

KUEHA – RAUMKÜHLUNG ÜBER DIE VORHANDENE HEIZUNGSANLAGE UNTER NUTZUNG REGENERATIVER ENERGIEQUELLEN

André Kremonke, Markus Arendt,
Lars Haupt, Alf Perschk, Clemens Felsmann

TU Dresden, Professur für Gebäudeenergie-technik und Wärmeversorgung,
andre.kremonke@tu-dresden.de, www.tu-dresden.de/mw/kueha

Kurzfassung: Mit dem Projekt KUEHA¹ wird, aufbauend auf vorangegangene theoretische Untersuchungen der Nachweis erbracht, dass mit der (bestehenden) Heizungsanlage im sommerlichen Kühlfall eine deutliche Verbesserung der thermischen Behaglichkeit erreicht werden kann. Dabei wird insbesondere die mit Freien Heizflächen erzielbare Kühlwirkung betrachtet. Die aktuellen Untersuchungen beschränken sich nicht nur auf die Kühlwirkung der Heizflächen, sondern schließen weitere, für die Anlagenfunktionalität erforderliche Aspekte ein. Hierzu zählen vor allem die Möglichkeiten einer flexiblen Energiebereitstellung und die Nutzung regenerativer Energiequellen.

Keywords: KUEHA, Kühlung, Heizflächen, Kälteerzeugung, Wärmepumpen, Behaglichkeit, regenerativ, Feldtest, Simulation, Klimawandel

1 Motivation

Die Auswirkungen des Klimawandels werden in urbanen Gebieten während der Sommermonate durch zusätzliche thermische Belastungen überlagert, welche durch verschiedene anthropogene Einflussfaktoren verursacht werden (Abb. 1).

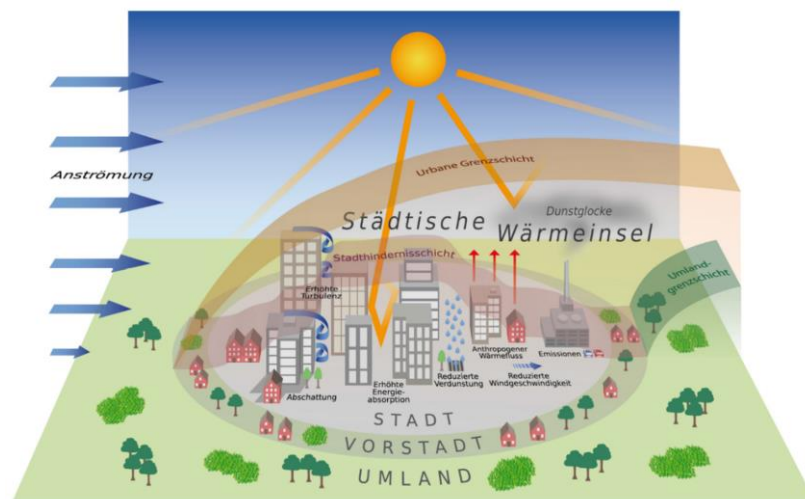


Abbildung 1: Anthropogene Einflüsse auf das Stadtklima [1]

¹ „EnOB: KUEHA – Erprobung und Demonstration einer neuartigen Systemlösung zur sommerlichen Raumkühlung unter besonderer Berücksichtigung von Energieeffizienz und Praxistauglichkeit“ Förderkennzeichen 03ET1461A

Die daraus resultierenden klimatischen Verhältnisse unterscheiden sich von denen des Umlandes vor allem durch höhere Temperatur- und Strahlungsbelastungen. Deren Wirkung führt zu dem Trend, dass die Oberflächentemperaturen der wirksamen Speichermassen nicht auf konstantem, dem Tag-/Nachtwechsel folgendem Niveau schwanken, sondern stetig ansteigen. Die damit einhergehende Belastung, bzw. Beeinträchtigung der Thermoregulation der dem Umgebungsklima ausgesetzten Menschen, führt zu einer signifikanten Erhöhung der Mortalitätsraten. Ein zeitnahes Monitoring existiert hierzu nach [2] bisher nur für die Bundesländer Berlin und Hessen. Auf dieser Datengrundlage wurden in [2] u.a. die in Abb. 2 dargestellten Mortalitäten für den Sommer 2018 ermittelt. Vor dem Hintergrund einer alternden Gesellschaft ist vor allem der starke Anstieg der Mortalität bei älteren Personen alarmierend. In [3] wird darauf verwiesen, dass in Deutschland elf der extremen Hitzeperioden seit 1950, erst nach der Jahrtausendwende aufgetreten sind. Für die Sommer 2003, 2006 und 2015 wird die Anzahl hitzebedingter Sterbefälle mit jeweils über 6000 angegeben.

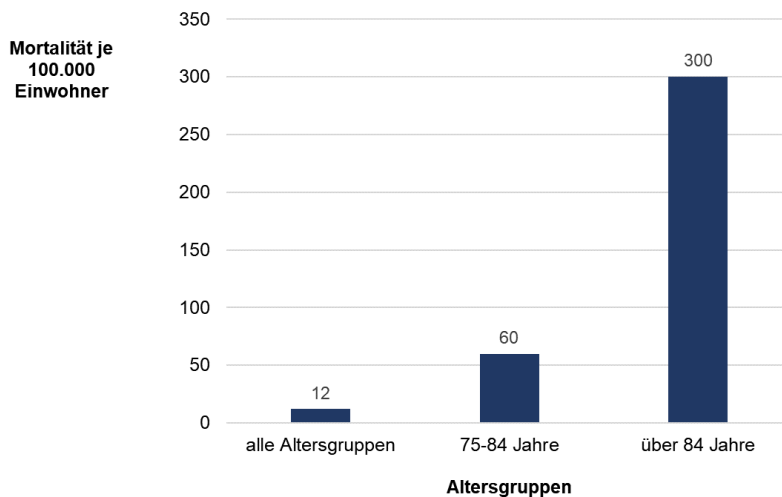


Abbildung 2: Hitzebedingte Sterbefälle in Berlin und Hessen während des Sommers 2018 nach [2]

