

## Vorwort

### *Meine Damen und Herren,*

das Jahr 2017 neigt sich seinem Ende zu. Auch in diesem Jahr wollen wir Ihnen zur Weihnachtszeit mit der Lektüre eines HLK-Briefs die ruhigen Tage bereichern. Erlauben Sie mir, die wichtigsten Ereignisse des Jahres 2017 aus meiner Sicht aufzuzählen.

Im März fand die ISH Messe statt. Für viele von uns ein lang herbei gesehntes Ereignis, um die Innovationen der Branche oder auch nur die Stimmung der Branche zu erleben. Dieses Jahr haben ca. 200.000 Personen die ISH besucht und sie konnten sich über Produkte von ca. 2.500 Ausstellern informieren. Ich meine, das sind erfreuliche Zahlen, zeigen sie doch den Zuspruch und die Wichtigkeit unserer Branche im In- und Ausland.

Das wichtigste Ereignis für uns fand im September statt. Am 28. September haben wir das 50-jährige Bestehen unserer HLK-Prüfstelle gefeiert. Im Beisein des Rektors der Universität Stuttgart, des Prodekans der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik und vieler Gäste aus Wirtschaft und Wissenschaft wurde unsere neue Laborhalle eröffnet. Bei diesem Anlass haben die Mitarbeiter des IGE und der HLK den Gästen ihre Forschungs- und Prüftätigkeiten in Form von Impulsvorträgen vorgestellt.

Die DKV-Tagung fand im November in Bremen statt. Dort haben drei IGE-Mitarbeiter ihre Forschungsergebnisse zu

1. GeoTU II: Geothermienutzung in innerstädtischen Tunneln – Ergebnisse der Messungen im Fasanhofunnel in Stuttgart,

2. Lüftungseffektivität von Wohnungslüftungsanlagen – Beurteilung des Potentials zur Energieeinsparung,

3. Energetische Bewertung von Wärmepumpen- und Mikro-KWK-Systemen – Entwicklung von Emulationsprüfständen,

dem interessierten Fachpublikum präsentiert.

An dieser Stelle möchte ich mich nun besonders beim HLK-Beirat bedanken, denn vier der fünf Beiräte werden zum Ende dieses Jahres ihr Amt niederlegen. Der HLK-Beirat bestehend aus den Herren Prof. Dr.-Ing. Heinz Bach, Heribert Baumann, Herbert Baur, Sven Dreesens (davor Jürgen Meyer und Dr. Marko Grasberger) und Manfred Hempel haben über zwei Jahrzehnte wichtige und wesentliche Impulse für den Verein, für die HLK und das IGE gegeben. Ich möchte mich hier stellvertretend für den VdF-Vorstand, aber vor allem auch im Namen der Geschäftsführer der HLK und aller Mitarbeiter/innen der HLK und des IGE für ihre langjährige, tatkräftige Unterstützung bedanken. Wir wissen, dass wir in diesen Herren überaus wichtige Partner in der Wirtschaft und im öffentlichen Dienst hatten und u.a. den heutigen Status eines eigenen Instituts ohne sie nicht erreicht hätten.

Der zum 1.1.2018 vom VdF-Vorstand gewählte, neu besetzte HLK-Beirat, besteht aus den Herren: Sven Dreesens, Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt, Dr. Henrik Siegle, Thorsten Vogel und Torsten Wenisch. Ich wünsche uns allen eine erfolgreiche Zusammenarbeit.

Des Weiteren möchte ich darauf aufmerksam machen, dass wir am

IGE im Laufe des Jahres vier neue wissenschaftliche Mitarbeiter eingestellt haben.

Es freut mich Ihnen mitteilen zu dürfen, dass uns in 2017 fünf Forschungsvorhaben bewilligt wurden:

1. BAFA: Validierung der überarbeiteten DIN V 18599
2. BBSR: Fortschreibung des Modellgebäudeverfahrens EnEV easy
3. BBSR: Simulationsrechnungen bei der energiesparrechtlichen Nachweisführung
4. ZfES: Untersuchung der Realisierbarkeit von Lastverschiebungspotentialen durch die zeitliche Flexibilisierung von RLT-Anlagen
5. ZfES: Studie zur Reduzierung des Energiebedarfs bauklimatischer Gebäudetechnik durch Nutzung von Wärmerohren als innovatives Wärmeübertragungssystem

Über diese werden wir ausführlich im nächsten HLK-Brief berichten.

Abschließend möchte ich darauf hinweisen, dass IGE-Mitarbeiter und ein Student für ihre Forschungsarbeit ausgezeichnet wurden.

Unser ehemaliger Institutsleiter Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt wurde für seinen herausragenden Einsatz für das Fachgebiet der technischen Gebäudeausrüstung mit der REHVA-Goldmedaille ausgezeichnet.

Unser wissenschaftlicher Mitarbeiter Dr.-Ing. Tobias Henzler hat für seine Dissertation den ersten Platz beim Otto F. Scharr-Preis für Energietechnik belegt.

Und unser Student Hagen Kaul, M.Sc. hat für seine Masterarbeit den VDI-Studienpreis Württemberg 2017 erhalten.

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

176. Personelle Veränderungen am IGE; Überblick der Studien-, Bachelor- und Masterarbeiten sowie Auszeichnungen für Mitarbeiter und Studierende des IGE

177. MEDIOR: Entwicklung eines mehrdimensionalen Strömungssensorsystems

178. GeopNu: Gebäudebetrieboptimierung durch Nutzer-

identifikation mit mobilen Endgeräten

179. Untersuchung des Energieeinsparpotentials von adaptiven Gebäudehüllen

180. Gebäudemodellierung mittels Gaußprozess-Regression

181. Solarthermische Wärmepumpensysteme

182. Effektiver thermischer Bohrlochwiderstand von Erdwärmesonden

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

Herzlichst  
Ihr



Konstantinos Stergiaropoulos

## Personelle Veränderungen sowie Studien-, Bachelor- und Masterarbeiten 2017

### Personelle Veränderungen

**Matthias Hartnagel, M.Sc.** ist seit Januar 2017 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IGE tätig und befasst sich unter anderem mit einem Forschungsprojekt zur Vermeidung von biogenem Schadstoffbefall in Kirchenorgeln.

An der Universität Stuttgart absolvierte er sowohl den Bachelor- als auch den Masterstudiengang Umweltschutztechnik.

**Matthias Eydner, M.Sc.** ist als Doktorand der Graduierten- und Forschungsschule „Effiziente Energienutzung“ Stuttgart (GREES) seit Februar 2017 am IGE tätig und bearbeitet das Thema „Flexibilisierung des Betriebs von raumluftechnischen Anlagen durch die Nutzung dezentraler Systeme“.

An der Hochschule Albstadt-Sigmaringen absolvierte er den Bachelorstudiengang Maschinenbau und wechselte anschließend für sein Masterstudium (Technologiemanagement) an die Universität Stuttgart.

**Dipl.-Ing. Osman Akyildiz** ist seit Juni 2017 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IGE tätig und befasst sich unter anderem mit der Validierung der neuen DIN V 18599 und dem Forschungsvorhaben zur Gebäudebetrieboptimierung durch Nutzeridentifikation in Räumen.

An der Universität Stuttgart absolvierte er den Diplom-Studiengang Technologiemanagement.

**Dipl.-Ing. Silke Rott** ist nach der Elternzeit wieder seit Oktober 2017 am IGE tätig. Sie unterstützt bei der Projektbearbeitung von Themen mit Fragestellungen der Raumluftechnik.

**Lukas Siebler, M.Sc.** ist seit November 2017 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IGE tätig und wird sich unter anderem mit experimentellen und numerischen Untersuchungen von Strömungsvorgängen in Lüftungsanlagen befassen.

An der Universität Stuttgart absolvierte er den Bachelorabschluss in Maschinenbau und den Masterabschluss in Fahrzeug- und Motorentechnik. Seine Tätigkeit wird aus Mitteln des Vereins der Förderer der Forschung im Bereich Heizung Lüftung Klimatechnik Stuttgart e.V., wie auf der Mitgliederversammlung beschlossen, für ein Jahr finanziert.

**Manuel Grimm, M. Sc.,** der seit Juni 2016 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IGE tätig war, ist im Juli 2017 zur HLK Stuttgart GmbH gewechselt. Dort ist er als Laboringenieur bei der Prüfung von Wärmepumpen und Wohnungslüftungsgeräten tätig.

**Elnaz Alaei:** Integration der Zielgrößen Energieeffizienz und Energieflexibilität in den digitalen Fabrikplanungsprozess (Masterarbeit)

**Benedict Alt:** Aufbau eines Prüfstands zur Kalibrierung eines Strömungssensors (Bachelorarbeit)

**Alena Apel:** Wirtschaftlicher Vergleich einer Tunnelgeothermieanlage und oberflächennaher Geothermie zur Gebäudekühlung (Studienarbeit)

**Alena Apel:** Modellierung der Luftströmungen innerhalb einer Orgel (Masterarbeit)

**Ezgi Attar:** Einfluss des Zugverkehrs auf das geothermische Potential in innerstädtischen Tunneln (Studienarbeit)

**Ezgi Attar:** Einfluss der Motorkühloberfläche von EC-Motoren in Elektrowerkzeugen auf die Erwärmung (Masterarbeit)

**Anna Dao:** Energetische Optimierung von Frostschutzstrategien bei Wärmepumpen (Bachelorarbeit)

**Kristina Geraskina:** Konzepte für die Klimatisierung von Schulen (Bachelorarbeit)

**Emil Hanna:** Verschmutzung und Schimmelbildung in Lüftungsanlagen (Bachelorarbeit)

**Frederik Harbord:** Entwicklung eines Energiekonzeptes für die Beheizung und Kühlung einer Gärtnerei (Bachelorarbeit)

**Matthias Hartnagel:** Untersuchung zu den Luftströmungen innerhalb einer Orgel (Masterarbeit)

**René Hellmuth:** Untersuchung der Potentiale eines BIM-Modells für die Gebäudetechnik (Masterarbeit)

**Weiyang Huang:** Energieeinsparung durch Optimierung des Luftstroms bei maschineller Lüftung unter Berücksichtigung realer Heiz- und Kühlsysteme (Masterarbeit)

