

## Vorwort

### *Meine Damen und Herren,*

auch in diesem Jahr freue ich mich, gemeinsam mit Ihnen, pünktlich zur Weihnachtszeit auf das vergangene Jahr zurückblicken zu dürfen. Mit dem HLK-Brief möchte ich die aus meiner Sicht wichtigsten Ereignisse des Jahres 2019 aufzählen.

Das wichtigste Ereignis für uns fand im April statt. Am 04. April durften wir interessierte Gäste aus Wirtschaft und Wissenschaft zu unserem 1. IGTE-Forum begrüßen. Nach der Neueinrichtung des IGTE im Sommer 2018 durften wir unsere Mission, die Arbeits- und Forschungsbereiche des IGTE sowie aktuelle Projekte und Highlights unserer nationalen und internationalen Forschungsaktivitäten präsentieren.

Neben Impulsvorträgen zu den laufenden Forschungsvorhaben gab es drei Plenarvorträge zu folgenden Schwerpunktthemen:

- Thermische Energiespeicher – eine Schlüsseltechnologie für die Energiewende?
- Innovative Gebäude- und Quartierskonzepte für Smart Cities
- Prüftätigkeiten und Dienstleistungen am IGTE.

Im Mai fand das Symposium Solarthermie in Bad Staffelstein statt. Sechs Mitarbeiter des Instituts trugen mit Vorträgen und Postern zur Veranstaltung bei:

- 40% Reduktion des solaren Wärmepreises durch die Kombination unterschiedlicher Optimierungsmaßnahmen
- Solare Wärme- und Stromversorgung von Wohngebäuden – Ergebnisse des Forschungsprojekts „SolSys“

- Fallstudie für den Einsatz einer kombinierten Strom-Wärme-Stromspeicherung für erneuerbare Energien am Beispiel des Windparks Alpha Ventus
- Sowie fünf Posterbeiträge.

Ebenfalls im Mai fand in Bukarest der 13. REHVA World Congress CLIMA 2019, einer der international führenden Kongresse für die Forschungsgebiete Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik, statt. Dort präsentierten zwei unserer Mitarbeiter ihre Forschungsarbeiten zu den Themen

- Investigation of a multizone building with HVAC system using a coupled thermal and airflow model
- Monitoring of indoor airflows with a new two-dimensional airflow sensor.

Ein weiteres Ereignis war der Internationale Kongress für Kältetechnik im August in Montreal. Dort haben drei IGTE-Mitarbeiter ihre Forschungsergebnisse zu

- Investigation of the nucleation temperature of different heat exchanger surfaces in an ice store
- Scaling parameters between ammonia and water
- Optimization potentials for the absorber and the generator of an ammonia-water absorption heat pump

vorgelegt.

Den Jahresabschluss in puncto „Vortragen“ bildete die Jahrestagung des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins (DKV), die im November in Ulm stattfand. Dort präsentierte ein IGTE-Mitarbeiter seine Forschungsergebnisse zu

- Flexibilisierung der Wärmebereitstellung für RLT-Anlagen

dem interessierten Fachpublikum.

Es freut mich Ihnen mitteilen zu dürfen, dass uns in 2019 elf Forschungsvorhaben bewilligt wurden:

- BMBF: Climate-Adapted Material Research for the Socio-Economic Context of Vietnam (CAMaRSEC)
- BMBF: Nachhaltige Gebäude für Menschen - Verbesserung der städtischen Lebensqualität in Kambodscha, Teilprojekt 5: Nachhaltige Gebäude (Build4People)
- Vector Stiftung: Kontinuierliche Solar-Sorptive Wassergewinnung aus der Luft in ariden Gebieten (KoSSWaL)
- BAM: Messungen im Rahmen des Nationalen Aktionsplans Energieeffizienz (NAPE)
- DBU: Untersuchungen zur Optimierung maschineller Lüftungskonzepte in Schulen zwecks Verbesserung der Innenraumluftqualität, Behaglichkeit und Energieeffizienz (OLiS)
- BMWi: Weiterentwicklung, Prüfung und Demonstration großvolumiger, preiswerter Warmwasserspeicher mit hocheffizienter Wärmedämmung zur Außenanstellung (StoEx2)
- BMWi: Initiative zur Markttablierung und Verbreitung von Anlagen zur thermisch-elektrischen Energieversorgung mittels PVT-Kollektoren und Wärmepumpen im Gebäudesektor (integraTE)
- DBU: Energieeffiziente Aerosolabscheidung mittels heterogener Kondensation (HetKond)
- DBU: Entwicklung einer kompakten, langlebigen und robusten Kleinkältemaschine auf Basis des Diffusions-Absorpti-

onskälteprozesses mit Platten-austreiber zur Erzeugung von Kälte aus überschüssiger Wärme (EDAPA)

- AiF/ZIM: Mobile Zeolite Heat Storage - Entwicklung eines mobilen, regenerativen, auf innovativen Polymer/Zeolith-Wabenkörpern basierenden Wärmespeichers ohne Wärmeverluste zur Nutzbarmachung von Abwärme in Industrieanlagen (MZHS)
- BBSR: Untersuchung und Erarbeitung von Grundlagen zur Fortschreibung des Modellgebäudeverfahrens EnEV easy für Wohngebäude (EnEV Easy Teil III)

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

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

195. Personelle Veränderungen sowie Studien-, Bachelor- und Masterarbeiten 2019

196. Studie zur energetischen Optimierung der Luftverteilung in Kanalnetzen

197. Studie zur Tropfenabscheidung und zur Luftentfeuchtung auf Basis der Dielektrophorese

198. Überwachung der Raumströmung mit einem zweidimensionalen Strömungssensorsystem

199. Modellierung und Beurteilung der Luftströmungen im pneumatischen System von Kirchenorgeln

200. CAMaRSEC - Klimaangepasste Materialforschung für den sozio-ökonomischen Kontext in Vietnam

201. Absenkung der Rücklauftemperatur im Fernwärmenetz

202. Anlagen-Monitoring und Simulation eines Wärmepumpen-Heizsystems mit PVT-Kollektoren als Wärmequelle

203. Solare Gebäude – zukunftssichere Konzepte zur Gebäudeenergieversorgung

204. Solares Luftheizsystem mit Vakuumröhren-Luftkollektor und Sorptionswärmespeicher für die Gebäudebeheizung

Gerne möchte ich auch darauf hinweisen, dass im Jahre 2019 zwei Studierende und eine Mitarbeiterin des IGTE für ihre Forschungsarbeiten ausgezeichnet wurden.

So belegte Matthias Burr für seine Masterarbeit den ersten Platz und Dr.-Ing. Rebecca Weber für ihre Dissertation den zweiten Platz beim Otto F. Scharr-Preis für Energietechnik.

Unsere Studentin Jennifer Rösler wurde für ihre Studienarbeit mit dem IVS-Award 2019 ausgezeichnet.

Zu guter Letzt darf ich Sie auf die im vergangenen Jahr erfolgte Überarbeitung der Website des VdF HLK aufmerksam machen.

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 ein besinnliches Weihnachtsfest und einen guten Rutsch in das Jahr 2020.

Herzlichst  
Ihr

Konstantinos Stergiaropoulos

# Personelle Veränderungen sowie Studien-, Bachelor- und Masterarbeiten 2019

## Personelle Veränderungen

**Dr.-Ing. Mohammad Reza Adili** war seit 2013 zuerst als Stipendiat der „Graduierten- und Forschungsschule Effiziente Energienutzung Stuttgart (GREES)“ und anschließend als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut tätig. Nach erfolgreicher Promotion hat er im Februar 2019 zu Drees & Sommer Advanced Building Technologies GmbH als Projektingenieur im Bereich Energiedesign gewechselt.

**Johannes Brunder, M.Sc.** ist seit April 2019 am IGTE als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig und befasst sich mit der Absorptionskältetechnik. Er arbeitet im Rahmen eines Promotionsstipendiums der Bundesstiftung Umwelt an der Skalierung des Diffusions-Absorptionskälteprozesses. An der Universität Stuttgart absolvierte er zunächst den Bachelorstudiengang „Erneuerbare Energien“ und anschließend den Masterstudiengang „Energietechnik“.

**Marco Biondi** ist seit August 2019 als technischer Angestellter am IGTE. In der Position des Elektromeisters unterstützt er die Umsetzung von Projekten, mit Hauptaugenmerk auf die Inbetriebnahme und Instandsetzung elektrischer sowie elektromechanischer Geräte und der regelmäßig wiederkehrenden Prüfungen solcher. Zum weiteren Aufgabenfeld gehört die Revision und Anpassung auf geänderte Anforderungen der Geräte.

**Christina Karagianni, M.Sc.** ist seit Oktober 2019 am IGTE als wissenschaftliche Mitarbeiterin tätig und beschäftigt sich hauptsächlich mit Themen zur Systemintegration und nachhaltigen Gebäuden. Sie absolvierte zuerst den Bachelorstudiengang „Mathematik“ und anschließend den Masterstudiengang „Umweltphysik“ an der Universität Athen sowie den weiteren Masterstudiengang „Nachhaltige Entwicklung“ an der Technischen Universität Athen.

**Daniel Haag, M.Sc.** ist seit November 2019 am IGTE als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig und befasst sich mit der Klimatisierung und Kühlung von Schaltschränken. In einer Kooperation mit der Friedrich Lütze GmbH untersucht er Energieeinsparpotenziale an Schaltschränken aus der industriellen Fertigung. Er absolvierte den Bachelor- und den Masterstudiengang „Maschinenbau“ an der Universität Stuttgart.

**Alaa Almahmoudi:** Entwicklung eines Belegungsprofilgenerators für Bürogebäude (Studienarbeit)

**Mahmoud Ansari:** Strömungssimulation – Parameterstudie zum Druckverlust in Strömungsbauteilen (Studienarbeit)

**Matthias Burr:** Analyse zur Regelung Thermoaktiver Bauteilsysteme (TABS) unter Einsatz maschinellen Lernens (Masterarbeit)

**Maurizio Calandri:** Erstellung von Gebäudelastgängen eines Quartiers für die Konzeption eines Wärmenetzsystems 4.0 (Masterarbeit)

**Lisa-Sophie Christmann:** Konzeptionierung von adaptiven Gebäudehüllen für Büro- und Wohngebäude (Masterarbeit)

**Anna Dao:** Erstellung und Überprüfung eines Bürogebäudemodells in TRNSYS (Masterarbeit)

**Safa Demir:** Ableitung einer Näherungsgleichung für die Ermittlung der Tunnellufttemperatur (Masterarbeit)

**Maik Doil:** Kreisprozessberechnung einer Ammoniak-Wasser-Absorptionswärmepumpe zur Beurteilung des Einflusses der verwendeten Zustandsgleichungen (Masterarbeit)

**Abdalla Fattouh:** Experimentelle Bestimmung des Druckverlustes der Einzelkomponenten sowie des Gesamtsystems einer dezentralen Wohnungs Lüftung (Bachelorarbeit)

**Michelle Fritz:** Einfluss des Nutzerverhaltens am Energiebedarf und -aufwand in Wohngebäuden (Bachelorarbeit)

**Jonas Giese:** Einfluss der Erzeugung und Verteilung auf das thermische Flexibilisierungspotential bei dezentralen RLT-Anlagen (Masterarbeit)

**Philip Grant:** Untersuchung zum Einsatz von Ultraschall-Befeuchtern in Wohnungslüftungsgeräten (Studienarbeit)

**Daniel Haag:** Simulation, Analyse und Verbesserung der thermischen Verhältnisse im Inneren eines Schaltschranks aus der industriellen Fertigung (Masterarbeit)

**Jonas Häcker:** Ermittlung der kostenoptimalen Aktivierungsfläche für Tunnelabsorber (Masterarbeit)

**Frederik Harbord:** Simulationsstudie zur Wirtschaftlichkeit von Tunnelgeothermienutzung in Gebäuden (Studienarbeit)

**Frederik Harbord:** Einfluss der Nutzenübergabe auf das Energieeinsparpotenzial einer Gebäudebetrieboptimierung in Bürogebäuden (Masterarbeit)

**Jonas Hilpert:** Multiphysikalische Strömungssimulation - Luftentfeuchtung auf Basis der Elektrostatik (Studienarbeit)

**Maximilian Irlinger:** Einfluss des Fensterflächenanteils auf Vorgaben zum baulichen Wärmeschutz von Wohngebäuden mit Brennwertkessel und Solarthermieanlage (Bachelorarbeit)

**Lukas Kohlhauer:** Energieaufwand für die Luftkonditionierung und -transport in Tunnelanlagen (Masterarbeit)

**Marina Kollmeier:** Technische Konzeptionierung eines neuartigen Aerosolabscheideverfahrens auf Basis heterogener Kondensation (Masterarbeit)

**Alper Köse:** Aufbau einer Bauteilbibliothek in Matlab/Simulink zur Simulation von Luftverteilnetzen (Studienarbeit)

**Christian Lodroner:** Validierung eines Strömungssensors zur Geschwindigkeits- und Richtungsmessung (Bachelorarbeit)

**Marcel Probst:** Charakterisierung von Wärmedämmstoffen für Vakuumwärmedämmung (Bachelorarbeit)

**Alexander Rath:** Entwicklung und Untersuchung von Mikrozirkulationsbremsen für Warmwasserspeicher (Bachelorarbeit)

**Nicole Rollinger:** CFD-gestützte Untersuchungen zu den Wärmetransportvorgängen in saisonalen Wärmespeichern (Bachelorarbeit)

**Dimitrios Romanas:** Untersuchung und Erprobung von kabellosen Sensoren für Behaglichkeitsmessungen (Studienarbeit)

**Jennifer Rösler:** Untersuchung verschiedener Verfahren der Partikelabscheidung anhand von CFD-Simulationen (Studienarbeit)

**Jan Rummel:** Weiterentwicklung eines TRNSYS-Modells für ein innovatives Strom-Wärme-Strom-Speichersystem mit Einbindung in ein Nahwärmesystem (Masterarbeit)

**Andre Saß:** Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Wärmedämmstoffen in einer Zweiplattenapparatur bei Variation der Messtemperatur und des Luftdrucks (Studienarbeit)

**Jessica Scheller:** Konzepte, Anwendungen und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für Hochtemperaturspeicher (Masterarbeit)

**Sascha Schnabel:** Konzeptionierung und Bewertung von RLT-Anlagenvarianten für Nichtwohngebäude (Masterarbeit)

**Johannes Schnitzer:** Untersuchung des interzonalen Luftaustauschs in Wohngebäuden (Masterarbeit)

**Rubin Sieber:** Einfluss des Fensterflächenanteils auf Vorgaben zum baulichen Wärmeschutz von Wohngebäuden mit Nah-/Fernwärmeversorgung (Bachelorarbeit)

**Janik Stiebing:** Gegenüberstellung von maschinellen Lernmethoden zur Modellbildung von Gebäudeenergiesystemen (Bachelorarbeit)

**Mateusz Szymanski:** Modellierung der solaren Einstrahlung und des Tageslichtverlaufs in TRNSYS (Masterarbeit)

**Raphael Tobisch:** Verfahren zu optischen Strömungsuntersuchungen in Luftverteilsystemen (Studienarbeit)

**Bamo Toufek:** Untersuchung der Luftströmungen innerhalb eines mehrzonigen Gebäudemodells (Studienarbeit)

**Marcel Traub:** Einfluss des Fensterflächenanteils auf Vorgaben zum baulichen Wärmeschutz von Wohngebäuden mit Luft-/Wasser-Wärmepumpe (Bachelorarbeit)

**Maximilian Weckerle:** Untersuchung der Wirtschaftlichkeit zentraler und dezentraler RLT-Anlagen (Bachelorarbeit)

**Marlon Weinert:** Ermittlung von Optimierungspotentialen an einer Ammoniak-Wasser-Absorptionswärmepumpe (Masterarbeit)

**Markus Weller:** Aufbau und Erprobung eines Versuchstands zur Visualisierung von Raumluftströmungen (Studienarbeit)

**Stefan Werner:** Erstellung eines Modells für die Beladungsleistung eines Eisspeichers mit unterschiedlichen Nukleationstemperaturen (Studienarbeit)

## Dissertationen

### Über den VdF HLK erhältlich

**Adili, Mohammad Reza**

Lüftungseffektivität von Wohnungslüftungsanlagen (WLA) und ihr Potential zur Energieeinsparung. Stuttgart 2019.

