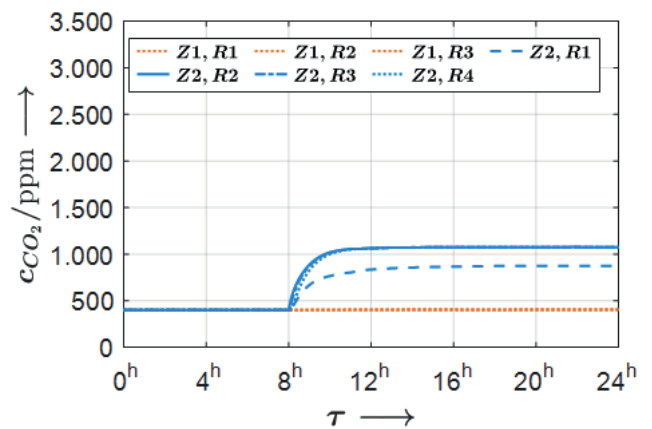


Bild 7: Verlauf der CO₂-Konzentrationen Fall 3-WZ

Luftverteil-Hardware-in-the-Loop-Prüfstand

Die Einsparpotentiale einer zonenweisen Regelung und von dezentraler anstatt zentraler Ventilation (s. Bild 8 und 9) bei bestimmten Nutzungsszenarien sollen auch messtechnisch quantifiziert werden, wofür derzeit ein Luftverteil-Hardware-in-the-Loop-Prüfstand (HiL-Prüfstand) entwickelt wird. Hierbei werden neben den Komponenten wie z.B. Ventilatoren, Verzweigung und Kanalleitungen auch geeignete Messtechnik bzw. Sensorik installiert. Zur einflussfreien Messung der Volumenströme kommen zuvor kalibrierte thermische Anemometer zum Einsatz, da diese im Vergleich zu Volumensstrommessdüsen vernachlässigbare Druckabfälle verursachen. Andernfalls wären Hilfsventilatoren erforderlich, die dies zwar kompensieren könnten, allerdings das Verhalten seriell folgender Ventilatoren beeinflussen. Der Energieaufwand des Lufttransportes wird über die elektrisch zugeführte Leistung der Ventilatoren gemessen. Dadurch können Szenarien der Wohnungslüftung mit zonenweiser Luftverteilung realistisch demonstriert und Einsparpotentiale dezentral angeordneter Ventilatoren analysiert werden. Die Durchströmung der Wohnung soll dabei über einstellbare Volumenstromklappen emuliert werden. Signale aus der Simulation definieren die Randbedingungen und die Lastverläufe. Zusätzlich wird am HiL-Prüfstand das dynamische Betriebsverhalten untersucht, z.B. das Verhalten von Ventilatoren in Parallelschaltung, die eine gegenseitige Beeinflussung der Ventilatoren zur Folge hat.

Zusammenfassung und Ausblick

Bereits die stoffliche Last, die aus der Nennbelegung resultiert, führt konzentriert auf einen Raum zu Betriebsfällen, bei denen mit der Strategie einer zonenweisen Regelung zur Lastabfuhr die Luftförderleistung auf

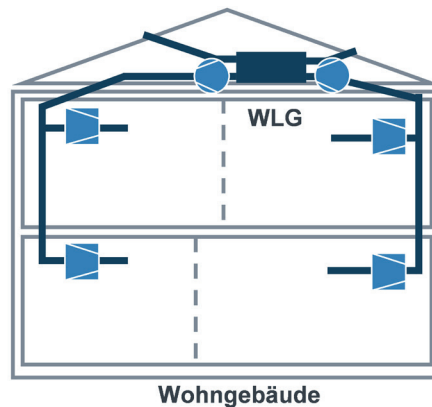


Bild 8: Prinzip-Skizze WLK mit zentraler Ventilation (zentrale Ventilatoren und dezentrale Drosselelemente)

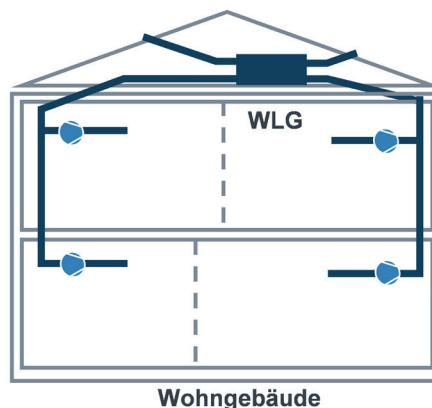


Bild 9: Prinzip-Skizze WLK mit dezentraler Ventilation (dezentral angeordnete Ventilatoren)

ca. 50 % abgesenkt werden kann. Dabei werden zudem erhebliche Lüftungswärmeverluste über freie Lüftung vermieden oder das Einhalten typischer Anforderungen hinsichtlich der CO₂-Konzentration erst ermöglicht. Wenn die stoffliche Lastabfuhr in Wohngebäuden bedarfsgeführt geregelt wird, ist damit eine zonenweise Regelung nicht nur wegen der

energetischen Einsparpotentiale anzustreben, sondern kann zur Einhaltung typischer Anforderungen an die Raumluftqualität mit WLK sogar erforderlich sein. Im weiteren Vorgehen sollen Jahressimulationen mit repräsentativen Lastprofilen zeigen, welche Aufwandsreduktion insgesamt für das Heizen und Lüften erreicht wird. Hierzu zählen auch vermiedene kleinere Lüftungswärmeverluste trotz WRG, wenn gering belastete Zonen mit lediglich reduzierten anstatt überhöhten Außenluftvolumenströmen versorgt werden. Parallel wird der Luftverteil-HiL-Prüfstand aufgebaut und zur Validierung und Quantifizierung der Potentiale unter Berücksichtigung realer Einflüsse beitragen.

Literatur

- [1] DIN 1946-6 Beiblatt 1:2012-09, Lüftung von Wohnungen – Allgemeine Anforderungen, Anforderungen zur Bemessung, Ausführung und Kennzeichnung, Übergabe/Übernahme (Abnahme) und Instandhaltung – Beiblatt 1: Beispielberechnungen für ausgewählte Lüftungssysteme
- [2] DIN 1946-6:2019-12, Raumlufttechnik – Teil 6: Lüftung von Wohnungen – Allgemeine Anforderungen, Anforderungen an die Auslegung, Ausführung, Inbetriebnahme und Übergabe sowie Instandhaltung
- [3] DIN EN 16798-1:2021-04, Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik – Modul M1-6; Deutsche Fassung EN 16798-1:2019

Rücklauf temperaturabsenkung im Wärmenetz 4.0

Luisa Haak, Johannes Brunder

Einleitung

In der Absenkung der Rücklauf temperatur von Wärmenetzen liegt ein großes energetisches und auch ökonomisches Potenzial. Eine geringere Rücklauf temperatur führt zu einer Reduktion der Wärmeverteilverluste, steigert die Effizienz der angeschlossenen Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen oder kann die Einbindung von Niedertemperaturwärmequellen wie z.B. Geothermie oder industrielle Abwärme ermöglichen. Darüber hinaus kann eine stärkere Auskühlung des Wärmeträgerfluids die Kapazität des Wärmenetzes erhöhen oder es kann über eine geringere Leistungsaufnahme der Pumpen des Wärmenetzes elektrische Energie eingespart werden [1], [3], [4].

Am Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) wurde im IGF-Projekt „Optimierung von Absorptionswärmepumpen für den Einsatz im Wärmenetz 4.0 (OptAwEW)“ und im Vorgängerprojekt „Potenziale von Absorptionswärmepumpen in zentralisierten Wärmeversorgungsnetzen (PARTA) [2] eine Möglichkeit untersucht, die Wärmenetzrücklauf-

temperatur deutlich unter die Rücklauf temperatur der Hausnetze abzusenkten. Dazu wurde eine neuartige Hausstation mit integrierter Absorptionwärmepumpe (AWP) entwickelt. Bei dem Arbeitsstoffpaar der AWP handelt es sich um Ammoniak/Wasser.

Betrachtete Betriebspunkte

Im Vorgängerprojekt PARTA wurden Fernwärmenetze der 3. Generation mit Vorlauf temperaturen von bis zu 110 °C betrachtet. Es wurden Rücklauf temperaturabsenkungen von bis zu 17 K erreicht.

Die Herausforderung im Projekt OptAwEW ist, die AWP mit den verringerten Vorlauf temperaturen der Wärmenetze 4.0 und damit einem deutlich reduzierten Exergieniveau anzutreiben. Dazu wurden verschiedene Betriebspunkte definiert (siehe Tabelle 1). Diese Betriebspunkte decken unterschiedliche übliche Vorlauf temperaturen der Wärmenetze 4.0 (95 °C, 85 °C, 75 °C) ab. Darüber hinaus werden zwei verschiedene Heizsysteme betrachtet: Eine Radiatorheizung mit der Temperaturpaarung Vorlauf/Rücklauf von 55 °C/45 °C sowie eine Fußbodenheizung mit 35 °C/28 °C. Parallel

dazu ist in allen Betriebspunkten eine Trinkwassererwärmung mittels der Hausstation möglich.

Durch eine theoretische Betrachtung konnte in einer Vorstudie die Kombination aus einem Wärmenetz 4.0 mit einer Vorlauf temperatur von 75 °C und einer Radiatorheizung ausgeschlossen werden. In diesem Betriebspunkt liegt zudem beim Einsatz einer derzeit üblichen Hausstation, bestehend aus einem Hauptwärmeübertrager, nur ein geringer Exergieverlust vor, weshalb das neuartige Konzept mit AWP zur Rücklauf temperaturabsenkung nicht sinnvoll einsetzbar ist. Für Betriebspunkt 2.5 werden deshalb keine Messungen durchgeführt.

Beschreibung des Konzepts und Ergebnisse

Das vereinfachte Anlagenschema der Hausstation mit integrierter AWP ist in Bild 1 links dargestellt. Eingezeichnet sind nur die Komponenten, die entweder direkt vom Fluid des Wärmenetzes oder auf der Seite des Verbrauchers vom Heizungswasser durchströmt werden. Ergänzt wird die AWP durch einen Hauptwärmeübertrager (HWÜ), der wie in einer derzeit üblichen Hausstation einen Wärmestrom $\dot{Q}_{HWÜ}$ vom Wärmenetz direkt auf das Heizungswasser überträgt.

Im Folgenden wird das Funktionsprinzip der Hausstation mit AWP zur Rücklauf temperaturabsenkung anhand des Zahlenbeispiels in Bild 1 erläutert, das an den Betriebspunkt 2.1 angelehnt ist. Das hohe Temperaturniveau des Vorlaufs im Wärmenetz von $\vartheta_{WN,VL} = 95^\circ\text{C}$ wird für den thermischen Antrieb der AWP verwendet.

Tabelle 1: Betrachtete Betriebspunkte im Projekt OptAwEW

Betriebspunkt	Austreiber-Eintritt $\vartheta_{WN,Austr,ein}$ = $\vartheta_{WN,VL}$	Verdampfer-Eintritt $\vartheta_{WN,Verd,ein}$	Heizung-VL $\vartheta_{Hz,VL}$	Heizung-RL $\vartheta_{Hz,RL}$
2.1	95 °C	47 °C	55 °C	45 °C
2.2	95 °C	30 °C	35 °C	28 °C
2.3	85 °C	47 °C	55 °C	45 °C
2.4	85 °C	30 °C	35 °C	28 °C
2.5	75 °C	47 °C	55 °C	45 °C
2.6	75 °C	30 °C	35 °C	28 °C

Hierfür wird zunächst der Austreiber durchströmt, anschließend strömt das primärseitige Fluid durch den HWÜ bevor es in den Verdampfer eintritt. Die primärseitige Austrittstemperatur des HWÜ entspricht an diesem Punkt der Rücklauftemperatur von derzeit üblichen Hausstationen. Im Zahlenbeispiel beträgt diese Temperatur $\vartheta_{WN,HWÜ,aus} = \vartheta_{WN,Verd,ein} = 47^\circ\text{C}$. Im Verdampfer wird dem Fluid des Wärmenetzes ein weiterer Wärmestrom \dot{Q}_{Verd} entzogen. Auf diese Weise wird Wärme nutzbar, welche bei einer derzeit üblichen Hausstation in den Fernwärmerücklauf zurückgeführt wird. Im Zahlenbeispiel beträgt die Temperatur des Fernwärmerücklaufs $\vartheta_{WN,RL} = \vartheta_{WN,Verd,aus} = 33^\circ\text{C}$. Es wird somit eine Rücklauftemperaturabsenkung von $\Delta\vartheta_{Verd} = 14\text{ K}$ erzielt. Die Erwärmung des Heizungswassers erfolgt durch Wärmeabgabe der AWP am Absorber \dot{Q}_{Abs} und am Kondensator \dot{Q}_{Kond} . Die Temperatur des Heizungswassers am Austritt aus der AWP beträgt $\vartheta_{Hz,AWP,aus} = \vartheta_{Hz,Kond,aus} = 55^\circ\text{C}$. Parallel zur AWP wird ein kleinerer Teil des Heizungswasser direkt im HWÜ erwärmt. Im Zahlenbei-

spiel beträgt die Temperatur des Heizungswassers nach dem HWÜ $\vartheta_{Hz,HWÜ,aus} = 70^\circ\text{C}$. Durch Mischen der beiden Teilströme erreicht der Heizungsvorlauf die benötigte Temperatur von $\vartheta_{Hz,VL} = 60^\circ\text{C}$. Die für die thermische Desinfektion nötigen Temperaturen für die Trinkwassererwärmung können für alle Wärmenetztemperaturen erreicht werden, indem kurzzeitig allein der HWÜ durchströmt wird. In Bild 1 rechts ist am Beispiel des Betriebspunktes 2.3 die Aufteilung der übertragenen Wärmeströme auf die einzelnen Komponenten der Hausstation dargestellt. Auf der Abszisse ist der fernwärmeseitige Wärmekapazitätsstrom \dot{W}_{WN} nach links und der heizungsseitige Wärmekapazitätsstrom \dot{W}_{Hz} nach rechts aufgetragen. Auf der Ordinate sind die Temperaturen der übertragenen Wärmeströme aufgetragen. Aus der Multiplikation von Temperaturdifferenz und Wärmekapazitätsstrom lässt sich der übertragene Wärmestrom berechnen, so dass die Flächen dem übertragenen Wärmestrom entsprechen. Aus der Energiebilanz der Hausstation resultiert, dass die wärmenetzsei-

tigen Wärmeströme am Austreiber \dot{Q}_{Austr} und am Verdampfer \dot{Q}_{Verd} den heizungsseitigen Wärmeströmen am Kondensator \dot{Q}_{Kond} , am Absorber \dot{Q}_{Abs} und den Wärmeverlusten der AWP entsprechen. Auch am HWÜ müssen die beiden Wärmeströme $\dot{Q}_{HWÜ}$ und damit die Flächen im Diagramm gleich groß sein. Für den Betriebspunkt 2.3 beträgt der insgesamt von der Hausstation übertragene Wärmestrom $\dot{Q}_{HS} = ca. 42\text{ kW}$. Neben dem thermischen Antrieb der AWP im Austreiber wird für den Betrieb eine Pumpe mit geringer Leistungsaufnahme benötigt. Bezogen auf die elektrische Leistungsaufnahme dieser Pumpe P_{el} ist die dem Fernwärmenetz zusätzlich entnommene Wärmeleistung um den Faktor 15 bis 55 höher. Die Ergebnisse des Betriebskennfeldes des Projekts OptAwEW sind in Bild 2 dargestellt. Auf der Abszisse ist jeweils der wärmenetzseitige Wärmekapazitätsstrom \dot{W}_{WN} aufgetragen. Im linken Diagramm ist die Gesamtheizleistung der Hausstation \dot{Q}_{HS} für die verschiedenen Betriebspunkte dargestellt.