Insbesondere im Gebäudebestand sind die Möglichkeiten zur Nachrüstung von Systemen zur Raumkühlung vor allem wegen der daraus resultierenden hohen Investitions- und Betriebskosten stark eingeschränkt. Demgegenüber kann mit der Nutzung der vorhandenen Heizungsanlage eine vergleichsweise kostengünstige und ökologische Lösung zur Raumkühlung realisiert werden. Diesbezüglich haben theoretische Voruntersuchungen [4], [5] gezeigt, dass auch mit Freien Heizflächen eine deutliche Verbesserung der thermischen Behaglichkeit erreicht werden kann. Mit dem Projekt KUEHA soll der Nachweis erbracht werden, dass sich die theoretischen Erkenntnisse auf praktische Anwendungsfälle übertragen lassen. Weiterhin werden die Untersuchungen auf die gesamte Kette, von der Kältebereitstellung über die Verteilung bis zur Übergabe erweitert und dabei auch regelungstechnische Problemstellungen sowie Aspekte der thermischen Behaglichkeit betrachtet.

2 Untersuchungsmethodik

Schwerpunkt der Untersuchungen ist die praktische Erprobung in mehreren Feldtestobjekten. Ergänzend werden analytische-, numerische- und Laboruntersuchungen durchgeführt. Die numerischen Untersuchungen erfolgen unter Nutzung der bidirektional gekoppelten Anlagen- und Gebäudesimulation TRNSYS-TUD [6].

Neben dem ungekühlten Vergleichsfall werden auf der Übergabeseite

- Kühlsegel und Kühldecken,
- Heizflächen mit großer Bauhöhe (Heizwände),
- Wandflächenheizungen sowie
- Fußbodenheizungen

als Vergleichssysteme zur Kühlung über Freie Heizflächen betrachtet.

In den Feldtestobjekten werden verschiedene Möglichkeiten zur Kältebereitstellung genutzt:

- Kompressionskältemaschinen
- Rücklaufauskopplung Prozesskälte
- Wärmepumpen (Gasmotor-Wärmepumpe und Sole-Wasser-Wärmepumpe)
- Adsorptionskältemaschine mit BHKW-Abwärmenutzung

3 Untersuchungsergebnisse

Abb. 3 gibt einen Überblick über die im Projekt untersuchten Problemstellungen. Hierzu werden in den nachfolgenden Abschnitten 3.1 bis 3.4 ausgewählte Ergebnisse vorgestellt.

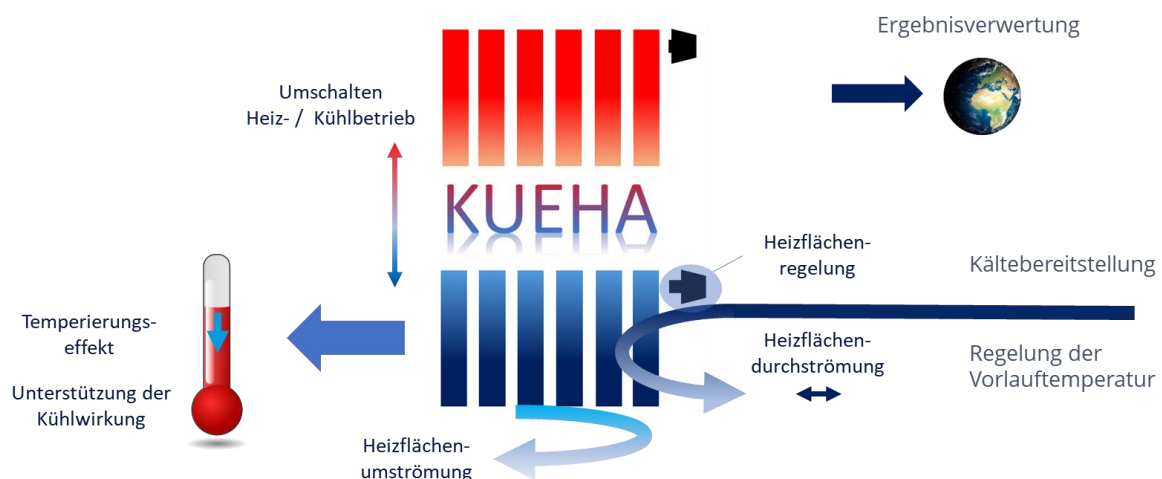


Abbildung 3: Untersuchungsschwerpunkte im Rahmen des Projektes KUEHA

3.1 Heizflächendurchströmung

Obwohl es für Freie Heizflächen verschiedene Anschlussmöglichkeiten gibt, werden die wärmeübertragenden Platten wasserseitig immer von oben nach unten durchströmt. Bereits in [4], [5] konnte mit CFD-Simulationen nachgewiesen werden, dass sich im Kühlfall bei einer solchen Durchströmung eine Kurzschlussströmung einstellen kann, bei der nur ein kleiner Teil der Heizkörperoberfläche zur Raumkühlung aktiviert wird. Die bisherigen praktischen Untersuchungen zeigen, dass sich bei mehrlagigen, parallel durchströmten Heizflächen eine solche Kurzschlussströmung nur bei kleinen Masseströmen einstellt (siehe Abb. 4a). Dies lässt sich durch eine Umkehr der Durchflussrichtung vermeiden (siehe Abb. 4c). Hierzu kann im Heizungsnetz an zentraler Stelle mit geringem Aufwand eine Installation zur Strömungsumkehr vorgesehen werden. Üblicherweise erfolgt jedoch die hydraulische Bemessung des Verteilnetzes so, dass die Heizflächen mit einem zur Auslegungsleistung korrespondierenden Massestrom versorgt werden. Für diesen Fall stellte sich bei den praktischen Untersuchungen eine vollständige Durchströmung der Heizfläche ein (siehe Abb. 4b). Völlig unproblematisch verhalten sich seriell durchströmte Heizflächen. Bei diesen Heizflächen wird zunächst die vordere und danach die hintere Platte durchströmt. Dabei konnte auch bei kleinen Masseströmen keine Kurzschlussströmung beobachtet werden (siehe Abb. 4d). Heizflächen mit serieller Durchströmung sind bereits seit 2005 auf dem Markt und werden außerordentlich erfolgreich verkauft. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass bei Bestandsanlagen eine gute Durchdringung gegeben ist.