Universität Stuttgart Mitteilung Nr. 29, 2019

ISBN 978-3-9811996-8-0

### Online Publikationen Universität Stuttgart (OPUS)

**Bierling, Bernd**

Untersuchung des thermohydraulischen Förderverhaltens einer Thermosiphonpumpe bei unterschiedlichen Beheizungsarten. Stuttgart 2019.

### **Frank, Alexander**

Modellierung und Analyse der thermo-fluiddynamischen Vorgänge in Schaltschränken unter Berücksichtigung von Wärmestrahlung und Entropieproduktion. Stuttgart 2019.

### **Juschka, Winfried**

Modellgestützte Entwicklung von Kleinf Feuerungen für feste Biobrennstoffe. Stuttgart 2019.

### **Schäfer, Micha**

Modeling and Simulation of Closed Low-Pressure Adsorbers for Thermal Energy Storage. Stuttgart 2019.

## Ehrungen und Preise

### Otto F. Scharr-Preis

**Matthias Burr** konnte mit seiner Masterarbeit „Analyse zur Regelung Thermoaktiver Bauteilsysteme (TABS) unter Einsatz maschinellen Lernens“ die Jury des Otto F. Scharr-Preis für Energietechnik überzeugen und damit den 1. Platz belegen. Ziel des Preises ist es, besondere wissenschaftliche Leistungen auf dem Gebiet der Energietechnik zu fördern und anzuerkennen.

**Dr.-Ing. Rebecca Weber** belegte mit ihrer Dissertation „Experimentelle und numerische Untersuchung eines kombinierten Warmwasser-Sorptionswärmespeichers für thermische Solaranlagen“ den 2. Platz des Otto F. Scharr-Preis für Energietechnik.

### IVS-Award

**Jennifer Rösler** wurde vom Informatikverbund Stuttgart (IVS) für ihre Studienarbeit „Untersuchung verschiedener Verfahren der Partikelabscheidung anhand von CFD-Simulationen“ mit dem „IVS-Award“ ausgezeichnet. Mit der Auszeichnung werden sehr gute studentische Arbeiten mit Bezug zur Informatik geehrt.



## Vorgehen

Anhand eines Lüftungssystems für zwei Nutzungszonen werden die folgenden Untersuchungen vorgenommen.

- Durchführung einer Enumeration (Simulation jeder möglichen Variantenkombination), welche die in der Realität vorhandenen Freiheitsgrade (Anzahl, Positionierung, Dimensionierung und Arbeitsbereiche der Ventilatoren) bei der Kanalnetzplanung und im (KVS-) Betrieb abdeckt. Die Freiheitsgrade sind in Bild 1 und Bild 2 vereinfacht dargestellt. Die Kanalgeometrie bleibt dabei unverändert.
- Da ein überproportionaler Anstieg des Rechenaufwands der Enumeration mit der Kanalnetzgröße und -komplexität zu erwarten ist, soll anschließend die Anwendbarkeit eines genetischen Algorithmus, der zu den stochastischen Optimierungsverfahren zählt, untersucht werden. So genannte genetische Algorithmen zeichnen sich dadurch aus, dass ein Großteil an Kombinationen aufgrund einer „genetischen Selektion“ frühzeitig nicht mehr berücksichtigt werden muss und somit der Rechenaufwand erheblich gesenkt werden kann.
- Vergleich der Ergebnisse und der Rechenzeiten beider Optimierungsmethoden.
- Ermittlung des Energieeinsparpotentials gegenüber einem Referenzfall nach dem Stand der Technik.

- Ableiten einer Methodik zur Luftverteilungsoptimierung für Variable-Volumenstrom- (VVS-) Systeme.

## Ergebnisse

Nach einer geeigneten Eingrenzung der Freiheitsgrade des Lüftungssystems mit zwei Nutzungszonen auf die Anzahl, Positionierung, Dimensionierung und Arbeitsbereiche der Ventilatoren werden beide Optimierungsmethoden (Enumeration und genetischer Algorithmus) auf ihre Funktion geprüft. Die Ergebnisse zeigen, dass beide Methoden in der Lage sind, ein energetisches Optimum zu finden.

An einem konkreten Beispiel einer zweizonigen Luftverteilung sind dazu bereits bei der Enumeration 6,6 Mio. Berechnungen/Varianten für den Leistungsbedarf der Luftverteilung erforderlich. Der genetische Algorithmus hingegen benötigt nur 9.091 Berechnungen und Zwischenschritte für das Ergebnis. Im Gegensatz zur Enumeration erhöhen sich zudem der Rechenaufwand und die Anzahl berechneter Leistungsbedarfe nicht mit der Anzahl der Parametervarianten, sondern ausschließlich mit der Anzahl der vorgegebenen Volumenströme.

Dieses Resultat zeigt das erhebliche Potential des genetischen Algorithmus auf. Allerdings muss in weiteren Schritten geprüft werden, ob der Algorithmus unabhängig von der Komplexität der Freiheitsgrade ein energetisches Optimum finden kann, oder ob er unter bestimmten Umständen keine geeigneten Ergebnisse liefert.

Anhand des Beispiels der Lüftung mit zwei Nutzungszonen kann mit der Variation dieser vier Freiheitsgrade und der Daten realer Anlagentechnik bereits im KVS-Betrieb ca. 20% des Energieaufwands für den Lufttransport gegenüber einer Anlagenplanung und dem Betrieb nach dem Stand der Technik eingespart werden.

Im VVS-Betrieb wird dieses Einsparpotential wesentlich höher eingeschätzt. Aus diesem Grund sollen die Untersuchungen in diesem Bereich fortgesetzt werden.

## Literatur

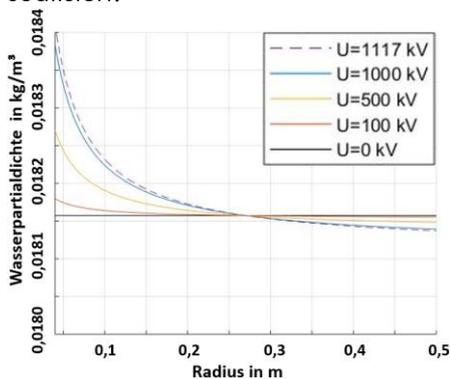
- [1] Alsen, N.; Klimmt, T.; Knissel, J. und Giesen, M., Abschlussbericht: Zum Forschungsprojekt: Einsatz dezentraler Ventilatoren zur Luftförderung in zentralen RLT-Anlagen insbesondere bei Nicht-Wohngebäuden. Kassel, Hess: Kassel University Press, 2019.
- [2] Schänzle, C.; Altherr, L.; Ederer, T.; Lorenz, U. und Pelz, P.: "As Good As It Can Be - Ventilation System Design By A Combined Scaling And Discrete Optimization Method," Veröffentlichung, Technische Universität Darmstadt, Universität Siegen, Darmstadt, Siegen, 2015.



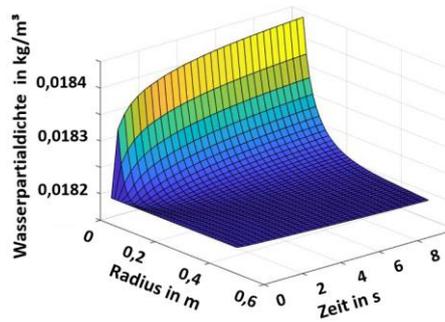
der Wassermoleküle zu identifizieren. An jeder Position entlang des Ringspalts stellt sich zwischen der Dielektrophorese und dem Konzentrationsgradienten eine Art Kräftegleichgewicht ein. Da der Prozess des Konzentrationsausgleichs durch Diffusion jedoch nicht als eine auf einzelne Moleküle wirkende Kraft beschrieben werden kann, ist zur Beschreibung der Effekte zu berücksichtigen, dass sich im Zylinderkondensator eine (rotationssymmetrische) Partialdichteverteilung des Wasserdampfes einstellt.

Die so genannte Dichtefunktionaltheorie ermöglicht diese Beschreibung aufgrund externer Kräfte (hier die Dielektrophorese) [2] und soll im Rahmen dieser Studie modelliert werden. Aufgrund des Feldstärkegradientenverlaufs im Zylinderkondensator wird in der Nähe der Innenelektrode eine höhere Wasserdampfpartialdichte erwartet.

Bei einem Außenelektrodenradius von 0,5 m, einem Innenelektrodenradius von 0,04 m, einer Länge von 1,0 m sowie unterschiedlichen angelegten Spannungen ist dieser Gleichgewichtsverlauf in Bild 3 visualisiert.



**Bild 3:** Gleichgewicht der Wasserdampfpartialverteilung bei unterschiedlichen Spannungen



**Bild 4:** Zeitliche Entwicklung der Wasserdampfpartialverteilung

Der Effekt der Dielektrophorese ist zwar vorhanden, aber stellt sich als zu klein heraus, um ihn für eine technische Entfeuchtung nutzbar zu machen.

Die Partialdichteverteilung unterliegt einer zeitlichen Entwicklung, welche in Bild 4 dargestellt ist. Theoretisch wird sich der Gleichgewichtszustand in Bild 3 erst nach unendlicher Verweilzeit im Kondensator einstellen, allerdings ist bereits nach einem Sekundenbruchteil eine quasi sprunghafte Entwicklung zu beobachten.

Aus diesem Grund wird auch die Untersuchung einer mehrfachen Abscheidung der Luft mit erhöhter Wasserdampfpartialdichte durchgeführt. Die Abscheidungen dieser Luftströme sollen dabei wie bei der Tropfenabscheidung über Hülsen (vgl. Bild 2) erfolgen.

Auch hier fällt die Wirkung hinsichtlich einer Luftentfeuchtung marginal aus.

Bei einer vierfachen Luftentfeuchtung wird bei gegebenen Randbedingungen (relative Luftfeuchte = 60%, Reduzierung des Luftvolumenstroms je Stufe um 50%, an die Volumenströme angepasste Geometrie und Spannungen) eine geringfügige Luftentfeuchtung von 0,1% berechnet. Zudem ist hervorzuheben, dass der entfeuchtete

Luftstrom aufgrund der Abscheidevolumenströme nur noch 1/8 des Eingangsluftstroms beträgt.

### Fazit

Das neuartige Prinzip zeigt für die Zielsetzung einer Wassertropfenabscheidung ein vielversprechendes Potential. Gegenüber dem Stand der Technik liegt aufgrund geringerer Druckabfälle ein wesentliches Energieeinsparpotential vor.

Die Aufgabe der Luftentfeuchtung in einem Zylinderkondensator hingegen ist für technische Anwendungen nicht ausreichend wirksam. In Zukunft sollen allerdings Möglichkeiten zur Realisierung durch weitere Ansätze wie bspw. der Einsatz von Membrantechnologie untersucht werden.

### Literatur

- [1] Demtröder, W. *Experimentalphysik 2*: Springer-Verlag.
- [2] Klink, C.; Planková, B. und Gross, J.: "Density Functional Theory for Liquid-Liquid Interfaces of Mixtures Using the Perturbed-Chain Polar Statistical Associating Fluid Theory Equation of State," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 54, no. 16, pp. 4633–4642, 2015.

# Überwachung der Raumströmung mit einem zweidimensionalen Strömungssensorsystem

Yuanchen Wang, Christian Lodroner

## Einleitung

Aufgrund der hohen Anforderungen an die Dichtheit von Gebäuden werden zur Sicherstellung der Raumluftqualität zunehmend Lüftungssysteme eingesetzt. Üblicherweise werden dabei verschiedene Parameter wie die Lufttemperatur, Feuchte oder CO<sub>2</sub>-Konzentration gemessen und zur Raumüberwachung oder zur Regelung der RLT-Anlagen verwendet. Die kontinuierliche Messung der Luftgeschwindigkeit wird hingegen nur für spezielle Anwendungsfälle (z.B. Reinräume) durchgeführt, obwohl Zugluft zu den häufigsten Ursachen für lokales Unbehagen empfinden der Raumnutzer zählt [1]. Das liegt nicht zuletzt an fehlenden kostengünstigen Messgeräten für diese Anwendung. Auf dem Markt sind für die Luftströmungsmessung viele verschiedene Anemometertypen erhältlich, jedoch ist keiner davon ideal für die kontinuierliche Messung in Innenräumen (Kriterien hierfür sind Messbereich, Genauigkeit, Ansprechzeit, Kosten, Größe sowie Robustheit) [4]. Aus diesem Grund wird in einem Forschungsvorhaben [5] der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF, FKZ: 19177N) der Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V. in Villingen-Schwenningen (HS-VS) und des Vereins der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik e.V. (VdF HLK) ein neues Sensorsystem entwickelt, das auf einem thermoelektrischen Messprinzip beruht und den Anforderungen für Messungen in Innenräumen gerecht wird. Das Forschungsvorhaben wird vom IGTE in Kooperation mit

HS-VS bearbeitet. Der Sensor ist in der Lage, neben dem Betrag auch die Richtung der Strömung in einer Ebene zu bestimmen. Mit der Vernetzung mehrerer Sensoren sollen Messdaten der Betriebszustände von RLT-Anlagen sowie der strömungstechnischen Vorgänge im Raum (insbesondere für Geschwindigkeiten bis 1 m/s) erfasst werden. In Verbindung mit der entsprechenden Regelungs- und Steuerungsstrategie kann auf diese Weise zur Optimierung des Anlagenbetriebs beigetragen werden.

## Funktionsweise

Die Messsonde besteht aus einem Siliziumchip mit einer Kantenlänge von ca. 2 mm, auf dem vier Thermopiles um ein quadratisches Heizelement herum angeordnet sind. Wird das Heizelement mit einer elektrischen Spannung beaufschlagt, so bildet sich ein Temperaturgradient aus. Wenn eine Luftströmung über den Sensorchip vorliegt, so wird dieser Gradient durch Konvektion in Strömungsrichtung verschoben, wodurch sich die Temperaturen an den Thermopiles entsprechend ändern. Aufgrund des thermoelektrischen Effekts tritt bei einer Temperaturdifferenz zwischen den Kontaktstellen der Thermopiles eine geringe elektrische Spannung auf. Durch die orthogonale Anordnung von vier Thermopiles kann durch Messung der Differenzspannungen der jeweils gegenüberliegenden Thermopiles der Betrag und die Richtung der Strömungsgeschwindigkeit bestimmt werden. Der Sensorchip wird in einem Kunststoffgehäuse verbaut und mit der Sensorelektronik verbunden

(Bild 1). Dort werden die Differenzspannungen gemessen und in Digitalsignale gewandelt.



