

Matthias Pazold, Sabine Giglmeier, Matthias Winkler und Zhenming Peng

Potenzialanalyse des Einsatzes bestehender Heizsysteme zur Raumkühlung

Einsatzmöglichkeiten und Grenzen

Mit einer am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP durchgeführten Analyse wurde untersucht, inwieweit vorhandene Heizsysteme zur Vermeidung von sommerlicher Überhitzung beitragen können. Das Potenzial von ursprünglich reinen Heiz-Übergabesystemen zum Kühlen kann mit einer hygrothermischen Gebäudesimulation untersucht werden.

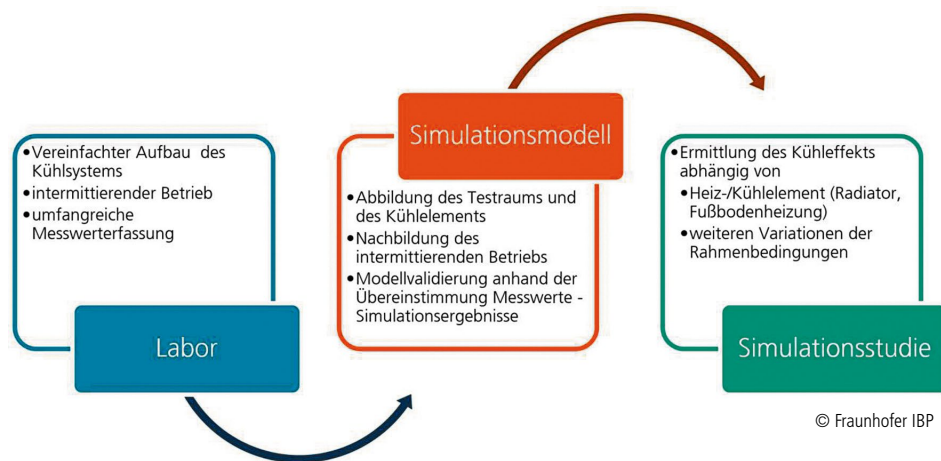


Abb. 1: Ablaufschema der Potenzialanalyse

Mit den steigenden Sommertemperaturen wird die Kühlung von Gebäuden auch in den gemäßigten mittel- und nord-europäischen Klimazonen immer beliebter. Neben der Neuinstallation von Klimaanlage in Bestandsgebäuden ist zudem die Möglichkeit, eine vorhandene Wärmepumpe auch zum Kühlen einzusetzen, interessant, sofern diese einen reversiblen Betrieb erlaubt.

KERNAUSSAGEN

- Heizsysteme können unter bestimmten Rahmenbedingungen erfolgreich zur Reduktion der sommerlichen Überhitzung beitragen.
- Über hygrothermische Gebäudesimulationen kann das Potenzial der Systeme zum Kühlen vorab berechnet werden.
- Zur Vermeidung von Feuchteschäden muss durch die abgestimmte Steuerung sichergestellt werden, dass kein Tauwasser am System ausfällt.

Für die sommerliche Kühlung kann somit das gleiche System verwendet werden, das bereits zum Heizen installiert ist. Gekühlte Heizkörper ermöglichen theoretisch gleichsowohl schnelle Reaktionszeiten und kostenintensive Neuinstallationen entfallen. Das System weist jedoch potenzielle Schwächen auf: Gekühlte Oberflächen erhöhen das Risiko von Kondensation und Schimmelbildung erheblich. Dem Risiko entgegenwirkende höhere Oberflächentemperaturen verringern jedoch die Kühlleistung und Reaktionszeit des Systems.

Für eine Abschätzung, inwiefern diese Technologie zur Vermeidung sommerlicher Überhitzung geeignet ist, wird am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP eine entsprechende Potenzialanalyse durchgeführt (Abb. 1). Dabei werden die Möglichkeiten von Labormessungen mit hygrothermischen Gebäudesimulationen kombiniert:

- In einem Testraum wird ein Radiator aufgebaut, gekühlt und seine raumklimatische Wirkung und weitere Parameter werden ermittelt.
- Dieser Aufbau wird dann in der hygrothermischen Gebäudesimulationssoftware WUFI® Plus als Modell entwickelt und anhand der Messungen validiert.