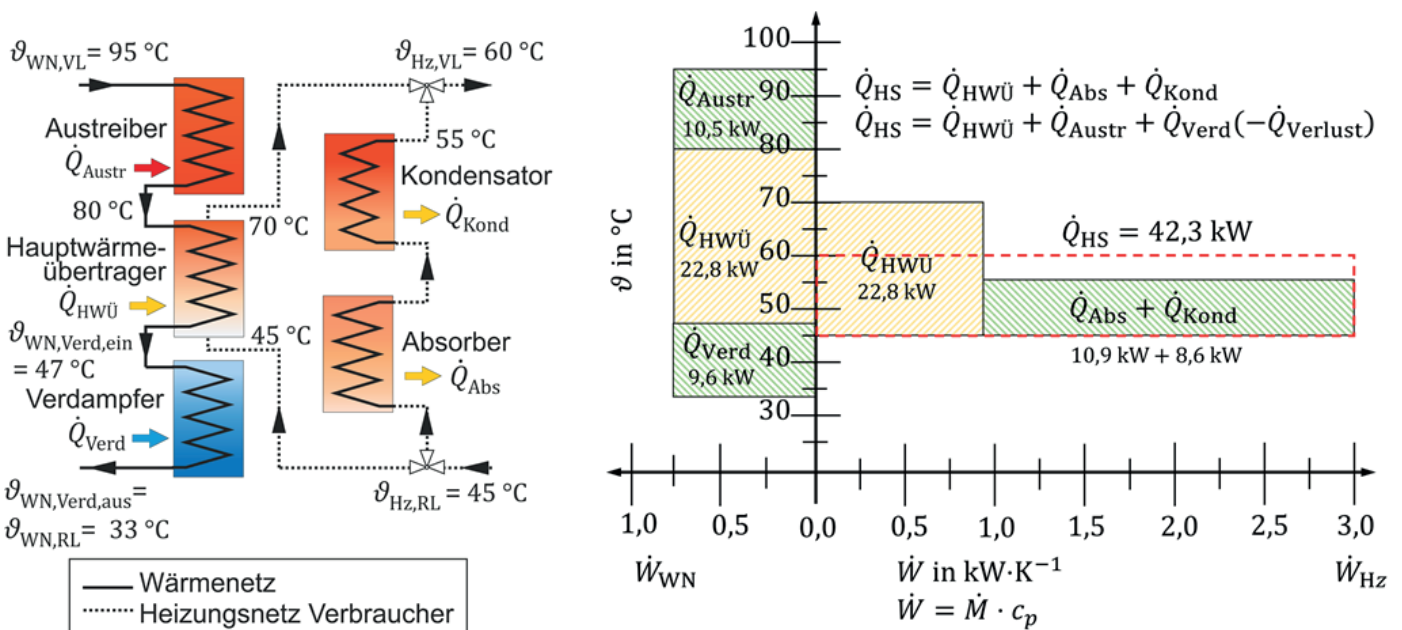


Bild 1: Vereinfachtes Anlagenschema der Hausstation mit integrierter Absorptionswärmepumpe (links) und Darstellung der übertragenen Wärmeströme in Betriebspunkt 2.3

Wie bei derzeit üblichen Hausstationen auch, ist die Gesamtheizleistung sehr gut über den fernwärmeseitigen Massenstrom, bzw. Wärmekapazitätsstrom, einstellbar. Der Anteil des von der AWP abgegebenen Wärmestroms am gesamten von der Hausstation übertragenen Wärmestrom variiert im Bereich von $\dot{Q}_{AWP} / \dot{Q}_{HS} = 0,3 \dots 0,5$. Diese Größe wurde infolge mehrerer durchgeführter Optimierungsmaßnahmen in Bezug auf die Wärme- und Stoffübertragung in Austreiber und Absorber gegenüber dem Vorgängerprojekt PARTA gesteigert. Dies zeigt, dass das Potenzial der AWP noch besser genutzt wird.

Im rechten Diagramm kann die erreichte Rücklauf Temperaturabsenkung $\Delta \vartheta_{Verd}$ abgelesen werden. Diese beträgt in den Messungen zwischen 7 K und 17 K, wobei bei geringerem fernwärmeseitigem Wärmekapazitätsstrom die erzielte Rücklauf Temperaturabsenkung größer wird. Das bedeutet, dass das Konzept für die Rücklauf Temperaturabsenkung mit einer AWP insbe-

sondere im Teillastbetrieb sehr gut funktioniert. Trotz der gegenüber dem Vorgängerprojekt abgesenkten Vorlauf Temperaturen des Wärmenetzes, d.h. geringeren Temperaturen für den Antrieb der AWP, werden vergleichbare Rücklauf Temperaturabsenkungen erzielt.

Danksagung

Diese Arbeit basiert ebenso wie das Vorgängerprojekt (IGF-Vorhaben-Nr. 19696 N) auf einem Projekt (IGF-Vorhaben-Nr. 21315 N) der industriellen Gemeinschaftsforschung und wird durch die Forschungsvereinigung Fernwärme begleitet. Die Förderung erfolgt durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) auf der Grundlage einer Entscheidung des Deutschen Bundestages. Des Weiteren wird das Projekt in einer Kooperation mit dem Fernwärme Forschungsinstitut (FFI) bearbeitet. Die Autoren möchten sich hiermit für die Unterstützung bedanken.

Literatur

- [1] Wirths, A.: Zur Bewertung der Energieeffizienz von Fernwärmesystemen unter Berücksichtigung des Fernwärmetemperaturniveaus. Dissertation. Dresden. 2014
- [2] Yang, F., Mirl, N., Schmid, F.: Potenziale von Absorptionswärmepumpen in zentralisierten Wärmeversorgungsnetzen. Schlussbericht zu IGF-Vorhaben Nr. 19696 N, 2020.
- [3] Knierim, R.: Rücklauf Temperatur: Ein ungehobener Schatz für Versorger und Kunden. Weitere Erlöse aus ungenutzter Wärmeenergie. Euro Heat&Power, 2007, 36(3), 56-65.
- [4] Sandrock, M., Maaß, C., Weisleder, S., Westholm, H., Schulz, W., Löschan, G., Baisch, C., Kreuter, H., Reyer, D. Mangold, D., Riegger, M., Köhler, C.: Kommunal Klimaschutz durch Verbesserung der Effizienz in der Fernwärmeversorgung mittels Nutzung von Niedertemperaturwärmequellen am Beispiel tiefergeothermischer Ressourcen, Oktober 2020. Climate Change.

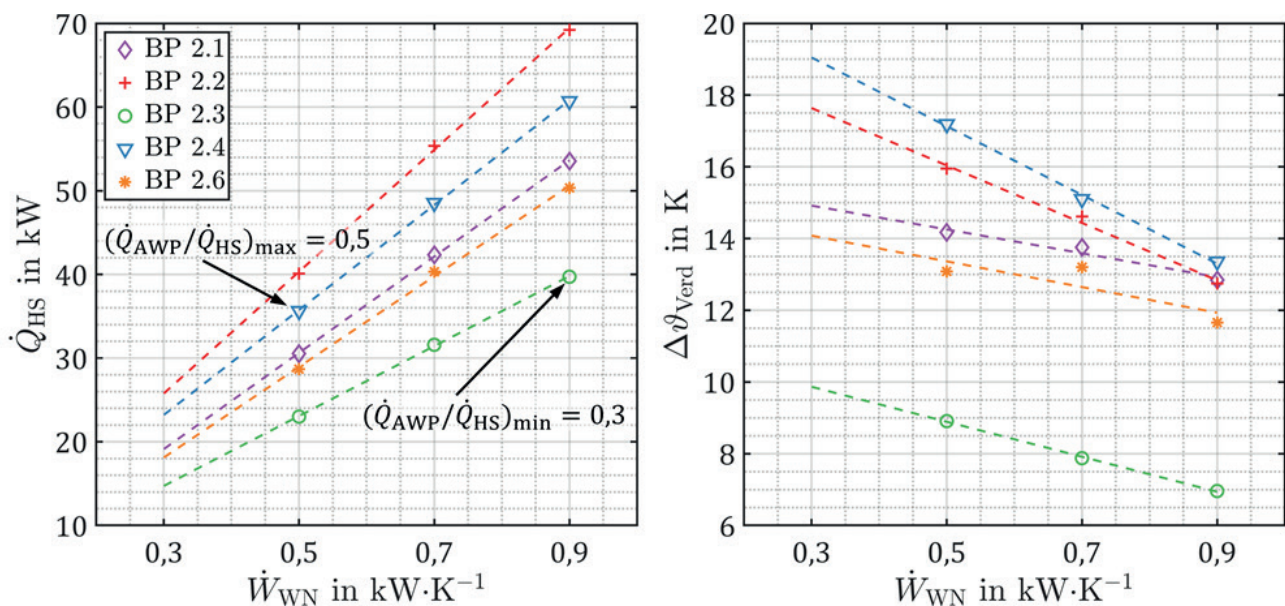


Bild 2: Gesamtwärmestrom der Hausstation mit Absorptionswärmepumpe (links) und erreichte wärmenetzseitige Rücklauf Temperaturabsenkung (rechts) aufgetragen über dem wärmenetzseitigen Wärmekapazitätsstrom

Technologiemarketing von PVT-Gebäudeenergieversorgungssystemen im Projekt „IntegraTE“

Claudia Scholl-Haaf, Harald Drück,
Stephan Fischer

Einleitung

Photovoltaisch-thermische Kollektoren, auch PVT-Kollektoren genannt, erzeugen Strom und Wärme aus Sonnenenergie. Kombiniert mit einer Wärmepumpe kann ein hocheffizientes Heizsystem entstehen, das insbesondere auch aktuellen Klimaschutzvorgaben gerecht wird. Das Projekt IntegraTE zeigt, wie mit dieser Technologie eine nachhaltige Versorgung von Gebäuden mit Wärme, Kälte und Strom gelingen kann. Wärmepumpen sind heute im Neubau vielfach die Heiztechnologie der Wahl. 2021 wurden in Deutschland insgesamt 154.000 Heizungs-wärmepumpen verkauft, was einem Plus von 28 % im Vergleich zum Vorjahr entspricht [1]. Wärmepumpen können dabei Umweltenergie aus verschiedenen Quellen nutzen. Beim Einsatz einer Luft/Wasser-Wärmepumpe können u.a. Geräuschemissionen problematisch sein. Bezüglich Erdwärmepumpen sind nicht immer die erforderlichen Flächen für Erdkollektoren oder die geologischen Bedingungen für Tiefenbohrungen vorhanden. PVT-Kollektoren können die Wärmepumpe nicht nur mit CO₂-freiem Strom beliefern, sondern dienen ihr auch als Wärmequelle, indem sie einen Großteil des Jahres Solar- und Umweltwärme zur Verfügung stellen.

Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderte Projekt „Initiative zur Marktabletierung und Verbreitung von Anlagen zur thermisch-elektrischen Energieversorgung mittels PVT-Kol-

lektoren und Wärmepumpen im Gebäudesektor (IntegraTE)“ (FKZ: 03EGB0023) will den Bekanntheitsgrad dieser energieeffizienten Technologie steigern. Mit dem Fraunhofer ISE in Freiburg, dem Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart und dem Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH) engagieren sich seit Dezember 2019 drei wissenschaftliche Partner gemeinsam in diesem Projekt. Darüber hinaus unterstützen der Bundesverband Wärmepumpe (BWP), der Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie (BDH) und der Bundesverband Solarwirtschaft (BSW) sowie 15 Industriepartner und die Bielefelder Kommunikationsagentur Solrico das Projekt.

Ziel und Vorgehensweise

Das Ziel des Projektes ist es, eine erhöhte Marktdurchdringung mit technisch sowie wirtschaftlich attraktiven Anlagen zur thermischen und elektrischen Energieversorgung mittels PVT und Wärmepumpen im Gebäudesektor zu erreichen. Als Basis hierfür werden die am Markt verfügbaren Systemkonzepte klassifiziert, datentechnisch erhoben und ausgewählte Demonstrationsanlagen messtechnisch untersucht. Parallel dazu werden für die energetische, ökonomische und ökologische Bewertung der Anlagen entsprechende Bewertungskennzahlen definiert. Diese Kennzahlen werden basierend auf den Ergebnissen der Demonstrationsanlagen sowie mittels begleitender Simulationen ausgewählter Demonstrationsgebäude bestimmt. Die Ergebnisse dieser Schritte bilden

die Grundlage für umfangreiche zielgruppenspezifische Marketingmaßnahmen, die zur Erreichung des Ziels der Verbreitung von PVT-Gebäudeenergieversorgungssystemen im Markt durchgeführt werden. Ein wichtiger Bestandteil der Marketingmaßnahmen stellt die Erstellung praxistauglicher Planungs- und Auslegungswerkzeuge dar, die eine vereinfachte Dimensionierung und Bewertung dieser komplexen Anlagen ermöglichen und damit die Marktdurchdringung beschleunigen sollen.

Beispiel Marketingmaßnahmen

Durch Marketingmaßnahmen soll der Bekanntheitsgrad von PVT-Gebäudeenergieversorgungssystemen am Markt gesteigert werden. Hierfür werden zunächst die relevanten Zielgruppen definiert und Marketingelemente und -materialien erstellt. Die erarbeiteten Inhalte dienen dann als Grundlage für die Marketingmaßnahmen. Im Projekt IntegraTE werden Zielgruppen aus der gesamten Wertschöpfungskette wie Hersteller von Systemen und Systemkomponenten, Planer, Architekten und Installateure sowie Endkunden adressiert (siehe Bild 1). Um diese Zielgruppen marketingtechnisch zu erreichen und damit positiv zu beeinflussen, ist zunächst die Erstellung von Marketingelementen wie Infografiken, Testimonialaussagen, Texten zur Technologiebeschreibung, Darstellung der Bewertungskennzahlen, Übersichten bzgl. Fördermaßnahmen und einer Liste mit Ansprechpersonen der am Projekt beteiligten Hersteller notwendig.

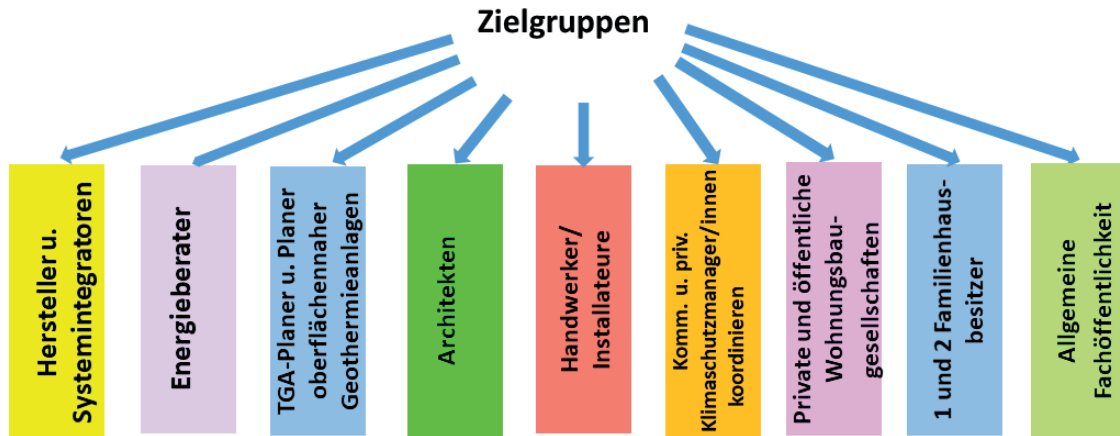


Bild 1: Zielgruppen für die Adressierung der Marketingmaßnahmen

Diese dienen als Basis für die Marketingmaßnahmen. Als ein Marketingelement werden bspw. Bewertungskennzahlen wie die System-Jahresarbeitszahl als Effizienz-kennzahl herangezogen. Als ökologische Kennzahl dient die CO₂-Einsparung. Sie wird im Vergleich zu alternativen Energieversorgungs-konzepten dargestellt und in Form einer Infografik visualisiert (siehe Bild 2).