Bild 1: Zweidimensionaler Strömungssensor (Kopfdurchmesser 15 mm)

## Tests im Kalibrierprüfstand

Die Funktionsmuster des Sensors werden auf einem motorisierten Drehtisch im Prüfstand platziert [6]. So lassen sich verschiedene Anströmwinkel innerhalb der Sensorebene einstellen. Werden die beiden Ausgangssignale eines Sensors bei Anströmung über einer 360°-Drehung aufgezeichnet, so resultieren eine sinusförmige und eine kosinusförmige Kurve der Signale. Hiermit lässt sich bereits der Strömungswinkel ermitteln. Für den Rückschluss auf den Betrag der Geschwindigkeit werden in den Prüfständen Kennlinien für die vier Hauptrichtungen des Sensors (0°, 90°, 180°, 270°) bestimmt. Da ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit und dem Ausgangssignal vorliegt, wird zur Bestimmung der Geschwindigkeit aus den Signalen eine Lookup-Tabelle verwendet. Bei Kalibrierungen wird nachgewiesen, dass der Sensor hinsichtlich Genauigkeit, Ansprechzeit sowie Messbereich den Anforderungen der Normen

DIN EN ISO 7726 und DIN EN 13182 gerecht wird [1], [3].

### Tests in anwendungsnahen Fällen

Mit mehreren Funktionsmustern des Sensors werden Versuche durchgeführt, unter anderem im Raumluftrömungslabor des IGTE. Im ersten Versuch wird der mit einem Ventilator erzeugte Zuluftstrom durch eine Weitwurfdüse in den Versuchsraum geleitet. Durch die symmetrische Versuchsanordnung kann der Strömungsverlauf als eben angenommen und mit den zweidimensionalen MEDIOR-Sensoren gemessen werden. In der Nähe der zweidimensionalen Sensoren werden richtungsunabhängige thermische Anemometer als Referenzgeräte installiert (Bild 2).

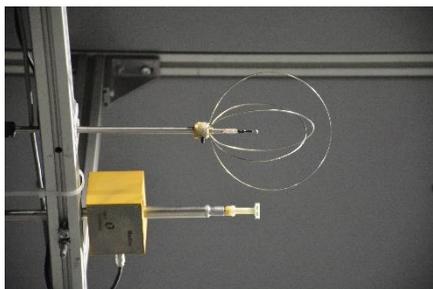


Bild 2: Referenzsensor (oben) und MEDIOR-Sensor (unten)

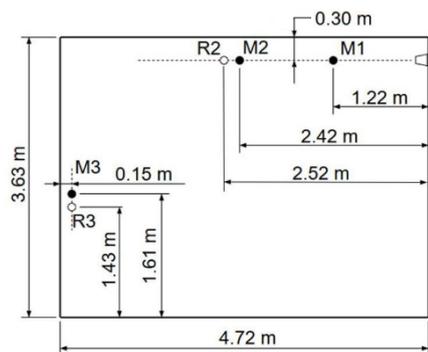


Bild 3: Position der Sensoren im Versuchsraum

In Bild 3 sind die Positionen der Sensoren (R: Referenzsensor und M: MEDIOR-Sensoren) im Versuchsraum eingezeichnet. Die Weitwurfdüse ist an der rechten Wandseite unterhalb der Decke positioniert. Vorab wird eine Strömungssimulation des Versuchs

durchgeführt (Bild 4). Der Zuluftstrom beträgt in diesem Versuch  $50 \text{ m}^3/\text{h}$ , wodurch eine Austrittsgeschwindigkeit an der Düse von ca.  $7 \text{ m/s}$  resultiert.

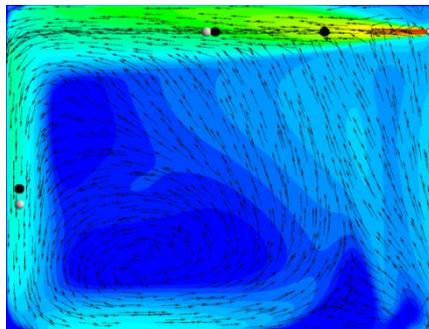


Bild 4: Strömungsbild

Die Messwerte der zweidimensionalen Sensoren stimmen mit den Messwerten der Referenzsensoren und mit den Ergebnissen der Strömungssimulation gut überein. In weiteren Versuchen wird unter anderem die thermische Auftriebsströmung über einem Heizkörper und die von einer Verdrängungslüftungsanlage erzeugte Strömung gemessen. Auch hier zeigt der mehrdimensionale Sensor eine gute Übereinstimmung mit den Referenzsensoren. Darüber hinaus liefert die zusätzliche Richtungsmessung mehr Informationen über die Strömung als beispielsweise ein richtungsunabhängiges thermisches Anemometer. Voraussetzung für den Einsatz des zweidimensionalen Sensors ist jedoch, dass die Strömung an der Messstelle in der Messebene des Sensors verläuft.

### Ausblick

Neue Versionen des Sensors verfügen über Funkmodule, mit denen in Zukunft mehrere Sensoren vernetzt werden sollen. Die Vernetzungsfähigkeit und die geringen Kosten bieten vor allem im Smart Home-Bereich ein großes Anwendungspotential. Neben konstruktiven Optimierungen der Gehäusegeometrie ist ebenfalls geplant, eine dreidimensionale Messung der Strömung

umzusetzen, was die Zahl der möglichen Anwendungen des Sensors wesentlich erhöhen würde. Dies soll durch eine Kombination des zweidimensionalen Sensors mit einem richtungsunabhängigen thermischen Anemometer umgesetzt werden.

### Literatur

- [1] DIN EN ISO 7726: Umgebungsklima - Instrumente zur Messung physikalischer Größen, April 2002
- [2] DIN EN ISO 7730: Ergonomie der thermischen Umgebung, Mai 2006
- [3] DIN EN 13182: Lüftung von Gebäuden - Gerätetechnische Anforderungen für Messungen der Luftgeschwindigkeit in belüfteten Räumen, Dezember 2002
- [4] Wang, Y.; Lodroner, C.; Müller, M.; Stergiaropoulos, K.: Monitoring of Indoor Airflows with a New Two-Dimensional Airflow Sensor. 2019. In: CLIMA 2019, Bukarest, Vol. 111
- [5] Abschlussbericht zum IGF-Vorhaben „Entwicklung eines mehrdimensionalen Strömungssensorsystems“ 2019.
- [6] Wang, Y.; Müller, M.; Stergiaropoulos, K.: Development of a Test Bench for the Calibration of a two-dimensional Velocity Sensor for low Airflows. 2018. In: Roomvent & Ventilation, Espoo.

# Modellierung und Beurteilung der Luftströmungen im pneumatischen System von Kirchenorgeln

Tobias Henzler, Matthias Hartnagel

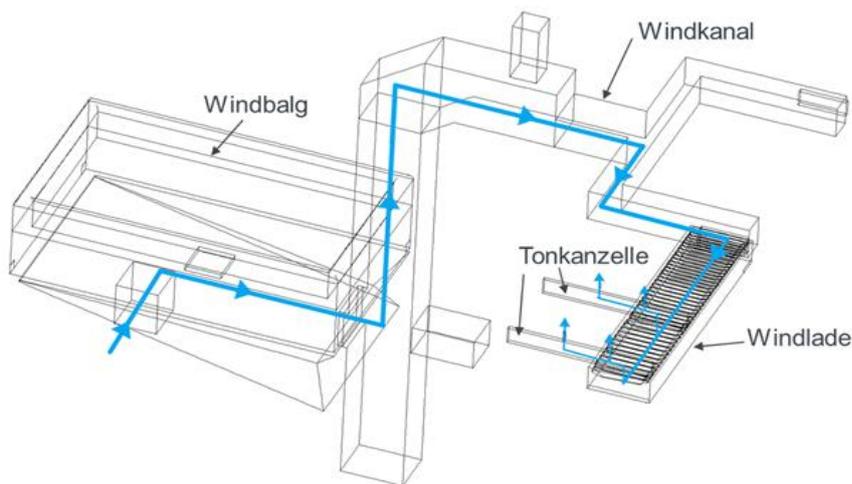
## Hintergrund

In Kirchenorgeln ist in den letzten Jahrzehnten ein zunehmender Schimmelpilzbefall festzustellen. Laut Schätzungen des Bundes Deutscher Orgelbaumeister e.V. ist mittlerweile davon auszugehen, dass jede dritte Orgel einen Schimmelpilzbefall aufweist [1]. Der Befall kann dabei einerseits im Orgelraum (im Inneren des Orgelgehäuses) sowie andererseits im pneumatischen System der Orgel auftreten. Exemplarisch zeigt Bild 1 den Schimmelpilzbefall (heller Bewuchs) an den Tonventilen einer Windlade des pneumatischen Systems.



**Bild 1: Schimmelpilzbefall an Tonventilen**

Insbesondere das pneumatische System ist nur in sehr begrenztem Maße von außen zugänglich, um Bauteile optisch zu prüfen oder ohne großen Aufwand zu reinigen. Eine entsprechende Reinigung ist daher aufgrund der erforderlichen Demontage mit hohen Kosten für die Kirchengemeinde verbunden. Aus diesem Grund werden in einem Forschungsvorhaben [2] der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF, FKZ: 18891 BG) des Trägervereins Institut für Holztechnologie



**Bild 2: Strömungspfad bei der betrachteten Bespielsituation**

Dresden e.V. (TIHD) und des Vereins der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik e.V. (VdF HLK) neue Lösungsansätze zur Vermeidung von Schimmelpilzbefall in Kirchenorgeln untersucht. Die Bearbeitung erfolgt in Kooperation mit dem Institut für Holztechnologie Dresden (IHD) und dem Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. (IDK).

## Ziele

Im Vorhaben sollen Maßnahmen erarbeitet und beurteilt werden, mit denen einem Schimmelpilzbefall vorgebeugt werden kann. So stellen die Untersuchung von technischen Maßnahmen zur Beeinflussung der eintretenden Luftströmung und die Entwicklung eines numerischen Modells zur Abschätzung des Schimmelpilzrisikos im pneumatischen System wesentliche Zielsetzungen dar. Am IGTE werden dazu

Simulationsmodelle erstellt, mit denen das Strömungsverhalten auch in unzugänglichen Bereichen des pneumatischen Systems abgebildet und damit für Schimmelpilzbildung kritische Bereiche identifiziert werden können.

## Vorgehen

Am Beispiel des geometrischen Aufbaus einer charakteristischen Orgel (Kirche St. Kunigunden in Pirna) werden die numerischen Untersuchungen zu den Luftströmungen im pneumatischen System der Orgel vorgenommen. Die Strömungsvorgänge werden dazu mit der CFD-Software ANSYS Fluent dreidimensional dargestellt. In Bild 2 ist ein angenommener Strömungspfad, der bei einer typischen Bespielung innerhalb der Orgelkomponenten vorliegt und im Weiteren untersucht wird, schematisch dargestellt. In einem ersten Schritt

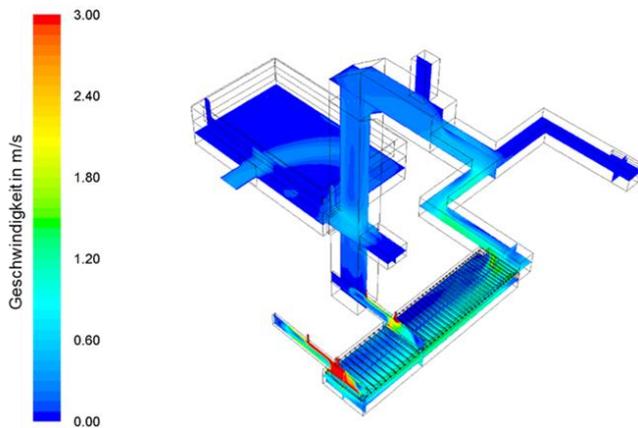


Bild 3: Geschwindigkeitsverteilung im Gesamtmodell

werden vier Hauptbereiche (Windbalg, Windkanal, Windlade und Orgelpfeifen) in Einzelmodellen abgebildet und die Strömungen in diesen Komponenten detailliert betrachtet. Für die vier dargestellten Bereiche werden charakteristische Randbedingungen für einen Sommer- und Winterfall herangezogen sowie damit kritische Teilbereiche im pneumatischen System identifiziert. Als kritische Bereiche für eine Schimmelpilzbildung werden solche Bereiche angesehen, die niedrige Oberflächentemperaturen bei hohen relativen Luftfeuchten, niedrige Geschwindigkeiten und eine hohe Partikelkonzentration aufweisen.

Im zweiten Schritt werden die Einzelmodelle ohne Berücksichtigung der für die Gesamtströmung irrelevanten Orgelpfeifen zu einem Gesamtmodell zusammengefügt.

### Ergebnisse

Exemplarisch werden die Ergebnisse für die Luftgeschwindigkeit des Gesamtmodells in Bild 3 gezeigt. Hierbei lassen sich folgende Teilbereiche als kritisch für Schimmelpilzbefall ableiten:

- Windbalg: Bereiche des Magazinbalgs außerhalb der Kurzschlussströmung in Richtung Windkanal sowie der Schöpfbalg,

- Windkanal: Bereich unterhalb des Eintritts in den Windkanal,
- Windlade: Eckbereiche, Bereiche zwischen den Tonventilen, Enden der Tonkammern.

Die Verbindungskanäle in die anderen Stockwerke der Orgel bzw. zur benachbarten Windlade zeigen zwar Bereiche mit sehr niedrigen Luftgeschwindigkeiten, dies liegt aber an der angenommenen Bespielung mit nur einer Windlade.

Für die weitere Auswertung werden so genannte Iso-Flächen verwendet. Diese stellen innerhalb der blau markierten Fläche Luftgeschwindigkeiten  $>0,2$  m/s dar, wohingegen außerhalb der Fläche diese geringer als  $0,2$  m/s ist. Bezüglich der Identifikation von kritischen Bereichen stellt eine Luftgeschwindigkeit von  $0,2$  m/s einen Grenzwert dar, bei dem sich Partikel  $<100 \mu\text{m}$  noch in Schwebelage befinden [3].

Bild 4 zeigt die Iso-Fläche von  $0,2$  m/s im Gesamtmodell des pneumatischen Systems. Auch mit dieser Darstellung lassen sich die kritischen Bereiche innerhalb des pneumatischen Systems erkennen. Abschließend erfolgt zur Überprüfung des Strömungsmodells ein qualitativer Vergleich mit visuellen Untersuchungen der Orgelkomponenten in zugänglichen Bereichen.

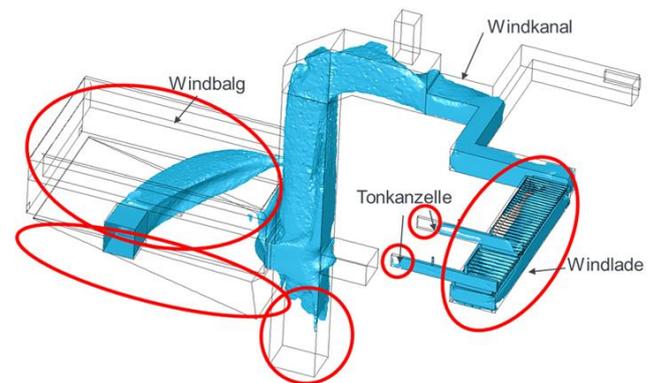


Bild 4: Iso-Flächen mit  $0,2$  m/s im Gesamtmodell

Der dort festgestellte Schimmelpilzbefall deckt sich gut mit den im Modell identifizierten kritischen Teilbereichen.

### Fazit

Die Abbildung des pneumatischen Orgelsystems in einem dreidimensionalen Strömungsmodell ermöglicht die Identifikation von kritischen Bereichen für Schimmelpilzbefall. Vergleichende Betrachtungen mit Befallsuntersuchungen decken sich mit den im Strömungsmodell als kritisch dargestellten Bereichen. Somit eignen sich die Strömungsmodelle, um Strömungen insbesondere in nicht zugänglichen Bereichen zu visualisieren sowie die Wirkung von möglichen Verbesserungsmaßnahmen einzuschätzen.