Mit diesem Modell wird anschließend eine Parameterstudie durchgeführt, um die Einsatzmöglichkeiten und Grenzen des Kühlsystems in Abhängigkeit von unterschiedlichen Bau-standards, klimatischen Bedingungen und des Nutzerverhaltens zu bestimmen. Neben der Kühlung über einen Radiator wird auch eine gekühlte Fußbodenheizung untersucht.

Laboruntersuchungen

Testraum

Am Standort Stuttgart betreibt das Fraunhofer IBP einen eigenen Klimasimulator, dessen Lufttemperatur zwischen -15 und +55 °C eingestellt und somit jedes erforderliche Außenklima abgebildet werden kann. Der innerhalb des Klimasimulators befindliche Testraum verfügt unter anderem über mehr als 170 Thermoelemente, Sensoren zur Grenzschichtvermessung, Wärmestrommesser, Feuchte- und Widerstandssensoren. Zwei der Wände des Testraums können mithilfe von Heizmatten auf der Außenseite als »Innenwände« betrachtet werden – während auf die beiden anderen »Außenwände« direkt die im Klimasimulator eingestellten Bedingungen einwirken. Alle Wände sowie der Fußboden verfügen über eigene Regelkreise und sind je nach Bedarf beheizbar.

Für die Studie wird innerhalb dieser genau definierten, überwachten Umgebung ein Radiator mit einer Breite von

0,72 m und einer Höhe von 1,00 m installiert und kontrolliert gekühlt (Abb. 2).

Ablauf

Ziel dieses Labortests ist es, Reaktionszeiten, Kühlleistung und Kondensationsraten zu messen. Das Klima außerhalb des Testraums wird auf 28 °C und 68 % relative Luftfeuchtigkeit geregelt. Diese Werte stellen sich auch vor Versuchsbeginn und zwischen den einzelnen Kühlphasen im Testraum ein und bilden somit für jede Kühlphase gleiche Anfangsbedingungen. Es werden vier Kühlphasen mit unterschiedlichen Kühldauern von vier, acht, 24 und 67 Stunden durchlaufen. Nach jeder Phase wird das kondensierte Wasser am und unter dem Radiator gesammelt und gewogen. Die Abkühlzeiten und die Solltemperaturen des durch den Radiator gepumpten Wassers im Vorlauf werden aufgezeichnet. Zusätzlich werden die Auswirkungen auf die raumklimatischen Bedingungen innerhalb des Testraums (Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit) und die Oberflächentemperaturen an den Sensorpositionen erfasst. Die gesammelten Messdaten werden dann zur Validierung des hygrothermischen Berechnungs- bzw. Simulationsmodells verwendet.

Simulationsmodell

Modellaufbau

Um die Erkenntnisse aus den Laborversuchen auf reale Gebäude übertragen und skalieren zu können, wird ein Simulationsmodell erstellt. Die Labormessungen werden zur Validierung des Simulationsmodells verwendet, indem das gemessene Innenklima durch die Simulation mit kontrollierten und definierten Randbedingungen reproduziert wird. Dafür genutzt wird die am Fraunhofer IBP entwickelte Gebäudesimulationssoftware WUFI® Plus (Abb. 3). Sie verbindet die hygrothermische Bauteilsimulation mit einer Simulation des Raumklimas und zusätzlichen Modulen wie dynamischen und detaillierten HLK-Systemen, dynamischen Simulationen von 3-D-Objekten wie Wärmebrücken und einem Luftströmungsmodell, das den Luftaustausch zwischen Gebäudezonen und der Umgebung berechnet. Das Simulationsmodell zum Testraum entstand schon in einem vorausgegangenen Projekt zu Innendämmungen und ist bereits validiert.



Abb. 2: Blick auf die Ecke des Testraums mit Radiator

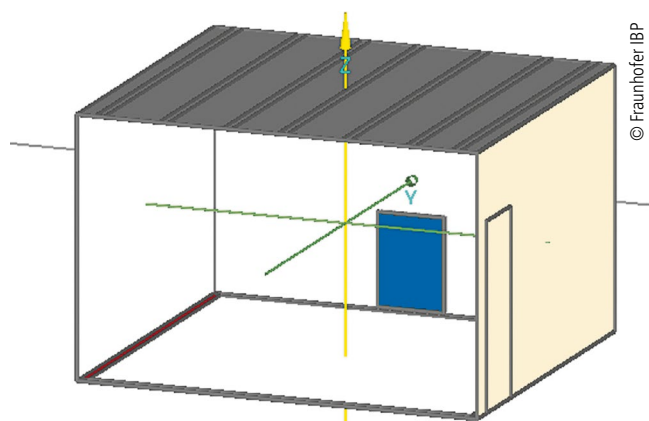


Abb. 3: Simulationsmodell des Testraums in WUFI® Plus. Die blaue Fläche stellt die Kühlfläche des Heizkörpers dar.