Diese Infografik wird als Element für die Erstellung zielgruppenspezifischer Informationsmaterialien wie z.B. Infoflyer, Website [2], Videos und Präsentationen eingesetzt, welche dann ihrerseits für Marketingmaßnahmen wie Webinare, Messeauftritte, Vorträge auf Symposien und Konferenzen, Artikel in Fachzeitschriften und Social Media Campaigns verwendet werden. Ein weiteres Beispiel für Marketingmaßnahmen ist die Erstellung von so genannten Case Studies, welche die Vorstellung der einzelnen Demonstrationsprojekte beinhalten. Zu den zehn messtechnisch untersuchten Demonstrationsgebäuden im Forschungsprojekt gehören Einfamilienhäuser und Mehrfamilienhäuser, wobei von beiden Katego-

rien sowohl Anlagen in Neubauten als auch in Bestandsgebäuden untersucht werden. Ein Beispiel ist ein Bestands-Mehrfamilienhaus in Heitersheim bei Freiburg mit sechs Wohnungen und einer Wohnfläche von 560 m², welches seit Dezember 2020 über eine

PVT-Wärmepumpen-Anlage zur Strom- und Wärmeversorgung verfügt (siehe Bild 3). Insgesamt 28 PVT-Kollektoren des Typs „Solink“ der Firma Consolar werden hier zusammen mit einer Wärmepumpe von Waterkotte eingesetzt.

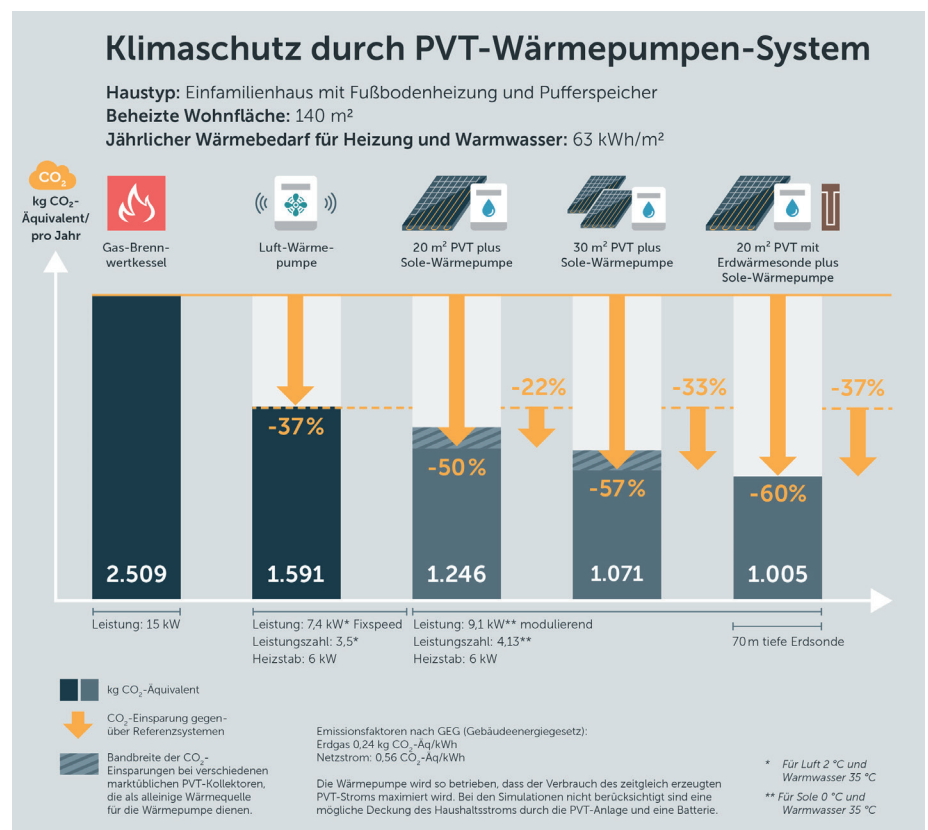


Bild 2: CO₂-Einsparung „System PVT und Sole-Wasser-WP“ im Vergleich zu Referenzsystemen mit Gasheizung



Bild 3: Saniertes Mehrfamilienhaus in Heitersheim bei Freiburg
 Quelle: Consolar

Eine zentrale Frischwasserstation übernimmt in Kombination mit einem 1.000-Liter-Speicher die Trinkwarmwasserversorgung des Gebäudes. Für den Heizungskreislauf wurde ein 800 Liter großer Pufferspeicher installiert. Die Beheizung der Wohnungen erfolgt über Fußbodenheizungen, die zusätzlich im Sommer auch als Fußbodenkühlungen dienen können. Die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe lag für das Jahr 2021 bei 4,3. Bei den im Projekt entwickelten Marketingmaßnahmen wird zusätzlich zur Beschreibung der Anlage auch das Zitat eines Testimonials verwendet, so wie bei diesem Beispiel der Bauherr Raphael Rieserer mit der Aussage „PVT-Kollektoren bieten eine gute und günstige Versorgung für die Wärmepumpe“.

Ausblick

Neben der Weiterführung der messtechnischen Untersuchungen und der Erweiterung des Analyseumfangs der Demonstrationsanlagen

sollen diese innerhalb der geplanten Aufstockung des Projekts durch eine Optimierung von Regelungsstrategien auch in ihrer Effizienz gesteigert werden. Darüber hinaus sollen die Bewertungskennzahlen für die Wirtschaftlichkeit weiter ausgearbeitet werden, indem eine Kostenerhebung von PVT-Gebäudeenergieversorgungssystemen und konkurrierenden Wärmeversorgungssystemen durchgeführt wird, um wirtschaftliche Bewertungskennzahlen zu berechnen (z.B. Kosten pro eingesparte CO₂-Emissionen) und daraus Infographiken zu erstellen. Neben der Erstellung eines webbasierten Decision-Support-Tools für die relevanten Zielgruppen (siehe Bild 1) soll eine Bewertungsmethodik für PVT-Wärmepumpensysteme für die Aufnahme als Wärmequelle in die DIN V 18599-5 erarbeitet werden. Schließlich ist geplant, das Marketing an die sich geänderten politischen Rahmenbedingungen anzupassen und hinsichtlich der

Zielgruppen „Handwerker und Installateure“ sowie „Architekten“ zu intensivieren.

Danksagung

Das Projekt IntegraTE wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages durch den Projektträger Jülich (PTJ) unter dem Förderkennzeichen 03EGB0023B gefördert. Die Autoren danken für die Unterstützung und übernehmen die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung.

Literatur

- [1] Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V.: <https://www.waermepumpe.de/presse/zahlen-daten/absatzzahlen> (Zugriff am 16. November 2022).
- [2] Website Projekt integraTE: <https://wp-monitoring.ise.fraunhofer.de/integrate/german/index/index.html>

Innovatives Wärmeversorgungskonzept mittels Tiefengeothermie, Solarthermie und saisonaler Wärmespeicherung

Sven Stark, Stefanie Lott,
Harald Drück

Einleitung

Das Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart hat im Auftrag der im Landkreis München gelegenen Gemeinde Gräfelfing eine Machbarkeitsstudie für ein innovatives Wärmenetzsystem erstellt. Hierbei standen insbesondere die Nutzung einer ehemaligen Kiesgrube als Langzeit-Wärmespeicher sowie von Tiefengeothermie als primäre Wärmequelle im Fokus der Untersuchung. Gräfelfing ist eine Gemeinde mit etwa 14.000 Einwohnern, die bis zum Jahr 2035 eine 100 % erneuerbare Energieversorgung mit einer Netto-Treibhausgasneutralität anstrebt. Wie der Großteil des Landkreises München ist auch der Standort Gräfelfing gut für die Nutzung von Tiefengeothermie geeignet. Das Ziel der Gemeinde ist es, das vorhandene geothermische Potenzial zur Wärmeversorgung zu nutzen und hierfür ein Wärmenetz aufzubauen, um so die derzeitige, hauptsächlich auf Erdgas basierende Wärmeversorgung zu dekarbonisieren. Gegebenenfalls kann das aufzubauende Wärmenetz auch für die Wärmeversorgung der etwa 11.000 Einwohner zählenden Nachbargemeinde Planegg bzw. für Teile von Planegg verwendet werden. Die beiden Gemeinden Gräfelfing und Planegg sind derzeit zum Großteil an das von den Stadtwerken München (SWM) betriebene

Erdgasnetz angeschlossen. Ein Ortsteil von Planegg, welcher in dieser Machbarkeitsstudie betrachtet wurde, wird hauptsächlich über ein ebenfalls von den Stadtwerken München betriebenes Fernwärmenetz mit Wärme versorgt.

Methodik

Zunächst wurden die von den beiden Gemeinden Gräfelfing und Planegg zur Verfügung gestellten Informationen bzgl. der Wärmebedarfe für die relevanten Gebiete sowie weitere vorliegende Randbedingungen analysiert und daraus zwei Leitszenarien für verschiedene Ausbaustufen eines Wärmenetzes definiert. Für diese Leitszenarien wurden die damit verbundenen Wärmebedarfe in der Jahressumme sowie als zeitlich hochaufgelöste Lastprofile berechnet. Des Weiteren wurden die auf den Gemeindegebieten verfügbaren Potenziale der wichtigsten erneuerbaren Wärmequellen, wie z.B. Tiefengeothermie und Solarthermie, sowie für die Realisierung eines saisonalen Wärmespeichers untersucht. Basierend auf den Wärmebedarfen und den vorhandenen Potenzialen wurden verschiedene Wärmeversorgungsvarianten für die beiden Leitszenarien erarbeitet.

Im Anschluss daran wurden dynamische Systemsimulationen mit der Software TRNSYS [1] für alle erarbeiteten Wärmeversorgungsvarianten durchgeführt, um diese detaillierter, beispielsweise in Bezug auf die Ermittlung der energetischen Beiträge der einzelnen Technologien und die

Dimensionierung der Hauptkomponenten zu untersuchen. Hierbei wurden auch Simulationen und Berechnungen zum strommarktdienlichen Betrieb einer Wärmepumpe und eines Elektrokessels durchgeführt. Des Weiteren wurden die Wärmeversorgungsvarianten bezüglich ihrer Wirtschaftlichkeit anhand der zu erwartenden Wärmegestehungskosten bzw. Wärmepreise sowie bezüglich ihrer Umweltwirkungen in Bezug auf Primärenergieaufwand und CO₂-Emissionen miteinander verglichen. Basierend auf den Ergebnissen des energetischen, wirtschaftlichen und ökologischen Vergleichs, wurde eine der Wärmeversorgungsvarianten favorisiert. Für die favorisierte Wärmeversorgungsvariante wurden schließlich grundlegende Aspekte der Genehmigungsfähigkeit geprüft.

Ergebnisse

Die jährlichen Wärmebedarfe in den beiden betrachteten Leitszenarien wurden zu 32.000 MWh/a bzw. 83.000 MWh/a, ohne Berücksichtigung der Wärmeverluste des Wärmenetzes, bestimmt. Das vorhandene tiefengeothermische Potenzial beträgt selbst bei konservativer Abschätzung der vorliegenden Randbedingungen ca. 84.000 MWh/a. Der Fokus der Untersuchungen wurde – aufgrund der dort wesentlich besseren Ausnutzung der verfügbaren Wärme aus der Tiefengeothermie – auf das zweite Leitszenario mit dem höheren jährlichen Wärmebedarf gelegt. Als Ergebnis der TRNSYS-Simulationen sowie der

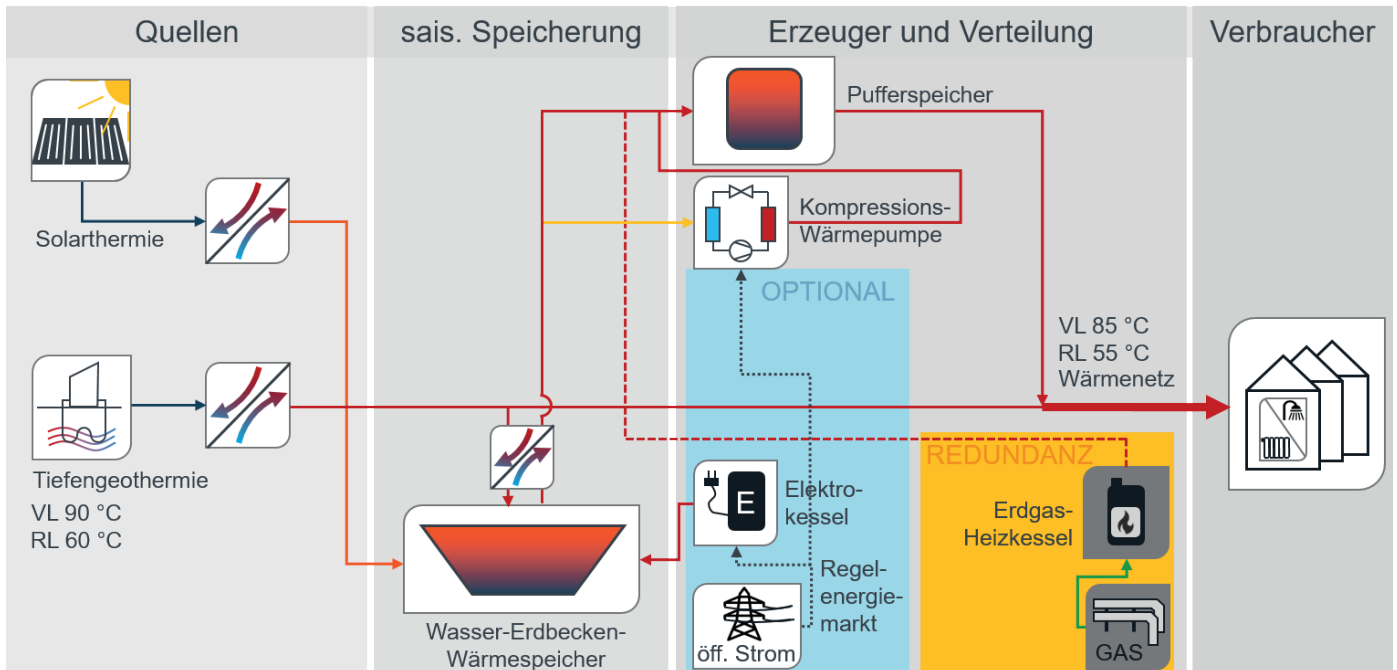


Bild 1: Schematische Darstellung der favorisierten Wärmeversorgungs-Variante

wirtschaftlichen und ökologischen Betrachtungen wurde schließlich das in Bild 1 dargestellte Wärmeversorgungskonzept als favorisierte Wärmeversorgungs-Variante ausgewählt.

Die tiefengeothermische Anlage ist bei dieser Wärmeversorgungs-Variante der Grundlast-Wärmeerzeuger, von welchem Wärme direkt an das Wärmenetz abgegeben wird. Bei vorhandenen Wärmeüberschüssen aus der Tiefengeothermie wird ein in der ehemaligen Kiesgrube realisierter saisonaler Wasser-Erdbecken-Wärmespeicher mit einem Wasservolumen von ca. 300.000 m³ beladen. Da das tiefengeothermische Potenzial insbesondere im Winter nicht ausreicht, um den Wärmebedarf inkl. der Wärmeverluste des Wärmenetzes sowie des saisonalen Wärmespeichers und des Pufferspeichers zu decken, wird als Zusatz-Wärmeerzeuger eine Kompressions-Wärmepumpe mit einer thermischen Nennleistung von 20 MW im Betriebspunkt W45/W90 eingesetzt.