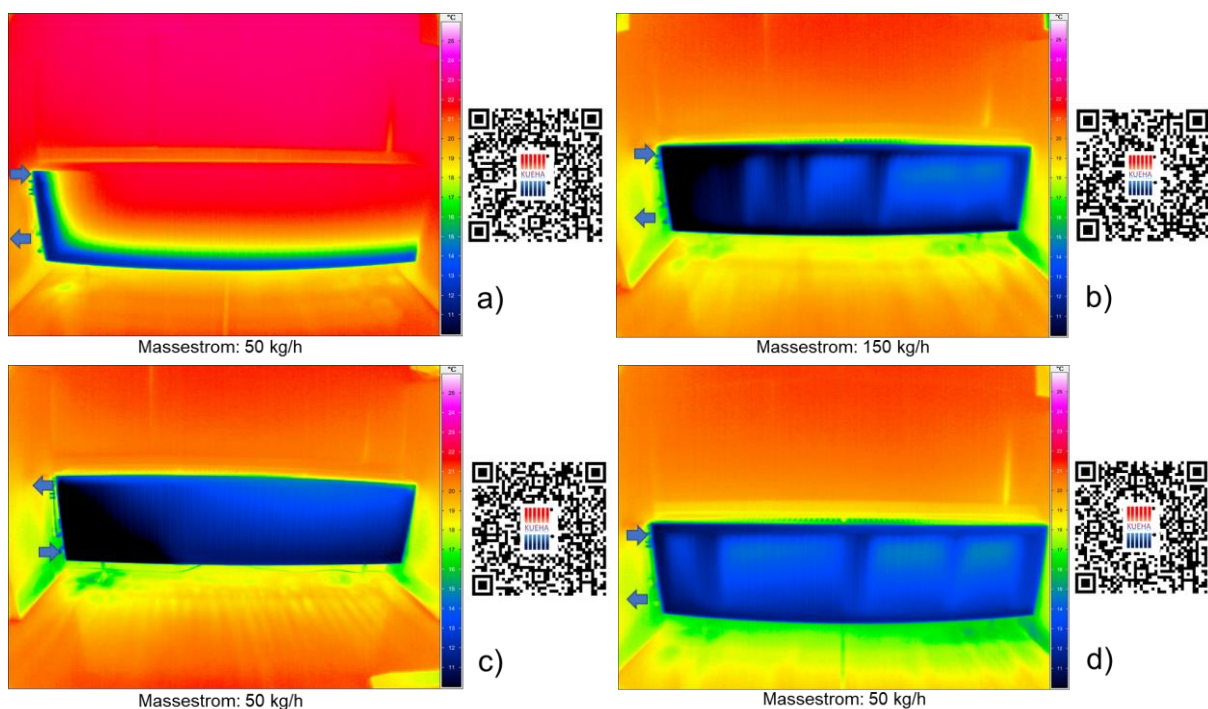


Abbildung 4: Verteilung der Oberflächentemperatur gekühlter, parallel (a-c) durchströmter Heizflächen bei Variation der Durchflussrichtung und Durchflussmenge sowie einer seriell durchströmten Heizfläche (d) [7]

3.2 Heizflächenumströmung

Im Heizfall stellt sich an Freien Heizflächen luftseitig eine Auftriebsströmung ein. Oberhalb der Heizfläche unterliegt der weitere Strömungsverlauf dem Einfluss der Raumluftrömung, welche in diesem Bereich meist von der sich an der Außenwand einstellenden Fallluftströmung dominiert wird. Dadurch können sich unterschiedliche, mehr oder weniger diffuse Strömungsverläufe ergeben.

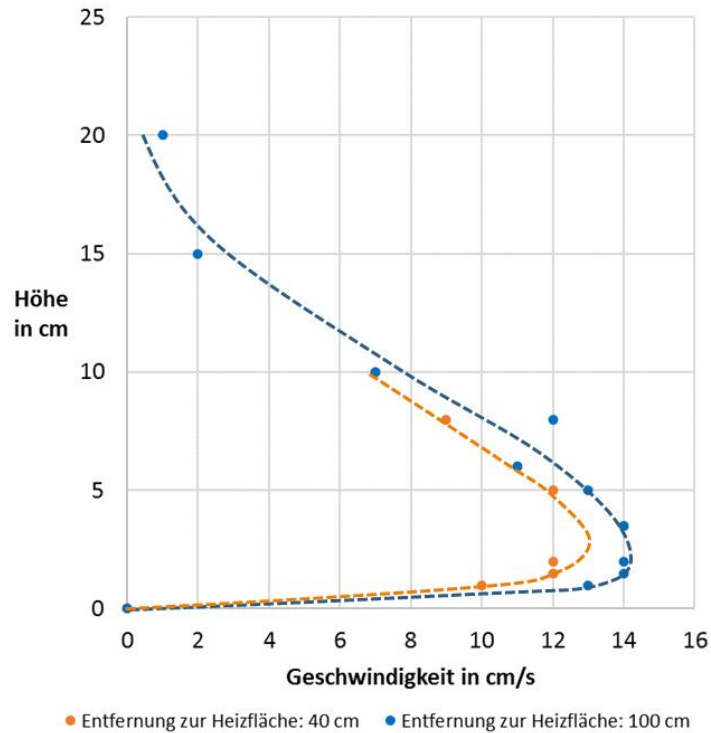


Abbildung 5: Gemessene vertikale Profile der Luftgeschwindigkeit bei verschiedenen Entfernungen zur gekühlten Heizfläche [7]