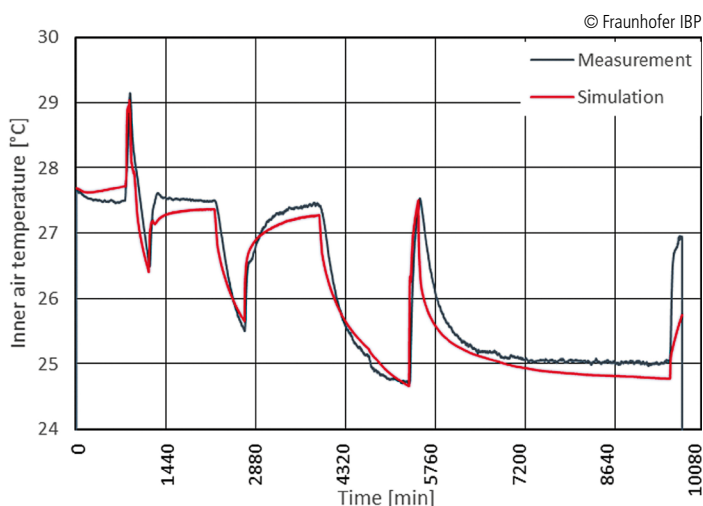


Abb. 4: Lufttemperatur innen: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Werten (MAE: 0,23 K)

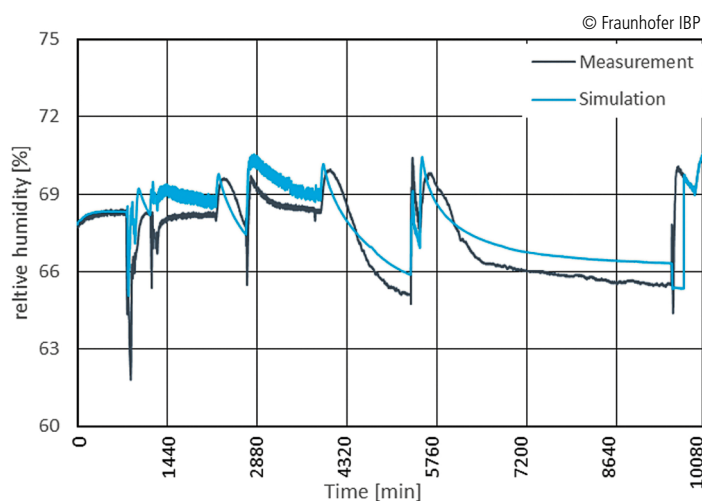


Abb. 5: Relative Luftfeuchte: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Werten (MAE: 0,79 % rel. F.)

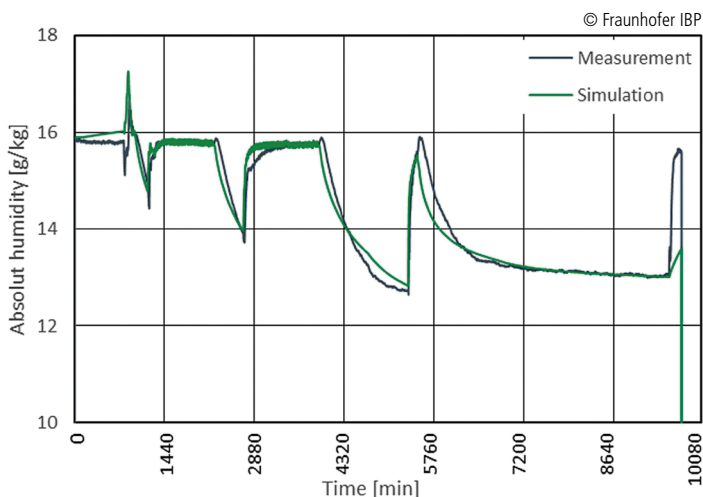


Abb. 6: Absolute Luftfeuchte: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Werten (MAE: 0,18 g/kg)

Im Zuge dieser Potenzialanalyse wird nun ein weiteres Modell entwickelt und in die Software implementiert, welches auch die Simulation von Flächenheiz- oder Kühlsystemen wie z. B. thermoaktiven Gebäudesystemen (TABS) ermöglicht.