### Literatur

- [1] BR-KLASSIK: <https://www.br-klassik.de/aktuell/news-kritik/orgelbaumeister-regensburg-klimawandel-problem-schimmel-100.html>. 2018. Abgerufen am 24.10.2019.
- [2] Abschlussbericht zum IGF-Vorhaben „Entwicklung technischer Verfahren zur Vermeidung der biogenen Schadstoffbelastung in Kirchenorgeln“ 2019.
- [3] Rüter, C.: Die Wege von Staub im Umfeld des Menschen. Springer Verlag 2016.

# CAMaRSEC- Klimaangepasste Materialforschung für den sozio-ökonomischen Kontext in Vietnam

Dirk Schwede, Yuanchen Wang

Im Juli 2019 hat in der Arbeitsgruppe „Systemintegration und Nachhaltige Gebäude“ am IGTE das internationale Verbundprojekt CAMaRSEC „Climate-Adapted Material Research for the Socio-Economic Context of Vietnam“ begonnen. Das Projekt wird von Dr. Dirk Schwede geleitet und wird im CLIENT II Programm des BMBF mit einer Laufzeit von 36 Monaten unter dem Förderkennzeichen 01LZ1804 mit 2,1 Mio. Euro gefördert.

## Einleitung

In Vietnam findet derzeit ein rascher wirtschaftlicher und sozialer Wandel statt, der zu veränderten Lebensstilen und neuen Anforderungen an die gebaute Umwelt führt. Es werden neue Gebäudetypologien mit Materialien, Konstruktionen und gebäudetechnischen Systemen entwickelt, die bisher in Vietnam nicht üblich waren. Mit den Komfortansprüchen ändert sich auch das Raumklima und die eingesetzten Baumaterialien sind neuen Raumklimabedingungen ausgesetzt, während das Außenklima extrem heiß und feucht ist. In den neuen Wohnhochhäusern (Bild 1) sind herkömmliche klimaangepasste Betriebs- und Verhaltensweisen der Bewohner (z.B. natürliche Belüftung, Ortswechsel im Gebäude [1,2]) nicht mehr wirksam, und es werden neue Technologien für die Raumklimatisierung installiert. Es werden auch neue Materialien eingesetzt, was unter den gegebene-

nen Bau- und Klimabedingungen oft zu Bauschäden führt.

## Hintergrund

Die Ressourcenverknappung und der Klimawandel wurden auch in Vietnam als dringende Probleme erkannt. Daher sind wirksame Strategien und Technologien zur Energieeinsparung und Ressourcenschonung dringend erforderlich, um den Energiebedarf für die Komfortkühlung, die Entfeuchtung und die Beheizung von Gebäuden zu senken.

Die Materialflüsse im Bausektor (z.B. die Zementnachfrage in Vietnam wird von 2015 bis 2020 um 66% steigen [3]) und der Energiebedarf (z.B. wird sich die Stromnachfrage bis 2030 gegenüber 2015 verdreifachen [4]) tragen erheblich zu diesen Problemen in Vietnam und anderen Ländern bei. In diesem Zusammenhang fördert die vietnamesische Bauindustrie derzeit auch die Verwendung von ungebrannten Ziegeln als Wandmaterial, um Energie und Umweltverschmutzung durch die Erzeugung und den Verbrauch von Ackerland zur Herstellung von Ton zu verringern. Als Ersatz werden Mauersteine aus alternativen Werkstoffen wie Porenbetonsteinen und Betonhohlsteinen beworben. Solche neuen Materialien erfordern jedoch angepasste Technologien sowie die Verarbeitung und Integration in das Gebäudesystem, um die auf dem Markt etablierten



Bild 1: Wohnhochhaus in Hanoi

Technologien dauerhaft und nachhaltig zu ersetzen. Insbesondere der Feuchteschutz ist in diesem Zusammenhang von großer Bedeutung.

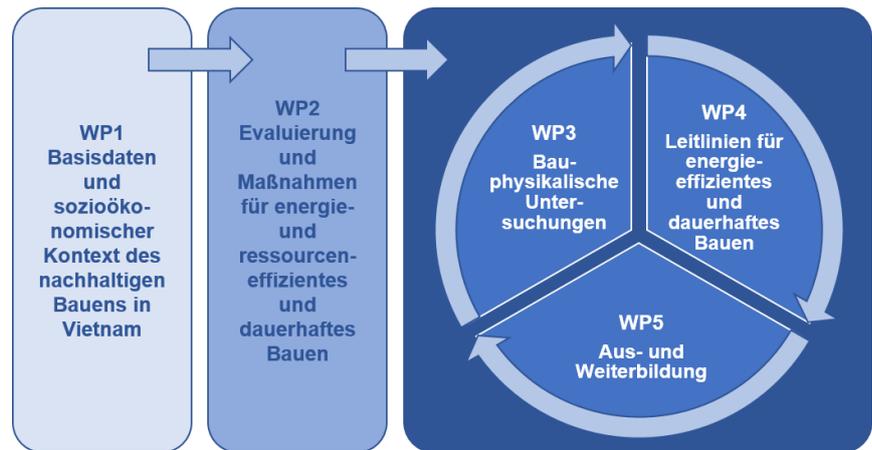
Bauschäden mit neuen Bausystemen, wie Risse im Putz oder das Eindringen von Feuchtigkeit, werden eine solche neue Baupraxis diskreditieren und sind daher für eine nachhaltige Entwicklung nachteilig. Derzeit liegen jedoch keine ausreichenden Kenntnisse über die physikalischen Eigenschaften von Baumaterialien in der vietnamesischen Bauindustrie vor, und es stehen keine Einrichtungen zur Prüfung und Charakterisierung von Baumaterialien zur Verfügung. Das CAMaRSEC-Projekt hat daher das Ziel, notwendige Forschungseinrichtungen als Grundlage für eine wissenschaftlich fundierte Materialcharakterisierung und die Entwicklung von Baustoffsystemen zu entwickeln.

## Arbeitsplan

Das Projekt ist in 5 Arbeitspakete gegliedert (vgl. Bild 2). Der Arbeitsumfang reicht von der Erhebung grundlegender Daten zum sozioökonomischen Kontext bis zum Governance- und Stakeholder-Kontext für energieeffizientes, ressourceneffizientes und insgesamt nachhaltiges Bauen in Vietnam in WP1. Das zweite Arbeitspaket WP2 konzentriert sich auf die technischen Aspekte der aktuellen Baupraxis und eine verbesserte Baupraxis als Ziel der zukünftigen Entwicklung. In WP3 werden verschiedene bauphysikalische Untersuchungsmethoden entwickelt, darunter die Einrichtung eines Labors, einer Testanlage im Freien und eines mobilen Testkits für Gebäudeaudits. Das Thema „Governance für energieeffizientes und nachhaltiges Bauen in Vietnam“ wird in WP4 behandelt, und WP5 befasst sich mit der Aus- und Weiterbildung auf den verschiedenen Ebenen der Bauwirtschaft, angefangen von der Hochschulausbildung über die Ausbildung von Bauarbeitern bis hin zur Ausbildung von Laborpersonal.

## Gebäudeaudits

Als Grundlage für die folgenden Untersuchungen wird eine Umfrage unter Bewohnern von 1.000 Wohnungen (500 in Hanoi und 500 in Ho Chi Minh City (HCMC)) durchgeführt, um den Kontext des Wohnens in neuen Wohnhochhäusern zu ermitteln. Es werden weiterhin in 100 Wohnungen (50 in Hanoi und 50 in HCMC) über



**Bild 2: Arbeitspakete und Projektablauf**

einen Zeitraum von einem Jahr grundlegende Raumluftbedingungen (Temperatur, Feuchte, CO<sub>2</sub>-Konzentration) gemessen, um die Raumklimaqualität und die vorherrschenden Betriebsweisen der Gebäude in modernen Wohnumgebungen zu dokumentieren. Detaillierte Audits und Messungen der Raumluftqualität und thermische Behaglichkeit werden in 20 Wohnungen durchgeführt (10 in Hanoi und 10 in HCMC). Diese Audits dokumentieren auch die installierte Gebäudeausrüstung und Gebäudeschäden.

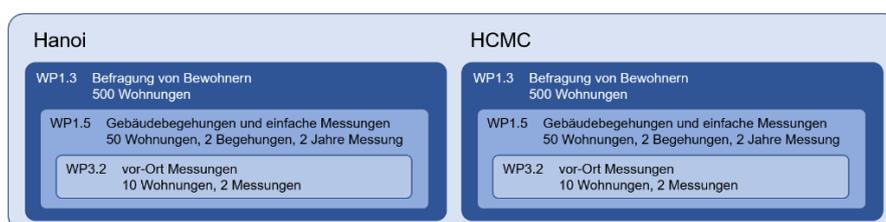
## Forschungsinfrastruktur

In WP3 werden eine Reihe von Forschungs- und Prüfeinrichtungen zur Materialforschung, -prüfung und -charakterisierung sowie zur Beurteilung von Bausystemen und Gebäuden entwickelt. Neben einem mobilen Testkit für Gebäudeaudits wird mit Unterstützung des CAMarSEC-Industriepartners TAURUS ein Konzept für ein bauphysikalisches Labor entwickelt

und teilweise umgesetzt. Als zweites Produkt ist auf einem Gelände außerhalb von Hanoi eine Freilandversuchsanlage geplant, ähnlich der Freilandversuchsanlage des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) in Holzkirchen.

## Literatur

- [1] Schwede, D, Waibel, M, Hesse, C, Nhien, NT (2016), "Promoting Climate Adapted Housing and Energy Efficient Buildings in Vietnam: Chances and Challenges". In: "Sustainable Ho Chi Minh City – Climate Policies for Emerging Megacities", Springer Verlag, ISBN 978-3-319-0414-3
- [2] Schwede, D, Hesse, C (2014), "HCMC: Climate-adapted Townhouses". In: "Space Planning and Design – Integrated Planning and Design Solutions for Future Megacities", Jovis Verlag, Future Megacities Vol. 5, ISBN 978-3-86859-277-1
- [3] GTAI Germany Trade & Invest, "Branchenanalyse: Bauwirtschaft in Vietnam", 20.6.2017 (online, abgerufen 17.11.2017)
- [4] Asian Development Bank and Asian Development Bank Institute. Viet Nam: Energy sector assessment, strategy, and road map. Mandaluyong City, Philippines: Asian Development Bank, 2016 (online, abgerufen 18.11.2017)



**Bild 3: Forschungsplan für Nutzerbefragungen und Messungen**

# Absenkung der Rücklauftemperatur im Fernwärmesetz

Nico Mirl, Klaus Spindler

## Einleitung

Im Zuge einer energetischen Sanierung der Gebäudehülle von Bestandsgebäuden kann das benötigte Temperaturniveau der Heizsysteme verringert werden. Sind diese Gebäude an einem Fernwärmesetz angeschlossen, wird dieses Potenzial oft nicht genutzt. Aufgrund einzelner Wärmeabnehmer im Fernwärmesetz, welche ein hohes Temperaturniveau von 90 °C bis 140 °C benötigen, kann die Fernwärmeverlauftemperatur in diesen Netzen oft nicht abgesenkt werden. Dementsprechend kann für die sanierten Gebäude ein großer Teil des exergetischen Potenzials nicht genutzt werden. Auch die Rücklauftemperatur dieser Fernwärmesetze ist mit ca. 50 °C ebenfalls hoch. Durch eine Absenkung der Fernwärmerücklauftemperatur kann die Effizienz des gesamten Fernwärmesystems erheblich gesteigert werden. Beispielsweise wird die Brennstoffausnutzung bei der Wärmeerzeugung durch eine erhöhte Auskühlung des Abgases und eine zusätzliche Brennwertnutzung erhöht. Zudem kann bei gleichbleibendem Wärmebedarf durch die bessere Ausnutzung des Fernwärmesetzes beispielsweise der Massenstrom und die Pumpenleistung reduziert werden. Alternativ können mehr Gebäude an ein bestehendes Fernwärmesystem angeschlossen werden.

Am IGTE wird im Projekt „Potenziale von Absorptionswärmepumpen in zentralisierten Wärmeversorgungsnetzen (PARTA)“ eine Möglichkeit untersucht, die Fernwärmerücklauftemperatur deutlich unter

die Rücklauftemperatur der Hausnetze abzusenken. Dazu wird eine neuartige Hausstation mit integrierter Absorptionswärmepumpe (AWP) entwickelt.

## Anlagenbeschreibung

Das vereinfachte Prozessschema der Hausstation mit integrierter Ammoniak-Wasser-AWP ist in Bild 1 dargestellt. Bei diesem Konzept wird zunächst das hohe Temperaturniveau des Fernwärmeverlaufs für den Antrieb der AWP verwendet. Im Zahlenbeispiel beträgt die Fernwärmeverlauftemperatur  $\vartheta_{FW,VL} = 110 \text{ °C}$ . Anschließend wird ein in Hausstationen üblicher Hauptwärmeübertrager (HWÜ) zur direkten Wärmeübertragung an das gebäudeseitige Heizungsnetz durchströmt. Die Temperatur des aus dem HWÜ austretenden Fernwärmewassers entspricht an diesem Punkt der Rücklauftemperatur von

bisherigen Hausstationen. Im Zahlenbeispiel beträgt diese Temperatur  $\vartheta_{FW,HWÜ,aus} = 42 \text{ °C}$ . Die Rücklauftemperaturabsenkung des Fernwärmesetzes wird erreicht, wenn dieses den Verdampfer der AWP durchströmt und so auf niedrigerem Temperaturniveau der AWP den Wärmestrom  $\dot{Q}_V$  zuführt. Im Zahlenbeispiel beträgt die Temperatur des Fernwärmerücklaufs  $\vartheta_{FW,RL} = 32 \text{ °C}$ . Es wird somit eine Rücklauftemperaturabsenkung  $\Delta\vartheta_{RL} = \Delta\vartheta_V = 10 \text{ K}$  erzielt.

Aus der Energiebilanz des Prozesses folgt, dass die gesamte Wärme, die der Absorptionswärmepumpe zugeführt wird, für die Erwärmung des Heizungswassers genutzt werden kann. Die Erwärmung des Heizungswassers erfolgt durch Wärmeabgabe der AWP am Absorber  $\dot{Q}_{Abs}$  und am Kondensator  $\dot{Q}_K$ . Parallel zur AWP wird das Heizungswasser direkt im HWÜ erwärmt.

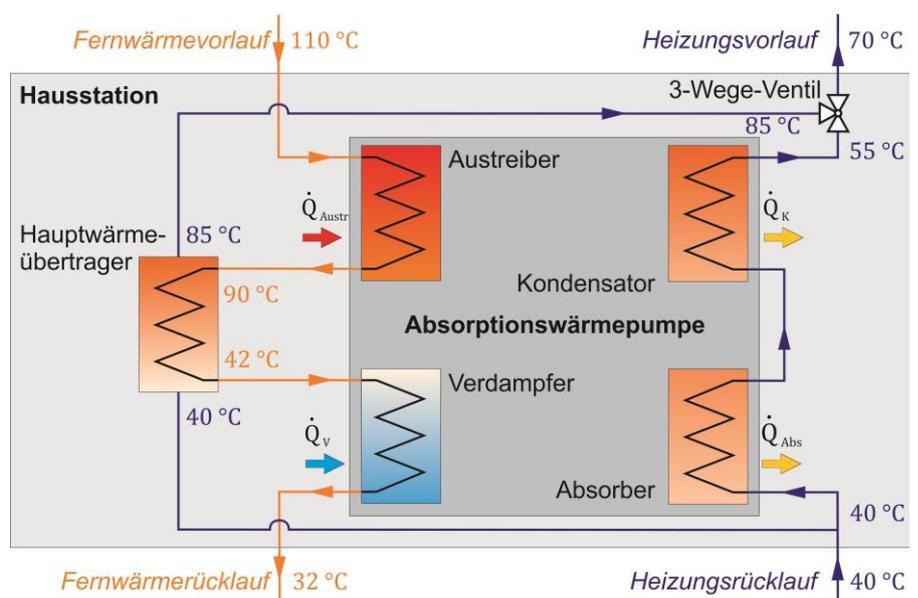


Bild 1: Vereinfachtes Anlagenschema der Hausstation mit integrierter Absorptionswärmepumpe

Im Zahlenbeispiel beträgt die Temperatur des Heizungswassers nach dem HWÜ  $\vartheta_{HW,HWÜ,aus} = 85\text{ °C}$ . Die Temperatur des Heizungswassers am Austritt aus der AWP beträgt  $\vartheta_{HWÜ,AWP,aus} = 55\text{ °C}$ . Durch die Mischung der beiden Teilströme resultiert schließlich die Heizungsvorlauftemperatur zu  $\vartheta_{HW,VL} = 70\text{ °C}$ . Im Projektverlauf konnte aufgezeigt werden, dass diese Verschaltung das Temperaturniveau des Fernwärmenetzes am effektivsten nutzt.