**Kevin Jehle:** Untersuchung der passiven Kühlung von Transformatoren in Innenräumen (Masterarbeit)

**Hagen Kaul:** Auswirkungen einer Abschaltung von RLT-Anlagen auf die Raumluftqualität (Masterarbeit)

**Erkan Korkmaz:** Anwendungsmöglichkeiten der Gebäudeklimatisierung in Fahrzeugen (Studienarbeit)

**Andre Kretschmar:** Kritische Luftzustände für Kulturgüter (Bachelorarbeit)

**Yixin Li:** Energetische Bewertung verschiedener Fassadensysteme in China (Masterarbeit)

**Tilman Linde:** Nutzung von Tunnelgeothermie für die Beheizung und Kühlung eines Gebäudes (Bachelorarbeit)

**Fabiana Reusch:** Untersuchung der Luftströmungen in Orgelpfeifen (Bachelorarbeit)

**Vanessa Schönfelder:** Einfluss der Gebäudehülle auf den Energiebedarf von Schulgebäuden (Studienarbeit)

**Julian Schwarz:** Einfluss der Dimensionierung einer Fußbodenheizung auf das Betriebsverhalten (Bachelorarbeit)

**Daniel Schwermann:** Untersuchung des Einsparpotentials adaptiver Gebäudehüllen im Gebäudebestand (Masterarbeit)

**Li Shen:** Analyse des Energieeinsparpotentials von Speicherheizungen im Gebäudebestand (Masterarbeit)

**Sichen Sheng:** Untersuchung der Anlagentechnik für Passivhäuser in chinesischen Klimaregionen (Masterarbeit)

**Christoph Weiß:** Möglichkeiten zur verbesserten Überführung von Planungsdaten in die Betriebsphase (Masterarbeit)

**Wei Zhang:** Untersuchung von Heizanlagen für die Erdgasvorwärmung (Masterarbeit)

**Yizhuo Zhang:** Einfluss der Anlaufzeit auf das energetische Einsparpotenzial eines mit Nutzenerkennung ausgestatteten Gebäudesystems (Studienarbeit)

**Weixiao Zhou:** Vergleich zweier Simulationsprogramme für Lüftungssysteme in kommerziellen Gebäuden (Masterarbeit)

## Preise - Auszeichnungen:

### Otto F. Scharr-Preis

Von der Otto F. Scharr-Stiftung wurde auch 2017 der Preis für Energietechnik verliehen. Unser wissenschaftlicher Mitarbeiter **Dr.-Ing. Tobias Henzler** konnte mit seiner Dissertation überzeugen und den ersten Platz sowie 5.000 Euro sichern.

### VDI-Studienpreis 2017 Württemberg

**Hagen Kaul, M.Sc.** hat für seine Masterarbeit „Auswirkungen einer Abschaltung von RLT-Anlagen auf die Raumluftqualität“ einen Preis erhalten. Der Preis in Höhe von 500 € wurde beim VDI-Forum im Forschungscampus der Robert Bosch GmbH in Renningen überreicht.

### REHVA Goldmedaille

Unser ehemaliger Institutsleiter **Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt** wurde im Rahmen der 61. Generalversammlung der REHVA mit der REHVA-Goldmedaille ausgezeichnet. Er ist erst der zweite Deutsche, der diese höchste Auszeichnung der TGA-Ingenieure erhielt.

## Dissertationen:

### **Henzler, Tobias**

Adaptive Gebäudehüllen und ihr Potential zur Energieeinsparung im Gebäudebereich. 2017. Universität Stuttgart Mitteilung Nr. 25  
ISBN 978-3-9811996-4-2

### **Ruschenburg, Jörn**

Bewertung von Wärmepumpensystemen mit solarthermischer Quelle durch Feldtest- und Simulationsmethoden. 2017. Universität Stuttgart Mitteilung Nr. 26  
ISBN 978-3-9811996-5-9

### **Massa Gray, Francesco**

Gaussian Process Building Models and their Application in Model Predictive Control. 2017. Universität Stuttgart Mitteilung Nr. 27  
ISBN 978-3-9811996-6-6

# MEDIOR: Entwicklung eines mehrdimensionalen Strömungssensorsystems

Yuanchen Wang, Michael Müller

## Einleitung

Ziel des vom BMWi geförderten IGF-Vorhabens ist es, ein kompaktes zweidimensionales Strömungssensorsystem zu entwickeln, das in der Praxis von Herstellern und Betreibern von Lüftungssystemen verwendet werden kann. Damit sollen Messdaten der Betriebszustände von RLT-Anlagen sowie der strömungstechnischen Vorgänge im Raum (insbesondere für Geschwindigkeiten von 0,05 bis 3 m/s) erfasst werden. In Verbindung mit der entsprechenden Regel- und Steuerungsstrategie kann so zur Energieeinsparung der Anlagen beigetragen werden.

Der zu entwickelnde Sensor soll leicht, mobil und hoch dynamisch bei sehr geringem internen Energiebedarf sein. Er soll die Geschwindigkeit und Richtung der Luftströmung im Raum erfassen.

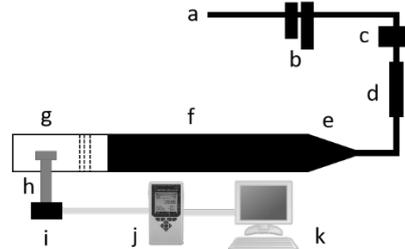
Der Sensor wird vom Projektpartner Hahn-Schickard Gesellschaft konstruiert und hergestellt. Am IGE werden die Prototypen getestet und kalibriert.

## Methodik

Die Herausforderung dieses Projekts liegt in der Kalibrierung des Sensors für niedrige Geschwindigkeiten. Nach ausführlicher Recherche über die auf dem Markt erhältlichen Kalibriereinrichtungen stellte sich heraus, dass keine den Anforderungen entsprechende Kalibriereinrichtung für niedrige Strömungsgeschwindigkeiten verfügbar ist.

Deshalb wurde am IGE zur Sensorkalibrierung ein Strömungskanal basierend auf der Arbeit von

Grandchamp et.al. [1] konstruiert und in Betrieb genommen.



- a: Druckluftanschluss ( $p = 5 \text{ bar}$ )
- b: Ölfilter für Druckluft
- c: Volumenstromregler
- d: Heizband zur Temperaturregelung
- e: Diffusor
- f: Beruhigungsstrecken, Siebe und Wabengleichrichter
- g: Messebene in Plexiglasrohr
- h: Messgerät
- i: Drehtisch
- j: Datenlogger
- k: Daten Weiterverarbeitung

## Bild 1: Strömungskanal

Der Strömungskanal (siehe Bild 1) wird mit Druckluft betrieben. Die Strömungsgeschwindigkeit im jeweiligen Messpunkt kann über einen Volumenstromregler eingestellt werden. Der Messbereich liegt zwischen 0,05 und 0,73 m/s. Die Lufttemperatur im Strömungskanal wird durch ein Heizband auf  $23 \text{ °C} \pm 1\text{K}$  geregelt. Durch die in der Beruhigungsstrecke eingebauten Wabengleichrichter und Siebe wird an der Messstelle eine laminare Strömung mit einem Turbulenzgrad von 1 % (bei 0,1 m/s) realisiert.



Bild 2: Windkanal

Zur Kalibrierung im Geschwindigkeitsbereich zwischen 0,7 und 3 m/s steht zusätzlich ein Windkanal zur Verfügung (siehe Bild 2). Der Windkanal wird mit einem Axialventilator betrieben, der die Raumluft durch den Windkanal hindurch ansaugt. Die Messstelle wird durch ein Plexiglasgehäuse von äußeren Einflüssen abgeschirmt. Da die Lufttemperatur im Windkanal nicht separat eingestellt werden kann, wird der Raum über eine Klimaanlage temperiert. Der Turbulenzgrad im Windkanal liegt bei unter 0,5 %.

Für die Kalibrierung des Sensors wird die eingestellte Strömungsgeschwindigkeit im Messpunkt sowohl im Strömungskanal als auch im Windkanal durch Referenzmessungen mit zwei rückführbar kalibrierten thermoelektrischen Anemometern ermittelt.

Da der in Bild 3 dargestellte Sensor sowohl die Richtung als auch die Geschwindigkeit der Strömung messen soll, müssen die Messungen auch dementsprechend konzipiert sein. An jedem Messpunkt wird daher eine volle Drehung des Sensors durchgeführt.

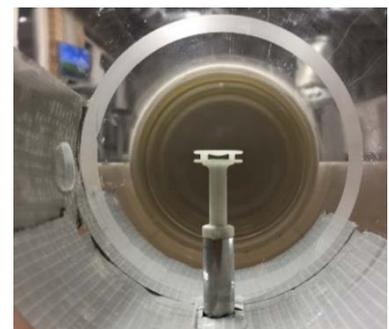


Bild 3: Strömungssensor mit der Schutzkappe

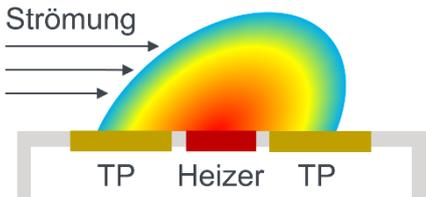


Bild 4: Strömung über der Sensormembran

Der Strömungssensor funktioniert nach dem Temperatur-Waage Verfahren. In der Mitte des Sensors ist ein Heizelement mit definierter Heizleistung angebracht. Dadurch entsteht über dem Heizer ein Temperaturfeld (siehe Bild 4).

Um dieses Heizelement sind 4 Thermopiles (TP) angebracht. Wenn die Strömung aus einer bestimmten Richtung auf den Sensor trifft, wird das Temperaturfeld zum hinteren Thermopile verschoben. Gemessen wird die dadurch entstehende Differenzspannung der jeweils gegenüberliegenden Thermopiles. Der Sensor gibt also zwei Spannungen aus. In der Kalibrierung werden diese Spannungen der entsprechenden Geschwindigkeit und der Richtung zugeordnet.

### Ergebnisse & Diskussion

Die Richtungserkennung ist bereits in der derzeitigen Version des Sensors möglich. Die Output-Spannungen beider Thermopilepaare (TP\_1 und TP\_2) über dem Winkel ergeben eine sinusförmige Kurve. Je zwei Spannungen können eindeutig einem Winkel zugeordnet werden (siehe Bild 5).

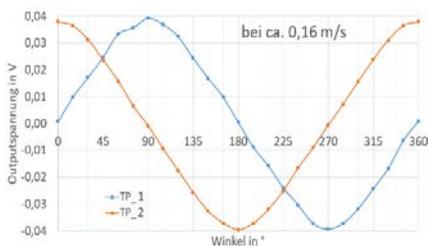


Bild 5: Spannung beider Thermopilepaare abhängig vom Winkel

Ab einer Geschwindigkeit von ca. 0,16 m/s ist die Winkelerkennung zuverlässig auf ca. 5° genau möglich.

Um die Geschwindigkeitsmessung zu realisieren, wird zuerst eine Lookup-Tabelle erstellt. In dieser wird den Output-Spannungen die Geschwindigkeit zugeordnet. Messwerte, die zwischen zwei Tabellenwerten liegen, werden durch lineare Interpolation ermittelt.

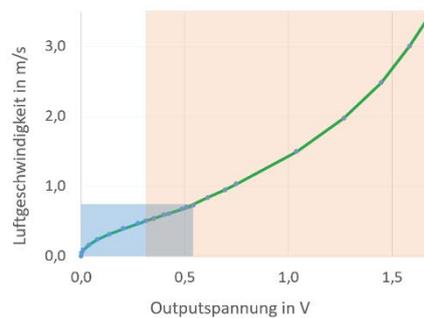


Bild 6: Strömungsgeschwindigkeit über der Output-Spannung

Bild 6 zeigt den Verlauf der Messkurve über dem gesamten Geschwindigkeitsbereich. Blau markiert ist der Bereich, der im Strömungskanal gemessen wird, rot der Bereich, der im Windkanal gemessen wird. Wie zu sehen ist, gibt es einen Übergangsbereich. Die Kurvenverläufe beider Messungen stimmen in diesem Bereich trotz der unterschiedlichen Prüfaufbauten überein.

Der Sensor verfügt über eine Schutzkappe (siehe Bild 3), die mit vier Stützen (bei 45°, 135°, 225° und 315°) an der Grundplatte befestigt ist. In Bild 7 sind die zwei Output-Spannungen des Sensors für verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten dargestellt. Im Bereich der Stützen ist eine Änderung des Verlaufs der Messkurve festzustellen (rote Pfeile). Diese Ände-

rung ist auf den Blockadeeffekt der Stützen zurückzuführen.

Diesem Problem soll durch konstruktive Maßnahmen entgegen gewirkt werden.

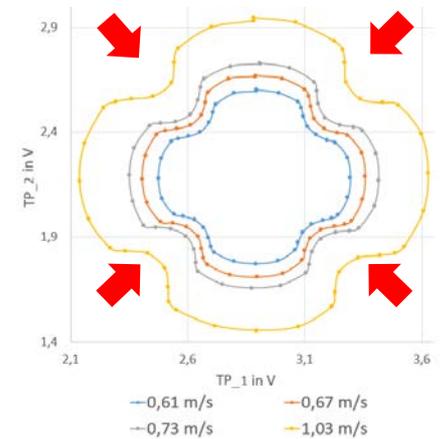


Bild 7: Blockadeeffekt bei verschiedenen Geschwindigkeiten

### Fazit

Es ist bereits mit dem derzeitigen Prototyp des Sensors möglich, die Strömungsgeschwindigkeit und die Strömungsrichtung zu bestimmen. Weitere Verbesserungen für künftige Sensorvarianten sind in Planung. Besonders der Blockadeeffekt soll dadurch verringert werden.

Über die Eingliederung des Sensors in ein Sensorsystem, das Raumtemperatur, Luftfeuchte und weitere Parameter umfasst, wird bereits nachgedacht. So soll ein Sensorsystem entstehen, das zur umfassenden Analyse der Raumluftqualität genutzt werden kann.

### Literatur

[1] X. Grandchamp; A. Van Hirtum; X. Pelorson: Hot film/wire calibration for low to moderate flow velocities; September 2010

# Gebäudebetrieboptimierung durch Nutzeridentifikation mit mobilen Endgeräten

Anders Berg, Osman Akyildiz, Tobias Henzler

## Kurzfassung

Die Raumbelegung in Gebäuden ändert sich ständig. Bei der Planung werden oft Nutzungsprofile aus Normen oder Erfahrungswerten verwendet. Im Gebäudebetrieb weisen die Energieverbrauchswerte aufgrund von veränderten Raumbelegungen daher häufig deutliche Unterschiede zu den im Vorfeld bestimmten Energiebedarfswerten auf. Die wachsende Verbreitung von mobilen Endgeräten ermöglicht es, die Anwesenheit in Räumen zu ermitteln. Diese Daten bieten die Möglichkeit einer verbesserten Analyse der Energieverbräuche einzelner Gebäudebereiche im Vergleich zu den Energiebedarfswerten aus der Planung.

Im Forschungsvorhaben „Gebäudebetrieboptimierung durch Nutzeridentifikation in Räumen“ (GeopNu), gefördert durch das BMWi, wird ein System zur Nutzeridentifikation entwickelt, das die Belegung in Räumen ermittelt. In einem Bürogebäude der Ed. Züblin AG wird das System messtechnisch und mit Gebäudesimulationen der Nutzereinfluss numerisch untersucht.

## Belegung von Gebäuden

Die Belegung von Büroräumen hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab. Der Beschäftigungsgrad der Nutzer (Vollzeit, Teilzeit), die Anzahl an Arbeitszeiten außerhalb des Büros (Ferien, Geschäftsreisen, Krankentage) und die Art des Büros (Einzelbüro, Gruppenbüro, Großraumbüro) sind einige Beispiele. Die Ermittlung von realistischen Profilen für Wohngebäude

ist deutlich komplexer, da viele Annahmen aus dem Alltagsleben getroffen werden müssen.

Die Belegungsprofile aus Normen weisen Unterschiede auf. Im Bereich Büro- und Wohngebäude ist sowohl die Verteilung und Anzahl an Stunden der täglichen Anwesenheit, als auch die abgegebene Wärme durch Personen und Geräte unterschiedlich. Bild 1 zeigt die

kumulierte Anzahl der Personenstunden und Bild 2 die abgegebene Wärme durch Personen und Geräte pro Arbeitstag für ein Einzelbüro aus den folgenden Normen:

- DIN EN 16798 [1]
- DIN EN 15232 [2]
- SIA 2024 [3]
- DIN V 18599 [4].

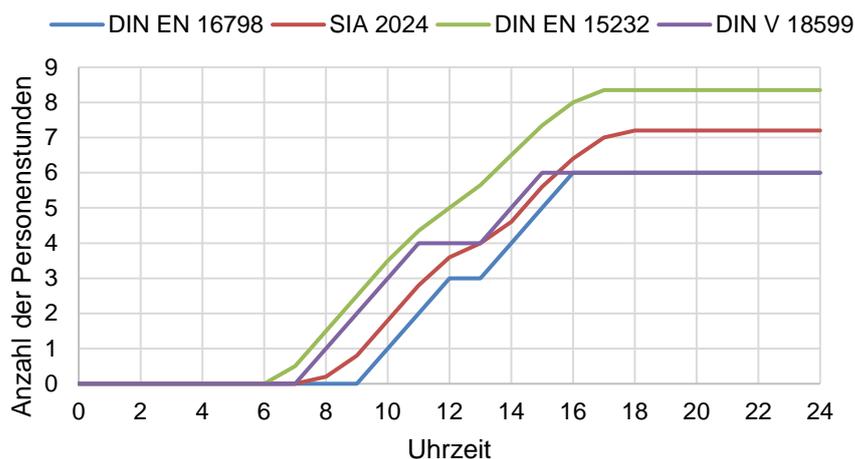


Bild 1: Anzahl der Personenstunden pro Arbeitstag für ein Einzelbüro

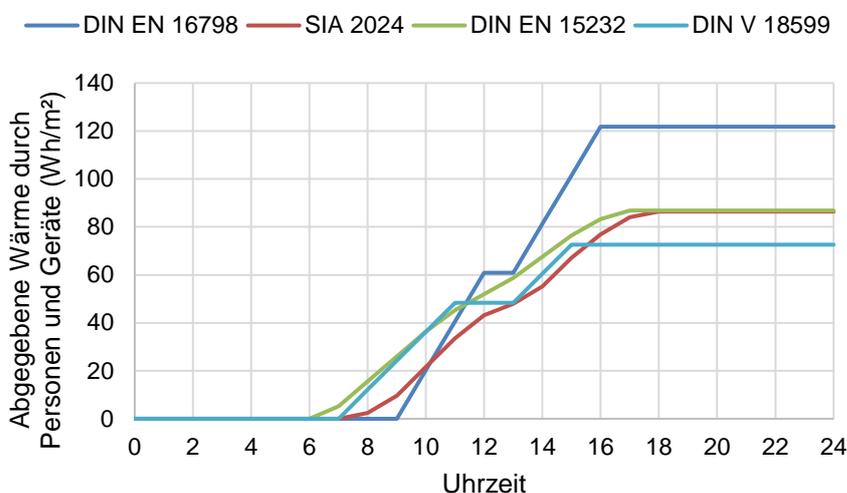


Bild 2: Abgegebene Wärme durch Personen und Geräte pro Arbeitstag für ein Einzelbüro

In DIN V 18599 wird von 6 Vollnutzungsstunden pro Tag mit einer mittleren Belegungsdichte von 10 m<sup>2</sup> pro Person ausgegangen. Zwischen der Norm mit der niedrigsten täglich abgegebenen Wärme (DIN V 18599) und der höchsten (DIN EN 16798), liegt ein Unterschied von 50 Wh/m<sup>2</sup> vor. Das heißt, dass die Wärmeabgabe nach DIN V 18599 nur etwa 60% der Wärmeabgabe nach DIN EN 16798 beträgt.

### Datenschutzkonforme Nutzeridentifikation

In Zusammenarbeit mit der Firma Indoo.rs GmbH wird ein System zur Nutzeridentifikation entwickelt, das mit den Ortsdaten mobiler Endgeräte (Smartphones, Tablets) die Belegung in Räumen ermittelt. Mit dem Institut für Wirtschaftsrecht (provet) der Universität Kassel wird ein datenschutzkonformes Umsetzungskonzept für das System erarbeitet, das auch die Anforderungen an die Datensicherheit erfüllt. Bisher gelten in Deutschland das Bundesdatenschutzgesetz (BDSG) und weitere Sonderregelungen zum Datenschutz. Am 25.05.2016 trat die Datenschutzgrundverordnung (DSGVO) in Kraft, die ab dem 25.05.2018 gilt. Ziel der DSGVO ist es, ein einheitliches Datenschutzniveau in der EU zu gewährleisten.

### Umsetzung im Züblinhaus

In einem Stockwerk des Züblinhauses in Stuttgart wird das System zur raumweisen Nutzeridentifikation mit mobilen Endgeräten installiert und messtechnisch untersucht. Die Inbetriebnahme erfolgt Anfang 2018. Die während des Praxistests aufgenommenen Belegungsprofile werden mit den Messdaten von bereits vorhandenen Präsenzmeldern und mit Profilen aus den Normen gegenüber-

gestellt. Damit kann der Einfluss der Belegung auf den Energiebedarf aufgezeigt werden. Bild 3 zeigt die mittlere Belegungsdichte für ein Einzelbüro an einen Arbeitstag (Mo – Fr). Die Anwesenheitssignale wurden für jede Viertelstunde der Arbeitswoche (Montag bis Freitag) gemittelt. Es besteht darüber hinaus die Möglichkeit, die Belegungsdichte je einzeltem Wochentag zu berechnen. Dadurch konnte eine mittlere Belegungsdichte oder „Belegungswahrscheinlichkeit“ ermittelt werden.

### Numerische Untersuchungen

Mit Hilfe von Gebäudesimulationen wird der Einfluss der Nutzeridentifikation in Wohn- und Bürogebäuden untersucht. Dazu werden die technische Gebäudeausrüstung und die elektrische Ausstattung betrachtet und deren Auswirkung auf den Energiebedarf abhängig vom Automatisierungsgrad untersucht. Als Ergebnis des Forschungsvorhabens sollen die Möglichkeiten eines Systems mit Nutzeridentifikation für die Betriebsoptimierung in Gebäuden aufgezeigt werden.

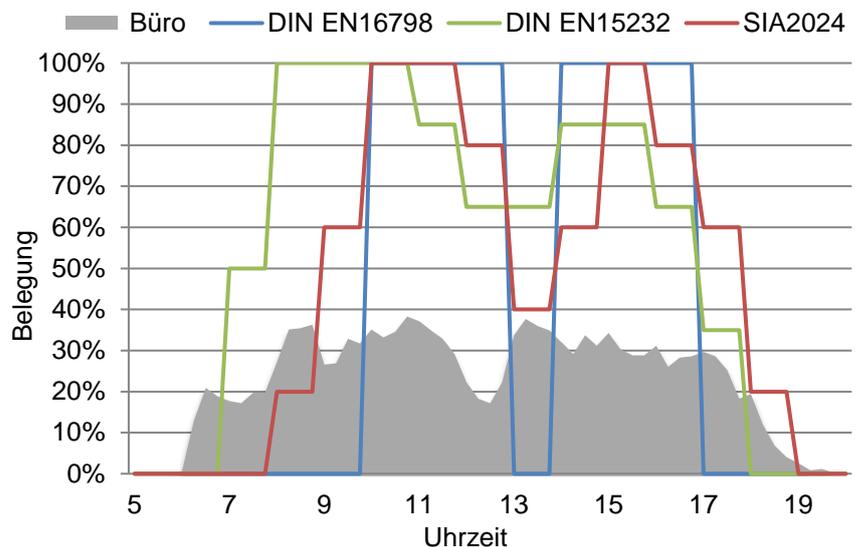


Bild 3: Vergleich zwischen einem Einzelbüro und den Belegungsprofilen aus Normen

Es lässt sich erkennen, dass die mittlere Belegung im Raum zwischen Montag und Freitag viel niedriger als die normativen Angaben ist. Es wird deutlich, dass sich die tatsächliche Belegung in Räumen schwer vorhersagen lässt. Die Möglichkeit, Belegungsdaten einer Nutzeridentifikation verwenden zu können, würde dabei unterstützen, den Betrieb der TGA besser an die Nutzung des Gebäudes und die Anforderungen der Nutzer in der Betriebsphase anzupassen.

### Literatur

- [1] DIN EN 16798 - Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, Entwurf, Deutsche Fassung, Juli 2015
- [2] DIN EN 15232 - Energieeffizienz von Gebäuden, Deutsche Fassung, September 2012
- [3] SIA 2024 - Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik, Schweizer Regel, 2015
- [4] DIN V 18599 - Energetische Bewertung von Gebäuden, Vornorm, Oktober 2016

# Untersuchung des Energieeinsparpotentials von adaptiven Gebäudehüllen

Tobias Henzler

## Einleitung

Aus den Vorgaben der Energieeinsparverordnung (EnEV) resultieren hohe Anforderungen an den Wärmeschutz von Gebäuden.

Mit einem verbesserten Wärmeschutz bspw. durch Dämmung von Gebäuden lässt sich zwar der Energiebedarf für das Heizen deutlich reduzieren, gleichzeitig steigen jedoch im Sommerfall und während der Übergangszeit die Temperaturen im Raum an, da die innere Wärmebelastung nur noch zu einem geringen Teil über die Gebäudehülle abgegeben werden kann. Die inneren Belastungen übersteigen bei Gebäuden, welche die derzeitigen Anforderungen der EnEV erfüllen, schon bei niedrigen Außentemperaturen die Raumheizlast und sorgen somit für eine Überwärmung des Raums. Dies führt insbesondere in hochgedämmten Gebäuden häufig zu einem deutlichen Anstieg der Raumtemperaturen und zu unbehaglichen Raumkonditionen.

Um den Gesamtenergiebedarf zu reduzieren, ist beim Wärmeschutz nicht nur die Fokussierung auf den Heizenergiebedarf, sondern auch auf den Kühlenergiebedarf notwendig. Die Anforderungen an einen optimalen Wärmeschutz verändern sich zum einen im Jahresverlauf deutlich und sind zum anderen in großem Maße von der Nutzung eines Raums abhängig. Eine Gebäudehülle, die den Wärmedurchgang an den thermischen Leistungsbedarf eines Raums anpassen kann, wird als adaptive Gebäudehülle bezeichnet.

Das energetische Potential einer adaptiven Gebäudehülle wurde in einer Dissertation [1] untersucht, die von der „Graduierten- und Forschungsschule Effiziente Energienutzung Stuttgart“ (GREES) mit einem Stipendium gefördert wurde.

## Stand der Technik und Forschung

In der Forschung werden mehrere Ansätze für adaptive Gebäudehüllen verfolgt. So gibt es Layersysteme, welche die Wärmeleitfähigkeit durch Verschieben von Dämmelementen variieren. Eine weitere Möglichkeit stellen bewegliche Dämmelemente dar, bei denen der Wärmedurchgang durch mechanisches Öffnen oder Schließen verändert wird. Daneben gibt es Systeme, die eine schaltbare Hinterlüftung der Dämmelemente zur Anpassung des Wärmedurchgangs vorsehen.

Das ZAE Bayern [2] ändert die Wärmeleitfähigkeit in der Dämmschicht und nutzt dafür Vakuumdämmpaneele, die aus einem hochdämmenden Zustand durch Freisetzen von Wasserstoff wärmeleitend geschaltet werden können. Die in dieser Arbeit betrachtete adaptive Gebäudehülle existiert in dieser Form bisher nicht und setzt voraus, dass eine Veränderung der Wärmeleitfähigkeit innerhalb definierter Grenzen möglich ist und dafür keine Hilfsenergie benötigt wird.

## Modellentwicklung

Veränderbare Wärmeleitfähigkeiten einer Wandschicht können nicht mit den derzeit häufig genutzten thermisch-energetischen

Simulationsprogrammen abgebildet werden. Aus diesem Grund wird ein Raummodell mit adaptiver Gebäudehülle erstellt, das auf dem Raummodell nach der Richtlinie VDI 6007 [3] basiert und um eine Wandschicht mit variabler Wärmeleitfähigkeit sowie dem erforderlichen Regelungsalgorithmus erweitert wird. Dabei wird die Raum- mit der Solltemperatur verglichen und mit der derzeitigen Wärmeleitfähigkeit eine theoretische thermische Last bestimmt. Wenn eine nutzbare Temperaturdifferenz gegenüber der Außentemperatur besteht, wird die optimale Wärmeleitfähigkeit berechnet. Ansonsten wird die Wärmeleitfähigkeit auf den Minimalwert gesetzt, damit der Leistungsbedarf minimiert werden kann.

Das adaptive Raummodell ermöglicht die Neuberechnung der Wandeigenschaften in jedem Simulationszeitschritt. Dazu wird geprüft, ob eine veränderte Wärmeleitfähigkeit den Leistungsbedarf reduzieren kann.

Eine Modellüberprüfung wird anhand von Sprungantworten und energetischen Vergleichen durchgeführt. Diese weisen plausible Temperatur- und Leistungsverläufe auf und zeigen damit die Eignung des Raummodells für die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen.

## Untersuchungsergebnisse

Zur Beurteilung des energetischen Einsparpotentials wird ein typischer Einzelbüroraum mit einer Grundfläche von 17,5 m<sup>2</sup> herangezogen. Der Raum befindet sich in der

Grundvariante in einem Gebäude am Standort Stuttgart. Es werden eine typische Raumnutzung mit Solltemperaturen von 20°C bzw. 26°C angenommen. Die zum Vergleich betrachtete Gebäudehülle erfüllt den Standard der EnEV 2014 mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten, der bei 0,23 W/(m<sup>2</sup>K) liegt. Dieser Wert stellt das Minimum, der zehnfache Wert (2,3 W/(m<sup>2</sup>K)) das Maximum der adaptiven Gebäudehülle dar. In Parametervariationen werden unterschiedliche Randbedingungen

nur sehr geringe Einsparungen erzielen lassen. Beim Kühlenergiebedarf ergeben sich dagegen deutliche Energieeinsparpotentiale, da zu einer großen Anzahl an Stunden im Jahr eine nutzbare Temperaturdifferenz an der Gebäudehülle vorliegt. Für Stuttgart lassen sich Einsparungen beim Kühlbedarf von ca. 70%, mit optimierter Regelungsstrategie sogar bis zu 80% erreichen (siehe Bild 1). Die Optimierung basiert auf der Vorgabe unterschiedlicher Solltemperaturen für den Raum

le vorliegt, kann die Raumtemperatur unter den Sollwert gesenkt werden, um die Speichermasse im Raum zu nutzen.

### Ausblick

Da zukünftig mit verschärften Vorgaben für den Wärmeschutz zu rechnen ist, muss von einer weiteren Zunahme der Überwärmung bzw. des Kühlenergiebedarfs ausgegangen werden, so dass Lösungen wie adaptive Gebäudehüllen nicht nur den Energiebedarf senken, sondern auch die thermische Behaglichkeit in den Räumen verbessern können. Die Ergebnisse zeigen das energetische Einsparpotential einer adaptiven Gebäudehülle insbesondere für hochgedämmte Gebäude und verdeutlichen den Bedarf für weitergehende Aktivitäten in der Forschung und Erprobung von Materialien mit variablen Wärmeleitfähigkeiten.

### Literatur

[1] Henzler, Tobias: Adaptive Gebäudehüllen und ihr Potential zur Energieeinsparung im Gebäudereich. Dissertation Universität Stuttgart. 2017

[2] ZAE Bayern: Schaltbare Wärmedämmung zur Nutzung der Sonnenergie in Gebäuden. März 2003

[3] VDI 6007-1: Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden – Raummodell. Juni 2015

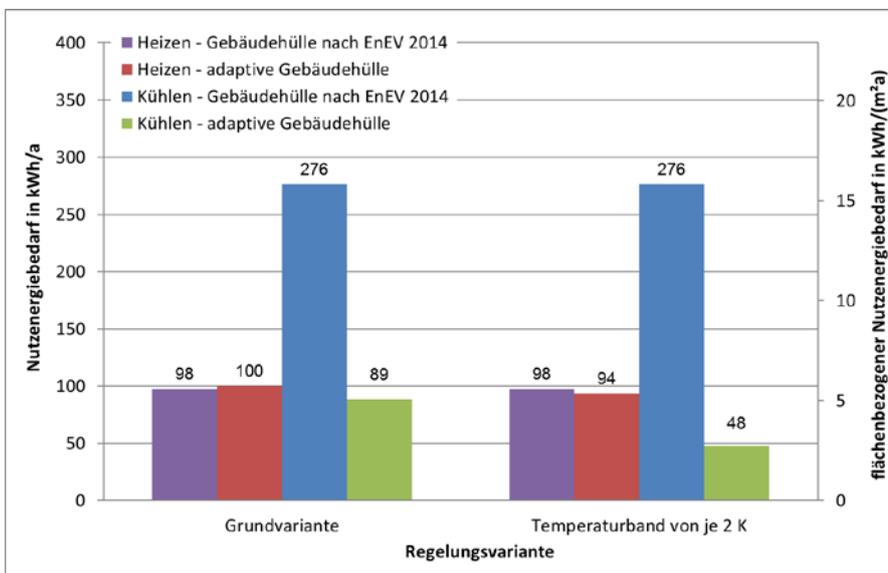


Bild 1: Nutzenergiebedarf abhängig von der Regelungsstrategie

und damit deren jeweiliger Einfluss auf das Energieeinsparpotential der adaptiven Gebäudehülle untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass sich beim Heizenergiebedarf mit einer adaptiven Gebäudehülle

und die adaptive Gebäudehülle. Dafür wird die Kühlsolltemperatur der adaptiven Gebäudehülle um 2 K gegenüber dem Raum reduziert. Sobald eine nutzbare Temperaturdifferenz an der Gebäudehülle

# Gebäudemodellierung mittels Gaußprozess-Regression

Francesco Massa Gray

## Kurzfassung

Weder schwarz noch weiß – manche Lösungen entstehen aus der Zusammensetzung gegensätzlicher Methoden. In dieser Arbeit wird ein Modellierungsansatz beschrieben, der klassische thermische Modelle eines Gebäudes mit einer Gaußprozess-Regression, einer Methode des maschinellen Lernens, kombiniert. Es wird gezeigt, dass diese Kombination genauere Innenlufttemperatur- und Energiebedarfsprognosen liefert als Modelle, die jeweils nur auf physikalischen Gleichungen oder Gaußprozessen basieren.

## Einleitung

Wie lässt sich eine HLK-Anlage so effizient wie möglich betreiben? Dies ist eine komplexe Frage, deren Antwort von den Eigenschaften der Anlagenkomponenten, vom thermischen Verhalten des Gebäudes und von anderen Einflüssen wie Nutzer und Wetter abhängt. Die modellprädiktive Regelung (MPR) ist ein Ansatz, der die explizite Berücksichtigung zahlreicher Randbedingungen in der Regelung einer HLK-Anlage ermöglicht und damit zu einem effizienteren Betrieb führen kann. Trotz der Vorteile der MPR wird sie in der Praxis nur selten implementiert. Einer der Gründe dafür ist, dass der Modellierungsaufwand eines Gebäudes und der zugehörigen HLK-Anlage erheblich ist. Um zur Lösung dieses Problems beizutragen, wurden in dieser Arbeit thermische und energetische Modelle mit Hilfe einer Gaußprozess-Regression (GPR) [1], entwickelt und evaluiert.

## Vorgehen

Als Ersatz für ein reales Gebäude wird ein detailliertes Simulationsmodell inklusive der HLK-Anlage in TRNSYS 17 [2] erstellt. Die Regelung hingegen wird in Matlab [3] entwickelt. Um die Matlab- und TRNSYS-Simulationen zu koppeln, wird das Building Controls Virtual Test Bed (BCVTB) [4] verwendet.

Drei Modellierungsansätze werden untersucht und miteinander verglichen. Der erste Ansatz berücksichtigt nur Gleichungen, die aus physikalischen Gesetzen abgeleitet sind. Der zweite Ansatz ist eine rein datenbasierte GPR, sodass die Gleichungen und Parameter nicht unbedingt physikalisch interpretierbar sind. Beim letzten Ansatz handelt es sich um ein hybrides Modell, das die GPR mit dem physikalischen Modell kombiniert. Alle drei Modellierungsansätze werden sowohl für die Innenlufttemperatur als auch für die Energiebedarfsprognose verwendet.

Die Vorhersagequalität der Modelle wird anhand des quadratischen Fehlers (RMSE) quantifiziert:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_{\text{mod},i} - x_{\text{ref},i})^2}{m}}$$

In der oberen Gleichung ist  $x$  die Größe, die prognostiziert wird – in dieser Arbeit entweder die Innenlufttemperatur oder der Energiebedarf,  $m$  ist die Anzahl an Simulationszeitschritten, die im Betrachtungszeitraum enthalten sind,  $\text{mod}$

steht für Modell und  $\text{ref}$  steht für die Referenzwerte. In dieser Arbeit wird die TRNSYS-Simulation als Referenz oder Bezugsfall betrachtet. Der Betrachtungszeitraum entspricht einem Jahr.

## Randbedingungen

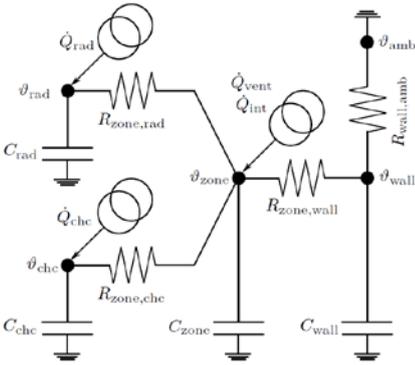
Das Versuchsobjekt stellt ein einstöckiges, 800 m<sup>2</sup> großes Bürogebäude dar, das sich in Stuttgart befindet. Für die Simulation werden die mit TRNSYS gelieferten Daten der Wetterstation Stuttgart-Leinfeldern verwendet.

Die HLK-Anlage berücksichtigt eine Lüftungsanlage, Heizkörper und Kühldecken für die Klimatisierung der Bürofläche. Ein Brennwertkessel und eine Kältemaschine sind jeweils für die Wärme- und Kälteversorgung zuständig.

## Modellierungsansätze

Vereinfachte physikalische Modelle, die aus Differenzialgleichungen entstehen, werden oft in der Gebäudetechnikforschung eingesetzt [5]. Sie haben den Vorteil, dass die Gleichungen und Parameter physikalisch interpretierbar sind. Außerdem ist es möglich, elektrische Ersatzschaltbilder zu erstellen, was die Interpretierbarkeit des Modells erhöht, wie in Bild 1 für das ausgewählte Gebäude zu sehen ist.

Wenn die Parameterwerte eines solchen vereinfachten Modells nicht aus physikalischen Grundlagen, sondern aus Mess- oder, wie in diesem Fall, Simulationsdaten bestimmt werden, werden sie mit dem Begriff Grey-Box-Modell versehen.

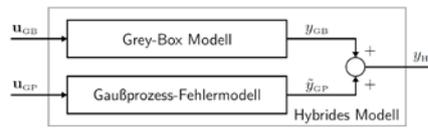


**Bild 1: Elektrisches Ersatzschaltbild des Grey-Box-Modells**

Eine Gaußprozess-Regression hingegen ist ein rein datenbasierter Modellierungsansatz – physikalische Gesetze werden nicht explizit berücksichtigt. Aus Messdaten werden die Korrelationen zwischen der Zielgröße, die mit dem Modell berechnet wird, und den Modelleingängen „gelernt“, indem Muster in den Trainingsdaten identifiziert werden. Ein großer Vorteil von solchen Modellen ist, dass kein oder kaum Hintergrundwissen über das zu modellierende System notwendig ist. Deswegen werden sie oft unter dem Begriff *Black-Box-Modell* klassifiziert. Der Nachteil ist, dass genügend Trainingsdaten in einer ausreichenden Qualität benötigt werden.

In dieser Arbeit wird auch ein hybrider Ansatz entwickelt, in dem ein Grey-Box-Modell mittels Gaußprozessen ergänzt wird. Im ersten Schritt wird ein Grey-Box-Modell erstellt und parametrisiert. Im zweiten Schritt wird das Modell ausgewertet und die Prognosen mit den Trainingsdaten verglichen. Die Abweichung, die dabei entsteht, ist die Zielgröße des GPR-Modells: Es werden Korrelationen zwischen den Eingangsdaten und dem Prognosefehler des Grey-Box-Modells gesucht. Die Hypothese ist, dass systematische Muster im Fehler dabei erkannt und die fehlerhafte Prognose des Grey-Box-

Modells damit verbessert werden. Bild 2 zeigt, wie die Ausgänge beider Modelle addiert werden, um die Endprognose des hybriden Modells zu berechnen.



**Bild 2: Struktur des hybriden Modells**

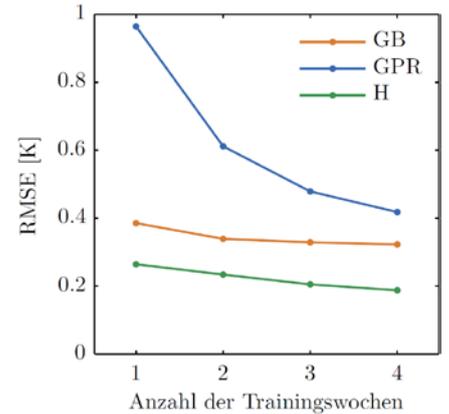
Die drei Modellierungsansätze sind in [6] detailliert beschrieben.

**Trainingsverfahren**

Die Simulationsergebnisse aus TRNSYS werden als *Trainingsdaten* verwendet, um die Parameter der verschiedenen Modelle anzupassen. Dafür wird ein adaptives Trainingsverfahren eingesetzt, in dem die Modelle über den Betrachtungszeitraum von einem Jahr wöchentlich neu parametrisiert werden. Nach jeder Anpassung der Parameter werden die Modelle ausgewertet, um die Innenlufttemperatur und den Energiebedarf der darauffolgenden Woche zu prognostizieren. Der Fehler der Prognose wird dann berechnet und die Trainingsdaten aktualisiert. Mit den neuen Daten aus der TRNSYS-Simulation wird der Prozess solange wiederholt, bis die Modelle ein Jahr lang trainiert und ausgewertet wurden. Um den Effekt der Datenmenge zu evaluieren, wird das Volumen der Trainingsdaten zwischen ein und vier Wochen variiert. Die Anzahl beschreibt die Wochen, die unmittelbar vor dem Trainingszeitpunkt vergangen sind.

**Ergebnisse und Diskussion**

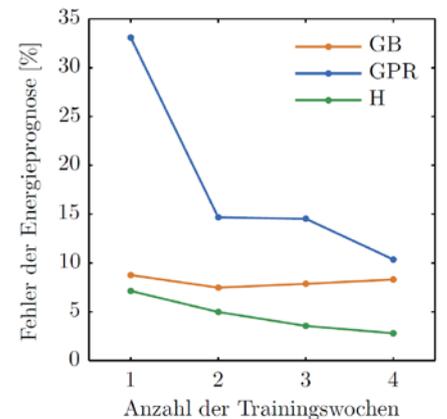
Bild 3 zeigt den quadratischen Fehler (RMSE) der Innenlufttemperaturprognose aller drei Modelle gegenüber der Anzahl an Trainingsdaten, die berücksichtigt wurden.



**Bild 3: Prognosefehler der Modelle für die Innenlufttemperatur**

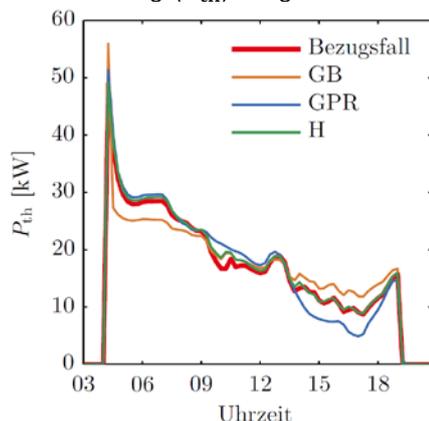
Zwei Hauptkenntnisse können aus Bild 3 abgeleitet werden. Einerseits liefert der hybride Modellierungsansatz (H) die besten Prognosen in allen betrachteten Trainingsfällen, d.h. die Prognosefehler des Grey-Box-Modells (GB) werden effektiv korrigiert. Andererseits beweist der hybride Ansatz eine höhere Robustheit gegen wenig verfügbare Trainingsdaten als die GPR, was dem physikalischen Rückgrat des Grey-Box-Modell-Anteils zu verdanken ist.

Im Fall der Energiebedarfsprognose sind die Ergebnisse analog dazu: Das hybride Modell erzielt den kleinsten Fehler in allen Fällen und zeigt ein robustes Verhalten, wenn nur wenig Trainingsdaten verfügbar sind (Bild 4).



**Bild 4: Prognosefehler der Modelle für den Energiebedarf**

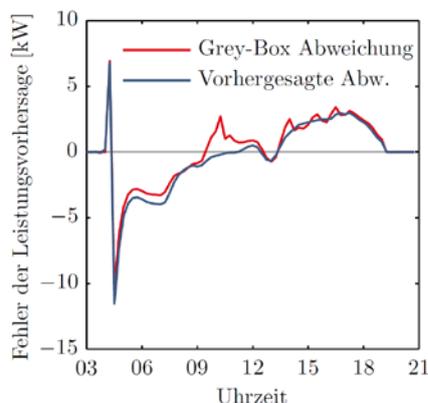
Um die Ergebnisse greifbarer zu machen, zeigt Bild 5 den Vergleich der Energiebedarfsprognosen mit dem Referenzenergiebedarf der TRNSYS-Simulation über einen Tag. Aus Darstellungsgründen wird der thermische Energiebedarf in eine Leistung ( $P_{th}$ ) umgewandelt.



**Bild 5: Prognostizierte thermische Leistung an einem Tag**

Bild 5 zeigt, dass das hybride Modell nicht nur bessere Prognosen als die GPR erzielt, sondern auch die Abweichungen des Grey-Box-Modells korrekt kompensiert werden. Dieses Verhalten ist in Bild 6 explizit zu sehen: Sowohl große Fehler von über 10 kW in der frühen Einschaltphase der HLK-Anlage, wie progressiv wachsende Fehler während des Tages werden

vom GPR-Anteil des hybriden Modells richtig prognostiziert.



**Bild 6: Abweichung des Grey-Box-Modells und die Vorhersage des GPR-Anteils des hybriden Modells**

#### Fazit

Drei Modellierungsansätze wurden hinsichtlich der Prognosegenauigkeit untersucht.

Es hat sich dabei herausgestellt, dass eine Mischung aus physikalischen Modellen und einer Gaußprozess-Regression bessere Innenlufttemperatur- und Energiebedarfprognosen liefern kann als Modelle, die jeweils nur auf physikalische Gleichungen oder Gaußprozessen basiert sind.

Solche Modelle können für eine Vielzahl von Anwendungen verwendet werden, wie z.B. für den

Einsatz in einem modellprädiktiven Regler.

#### Literatur

[1] C. Rasmussen und C. Williams, Gaussian Processes for Machine Learning, MIT Press, 2006.

[2] S. Klein, et al., TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 2010.

[3] The MathWorks, Inc., Matlab, Version 8.3.0, 2014.

[4] M. Wetter, „Co-simulation of building energy and control systems with the Building Controls Virtual Test Bed,“ Journal of Building Performance Simulation, Bd. 4, Nr. 3, pp. 185-203, 2011.

[5] A. Fouquier, et al., „State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review,“ Renewable and Sustainable Energy Reviews, Bd. 23, pp. 272-288, 2013.

[6] F. Massa Gray, Gaussian Process Building Models and their Application in Model Predictive Control, Institut für Gebäudeenergetik, Universität Stuttgart, 2017.

# Solarthermische Wärmepumpensysteme

Jörn Ruschenburg

## Einleitung

Solarthermie in Heizungsanlagen wird in aller Regel mit anderen Wärmeerzeugern kombiniert, seit Jahrzehnten auch mit Wärmepumpen. Allein in Deutschland ist die Kombination bereits tausendfach realisiert worden. Die größte Besonderheit besteht darin, dass die Solarthermie in vielen Fällen auch als Umweltenergiequelle der Wärmepumpe dienen kann (vgl. Bild 1).

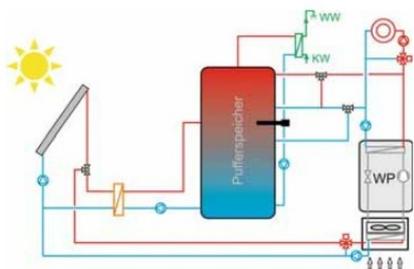


Bild 1: Solarthermisches Wärmepumpen-Kombisystem [AEE Intec / TU Graz]

Der Umfang der Anlage, die kapitalgebundenen Kosten und der regelungstechnische Aufwand steigen zwangsläufig, die Vorteile im Anlagenbetrieb sind hingegen nicht ad hoc quantifizierbar.

Im Rahmen eines vom Institut für GebäudeEnergetik betreuten und am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE durchgeführten Dissertationsprojekts wurde diese Kombination näher untersucht [1]. Hauptziele waren die Bewertung der quell- und senkenseitigen Solarthermienutzung, die Identifikation von Vor- und Nachteilen und das Aufzeigen von Potentialen. Ausgewählte Aspekte der Dissertation werden in diesem Artikel wiedergegeben.

## Marktbezogene Analyse

In Zusammenarbeit mit den Mitgliedern des IEA SHC Task 44, parallel organisiert als HPP Annex 38 [2] wurden 128 marktverfügbare Systeme erhoben und vergleichend ausgewertet (Bild 2). Die jeweiligen Installationszahlen blieben hierbei mangels Datengrundlage unberücksichtigt.

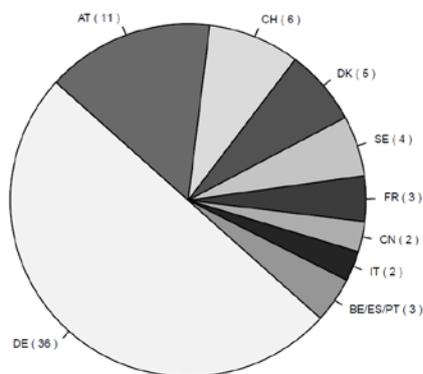


Bild 2: Marktverfügbare Systeme nach Herkunftsland

Bezüglich der „klassischen“ Quellen zeigt Bild 3, dass Außenluft oder Erdreich als alleinige Quellen jeweils von ca. eine Viertel der an-

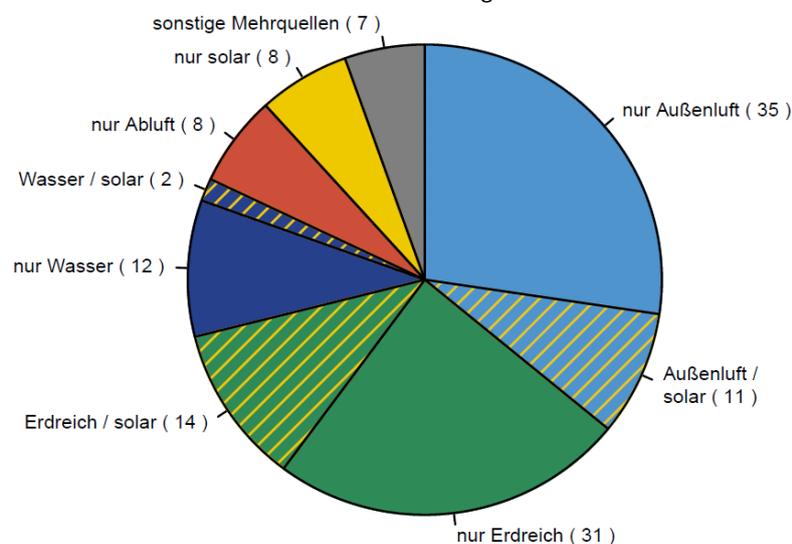


Bild 3: Marktverfügbare Systeme nach Quelle (n = 128)

gebotenen Systeme genutzt werden.

Neben den Systemen mit Solarthermie als alleiniger Umweltenergiequelle wird in einem Viertel der Systeme Solarthermie zusätzlich zu einer anderen Quelle genutzt, dargestellt als schraffierte Sektoren.

## Bewertungsgrößen

Keine der etablierten Bewertungsgrößen kann die Vielfalt der solarthermischen Wärmepumpen-Kombinationen berücksichtigen. Deshalb wurde auf neuere Vorschläge zurückgegriffen, die in Bild 4 dargestellt sind.

Nach diesen Definitionen der Jahresarbeitszahl bzw. Seasonal Performance Factor SPF bewertet der  $SPF_{bSt}$  das Wärmeerzeugungsteilsystem. Die Systemgrenze des  $SPF_{SHP+}$  hingegen umfasst weitere Zirkulationspumpen und thermische Speicher, und somit wird hier der Nutzenergie-Aufwand ins Verhältnis zum Endenergie-Aufwand gesetzt.

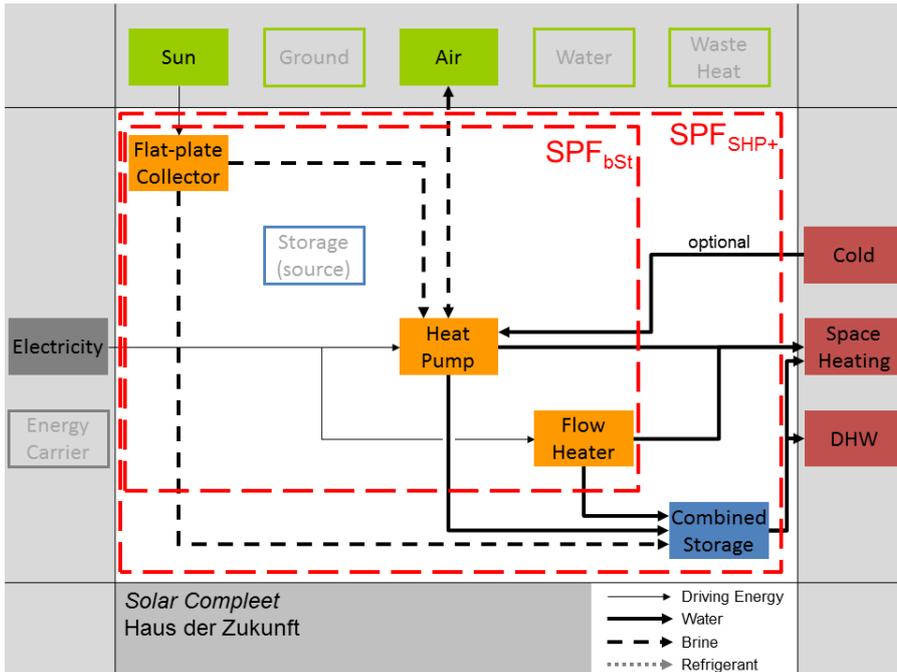


Bild 4: Vereinfachtes Schema einer Heizungsanlage, Bewertungsgrößen und Bilanzgrenzen nach Malenkovic et al. [3] in Rot

**Feldtest-Projekte**

Für 32 im Rahmen des oben genannten Task 44 / Annex 38 dokumentierte Feldtest-Anlagen zeigt Bild 5 die Bandbreite der Jahresarbeitszahlen SPF<sub>SHP</sub> mit Werten zwischen 1,3 und 5,1. Der als gestrichelte Linie gezeigte Median

beträgt lediglich 2,9. Werden die thermischen Speicher und Ladepumpen außer Acht gelassen und die Bilanzgrenze enger gezogen, ergeben sich für die Jahresarbeitszahlen SPF<sub>bst</sub> Werte zwischen 1,7 und 6,1. Der Median beträgt hier 3,5 und wird als strichpunktier

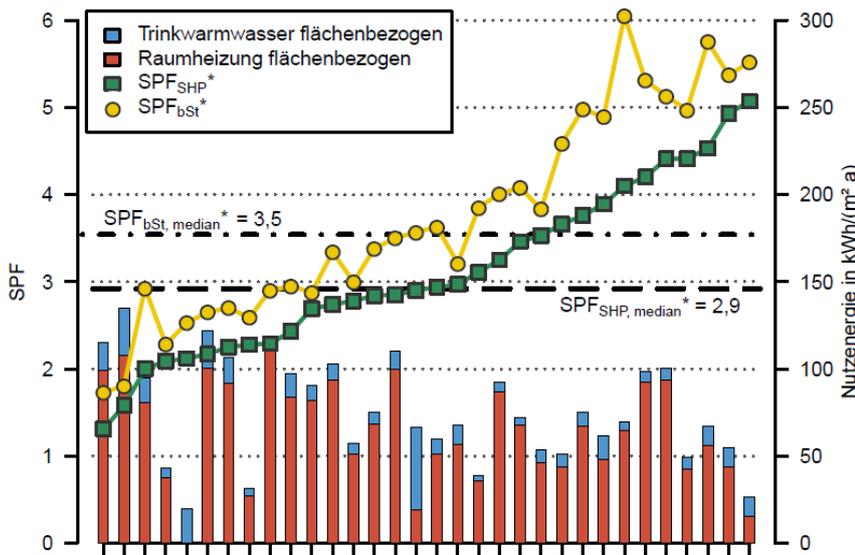


Bild 5: Jahresarbeitszahlen SPF<sub>SHP</sub> und SPF<sub>bst</sub> der Feldtestanlagen (Quadrate und Kreise, auf die linke Achse bezogen) sowie Aufwände für Raumheizung und Trinkwarmwasser (Säulen, auf die rechte Achse bezogen).

Linie gezeigt.

Nicht gezeigt werden hier die Einflüsse u.a. von Komponenteneigenschaften, Klima und Nutzerverhalten, mit denen die breite Streuung zumindest teilweise erklärt werden kann.

Die Werte sind aber als kritisch einzustufen, da kaum Vorteile gegenüber nicht-solaren Wärmepumpen oder anderen Wärmeerzeugern aufgezeigt werden konnten. Allerdings entstammen die ausgewerteten Anlagen mehrheitlich Forschungsprojekten. In Detailanalysen einiger Anlagen konnten folglich wirkungsstarke Regelfehler identifiziert werden.

Empfehlenswert scheint ein systematischer Feldtest von solchen solarthermischen Wärmepumpenanlagen, die sämtlich dem Stand der Technik entsprechen, um einen aussagekräftigen Vergleich mit anderen Wärmeerzeugern zu ermöglichen.

**Literatur**

[1] J. Ruschenburg: Bewertung von Wärmepumpensystemen mit solarthermischer Quelle durch Feldtest- und Simulationsmethoden. Universität Stuttgart, Institut für GebäudeEnergetik, Mitteilung Nr. 26, ISBN 978-3-9811996-5-9, 2017.

[2] J.-C. Hadorn (Hrsg.): Solar and Heat Pump Systems for Residential Buildings. John Wiley & Sons, Inc., ISBN 978-3-433-03040-0, 2015

[3] I. Malenkovic, S. Eicher und J. Bony: Definition of main system boundaries and performance figures for reporting on SHP systems. 2012.

# Effektiver thermischer Bohrlochwiderstand von Erdwärmesonden

Mathieu Riegger

## Hintergrund

Die Wärmetransporteigenschaften von Erdwärmesonden (EWS) im (quasi-)stationären Betriebszustand sind durch den effektiven thermischen Bohrlochwiderstand  $R_{b,eff}$  charakterisiert, der in zahlreichen gängigen Erdwärmesondenauslegungsprogrammen entweder berechnet oder als einer der zentralen Parameter direkt eingegeben werden kann.

Je geringer der effektive thermische Bohrlochwiderstand  $R_{b,eff}$  einer Erdwärmesonde ist, desto besser sind die Wärmeübertragungseigenschaften dieser Erdwärmesonde. Der effektive thermische Bohrlochwiderstand ist der wesentliche thermische Parameter, auf den neben der Tiefe bei der Erstellung einer Erdwärmesonde Einfluss genommen werden kann. Bei einem Erdwärmesondenfeld spielen zusätzlich die Anzahl, Anordnung und Verschaltung der Erdwärmesonden eine wesentliche Rolle.

## Problemstellung

Der Einfluss verschiedener Faktoren (z. B. Art des Verfüllmaterials, Bohrl Lochdurchmesser, Position der Sondenrohre im Bohrloch) auf den effektiven thermischen Bohrlochwiderstand von fertiggestellten Erdwärmesonden ist bisher allerdings nicht zufriedenstellend untersucht. Auch fanden bisher keine systematischen Untersuchungen statt, wie der mit Hilfe von Thermal Response Tests an fertiggestellten Erdwärmesonden bestimmbare effektive thermische Bohrlochwiderstand mit Hilfe von Berechnungsmodellen vorab möglichst genau berechnet

werden kann. Diese Untersuchungen sind an fertiggestellten Erdwärmesonden nur bedingt möglich, da die für die Berechnung von  $R_{b,eff}$  relevanten Parameter wie der Verlauf der Sondenrohre im Bohrloch sowie die tatsächliche Verfüllqualität und damit die Wärmeübertragungseigenschaften im Bohrloch in der Regel unbekannt oder unter vertretbarem Aufwand nicht mit hinreichender Genauigkeit ermittelbar sind.

Für die Auslegung aller Erdwärmesondenanlagen, insbesondere für kleine und mittelgroße, an denen aus Kostengründen meist kein Thermal Response Test zur Bestimmung der Untergrund-Wärmeleitfähigkeit und des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands durchgeführt wird, sind die genannten Fragestellungen jedoch von großer Bedeutung.

## Vorgehen

Zunächst wurde ein neues Mess- und Auswerteverfahren inklusive des zugehörigen Versuchsaufbaus (siehe Bild 1) zur Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands von unter Baustellenbedingungen eingebauten, 30 m tiefen Erdwärmesonden entwickelt. Im Gegensatz zum bekannten Verfahren des Thermal Response Tests wird damit eine verbesserte Genauigkeit erreicht und die untersuchten Erdwärmesonden können nach der Versuchsdurchführung außerdem zerstörungsfrei rückgebaut werden. Auf diese Weise wurden bei 19 Erdwärmesonden die folgenden Einflussfaktoren untersucht (siehe Bild 2):

- Art der Erdwärmesonde (1-U-EWS, 2-U-EWS)

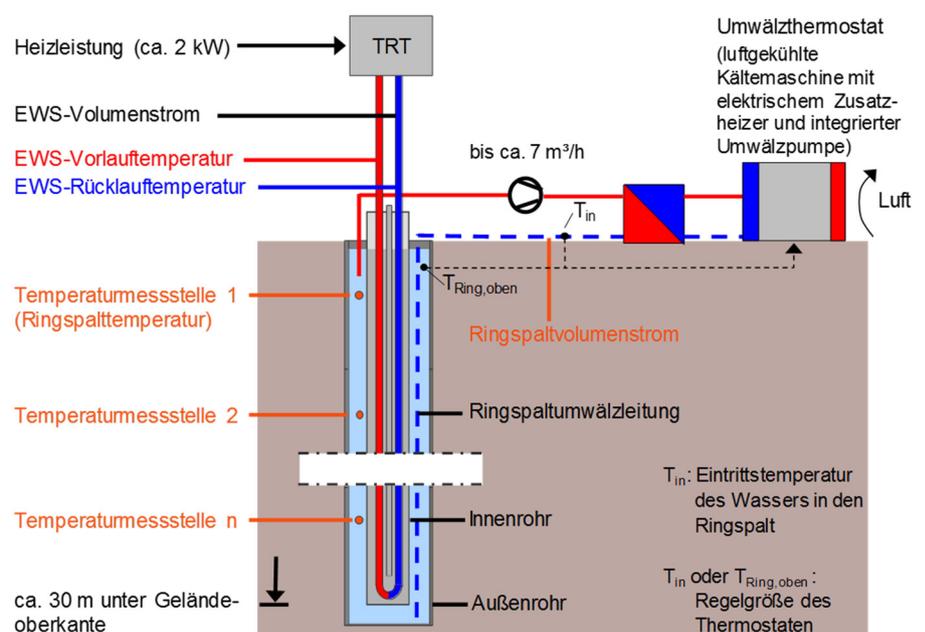


Bild 1: Versuchsaufbau zur Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands

- Art und Wärmeleitfähigkeit des Füllmaterials
- Bohrl Lochdurchmesser
- Position der Sondenrohre im Bohrl Loch (Abstandshalter/ Zentrierhilfen mit unterschiedlichen Einbauabständen)
- EWS-Volumenstrom

möglichst genauen Berücksichtigung des effektiven thermischen Bohrl Lochwiderstands bei einer EWS-Anlagenauslegung.

Im Zusammenhang mit diesen Untersuchungen wird der auf einen Referenzbohrl Lochdurchmesser bezogene **referenzierte effektive thermische Bohrl Lochwiderstand** als ver-

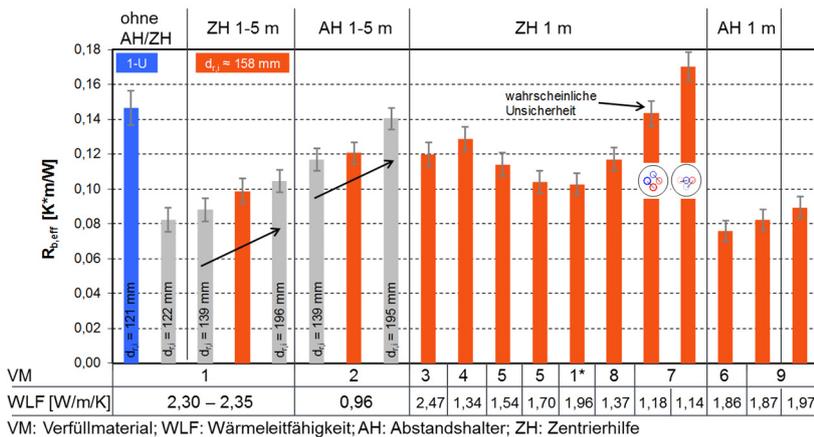
(Vorab-)Berechnung des zu erwartenden  $R_{b,eff}$ -Werts zu ermöglichen, wird ein Verfahren vorgeschlagen, das auf der Verwendung sogenannter **kalibrierter Schenkelabstände** der untersuchten Erdwärmesonden basiert.

Der kalibrierte Schenkelabstand wird durch Berechnung von Vergleichswerten des effektiven thermischen Bohrl Lochwiderstands der untersuchten Erdwärmesonde bestimmt. Für die Berechnung der  $R_{b,eff}$ -Vergleichswerte werden die realen Geometrie- und Betriebsbedingungen der untersuchten Erdwärmesonde verwendet. Lediglich der Schenkelabstand der Sondenrohre (Definition siehe Bild 3) wird bei den Vergleichswertberechnungen so lange variiert, bis der berechnete  $R_{b,eff}$ -Vergleichswert mit dem gemessenen  $R_{b,eff}$ -Wert übereinstimmt. Der auf diese Weise ermittelte Schenkelabstand wird als kalibrierter Schenkelabstand bezeichnet.

Die Verwendung der kalibrierten Schenkelabstände bietet die Möglichkeit, die in einer EWS zu erwartenden Verhältnisse (Sondenrohrverlauf, Kontaktwiderstände, Füllqualität) realitätsnah zu berücksichtigen. Bisher konnten für fünf praxisrelevante EWS-Konfigurationen kalibrierte Schenkelabstände ermittelt werden.

### Ausblick

Auf Grund der hohen Praxisrelevanz werden weitere  $R_{b,eff}$ -Messungen in dem entwickelten Versuchsaufbau an den in Deutschland am häufigsten eingesetzten 2-U-EWS ohne zusätzliche Einbauten (Abstandshalter, Zentrierhilfen etc.) empfohlen, aus denen wenn möglich eine Korrelation zwischen dem Bohrl Lochdurchmesser und dem kalibrierten Schenkelabstand abgeleitet werden sollte.



**Bild 2:** Übersicht der gemessenen effektiven thermischen Bohrl Lochwiderstände für 19 bei EWS-Standardbetriebsbedingungen (u.a. einheitlicher Sondenrohrvolumenstrom) untersuchte Erdwärmesonden

Die Übertragbarkeit der im neu entwickelten Versuchsaufbau ermittelten  $R_{b,eff}$ -Werte auf im Untergrund eingebaute Erdwärmesonden unter Einhaltung sehr geringer Abweichungen wurde mit Hilfe von Finite-Element-Simulationen nachgewiesen.

### Bewertung und Anwendungshinweise

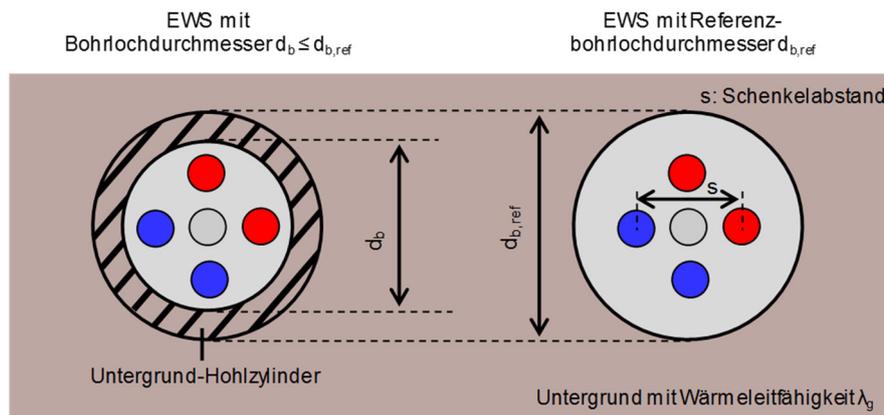
Zur Bewertung der 19 untersuchten EWS-Konfigurationen wurden Systemberechnungen für einen definierten Anwendungsfall (Beheizung eines Einfamilienhauses) mit einem gängigen EWS-Auslegungsprogramm durchgeführt. Dabei wurden die zur Erreichung eines einheitlichen thermischen Auslegungsziels erforderlichen Bohrtiefen ermittelt. Die hierbei gegenüber der „besten“ EWS ermittelten zusätzlich erforderlichen Bohrtiefen von teilweise 25 % und mehr verdeutlichen die Notwendigkeit einer

einfaches Bewertungskriterium eingeführt (siehe Bild 3), das in seiner Aussagekraft gegenüber dem Verfahren der Systemberechnung nicht eingeschränkt ist.

Mit Hilfe des referenzierten effektiven thermischen Bohrl Lochwiderstands können  $R_{b,eff}$ -Werte von EWS mit verschiedenen Bohrl Lochdurchmessern direkt miteinander verglichen werden.

Bei diesen Vergleichen konnte gezeigt werden, dass geringe referenzierte effektive thermische Bohrl Lochwiderstände für alle Bohrl Lochdurchmesser zwischen ca. 120 und 200 mm erreicht werden, sofern ein thermisch verbessertes Füllmaterial mit einer hohen Wärmeleitfähigkeit von ca. 2 W/m/K verwendet und gleichzeitig auf Maßnahmen zur Bündelung der Sondenrohre in kurzen Abständen (z.B. durch Zentrierhilfen) verzichtet wird.

Um für zukünftige Anlagenauslegungen eine möglichst genaue



$$R_{b,eff,ref} = R_{b,eff} + R_{\text{Untergrund-Hohlzylinder}} = R_{b,eff} + \frac{\ln\left(\frac{d_{b,ref}}{d_b}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_g}$$

Vorschlag für  $d_{b,ref}$  und  $\lambda_g$ :  $d_{b,ref} = 200 \text{ mm}$ ;  $\lambda_g = 2 \text{ W/m/K}$

**Bild 3:** Veranschaulichung der Methode zur Bestimmung des referenzierten effektiven thermischen Bohrlochwiderstands  $R_{b,eff,ref}$

### Schlussbemerkung

Dieser Bericht stellt einen Auszug aus der Dissertation von Mathieu Riegger [1] dar, die am Steinbeis Forschungsinstitut Solites innerhalb

des Forschungsvorhabens EWSplus [2] erstellt und von Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt vom IGE der Universität Stuttgart betreut wurde.

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Forschungsvorhaben EWSplus wurde mit Mitteln des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg gefördert. Der Autor dankt für die Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt beim Autor.

### Literatur

[1] Riegger, Mathieu: Entwicklung eines Messverfahrens zur Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands von Erdwärmesonden, Dissertation, IGE Universität Stuttgart, Veröffentlichung 2018

[2] Riegger, Mathieu: EWSplus – Untersuchungen zur Qualitätssicherung von Erdwärmesonden, Steinbeis Forschungsinstitut Solites, Stuttgart, 2013