Validierung des Modells

Zur Validierung des hygrothermischen Simulationsmodells werden die Messwerte aus dem Laborversuch mit den Werten der rechnerischen Simulation verglichen und der mittlere absolute Fehler (englisch: Mean Absolute Error, kurz: MAE) berechnet. Die Ergebnisse für die Lufttemperatur innen, die relative Luftfeuchtigkeit und die absolute Luftfeuchte sind in den Abb. 4 bis 6 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die rechnerische Simulation die gemessenen Werte reproduzieren kann, insbesondere auch den intermittierenden Betrieb der Kühlung mit den gegebenen Systemträgheiten.

Da bewusst mit einer hygrothermischen Simulation gearbeitet wird, können auch die Feuchteverhältnisse unter Einbeziehung der Feuchtespeichereffekte der Raumkomponenten simuliert werden. Die absolute Feuchte in Abb. 6 zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation. Dasselbe gilt für die relative Feuchte, siehe Abb. 5.

Die hygrothermische Simulation berechnet auch die Feuchteverhältnisse bzw. die Tauwassermenge an der Oberfläche des Radiators. Tab. 1 zeigt das Ergebnis und vergleicht die Menge des im Laborversuch gesammelten Tauwassers mit der simulierten Tauwassermenge. Sie macht deutlich, dass die vier Perioden recht gut zusammenpassen, wenn man die Simulationsergebnisse unter der Annahme einer vollständig durchmischten Luft mit vielen Messpunkten innerhalb des Prüfraums vergleicht.

Simulationsstudie

Randbedingungen

Es wurde gezeigt, dass wasserdurchflossene Rohrsysteme in Bauteilen (in dem gezeigten validierten Fall ein Radiator) mit dem entwickelten Modell und WUFI® Plus realistisch abgebildet werden können. Im nächsten Schritt wird das Modell in einen exemplarischen Raum, in diesem Fall in einen Büroraum, gesetzt und eine Vielzahl von Parametern variiert. Dadurch können Erkenntnisse zur Anwendbarkeit und zum Kühlungspotenzial des Systems unter den gegebenen Randbedingungen gewonnen werden.

Betrachtet werden zwei Heiz-Übergabesysteme die nun zur Raumkühlung eingesetzt werden:

- Radiator (Heizkörper),
- Fußbodenheizung.

Der Modellraum ist im Ausgangszustand durch innere Wärmegewinne und solare Einstrahlung im Sommer deutlich zu warm und somit unbehaglich. Ziel jeder untersuch-

Tab. 1: Vergleich der gemessenen und der berechneten Tauwassermengen für die vier Kühlphasen

Dauer der Kühlphase [h]	gemessene Tauwassermenge [g]	simulierte Tauwassermenge [g]
4	147,6	129
8	291,0	257
24	696,2	695
67	944,4	1044

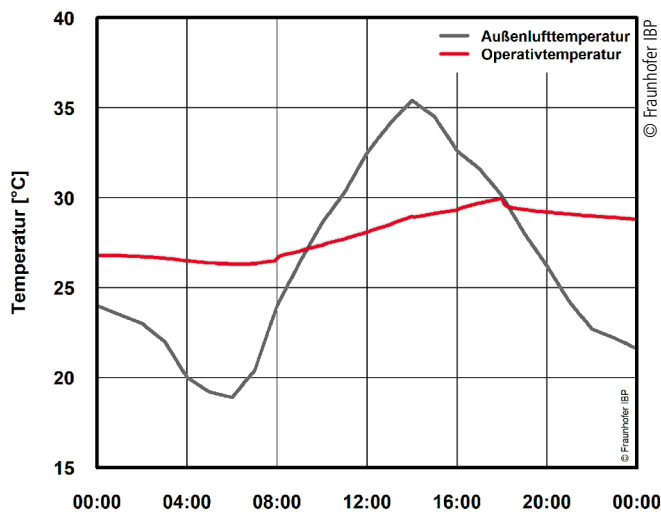


Abb. 7: Typischer Tagesverlauf der Operativtemperatur innen und der Außenlufttemperatur ohne Kühlung im Fall mit einer anwesenden Person und 1,8 m² Fensterfläche

ten Variante ist es, den Raum mit dem beschriebenen System auf ein behagliches/komfortables Niveau zu kühlen. Dazu werden je Variante die Übertemperaturgradstunden (in Kh/Jahr) betrachtet, eine Maßeinheit, mit der der thermische Komfort beurteilt werden kann. Überschreitet die operative Raumtemperatur für eine Stunde die höchstzulässige Temperatur (26 °C) um genau 1 °K, entspricht das einer Übertemperaturgradstunde (Kh). Wird die zulässige Temperatur im selben Zeitraum um 2 °K oder in zwei Stunden um 1 °K überschritten, entspricht das zwei Übertemperaturgradstunden und so weiter. Die DIN 4108:2013 gibt für Wohngebäude 1200 Kh/Jahr und für Nichtwohngebäude 500 Kh/Jahr als maximal zulässigen Wert vor.

Ein wesentlicher Nachteil von Flächenkühlsystemen ist die Tauwasserbildung, wenn die Oberflächentemperatur den Taupunkt der Raumlufttemperatur unterschreitet. Um zu verhindern, dass im Raum Feuchteschäden entstehen und auch um die Gefahr von Schimmelpilzwachstum aufgrund einer erhöhten Feuchtigkeit im Material zu verringern, muss die Temperatur, mit der gekühlt wird, auf einen zu bestimm-

menden Minimalwert begrenzt sein. Die Minimal-Temperaturgrenze beschränkt jedoch auch die Kühlkapazität. Um die Überhitzung von Räumen dennoch zu vermeiden, ist eine passende Regelungsstrategie wichtig.

Betrachtete Varianten

Untersucht werden folgende Regelstrategien:

- Betrieb ganztägig (24 h/Tag) oder nur zur Nutzungszeit (10 h/Tag),
- Kühlung kontinuierlich bei Betrieb oder geregelt bei Überschreiten von 24 °C Raumlufttemperatur,
- Vorlauftemperatur konstant bei 14 °C oder Taupunkttemperatur geführt (Vorlauftemperatur = Taupunkttemperatur der Raumluft + 1 °C).

Gleichbleibende Rahmenbedingungen des Büroraums:

- Außenmaße: 4 m breit, 4 m lang und 2,8 m hoch,
- zwei Außenwände (nach Süden und nach Westen):
 - ▷ Hochlochziegel mit einer Dicke von 0,295 m und einem U-Wert von 1,32 W/m²K,
 - ▷ jeweils ein Fenster mit Zweifachverglasung ($U_w = 2,73 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g = 0,6$, Rahmenanteil von 30 %),
- zwei Innenwände aus Hochlochziegel mit einer Dicke von 0,14 m und einem U-Wert von 2,255 W/m²K,
- Raumbegrenzung nach oben und unten durch Beton-Innendecken.

Auf der Außenseite von Innenbauteilen wird dasselbe Klima wie auf der Innenseite, also das simulierte Innenraumklima, angesetzt.

Varianten des Büroraums:

- Fensterfläche mit 1,8 m² oder 3,6 m²,
- Radiatorfläche von 0,7 m² oder 1,4 m² (natürlich nur bei der Variante mit Radiator).

Raumnutzung:

- Nutzungszeit: 08:00 bis 18:00 Uhr,
- Annahme der typischen Wärme- und Feuchteabgabe anwesender Personen im Raum sowie der Wärmeabgabe von elektrischen Geräten und der Beleuchtung,
- 0,5-fache Luftwechselrate als Tagesmittelwert entsprechend dem hygienischen Mindestluftwechsel.

Ergebnisse

Abb. 7 zeigt den typischen Tagesverlauf der operativen Innenraumtemperatur und der Außenlufttemperatur an einem Sommertag im angenommenen Referenzfall ohne Kühlung. Etwa ab der Mittagszeit wird es zu warm (über 26 °C) und thermisch unkomfortabel.