Neben dem thermischen Antrieb der AWP im Austreiber wird für den Betrieb eine Lösungsmittelpumpe 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. Da der thermische Antrieb für die AWP im Fernwärmenetz im Vergleich zu einer derzeit üblichen Hausstation keinen Mehraufwand darstellt, ist dieser Faktor direkt mit der Leistungszahl von Kompressionswärmepumpen vergleichbar.

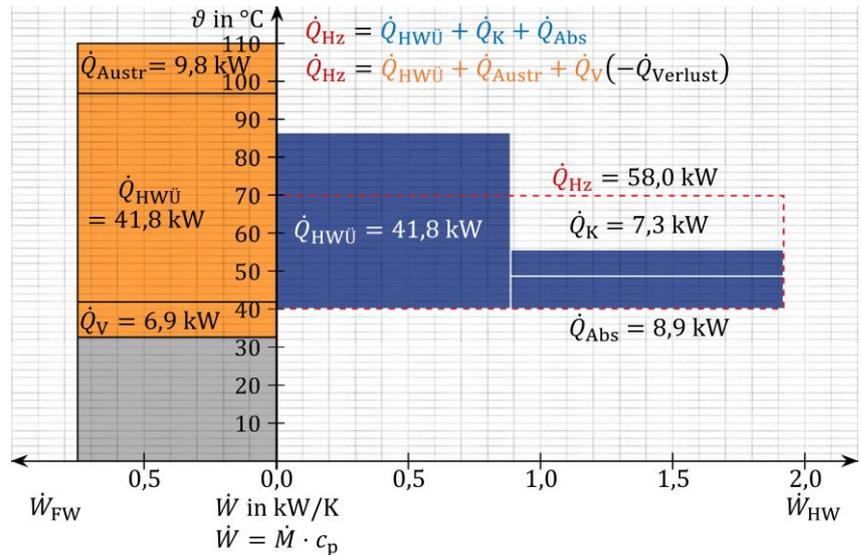


Bild 2: Darstellung der Wärmeströme innerhalb der Hausstation in BP 1

**Erzielte Rücklauftemperaturabsenkung**

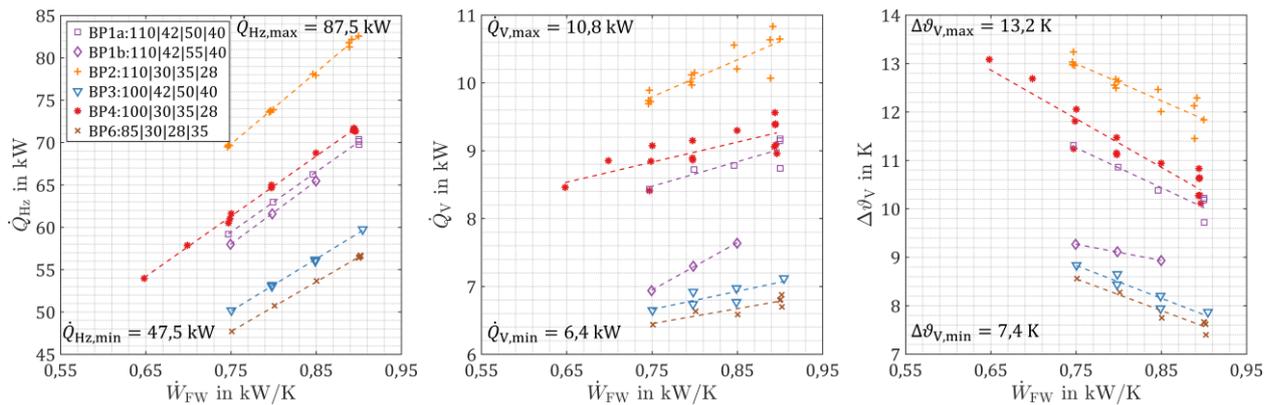
Die Betriebspunkte (BP) für ein Kennfeld sind in Tabelle 1 aufgeführt. Durch eine theoretische Betrachtung konnte in einer Vorstudie die Kombination aus einem Niedertemperaturfernwärmenetz und einer Radiatorheizung ausgeschlossen werden. Für BP 5 werden deshalb keine Messungen durchgeführt. In diesem Betriebspunkt liegt zudem beim Einsatz einer derzeit üblichen Hausstation, bestehend aus einem Hauptwärmeübertrager, kaum ein Exergieverlust vor, weshalb das neuartige Konzept nicht

sinnvoll einsetzbar ist. Bei BP 1 und BP 3 wird der Heizungskreislauf im Absorber und im Kondensator nur von  $\vartheta_{HW,RL} = 40\text{ °C}$  auf  $50\text{ °C} < \vartheta_{AWP,aus} < 55\text{ °C}$  erwärmt. Die Heizungsvorlauftemperatur von  $\vartheta_{HW,VL} = 70\text{ °C}$  wird durch eine Beimischung des im Hauptwärmeübertrager erwärmten Heizungswassers erreicht. Bei den Betriebspunkten 2, 4 und 6 wird der Heizungskreislauf in der Absorptionswärmepumpe (im Absorber und Kondensator) von  $\vartheta_{HW,RL} = 28\text{ °C}$  auf  $\vartheta_{AWP,aus} > 35\text{ °C}$  erwärmt.

Tabelle 1: Angestrebte Betriebspunkte, die innerhalb des Projektes PARTA vermessen werden

Betriebspunkt (BP)	Austreiber-Eintritt $\vartheta_{FW,Austr,ein} = \vartheta_{FW,VL}$	Verdampfer-Eintritt $\vartheta_{FW,V,ein} = \vartheta_{FW,HWÜ,aus} = \vartheta_{HW,RL} + 2\text{ K}$	Heizung-VL $\vartheta_{HW,VL}$	Heizung-RL $\vartheta_{HW,RL}$	Beschreibung
1	110 °C	42 °C	70 °C	40 °C	HT <sup>1</sup> -Fernwärmenetz Radiatorheizung
2	110 °C	30 °C	35 °C	28 °C	HT <sup>1</sup> -Fernwärmenetz Fußbodenheizung
3	100 °C	42 °C	70 °C	40 °C	MT <sup>2</sup> -Fernwärmenetz Radiatorheizung
4	100 °C	30 °C	35 °C	28 °C	MT <sup>2</sup> -Fernwärmenetz Fußbodenheizung
5	85 °C	42 °C	70 °C	40 °C	NT <sup>3</sup> -Fernwärmenetz Radiatorheizung
6	85 °C	30 °C	35 °C	28 °C	NT <sup>3</sup> -Fernwärmenetz Fußbodenheizung

<sup>1</sup>Hochtemperatur, <sup>2</sup> Mitteltemperatur, <sup>3</sup>Niedertemperatur



**Bild 3:** Gesamtwärmestrom der Hausstation mit Absorptionswärmepumpe (links), zusätzlich dem Fernwärmenetz entnommener Wärmestrom (Mitte) und erreichte fernwärmeseitige Rücklauf-temperaturabsenkung (rechts) aufgetragen über dem fernwärmeseitigen Wärmekapazitätsstrom in den verschiedenen Betriebspunkten.

In Bild 2 ist am Beispiel des BP 1 die Aufteilung der übertragenen Wärmeströme auf die einzelnen Komponenten der Hausstation dargestellt. Auf der Abszisse ist der fernwärmeseitige Wärmekapazitätsstrom  $\dot{W}_{FW}$  nach links und der heizungsseitige Wärmekapazitätsstrom  $\dot{W}_{HW}$  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. Die Flächen in dem Diagramm entsprechen somit dem übertragenen Wärmestrom. Aus der Energiebilanz der Hausstation folgt, dass die fernwärmeseitigen Wärmeströme am Ausreiber  $\dot{Q}_{Austr}$  und am Verdampfer  $\dot{Q}_V$  den heizungsseitigen Wärmeströmen am Kondensator  $\dot{Q}_K$ , am Absorber  $\dot{Q}_{Abs}$  und den Wärmeverlusten der Absorptionswärmepumpe entsprechen. Auch am Hauptwärmeübertrager müssen die beiden Wärmeströme  $\dot{Q}_{HWÜ}$  und damit die Flächen im Diagramm gleich groß sein. Mit dem fernwärmeseitigen Austritt aus dem Ausreiber mit  $\vartheta_{FW,Austr,aus} = 96$  °C kann das Heizungswasser im Hauptwärmeübertrager über  $\vartheta_{HW,VL} = 70$  °C hinaus erwärmt werden. Dies hat

den Vorteil, dass die nötige Temperaturerhöhung innerhalb der Absorptionswärmepumpe durch eine Mischung der beiden Teilströme geringer ausfallen kann. Die Absorptionswärmepumpe arbeitet damit in einem effizienteren Betriebspunkt. Im Diagramm ist die Mischung mit  $\dot{Q}_{Hz}$  ebenfalls eingezeichnet. Durch die Mischung der beiden Teilströme kann der gesamte Wärmestrom  $\dot{Q}_{Hz}$  bei einer heizungsseitigen Vorlauf-temperatur von  $70$  °C bereitgestellt werden. Auf der Fernwärmeseite beträgt die Rücklauf-temperatur in diesem Betriebspunkt  $\vartheta_{FW,RL} = 33$  °C, bei einer heizungsseitigen Rücklauf-temperatur von  $\vartheta_{HW,RL} = 40$  °C.

Die Ergebnisse des Betriebskennfeldes sind in Bild 3 dargestellt. Auf der Abszisse ist jeweils der fernwärmeseitige Wärmekapazitätsstrom aufgetragen. Im linken Diagramm ist die Gesamtheizleistung der Hausstation  $\dot{Q}_{Hz}$  in den verschiedenen Betriebspunkten dargestellt. Wie bei den bisherigen Hausstationen auch, ist die Gesamtheizleistung sehr gut über den fernwärmeseitigen Massenstrom, bzw. Wärmekapazitätsstrom, einstellbar. Im mittleren Diagramm ist der im Verdampfer der AWP zusätzlich gewonnene Wärmestrom aufgetragen. Auch dieser Wärmestrom wird

mit einer Absenkung des fernwärmeseitigen Massenstroms verringert, wobei die Steigung deutlich niedriger ist. Hierdurch ist im Teillastfall, also bei geringerem Massenstrom, der Anteil des zusätzlich gewonnenen Wärmestroms an der Gesamtheizleistung sogar größer. Im rechten Diagramm kann die erreichte Rücklauf-temperaturabsenkung abgelesen werden. Diese beträgt in den Messungen zwischen  $7,4$  K und  $13,2$  K, wobei bei geringerem fernwärmeseitigem Wärmekapazitätsstrom die erzielte Rücklauf-temperaturabsenkung größer wird. Das zur Verfügung stehende Potenzial wird somit besser genutzt.

### Danksagung

Diese Arbeit basiert auf einem Projekt (IGF-Vorhaben-Nr."19696 N/2"), das im Rahmen des "Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)" vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) auf der Grundlage einer Entscheidung des Deutschen Bundestages unterstützt wird. Das Projekt wird gemeinsam mit dem Fernwärme Forschungsinstitut (FFI) bearbeitet. Die Autoren möchten sich hiermit für die Unterstützung bedanken.

# Anlagen-Monitoring und Simulation eines Wärmepumpen-Heizsystems mit PVT-Kollektoren als Wärmequelle

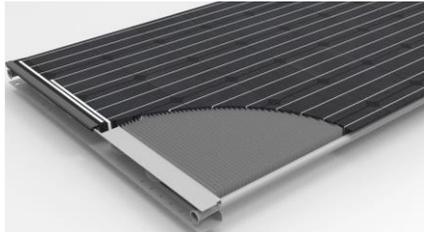
Sebastian Asenbeck, Stephan Fischer

## Kurzfassung

Das Monitoring einer Feldtest-Anlage zeigt die Eignung eines speziell entwickelten PVT-Kollektors als alleinige Wärmequelle für eine Wärmepumpe. Potentiale zur Effizienzsteigerung durch Lastmanagement oder den Einsatz einer leistungsge-regelten Inverter-Wärmepumpe werden mit Systemsimulationen aufgezeigt.

## Einleitung

Wärmepumpen finden im Bereich der Gebäudebeheizung eine zunehmende Verbreitung. Voraussetzung ist eine Wärmequelle, bisher in der Regel das Erdreich (Sole/Wasser-Wärmepumpe), das Grundwasser (Wasser/Wasser-Wärmepumpe) oder die Außenluft (Luft/Wasser-Wärmepumpe). Eine weitere Variante wird durch Neuentwicklungen im Bereich der Solartechnik ermöglicht: ein photovoltaisch-thermischer Solarkollektor (PVT-Kollektor) kann einerseits die benötigte Niedertemperaturwärme für die Wärmepumpe zur Verfügung stellen und andererseits einen Beitrag zur Stromversorgung von Heizsystem und Haustechnik leisten. Bei entsprechender Auslegung kann der Stromverbrauch derartiger Heizsysteme - in der Jahresbilanz - durch Eigenstromerzeugung des PVT-Kollektors abgedeckt werden. Ein weiteres, offensichtliches Argument für den Einsatz eines PVT-Wärmepumpen-Heizsystems



**Bild 2:** PVT-Kollektor der Firma Consolar mit für Wärmepumpeneinsatz optimiertem rückseitigem Wärmeübergang zur Umgebung [4]

im Vergleich zu Luft/Wasser-Wärmepumpen ist der geräuschlose Betrieb ohne bewegte Teile im Außenbereich. Aber auch, wenn aufgrund der örtlichen Gegebenheiten und Vorschriften der Einsatz von Wärmepumpen mit Erdreich-Anbindung nicht möglich, zu aufwendig oder zu teuer ist, kann ein PVT-Kollektor den Einsatz von Wärmepumpen eröffnen.

Die Firma Consolar und der niederländische Partner Triple Solar vertreiben seit 2018 einen speziell für Wärmepumpensysteme entwickelten PVT-Kollektor (siehe Bild 1), wobei bereits mehr als 50 Anlagen realisiert wurden. In dem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Projekt SOLINK<sup>1</sup> wird vom IGTE u.a. der Betrieb einer Feldtest-Anlage in einem Einfamilienhaus im Raum Stuttgart messtechnisch erfasst (vgl. Bild 2), das im Rahmen einer Sanierung mit dem PVT-Wärmepumpen-Heizsystem der Firma Consolar ausgestattet wurde.