Mit diesem Betriebspunkt wird die Wassertemperatur am Verdampfer-eintritt von 45 °C und die Wassertemperatur am Kondensatoraustritt von 90 °C beschrieben. Die Kompressions-Wärmepumpe entnimmt Wärme aus dem Wasser-Erdbecken-Wärmespeicher, hebt die Wärme auf das Nutztemperaturniveau an und belädt einen Pufferspeicher mit einem Volumen von 2.000 m³. Der Wasser-Erdbecken-Wärmespeicher wird neben der Tiefengeothermie auch durch eine solarthermische Anlage mit einer Bruttokollektorfläche von insgesamt 56.700 m² bzw. 39,7 MW_{th} beladen. Durch diese erhöht sich im Vergleich zu einer Variante ohne Solarthermie die aus dem Wasser-Erdbecken-Wärmespeicher direkt für das Wärmenetz entnehmbare Wärmemenge, wodurch der Strombedarf der Kompressions-Wärmepumpe reduziert wird. Als Redundanz-Wärmeerzeuger wird ein Erdgas-Heizkessel mit einer thermischen Nennleistung von 30 MW eingesetzt. Dieser Redundanz-Wär-

meerzeuger wird ausschließlich bei einem Ausfall der Tiefengeothermie und/oder der Kompressions-Wärmepumpe benötigt und ist daher im Regelfall nie in Betrieb. Des Weiteren wurde der strommarktdienliche Betrieb der Kompressions-Wärmepumpe sowie eines Elektrokessels untersucht. Hierbei hat sich jedoch gezeigt, dass aufgrund der zu hohen wirtschaftlichen Risiken ein strommarktdienlicher Betrieb der Kompressions-Wärmepumpe und des Elektrokessels nicht empfohlen werden kann.

Mit der favorisierten Wärmeversorgungs-Variante werden gegenüber dem Ist-Zustand der Wärmeversorgung jährlich ca. 8.000 t an CO₂-Äquivalentemissionen eingespart (siehe Bild 2), wenn für die Berechnungen die derzeitigen spezifischen CO₂-Äquivalentemissionen angesetzt werden. Auch der Primärenergieaufwand wird gegenüber dem Ist-Zustand der Wärmeversorgung um ca. 50.000 MWh/a deutlich reduziert.

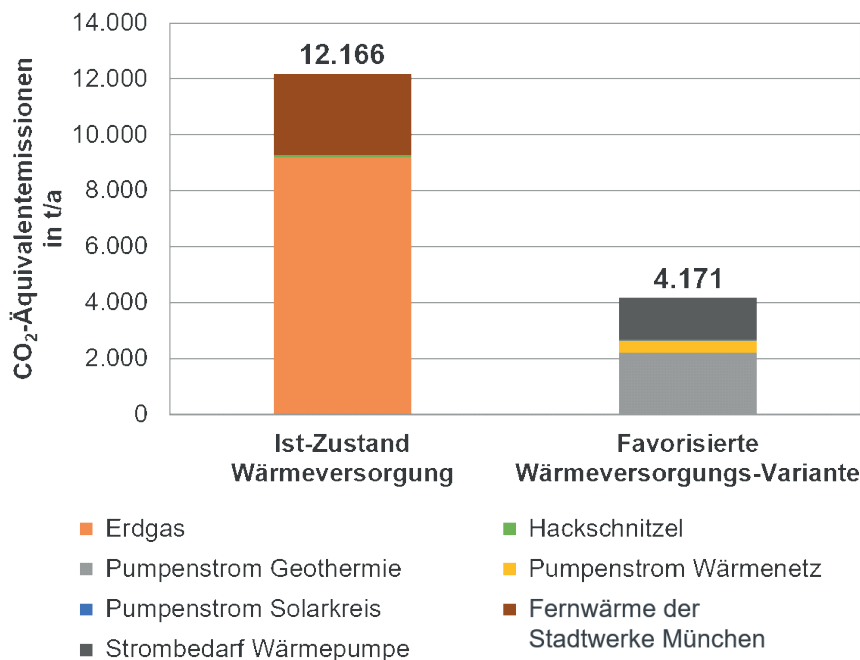


Bild 2: Jährliche CO₂-Äquivalentemissionen für den Ist-Zustand der Wärmeversorgung und die favorisierte Wärmeversorgungs-Variante

Die hier favorisierte Wärmeversorgungs-Variante weist insbesondere perspektivisch, d.h. bei weiter sinkenden spezifischen CO₂-Äquivalentemissionen des Stroms im deutschen Stromnetz, sehr hohe Einsparungen an CO₂-Äquivalentemissionen gegenüber dem Ist-Zustand der Wärmeversorgung auf.

Fazit

Bei dem hier vorgestellten Wärmeversorgungskonzept decken Tiefengeothermie und Solarthermie mehr als 95 % des gesamten Wärmebedarfs für das betrachtete Leitszenario. Dabei stellt die favorisierte Wärmeversorgungs-Variante insbesondere durch den kombinierten Einsatz von Tiefengeothermie, Solarthermie und einer Großwärmepumpe in Verbindung mit einem, durch Konversion aus einer ehemaligen Kiesgrube zu errichtenden, saisonalen Wärme-

speicher ein hochinnovatives Gesamtkonzept für eine erneuerbare Wärmeversorgung dar. Bei einer Umsetzung der vorgeschlagenen Wärmeversorgungs-Variante werden nicht nur die CO₂-Äquivalentemissionen und der Primärenergieaufwand gegenüber dem Ist-Zustand der Wärmeversorgung deutlich reduziert, sondern insbesondere unter Berücksichtigung einer finanziellen Förderung auch sehr attraktive Wärmepreise erreicht.

Literatur

[1] TRNSYS (Transient System Simulation) Software, <http://www.trnsys.com>.

Energiewandler mit geringem Strombedarf zur Versorgung von Hochtemperaturverbrauchern aus Niedertemperatur-Wärmenetzen

Luisa Haak, Johannes Brunder

Einleitung

Wärmenetze stellen einen wichtigen Bestandteil der heutigen und noch mehr der zukünftigen Wärmeversorgung dar. Um verstärkt Wärmequellen mit niedrigem Temperaturniveau wie z.B. Geothermie oder Industrieabwärme einbinden zu können und um Wärmeverluste zu reduzieren, wird eine Absenkung der Vorlauf-temperatur auf 95 °C oder geringer angestrebt. Dies stellt Betreiber von Wärmenetzen sowie an Wärmenetze angeschlossene Verbraucher, die auf hohe Temperaturen von bis zu 120 °C angewiesen sind, vor erhebliche Herausforderungen. Nach Stand der Technik folgt daraus, dass entweder diese Hochtemperaturverbraucher zukünftig von der Fern- oder Nahwärmeversorgung ausgeschlossen werden, oder dass die Umstellung des Wärmenetzes auf den Wärmenetz 4.0-Standard durch diese Hochtemperaturverbraucher verhindert wird.

Ziel und Vorgehen

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, in einem Wärmenetz 4.0 – trotz der abgesenkten Vorlauf-temperatur – für bestimmte Hochtemperaturverbraucher das hohe Temperaturniveau der heutigen Fernwärmenetze effizient zur Verfügung zu stellen. Der gewählte Lösungsansatz sieht vor, entsprechende dezentrale Über-

gabestationen (Hausstationen) mit einem Energiewandler auszustatten, um die Vorlauf-temperatur für den Hochtemperaturverbraucher bedarfsorientiert zu erhöhen.

Bei den betrachteten Energiewandlern handelt es sich um einen Absorptionswärmetransformator (AWT) und eine Kompressionswärmepumpe mit Lösungskreis (KWPL); beide zeichnen sich durch einen, gegenüber einer Kompressionswärmepumpe, geringen Strombedarf aus. Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden am Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart ein AWT und am Institut für Thermodynamik (IfT) der Universität Hannover eine KWPL simulativ sowie experimentell im Technikumsmaßstab untersucht. Die Versuchsanlagen werden für den Betrieb in einer Fernwärmeübergabestation im Hinblick auf Effizienz, Betriebssicherheit und Kosten optimiert. Darüber hinaus werden durch einen weiteren Forschungspartner, das Fernwärme-Forschungsinstitut (FFI), simulativ die Auswirkungen auf das Fernwärmenetz und die Kosteneinsparpotentiale durch die Absenkung der Vorlauf-temperatur analysiert. Die für die Wärmeversorgung der Hochtemperaturverbraucher mit Hilfe eines AWT oder einer KWPL anfallenden Kosten sollen in Abhängigkeit von Wärme-, Strom-, Gas- und CO₂-Preis ermittelt werden. So

werden die Technologien hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit sowohl miteinander als auch mit weiteren Wärme-erzeugern wie z.B. Kompressionswärmepumpen verglichen.

Arbeitsinhalte des IGTE

- Erstellen eines Simulationsmodells des AWT - Berechnung von Anlagenkennfeldern
- Simulative Auslegung von Wärmeübertragern und Pumpen
- Aufbau eines AWT sowie der benötigten Peripherie und Messtechnik
- Inbetriebnahme des AWT und Entwicklung einer Regelung
- Demonstrationsbetrieb der Hausstation mit integriertem AWT durch Emulation realer Verbraucherezustände und zukünftiger Netzzustände

Danksagung

Das Forschungsprojekt (IGF-Vorhaben-Nr. 22424 N) wird im Rahmen des Programms für Industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF) durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) gefördert und durch die Forschungsvereinigungen Fernwärme und den Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. (VdF HLK) getragen. Die Autoren danken für die Unterstützung.

(Weiter-)Entwicklung von Methoden und Bereitstellung von Daten für die ökologische und ökonomische Lebenszyklusanalyse

Stephan Fischer

Einleitung

Die Bereitstellung von Wärme für Wohngebäude hat einen erheblichen Einfluss auf die Nachhaltigkeit der Energieversorgung und stellt einen immensen Kostenfaktor dar. Zur Optimierung der Wärmeversorgung im Hinblick auf die aktuelle klimapolitische Zielstellung stehen verschiedene Technologien und deren Kombinationen zur Verfügung, die insbesondere auf die Nutzung von erneuerbaren Energiequellen fokussieren. Aber gerade für die Nutzung erneuerbarer Energien, die ab 2024 65 % der Wärmeversorgung von Wohngebäuden decken müssen, sind die Anforderungen der Planer, Entscheider und Anwender sowie der gesamtgesellschaftlich Verantwortlichen hinsichtlich der Nachhaltigkeit der verwendeten Systeme und der Kosten sehr hoch. Diese können derzeit, aufgrund unzureichender Kenntnis und Weiterentwicklung der vorhandenen Methoden zur Lebenszyklus- und Kostenanalyse sowie der dafür fehlenden Modelle und Daten, nicht vergleichbar erfasst werden.

Für die ökologische und wirtschaftliche Bewertung von Systemen und Komponenten für die Wärmebereitstellung im Wohnbau spielen eine Vielzahl von Einflussfaktoren über den Lebenszyklus eine Rolle. Das Projekt „Effizientes Heizen“, das vom Fraunhofer ISE, dem Fraunhofer IBP und dem Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität

Stuttgart initiiert und gemeinsam mit Vertretern der Heizungs-, Immobilien- und Planungsbranche durchgeführt wird, zielt darauf ab, die zu Grunde liegenden komplexen Zusammenhänge zu erfassen, zu bewerten und technologieübergreifend vergleichbar zu machen. Die Verlässlichkeit der Daten im Hinblick auf die verwendeten Grundmaterialien, Fertigungstechniken, Installation, Wartung und Lebensende sollen durch Datenerhebung unter anderem direkt bei der Industrie gestützt werden. Neben dem exemplarischen Vergleich alternativer Materialien, Komponenten und Fertigungsprozesse soll auch der Einfluss eines veränderlichen Lebensenergieertrages berücksichtigt werden. Die Untersuchungen sollen auf Ebene der Gebäudeintegration sowie für ausgewählte Fragen auch im volkswirtschaftlichen Kontext erfolgen. Zur Verbesserung der Datenverfügbarkeit und Entscheidungsunterstützung werden – die im Projekt generierten – Umwelt- und Kosteninformationen potenziellen Anwendern zugänglich gemacht, um ihnen die Auswahl von ökologisch und wirtschaftlich vorteilhaften Varianten zu ermöglichen.

Arbeitsplan

Die Arbeiten im Projekt „Effizientes Heizen“ decken grundsätzlich die gesamte Wertschöpfungskette in der Heizungsindustrie ab und integrieren die relevanten technischen Komponenten der Wärmebereitstellung lebenszyklusbezogen. AP 1 widmet sich dem Projektmanage-

ment und der Projektorganisation durch Arbeitstreffen, Berichtswesen, Steuerung und Überwachung des Arbeitsfortschrittes. Die Einbindung des projektbegleitenden Industriebeirates stellt insbesondere eine wichtige Aufgabe dar. Für die konsistente und belastbare lebenszyklusbezogene Bilanzierung im Hinblick auf Ökologie und Ökonomie werden im AP 2 die Systemgrenzen und der Untersuchungsrahmen (inkl. der zu analysierenden Technologien und deren Systemeinbindung im Gebäude) definiert. Die ökologischen und ökonomischen Bewertungsansätze werden mit möglichst hoher Kongruenz ausgestaltet. Zusätzlich werden die notwendigen technologiespezifischen Parameter für/aus den lebenszyklusbezogenen Simulationsrechnungen und die Kommunikationsformate für die Datenerhebung im Rahmen der Sachbilanz (AP 3, AP 4) sowie für die Ergebnisse der Bilanzierung (AP 5) festgelegt. Diese folgen den gängigen Formaten (wie bspw. dem Format des International Reference Life Cycle Data System, ILCD). Für die technologiespezifischen Parameter werden Simulationen im Hinblick auf den Gebäudebetrieb und das Langzeitverhalten bzw. die Dauerhaftigkeit der identifizierten Heiztechnologien durchgeführt. Diese stellen belastbare Aussagen und Informationen zur Degradation, für den späteren Betrieb und für die Ermittlung von Komponentenlebensdauern dar. Unter Einbindung der Industriepartner sowie des Projektbeirates und

auf Grundlage der Bewertungsansätze im AP 2 werden in AP 3 und AP 4 alle notwendigen lebenszyklusbezogenen Inventardaten (sog. Sachbilanzdaten) erhoben. Beispiele sind die Erfassung und Bewertung von Material- und Energieeinsatz, Abfallströmen und Emissionen in Herstellung, Installation, Betrieb und Entsorgung. Diese bilden zusammen mit den Informationen aus der technischen Simulation die Grundlage für den Aufbau lebenszyklusbezogener Modelle und für die ökologische und ökonomische Bilanzierung in AP 5. Hierbei werden die Technologien sowohl auf Produktebene als auch auf Systemebene, mit Gebäudebezug ökologisch und ökonomisch bewertet. Ebenso wird das Optimierungspotential der Komponenten ausgewählter Heizungstechnologien hinsichtlich der ökologischen und ökonomischen Kennwerte untersucht. Unter Berücksichtigung von definierten Gebäudetypen mit definierten Wärmebedarfen wird

u. a. das system- und klimaspezifische Optimum der möglichen unterschiedlichen Kombinationen der betrachteten Technologien ermittelt. Im Arbeitspaket 6 werden die Ergebnisse der Bilanzierung zusätzlich volkswirtschaftlich bewertet und Ansatzpunkte für die politische Förderung effizienter Maßnahmen identifiziert. Das abschließende AP 7 stellt die Schnittstelle des Projekts zur Öffentlichkeit sowie zur Verbreitung der Projektergebnisse in die betroffenen Industrien und internationalen Gremien dar. Die Ergebnisse des Projektes sollen insbesondere auch im Rahmen einer Arbeitsgruppe des IEA Solar Heating and Cooling Programme in Zusammenarbeit mit anderen Forschungsprogrammen der IEA (Wärmepumpen, Photovoltaische Systeme, Gebäudetechnik) bereitgestellt werden, um einen realistischen Vergleich und eine Optimierung der Wärmeversorgung von Wohngebäuden international zu ermöglichen. Bild 1 gibt einen Über-

blick über Arbeits- und Unterarbeitspakete und deren Verzahnung.

Danksagung

Das Forschungsprojekt „Systematische Untersuchung und Bewertung der wirtschaftlichen und ökologischen Nachhaltigkeit von solarbasierten erneuerbaren Heizungssystemen im Vergleich mit alternativen Systemen“, Akronym „Effizientes Heizen“, wird aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) über den Projektträger Jülich (PTJ) unter dem Förderkennzeichen 03EN6014A und B gefördert, sowie durch die beteiligten Industriepartner finanziell und inhaltlich unterstützt. Die Autoren möchten allen beteiligten Partnern und KollegenInnen für die gute Unterstützung, Zusammenarbeit und das Engagement danken und übernehmen die Verantwortung für den Inhalt dieses Beitrags.

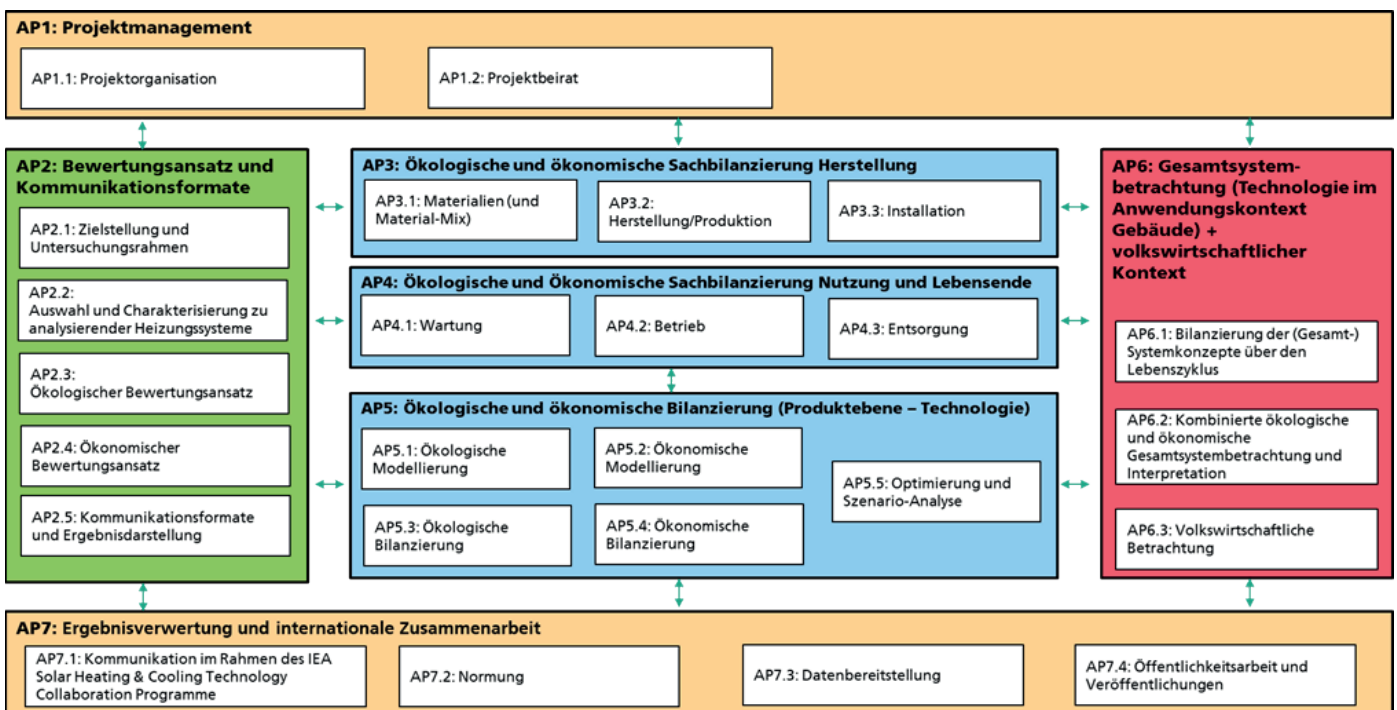


Bild 1: Überblick und Verzahnung der einzelnen Arbeitspakete des Projekts „Effizientes Heizen“

In den Blättern des HLKBRIEFes wird über die Aktivitäten des Instituts für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart, der Forschungsgesellschaft HLK Stuttgart mbH, der HLK Stuttgart GmbH und des Vereins der Förderer der Forschung im Bereich HLK Stuttgart e.V. (Herausgeber) berichtet. VdF HLK Stuttgart e.V., Pfaffenwaldring 6A, 70569 Stuttgart, www.vdf.hlk-stuttgart.de, E-Mail: info@vdf.hlk-stuttgart.de

Entwicklung regelbarer Vakuumdämmelemente zur bedarfsgerechten Anpassung des Wärmedurchgangs

Maurizio Calandri (IGTE),
 Jonina Felbinger (DLR),
 Leon Pauly (DITF)

Einleitung und Hintergrund

Die Verringerung des Energiebedarfs hin zu einem klimaneutralen Gebäudebestand stellt eines der Hauptziele des Energiekonzepts der deutschen Bundesregierung in Bezug auf Gebäude dar [1]. Die Vorgaben des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) [2] hinsichtlich der Sanierung von Bestandsgebäuden zielen hauptsächlich darauf ab, den Heizenergiebedarf von Gebäuden zu reduzieren, der derzeit einen Anteil von ca. 70 % am Gesamtenergiebedarf bei Wohngebäuden [3] und etwa 50 % bei Bürogebäuden [4] aufweist. Jedoch treten im Sommerfall und auch schon in der Übergangszeit aufgrund der Luftdichtheit und des geringen Wärmedurchgangs der hochgedämmten Gebäudehülle erhöhte Raumtemperaturen auf. Diese können zu unbehaglichen Zuständen oder steigendem Kühlenergiebedarf bei Einhaltung der maximalen Raumtemperaturen führen.

Neben der Verringerung des Energiebedarfs stellt die zunehmende elektrische Wärme- und Kältebereitstellung in Gebäuden eine große Herausforderung für einen stabilen und sicheren Netzbetrieb dar. Zur Stabilisierung der Stromnetze besteht daher ein steigender Bedarf an Maßnahmen zur Entkopplung von Stromerzeugung und Stromverbrauch z.B. durch eine Flexibilisierung von Lasten auf der Verbraucherseite (Demand Side Management) [5]. Um Lasten auf Seiten heiz- und raumlufttechnischer Anlagen als größte Verbraucher in Gebäuden ab- oder zuzuschalten und gleichzeitig die geforderten Raumkonditionen zu jedem Zeitpunkt einzuhalten, ist eine Speichermöglichkeit für thermische Energie im Gebäude (Gebäude-masse oder thermischer Energiespeicher) erforderlich. Eine Möglichkeit, den Gesamtenergiebedarf sowohl für Heizen als auch Kühlen zu senken, bieten so genannte adaptive Gebäudehüllen. Diese haben den Vorteil, dass sie den Wärmedurchgang durch die Gebäudehülle variabel an die

thermische Last im Gebäude anpassen können (siehe Bild 1 links). Außerdem können durch regelbare Dämmmaterialien als Alternative zu fluidbasierten verlustbehafteten Speichern massive Bauteile, die aus statischen Gründen erforderlich sind, als thermisch aktivierbare Speichermassen (analog zu einer thermischen Bauteilaktivierung) erschlossen werden (siehe Bild 1 rechts).

Die beschriebenen regelbaren Vakuumdämmelemente werden im Forschungsvorhaben „Entwicklung regelbarer Vakuumdämmelemente zur bedarfsgerechten Anpassung des Wärmedurchgangs von Gebäudehüllen und -strukturen sowie der thermischen Aktivierung von Speichermassen“ (ReVaD) erarbeitet. Das Forschungsvorhaben wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) gefördert (FKZ: 22617 N) und vom Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. (VdF HLK) in Kooperation mit dem Forschungskuratorium Textil e.V. begleitet. Die Bearbeitung erfolgt durch das Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung der Universität Stuttgart (IGTE), die Deutschen Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf (DITF) sowie das Institut für Technische Thermodynamik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR).

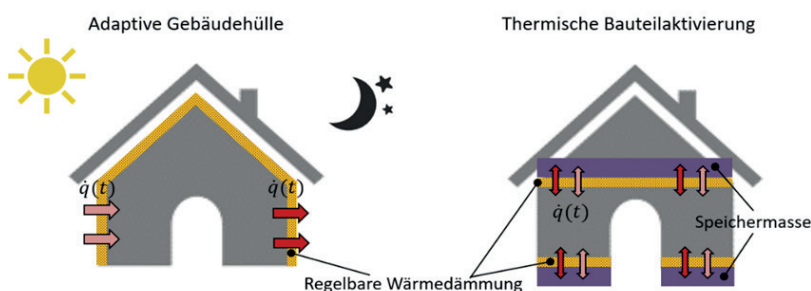


Bild 1: Einsatzdarstellung regelbarer Vakuumdämmelemente als adaptive Gebäudehüllen (links) und zur thermischen Bauteilaktivierung (rechts)

Ziele

Zur Erfüllung der Vorgaben nach dem GEG [2] werden neben den derzeit häufig verwendeten Konzepten des Wärmedämmverbundsystems und der hinterlüfteten Fassade mittlerweile in Spezialfällen auch Vakuumdämmpaneele (VIP) eingesetzt. Diese haben den Vorteil, dass für einen vorgegebenen Wärmedurchgangskoeffizienten die notwendigen Dämmschichtdicken wesentlich geringer als bei anderen Dämmstoffen ausgeführt werden können. Das Prinzip der Vakuumdämmung basiert darauf, dass sich durch Evakuieren eines Panels dessen Wärmeleitfähigkeit auf ein Minimum reduzieren lässt. Mit der Absenkung des Gasdrucks lässt sich die Wärmeleitung des Gases wesentlich reduzieren und damit auch die Gesamtwärmeleitung im Panel deutlich verringern.

Dieser Effekt der gasdruckabhängigen Wärmeleitfähigkeit im Vakuumpaneel steht im Fokus des Vorhabens, da er zu einer gezielten Einstellung des Wärmedurchgangs genutzt werden kann. Es soll ein Vakuumdämmelement entwickelt werden, dessen Wärmedurchgang regelbar ist, indem der Druck im Panel mit einer reversiblen Gas-

Feststoff-Reaktion kontrolliert wird. Die Dämmelemente werden zudem im Kontext des seriellen Bauens als modulare Einzelemente konzipiert, so dass zu einem späteren Zeitpunkt ggf. eine industrielle Fertigung und Qualitätsprüfung ermöglicht wird.

Vorgehen

Schaltbare Dämmelemente (SWD) für Fassaden unter Nutzung thermochemischer Reaktionsmaterialien sind seit Ende der 1990er Jahre etabliert und werden überwiegend für die Nutzung von Sonnenenergie zur Heizungsunterstützung verwendet [7,8,9]. Hierbei kommt ein Metallhydrid-Getter-Material zum Einsatz, das in einem exothermen Absorptionsprozess Wasserstoff einlagert und umgekehrt bei Wärmezufuhr den Wasserstoff in einer endothermen Reaktion wieder freisetzt (siehe Bild 2, links).

Im Forschungsvorhaben wird die Gasdruckabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von porösen Strukturen als grundlegender Ansatz genutzt, um den Wärmedurchgang zu regeln. Der Wärmedurchgang kann an großflächigen porösen Strukturen über eine kleine zusätzliche Komponente (thermochemischer Reaktor) geregelt werden (siehe Bild 2,

rechts). Das Vakuumdämmpaneel wird mit der hier adressierten Technologie um eine zusätzliche Funktion, nämlich der aktiven Regelung des Wärmedurchgangs über den Gasdruck, erweitert.

Im Hinblick auf den Reaktor werden am DLR unterschiedliche Metallhydrid-Materialien charakterisiert, die Materialauswahl an die Anforderungen des Panels angepasst sowie die entsprechenden Metallhydrid-Reaktoren entwickelt und getestet. Eine reversible Reaktion zwischen Wasserstoff und einer Metalllegierung ist ideal, da einerseits das Wasserstoffgas eine hohe Wärmeleitfähigkeit aufweist und andererseits die Speicherung des gasförmigen Wasserstoffs in so genannten Metallhydriden in einem sehr kleinen Volumen erfolgen kann. Die Einstellung des Wasserstoffdrucks erfolgt über die zielgerichtete Temperierung des stofflich gekoppelten Metallhydrid-Reaktors. Zur Reduktion des Energiebedarfs während der endothermen Desorption – und somit dem Anstieg der Wärmeleitfähigkeit – werden die beiden Kernkomponenten Panel und Reaktor durch ein Ventil voneinander getrennt. Zum Absenken der Wärmeleitfähigkeit wird die Verbindung wiederhergestellt und Wasserstoff wird durch das Metallhydrid aufgenommen – analog zu einer Evakuierung mittels Vakuumpumpe, jedoch als geschlossenes System.

Die DITF entwickeln auf Basis textiler Verfahrenstechnik Paneele, die aus einer gasdichten Hülle und einem porösen Stützkern aufgebaut sind.

Im Rahmen des Vorhabens werden am IGTE geeignete Einsatzbereiche und deren Potenziale zur Umsetzung von adaptiven Gebäudehüllen mit regelbarer Vakuumdämmung anhand eines am IGTE entwickelten Simulationsmodells [6] untersucht.

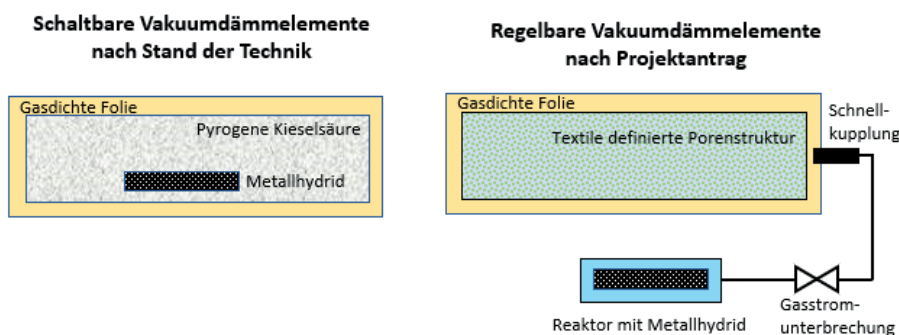


Bild 2: Vergleich zwischen schaltbaren Dämmelementen (Stand der Technik [7]) und regelbaren Vakuumdämmelementen (Größendarstellung ist nicht maßstäblich)

Mit diesem kann das thermisch-energetische Verhalten adaptiver Gebäudehüllen abgebildet und mit Gebäudehüllen nach dem Stand der Technik verglichen werden. Für einen effektiven Einsatz der regelbaren Dämmelemente ist der Zeitpunkt, wann die Dämmschicht minimal oder maximal leitend geschaltet wird, von zentraler Bedeutung. Hierfür notwendig ist eine Regelung, die den Wärmedurchgang in Abhängigkeit vom aktuellen Gebäudezustand und der meteorologischen Randbedingungen anpasst. Eine optimierte Betriebsweise kann durch eine vorausschauende Regelung des Wärmedurchgangs in Abhängigkeit zukünftiger Gebäudelasten und Wettervorhersagen erreicht werden, wofür eine modellprädiktive Regelung zum Einsatz kommen soll. Darüber hinaus erlaubt die modellprädiktive Regelung in Verbindung mit der Technologie der regelbaren Wärmedämmung nicht nur eine Reduzierung des Energiebedarfs; die Speicherfähigkeit kann zudem auch zur Verschiebung von Lasten (Flexibilisierung) eingesetzt werden. Auf Grund der hohen Dämmwirkung lassen sich massive Gebäudebauteile thermisch quasi entkoppeln, so dass sie in Zeiten hoher Verfügbarkeit elektrischer Energie erwärmt oder gekühlt und anschließend bedarfsorientiert entladen werden können.

Literatur

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, Berlin, 2010.
- [2] 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.
- [3] Statistisches Bundesamt, Bericht zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen, Wiesbaden, Dezember 2014.
- [4] G. Bayer, T. Sturm und M. Steininger, Energieflüsse in Bürogebäuden – (NEWID-IST), Wien, August 2014.
- [5] B. Krockenberger, R. Grob, M. Tritschler, C. Luft und J. Hahn, Abschlussbericht des Forschungsvorhabens Energieoptimiertes Bauen: Monitoring und Betriebsoptimierung der Kreissparkasse Göppingen, Hochschule Esslingen, Esslingen, 2014.
- [6] T. Henzler, Adaptive Gebäudehüllen und ihr Potential zur Energieeinsparung im Gebäudebereich, 2017.
- [7] ZAE Bayern, Schaltbare Wärmedämmung zur Nutzung der Sonnenenergie in Gebäuden, Bayern, 2003.
- [8] R. Caps, J. Heffleisch und J. Fricke, Schaltbare Vakuumdämmung - insbesondere zum Einsatz für solare Energienutzung. Patent DE 196 47 567 A1, 1998.
- [9] C. Römer, H. Weinläder, S. Weismann, S. Vidi und J. Wachtel, Switchable Thermal Insulation for increasing energy efficiency of building façades in EuroSun 2016, Palma de Mallorca, Spanien, 2016.

Untersuchungen zur Lüftungseffektivität bei solaren Luftheiz- und Luftkühlsystemen in Wohngebäuden

Benjamin Walz

Hintergrund und Ziel

Im Rahmen des Projekts SolSpaces^E befasst sich das Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart mit der Entwicklung eines luftbasierten Klimatisierungskonzepts für Wohngebäude. SolSpaces^E wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms unter dem Förderkennzeichen (FKZ) 03EN6008A gefördert. Es folgt auf das abgeschlossene Projekt SolSpaces 2.0 (FKZ: 0325868), in dem ein solar-sorptives Heizsystem entwickelt und in einem auf dem Campus der Universität Stuttgart aufgebauten kompakten Fertighaus des Projektpartners SchwörerHaus KG erprobt wurde (siehe Bild 1). Um einen möglichst hohen solaren Deckungsanteil zu erreichen, wurde ein saisonaler Sorptionswärmespeicher

eingesetzt. Dabei wird beim Beladungsvorgang ein Zeolith-Granulat mit feuchter Luft durchströmt. Es kommt zur Adsorption von Wasserdampfmolekülen, was zur Freisetzung von Adsorptionswärme führt, die die durchströmende Luft erwärmt. Bei der Beladung dagegen wird warme Luft durch den Speicher geführt, was in der Desorption der Wassermoleküle im Zeolith resultiert. Im Projekt SolSpaces^E steht die Reduktion der CO₂-Emissionen des Gebäudes im Fokus. Mit dem Vorhaben soll ein Beitrag zu den Zielen der Bundesregierung geleistet werden, bis zum Jahr 2045 Treibhausgasneutralität zu erreichen [1]. Die Zielvorgabe des Projekts ist es, mindestens 50 % der CO₂-Emissionen im Vergleich zur heutigen Systemtechnik einzusparen. Das soll durch ein Zusammenspiel folgender Maßnahmen erreicht werden:

1. Hohe solarthermische Beiträge der Wärmebereitstellung durch den Einsatz von hocheffizienten

Vakuumröhren-Luftkollektoren in Kombination mit einem luftdurchströmten Kurzzeit-Feststoffspeicher

2. Optimierung der Lüftungseffektivität durch Analyse und gezielte Verbesserung der Raumluftrömung unter Berücksichtigung einer Feuchterückgewinnung mittels einer selektiven Membran
3. Weiterentwicklung des im Projekt SolSpaces 2.0 gestalteten Luftheizsystems hinsichtlich der Integration einer Inverter-Luft/Luft-Wärmepumpe, welche mit Strom aus einer PV-Anlage oder einem zuvor beladenen elektrochemischen Speicher angetrieben wird
4. Kühlung des Gebäudes durch eine Verbindung von passiven Maßnahmen, wie z.B. schaltbaren Verglasungen, und aktiven Maßnahmen, wie einer adsorptiven Verdunstungskühlung.

Bild 2 zeigt das Anlagenschema des solaren Klimatisierungssystems mit den genannten vier Technologieschwerpunkten. Kann die Heizlast an einem kalten Wintertag mit geringem solarem Eintrag nicht durch die solare Wärmebereitstellung gedeckt werden, kommen elektrische PTC-Heizelemente zum Einsatz. Diese werden aus dem Stromnetz gespeist, sodass deren Strombedarf die größte CO₂-Emissionsquelle des Klimatisierungssystems darstellt. Die Herausforderung besteht somit darin, den Einsatz der PTC-Heizelemente bei gleichzeitiger Gewährleistung behaglicher Bedingungen in den Wohnräumen zu minimieren.



Bild 1: SolSpaces-Gebäude auf dem Campus der Universität Stuttgart

Eine luftbasierte Gebäudeklimatisierung bringt verschiedene Vor- und Nachteile mit sich. Dabei stehen die Einfachheit der Systemtechnik und damit verbundene Kostenvorteile der durch Behaglichkeitsanforderungen begrenzten Heizleistung gegenüber [2]. Bei äußerst luftdichten und energieeffizienten Gebäuden überwiegen in der Theorie die Vorteile eines luftbasierten Heizsystems. Ein besonderer Forschungsgegenstand ist die Optimierung der Lüftungseffektivität bei gegenüber der Raumluft höheren oder niedrigeren Zulufttemperaturen. Es stellen sich folgende Fragen:

1. Wie verändert sich die Luftströmung bei im Vergleich zur Raumtemperatur höheren bzw. niedrigeren Zulufttemperaturen (Heiz- oder Kühlfall)?
2. Können in der Anforderungszone die Behaglichkeitskriterien bei im Vergleich zur Raumtemperatur höheren bzw. niedrige-

ren Zulufttemperaturen eingehalten werden?

3. Um welchen Betrag lässt sich der Heizenergieaufwand durch eine Optimierung der Luftführung und der damit verbundenen Reduktion der Zuluftvolumenströme verringern?

Vorgehen

Die vorgestellten Forschungsfragen werden im ersten Schritt mit numerischen Strömungssimulationen (CFD, engl.: Computational Fluid Dynamics) untersucht. Hierbei wird ein numerisches Modell aufgebaut, das unterschiedliche Luftführungskonfigurationen in einem Beispielraum abbildet. Damit sollen unterschiedliche Lüftungsstrategien, beispielsweise durch Variation der Positionen und der Orientierungen der Luftdurchlässe, untersucht werden. Dabei stehen das Verhalten des Luftaustauschungsgrads und der thermischen Behaglichkeit bei gegenüber der Raumluft höheren oder niedrigeren

Zulufttemperaturen (Heiz- und Kühlanforderung) im Vordergrund.

Im Weiteren werden exemplarische Messungen der thermischen Behaglichkeit und der Lüftungseffektivität im Raumluftströmungslabor (RLS) des IGTE durchgeführt. Das RLS ermöglicht es, reproduzierbare Strömungszustände zu erzeugen, indem Randbedingungen wie z.B. Zuluftstrom, Zulufttemperatur und Wandtemperaturen eingestellt werden können. Die Lüftungseffektivität kann durch Spurengas-Messungen bestimmt werden. Dabei wird ein kontrollierter kontinuierlicher Strom an Spurengas in die Raumluft injiziert und mit Gasanalytoren der zeitliche Verlauf der Spurengaskonzentration an unterschiedlichen Punkten im Raum und in der Abluft gemessen. Aus den Konzentrationsverläufen können dann der lokale Luftaustauschindex und der globale Luftaustauschungsgrad bestimmt werden. Bild 3 zeigt eine solche Spurengas-Messung im RLS. Zu erkennen sind die Gasanalytoren und die Anbindungsleitungen zur Probenahme (blaue Schläuche), durch die die Raumluft an unterschiedlichen Messpunkten angesaugt wird.

Der Nutzen einer hohen Lüftungseffektivität kommt zum Tragen, wenn zum Beispiel in den Übergangszeiten von Sommer und Winter keine thermischen Lasten abzuführen sind. Dann resultiert der erforderliche Zuluftvolumenstrom aus den Anforderungen an die Lüfthygiene. Verfügt das Lüftungssystem über eine hohe Lüftungseffektivität, kann der Zuluftvolumenstrom im Vergleich zu einem Lüftungssystem mit niedriger Lüftungseffektivität verringert werden. Weil der Luftstrom kubisch in die Berechnung des Energieaufwands für den Lufttransport einfließt, resultiert daraus ein relevantes Energieeinsparpotential.

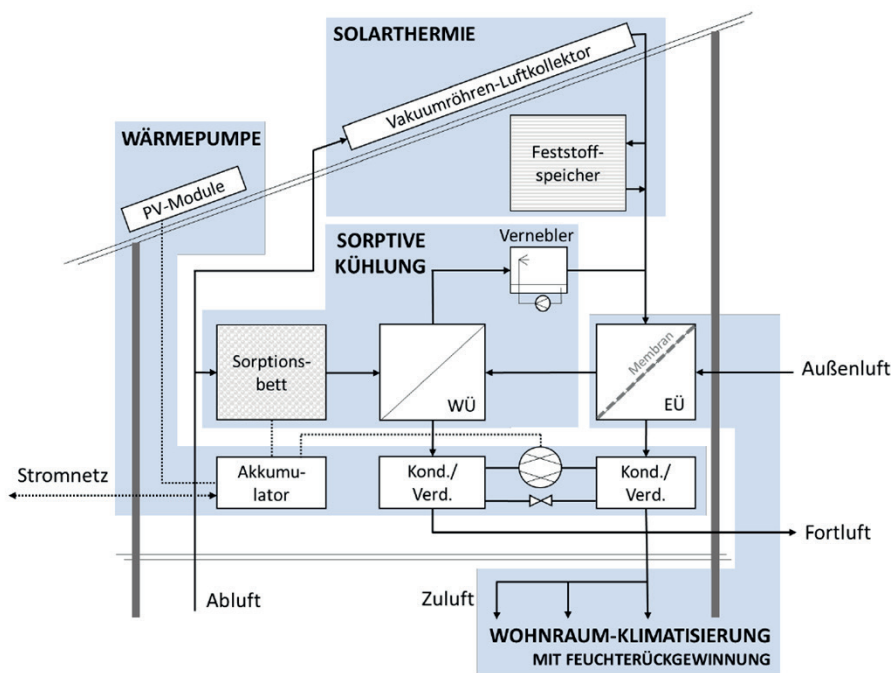


Bild 2: Anlagenschema des solaren Luftheiz- und Luftkühlsystems

Liegen erste Ergebnisse aus den erläuterten Untersuchungen vor, wird in einem weiteren iterativen Schritt – mit den Daten aus den CFD-Berechnungen – und entsprechenden Messungen mit dem thermisch-energetischen Simulationswerkzeug TRNSYS das gesamte Klimatisierungskonzept ausgelegt und hinsichtlich des Energiebedarfs und solaren Deckungsanteils optimiert. Die Software TRNSYS ermöglicht es hierbei, anhand von Wetterdaten die Energieströme durch die einzelnen Komponenten des Klimatisierungssystems nachzuvollziehen. Beispielsweise lassen sich damit die einzelnen Subsysteme dimensionieren und aufeinander abstimmen. Liegen Ergebnisse zu beispielsweise den Heizlasten aus den TRNSYS-Berechnungen vor, können diese wiederum als optimierte Randbedingungen für die CFD-Simulation verwendet werden.

Stand der Untersuchungen und Ausblick

Die Untersuchungen zur Luftströmung bei gegenüber der Raumluft höherer oder niedrigerer Zulufttemperatur befinden sich in einem frühen Bearbeitungsstadium. Erste Messungen der thermischen Behaglichkeit und der Lüftungseffektivität wurden im RLS durchgeführt. Des Weiteren wurden Skripte entwickelt, mit denen eine automatisierte Auswertung der Messdaten erfolgen kann. In den nächsten Monaten finden weitere Messungen im RLS und die numerische Berechnung der Raumluftströmung statt.

Ferner soll der Forschungsfrage nachgegangen werden, inwiefern Asymmetrien der Innenwandoberflächentemperaturen Auswirkungen auf die Raumluftströmung haben. Um den Effekt zu quantifizieren, wurde an einem sonnigen Septem-

bertag eine Messung der Oberflächentemperatur auf der Innenseite der Nord- und Südwand im SolSpaces-Gebäude durchgeführt. Dabei wurde im Tagesverlauf ein maximaler gleichzeitiger Temperaturunterschied von 1 K zwischen der Nord- und der Südwand gemessen. Dieser Einfluss soll in den folgenden numerischen und messtechnischen Untersuchungen im RLS als Randbedingung berücksichtigt werden. Aus den gewonnenen Erkenntnissen wird die Optimierung des Gesamtsystems erfolgen.

Literatur

- [1] Bundesregierung, Klimaschutzgesetz 2021, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672>, Stand Oktober 2022.
- [2] Greml, Andreas et al.; Komfortlüftungsinfo Nr. 28, Lüftung im Passivhaus, 2014.



Bild 3: Spurengas-Messaufbau im Raumluftströmungslabor

Heat2Share – Integration eines thermochemischen Speichers in das Nahwärmenetz in Barenthin

Henner Kerskes

Einleitung

Eine effiziente, verlustarme und kompakte Wärmespeicherung ist eine wichtige Voraussetzung, um die regenerative Wärmeversorgung im Gebäudesektor zu erhöhen. Insbesondere für den städtischen Gebäudebestand, in dem der verfügbare Platz für Wärmeerzeugung und Wärmespeicherung knapp ist, sind verbesserte Konzepte der bereits vorhandenen wasserbasierten Speichertechnologien sowie die Entwicklung neuer thermischer Energiespeichertechnologien von großer Bedeutung.

In diesem Kontext ist das Ziel des nationalen Forschungsvorhabens Heat2Share die Weiterentwicklung eines verbesserten thermochemischen Wärmespeichers (TCS), der nach dem Prinzip der geschlossenen Adsorption arbeitet.

Alternative Speichermaterialien wie Phasenwechselmaterialien und Sorptions- oder thermochemische Speichermaterialien wurden in der jüngsten Vergangenheit intensiv für Energiespeicheranwendungen erforscht. Dabei zeichnen sich Sorptions- und thermochemische Energiespeicherverfahren durch eine hohe Energiespeicherdichte (kWh/m^3) und geringe Wärmeverluste aus, was sie auch für die Langzeitwärmespeicherung interessant macht.

Bild 1 zeigt links den Aufbau des thermochemischen Speichers für die geschlossene Prozessführung. Der Speicher besteht aus einem Behälter, in dem der Wärmeübertrager

integriert ist. Bei dem Wärmeübertrager handelt es sich um einen Lamellen-Rohr-Wärmeübertrager, dessen Hohlräume zwischen den Lamellen mit dem Speichermaterial gefüllt werden. Daran angeflanscht befindet sich ein Kondensator, eine Wasserbevorratung und ein Verdampfer. Das Speichersystem ist hermetisch geschlossen und arbeitet im Unterdruck zwischen 10 und 50 mbar. Bild 1 rechts schematisiert den Ablauf des Speicherprozesses. Für die thermische Beladung des Speichers wird Wärme auf höherem Temperaturniveau zugeführt. Am Speichermaterial gebundene Wassermoleküle werden desorbiert. Der Wasserdampf verlässt den Speicher und wird im Kondensator verflüssigt, Niedertemperaturwärme wird abgeführt. Während der Speicherphase liegen das trockene Speichermaterial und das verflüssigte Wasser getrennt vor. Dieser energetische Zustand kann über beliebig lange Zeiträume verlustfrei aufrechterhalten werden. In der thermischen Entladephase werden Wasser und Speichermaterial wieder zusammengeführt. Dazu wird mit Hilfe einer Niedertemperaturquelle das bevorratete Wasser bei niedrigem Druck (typisch: 30 mbar, ca. 25 °C) verdampft und dem Speicherbehälter zugeführt. Der Wasserdampf wird dort adsorbiert und die freiwerdende Adsorptionswärme wird über den Wärmeübertrager auf höherem Temperaturniveau der Heizanwendung zugeführt.

Aufbauend auf den Erfahrungen, die in den vorangegangenen Forschungsprojekten MoGeSoWa [1]

und COMTES [2] gesammelt wurden, wird in dem laufenden Forschungsprojekt Heat2Share ein modulares, kaskadiertes thermochemisches Wärmespeichersystem entwickelt, aufgebaut und erprobt. Der Speicher wird in das Nahwärmenetz der Gemeinde Barenthin, nördlich von Berlin gelegen, integriert. Hier versorgt eine Biogasanlage 28 Wohnhäuser in der ländlichen Region mit Wärme. Die thermische Leistung des Blockheizkraftwerks beträgt 432 kW, wovon etwa 100 kW für die Beheizung des Fermenters benötigt werden.

Der thermochemische Speicher soll zum Lastausgleich zwischen Wärmeüberschuss und -mangel im Wärmenetz eingesetzt werden. Eine Herausforderung bei dieser Art von Anwendung ist, dass der Speicher nur in einem sehr kleinem Temperaturbereich zwischen 55 und 75 °C betrieben werden kann. Diese kleine Temperaturspreizung zwischen Adsorption und Desorption ist für thermochemische Speicher untypisch, sodass das verwendete Speichermaterial, die Wärmeübertragergeometrie und das Speicherdesign sehr genau darauf abgestimmt werden müssen. Als thermochemisches Speichermaterial wird ein Verbund aus Aktivkohle und Calciumchlorid (CaCl_2) eingesetzt. Es zeichnet sich durch eine hohe Energiespeicherdichte auch bei niedrigen Betriebstemperaturen und kleinen Temperaturspreizungen aus. Problematisch ist jedoch das korrosive Verhalten des Materials.

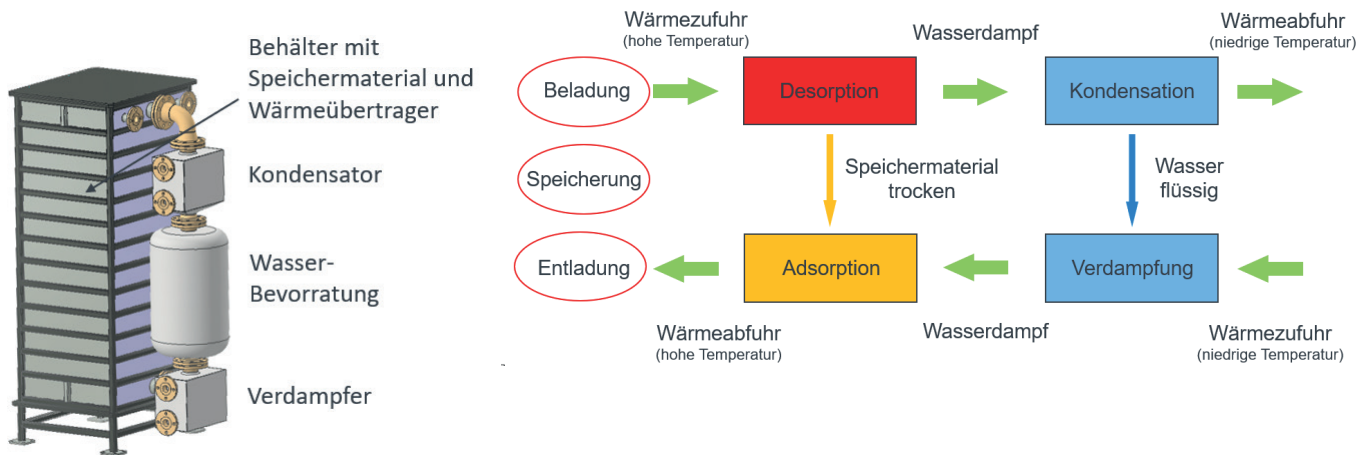


Bild 1: Darstellung der wesentlichen Komponenten des thermochemischen Speichers (links), schematische Darstellung des verfahrenstechnischen Ablaufs der thermochemischen Speicherung (rechts)

Die Aufgabe des Instituts für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart im Forschungsvorhaben Heat2Share besteht in erster Linie in der verfahrenstechnischen Auslegung des Speichersystems. Durch detaillierte numerische Simulationen der Adsorptions- und Desorptionsvorgänge werden die notwendigen Kenntnisse für die Dimensionierung und Auslegung der Anlagenkomponenten erreicht. Insbesondere das Design des Wärmeübertragers und die Dampfführung im Speicherbehälter spielen für die Leistungscharakteristik eine wichtige Rolle.

Derzeit befindet sich der Demonstrationsspeicher in der Errichtungsphase. Vier Speichermodule mit jeweils 250 kg Speichermaterial werden in einem Container zusammen mit der gesamten messtechnischen Peripherie installiert. Ab Frühjahr 2023 soll das Speichersystem in das Wärme-

netz von Barenthin implementiert werden.

Mit dem Projekt Heat2Share wird erstmals in Deutschland ein thermochemischer Speicher mit geschlossener Prozessführung in einem realen Wärmenetz integriert. Ein Technologiereifegrad (TRL) von 6 wird damit erreicht und stellt einen Meilenstein für die Technologie dar. Das Konsortium erwartet eine Vielzahl von interessanten Ergebnissen und neue Erkenntnisse zum Betrieb eines thermochemischen Speichers. Die Projektpartner des IGTE in diesem Projekt sind die Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (Projektkoordinator), die Fa. ZeoSys Energy (Anlagenhersteller), BEB Bio-Energy Berlin, A&O Gebäudetechnik und das Fraunhofer IWU. Das Projekt Heat2Share wird gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz unter Koordination des PTJ, FKZ 03EN3018B.

Literatur

- [1] Entwicklung eines modularen, geschlossenen, sorptiven Wärmespeichers zur Energieeffizienzsteigerung von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (MoGe-So-Wa), <https://doi.org/10.2314/GBV:1023258943>.
- [2] R. Köll, W. van Helden, G. Engel, W. Wagner, B. Dang, J. Jänchen, H. Kerskes, T. Badenhop, T. Herzog, An experimental investigation of a realistic-scale seasonal solar adsorption storage system for buildings, *Solar Energy*, Volume 155, 2017, Pages 388-397, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.06.043>.



Optimierung von Lüftungsstrategien für Nichtwohngebäude im Hinblick auf Gesundheit und Energieaufwand

Lukas Siebler, Simon Klug

Einleitung

Die anhaltende SARS-CoV-2-Pandemie verursacht langfristige gesellschaftliche und volkswirtschaftliche Schäden. Neben erforderlichen Finanzhilfen sorgen fehlende Einnahmen insbesondere in der Kulturszene für Herausforderungen [1, 2]. Lüftungsmaßnahmen können Infektionsrisiken zwar nachweislich senken [3–5] allerdings sorgen die hohen erforderlichen Außenluftströme im Winterfall auch für erhebliche Lüftungswärmeverluste. Theoretische Untersuchungen zu Lüftungsstrategien für verschiedene Gebäudetypen und Nutzungsprofile können helfen, den beiden im Konflikt zueinanderstehenden Zielsetzungen zu begegnen. Neben einem wirksamen Stoffabtransport für ein geringes Infektionsrisiko sollen energetische Aufwände für Heizen, Kühlen und Lüften minimiert werden. Bei variablen Gewichtungen der zu quantifizierenden Größen eröffnet sich eine Optimierungsaufgabe, die in dieser Studie bearbeitet wird.

Methodik

Hierfür wird derzeit ein flexibel an unterschiedliche Anforderungen und Untersuchungsaufgaben anpassbares Simulationsmodell entwickelt, welches es erlaubt, sowohl die stofflichen als auch die thermischen Bilanzen eines Raums zu analysieren. Dabei soll die transiente stoffliche Belastung über die Annahme einer

idealen Mischlüftung beschrieben werden. Neben zentralen und dezentralen maschinellen Lüftungssystemen sollen auch Luftreinigungsgeräte und eine Fensterlüftung mit unterschiedlichen Lüftungsstrategien bewertet werden.

Im Fokus stehen neben einer Modellierung der für die Lüftungsmaßnahmen erforderlichen Hilfsenergien eine adäquate thermische Bewertung der auftretenden Lüftungswärmeverluste. Um reale Szenarien nachbilden zu können, werden Regelungsstrategien nach Stand der Technik in die Simulationsmodelle implementiert.

Neben einem Simulationsmodell für einen Konferenzraum mit hohen Fluktuationen in der Belegung bildet ein weiteres Modell ein Stockwerk einer Schule mit sechs Klassenräumen ab. In beiden Szenarien lassen sich verschiedene natürliche und maschinelle Lüftungsstrategien untersuchen. Anhand von Typtagen im Winter oder Sommer können sowohl ein statistischer Erwartungswert an Neuinfektionen (vorausgesetzt ist keinerlei Schutz wie Impfungen, Masken, ...) als auch der energetische Aufwand für den Anlagenbetrieb bestimmt werden. Um beide Größen (trotz verschiedener physikalischer Einheiten) gemeinsam bewerten zu können, wird eine fiktive Zielgröße entwickelt, über die bei verschiedenen Gewichtungen einer gesundheitlichen Bewertung und des Energieaufwands dann theoretisch optimale Parameter für Lüf-

tungsmaßnahmen bestimmt werden können.

Diese Zielgröße Φ wird in Gleichung (1) beschrieben:

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

mit der gesundheitlichen Gewichtung x , dem Energieaufwand bei bestimmten Parametern (z.B. eine bestimmte CO_2 -Obergrenze oder Zeiten der Fensterlüftungszyklen) W_i , dem gemittelten Energieaufwand über die Variation der Parameter \tilde{W} , sowie dem statistischen Erwartungswert an Neuinfektionen μ_i bei bestimmten Parametern und dem Mittelwert dieser Größe über alle Parameter $\tilde{\mu}$. Die Werte von Φ variieren dabei um einen medianen Wert von 1, wobei ein möglichst kleiner Wert den Zielkonflikt optimal löst. Alle für die Gleichung erforderlichen Größen werden bspw. im Szenario der Schule je für einen ganzen Schultag für die sechs Klassenräume des Stockwerks erhoben.

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

Fensterlüftung einer Schule

Nachfolgend werden Simulationsergebnisse eines exemplarischen teilrenovierten Klassenraums (höherer Dämmstandard der Fenster) mit wechselnder Klassenbelegung (5 Klassen) an einem typischen Wintertag (über 6 Doppelschulstunden inkl. Mittagspause) gezeigt. Die Lüftung erfolgt dabei über Fenster, was dem Standard in deutschen Schulen entspricht. Allerdings wird eine händische Bedienung idealisiert anhand einer CO₂-Ampel simuliert. Bei einer Obergrenze der CO₂-Konzentration von 1.500 ppm werden in diesem Szenario die Fenster geöffnet

und nach Erreichen der Untergrenze von 800 ppm wieder geschlossen. Die Randbedingungen sind in Tabelle 1, die zeitlichen Verläufe der relevanten Simulationsergebnisse in Bild 1 dargestellt. Der solare Eintrag und die Beleuchtungsleistung in den Klassenräumen werden in der Simulation bislang nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse dieser expliziten Simulation zeigen, dass trotz der hohen Spreizung der CO₂-Ober- und Untergrenze, die Lüftungszyklen sehr kurz ausfallen und sich ca. alle 10 Minuten der Prozess aus Öffnen und erneutem Schließen der Fenster wiederholt. Neben dem Bedienungsauf-

wand, der voraussichtlich einen konzentrierten Unterricht beeinträchtigt sind die Raumlufttemperaturen aus Sicht der Behaglichkeit als kritisch einzustufen. Temporär fällt diese auf unter 14 °C und bewegt sich bei Anwesenheit im Mittel in Bereichen um 17 °C und das obwohl die angenommene maximal mögliche Heizleistung mit 5.000 W um ca. 150% über der Normheizlast für diesen Raum angesetzt wird. Mit einer Heizkörperauslegung nach Stand der Technik würde dieser Betrieb in deutlich unbehaglicheren Raumlufttemperaturverläufen resultieren.

Tabelle 1: Ausgewählte Randbedingungen der Klassenraum-Simulation mit Fensterlüftung

Raumvolumen	180 m ³ [6]	U-Wert Wand	0,37 W/m ² K
Außenwandfläche	25,8 m ²	U-Wert Fenster	1,22 W/m ² K
Fensterfläche	12,9 m ²	Max. Heizleistung	5.000 W
zu öffnende Fensterfläche	6,4 m ²	Wärmeabgabe Mensch	60 W [7]
Außenlufttemperatur	0°C	Virusvariante	SARS-CoV-2 (Delta)

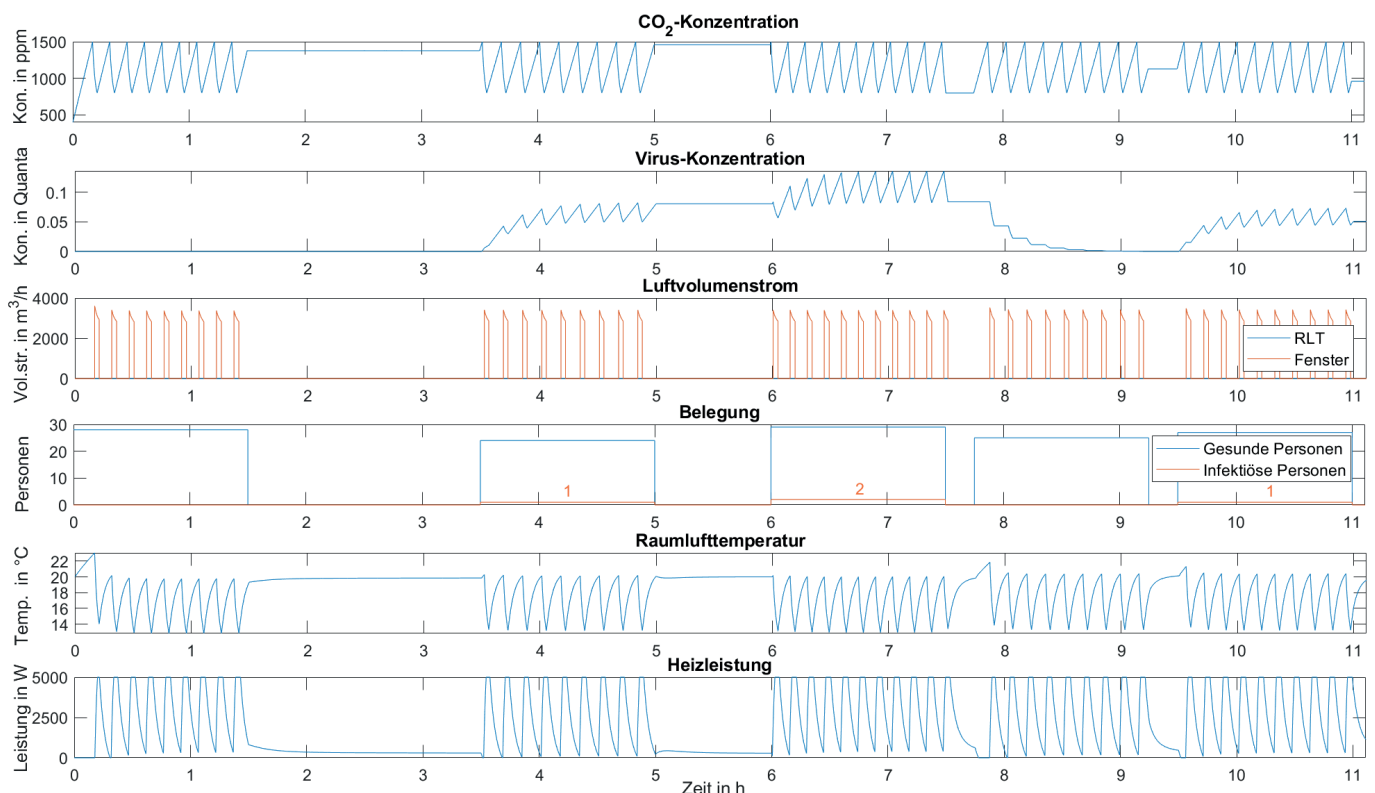


Bild 1: Zeitliche Verläufe im Klassenraum an einem typischen Wintertag bei einer CO₂-basierten Fensterlüftung

Analog zu dieser Simulation werden neben relevanten Parametervariationen auch gänzlich andere Fensterlüftungsstrategien (z.B. eine zeitlich zyklische) verfolgt. Bei der maschinellen Lüftung sind unter den implementierten Betriebsmodi ein Konstant-Volumenstrom-System, eine Regelung nach der CO₂-Konzentration oder eine Regelung nach der direkten Anwesenheit von Personen.

Maschinelle Lüftung einer Schule

Im Bild 2 sind zeitliche Verläufe der relevanten Größen beim exemplarischen Betrieb einer zentralen raumlufttechnischen (RLT-) Anlage desselben Raums bei identischen Randbedingungen (Tabelle 1) gezeigt. Die CO₂-Konzentration wird hierbei über die Stellgröße des Volumenstroms PI-geregt. In diesem Szenario sind eine CO₂-Obergrenze von 1.000 ppm und ein Mindestaußenluftvolumenstrom im Fall keiner Anwesenheit von 400 m³/h eingestellt, um im Pandemiebetrieb

in Pausen sowohl die CO₂-Konzentration als auch die Virenbelastung der Raumluft signifikant senken zu können.

Im Vergleich zur Fensterlüftung sind in diesem Fall erheblich geringere Heizleistungen erforderlich, welche auf die Wärmerückgewinnung (Rückwärmzahl/Temperaturänderungsgrad 0,8) und die damit geringeren Lüftungswärmeverluste zurückzuführen sind. Zudem zeigt sich, dass die Wärmeabgabe der Personen bei voller Belegung ausreicht, um die erforderliche Heizleistung auf null zu senken. Folglich liegen in diesem Szenario bei Anwesenheit quasi keine unbehaglichen Raumlufttemperaturen vor.

Die für diesen Betrieb erforderliche Hilfsenergie für den Lufttransport wird bei der Simulation nur für die gesamte zentrale RLT-Anlage (für sechs Klassenräume des Stockwerks) ermittelt. Der Gesamtenergieaufwand würde sich bei diesem exemplarischen Szenario durch die

Umstellung von Fenster- auf maschinelle Lüftung von 128 kWh (rein thermisch) auf 23,6 kWh (11,6 kWh thermisch und 12,0 kWh elektrische Hilfsenergie) für einen Schultag reduzieren. Das Simulationsergebnis an Neuinfektionen ändert sich von 24 auf 21 Personen (kein Schutz wie Impfungen, Masken, ...). Als interessant stellt sich heraus, dass der thermische Aufwand bei der maschinellen Lüftung trotz einer Rückwärmzahl von nur 0,8 um einen Faktor 10 kleiner wird. Hintergrund sind die internen Wärmequellen in Form von Personen, deren Anwesenheit hier bereits ausreicht, um die Heizlast auf null zu senken.

Auch unter Berücksichtigung der Hilfsenergie wird ersichtlich, dass bei sehr hohen Belegungsdichten (wie in Klassenräumen) die Vorteile einer maschinellen Lüftung überwiegen. Gerade in Zeiten einer Pandemie mit luftgetragenen Erregern ist bei solchen Belegungsdichten die Fensterlüftung als kritisch zu bewerten.

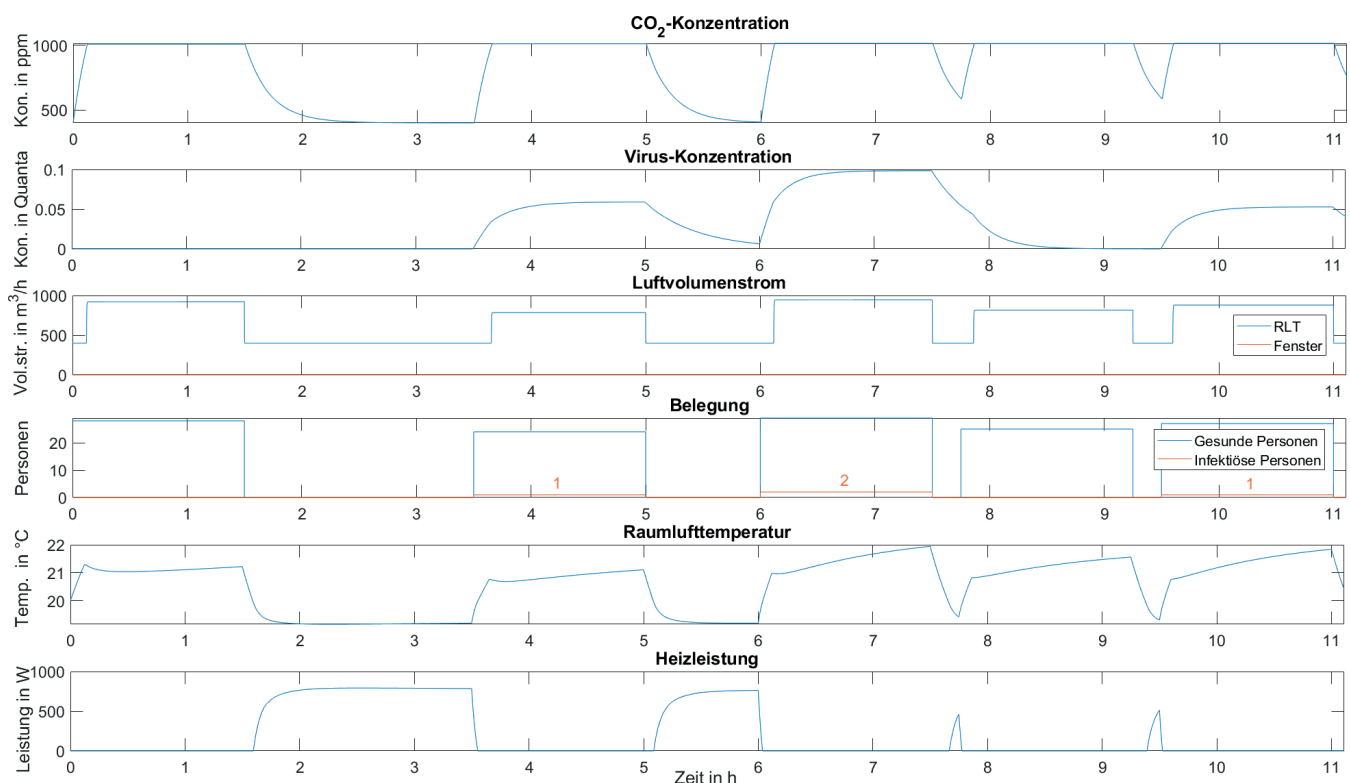


Bild 2: Zeitliche Verläufe im Klassenraum an einem typischen Wintertag bei einem CO₂-basierten Betrieb einer zentralen RLT-Anlage

Optimierung einer bestimmten Strategie

Übergeordnetes Ziel der Studie ist es, innerhalb einer bestimmten Lüftungsstrategie für verschiedene Gewichtungen der Gesundheit und des Energieaufwands Optimierungsprozesse durchzuführen, welche identifizieren sollen, bei welchen Parametern die entwickelte gewichtete Zielgröße minimal wird. Ein solcher Betriebspunkt stellt bei gegebenen Randbedingungen einen theoretisch idealen Kompromiss aus energetischer und gesundheitlicher Zielsetzung dar.

In Bild 3 sind die Ergebnisse dieses Optimierungsprozesses innerhalb der CO₂-basierten Fensterlüftung gemäß des Signals einer CO₂-Ampel aufgezeigt. Hierbei werden die Parameter der CO₂-Grenzen für eine Fensteröffnung und das -schließen variiert.

Jede farbig markierte Fläche beschreibt hierbei die Ergebnisse für eine bestimmte Gewichtung x der

gesundheitlichen Bewertung. Für die blaue Fläche ($x=0,3$), wird bspw. in der Zielgröße die Gesundheit (über die statistische Anzahl an Neuinfektionen) mit 30 % gewichtet und der energetische Aufwand mit den restlichen 70 % (vgl. Gleichung (1)). Für diese Gewichtung ergibt sich für Fensteröffnungen und -schließungen bei der CO₂-Obergrenze von 1.500 ppm bzw. der -Untergrenze von 900 ppm ein mit einem blauen Kreis gekennzeichnetes exemplarisches Optimum ($\Phi=0,91$).

Im Diagramm lässt sich erkennen, dass für zunehmende gesundheitliche bzw. gleichzeitig abnehmende energetische Gewichtung, sich das Optimum entlang des Randgebietes des Diagramms von vorne links nach hinten rechts verschiebt. Das bedeutet übertragen, wenn die Energie bei der Strategie fokussiert wird ($x = 0,3$), sich die Lüftungszyklen in Bereiche höherer Maximal-Konzentrationen bewegen, die Spreizung der Ober- und Untergrenze allerdings

nahezu unverändert zwischen 500 und 600 ppm liegen. Dieses Ergebnis lässt sich auch physikalisch begründen: Je höher die Stoffkonzentration im Raum, desto wirksamer wird die Lüftung im Stoffabtransport pro Zeiteinheit. Dadurch lassen sich bei gleichbleibender Spreizung kürzere Lüftungszyklen realisieren, durch die dann kumulative Lüftungswärmeverluste eingespart werden können. Allerdings bleiben dabei stets höhere Restkonzentrationen an CO₂ und Viren im Raum enthalten, die dann in höheren Infektionsrisiken resultieren. Dies erklärt dann auch die gegenteilige Lage des Optimums auf der grünen Fläche ($x = 0,7$). Hier sind die Lüftungszyklen von 1.000 auf 500 ppm zwar etwas länger, wodurch der Energieaufwand etwas höher ausfällt, allerdings liegt im Mittel eine geringere CO₂- bzw. Virenkonzentration vor, was in weniger Neuinfektionen resultiert.

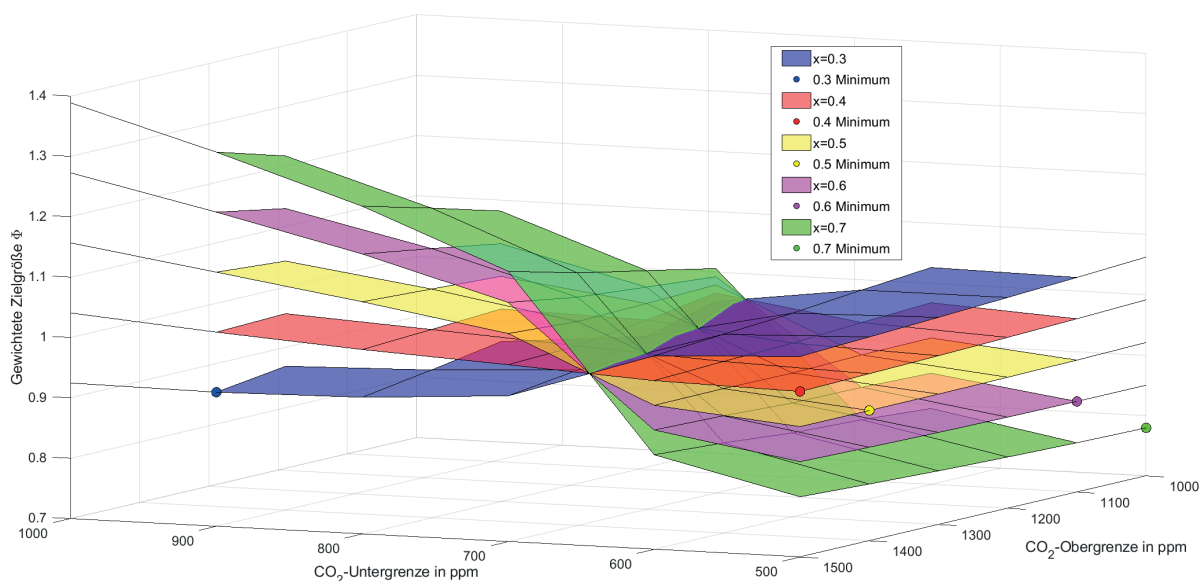


Bild 3: Optimierungsprozess der Parameter innerhalb der CO₂-basierten Fensterlüftung

Ausblick

Im nächsten Schritt wird ein globaler Optimierungsprozess entwickelt, der die verschiedenen übergeordneten Lüftungsstrategien (z.B. zeitliche Fensterlüftung vs. CO₂-geregelte maschinelle Lüftung) miteinander vergleicht. Die dabei entstehenden quantitativen Ergebnisse können einen weiteren wichtigen Schritt darstellen, um fundierte Aussagen darüber zu treffen, wie Gebäude mit hohen Belegungsdichten künftig gesundheitlich und energetisch optimal betrieben werden können.

Literatur

- [1] Deutsche Welle, Bundesregierung hilft Firmen mit 500-Milliarden-Paket. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dw.com/de/bundesregierung-hilft-firmen-mit-500-milliarden-paket/a-52757943> (Zugriff am: 16. November 2022).
- [2] L. T. Bayerischer Rundfunk, Theater in Bayern: Imageschaden durch 25 Prozent Auslastung. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.br.de/nachrichten/wirtschaft/kulturbranche-theater-in-bayern-imageschaden-durch-25-prozent-auslastung,Sv9UwZ> (Zugriff am: 16. November 2022).
- [3] C. Redder und C. Fieberg, „Sensitivity analysis of SARS-CoV-2 aerosol exposure“ (eng), GMS hygiene and infection control, Jg. 16, Doc28, 2021, doi: 10.3205/dgkh000399.
- [4] T. Hussein et al., „Indoor Model Simulation for COVID-19 Transport and Exposure“ (eng), International Journal of Environmental Research and Public Health, Jg. 18, Nr. 6, 2021, doi: 10.3390/ijerph18062927.

[5] L. Siebler, M. Calandri, T. Rathje und K. Stergiaropoulos, „Experimental Methods of Investigating Airborne Indoor Virus-Transmissions Adapted to Several Ventilation Measures“ (eng), IJERPH, Jg. 19, Nr. 18, 2022, doi: 10.3390/ijerph191811300.

[6] E. Lichtner und M. Kriegel, „Luftgetragene Erreger und Luftqualität in Innenräumen am Beispiel eines Klassenzimmers - Verteilung der Erreger und Bewertung der Lüftungseffektivität“, 2021.

[7] DIN V 18599: Energetische Bewertung von Gebäuden, Deutsche Industrie Norm.