Kühlung über Radiator

Exemplarisch wird in Abb. 8 der Einfluss auf die Übertemperaturgradstunden verschiedener Varianten gegenübergestellt. Die Darstellung zeigt deutlich, dass bereits mit der Kühlung über die einfache Radiatorfläche (etwa 0,7 m² wirk-same Kühlfläche) eine deutliche Reduktion der Übertemperaturgradstunden erreicht werden kann (Beispiel: Reduktion um über 40 % bei einer Bürobelegung mit einer Person und einer Fensterfläche von 3,6 m²). Bei einer Verdopplung der Radiatorfläche (auf etwa 1,4 m²) wird der Effekt noch deutlich verstärkt (im selben Belegungsfall wie eben erfolgt eine Reduktion der Übertemperaturgradstunden im Vergleich zum ungekühlten Fall um etwa 65 %).

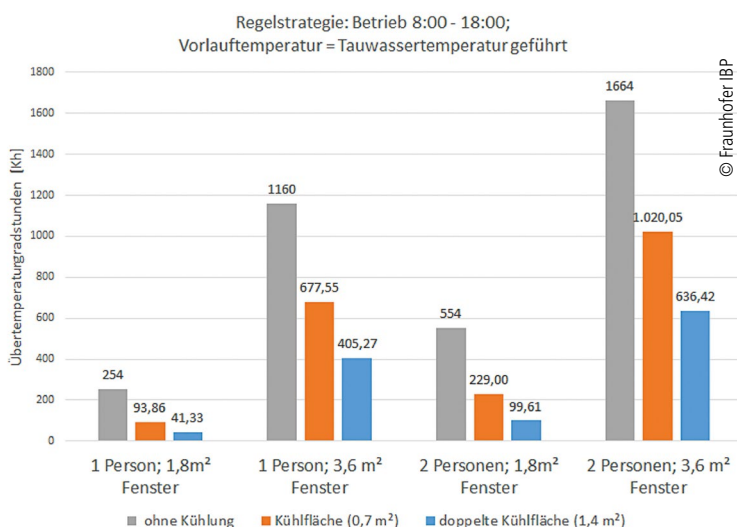


Abb. 8: Übertemperaturgradstunden im Vergleich. Regelungsstrategie laut Tab. 2, Zeile 8: kontinuierliche Kühlung bei Anwesenheit, taupunkttemperaturgeführte Vorlauftemperatur

Tab. 2: Vergleichswerte der Parameterstudie zur Kühlung über Radiator

				Übertemperaturgradstunden [Kh]				Tauwasser [g]
Zeile	Betrieb	Regelung	Vorlauf	1,8 m² Fenster		3,6 m² Fenster		
				1 Person	2 Personen	1 Person	2 Personen	
1	Referenz ohne Kühlung			254	554	1 160	1 664	
2	24h	kontinuierlich	14 °C	23	65	355	571	> 3 500
3	24h	Bei T _{op} > 24°C	14 °C	44	107	442	673	> 3 100
4	8 – 18 Uhr	kontinuierlich	14 °C	69	176	595	922	> 1 500
5	8 – 18 Uhr	Bei T _{op} > 24°C	14 °C	85	198	626	952	> 1 500
6	24h	kontinuierlich	Taupunkt +1 °C	45	111	451	699	< 0,02
7	24h	Bei T _{op} > 24°C	Taupunkt +1 °C	73	167	541	806	< 0,02
8	8 – 18 Uhr	kontinuierlich	Taupunkt +1 °C	94	229	678	1 020	< 0,02
9	8 – 18 Uhr	Bei T _{op} > 24°C	Taupunkt +1 °C	113	254	712	1 055	< 0,02

Neben den in Abb. 8 gezeigten Varianten sind weitere Ergebnisse der Simulationen in Tab. 2 dargestellt. Alle betrachteten Varianten mit einer konstanten Vorlauftemperatur von 14 °C sind kritisch, da Tauwasser auf der Heizkörperoberfläche ausfällt. Selbst wenn es dort »aufgewischt« und darunter aufgefangen wird, ist zu bedenken, dass z. B. die Zuleitung meist nicht gedämmt ist und auch dort an der Wand Tauwasser ausfallen wird. Eine taupunkttemperaturgeführte Vorlauftemperatur (plus Sicherheitszuschlag von 1 °C) führt zu so gut wie keinem Tauwasserausfall.