Im Kühlfall stellt sich ein definierter Strömungsverlauf ein, bei dem die vom Heizkörper erzeugte Kaltluftströmung zunächst auf den Fußboden fällt und auf diesem entlang in Richtung der Aufenthaltszone strömt. Abb. 5 zeigt beispielhaft gemessene vertikale Luftgeschwindigkeitsverteilungen in verschiedenen Entfernungen zur gekühlten Heizfläche. In [8] wurde eine ähnliche Strömungsform experimentell untersucht. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass auch bei hohen Oberflächentemperaturen des Fußbodens eine Auftriebsströmung erst sehr spät einsetzt. Damit ist die vom Heizkörper ausgehende Kaltluftströmung sehr gut geeignet, um thermische Lasten vom Fußboden aufzunehmen. Da die Oberflächentemperatur von Personen oberhalb der Temperatur im Kaltluftsee liegt, werden diese wiederum durch aufsteigende Kaltluft gekühlt (siehe Abb. 6). Dieser Effekt ähnelt stark der Quelllüftung, deren Kühlung als sehr angenehm beschrieben wird. Die aus dem Kaltluftsee resultierende Kühlwirkung von Personen wirkt zusätzlich zum in Abschn. 3.3 beschriebenen Temperierungseffekt.

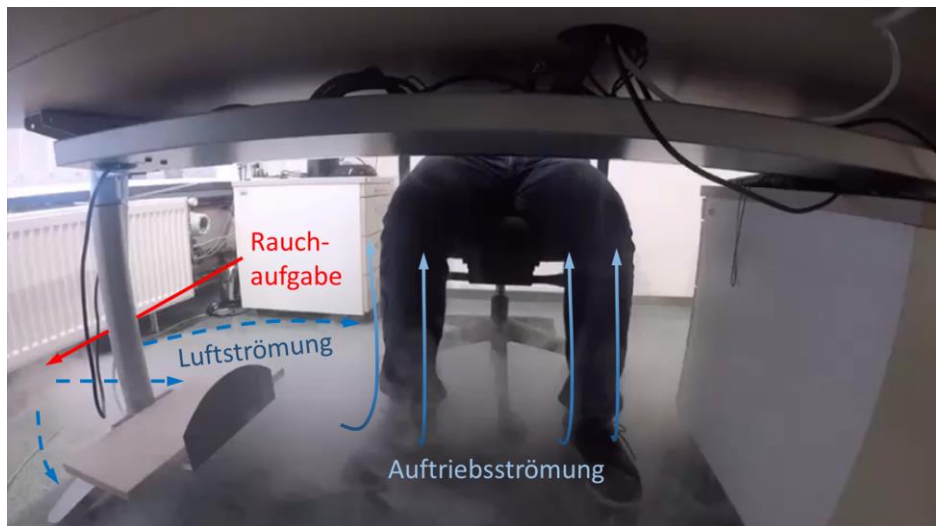


Abbildung 6: Visualisierung der von einem gekühlten Heizkörper ausgehenden und an einer Person aufsteigenden Luftströmung [7]

3.3 Temperierungseffekt

Im Kühlfall haben Freie Heizflächen eine vergleichsweise geringe Leistung, da die Differenz zwischen der mittleren Oberflächentemperatur der Heizfläche und der Lufttemperatur deutlich kleiner als im Heizbetrieb ist. Daher kann beim Kühlen über Freie Heizflächen die Gewährleistung der thermischen Behaglichkeit nicht für alle Betriebssituationen erwartet werden. Die theoretischen Untersuchungen aus [4], [5] haben gezeigt, dass sich bei der Kühlung über Freie Heizflächen dennoch eine deutliche Verbesserung der thermischen Behaglichkeit gegenüber dem ungekühlten Vergleichsfall einstellt. Dieser Effekt wird als Temperierung bezeichnet. Um diesen Effekt optimal nutzen zu können, ist bei der Kühlung über Freie Heizflächen während einer Kühlperiode ein durchgängiger Kühlbetrieb erforderlich. Dadurch können in Zeiträumen mit geringen Wärmebelastungen die thermischen Speichermassen des Gebäudes entladen werden, um in Zeiträumen mit hohen Wärmebelastungen ein niedrigeres Temperaturniveau zu erreichen. Die praktischen Erfahrungen zeigen, dass eine zu starke Auskühlung der Räume während einer Kühlperiode nicht zu erwarten ist. Dies liegt einerseits an der vergleichsweise geringen Kühlleistung Freier Heizflächen und andererseits an deren Selbstregelungseffekt. Dieser resultiert aus dem hohen Temperaturniveau des Kühlmediums. Mit sinkender Raumtemperatur wird die Temperaturdifferenz zur gekühlten Heizfläche sehr klein und limitiert dadurch deren Leistung.

Für die Bewertung der Systemlösung ist eine Quantifizierung des Temperierungseffektes notwendig, aber schwierig umsetzbar. Laboruntersuchungen sind wegen eingeschränkter Möglichkeiten zur Berücksichtigung gebäudeinterner Speichereffekte ungeeignet. Simulationsrechnungen bieten grundsätzlich die Möglichkeit einer hinreichend genauen Abbildung der Realität, jedoch werden Simulationsergebnisse ohne praktischen Nachweis oftmals infrage gestellt. Ein wesentlicher Vorteil von Simulationsrechnungen ist die Reproduzierbarkeit der Randbedingungen. Bei Felduntersuchungen ist die Reproduzierbarkeit der Randbedingungen, insbesondere beim sommerlichen Kühlfall, problematisch. Dies resultiert vor allem aus der Dynamik der Wärmebelastung und den daraus resultierenden

Speichereffekten sowie den eingeschränkten Möglichkeiten der Versuchsplanung unter Berücksichtigung der Witterungsbedingungen. Notwendige Kreuztests zwischen einem gekühlten und ungekühlten Vergleichsfall führen schnell zu Akzeptanzproblemen der Nutzer. Weiterhin wären bei einer Versuchsdurchführung längere Einschwingvorgänge erforderlich, welche aber mit dem insgesamt zur Verfügung stehenden Versuchszeitraum konkurrieren.

Im Rahmen des Projektes wurden daher verschiedene Ansätze zur Quantifizierung des Kühleffektes verfolgt. Die Autoren gehen davon aus, dass eine zusammenfassende Betrachtung der daraus resultierenden Ergebnisse die erforderliche Quantifizierung des Temperierungseffektes erlaubt.

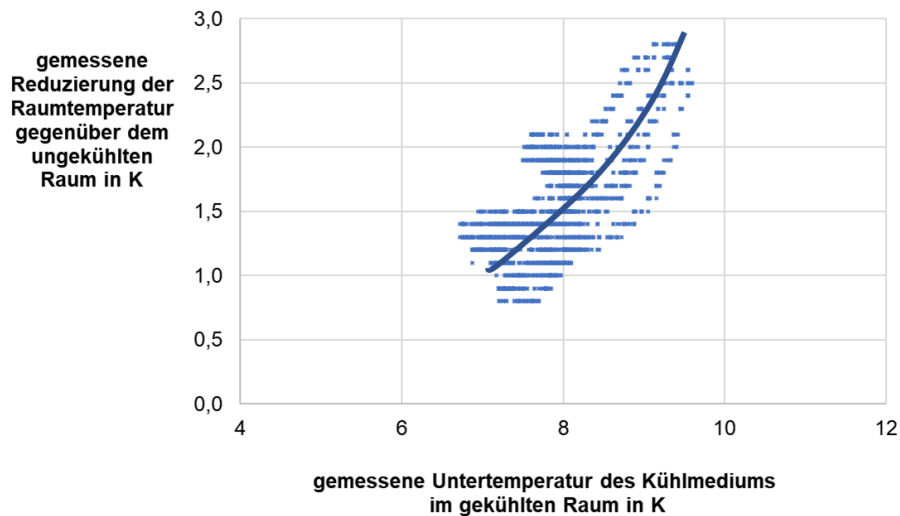


Abbildung 7: Wirkung der Untertemperatur des Kühlmittels auf die Absenkung der Raumtemperatur [7]

In einem Feldtestobjekt konnten zwei benachbarte und identisch ausgestattete Büroräume einem mehrwöchigen Monitoring unterzogen werden. Dabei wurde einer der beiden Büroräume über zwei Freie Heizflächen gekühlt, während der andere Büroraum nicht gekühlt wurde. Beide Büroräume waren während des Untersuchungszeitraumes ungenutzt. Während des Versuchszeitraumes stellte sich im ungekühlten Büroraum eine deutlich niedrigere Raumtemperatur ein. Wegen der nahezu identischen Randbedingungen kann die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Räumen als Temperaturabsenkpotehtial interpretiert werden. Während des Versuchszeitraumes war die Ansteuerung zur Vorlauftemperaturregelung noch nicht installiert. Zur Vermeidung von Tauwasserbildung wurde die Vorlauftemperatur im Handbetrieb auf ein vergleichsweise hohes Niveau eingestellt, so dass dadurch die Kühlwirkung der Heizflächen deutlich begrenzt wurde. In Abb. 7 ist die gemessene Reduzierung der Raumtemperatur über der Untertemperatur des Kühlmediums aufgetragen. Diese Zuordnung ermöglicht die Extrapolation der möglichen Temperaturabsenkung bei niedrigeren Untertemperaturen. Im vorliegenden Fall hätte eine Vorlauftemperaturregelung eine um mindestens 3 K niedrigere Vorlauftemperatur bereitstellen können. Damit sollte sich eine deutlich größere Temperaturabsenkung erreichen lassen.

In einem anderen Feldtestobjekt mit sechs Büroräumen besteht die Möglichkeit, nicht nur mit Freien Heizflächen, sondern auch über verschiedene Vergleichssysteme zu kühlen (siehe Abschn. 2). Hier wurden über zwei Kühlperioden hinweg Vergleichsuntersuchungen durchgeführt. Die Messungen zeigen, dass das Temperaturabsenkpotential der Freien Heizflächen etwa halb so hoch wie das Absenkpotential der untersuchten Komfortkühlsysteme ist. Beispielhaft sind in Abb. 8 die Mittelwerte der Raumtemperaturen (im Zeitraum 10:00-14:00 Uhr) über der maximalen Außentemperatur des jeweiligen Tages aufgetragen. Da die Räume einen großen Glasflächenanteil aufweisen und die Fenster nach Osten ausgerichtet sind, treten im Zeitraum 10:00-14:00 Uhr die höchsten thermischen Belastungen auf. Für den gekühlten und ungekühlten Vergleichsfall wurden in Abb. 8 nur Zeiträume mit maximalen Wärmebelastungen ausgewählt. Obwohl die Versuchsdurchführung zu der vorangestellten Betrachtung von zwei Vergleichsräume abweicht, entspricht das Absenkpotential dem aus Abb. 7 extrapolierten Wert von mehr als 3 K.