**Bild 1:** Feldtest-Anlage mit 40 m² PVT-Kollektorfeld

Dieser Beitrag stellt Monitoring-Ergebnisse eines Jahres (März 2018 – Feb 2019) vor. Außerdem werden mit Systemsimulationen die Potentiale eines Lastmanagements und einer Wärmepumpen-Leistungsregelung aufgezeigt.

## Feldtest-Anlagenbetrieb 2018/19

Bild 2 zeigt die Feldtest-Anlage mit der großzügig dimensionierten Kollektorfläche von 40 m².

Das Heizsystem ist in Bild 3 schematisch dargestellt: Hauptkomponenten sind eine Sole/Wasser-Wärmepumpe (einstufig, 7 kW bei B0/W35, zulässige Sole-Eintrittstemperatur bis -15 °C), ein Eisspeicher (300 l) und ein Kombispeicher (1.000 l).

Das sanierte Gebäude ist mit einer maschinellen Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinner (WRG) ausgestattet und wird durch eine Flächenheizung (Wand- bzw. Fußbodenheizung) mit einer maximalen Vorlauftemperatur von 35 °C beheizt. Der Gesamt-Wärmebedarf für Raumheizung und Trinkwassererwärmung wurde in der Planung

<sup>1</sup> Vorhaben SOLINK: „Hocheffiziente, auf intelligenter Verknüpfung von PVT und Wärmepumpentechnik basierende

Wärmeversorgung für Gebäudebestand und Neubau; Phase 2: Entwicklung, Systemintegration, Erprobung

und Optimierung der PVT-Wärmepumpen-Versorgungseinheit“ Förderkennzeichen 33226/02

mit etwa 11.000 kWh/a prognostiziert.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über den realen Anlagenbetrieb im Betriebsjahr 2018/19<sup>2</sup>.

Aufgeführt sind u.a. die System-Jahresarbeitszahl SJAZ als Maß für die Systemeffizienz, die die insgesamt abgegebene Wärme für Trinkwarmwasser  $Q_{WW}$  und Raumheizung  $Q_{HK}$  zum elektrischen Energieverbrauch des Heizsystems  $W_{el,sys}$  ins Verhältnis setzt, vergleiche Gl. (1). Die Kenngröße  $SJAZ_{PVT}$  berücksichtigt zusätzlich den direkt für das Heizsystem nutzbaren PV-Ertrag  $W_{el,PV \rightarrow sys}$ , d.h. der elektrische Energieverbrauch wird um die entsprechende PV-Eigenstromnutzung reduziert, siehe Gl. (2).

$$SJAZ = \frac{Q_{WW} + Q_{HK}}{W_{el,sys}} \quad (1)$$

$$SJAZ_{PVT} = \frac{Q_{WW} + Q_{HK}}{W_{el,sys} - W_{el,PV \rightarrow sys}} \quad (2)$$

Das Gebäude war im betrachteten Zeitraum noch nicht bewohnt, die Wärmerückgewinnung war nicht in Betrieb und es erfolgte auch keine Trinkwarmwasserentnahme. Dennoch wurde durchgehend geheizt und der Trinkwarmwasserbereitstellungsteil des Kombispeichers wurde auf eine Temperatur von 52 °C vorgehalten. Der Vergleich zur ursprünglichen Auslegungs-

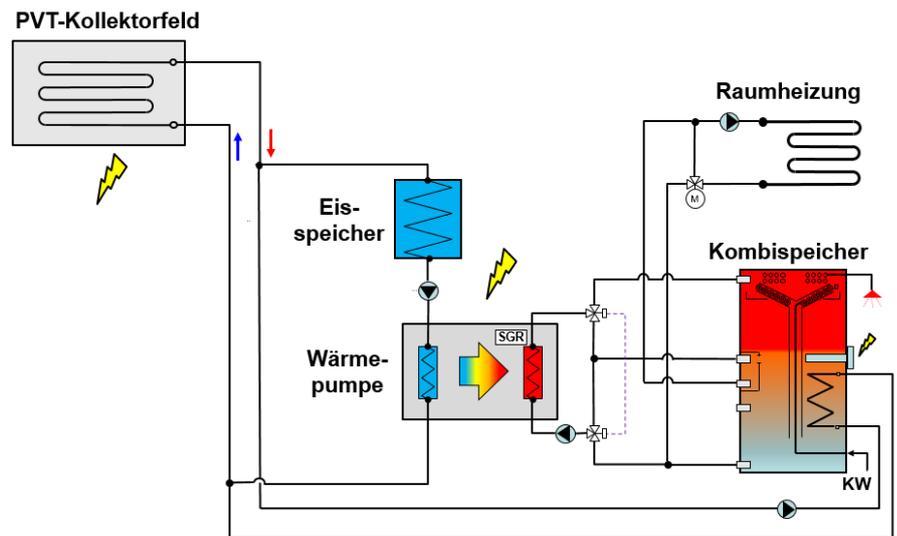


Bild 3: Hydraulik der Feldtest-Anlage

rechnung (Tabelle 1) zeigt eine etwas höhere Systemeffizienz (SJAZ) als erwartet, was mit der nicht vorhandenen Trinkwarmwasserentnahme und den resultierenden, geringeren Wärmepumpen-Laufzeiten für die Trinkwassererwärmung in Zusammenhang gebracht wird. Der PV-Eigenstromverbrauch und die System-Jahresarbeitszahl  $SJAZ_{PVT}$  fallen dagegen niedriger aus. Hier wäre durch ein Lastmanagementsystem, das den Kombispeicher aktiv zur Lastverschiebung nutzt und die Wärmepumpen-Laufzeiten so verstärkt in PV-Überschusszeiten verschiebt, noch eine deutliche Verbesserung zu erwarten. Ein entsprechender „Energienanager“ wurde

erst kürzlich in Betrieb genommen. Das Potential wird im folgenden Abschnitt mit Systemsimulationen näher beleuchtet.

Der in Tabelle 1 aufgeführte elektrische Nutzungsgrad der PV-Anlage beinhaltet Verluste der Verkabelung, des Wechselrichters und eine eventuelle Verschmutzung der PV-Module. Der ermittelte Wert von 14% beträgt etwa 80% des PV-Modulwirkungsgrads (Herstellerangabe 17,5 %) bei Standard-Testbedingungen.

**Potentialstudie**

Im Rahmen des Projekts SOLINK wurde das PVT-Wärmepumpenheizsystem im Simulationspro-

Tabelle 1: Kenngrößen des Heizsystems im Betriebsjahr März 2018 - Feb 2019

	Wärme für WW und HK in kWh/a	Elektrische Energie in kWh/a *exkl. Heizkreis-Pumpe und Regler				System-Jahresarbeitszahl		PV-Anlagen-Nutzungsgrad (AC)
		WP-System*	PV-Eigenverbrauch	Netzbezug*	PV-Ertrag (AC)	SJAZ (Gl. 1)	SJAZ <sub>PVT</sub> (Gl. 2)	
Realer Betrieb (ohne WRG, ohne TWW-Entnahme, ohne Lastmanagement)	13.581	3.521	612	2.909	8.128	3,9	4,7	14 %
Urspr. Auslegungsrechnung (Würzburg)	11.118	3.081	933	2.148	7.122	3,7	5,1	14 %

<sup>2</sup> An wenigen Tagen wurden fehlende Messdaten durch Messdaten von Tagen des gleichen Monats ersetzt.

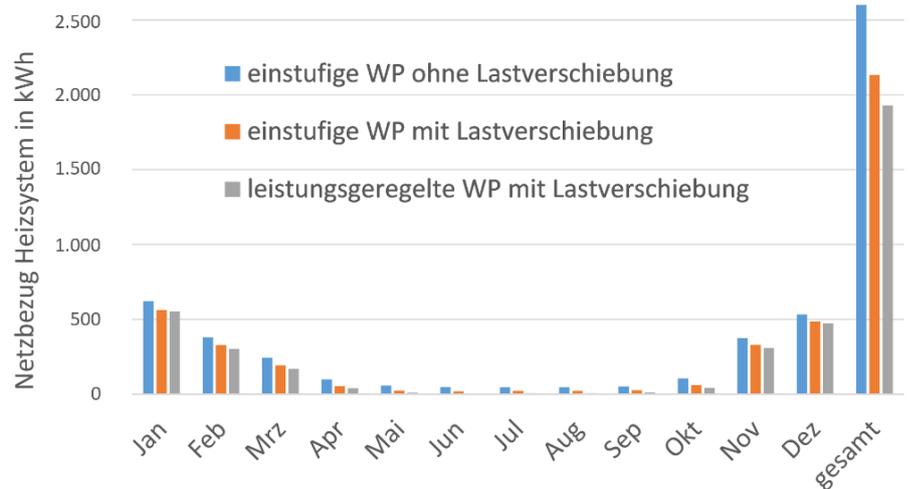
gramm TRNSYS abgebildet und validiert. Bild 4 zeigt Ergebnisse einer Simulationsstudie für ein Referenz-Einfamilienhaus am Standort Würzburg. Untersucht wurde das Potential zweier Maßnahmen, den verbleibenden Netzstrombezug weiter abzusenken:

Einerseits wird eine thermische Lastverschiebung realisiert, d.h. bei PV-Stromüberschuss wird die Wärmepumpe eingeschaltet und der Kombipeicher zusätzlich „auf Vorrat“ beladen. Wie in Bild 4 erkennbar, lässt sich dadurch der Netzstrombezug bereits deutlich absenken, im Jahresverlauf um nahezu 20%. Durch die Lastverschiebung kann in den Sommermonaten der Wärmebedarf für die Trinkwassererwärmung bereits zu großen Teilen mit selbst erzeugtem PV-Strom bereitgestellt werden.

Eine weitere Maßnahme zur Reduktion des Netzstrombezugs ist der Einsatz einer Inverter-Wärmepumpe mit Leistungsregelung, die die Wärmepumpenleistung dem PV-Überschussstrom bzw. dem momentanen Leistungsbedarf nachführt. Die leistungsgeregelte Wärmepumpe kann dadurch bereits relativ kleine PV-Überschüsse zur Lastverschiebung nutzen, der Eigenverbrauchsanteil steigt folglich nochmals an, vergleiche Bild 4. In den Sommermonaten ist ein Wärmepumpenbetrieb dann ausschließlich mit PV-Strom möglich, über das Jahr eine Netzstromreduktion um etwa 10%.

### Zusammenfassung und Ausblick

Die grundsätzliche Funktionstauglichkeit der PVT-Kollektoren als Wärmequelle für eine Wärmepumpe konnte mit dem Monitoring der Feldtest-Anlage in der Region Stuttgart aufgezeigt werden – trotz



**Bild 4:** Einfluss eines Lastmanagementsystems (Lastverschiebung) sowie einer Wärmepumpen-Leistungsregelung auf den verbleibenden Netzstrombezug des Heizsystems

eines noch nicht vollständig repräsentativen Betriebs in dem bisher unbewohnten Gebäude. Auch bei moderaten Winterbedingungen (Außentemperaturen bis  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , moderate Schneebedeckung und Vereisung) konnte der Wärmepumpenbetrieb zu jedem Zeitpunkt sichergestellt werden, die Systemeffizienz bewegt sich mit  $\text{SJAZ} \approx 3,9$  und  $\text{SJAZ}_{\text{PVT}} \approx 4,7$  in der erwarteten Größenordnung. Mithilfe von Systemsimulationen wurden das Potential von Lastmanagement/thermischer Lastverschiebung (Netzstrombezug  $-20\%$ ) und zusätzliche Vorteile durch den Einsatz einer leistungsgeregelten Inverter-Wärmepumpe (Netzstrombezug  $-10\%$ ) berechnet. Für den kommenden Winter wird das Monitoring fortgesetzt, um weitere Betriebserfahrungen zu sammeln, insbesondere bei tieferen Minusgraden sowie hinsichtlich Schnee und Vereisung. Von besonderem Interesse ist darüber hinaus der Einfluss der Trinkwarmwasserentnahme und des „Energiemanagers“ auf die Systemeffizienz in dem

mittlerweile bewohnten Gebäude, im realen Betrieb.

Weitere Informationen und Anlagenbeispiele finden sich in [1]-[4].

### Literatur

- [1] Leibfried U., Asenbeck S., Fischer S.: PVT-Wärmepumpensystem SOLINK – Systemvalidierung und zwei Jahre Praxiserfahrung, Tagungsband Symposium Thermische Solarenergie 2019, Bad Staffelstein
- [2] Leibfried U., Fischer S., Asenbeck S.: PVT-Energie für Wärmepumpen – Systemvalidierung und zwei Jahre Praxiserfahrung, Heizungsjournal, Ausgabe 10-2019
- [3] Lampe C. et al.: Experimentelle Untersuchungen an Testfeldern mit SOLINK-photovoltaisch-thermischen Kollektoren, Tagungsband Symposium Thermische Solarenergie 2019, Bad Staffelstein
- [4] Leibfried U., Asenbeck S., Fischer S.: SOLINK – PVT-Energieversorgungssystem für Wärmepumpen. Tagungsband Symposium Solthermie 2018, Bad Staffelstein

# Solare Gebäude – zukunftssichere Konzepte zur Gebäudeenergieversorgung

Dominik Bestenlehner, Harald Drück

## Einleitung

35 % der Endenergie wird in Deutschland im Gebäudebereich verbraucht. Mit einer Verringerung des Energieverbrauchs der Gebäude kann daher ein signifikanter Beitrag zur Reduzierung des Ausstoßes von Treibhausgasen und damit zur Erreichung des 2 K-Ziels geleistet werden. Bei der Reduktion des Energieverbrauchs von Gebäuden wurden in den letzten Jahren deutliche Fortschritte erzielt. Laut Stat. Bundesamt wurde in Deutschland im Zeitraum von 1990 bis 2015 eine Reduzierung des durchschnittlichen flächenbezogenen Heizwärmeverbrauchs von 240 kWh/(m<sup>2</sup> a) auf 170 kWh/(m<sup>2</sup> a) erreicht. Allerdings kompensiert der seit Jahren ansteigende Komfortanspruch der Bewohner diese erreichten Energieeinsparungen. So stieg die Wohnfläche je Einwohner im gleichen Zeitraum von 35 m<sup>2</sup> auf 46 m<sup>2</sup>.

Um die Energiewende erfolgreich umzusetzen und die Klimaschutzziele zu erreichen, ist eine effiziente und weitgehend auf erneuerbaren Energien basierende Energieversorgung von Gebäuden unabdingbar. Für die Gebäudeenergieversorgung werden daher Konzepte benötigt, die eine wesentliche Reduzierung der Treibhausgase beinhalten. Dies betrifft nicht nur die Versorgung der Gebäude mit Strom, sondern vor allem auch mit Wärme. Hierzu sind unterschiedliche Lösungen denkbar. Einerseits ist natürlich der Energiebedarf der Gebäude zu reduzieren. Dazu sind Maßnahmen an der Gebäudehülle, wie z. B. der Einbau von Fenstern mit Dreifachverglasung,

das Anbringen einer Wärmedämmung, die Erhöhung der Luftdichtigkeit oder am besten eine Kombination aus mehreren dieser Maßnahmen möglich. Ein weiterer wichtiger Ansatzpunkt ist die Gebäudetechnik. So kann der Einbau einer maschinellen Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung einen deutlichen Beitrag zur Reduktion des für die Beheizung des Gebäudes benötigten Energiebedarfs leisten.