Der thermische Komfort hinsichtlich Überhitzung kann in allen betrachteten Varianten deutlich verbessert, aber nicht immer erreicht werden, gemessen an den Übertemperaturgradstunden (Überschreitungen der zulässigen

500 Kh/Jahr im Bürogebäude sind in Tab. 2 kursiv dargestellt). Da die Kühlkapazität in allen untersuchten Varianten nicht ausreicht, um die Raumtemperatur stets innerhalb der Behaglichkeitsgrenzen (< 26 °C) zu halten, ist ein leichter Vorteil eines kontinuierlichen 24 h-Betriebs im Vergleich zum Betrieb nur während der Nutzungsstunden oder im Vergleich zur Kühlung nur bei Überschreitung einer operativen Temperatur von 24 °C festzustellen. Ein Minimalwert der Raumlufttemperatur, unter dem die Kühlung ausgeschaltet wird, ist in jedem Fall empfehlenswert, damit es nicht zu kalt wird.

Kühlung über Fußbodenheizung

Anders sieht es bei dem Einsatz von Fußboden-Heizelementen zur Kühlung aus. In Abb. 9 wird ein typischer Tagesverlauf der simulierten operativen Temperatur in dem untersuchten Büroraum dargestellt (neben dem ungekühlten Referenzfall und dem Vergleichsfall mit Radiator). Es ist eine deutliche Verbesserung des thermischen Komforts im Vergleich zu den anderen Fällen zu erkennen – die operative Temperatur bleibt beständig unter 26 °C. Folglich ergeben sich hier und auch in allen weiteren untersuchten Fällen (hier ausschließlich mit taupunkttemperaturgeführter Vorlauftemperatur) mit der Fußbodenheizung als Kühlsystem keine Übertemperaturgradstunden – es bleibt thermisch komfortabel. Somit wird an dieser Stelle auch auf eine weitere Darstellung der berechneten Varianten wie in Tab. 2 und im Balkendiagramm (Abb. 8) verzichtet.

Zusammenfassung und Ausblick

Die beschriebene Studie zeigt, dass es möglich ist, die bestehenden Heiz-Übergabesysteme auch zum Kühlen zu verwenden, um den thermischen Komfort zu verbessern. Im Falle des Radiators können unkomfortable Bedingungen zwar reduziert, aber nicht ausgeschlossen werden. Fachleute sprechen deshalb in diesem Zusammenhang auch von einem sogenannten Ankühlen.

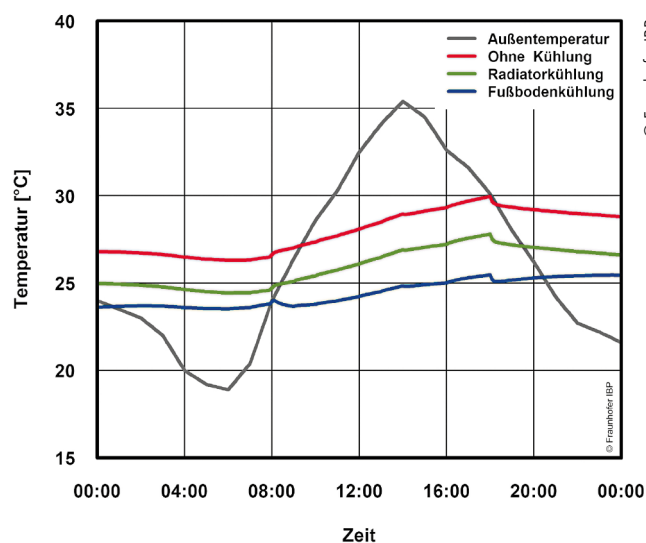


Abb. 9: Typischer Tagesverlauf der Operativtemperatur innen und der Außenlufttemperatur ohne Kühlung (rot), mit Kühlung über Radiator (grün) und über Fußbodenheizung (blau) im Fall mit einer anwesenden Person und 1,8 m² Fensterfläche

Über das Kühlen mit dem Fußbodenheizsystem können bei den in dieser Studie gewählten Rahmenbedingungen Übertemperaturgradstunden komplett vermieden werden.

Bei den betrachteten und anderen Systemen zum Kühlen muss generell sichergestellt werden, dass keine Feuchteschäden durch den Tauwasserausfall entstehen. Eine konstante Vorlauftemperatur darf deshalb nicht zu niedrig gewählt werden. Im besten Fall folgt die Vorlauftemperatur, mit der gekühlt wird, der Taupunkttemperatur, um Kondensation zu vermeiden und dabei aber die maximal mögliche Kühlkapazität zu erreichen.

Die hygrothermische Gebäudesimulationssoftware WUFI® Plus kann, erweitert mit einem Modell zur Berechnung durchströmter Rohrleitungen in Gebäudebauteilen (Wände, Fußböden, Decken oder aber auch Heizkörper), herangezogen werden, um das Potenzial von ursprünglich reinen Heiz-Übergabesystemen zum Kühlen zu berechnen. Neben dem thermischen Komfort kann des Weiteren auch die Tauwasserbildung auf den dann kalten Oberflächen berechnet werden. Zudem können mit der hygrothermischen Simulation noch weitere Aspekte berechnet werden, wie z.B. das Risiko von Schimmelpilzwachstum im Jahresverlauf, da neben der Raumluftfeuchte auch das Feuchteverhalten der Baustoffe der Gebäudebauteile berücksichtigt wird. Dies sowie die zum Kühlen je Fall notwendige Energiemenge wurden hier allerdings nicht betrachtet.

In dieser Studie wird im Wesentlichen das Potenzial der betrachteten Systeme zur Vermeidung von Überhitzung betrachtet und als vielversprechend bewertet. Für eine vollumfängliche Beurteilung des Systems müssen aber noch weitere Aspekte genau überprüft werden (Auswahl):

- Behaglichkeit für den Nutzer (u. a. Vermeidung von Komforteinbußen durch Temperatur-Asymmetrie und/oder zu kalte Fußböden),
- Auswirkungen der Temperaturwechsel auf Fußbodenbeläge und andere Materialien und Systeme im Raum,
- Kühlleistungspotenzial und Energieeffizienz des jeweiligen Systems mit seinen spezifischen Rahmenbedingungen (z.B. Raumgeometrie und -nutzung, Fensterflächenanteil). Je nach Rahmenbedingungen können passive Maßnahmen, wie beispielsweise ein verbesserter Sonnenschutz an den Fenstern oder ein effektives Konzept zur Nachkühlung, eine energiesparende Alternative darstellen, die zu bevorzugen ist.

Die Kombination aus Labors, Simulationsmöglichkeiten und hygrothermischer Expertise am Fraunhofer IBP ermöglicht es, diese offenen Punkte zu untersuchen, Systeme zu optimieren und Steuerungsalgorithmen zu entwickeln.

Hinweis

Dieser Fachartikel ist bereits in Ausgabe 5/2020 der BAUSUBSTANZ, Fraunhofer IRB Verlag, erschienen.

DIE AUTOREN

Matthias Pazold



Matthias Pazold studierte Bauingenieurwesen (Bachelor) an der Hochschule Magdeburg-Stendal (2009) und allgemeinen Ingenieurbau (Master) an der Hochschule für angewandte Wissenschaften München (2011). Seit 2011 beschäftigt er sich mit Gebäudesimulationssoftware in der Entwicklung, Anwendung und Hilfestellung am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP.

Matthias Winkler



Matthias Winkler studierte Bauingenieurwesen (Bachelor, 2011) sowie Allgemeiner Ingenieurbau (Master, 2013) an der Hochschule für angewandte Wissenschaften München und ist seit 2011 Gebäudeenergieberater. Seit 2012 ist er am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP tätig und beschäftigt sich dort mit der Entwicklung und Anwendung von Simulationsmodellen auf mehreren Skalenebenen – von Bauteil- über Gebäude- bis hin zu Stadtklimasimulationen. Seit 2015 ist er zusätzlich Lehrbeauftragter an der Hochschule München.

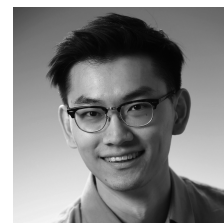
Sabine Giglmeier



Sabine Giglmeier studierte Innenausbau (Bachelor) an der TH Rosenheim. Seit ihrem Abschluss 2014 ist sie am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP beschäftigt und verantwortet mittlerweile das Business Development Management der Abteilung Hygrothermik. Dabei liegt der Fokus auf der sinnvollen Verknüpfung von F&E mit den Marktbedürfnissen.

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
Standort Holzkirchen
Fraunhoferstr. 10
83626 Valley
sabine.giglmeier@ibp.fraunhofer.de
www.ibp.fraunhofer.de

Zhenming Peng



Zhenming Peng studierte Bauingenieurwesen an der Technischen Universität München (Master, 2020) und hat im Rahmen seiner Tätigkeit als wissenschaftliche Hilfskraft am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP zahlreiche Parameterstudien durchgeführt.