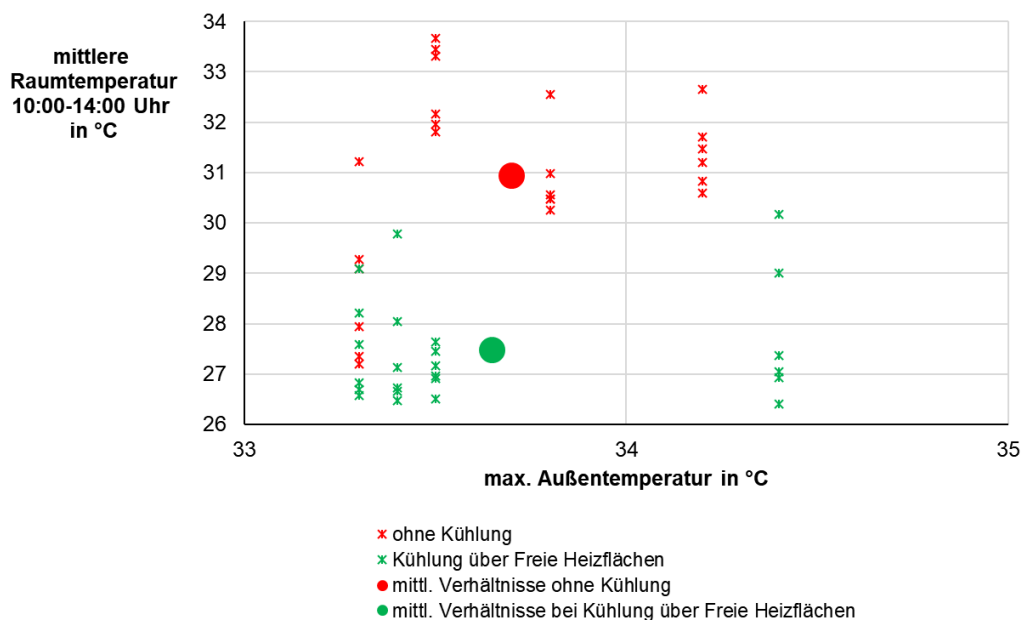


Abbildung 8: Wirkung der Untertemperatur des Kühlmittels auf die Absenkung der Raumtemperatur (Messergebnis) [7]

Die Abb. 8 zugrundeliegende Versuchsdurchführung ist eine zeitliche Abfolge verschiedener Szenarien. Dabei erfordert die zeitliche Abarbeitung des Versuchsprogrammes und die aus dem Witterungsverlauf resultierenden Unwägbarkeiten, den weitestgehenden Verzicht auf die Berücksichtigung von Einschwingperioden. Dies hat zur Folge, dass die Raumtemperaturen während einer Messperiode ohne Kühlung von der vorangegangenen Kühlperiode beeinflusst werden und ihrerseits die Raumtemperaturen einer sich anschließenden Kühlperiode beeinflussen. Daraus lässt sich die Schlussfolgerung ableiten, dass tendenziell für den ungekühlten Fall zu niedrige und für den gekühlten Fall zu hohe Raumtemperaturen ermittelt wurden. Simulationsrechnungen bilden diesbezüglich den Vorteil, dass solche Szenarien unter exakt gleichen Randbedingungen und voneinander entkoppelt gerechnet werden können. Für das untersuchte Gebäude mit Standort Dresden wurde innerhalb der Simulationsumgebung TRNSYS-TUD ein detailliertes Simulationsmodell erstellt, welches auch die darin befindliche Anlagentechnik abbildet. Das parametrisierte Nutzerverhalten und die inneren Wärmequellen sind an die realen Verhältnisse angelehnt. Als Wetterdatensatz wurde das örtliche

Testreferenzjahr mit Extremsommer berücksichtigt. Abb. 9 zeigt als Ergebnis von Jahressimulationen mit einer Zeitschrittweite von 3 min die Auswertung der Hauptkühlperiode. Die dargestellten Raumtemperaturverläufe ergeben sich aus einer für jeden Zeitschritt durchgeführten Mittelwertbildung über alle Büroräume. Zusätzlich sind die Obergrenzen der Behaglichkeitskategorien für Büronutzung nach DIN EN ISO 7730 [9] gekennzeichnet.

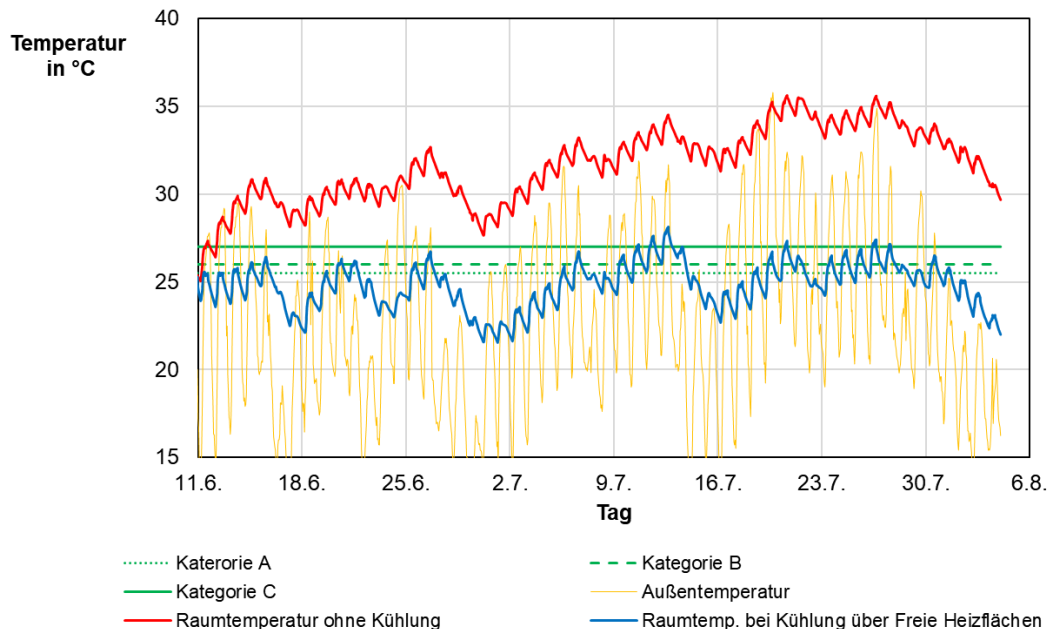


Abbildung 9: Verlauf der Außen- und Raumtemperaturen für den gekühlten und ungekühlten Vergleichsfall sowie Obergrenzen der Behaglichkeitskategorien nach DIN EN ISO 7730 [9] (Simulationsergebnis)

Aus dem Vergleich der Raumtemperaturverläufe lassen sich nachstehende Aussagen ableiten:

- Im gekühlten Fall stellt sich während der gesamten Kühlperiode ein konstantes Niveau der Raumtemperaturen bei ca. 25°C ein, welches durch Schwankungen im Bereich $\pm 3K$ überlagert wird. Dabei werden die Minimal- und Maximalwerte nur kurzzeitig erreicht. Die Obergrenze der Behaglichkeitskategorie C wird ebenfalls nur kurzzeitig überschritten.
- Ohne Kühlung steigt das Niveau der Raumtemperaturen stetig. Während der gesamten Kühlperiode ist die Obergrenze der Behaglichkeitskategorie C überschritten.
- Zu Beginn der Kühlperiode entspricht das Temperaturabsenkpotential der messtechnisch ermittelten Größenordnung bei sich abwechselnden Szenarien.
- Mit dem durchgängigen Kühlbetrieb können die thermisch wirksamen Speichermassen des Gebäudes besser zur Aufnahme und Abgabe von Wärmebelastungen genutzt werden. Dies führt zu einer größeren Amplitude der Raumtemperaturschwankungen im Tag-/Nachtwechsel und dämpft den Anstieg der Raumtemperatur bei länger anhaltenden Wärmebelastungen.

3.4 Kältebereitstellung

Wird die Heizungsanlage auch für den Kühlbetrieb genutzt, darf dabei die Taupunkttemperatur der Umgebungsluft nicht unterschritten werden. Andererseits lässt sich die Kühlleistung maximieren, wenn die Temperatur des umlaufenden Kühlmediums möglichst in der Nähe der Taupunkttemperatur liegt. Im Rahmen des Projektes KUEHA wurde daher eine taupunkttemperaturgeführte Regelung der Vorlauftemperatur erprobt. Als Führungsgröße wird dabei der mit einem Offset beaufschlagte Maximalwert gemessener Taupunkttemperaturen² verwendet. Der Offset wurde im Feldtest auf Werte von 0 bis 1 K parametrisiert, ohne dass eine Tauwasserbildung beobachtet werden konnte. Zusätzlich können an kritischen Stellen Tauwasserfühler installiert werden, deren Signal bei einer Tauwasserbildung zum Absperren des Heizkreises oder zum Ausschalten der Heizkreispumpe führt. Abb. 10 zeigt die Häufigkeiten der in einer Feldtestanlage für den Kühlbetrieb ermittelten Sollvorlauftemperaturen. Die Vorlauftemperaturen liegen auf einem Temperaturniveau, welches auch Sole-Wasser- oder Wasser-Wasser-Wärmepumpen für den Heizbetrieb als Wärmequelle nutzen. Hierbei kann für den sommerlichen Kühlbetrieb der Wärmequellenkreislauf direkt als Wärmesenke genutzt werden, ohne dass die Wärmepumpe als Kältemaschine betrieben wird. Dies hat bei günstigen geologischen Bedingungen zusätzlich den Vorteil, dass die Wärmequelle für den Heizbetrieb besser regeneriert werden kann. Adsorptionskältemaschinen, welche im Sommer beispielsweise mit der Abwärme eines BHKW angetrieben werden können, sind ebenfalls gut für den Einsatz in diesem Temperaturbereich geeignet.

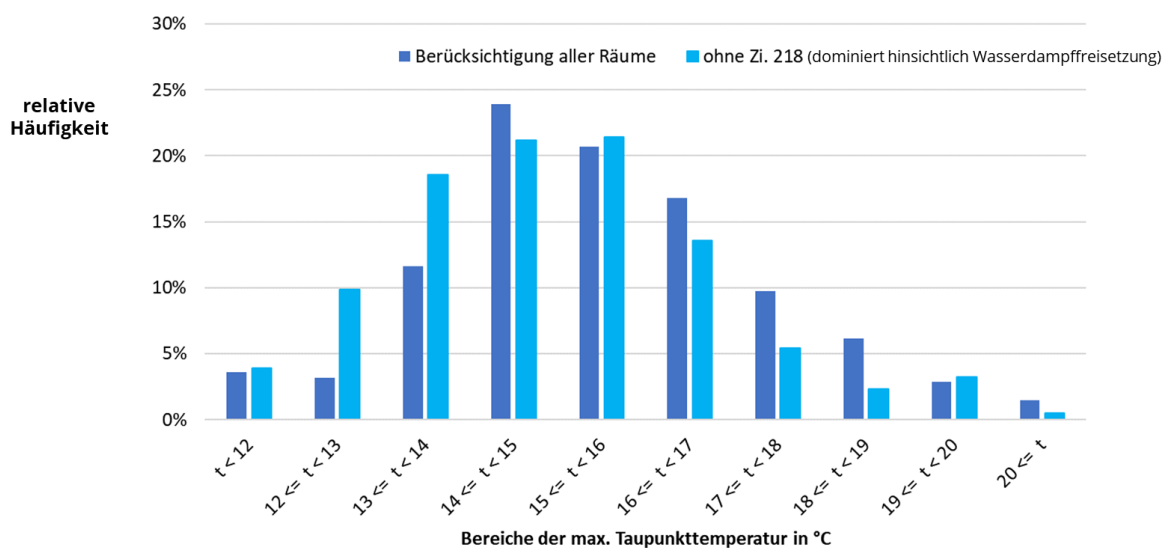


Abbildung 10: In einer Feldtestanlage ermittelte Häufigkeitsverteilung der max. Taupunkttemperatur als Führungsgröße der Vorlauftemperaturregelung [7]

Aufgrund der geringen Kühlleistung Freier Heizflächen und der Möglichkeit eines durchgehenden und unregelmäßigen Kühlbetriebes ergeben sich Möglichkeiten für eine flexible Abnahme vergleichsweise kleiner Erzeugerleistungen. Dabei lässt sich auch eine Grundkühlung über Freie Heizflächen realisieren, welche für Räume mit höheren

² Die Taupunkttemperaturen werden aus gemessenen Werten der relativen Feuchte und Lufttemperatur berechnet.