Darüber hinaus tragen vergleichsweise einfache Maßnahmen wie der Einsatz von energieeffizienten Haushaltsgeräten und Leuchtmitteln zur Reduzierung des Energieverbrauchs bei. Vor allem bei Geräten, die im Dauereinsatz sind wie Kühl- und Gefrierschrank, können signifikante Energieeinsparungen erzielt werden. Durch eine Umstellung von konventionellen Glühlampen auf LED-Beleuchtung sind weitere Energieeinsparungen möglich. Der Einsatz von Smart-Home Anwendungen zur gezielten Steuerung von Beleuchtung oder Haushaltsgeräten verspricht ebenfalls eine zusätzliche Effizienzsteigerung. Allerdings ist hierbei zu beachten, dass der Strombedarf der eingesetzten Smart-Home-Technik die erzielten Einsparungen nicht wieder kompensiert oder im schlimmsten Fall gar „überkompensiert“.

Der dritte wichtige Ansatzpunkt stellt die Anlagentechnik dar, also die Frage: Wie wird das Gebäude mit Energie versorgt? Auch hierbei sind Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz notwendig, aber bei weitem nicht ausreichend. Ein neues Gasbrennwertgerät reduziert

mit Sicherheit die Treibhausgasemissionen im Vergleich zu einem 30 Jahre alten Ölkessel. Jedoch werden auch in einem modernen Gas- oder Ölbrennwertgerät nach wie vor fossile Energieträger verbrannt und dadurch weiterhin klimaschädliche Stoffe freigesetzt.

Es müssen also Techniken eingesetzt werden, die möglichst vollständig auf erneuerbaren Energieträgern aufsetzen und damit keine Treibhausgase emittieren. Eine Option ist, Biomasse als Energieträger zu nutzen. Allerdings ist deren Potential begrenzt, so dass eine Substitution aller fossilen Brennstoffe durch Biomasse keine Lösung darstellt. Unter diesem Aspekt bietet die Nutzung der solaren Strahlungsenergie zur Energieversorgung von Gebäuden wesentliche Vorteile. Beispielsweise werden bei der Nutzung von Solarenergie ebenfalls keine CO<sub>2</sub>-Emissionen und zusätzlich auch keine Stickoxide und Feinstaub freigesetzt.

## Solare Energieversorgungskonzepte für Wohngebäude

Im Bereich der Wohngebäude gibt es derzeit bereits viele Lösungen für die Nutzung von erneuerbaren Energien. Einige dieser Lösungen nutzen bereits die Solarenergie, entweder thermisch über Sonnenkollektoren oder elektrisch über Photovoltaikmodule. Ergänzt wird dies durch eine weitere Energiequelle, wie beispielsweise Biomasse in Form von Stückholz, Holzhackschnitzeln und Holzpellets oder fossile Energieträger wie Gas oder Öl.

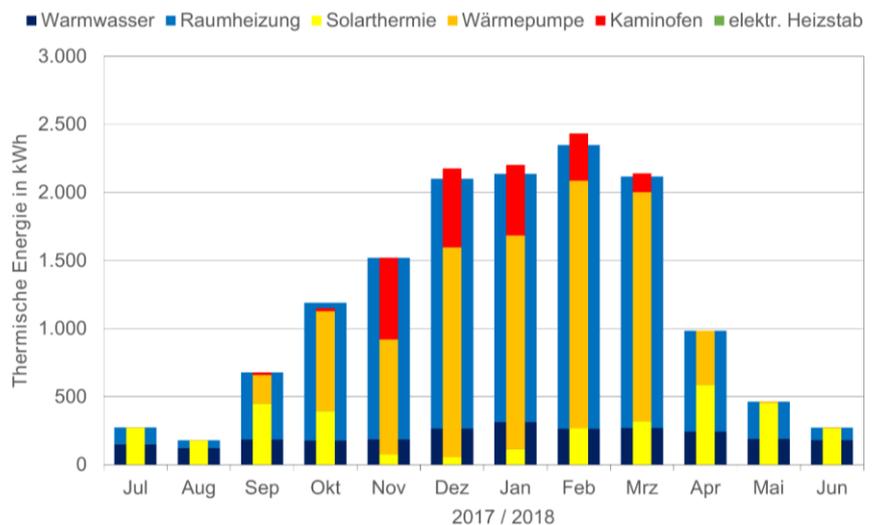


**Bild 1:** SolarAktivHaus<sup>plus</sup> in der Nähe von Heilbronn. Gut zu erkennen sind die 15 m<sup>2</sup> (10,5 kW) solarthermischen Kollektoren direkt unterhalb des Firstes und die 62 m<sup>2</sup> (9,4 kW<sub>p</sub>) Photovoltaik-Module auf dem restlichen Süddach. Rechts neben dem Gebäude steht die Außeneinheit der als Zusatzheizung dienenden Luft-Wasser-Wärmepumpe. Quelle: KHB-Creativ Wohnbau/Marco Jens

Das sogenannte SolarAktivHaus ist ein Konzept zur Wärmeversorgung von Gebäuden, das den „solaren“ Ansatz konsequent in die Praxis umsetzt: Das SolarAktivHaus deckt seinen Wärmebedarf typischerweise zu 60 % bis 70 %, jedoch mindestens zu 50 %, mit thermischer Solarenergie. Damit wird mehr als die Hälfte des Energiebedarfs zur Beheizung des Gebäudes und zur Trinkwassererwärmung von einer thermischen Solaranlage geliefert. Es wird also nicht mehr die konventionelle Heizung durch Solarthermie unterstützt, sondern die Solarheizung wird von einer konventionellen Wärmequelle unterstützt. Wird das Konzept des SolarAktivHauses konsequent weitergedacht, wird das Gebäude zum SolarAktivHaus<sup>plus</sup> (vgl. Bild 1). Mit zusätzlicher Anlagentechnik, wie einer Photovoltaikanlage und einer Wärmepumpe, wird nicht nur der Wärme-, sondern auch der Strombedarf in einem Gebäude zu mehr als der Hälfte von der Sonne gedeckt. Allerdings muss das Zusammenspiel aller Komponenten durch eine intelligente Regelung genau

aufeinander abgestimmt werden. Beispielsweise muss verhindert werden, dass die Wärmepumpe zu Zeiten betrieben wird, während derer die Photovoltaikanlage keinen

Strom liefert oder der von der PV-Anlage erzeugte Strom im Haushalt, also z. B. für den Backofen, benötigt wird. In solchen Fällen müsste der zusätzliche Strombedarf aus dem öffentlichen Netz gedeckt werden. Auch sollte bei der Wärmeerzeugung der Solarthermie ein Betriebsvorrecht eingeräumt werden, da diese keine weitere externe Energie, außer einem geringen Strombedarf für die Umwälzpumpen, zur Wärmeerzeugung benötigt. Werden alle Technologien innerhalb des SolarAktivHouses<sup>plus</sup> richtig dimensioniert, intelligent aufeinander abgestimmt und effizient betrieben, ergeben sich damit signifikante Einsparungen von Treibhausgasen. In dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Vorhaben „SolSys“<sup>1</sup> wurde u.a. eine umfangreiche messtechnische Untersu-



**Bild 2:** Thermische Energiebilanzen des Jahres 2017/2018 des SolarAktivHaus<sup>plus</sup> bei Heilbronn. Mit breiten blauen Balken ist der Wärmeverbrauch dargestellt, dunkelblau für die Trinkwassererwärmung und hellblau für die Gebäudebeheizung. Zur Deckung des Wärmeverbrauchs tragen die Solarthermieanlage (gelbe Balken), die Wärmepumpe (orangefarbene Balken) und der Holzsplit-Kaminofen (rote Balken) bei. Ein elektrischer Heizstab als Notheizung wurde zwar installiert, kommt aber nicht zum Einsatz. Es ist gut zu erkennen, dass die Solarthermieanlage während fünf Monaten den Wärmebedarf fast vollständig decken kann. In der Übergangszeit und im Winter leistet die Wärmepumpe den größten Beitrag zur Deckung des Wärmeverbrauchs. Im Winter kommt zusätzlich noch der Kaminofen zum Einsatz.

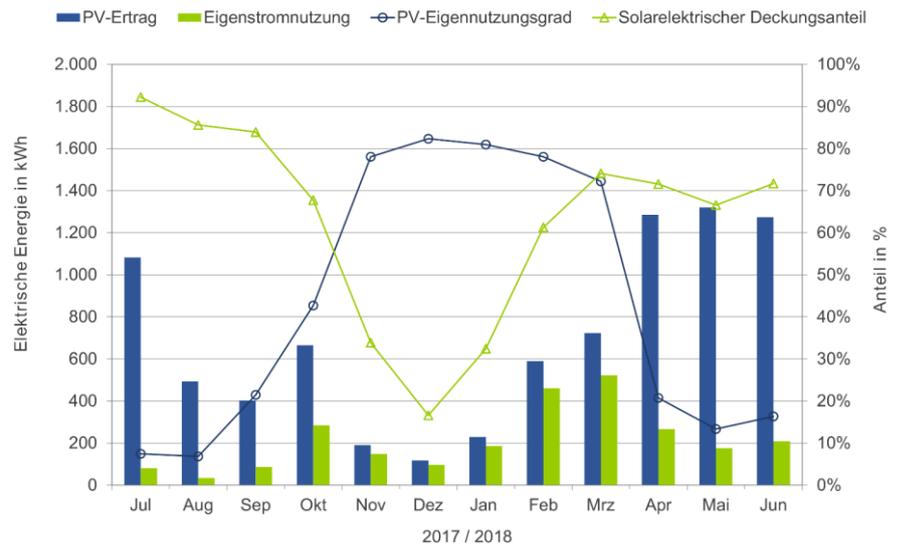
<sup>1</sup> SolSys – Analyse und Optimierung solarer Energieversorgungssysteme für Wohngebäude deren Wärme- und Strombedarf zum überwiegenden Teil durch Solarenergie bereitgestellt wird

chung von sechs solcher SolarAktivHäuser<sup>plus</sup> durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass der Wärmebedarf des Gebäudes durch Solarthermie während etwa sechs Monaten des Jahres fast vollständig gedeckt werden kann (vgl. Bild 2).

In den Wintermonaten liefert eine Wärmepumpe den Großteil der benötigten Wärme. Da diese jedoch überwiegend mit Photovoltaik-Strom betrieben wird, erhöht sich damit ebenfalls der gesamtsolare Deckungsanteil. Ein kleiner Kaminofen im Wohnzimmer mit einer sogenannten Wassertasche zum Anschluss an die Raumheizung übernimmt die Deckung des restlichen Wärmebedarfs.

Die detaillierte Betrachtung des Stromverbrauchs zeigt ein ähnliches Verhalten. Während neun Monaten des Jahres kann die Photovoltaikanlage den Strombedarf zu mehr als 50 % decken, in vier Monaten liegt der solarelektrische Deckungsanteil sogar zwischen 70 % und 80 %. Selbst in den Wintermonaten, wenn die solare Einstrahlung stark reduziert und der Strombedarf durch die Wärmepumpe zur Gebäudebeheizung am höchsten ist, können solarelektrische Deckungsanteile zwischen 15 % und 35 % erreicht werden (vgl. Bild 3).

Die Energiebilanzen werden hier auf der Basis von 10-Minuten-Werten berechnet. Üblich, aber nicht sinnvoll, ist bisher die energetische Bilanzierung auf der Basis von Jahreswerten, wie sie z. B. für die Definition des Energieeffizienzhaus Plus Standards verwendet wird. Eine hohe zeitliche Auflösung bei der energetischen Bilanzierung ist jedoch wichtig um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass das elektrische Netz keine Speicherfähigkeit besitzt und eingespeister Strom sofort wieder verbraucht wird. Deshalb kann Strom, der im Sommer als PV-Überschuss ins Netz eingespeist wird, nicht im Winter



**Bild 3: Elektrische Energiebilanzen des Jahres 2017/2018 des SolarAktivHaus<sup>plus</sup> bei Heilbronn.** Mit blauen Balken sind die monatlichen Erträge der PV-Anlage dargestellt, mit grünen Balken der davon selbstgenutzte Strom im Gebäude. Das Verhältnis zwischen selbstgenutztem und erzeugtem Strom wird durch den PV-Eigennutzungsgrad ausgedrückt (blaue Linie im Diagramm). Der solarelektrische Deckungsanteil (grüne Linie) gibt an, wie viel des vom Gebäude benötigten Stroms die PV-Anlage deckt. Wichtig: Strom, der ins öffentliche Netz eingespeist wird, wird in dieser Bilanz nicht berücksichtigt bzw. gutgeschrieben, da dieser Strom über das Netz direkt von anderen Verbrauchern genutzt und nicht im Netz gespeichert wird.

entnommen werden. Vielmehr müssen zur Deckung des Stromverbrauchs im Winter zusätzliche fossile Kraftwerke betrieben werden. Eine Bilanzierung auf Basis von Jahreswerten errechnet also einen deutlich verringerten Ausstoß an CO<sub>2</sub>-Äquivalenten als dies tatsächlich der Fall ist.

Die monatlich aufgelösten solaren Deckungsanteile lassen sehr gut die saisonalen Schwankungen erkennen (vgl. Bild 4). Auffallend ist, dass der solarelektrische Deckungsanteil in den Sommermonaten geringer ausfällt als der solarthermische. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Gebäude über keinen Stromspeicher für die PV-Anlage verfügt, die Solarthermieanlage jedoch mit einem Warmwasserspeicher ausgestattet ist. Das Verhältnis zwischen solarthermischem und solarelektrischem Deckungsanteil dreht sich jedoch in den Wintermonaten um, wobei der Unterschied nicht sehr ausgeprägt ist. Der gesamtsolare Deckungsanteil liegt

zwischen dem solarelektrischen und dem solarthermischen Deckungsanteil.

Über das Jahr betrachtet, beträgt der solarthermische Deckungsanteil ca. 50 %, der solarelektrische ca. 60 % und der gesamtsolare Deckungsanteil ca. 55 %. Diese Ergebnisse zeigen, dass das Konzept des SolarAktivHäuses<sup>plus</sup> hervorragend funktioniert und bei einer konsequenten solaren Energieversorgung hohe Eigenversorgungsgrade erzielt werden können. Dies ist besonders vor dem Hintergrund bemerkenswert, dass dieses Gebäude über keinen elektrischen Energiespeicher verfügt.

### Zusammenfassung

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts SolSys zeigen, dass die sowohl als Einfamilienhäuser wie auch als Mehrfamilienhäuser realisierten SolarAktivHäuser<sup>plus</sup> einerseits energieeffizient und zuverlässig funktionieren und damit einen wichtigen Beitrag zur Einhaltung der Klima-

schutzziele leisten. Andererseits wurde jedoch auch offensichtlich, dass insbesondere der Nutzer sowie die mehr oder weniger konsequente Ausnutzung der winterlichen Einstrahlung die Effizienz des Gesamtsystems maßgeblich beeinflussen können.

Grundsätzlich bietet ein SolarAktivHaus<sup>plus</sup> großen Wohnkomfort und trägt aufgrund von hochwertigen und nachhaltigen Baustoffen auch zum gesunden Wohnen bei.

Es gibt also heute bereits diverse Möglichkeiten, eine nachhaltige und effiziente Energieversorgung von Gebäuden zu realisieren und damit einen wichtigen Beitrag zum Gelingen der Energiewende zu leisten. Zusätzlich bieten derartige Gebäude ihren Nutzern langfristig ein hohes Maß an Preis- und Versorgungssicherheit. Die vielversprechendsten Konzepte basieren alle auf der thermischen und photovoltaischen Nutzung von Solarenergie in Verbindung mit weiteren Techno-

logien wie Wärmepumpen oder Biomassefeuerungen. Nur durch die konsequente Umsetzung von SolarAktivHaus<sup>plus</sup>-Konzepten im Neubau und im Bestand kann das von der Bundesregierung für das Jahr 2050 vorgegebene Ziel eines „klimaneutralen Gebäudebestands“ erreicht werden.