Komfortansprüchen mit einem bedarfsgeregelten Komfortkühlsystem ergänzt wird. Abb. 11 zeigt für eine solche Kombination die Anteile der in einem Feldtestobjekt erfassten Kühlenergie.

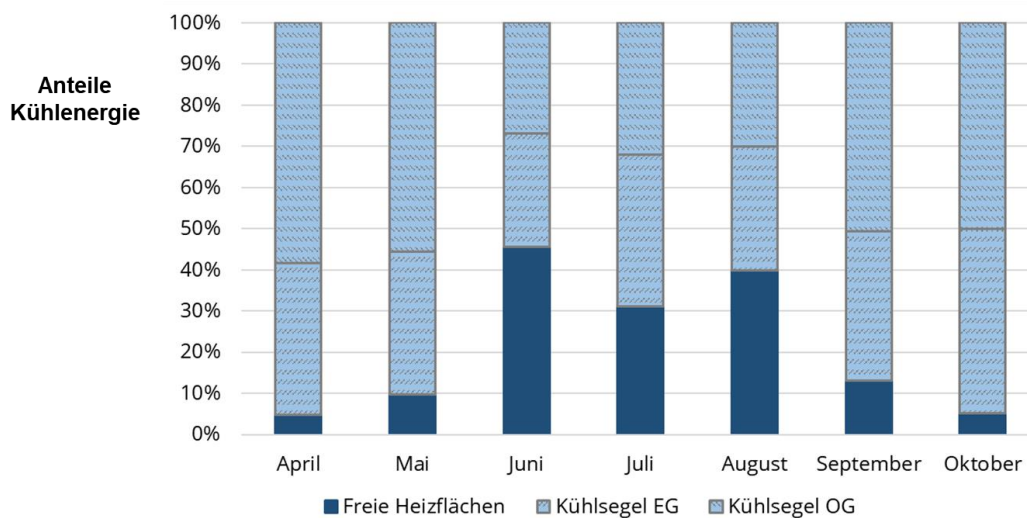


Abbildung 11: Gemessene Aufteilung der Kühlenergie zwischen verschiedenen Übergabesystemen (Zwischenergebnis - Regelung noch nicht optimiert)

4 Ausblick

Neben der weiteren Bearbeitung der bisherigen Untersuchungsschwerpunkte wird ein weiteres Feldtestobjekt, in welchem Grundwasser als Wärmesenke genutzt wird, in die Analyse einbezogen. Die praktischen Untersuchungen werden auf die Optimierung des Anlagenbetriebes ausgedehnt. Perspektivisch soll eine den Heiz- und Kühlbetrieb einschließende Gesamtsystemoptimierung in den Vordergrund rücken. Mit Hilfe der bidirektional gekoppelten Anlagen- und Gebäudesimulation erfolgt eine systematische Untersuchung des Temperaturabsenkpentials unter Berücksichtigung verschiedener Dämmstandards und Auslegungsgrößen der Heizflächen.



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Projektpartner:



Referenzen

- [1] DWD - Deutscher Wetterdienst, „Die Städtische Wärmeinsel,“ [Online]. Available: https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimawirk/stadtpl/projekt_waermeinseln/projekt_waermeinseln_node.html. [Zugriff am 30.01.2020].
- [2] Robert Koch-Institut, „Epidemiologisches Bulletin Nr. 23,“ ISSN (Online) 2569-5266, 6. Juni 2019.
- [3] M. an der Heiden, S. Muthers, H. Niemann, U. Buchholz, L. Grabenhenrich und A. Matzarakis, „Schätzung hitzebedingter Todesfälle in Deutschland zwischen 2001 und 2015,“ *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz Ausgabe 5/2019*, 2019.
- [4] W. Richter, „Handbuch der thermischen Behaglichkeit - Sommerlicher Kühlbetrieb,“ ISBN 978-3-88261-068-0, 2007.
- [5] P. Seidel, R. Gritzki, J. Haupt und M. Rösler, „Sommerliche Raumkühlung im Wohnungsbau mittels kombinierter Heiz-/Kühlsysteme und gleitend nicht normierter Raumtemperaturen (Temperierungseffekt),“ Forschungsbericht BMWi 0327483A, TU Dresden, 2013.
- [6] A. Perschk, „Gebäude- und Anlagensimulation - Ein "Dresdner Modell",“ *Gesundheitsingenieur*, August. Nr.4 2010.
- [7] M. Arendt, L. Haupt, A. Kremonke, A. Perschk und C. Felsmann, „EnOB: KUEHA - Erprobung und Demonstration einer neuartigen Systemlösung zur sommerlichen Raumkühlung unter besonderer Berücksichtigung von Energieeffizienz und Praxistauglichkeit,“ zweiter Zwischenbericht, Förderkennzeichen 03ET1461A, 2019.
- [8] A. Kremonke, „Wärmeabgabe teilbeheizter Fußböden,“ Dissertation, TU Dresden, Institut für Thermodynamik und TGA, Dresden, 2000.
- [9] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN ISO 7730: Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit*, 2006.