### Danksagung

Das dieser Veröffentlichung zugrunde liegende Forschungsvorhaben „SolSys - Analyse und Optimierung solarer Energieversorgungssysteme (Wärme/Strom)“ wurde als Verbundprojekt gemeinsam vom Fraunhofer ISE, dem IGS der Technischen Universität Braunschweig sowie SWT Stuttgart bearbeitet und teilweise mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter den Förderkennzeichen FKZ 032 5558 A+B durch den Projektträger Jülich (PTJ) gefördert. Die Autoren danken für die Unterstützung und übernehmen die

Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung.

### Literatur

- [1] Bestenlehner et al.: Solare Wärme- und Stromversorgung von Wohngebäuden – Exemplarische Ergebnisse des Forschungsprojektes „SolSys“, Symposium Solarthermie und innov. Wärmesysteme 2019
- [2] Bestenlehner et al.: Solar Active Houses: Buildings with a Solar Thermal Fraction of at Least 50 % as the Building Standard of the Future, International Solar Energy Society, 2011. <https://doi.org/10.18086/swc.2011.17.02>.
- [3] Kobelt et al.: Solar Active Houses: Simulation Based Analysis of Building Concepts with High Solar Thermal Fractions, 1–10. International Solar Energy Society, 2015. <https://doi.org/10.18086/eurosun.2014.03.12>.

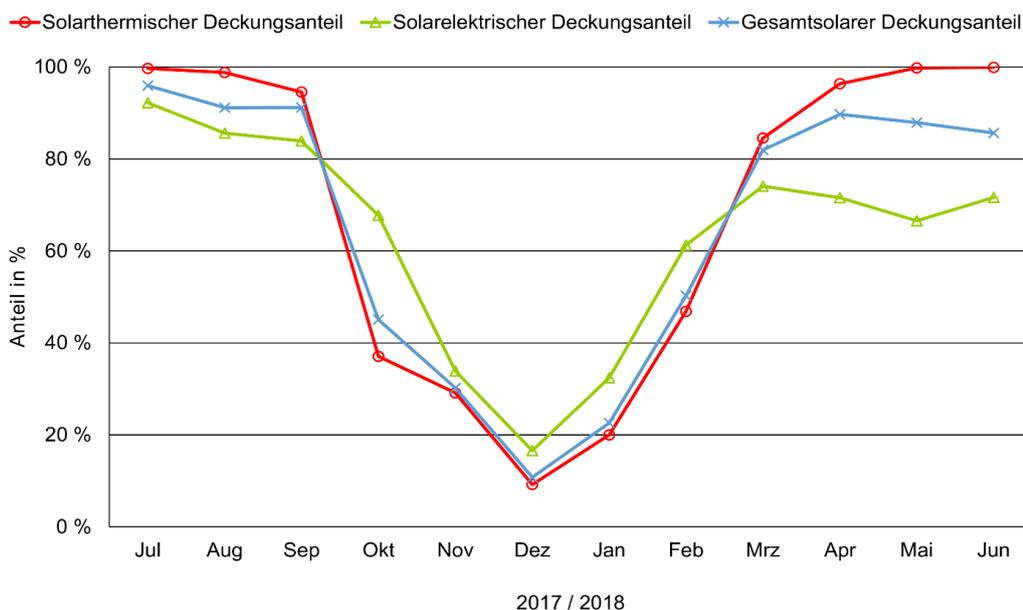


Bild 4: Solare Deckungsanteile des Jahres 2017/2018 des SolarAktivHaus<sup>plus</sup> bei Heilbronn. In rot ist der solarthermische Deckungsanteil, in grün der solarelektrische und in blau der gesamtsolare Deckungsanteil dargestellt. Der solarthermische Deckungsanteil beinhaltet einerseits die direkte Deckung des Wärmeverbrauchs des Gebäudes durch Solarthermie, andererseits aber auch die indirekte Deckung des Wärmeverbrauchs durch Photovoltaik in Kombination mit einer Wärmepumpe. Der solarelektrische Deckungsanteil beinhaltet zusätzlich zum Haushaltsstrom auch den Stromverbrauch der Wärmepumpe.

# Solares Luftheizsystem mit Vakuumröhren-Luftkollektor und Sorptionswärmespeicher für die Gebäudebeheizung

Henner Kerskes, Rebecca Weber, Sebastian Asenbeck



Im Forschungsprojekt SolSpaces wird gemeinsam mit dem Projektpartner SchwörerHaus KG ein solares Heizungskonzept mit Langzeitwärmespeicherung für energieeffiziente Gebäude entwickelt und realisiert. Ziel ist es, die Wärmeversorgung des Gebäudes mit dem neuen Heizsystem weitgehend auf solarer Basis sicherzustellen. Der zentrale Bestandteil des Konzepts ist ein Sorptionswärmespeicher zur saisonalen Wärmespeicherung, der über einen Sonnenkollektor beladen wird. Für die Erprobung des Heizsystems ist auf dem Campus der Universität Stuttgart ein Gebäude der Firma SchwörerHaus KG errichtet worden. Im aktuellen Folgeprojekt SolSpaces 2.0 wird die Technologie um weitere Komponenten zur energieeffizienten Beheizung und Kühlung von modernen Gebäuden erweitert.

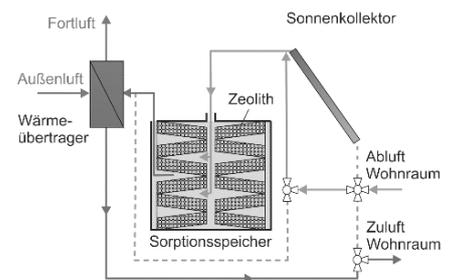
## Das Forschungsgebäude

Die Erprobung des neu entwickelten solaren Heizsystems erfolgt in einem Gebäude vom Typ „Flying Spaces“ [1], (Bild 1). Das Gebäude

hat eine Nutzfläche von 43 m<sup>2</sup> und weist aufgrund seines relativ großen Oberflächen- zu Volumenverhältnisses einen vergleichsweise hohen flächenbezogenen Wärmebedarf auf. Der absolute Wärmebedarf beträgt ca. 3.000 kWh pro Jahr und liegt damit in einer ähnlichen Größenordnung wie größere Wohneinheiten mit gutem Dämmstandard. Das solare Heizungskonzept kann daher an dem Forschungsgebäude im kleineren Maßstab erprobt und später auch auf größere Gebäude mit ähnlichem Wärmebedarf übertragen werden.

## Das solare Heizsystem

Zentrales Element des neu entwickelten Heizungskonzepts (Bild 2) ist der saisonale Sorptionswärmespeicher, mit dem Energie mit hoher Speicherdichte über lange Zeiträume nahezu verlustfrei gespeichert werden kann. Als Sorptionsmaterial wird binderfreier Zeolith 13X verwendet, der im Speicher als Festbett aus kugelförmigem Granulat vorliegt. Auf dem Dach des Gebäudes befindet sich ein Vakuumröhren-Luftkollektor. Während der Heizperiode kann bei vorhandener



**Bild 2: Komponenten des solaren Heizsystems**

Strahlung mit dem Luftkollektor direkt oder anderenfalls mit der Energie aus dem Sorptionswärmespeicher geheizt werden. Das Prinzip der Wärmespeicherung mittels Sorptionswärmespeicher erklärt sich wie folgt: Bei der Entladung des Speichers durchströmt Raumabluft den Sorptionspeicher und Wasser(dampf)moleküle der Luft werden vom Speichermaterial (Zeolith) adsorbiert. Dadurch wird Wärme (Adsorptionsenthalpie) frei, wodurch sich die den Speicher durchströmende Luft erwärmt. Umgekehrt werden bei der Beladung des Speichers durch die Zufuhr von heißer Luft aus dem Vakuumröhren-Luftkollektor die adsorbierten Wassermoleküle wieder desorbiert



**Bild 1: SolSpaces Forschungsgebäude auf dem Campus der Universität Stuttgart**

und mit dem Luftstrom aus dem Sorptionsmaterial abtransportiert. Die angestrebte Desorptionstemperatur beträgt 180 °C. Die Beheizung des Gebäudes erfolgt über das Lüftungssystem.

Der im Forschungsgebäude aufgebaute Sorptionswärmespeicher fasst 4,3 m<sup>3</sup> Sorptionsmaterial. Die theoretische Speicherkapazität beträgt bei den vorhandenen Randbedingungen etwa 700 kWh. Das Vakuumröhren-Luftkollektorfeld hat eine Fläche von 20,5 m<sup>2</sup> und besteht aus sechs in Reihe geschalteten Modulen.

### Der segmentierte Sorptionswärmespeicher

Die Besonderheit dieses neu entwickelten Sorptionswärmespeichers ist dessen Segmentierung, die den Einsatz von großen Materialvolumina und damit die Realisierung großer Speicherkapazitäten ermöglicht [2].

Der kubische Speicher ist in vier Quadranten aufgeteilt, mit jeweils sechs horizontalen Segmenten (Bild 3, links). Dadurch entstehen insgesamt 24 flache Teilstücke mit großem Strömungsquerschnitt und kurzer Durchströmungslänge, wodurch ein geringer Druckabfall bei der Durchströmung erreicht wird. Zwei übereinanderliegende Segmente bilden ein Segmentpaar, das gemeinsam durchströmt wird. Die

Luft tritt in den zentralen Eintrittskanal ein, strömt durch ein Segmentpaar und tritt über einen der vier Austrittskanäle entlang der Speicherkanten wieder aus dem Speicher aus (Bild 3, Mitte).

### Der Vakuumröhren-Luftkollektor

Das Besondere des verwendeten Vakuumröhren-Luftkollektors der Firma airwasol (LSair-M-13-3-200) ist, dass die Vakuumröhren an beiden Seiten offen sind und längs durchströmt werden können. Aufgrund des dadurch sehr geringen Druckabfalls können mehrere Kollektormodule in Strömungsrichtung hintereinandergeschaltet werden.

Die äußere Glasröhre des Kollektors besteht aus Borsilikatglas. Im Inneren befindet sich das aus Edelstahl gefertigte Absorberrohr, das eine hochselektive Tinox-Beschichtung besitzt. Die Abmessungen der äußeren Glasröhre (Durchmesser x Wandstärke x Länge) betragen 90 x 2,5 x 2000 mm und für das Absorberrohr betragen die Abmessungen (Durchmesser x Wandstärke) 50 x 0,2 mm.

Zur weiteren Leistungssteigerung ist auf der Rückseite des Absorbers ein Reflektor aus hochreflektierendem Aluminium angebracht. Der Reflektor befindet sich in der Glasröhre, sodass das Reflektormaterial hermetisch von der Umgebung ge-



Bild 4: Vakuumröhren-Luftkollektor auf dem Dach des Forschungsgebäudes (oben) und Detailansicht einer Röhre mit innenliegendem Reflektor (unten)

trennt und so vor Witterungseinflüssen und Verschmutzungen geschützt ist.

Eine hohe thermische Leistungsfähigkeit, insbesondere bei Arbeitstemperaturen von über 150 °C, ist für die solarthermische Desorption des Sorptionsmaterial sehr wichtig. Bei 850 W/m<sup>2</sup> Einstrahlung auf die Kollektorebene wurde beispielsweise eine Stagnationstemperatur des Kollektors von 265 °C gemessen.

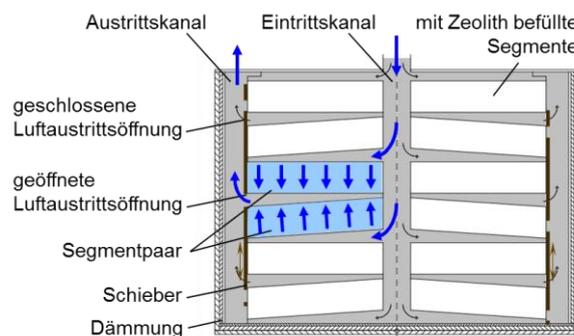
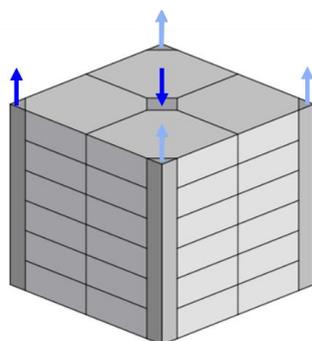


Bild 3: Segmentierung des Sorptionswärmespeichers (links), vertikaler Schnitt durch den Speicher mit Strömungsführung (Mitte), Sorptionswärmespeicher im Aufbau, zur Hälfte befüllt (rechts)

### Messergebnisse der Heizperiode 2017/2018

In der Heizperiode 2017/18 wurden interne Wärme- und Feuchtequellen im Gebäude installiert, um den Betrieb eines bewohnten Gebäudes nachzubilden. Während der Zeit von Mitte Oktober bis Ende April konnten durch den Sorptionswärmespeicher 610 kg Wasserdampf aus der Raumluft adsorbiert und somit ca. 610 kWh Adsorptionswärme freigesetzt werden, die zur Beheizung des Gebäudes genutzt wurde. Ende Februar erreichte der Speicher eine maximale Wasserbeladungsdifferenz von 588 kg. Dies entspricht ca. 85 % der theoretisch maximal möglichen Wasseraufnahme unter den vorherrschenden Betriebsbedingungen. Zwischenzeitlich, besonders in den Frühlingsmonaten März und April, konnte der Speicher auch desorbiert werden, d. h. es erfolgte eine zwischenzeitliche Beladung des Speichers. Insgesamt wurden in der untersuchten Zeitperiode 143 kg Wasser desorbiert.

Mit der über die Heizperiode adsorbierten Wassermenge von 610 kg ergibt sich eine sorptive Energiespeicherung von  $141 \text{ kWh/m}^3$ . Der Kollektorertrag während der Heizperiode 2017/18 betrug ca. 1.762 kWh. Etwa die Hälfte der vom Kollektor bereitgestellten

Wärme konnte direkt für die Gebäudebeheizung genutzt werden, die andere Hälfte wurde im Sorptionswärmespeicher, größtenteils als fühlbare Wärme, zwischengespeichert. Die in der Heizperiode zusätzlich benötigte elektrische Nachheizenergie betrug 592 kWh. Als Gesamtheizwärmeverbrauch des Gebäudes wurden 2.942 kWh gemessen. Somit wurde ein solarer Deckungsanteil von 79,9 % erreicht.

### Ausblick

In der Fortführung des Forschungsprojekts werden ergänzende Maßnahmen entwickelt und erprobt, um den solaren Deckungsanteil weiter zu erhöhen. Dazu gehört eine photovoltaisch unterstützte Regenerationsstrategie des Speichers, um in der Praxis eine weitere Annäherung an die theoretische Speicherkapazität zu erreichen.

Die Untersuchungen des Heizsystems bezüglich photovoltaisch unterstützter Regeneration und sommerlichem Überwärmungsschutz durch schaltbare Verglasungen werden seit Sommer 2019 durchgeführt.

### Weiterführende Literatur

[1] SchwörerHaus KG. Flying-Spaces. <https://www.schworerhaus.de/flyingspaces/> Stand: Oktober 2019.

[2] Rebecca Weber, Sebastian Asenbeck, Henner Kerskes, Harald Drück, SolSpaces – Testing and performance analysis of a segmented sorption store for solar thermal space heating, Energy Procedia 91 (2016) 250–258.

Das Forschungsprojekt „SolSpaces 2.0 – Weiterentwicklung und Optimierung eines solaren Heizsystems mit Sorptionswärmespeicher zur vollständigen Wärmeversorgung von Energieeffizienzhäusern“ wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages gefördert und vom Projektträger Jülich (PtJ) unter dem Förderkennzeichen 0325868B betreut. Die Autoren danken für die Unterstützung und übernehmen die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages