

2017

Ernst & Sohn

Sonderdruck



Bauteilaktivierung

Prof. Dr.-Ing. Jens Pfafferott
Prof. Dr.-Ing. Doreen E. Kalz



Wir gestalten die Zukunft der Gebäudetechnik

ROM Technik gehört deutschlandweit zu den führenden Unternehmen im Planen, Bauen und Instandhalten der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA).

Unser Bereich **Forschung & Entwicklung** zählt zu den führenden Gebäudetechnik-Laboren in Europa. Ein hoch spezialisiertes Team aus Wissenschaftlern, Ingenieuren und Technikern erarbeitet hier auf einem soliden Fundament von Theorie und jahrzehntelanger Erfahrung Lösungen für praxis- und projektbezogene Herausforderungen.

Unsere Kunden profitieren vom exzellenten Know-how unserer **KompetenzCenter**:

- | | |
|---|---|
|  Reinräume & Labore |  Leitstellentechnik |
|  Medientechnik |  Industrielle Lufttechnik |
|  Stromversorgung |  Automatisierungstechnik |
|  Kommunikation & Sicherheitstechnik |  Gebäudeautomation |

Die Traditionsfirma ROM Technik, die 1859 gegründet wurde, bietet mit rund 2000 hervorragend qualifizierten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern deutschlandweit das gesamte Spektrum der Gebäudetechnik an.

Machen Sie sich Gedanken über die Zukunft Ihrer TGA? Dann lernen Sie uns kennen!

www.rom-technik.de



Rud. Otto Meyer Technik Ltd. & Co. KG
Motorstraße 62 · 70499 Stuttgart
Telefon 0711 1393-00
info@rom-technik.de · www.rom-technik.de



Sonderdruck 2017

- Vorwort**
- 4 J. Pfafferott, D. Kalz
Thermoaktive Bauteilsysteme
- Fachthemen**
- 6 D. Kalz, J. Pfafferott, R. Koenigsdorff
Betriebserfahrungen mit Thermoaktiven Bauteilsystemen
aus Bauphysik 34 (2012). DOI: 10.1002/bapi.201200011
- 16 D. Kalz, J. Pfafferott
Energieeffiziente Kühlung und thermischer Raumkomfort: Vergleichende Analyse von acht europäischen Nichtwohngebäuden (Teil 1)
aus Bauphysik 34 (2012). DOI: 10.1002/bapi.201200037
- 29 J. Pfafferott, D. Kalz
Energieeffiziente Kühlung und thermischer Raumkomfort: Simulationsbasierte Evaluierung von Kühlkonzepten in verschiedenen europäischen Klimazonen (Teil 2)
aus Bauphysik 35 (2013). DOI: 10.1002/bapi.201310046
- 35 D. Kalz, J. Pfafferott, S. Herkel, M. Sonntag
Energieeffiziente Kühlung und Thermischer Raumkomfort: Erfahrungen aus dem Langzeitmonitoring von 42 Bürogebäuden
aus Bauphysik 36 (2014). DOI: 10.1002/bapi.201410030
- 51 D. Kalz, F. Hölzenbein, J. Pfafferott, G. Vogt
Nutzerzufriedenheit mit dem thermischen Komfort in Bürogebäuden mit Umweltenergiekonzepten
aus Bauphysik 35 (2013). DOI: 10.1002/bapi.201310082
- 66 J. Pfafferott, S. Herkel, F. Kagerer, D. Kalz, M. Sonntag
Kurzzeitmessungen zum thermischen Komfort im Sommer
aus Messtechnik im Bauwesen, Bauphysik 35 (2013)
- 71 F. Nüßle, J. Pfafferott
Kühldeckensystem mit Aktivierung der Speichermasse der Betondecke
aus Bauphysik 33 (2011). DOI: 10.1002/bapi.201110000
- 78 J. Pfafferott, M. Frietsch, T. Lang, M. Schmelas
Kalorische Messungen an thermisch aktivierten Bauteilsystemen
aus Messtechnik im Bauwesen, Bauphysik 37 (2015)
- 83 J. Pfafferott, M. Frietsch, S. Himmelsbach, T. Lang
Messtechnische Bestimmung von Aufwandszahlen unterschiedlicher Flächentemperiersysteme
aus Bauphysik 38 (2016). DOI: 10.1002/bapi.201610039
- 95 J. Pfafferott, G. Henze, T. Lang
Anlagenaufwandszahlen für die Bauteilaktivierung in Abhängigkeit des Regelkonzeptes – Welche Betriebsführungsstrategie passt zu welchem Gebäude?
aus Bauphysik 39 (2017). DOI: 10.1002/bapi.201710032

Ernst & Sohn
A Wiley Brand

Ernst & Sohn
Verlag für Architektur und technische
Wissenschaften GmbH & Co. KG

Rotherstraße 21
D-10245 Berlin
Tel.: (030) 4 70 31-200
Fax: (030) 4 70 31-270
info@ernst-und-sohn.de
www.ernst-und-sohn.de

Thermoaktive Bauteilsysteme

...haben sich als integraler Bestandteil von energieeffizienten Gebäudekonzepten etabliert. Die Bauteilaktivierung ist keine neue Technologie und geht bis auf die (mit Luft betriebene) Hypokaustenheizung im Altertum zurück. In der heutigen Form wurden (mit Wasser betriebene) Flächentemperiersysteme in den 1920er Jahren beschrieben und vereinzelt eingesetzt. Die Wiedereinführung dieser in Vergessenheit geratenen Technologie begann in den späten 1980er Jahren. Zu Beginn der 1990er Jahre wurden viele der mit Bauteilaktivierung ausgestatteten Gebäude noch im Rahmen von geförderten Projekten realisiert. Ende der 1990er Jahre gelang der immer ausgereifteren Technologie dann schrittweise der Durchbruch. In den 2000er Jahren rückte dann die Evaluation realisierter Gebäude immer stärker in den Fokus wissenschaftlicher Arbeiten. Dies wiederum unterstützte die Suche nach der optimalen Betriebsführung der Gesamtsysteme (Erzeugung, Verteilung und Übergabe) im Heiz- und Kühlbetrieb. Die am Markt verfügbaren Produkte haben ihre Bestandsprobe bestanden und haben folglich seit den 2010er Jahren nur unwesentliche Anpassungen erfahren. Ein guter Zeitpunkt für eine Bestandsaufnahme.

In den vergangenen Jahren sind in der BAUPHYSIK in loser Folge Artikel erschienen, die Praxiserfahrungen mit der Bauteilaktivierung in den Vordergrund stellten. Dieser Sonderdruck fasst einige dieser Artikel zusammen und spannt den Bogen von der Planung über die Installation bis hin zur Betriebsführung – immer ausgehend von Erfahrungen aus Messkampagnen und Monitoringprojekten.

Viele erfolgreiche Gebäude, die mit thermoaktiven Bauteilsystemen (TABS) in Verbindung mit der Nutzung von Umweltenergie gekühlt und ggf. beheizt werden, belegen, dass mit diesen Systemen ein hohes Maß an thermischer Behaglichkeit in Verbindung mit einer hohen Energieeffizienz erreicht werden kann. Der erste Artikel stellt Betriebserfahrungen und eine systematische Auswertung einer ganzen Reihe von Projekten vor, diskutiert Verbesserungsmöglichkeiten in Planung, Ausführung und Betrieb und definiert Erfolgsfaktoren für den Einsatz von thermoaktiven Bauteilsystemen.

Der zweite und dritte Artikel stellt Gebäude in unterschiedlichen europäischen Klimazonen vor, die Umweltenergie zum Heizen und Kühlen nutzen. Die Analyse erfolgt auf Basis von detaillierten Langzeitmessungen in Demonstrationsgebäuden bzw. einer Simulationsstudie. Eine standardisierte Datenauswertung ermöglicht einen Quervergleich unter Berücksichtigung von Kühlenergieverbrauch, thermischen Raumkomfort und Primärenergieeinsatz.

Die gemeinsame Analyse von thermischen Komfort und Energieeinsatz wird im vierten Artikel auf das detaillierte Langzeitmonitoring in vielen Bürogebäuden mit unterschiedlichen Gebäude- und Kühlkonzepten angewendet. Stärken und Schwächen von Gebäuden ohne Kühlung, mit passiver Kühlung, mit luft- und wassergeführten Umweltenergiekonzepten und mit Voll- oder Teilklimatisierung werden in diesem Quervergleich klar herausgearbeitet.

Thermische Komfortmodelle führen subjektives Empfinden bzw. Zufriedenheit und objektive Messung zusammen. Umfangreiche Nutzerbefragungen und Langzeitmessungen in zwei Bürogebäuden mit maschineller Nachtlüftung und Bauteilaktivierung weisen deutlich darauf hin, dass der thermische Komfort im Gebäude mit Nachtlüftung gut durch das adaptive Modell und im Gebäude mit Bauteilaktivierung gut durch das Wärmebilanz- bzw. PMV-Modell beschrieben wird. Gleichzeitig zeigt der fünfte Artikel auch, dass die tägliche Temperaturschwankung von den Nutzern gewünscht und folglich in der Betriebsführung berücksichtigt werden sollte.

Gebäude, die aktiv oder passiv mit Umweltenergie gekühlt werden, weisen bauphysikalisch und anlagentechnisch bedingt eine begrenzte Kühlleistung auf. Daher kann der thermische Komfort im täglichen Betrieb nicht durchgängig garantiert werden, wenn die Betriebsbedingungen stark von den Planungswerten abweichen. Der sechste Artikel stellt eine Mess- und Auswertemethode vor, wie der thermische Komfort mit Hilfe von Kurzzeitmessungen im Betrieb evaluiert und beispielsweise mit Planungswerten verglichen werden kann.

Die intensive Auseinandersetzung mit unterschiedlichen Anlagenkonzepten und deren Auswirkung auf Energieeffizienz und Komfort führt direkt zur Frage nach der passenden Betriebsweise. Im siebten Artikel wird die thermische Aktivierung insb. von Betondecken bei Flächentemperiersystemen diskutiert. Damit können praktisch nutzbare Zeitfenster definiert werden, die auf unterschiedliche Weise zum Lastmanagement im Gebäude genutzt werden können.

Während Simulationsstudien gut geeignet sind, um das Potenzial von Regelalgorithmen zu bestimmen, eignen sich Monitoringkampagnen dazu, deren Einsatz praxisnah zu bewerten. Messungen im Labor schließen dabei die breite Lücke zwischen mathematisch-numerisch entwickelten Methoden und tatsächlichen Betriebsergebnissen. Der achte Artikel stellt eine Laborumgebung vor, in der mit kalorischen Messungen unter kontrollierten, dynamischen Randbedingungen z.B. die tatsächlich erzielbaren Energieeinsparungen mit verbesserten Regelalgorithmen bestimmt werden können.

In dieser Laborumgebung konnten Energieaufwandszahlen für die Nutzenübergabe unterschiedlicher Flächentemperiersysteme messtechnisch bestimmt werden. Der neunte Artikel zeigt wie die in den Normen genannten Aufwandszahlen in der Planung eingesetzt und mit produkt- oder objektbezogenen Daten ergänzt werden können. Damit kann in der Auslegungspraxis die große Unsicherheit bei der Leistungsdimensionierung und der Berechnung des (Jahres-)Energiebedarfs deutlich reduzieren.

Der zehnte Artikel schließt diesen Sonderdruck ab. Umfangreiche Messkampagnen im Raumklimalabor der Hochschule Offenburg mit verbesserten konventionellen und innovativen Regelalgorithmen zeigen Chancen und Grenzen der Betriebsführung von thermoaktiven Bauteilsystemen auf. Werden diese Erfahrungen in Form von Aufwandszahlen für die Regelung interpretiert, ist es möglich, Regelkonzepte in der Planung bei der Berechnung der Anlagenaufwandszahl bzw. der Berechnung des (Jahres-)Energiebedarfs explizit zu berücksichtigen.

Dieser Sonderdruck fasst in seinen Artikeln Ergebnisse aus vielen Projekten und über einen Zeitraum von mehr als 10 Jahren zusammen. In dieser Zeit durften wir mit vielen Studierenden, Wissenschaftlern, Firmen und Projektpartnern intensiv zusammenarbeiten, bei denen wir uns an dieser Stelle herzlich bedanken wollen. Ohne ihr Engagement wäre eine so breite Analyse der verschiedenen Aspekte der Bauteilaktivierung nicht möglich gewesen. Danke.

Prof. Dr.-Ing. *Jens Pfafferott*
Hochschule Offenburg

Prof. Dr.-Ing. *Doreen Evelin Kalz*
Beuth Hochschule für Technik Berlin

Betriebserfahrungen mit thermoaktiven Bauteilsystemen

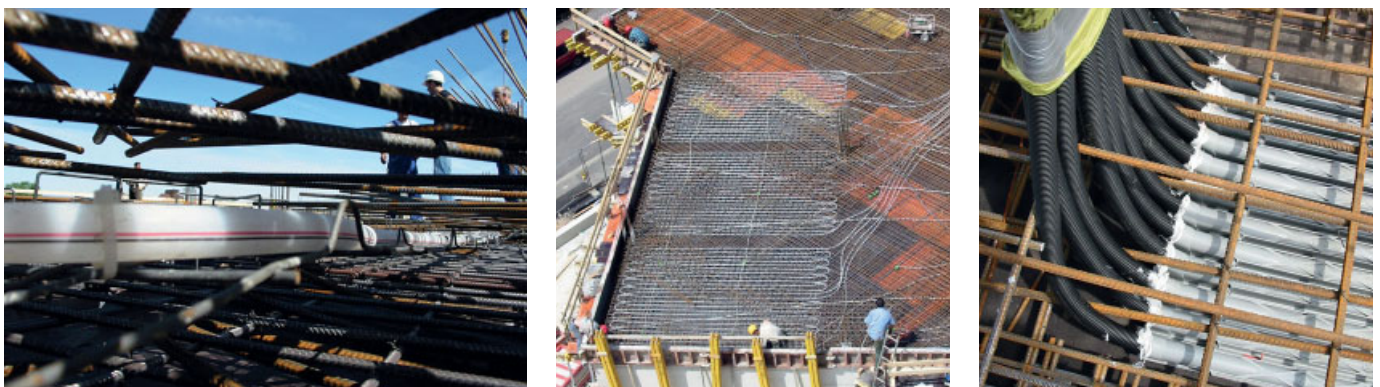
Gebäude, die mit thermoaktiven Bauteilsystemen (TABS) in Verbindung mit der Nutzung von Umweltenergie gekühlt und ggf. beheizt werden, haben sich in den letzten Jahren etabliert. Viele erfolgreiche und gut funktionierende Beispiele belegen, dass mit diesen Systemen ein hohes Maß an thermischer Behaglichkeit in Verbindung mit einer hohen Energieeffizienz bei Nutzung von erneuerbarer Umweltenergie (v. a. oberflächennaher Geothermie) erreicht werden kann. Jedoch zeigen die Betriebserfahrungen und die systematische wissenschaftliche Auswertung einer ganzen Reihe von Projekten, dass es in Planung, Ausführung und Betrieb noch Verbesserungsmöglichkeiten in Richtung einer besseren Ausschöpfung des Effizienzpotentials gibt. Im Folgenden werden Praxiserfahrungen und Betriebsauswertungen einer Reihe von Nichtwohngebäuden mit thermoaktiven Bauteilsystemen hinsichtlich des thermischen Raumkomforts und der Energieeffizienz vorgestellt und Erfolgsfaktoren sowie Anforderungen an die Systeme aufgezeigt.

Operating experience with Thermo-Active Building Systems (TABS). *Buildings that are cooled and, if applicable, heated by thermo-active building systems (TABS) in combination with environmental energy have been established in the market during the last years. Many successful and efficient examples prove, that these systems can achieve a good thermal room comfort with a high energy efficiency of the plant system using environmental energy (mainly surface-near geothermal energy). However, operating experience and a systematic evaluation of several building projects demonstrate that there is potential improvement in the design, implementation, and operation of TABS systems. The article presents operating experience and a detailed evaluation of*

the operation performance of several non-residential buildings with thermo-active building systems with respect to thermal comfort and energy efficiency.

1 Einleitung

Niedrigenergiegebäude mit einem energieoptimierten Gesamtkonzept aus Architektur, Bauphysik und Gebäudetechnik weisen einen geringen Heiz- und Kühlbedarf auf. Sie können somit bei vergleichbarem Arbeitsplatzkomfort auf eine Vollklimatisierung und den Einsatz von Kältemaschinen zu Gunsten von Umweltenergie aus dem Erdreich, dem Grundwasser oder der Außenluft verzichten. Diesem Trend folgend rücken wassergeführte thermoaktive Bauteilsysteme (TABS) in die engere Auswahl von Architekten und Ingenieuren, siehe Bilder 1 und 2. Der Wunsch nach einem komfortablen Raumklima verbunden mit der Forderung nach einem möglichst geringen Energieverbrauch und einer verbreiteten Skepsis gegenüber Klimaanlage unterstützen diese Entwicklung. Thermoaktive Bauteilsysteme (TABS) sind Rohrregister, die – im Gegensatz etwa zu Heizkörpern und abgehängten Kühldecken – in Bauteile der Gebäudestruktur integriert werden. Oberflächennahe Systeme werden dagegen als Kapillarrohrmatten in den Deckenputz eingebracht oder als Trockensystem in der Wand bzw. der Decke verlegt. Eine ausführliche Darstellung einzelner TABS-Systeme findet sich in [1] und [2].



*Bild 1. Thermoaktive Bauteilsysteme: (links) Rohrregister zwischen oberer und unterer Bewehrung, (Mitte) Blick auf eine Geschossdecke, Deckenanschluss Rohrleitung BKT (Quelle: solares bauen GmbH, Freiburg)
 Fig. 1. Thermo-active building systems: (left) pipe circuit between upper and lower reinforcement, (middle) floor area with pipe circuits, connection at ceiling for TABS (source: solares bauen GmbH, Freiburg)*

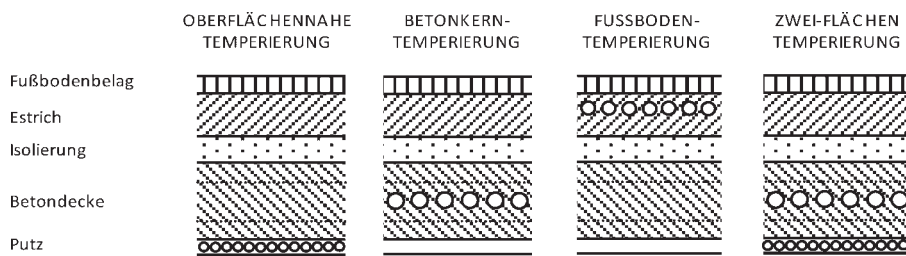


Bild 2. Thermoaktive Bauteilsysteme: Oberflächennahe Temperierung mittels Kapillarrohrmatten, Betonkern-, Fußboden- und Zwei-Flächentemperierung Fig. 2. Thermo-active building systems: surface-near system (capillary tubes), concrete core conditioning, floor conditioning, 2-layer conditioning (from left to right)

Im Jahr 2007 wurden allein in Deutschland rund 845.000 m² thermisch aktivierbare Flächen in Büro- und Verwaltungsgebäuden neu installiert. Knapp 60 % der Büroneubauten werden im Sommer über TABS gekühlt – und teilweise im Winter geheizt [3]. Dabei teilen sich Betonkernaktivierung und Kühldecken zu etwa gleichen Teilen den Markt. Auch in der Sanierung finden thermoaktive Bauteilsysteme immer mehr Anwendung. Damit haben sich thermoaktive Bauteilsysteme binnen eines Jahrzehnts – seit der Realisierung erster Projekte in den 80er Jahren in der Schweiz – als innovatives System zur Flächenheizung und -kühlung mit großem wirtschaftlichem und ökologischem Potenzial etabliert. Viele erfolgreiche und gut funktionierende Beispiele zeigen dies.

Jedoch: Einmal gebaut sind TABS zementierte Planung und Ausführung im wörtlichen Sinn mit eigenen Grenzen der Leistungsfähigkeit und Regelbarkeit. Bei Standardanwendungen, wie etwa dem Einsatz als Kühlsystem ohne den hohen Anspruch einer Klimatisierung, ist dies kein Problem. In anspruchsvolleren Einsatzfällen steigen dagegen die Anforderungen an eine optimale Planung, Systemtechnik und Betriebsführung.

2 Gebäude- und Energiekonzepte

Nichtwohngebäude, in denen TABS eingesetzt werden, weisen unterschiedliche architektonische und planerische Ansätze auf. Im einfachsten Fall wird ein konventionelles Gebäudekonzept um TABS zur Raumkühlung ergänzt und die gesetzlichen Anforderungen an Wärmeschutz und Energiebedarf werden mehr oder weniger stark unterschritten [4]. Demgegenüber liegt der Primärenergiebezug für die technische Gebäudeausrüstung und

die Beleuchtung von Niedrigenergie-Nichtwohngebäuden um bis zu einem Faktor 3 niedriger. Im Förderprogramm EnoB „Energieoptimiertes Bauen“ galt hierfür bisher ein Zielwert von 100 kWh_{prim}/(m²_{NGFa}). Dieser ist erreichbar durch eine gut gedämmte und dichte Gebäudehülle, konsequent begrenzte solare Lasten (Sonnenschutzsysteme), eine effektive hygienische Lüftung mit Wärmerückgewinnung, ausreichend thermische Gebäudespeicherkapazität und begrenzte interne Lasten (effiziente Bürogeräte, Tageslichtnutzung). Derartige Gebäude sind ein idealer (wenngleich nicht der einzig sinnvolle) Einsatzfall für eine Heizung und Kühlung mit thermoaktiven Bauteilsystemen in Kombination mit natürlichen Umweltenergiequellen bzw. -senken (oberflächennahe Geothermie und Außenluft).

Bild 3 enthält eine Übersichtsdarstellung dieser Systeme, ergänzt um vier Energiebilanzgrenzen der Wärme- und Kälteversorgung, um verschiedene Gebäude und Energiekonzepte vergleichen zu können. Die vier Bilanzgrenzen entsprechen weitgehend der Definition in DIN V 18599: 2011-12 und umfassen folgende Subsysteme und Komponenten, wobei jeweils der gesamte Energieeinsatz inklusive Pumpen, Mess- und Regelungstechnik usw. zu berücksichtigen ist:

- I. Bereitstellung von *Umweltwärme/-kälte* aus Grundwasser, Erdreich oder Außenluft
- II. Erzeugung von Wärme/Kälte mittels (reversiblen) *Wärmepumpensystem* (aktives Heizen und Kühlen) oder mittels Wärmetauscher (direktes Kühlen)
- III. thermische *Speicherung und Wärme- und Kälteverteilung* im Gebäude
- IV. *Wärme- und Kälteübergabe* im Raum mittels TABS und maschineller Lüftungsanlage

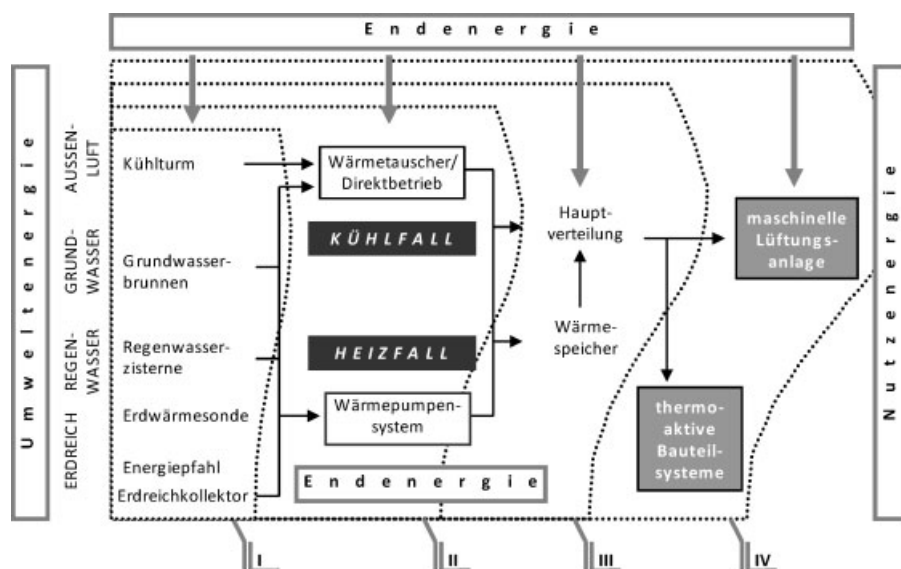


Bild 3. Allgemeine Systemdarstellung der Heiz- und Kühlkonzepte mit TABS in Kombination mit natürlichen Umweltwärmequellen/-senken sowie der Energiebilanzgrenzen I bis IV zur Bewertung

Fig. 3. General description of the heating and cooling concepts with TABS in combination with environmental heat sources/sinks, as well as the balance boundaries I to IV for evaluation

3 Thermoaktive Bauteilsysteme – Ergebnisse aus der Praxis

Im Folgenden werden Praxiserfahrungen und Betriebsauswertungen einer Reihe von Nichtwohngebäuden mit TABS in Kombination mit Umweltwärmequellen/-senken entsprechend Bild 3 vorgestellt [5]. Die dargestellten quantitativen Auswertungen basieren auf mehrjährigen Monitoringkampagnen aus den Förderprogrammen EnOB „Energieoptimiertes Bauen“ und „LowEx:Monitor“ des BMWi [6], [7], [8].

3.1 Nutzung von Umweltenergie zum Heizen und Kühlen (Bilanzgrenze I)

Prinzipiell kann die Energiebereitstellung für TABS auf alle Arten erfolgen, mit denen Heiz- und Kühlenergie üblicherweise in Gebäuden bereitgestellt wird. Doch der Vorteil von thermoaktiven Bauteilsystemen ist, dass man aufgrund der großen Wärme bzw. Kälte übertragenden Fläche bereits mit sehr kleinen Temperaturdifferenzen zwischen Decken- und Raumtemperatur effektiv heizen oder kühlen kann. Die Kühlwassertemperaturen werden auf einen Temperaturbereich von 16 bis 22 °C und die Heizwassertemperaturen auf maximal 27 bis 32 °C begrenzt.

Erfolgsfaktoren:

1 Die Betonkerntemperierung als Niedertemperatursystem im Heizfall bzw. Hochtemperatursystem im Kühlfall ermöglicht den effizienten Einsatz von Umweltwärmequellen bzw. -senken. Im Winter wird das natürlich vorhandene Temperaturniveau der Umweltenergie durch eine Wärmepumpe noch geringfügig und damit wirtschaftlich günstig erhöht. Im Sommer wird das Erdreich bzw. das Grundwasser als natürliche Umweltwärmesenke zur direkten Kühlung (Einsatz eines Wärmetauschers) der Gebäude genutzt, sodass lediglich Hilfsenergie zur Verteilung der Kühlenergie, nicht aber zu deren Erzeugung, aufgewendet werden muss.

- Die direkte Kühlung mittels oberflächennaher Geothermie ermöglicht die Bereitstellung von Klimakälte mit hoher Energieeffizienz – eine korrekte Auslegung, Installation und Betrieb der Geothermiesysteme vorausgesetzt. Für das Primärsystem im Betriebsmodus „Direkte Kühlung“ (ohne den Einsatz einer reversiblen Wärmepumpe bzw. Kältemaschine) wurden messtechnisch Jahresarbeitszahlen zwischen 10 und 16 kWh_{therm}/kWh_{el} (Bilanzgrenze I) nachgewiesen. Dabei ergeben sich für die Grundwassersysteme etwas geringere Jahresarbeitszahlen als für Erdreichsysteme aufgrund des höheren Hilfsenergieeinsatzes im offenen hydraulischen System.
- Wie jeder thermische Speicher überbrückt die thermisch aktivierte Betondecke die zeitliche Differenz zwischen Energieangebot und Energiebedarf und bewirkt eine teilweise Verschiebung der thermischen Lasten in die Nachtstunden. Die Trennung von Luftkonditionierung während der Anwesenheitszeit der Nutzer (Erwärmung bzw. Kühlung der Zuluft) und Betrieb der Betonkerntemperierung in den Nachtstunden ermöglicht somit eine Leistungsreduktion des Geothermiesystems bzw. der Wärme- und Kälteerzeuger und spart Investitionskosten.

Anforderungen:

- Die Energieeffizienz der Umweltwärmequellen und -senken wird durch den Hilfsstrombedarf bestimmt und ist damit in erster Linie von der elektrischen Leistungsaufnahme der Primärpumpe (Grundwasser- oder Solepumpe) abhängig. Die installierte elektrische Pumpenleistung in den untersuchten Projekten variiert zwischen 20 und sogar 230 W_{el} pro Kilowatt Heiz- und Kühlleistung der Wärmequelle bzw. Wärmesenke, siehe Bild 4. Im Rahmen der Planung sollten daher klare Vorgaben für die

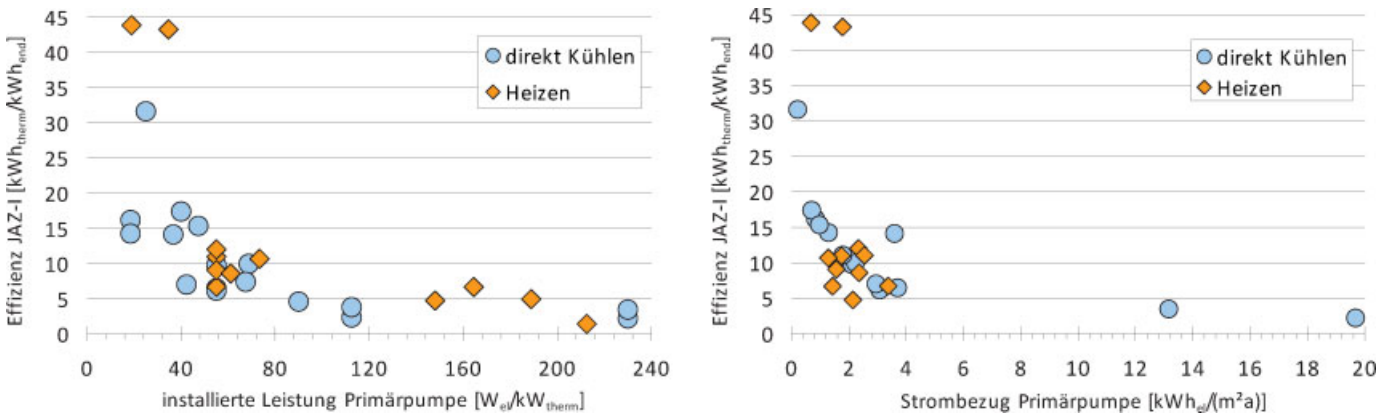


Bild 4. (links) Korrelation von gemessener Energieeffizienz der Wärmequelle/Wärmesenke SPF-I (Bilanzgrenze I) [kWh_{therm}/kWh_{end}] im Heiz- und Kühlfall und nominelle, elektrische Leistungsaufnahme der installierten Primärpumpe [W_{el}/kW_{therm}]. (rechts) Korrelation von gemessener Energieeffizienz der Wärmequelle/Wärmesenke SPF-I (Bilanzgrenze I) [kWh_{therm}/kWh_{end}] im Heiz- und Kühlfall und spezifischer Strombezug der installierten Primärpumpe [kWh_{el}/(m²TABSa)] pro Quadratmeter thermisch aktivierter Fläche. Ergebnisse sind getrennt für den Heiz- und den Kühlfall dargestellt. Messergebnisse aus EnoB- und LowEx:Monitor-Demonstrationsgebäuden

Fig. 4 (left) Correlation of measured energy efficiency of heat source/sink SPF-I (balance boundary I) [kWh_{therm}/kWh_{end}] in heating and cooling mode and nominal, electrical power consumption of the installed primary pump [W_{el}/kW_{therm}]. (right) Correlation of measured energy efficiency of heat source/sink SPF-I (balance boundary I) [kWh_{therm}/kWh_{end}] in heating and cooling mode and energy consumption of installed primary pump [kWh_{el}/(m²TABSa)], specifically related to the thermally activated floor area. Results are illustrated separately for the heating and cooling mode. Monitoring results are derived from the demonstration buildings of the EnoB and LowEx:Monitor program

zu erreichende Energieeffizienz der Systeme vereinbart werden.

- 5 Ein optimal dimensioniertes Rohrnetz mit geringen Druckverlusten (kleiner 300 Pa/m), korrekt dimensionierte Primärpumpen (kleiner 40 W_{el}/kW_{therm}), eine Volumenstromregelung der Primärpumpe nach der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf (Temperaturdifferenz zwischen 3 und 5 Kelvin) und optimale Betriebsführung (Strombezug kleiner 2 $kWh_{el}/(m^2_{TABSa})$) lassen bei den untersuchten Anlagen eine Effizienzsteigerung von 34 bis 50 % erwarten. Damit wird gezeigt, dass im Betriebsmodus „Freie Kühlung“ Jahresarbeitszahlen größer 20 kWh_{therm}/kWh_{end} erreicht werden können.
- 6 Der Betrieb von hocheffizienten Geothermieanlagen erfordert eine gute und sorgfältige Planung, sowohl der Hydraulik als auch der thermischen Auslegung des Erdwärmesondenfeldes bzw. der Grundwasserbrunnenanlage. Falsche Annahmen in der Planung (z. B. ungestörte Erdreichtemperatur, zu geringe Entzugsleistung für Erdwärmesonden, verfügbare Fördermengen für Grundwasser) und Fehler bei der Dimensionierung führen zu unzureichenden Heiz-/Kühlleistungen und zu geringer Energieeffizienz, die im Betrieb der Anlage kaum kompensiert bzw. korrigiert werden können. Dann ist die Nachrüstung eines zusätzlichen Wärme-/Kälteerzeugers unumgänglich.
- 7 Bei der Nutzung des Erdreichs als Wärmequelle und -senke sollte über das Betriebsjahr eine nahezu ausgeglichene Energiebilanz zwischen entzogener (Heizfall) und eingespeicherter Wärme (Kühlfall) erreicht werden, um die Leistungsfähigkeit des Geothermiesystems langfristig aufrecht erhalten zu können.

3.2 Einsatz von Wärmepumpen und Kältemaschinen (Bilanzgrenze II)

Thermoaktive Bauteilsysteme begünstigen im Heizfall den Einsatz von Wärmepumpenanlagen, die das vorhandene Temperaturniveau der Umweltwärmequelle (Erdreich: 6 bis 14 °C, Grundwasser: 8 bis 12 °C oder Außenluft) geringfügig auf die notwendige Vorlauftemperatur von 27 bis 32 °C erhöhen. Auch Abwärme von Server- oder Lebensmittelkühlung oder Industrieprozessen auf niedrigem Temperaturniveau kann zum Heizen genutzt werden. Erfordert das Gebäude und die Nutzung eine erhöhte Kühlleistung, kann Klimakälte durch eine erdgekoppelte, reversible Wärmepumpe energieeffizient bereitgestellt werden.

Erfolgsfaktoren:

- 1 Für die Wärmepumpenanlagen in den untersuchten Gebäuden (Bilanzgrenze II: Wärmepumpe mit Verdichter und Primärpumpe) werden Jahresarbeitszahlen von 3 bis 5,6 kWh_{therm}/kWh_{el} (Erdreich) bzw. 3,0 kWh_{therm}/kWh_{el} (Grundwasser) erreicht. Sowohl die Primärpumpe (Abschnitt 3.1) als auch die Vorlauftemperatur für das BKT-System haben einen entscheidenden Einfluss auf die Leistungs- (COP) und Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpe, siehe Bild 5.
- 2 Die Nutzung von erdreichgekoppelten Kältemaschinen stellt ein effizientes und nachhaltiges Konzept zur Ge-

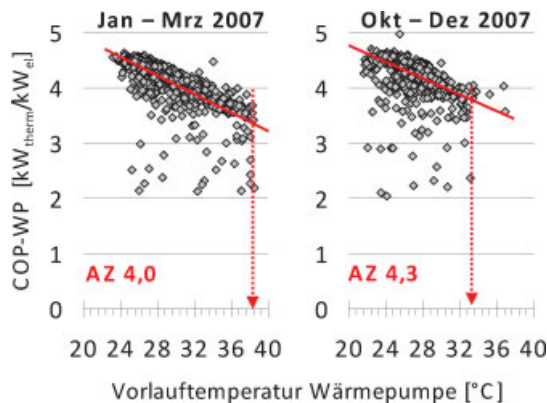


Bild 5. Stündlich gemessene Leistungszahl (COP-WP) der Wärmepumpe aufgetragen über der Vorlauftemperatur [°C]. Die Vorlauftemperatur der Wärmepumpe wurde von 38 °C (Betriebszeitraum Januar bis März 2007) auf 32 °C (Betriebszeitraum Oktober bis Dezember 2007) begrenzt. Dies bewirkte eine Steigerung der Arbeitszahl (AZ) in der jeweiligen Betriebsperiode von 4,0 auf 4,3 [kWh_{therm}/kWh_{end}]

Fig. 5. Hourly coefficient of performance of the heat pump (COP-HP) plotted versus the supply water temperature [°C]. The supply water temperature was reduced from 38 °C (operation period January to March 2007) to 32 °C (operation period October to December 2007). This measure resulted in an increase of the performance factor (PF) from 4.0 to 4.3 [kWh_{therm}/kWh_{end}]

bäudekühlung dar. Auch hier bedingen die relativ hohen Vorlauftemperaturen zur Kühlung von 16 bis 20 °C gute Energieeffizienzen. Messtechnisch wurden in zwei Projekten Jahresarbeitszahlen von 4,8 bis 5,8 kWh_{therm}/kWh_{el} nachgewiesen.

Anforderungen:

- 3 Wärmepumpen und Kältemaschinen sind sorgfältig für den jeweiligen Einsatzzweck auszuwählen und zu dimensionieren. Unnötige Sicherheitszuschläge bei der Leistung führen zu einem häufigeren Takten, was sich negativ auf die Effizienz und die Lebensdauer des Aggregate auswirkt. Bei der Auswahl des Fabrikats bzw. Typs ist auf eine möglichst hohe Effizienz im vorgesehenen Bereich der Betriebstemperaturen (Temperaturhub) zu achten – hierbei gibt es nicht unbeträchtliche Unterschiede. Auch sind die elektrischen Stand-By-Verluste (Regelung, Ölsumpfeheizung) nicht unerheblich.

3.3 Wärme- und Kälteverteilung im Gebäude (Bilanzgrenze III)

Wärme- bzw. Kältebereitstellung bei geringen Temperaturdifferenzen bedeutet auf technischer Ebene einen reduzierten Primärenergieeinsatz. Jedoch bringen die geringen Temperaturdifferenzen den Nachteil mit sich, dass ein verhältnismäßig hoher Volumenstrom gefördert werden muss, um eine entsprechende Wärme-/Kältemenge zu transportieren. Aufgrund dessen kommt dem hydraulischen Verteilsystem als Verbindungsglied zwischen der Wärme-/Kälteerzeugung und der Wärme-/Kälteübergabe bei der Optimierung des Gesamtsystems eine zentrale Bedeutung zu. Der spezifische Volumenstrom bei der Betonkerntemperierung variiert zwischen 5 und 16 kg/m^2h . Oberflächennahe Systeme

werden in der Regel mit höheren Volumenströmen zwischen 20 und 35 kg/m²h betrieben.

Erfolgsfaktoren:

1 Die BKT bedingt die Entkopplung von thermischer Raumkonditionierung (Heizen und Kühlen) und Lüftungsanforderungen. Der auf das hygienisch erforderliche Maß reduzierte Luftvolumenstrom führt zur Verkleinerung des Kanalnetzes um bis zu 70 % und zur Reduzierung der Betriebskosten und des Stromverbrauchs. Durch die Entkopplung von latenten und sensiblen Kühllasten lassen sich auch bei erforderlicher Entfeuchtung der Zuluft Energieaufwand und Kosten deutlich senken.

Anforderungen:

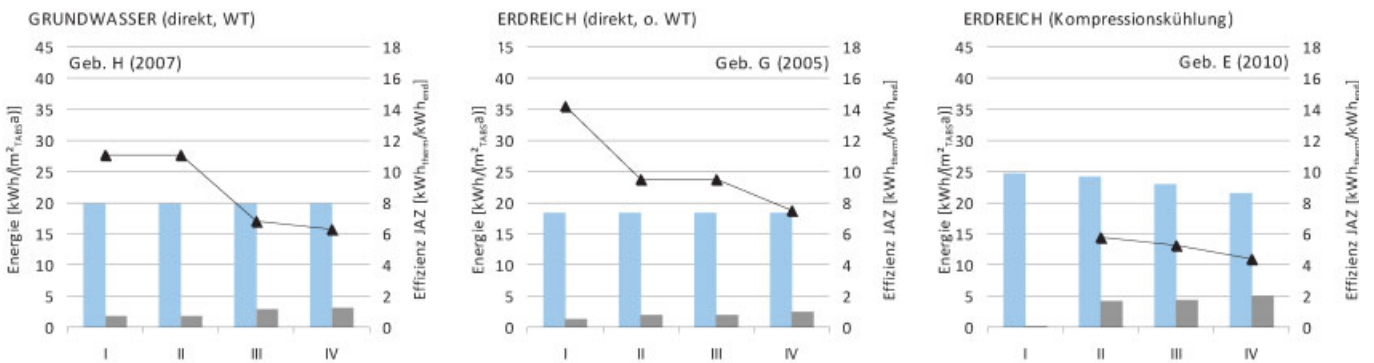
2 Der elektrische Hilfsenergiebezug für die Hydraulik im Primär- und Sekundärkreis (Pumpen, keine Ventilatoren für die Lüftung) beträgt für die jeweiligen Gebäude 3 bis 10 kWh_{el}/(m²_{NGFA}) bzw. 25 bis 45 % des gesamten Endenergiebezugs für die Bereiche Heizen, Kühlen und Belüften (ohne Beleuchtung). Die elektrisch installierte Leistung der Verteil- und Umwälzpumpen variiert bei den untersuchten Gebäuden zwischen 19 und 80 W_{el}/kW_{therm}. Für die Kälteverteilung im Gebäude

und Kälteübergabe im Raum ist damit eine zusätzliche Hilfsenergie von 0,7 bis 3,0 kWh_{el}/(m²_{TABSA}) erforderlich. Die Wärmeverteilung im Gebäude und die Wärmeübergabe im Raum erfordert einen Hilfsenergieeinsatz für die Hydraulik von 1,5 bis 6,5 kWh_{el}/(m²_{TABSA}).

3 Die hydraulischen Systeme sollen daher für einen geringen Druckverlust und eine geringe hydraulische Leistung ausgelegt werden, um den Hilfsenergieeinsatz für die Pumpen zu reduzieren. Erfahrungen aus Bauprojekten zeigen aber immer wieder, dass gerade in der Dimensionierung und im Betrieb des hydraulischen Systems gravierende Fehler gemacht wurden und werden. Eine unzureichende Funktionalität der Wärmeübergabesysteme und ein zu hoher Hilfsenergieaufwand liegen meist an einer falschen Planung, einer unzureichenden Ausführung und immer wieder einem fehlenden hydraulischen Abgleich. Eine eingeschränkte Nutzbarkeit der TABS-Systeme und ein erhöhter Energiebedarf bzw. eine deutlich verringerte Energieeffizienz sind die Folge.

4 Die Effizienz des gesamten Heiz- bzw. Kühlsystems wird entscheidend vom Hilfsenergieaufwand und damit von der Hydraulik bestimmt. Die Effizienz des gesamten Kühlsystems liegt in den Messprojekten zwischen 1,5 und 8,0 kWh_{therm}/kWh_{el} und des gesamten Heizsystems bei 1 bis 2,5 kWh_{therm}/kWh_{el}, siehe Bild 6.

KÜHLSYSTEM



HEIZSYSTEM

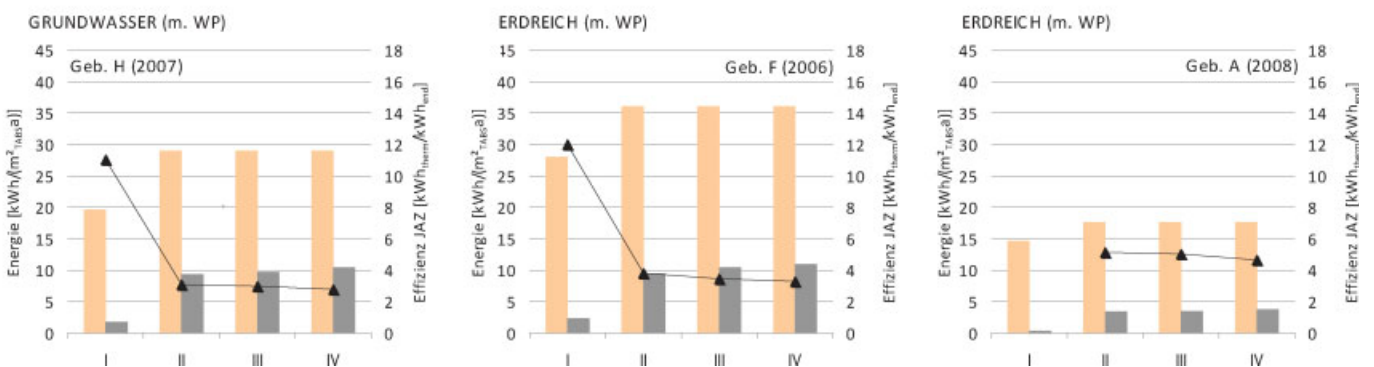


Bild 6. Bewertung des Gesamtsystems im Heiz- und Kühlfall am Beispiel von fünf Gebäuden: Bereitstellung von Wärme/Kälte (orange/blau, [kWh_{therm}/(m²a)]), Hilfsstrombezug für Pumpen und Verdichter bei der Wärmepumpe (grau, [kWh_{el}/(m²a)]) und Energieeffizienz (JAZ, [kWh_{therm}/kWh_{el}]) der einzelnen Bilanzgrenzen I bis IV gemäß Bild 3. Abkürzungen: Wärmetauscher (WT), Wärmepumpe (WP)

Fig. 6. Evaluation of the entire plant system in heating and cooling mode for five buildings: supply of heating/cooling energy (orange/blue, [kWh_{therm}/(m²a)]), auxiliary energy use for pumps and compressor of heat pump (grey, [kWh_{el}/(m²a)]), and energy efficiency (SPF, [kWh_{therm}/kWh_{el}]) of the particular balance boundary I to IV according to Fig. 3. Abbreviations: heat exchanger (WT), heat pump (WP)

3.4 Wärme- und Kälteübergabe im Raum (Bilanzgrenze IV)

Die große, Wärme übertragende Fläche der thermisch aktivierten Decke ermöglicht es, bei bereits geringen Über- bzw. Untertemperaturen nennenswerte Leistungen an den Raum abzugeben. Daher können BKT-Systeme selbst die vergleichsweise geringe Temperaturdifferenz natürlicher Wärmesenken (Sommer) bzw. Wärmequellen (Winter) gegenüber der Raumtemperatur effektiv nutzen.

Erfolgsfaktoren:

- 1 Im stationären Zustand werden Kühlleistungen von 30 bis 40 W/m² erreicht. Nach oben ist die Kühlleistung durch den Taupunkt der Raumlufttemperatur begrenzt, da sich andernfalls Tauwasser an der Decke bildet. Der Taupunkt liegt bei etwa 15 °C für 26 °C Raumlufttemperatur und 50 % relative Luftfeuchte. Daher muss vor allem der Eintrag solarer Lasten durch einen wirksamen Sonnenschutz gemindert werden. Aufgrund der relativ „hohen“ Vorlauftemperaturen natürlicher Wärmesenken ist eine Unterschreitung des Taupunktes fast nie gegeben. Im Heizfall können Leistungsdichten von 25 bis 30 W/m² erreicht werden. Oberflächennahe System können unter entsprechenden Betriebsbedingungen Kühlleistungen von bis zu 70 W/m² erreichen.
- 2 Speicherverluste, begrenzte Regelbarkeit und nicht beeinflussbare Wärmeströme vom Bauteil an den Raum bzw. umgekehrt bedingen höhere Wärme- und Kälteverbräuche als bei einer idealen Raumkonditionierung. Daraus ergibt sich systembedingt ein 1,5- bis 2-fach erhöhter Mehrverbrauch an Nutzenergie gegenüber gut regelbaren Systemen die mit geringen Abweichungen von der Raumsolltemperatur auskommen [9]. Durch den Einsatz von Umweltenergie zum Heizen und Kühlen wird aber der Primärenergieverbrauch der BKT-Systeme entscheidend reduziert. Des Weiteren ist der Hilfsenergieeinsatz für die Wärme- und Kälteverteilung (Hydraulik, Aufwand an Transportenergie) bei wassergeführten Systemen geringer als bei luftgeführten Systemen.

Anforderungen:

- 3 Durch Maßnahmen in der Betriebsführung und Regelung lässt sich der Hilfsenergieaufwand im Sekundärkreis deutlich reduzieren. Dies betrifft: Reduzierung des Teillastverhaltens, Leistungsabstimmung der einzelnen Verbraucher und Reduzierung der Betriebszeiten.
- 4 Monitoringergebnisse aus den Projekten zeigen, dass die BKT-Systeme oft mit Nennlastvolumenstrom und kleinen Temperaturspreizungen zwischen Vor- und Rücklauf betrieben werden, siehe Bild 7. Dies verursacht einen unnötig hohen Strombezug und führt zu einer geringeren Energieeffizienz. Auf eine möglichst weitgehende Reduzierung der Betriebszeiten ist zu achten, ggf. sind ein intermittierender Pumpenbetrieb und/oder eine Volumenstromregelung nach der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf (zwischen 3 und 5 Kelvin) zielführend.
- 5 Aufgrund der begrenzten Leistungsfähigkeit der Betonkerntemperierung ist ein integral geplantes Gebäudekonzept (optimale Abstimmung von Architektur, Bauphysik und Gebäudetechnik) mit konsequenter Begrenzung der Heiz- und Kühllast Voraussetzung für deren

Einsatz. Ungenügende Annahmen zu Heiz- und Kühlbedarf in der Planung oder veränderte Gebäudenutzung lassen sich im späteren Gebäudebetrieb nur durch Nachinstallation eines Zusatzsystems, längere Betriebszeiten oder der aktiven Konditionierung der Zuluft korrigieren.

- 6 Die Kombination der Betonkerntemperierung mit einem regelbaren und schnell reagierenden Zusatzsystem ist dann sinnvoll, wenn in den Nutzungsbereichen erhöhte

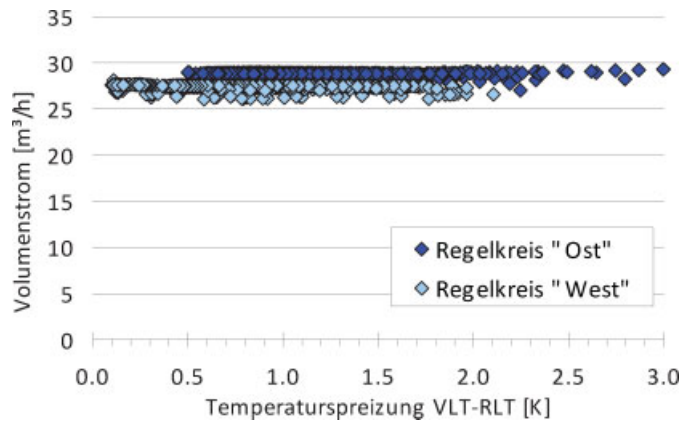


Bild 7. Volumenstrom [m³/h] der TABS-Regelkreise mit den dazugehörigen Temperaturspreizungen zwischen Vor- und Rücklauf [K]

Fig. 7. Volume flow [m³/h] of TABS circuits with the corresponding temperature differences between supply and return [K]

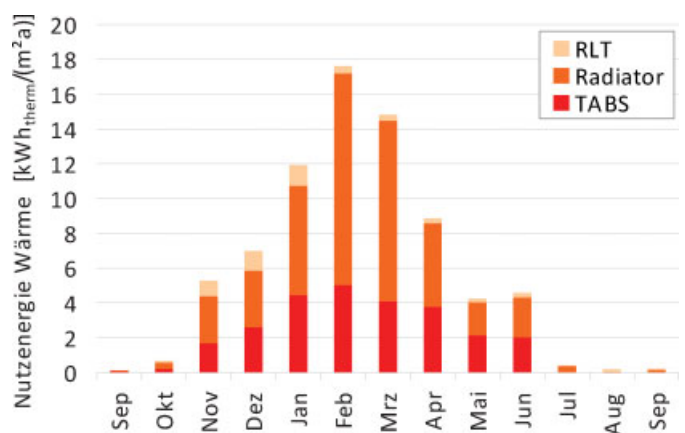


Bild 8. Kombination Betonkerntemperierung (Versorgung mit erdgekoppelter Wärmepumpe, Temperaturniveau 28/30 °C) und Radiatoren (Fernwärmeversorgung, Temperaturniveau 75/55 °C). Dargestellt ist die bereitgestellte Wärme [kWh_{therm}/(m²a)], getrennt nach den Übergabesystemen. Radiatoren als schnell reagierendes System auf hohem Temperaturniveau decken den Großteil der Heizlast und des Heizwärmeverbrauch und schränken den Einsatz der BKT deutlich ein

Fig. 8. Combination of concrete core conditioning (heat supply with ground-coupled heat pump, temperature level 28/30 °C) and radiator (district heating, temperature level 75/55 °C). Given is supplied heating energy [kWh_{therm}/(m²a)] separately for the three delivery systems. Due to their rapid response at a high temperature level, radiators cover a large share of the heat load and heating energy consumption and considerably constrain the usage of the concrete core conditioning system

Komfort- oder sich verändernde Nutzungsbedingungen gefordert sind. Das zusätzliche Heiz-/Kühlsystem (z. B. Randstreifenelemente, Niedertemperaturradiatoren) sollte aber auf dem gleichen Temperaturniveau wie die Betonkerntemperierung betrieben werden. Dies ermöglicht zum einen die Nutzung des gleichen Verteilsystems und spart damit Investitionskosten. Zum anderen führt der Einsatz eines Hochtemperatursystems im Parallelbetrieb zu einer deutlichen Verschiebung der Lastabdeckung zu Gunsten des Hochtemperatursystems und damit zur Einschränkung des BKT-Betriebs, siehe Bild 8.

4 Thermischer Raumkomfort im Sommer und Winter

Thermischer Raumkomfort in Nichtwohngebäuden wird anhand der neuen Europäischen Richtlinie DIN EN 15251:2007-08 bewertet. Gebäude, die durch Klimaanlage aber auch durch thermoaktive Bauteilsysteme aktiv konditioniert werden, sollten entsprechend dem statischen Komfortmodell nach der DIN ISO 7730:2005 festgelegte Raumtemperatursollwerte, unabhängig von den Außentemperaturbedingungen, einhalten, siehe Bild 9.

Erfolgsfaktoren:

- 1 Detaillierte Auswertungen zu den Gebäuden zeigen, dass durch Kühlung mit thermoaktiven Bauteilsystemen (insbesondere Betonkernaktivierung) die geforderten Raumtemperaturen unter Berücksichtigung des Nutzerverhaltens (fast) immer eingehalten werden können, siehe Bild 9. Betrachtet man die mittlere operative Raumtemperatur im Sommer zeigt sich, dass die Komfortkriterien für die Komfortkategorie II für 90 % zufriedene Nutzer nur sehr selten und an einzelnen Stunden überschritten werden, in Bild 10 mit Sollwert 26 °C für Komfortkategorie II. In der Komfortanalyse der einzelnen Gebäude zeigt sich kein ausgeprägter Unterschied in Abhängig-

keit der jeweils eingesetzten Umweltenergiesenken – eine ausreichende Dimensionierung und eine vernünftige Betriebsführung vorausgesetzt. Das Erdreich und das Grundwasser sind von der Außentemperatur weitgehend unabhängige Wärmesenken, die es ermöglichen Gebäude auch bei höheren Außentemperaturen effektiv zu kühlen. Auch im Winter kann die Betonkerntemperierung in diesen Gebäuden in Kombination mit einer maschinellen Lüftung den thermischen Komfort ohne zusätzliche statische Heizflächen gewährleisten. Die nach den DIN EN 15251:2007-08 festgelegten Raumtemperatursollwerte von minimal 19 bis 21 °C werden nur selten unterschritten [5], [10].

- 2 Die nahe an der Raumlufttemperatur liegenden System- und Bauteiltemperaturen, der hohe Strahlungsanteil an der Wärmeübertragung sowie die Abwesenheit hoher Luftwechsel und je nach System eventuell hoher Luftgeschwindigkeiten erhöhen die thermische Behaglichkeit.

Anforderungen:

- 3 Kühlenergiekonzepte mit thermoaktiven Bauteilsystemen und Umweltenergie stellen für das mitteleuropäische Klima eine energieeffiziente Lösung dar, können aber aufgrund von Systemträgheiten und systembedingten Temperaturen keine stringenten Raumtemperatursollwerte gewährleisten. Sollen bestimmte Raumtemperaturen gewährleistet werden, ist ein zusätzliches, regelbares und schnell reagierendes Heiz- und Kühlsystem erforderlich.
- 4 Der Einsatz durchgehender abgehängter Decken mit dämmenden Elementen zur Gestaltung der Raumakustik (Nachhallzeit, Schallverteilung) ist in den Räumen mit Betonkerntemperierung nicht möglich bzw. in der Fläche und Anordnung stark eingeschränkt. Räume mit hohen akustischen Anforderungen verlangen ein entsprechendes Raumakustikkonzept.

RAUMKOMFORT NACH EUROPÄISCHER NORM DIN EN ISO 15251:2007-08

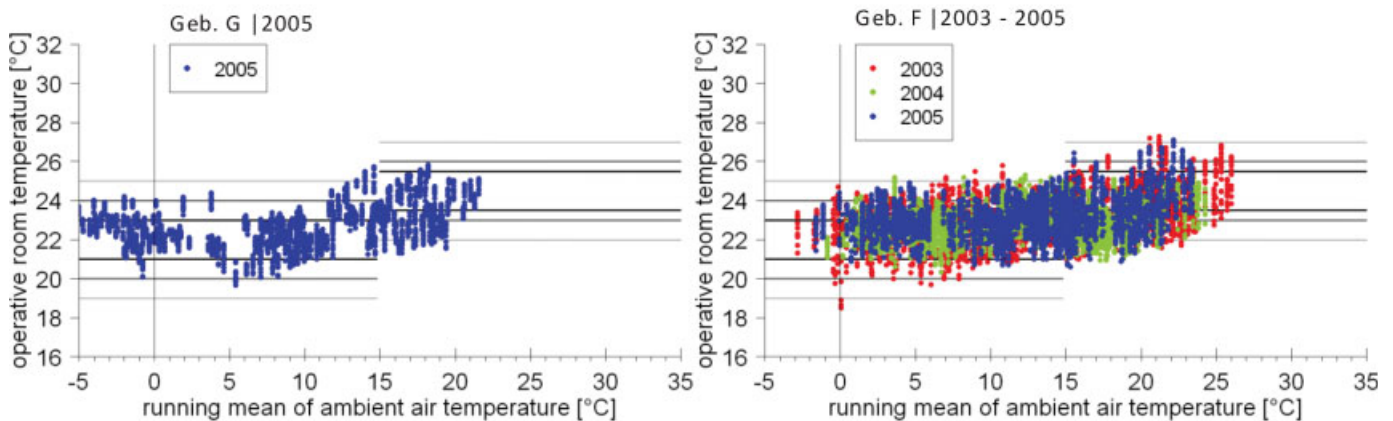


Bild 9. Bewertung des thermischen Raumkomfort während der Anwesenheit des Nutzers nach der Europäischen Komfortnorm DIN EN 15251:2007-08; PMV-Komfortmodell: Stündlich gemessene Raumtemperaturen (Mittelwert aller Räume) während der Anwesenheitszeit der Nutzer aufgetragen über dem gleitenden Außentemperaturmittel. Winterperiode: gleitende Außentemperatur kleiner 15 °C, Sommerperiode: gleitende Außentemperatur größer 15 °C. Die Linien markieren die Komfortgrenzen für die Klassen I, II und III

Fig. 9. Evaluation of thermal room comfort during the occupancy of the use according the European comfort guideline DIN EN 15251:2007-08; PMV comfort model: Hourly measured room temperature (average of all rooms) during occupancy is plotted versus the running mean ambient air temperature. Winter period: running mean ambient air temperature smaller 15 °C, summer period: running mean ambient air temperature greater 15 °C. Grey lines indicate the comfort boundaries for the classes I, II and III

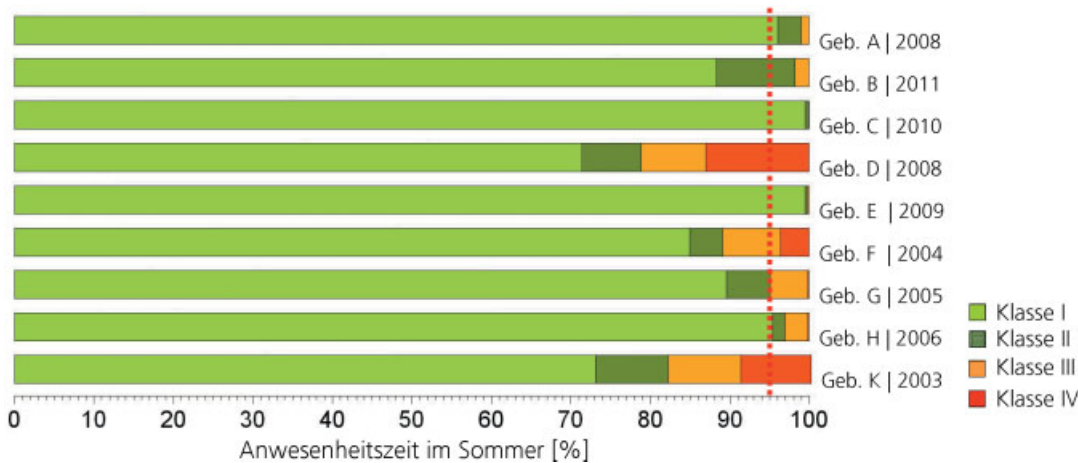
KOMFORT-FOOTPRINT: Überschreitungshäufigkeit der Komfortklassen

Bild 10. Bewertung des thermischen Raumkomfort während der Anwesenheit des Nutzers nach der Europäischen Komfortnorm DIN EN 15251:2007-08, PMV-Komfortmodell: Anwesenheitszeit im Sommer [%], an der das Gebäude die Anforderungen der Komfortklassen I bis II erfüllt (Überschreitung der oberen Komfortgrenzen). Die meisten Gebäude gewährleisteten zu 95 % der Nutzungszeit einen Raumkomfort nach den Anforderungen der Kategorie II

Fig. 10. Evaluation of thermal room comfort during the occupancy of the use according the European comfort guideline DIN EN 15251:2007-08; PMV comfort model: Time during occupancy [%] when building fulfills the comfort requirements of classes I to III (exceedance of upper comfort limits). Most of the investigated buildings guarantee during 95 % of the occupancy time a room comfort in compliance with comfort class II

5 Aufgrund der Systemträgheiten und der Regelung der BKT nach thermischen Zonen ist der Nutzereinfluss auf die Raumtemperaturregelung stark eingeschränkt.

5 Fehlerquellen in Planung und Ausführung

Die oben angeführten, für Gebäude mit TABS und Umweltenergie spezifischen Anforderungen bringen auch spezifische Fehlerquellen mit sich. Folgende Beispiele verdeutlichen dies:

- Der Bemessung eines Erdwärmesondenfeldes für eine direkte geothermische Kühlung wurde ein Literaturwert für die ungestörte Erdreichtemperatur ca. 11 °C zugrunde gelegt. Der tatsächlich bei der Erkundung gemessene, ungewöhnlich hohe und für die Kühlung ungünstigere Wert am Standort von ca. 15 °C floss nicht in die Planung ein, sodass das Erdsondenfeld im Betrieb nicht für die direkte Kühlung ausreichte. Dies wurde erst durch Einsatz einer reversiblen Wärmepumpe zur aktiven Kühlung möglich.
- In einem anderen Projekt wurde trotz korrekter Vorplanung die gesamte Rohrdimensionierung des Versorgungsnetzes für ein TABS mit einer zu hohen Temperaturspreizung und damit unter Annahme eines weniger als halb so großen Volumenstroms wie erforderlich durchgeführt. Das danach ausgeführte Rohrnetz wies so hohe Strömungswiderstände auf, dass der für TABS erforderliche hohe Volumenstrom nicht gefördert werden konnte. Es wurde ein Austausch der zentralen Verteilleitung und der Hauptverteilung erforderlich.
- Durch ungünstige Regelungseinstellungen kann es dazu kommen, dass ein TABS in der Übergangszeit morgens heizen und nachmittags wieder kühlen soll. In einem weiteren Projekt wurde der im System vorhandene Pufferspeicher entsprechend aufgeheizt und später wieder heruntergekühlt werden. Im vorliegenden Fall konnte

dieses Problem durch Veränderung der Regelungs-Sollwerte beseitigt werden, ohne dass der thermische Komfort im Gebäude leidet.

- Offene Rückkühlwerke und Grundwasser-Brunnenanlagen wurden in mehreren Projekten so geplant und ausgeführt, dass die zugehörige Pumpe in einem offenen hydraulischen System die gesamte geodätische Höhendifferenz des Gebäudes (plus ggf. des Brunnens unter der Erdoberfläche) überwinden muss, was den Förderenergieaufwand vervielfacht. In einem Projekt führten Probleme mit Aufbau der Wassersäule beim Einschalten der Grundwasserpumpe sogar dazu, dass die Pumpe von den Betreibern ständig in Betrieb gehalten wird und damit ein Vielfaches der benötigten Zeit läuft.

Derartige Fehler können im Extremfall zur Notwendigkeit eines Umbaus führen. In anderen Fällen werden Sie durch eine veränderte Betriebsweise „kompensiert“. Gelegentlich werden sie nicht augenscheinlich; die Folge ist dann i. d. R. ein überhöhter Energieverbrauch, der die ökologischen und ökonomischen Vorteile des Gesamtsystems zunichte machen kann.

Darüber hinaus können auch direkt beim Bau auf der Baustelle TABS-typische Schäden auftreten:

- Bauteile mit TABS dürfen, je nach Verlegetiefe der Rohre im Bauteil, nur bis zu einer bestimmten Tiefe angebohrt werden. Leitungen und andere Installationen (Beleuchtung), die zu weit in das Bauteil hineinreichen, müssen durch Leerrohre in den Decken vorbereitet sein. In Projekten, bei denen dies missachtet wurde, war die „Trefquote“ beim Bohren mitunter unerfreulich hoch. Ist eine TABS-Leitung innerhalb des Bauteils beschädigt, muss das Bauteil an der betreffenden Stelle geöffnet und ein neues Rohr- oder Passstück eingefügt werden. Dies ist technisch möglich und durchaus erprobt, aber sehr aufwändig.

- TABS-Rohre sind vor und während des Betonierens sowie während des Aushärtens des Betons mit Wasser unter Druck gefüllt. In einem überwinterter der Rohrbau mit dem Wasser im System. Die dadurch aufgetretenen Frostschäden, waren so erheblich und irreparabel, dass die Betonkerntemperatur außer Betrieb genommen und durch abgehängte Kühlregel ersetzt werden musste.

Derartige Baustellenschäden lassen sich allerdings durch Beachtung der entsprechenden Regeln vermeiden, was eine diesbezüglich kundige und aufmerksame Bauleitung voraussetzt. Der Bau von TABS, vor allem Betonkerntemperatur, bedeutet, dass Rohbau und technischer Ausbau in einer für viele Projektbeteiligte ungewohnten Weise miteinander verknüpft sind.

6 Zusammenfassung

Gebäude, die mit thermoaktiven Bauteilsystemen (TABS) in Verbindung mit der Nutzung von Umweltenergie gekühlt und ggf. beheizt werden, haben sich in den letzten Jahren etabliert. Viele erfolgreiche und gut funktionierende Beispiele belegen, dass mit diesen Systemen ein hohes Maß an thermischer Behaglichkeit in Verbindung mit einer hohen Energieeffizienz und bei Nutzung von erneuerbarer Umweltenergie (v. a. oberflächennaher Geothermie) erreicht werden kann.

Jedoch zeigen die Betriebserfahrungen und die systematische wissenschaftliche Auswertung einer ganzen Reihe von Projekten, dass es in Planung, Ausführung und Betrieb noch Verbesserungsmöglichkeiten in Richtung einer besseren Ausschöpfung des Effizienzpotenzials gibt. Gerade bei diesen Systemen sind die richtige Auslegung des Gesamtsystems, eine korrekte Umsetzung auf der Baustelle und eine korrekte Betriebsführung von großer Wichtigkeit.

Durch den sich stetig verringernden Bedarf und Verbrauch von Energie für die Gebäudetechnik bei Niedrigenergiegebäuden muss dem Hilfsenergieverbrauch für die Hydraulik von wassergeführten Systemen eine größere Bedeutung beigemessen werden (v. a. für Pumpen). Die Energie- und Effizienzanalyse der Messprojekte unterstreicht, wie wichtig die richtige Auslegung des Gesamtsystems, eine korrekte Umsetzung auf der Baustelle und schließlich eine vernünftige Betriebsführung sind, um das hohe Effizienzpotential von Energieversorgungskonzepten mit Umweltenergie wirklich auszuschöpfen. Für das Gesamtsystem im Betriebsmodus „Freie Kühlung“ ohne Kältemaschine (Bereitstellung, Verteilung und Übergabe von Kälte – Bilanzgrenze I bis IV) sollte eine Energieeffizienz in der Größenordnung von einer Jahresarbeitszahl $10 \text{ kWh}_{\text{therm}}/\text{kWh}_{\text{el}}$ angestrebt werden. Im Heiz-/Kühlfall mit reversibler Wärmepumpe bzw. Kältemaschine ist für das Gesamtsystem eine Jahresarbeitszahl von $5 \text{ kWh}_{\text{therm}}/\text{kWh}_{\text{el}}$ durchaus machbar.

Tabelle 1. Zusammenfassung der Energie- und Effizienzkennzahlen für Gebäude- und Energiekonzepte mit TABS und Umweltwärmequellen/-senken. Messergebnisse aus Demonstrationsgebäuden
 Table 1. Summary of energy and efficiency indexes for building and energy concepts with TABS and environmental heat sources/sinks. Monitoring results from demonstration buildings

Bilanzgrenze I: Nutzung von Umweltwärmequellen und -senken zum Heizen und Kühlen	
Effizienz Wärmequelle	JAZ-I: 5–12 $\text{kWh}_{\text{therm}}/\text{kWh}_{\text{el}}$
Effizienz Wärmesenke (direkte Kühlung)	JAZ-I: 10–16 $\text{kWh}_{\text{therm}}/\text{kWh}_{\text{el}}$
spezifische installierte elektrische Leistung der Primärpumpe	20–230 $\text{W}_{\text{el}}/\text{kW}_{\text{therm}}$
Jährlicher Strombezug der Primärpumpe	0,5 bis 4,0 $\text{kWh}_{\text{el}}/(\text{m}^2_{\text{NGF}}\text{a})$
Temperaturdifferenz Vorlauf-Rücklauf im Heizfall/Kühlfall	1–3 Kelvin
Temperatur Wärmequelle/Wärmesenke (Erdreich)	6–16 °C
Bilanzgrenze II: Einsatz von Wärmepumpen und Kältemaschinen in Kombination mit Umweltwärmequellen und -senken zum Heizen bzw. Kühlen	
Effizienz erdgekoppelte Wärmepumpe (einschl. Hilfsenergie für Primärpumpe)	JAZ-II: 3–5,6 $\text{kWh}_{\text{therm}}/\text{kWh}_{\text{el}}$
Effizienz Grundwasser-gekoppelte Wärmepumpenanlage (einschl. Hilfsenergie)	JAZ-II: 3,0 $\text{kWh}_{\text{therm}}/\text{kWh}_{\text{el}}$
Effizienz erdreichgekoppelte Kältemaschine (einschl. Hilfsenergie)	JAZ-II: 4,8–5,8 $\text{kWh}_{\text{therm}}/\text{kWh}_{\text{el}}$
Anteil des Strombezugs der Primärpumpe am Wärmepumpensystem	13–35 %
Vorlauftemperatur der Wärmepumpe im Heizfall (ohne Warmwasserbereitung)	30–38 °C
Bilanzgrenze III: Wärme- und Kältespeicherung und -verteilung im Gebäude	
spezifische installierte elektrische Leistung für Verteil- und Umwälzpumpen	20–120 $\text{W}_{\text{el}}/\text{kW}_{\text{therm}}$
Hilfsenergiebezug für Verteil- und Umwälzpumpen im Heizfall	1,5–6,5 $\text{kWh}_{\text{el}}/(\text{m}^2_{\text{NGF}}\text{a})$
Hilfsenergiebezug für Verteil- und Umwälzpumpen im Kühlfall	0,7–3,0 $\text{kWh}_{\text{el}}/(\text{m}^2_{\text{NGF}}\text{a})$
Bilanzgrenze IV: Wärme- und Kälteübergabe im Raum mittels thermoaktiven Bauteilsystemen (TABS)	
Effizienz des Gesamtsystems (Heizfall)	JAZ-IV: 1–2,5 $\text{kWh}_{\text{therm}}/\text{kWh}_{\text{el}}$
Effizienz des Gesamtsystems (Kühlfall)	JAZ-IV: 1,5–8,0 $\text{kWh}_{\text{therm}}/\text{kWh}_{\text{el}}$
Vorlauftemperatur TABS (Heizfall)	26–30 °C
Vorlauftemperatur TABS (Kühlfall)	16–22 °C

Danksagung

Der Hauptteil der Arbeiten, die zu den hier dargestellten Ergebnissen führten, wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert (EnoB:Monitor: Förderkennzeichen 0335007P und LowEx:Monitor 0327466B). Weitere Ergebnisse lieferten Kontakte mit und Direktaufträge von Gebäudeeigentümern. Die Autoren danken den einzelnen Evaluierungsteams für die Messdatenaufbereitung und -auswertung sowie für hilfreiche Diskussionen und den Bauherren für die Möglichkeit, ihre Gebäude zu untersuchen.

Literatur

Hinweis

Dieser Artikel basiert auf einer Veröffentlichung in der Zeitschrift *DETAIL*, die im November 2011 erschienen ist. Einzelne Informationen wurden aus diesem Artikel [11] übernommen, geändert und ergänzt.

- [1] Thermoaktive Bauteilsysteme. BINE Themeninfo 1/2007, BINE Informationsdienst.
- [2] *Koenigsdorff, R.*: Bauteilaktivierung – eine alte Idee und Ihre heutige Verbreitung. *DETAIL* 47 (2007) H. 6, S. 670–674.
- [3] *Lohmüller, S., Koob, C., Leisering, F.*: Das Marktvolumen für Flächenkühlung in Deutschland. *HLH* 60 (2009) S. 58–60.
- [4] *Koenigsdorff, R.*: Oberflächennahe Geothermie für Gebäude – Grundlagen und Anwendungen zukunftsfähiger Heizung und Kühlung. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2011.
- [5] *Kalz, D. E.*: Heating and Cooling Concepts employing Environmental Energy and Thermo-Active Building Systems for Low-Energy Buildings – System Analysis and Optimization. Dissertation, Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart, 2010.
- [6] Forschung für Energieoptimiertes Bauen, Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, www.enob.info, Januar 2012.
- [7] Forschung für Energieoptimiertes Bauen in der Sanierung, Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, www.enob.info/de/sanierung, Januar 2012.
- [8] LowEx:Monitor – Exergetisches Monitoring für Gebäude mit Erdwärmenutzung, Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, www.lowexmonitor.ise.fraunhofer.de, Januar 2012.
- [9] *Kempkes, C., Schalk, K., Felsmann, C., Oschatz, B., Günther, M.*: Energetische Bewertung thermisch aktivierter Bauteile. Dynamisch thermische Simulation, messtechnische Validation, vereinfachte Bewertungsansätze. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2009.
- [10] *Pfafferoth, J., Herkel, S., Kalz, D., Zeuschner A.* (2007): Comparison of low-energy office buildings in summer using different thermal comfort criteria: *Energy and Buildings*, 39(7): 750–757.
- [11] *Kalz, D., Koenigsdorff, R., Pfafferoth, J.*: Thermoaktive Bauteilsysteme: Betriebserfahrungen aus der Praxis. *DETAIL*, 51 (2011), 11 Massive Bauten, S. 1266–1278.

Autoren dieses Beitrages:

Dr.-Ing. Doreen Kalz, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE, Abt. Thermische Anlagen und Gebäude, Energieeffiziente und solare Kühlung, Heidenhofstr. 2, D-79110 Freiburg
 Prof. Dr.-Ing. Jens Pfafferoth, Hochschule Offenburg, Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Institut für Energiesystemtechnik (INES), Badstr. 24, D-77652 Offenburg
 Prof. Dr.-Ing. Roland Koenigsdorff, Hochschule Biberach, Gebäudeklimatik und Energiesysteme, Institut für Gebäude- und Energiesysteme (IGE), Karlstr. 11, D-88400 Biberach

Energieeffiziente Kühlung und thermischer Raumkomfort: Vergleichende Analyse von acht europäischen Nichtwohngebäuden (Teil 1)

Unter dem europäischen Programm Intelligent Energy for Europe (IEE) fanden sich acht europäische Partner zusammen, um im Rahmen des Projektes *ThermCo* Lüftungs- und Kühlenergiekonzepte für Nichtwohngebäude mit niedrigem Energieeinsatz im Hinblick auf die Energieeffizienz und den thermischen Raumkomfort zu bewerten. Die Analyse erfolgte auf Basis von detaillierten Langzeitmessungen über ein Betriebsjahr in acht Demonstrationsgebäuden in unterschiedlichen klimatischen Zonen Europas und einer standardisierten Datenauswertung. Im Quervergleich aller acht Gebäude werden die Kühlkonzepte gleichermaßen nach dem thermischen Kühlenergiebezug, dem thermischen Raumkomfort und dem Primärenergieeinsatz für die technische Gebäudeausrüstung und die Beleuchtung bewertet. Ein Energiekonzept ist erst dann zufriedenstellend, wenn mit möglichst geringem Energieeinsatz und bei hoher Anlageneffizienz ein guter thermischer Raumkomfort zur Verfügung gestellt werden kann. Mit entsprechenden Gebäudesignaturen werden diese Parameter in einen Zusammenhang gebracht und die Zielstellung überprüft. Detaillierte Komfortuntersuchungen nach der europäischen Komfortnorm DIN EN 15251:2007-08 geben Hinweise auf die Wirksamkeit der eingesetzten Kühltechnologien in den jeweiligen Klimazonen. Daraus lassen sich Handlungsempfehlungen ableiten.

Energy efficient cooling and thermal interior comfort: comparison of eight European non-residential buildings. *Under the framework of the European Program Intelligent Energy for Europe (IEE), the project ThermCo evaluates low-energy ventilation and cooling concepts for non-residential buildings all-over Europe using a standardized method based on existing monitoring data from best practice examples. The proposed approach is applied to eight demonstration projects in different climatic zones of Europe. The analysis is based on long-term monitoring campaigns in high-time resolution over one year of operation. In cross-comparison of all eight buildings, the cooling concepts are evaluated according to the thermal cooling energy consumption, the thermal interior comfort, and the building's total primary energy use for heating, cooling, ventilation, and lighting.*

1 Einleitung

In Deutschland ist in etwa die Hälfte der Büro- und Verwaltungsgebäude mit Kühl- oder Klimatisierungsvorrichtungen ausgestattet – rund 10 % sind vollklimatisierte und ein gutes Drittel teilklimatisierte Gebäude [1]. Die somit zu kühlende Fläche der Büro- und Verwaltungsgebäude des GHD-Sektors von 107 [2, Stand 2008], 217 [3, Stand 2005]

bzw. 273 Mio. m² [4, Stand 2009] erfordert nach Angabe verschiedener Studien einen Endenergiebedarf zwischen 800 GWh_{end}/a [5, Stand 2008]¹, 3.130 GWh_{end}/h [3, Stand 2005], 3.520 GWh_{end}/h [VDMA, Stand 2008] bis sogar 5.540 GWh_{end}/a [4, Stand 2009]. Dies entspricht einem spezifischen Endenergiebezug für Klimakälte von 10 bis 20 kWh_{end}/(m²_{NGFA}) [2, Stand 2008 und 4, Stand 2009]. Der elektrische Endenergiebedarf beträgt davon rund 85 % [2, Stand 2008].

Für die Klimatisierung des gesamten GHD-Sektors werden nach unterschiedlichen Erhebungen folgende Werte für den jährlichen Endenergiebedarf angegeben: 2,6 TWh_{end} [6, Stand 2010], 15,0 TWh_{end} [7, Stand 2005], 15,6 TWh_{end} [8, Stand 2008], 17,8 TWh_{end} [9, Stand 2005] und 20,8 TWh_{end} [4, Stand 2009].

Viele Studien prognostizieren weiterhin einen Anstieg des Energiebedarfs für die Gebäudekühlung in Deutschland und auch in Europa. Die Autoren einer gemeinsamen Studie von Prognos und Öko-Institut [9] gehen davon aus, dass spätestens ab 2015 alle errichteten Neubauten im GHD-Sektor mit Klimaanlage ausgerüstet und auch im Bestand in erheblichen Maße Nachrüstungen erfolgen werden. Andere Studien erwarten für Geschäfts- und Bürogebäude voraussichtlich bis 2020 sogar einen Anstieg der Kühlung auf 70 % des Gebäudebestandes [3], [4]. Begründet wird dies mit einem verstärkten Auftreten heißer Sommer und der zunehmenden Ausstattung von Dienstleistungsgebäuden.

Unter Annahme eines Referenzszenarios mit moderaten Effizienzsteigerungen und einer Weiterführung der bisherigen Klima- und Energiepolitik wird ein Anstieg des Endenergieverbrauchs für Kühlen und Lüften im GHD-Sektor bis 2020 auf 19 bis 35 TWh_{end} [4] bzw. bis 2050 um 300 % auf rund 53 TWh_{end} prognostiziert [9]. Nur mit einem strategischen Maßnahmenbündel (Passivhausstandard für Neubau und Sanierung ab 2020, Verdopplung der Sanierungsrate, energieeffiziente Klima- und Lüftungsanlagen, Austausch bzw. Bedarfsanpassung von Bestandsanlagen) könnte dieser Anstieg bis 2050 auf ca. 21 TWh_{end} begrenzt werden [9].

Diese Szenarien liegen deutlich über den Prognosen der internationale Studien EERAC und EECCAC aus den Jahren 1999 und 2003 [3], [10], die für Deutschland eine Erhöhung des Energiebezugs für Kühlung auf 7,4 TWh_{end}

¹ Endenergiebezug für büroähnliche Betriebe.

im Jahr 2020 und 13,8 TWh_{end} im Jahr 2050 annahmen. Für Europa prognostizierten diese Studien eine Vervielfachung der klimatisierten/gekühlten Gebäudefläche zwischen 1990 und 2020 [3], [10], Bild 1. Für den Endenergiebedarf zur Klimatisierung/Kühlung von Gebäuden in den EU-15 Staaten (Stand 2003) wird vom Jahr 2010 ausgehend ein Anstieg um 20 % bis zum Jahr 2020 angenommen. Eine EU-Studie [11] geht sogar von einer Steigerungsrate für Energie für Kälte von 3,9 % pro Jahr zwischen 2000 und 2030 aus.

Technologien und Konzepte zur Minderung bzw. Vermeidung des Energiebedarfs für die Kühlung von Nichtwohngebäuden sind bekannt und werden erfolgreich in Sanierungsvorhaben und Neubauten für Niedrigenergiegebäude eingesetzt. Mit einem energieoptimierten Gesamtkonzept aus Architektur, Bauphysik und Gebäudetechnik weisen diese Gebäude einen deutlich geringeren Kühlbedarf auf. Dieser ist erreichbar durch eine gut gedämmte und dichte Gebäudehülle, konsequent begrenzte solare Lasten (Sonnenschutzsysteme), eine effektive hygienische Lüftung mit Wärmerückgewinnung, ausreichend thermische Gebäudespeicherkapazität und begrenzte interne Lasten (effiziente Bürogeräte, Tageslichtnutzung). Somit können diese Gebäude bei vergleichbarem Arbeitsplatzkomfort auf eine Vollklimatisierung und den Einsatz von Kältemaschinen zu Gunsten von Umweltenergie aus dem Erdreich, dem Grundwasser oder der Außenluft verzichten.

Unter dem europäischen Programm Intelligent Energy for Europe (IEE) fanden sich acht europäische Partner zusammen, um im Rahmen des Projektes ThermCo [12] Lüftungs- und Kühlenergiekonzepte für Nichtwohngebäude mit niedrigem Energieeinsatz im Hinblick auf die Energieeffizienz und den thermischen Raumkomfort zu bewerten. Die Analyse erfolgte auf Basis von detaillierten Langzeitmessungen über ein Betriebsjahr in acht Demonstrationsgebäuden in unterschiedlichen klimatischen Zonen Europas und einer standardisierten Datenauswertung (vorliegender Teil 1). Im Quervergleich aller acht Gebäude werden die Kühlkonzepte gleichermaßen nach dem thermischen Kühlenergiebezug, dem thermischen Raumkomfort und dem Primärenergieeinsatz für die technische Gebäudeausrüstung und die Beleuchtung bewertet. Ein Energiekon-

zept ist erst dann zufriedenstellend, wenn mit möglichst geringem Energieeinsatz und bei hoher Anlageneffizienz ein guter thermischer Raumkomfort zur Verfügung gestellt werden kann. Mit entsprechenden Gebäudesignaturen werden diese Parameter in einen Zusammenhang gebracht und die Zielstellung überprüft. Detaillierte Komfortuntersuchungen nach der europäischen Komfortnorm DIN EN 15251:2007-08 [13] geben Hinweise auf die Wirksamkeit der eingesetzten Kühltechnologien in den jeweiligen Klimazonen. Daraus lassen sich Handlungsempfehlungen ableiten.

Weiterhin wurden mittels Simulationsrechnungen fünf Lüftungs- und Kühlenergiekonzepte für jeweils sechs Referenzstandort in nord-, mittel- und südeuropäischen Klimazonen anhand eines standardisierten Gebäudemodells untersucht und bewertet (Teil 2). Im Ergebnis stehen für Konzepte in den jeweiligen Klimazonen Kennzahlen für den thermischen Kühl- und dem damit einhergehenden elektrischen Endenergiebezug zur Verfügung. Weiterhin werden die Konzepte hinsichtlich des thermischen Raumkomforts bewertet.

2 Gebäude- und Energiekonzepte

Die neuen und sanierten europäischen Nichtwohngebäude weisen unterschiedliche architektonische und planerische Ansätze auf. Allen gemein ist jedoch das Ziel, den Kühlenergiebezug durch passive Technologien (Reduzierung der solaren Lasten durch Sonnenschutzsysteme, kontrollierte Lüftung, thermische Gebäudespeichermasse) und durch Nutzung von natürlichen Umweltwärmesenken deutlich zu senken – dabei aber die Anforderungen an den thermischen Raumkomfort zu gewährleisten. Bis auf das dänische Gebäude, können die Nutzer Fenster öffnen/schließen, den Sonnenschutz manuell bedienen und ihre Kleidung den Umgebungstemperaturen anpassen. Informationen zum Heiz- und Kühlkonzept der untersuchten Gebäude sind in Tabelle 1 zusammengefasst und schematisch in Bild 1 dargestellt. Die nachfolgend diskutierten Ergebnisse zum thermischen Raumkomfort basieren auf einjährigen Monitoringkampagnen mit hoher Messwertauflösung (Raumtemperatur, Raumfeuchte und Außenklima am Gebäudestandort).

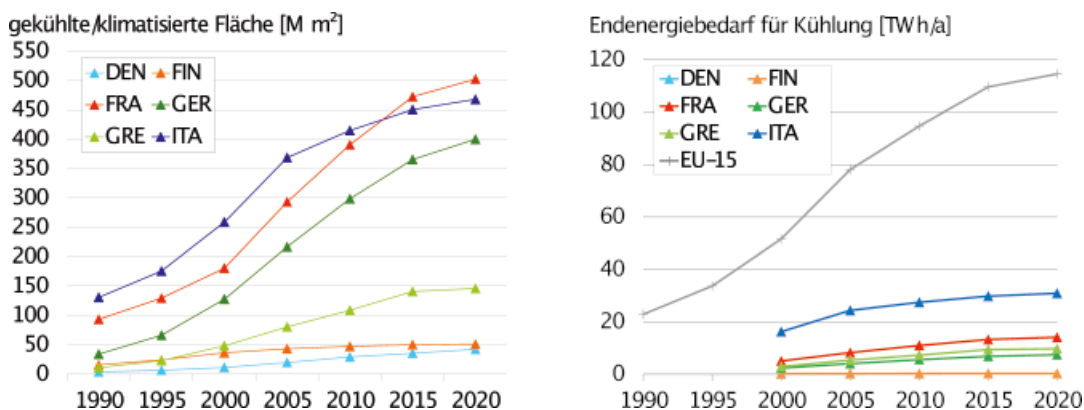


Bild 1. Klimatisierte Flächen [Million m²] (links) und Endenergiebedarf für Klimatisierung/Kühlung [TWh_{end}/a] in ausgewählten europäischen Ländern und der EU-15 (rechts) [3]

Fig. 1. Area conditioned [million m²] (left) and end energy use for air-conditioning/cooling [TWh_{end}/a] in chosen European countries and the EU-15 (right) [3]

Tabelle 1. Informationen zur Bauphysik und zum Heiz- und Kühlkonzept der untersuchten Gebäude. Zusätzlich beschrieben ist das Gebäudesimulationsmodell für ein typisches Niedrigenergiegebäude (SIM), s. Abschn. 4 und Teil 2 dieser Veröffentlichung. Die grau hinterlegten Felder kennzeichnen die eingesetzten Technologien.

Table 1. Information of the building physics and the heating and cooling concept of the buildings investigated. Additionally given is the description of the simulation model for a typical low-energy office building (SIM), see section 4 and part 2 of this publication. The grey fields indicate the technologies applied.

Gebäude	Bauphysik							Übergabe				Kälteerzeugung / Wärmesenke				Lüftung					
	beheizte Grundfläche [m ²]	U-Wert Außenwand [W/(m ² K)]	U-Wert Fenster [W/(m ² K)]	AV Verhältnis [m ⁻¹]	Verglasungsanteil Fassade [%]	Verschattung ⁴	Referenzraum ⁵	Konvektor	FBT	DKP/DHP	Radiator	Luft	Kältemaschine / rev. WP	Fernkälte	Splitgeräte	Erreich	Außenluft	frei ¹	maschinell	Nachtlüftung ³	WR [%] ²
CZE	230	0,2	1,2	k.A.	k.A.	i	1					k								f	
DEN	21.199	0,2	1,12	0,3	30–60	i	3					h+k						-		nein	70
FIN	6.900	0,22	1,1	k.A.	k.A.	i+a	12					h+k								k.A.	80
FRA	3.900	0,43	2,2	0,1	40	i	9													f	55
GER	1.390	0,3	1,4	0,27	20–87	a	3 ^x					h+k								f	68
GRE	1.000	0,25	2,7	0,7	20–81	i+a	9					h+k								f+m	
ITA	752	0,34	1,4	0,6	20	a	3					h+k								f+m	52
ROU	634	0,82	2,5	0,32	30–40	a	4					k								f	
SIM	b	0,24	1,8	0,4	35	a	3	Simulation und Bewertung unterschiedlicher Wärmesenken, Kälteübergabe- und Lüftungssysteme													

¹ offene Fenster in Räumen, ² Wärmerückgewinnung (WR) [%], ³ freie (f) bzw. maschinelle (m) Nachtlüftung, ⁴ außen liegende Verschattung (a), innen liegende Verschattung (i), k.A. keine Angabe, ⁵ Anzahl der vermessenen Referenzräume zur Untersuchung des thermischen Raumkomforts, gekühlte (k) bzw. erwärmte (h) Zuluft, Fußbodentemperierung (FBT), Deckenkühl-/heizpaneel (DKP, DHP) ^x 1 Großraum- und 2 Zweipersonenbüros, ^b simuliert wird ein Gebäudeausschnitt.

Lüftungskonzept

Während der Anwesenheitszeit der Nutzer werden alle Gebäude (bis auf das dänische Gebäude) manuell über Fenster belüftet. Die meisten Gebäude haben zusätzliche eine maschinelle Lüftungsanlage. In den Gebäuden mit einer Zu- und Abluftanlage wird die Zuluft in der Regel etwas gekühlt. Alle Gebäude verzichten auf eine klassische Klimatisierung mit Luftentfeuchtung.

Kühlkonzept

Neben dem Einsatz von passiven Maßnahmen zu Sicherstellung des sommerlichen Wärmeschutzes, nutzen die meisten Gebäude freie und/oder maschinell unterstützte Nachtlüftung zur Kühlung der Büroräume. Das deutsche und italienische Gebäude wird in Kombination mit dem Nachtlüftungskonzept auch aktiv über einen Direktbetrieb von Erdwärmesonden gekühlt. Die Kälteübergabe im Raum erfolgt mittels Flächenkühlung (GER) bzw. über die Zuluft (ITA). In Zeiten einer erhöhten Bedarfsanforderung steht bei den Gebäuden in Athen und Bukarest neben der Nachtlüftung auch eine aktive Kälteerzeugung mit Splitgeräten zur Verfügung. Die zwei Demonstrationsgebäude in Nord-europa nutzen eine aktive Kältebereitstellung durch Kompressionskältemaschine (DEN) bzw. Fernkälte (FIN). Die Kälteübergabe in den Büroräumen erfolgt in beiden Gebäuden über Flächenkühlung und über die Zuluft.

3 Thermischer Raumkomfort

Thermischer Raumkomfort in Nichtwohngebäuden wird anhand der europäischen Richtlinie DIN EN 15251:2007-08 [13] bewertet, die gemäß dem implementierten Kühlkonzept zwei Komfortmodelle definiert:

Adaptiv

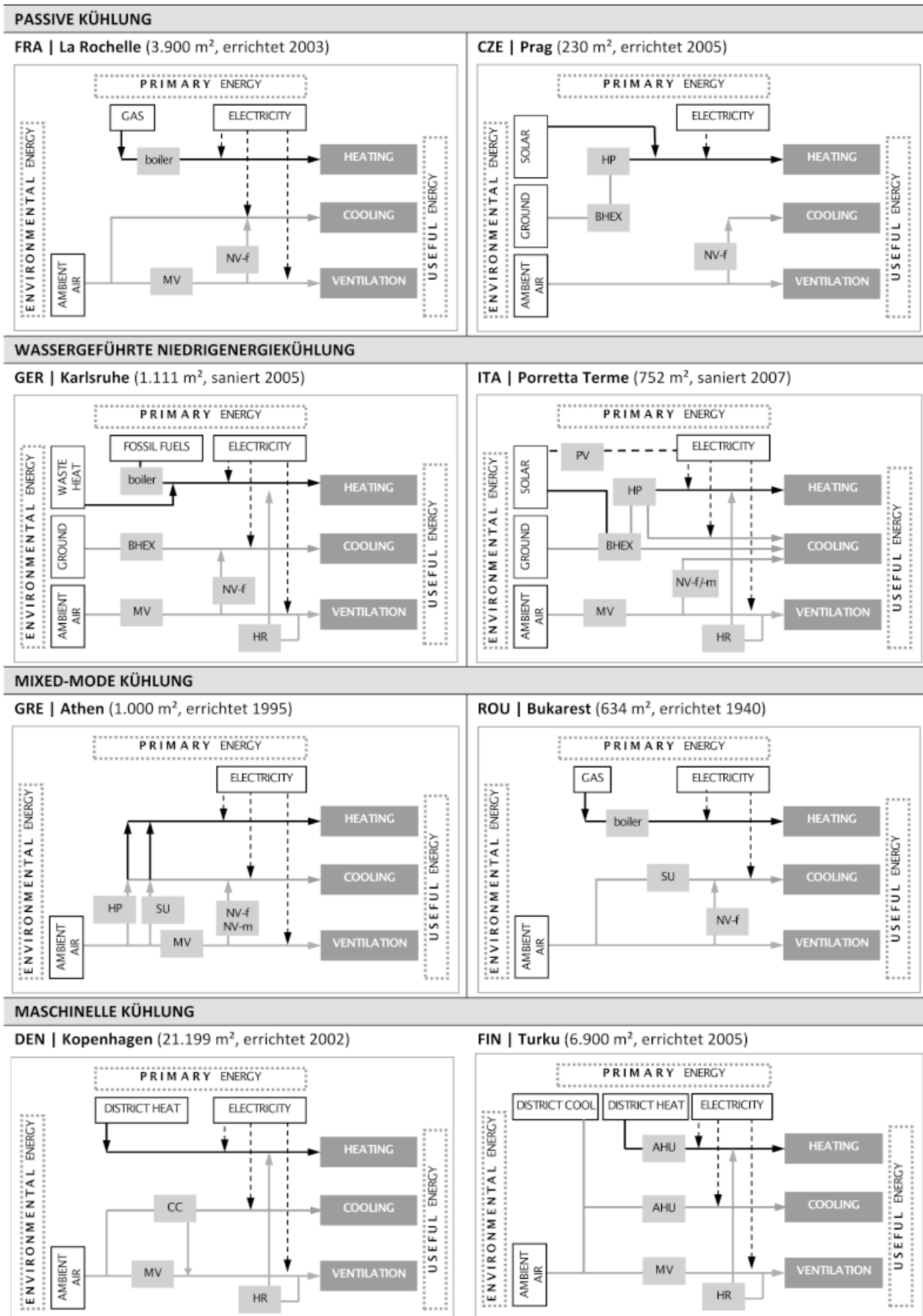
Gebäude ohne maschinelle Kühlung werden mit einem adaptiven Komfortmodell bewertet, welches sowohl Änderungen des Außenklimas als auch die Einflussnahme des Nutzers auf seine unmittelbare Umgebung (z. B. durch Öffnen von Fenstern, Betätigung des Sonnenschutzes, keine Bekleidungsanforderung) berücksichtigt. Der geforderte Sollwert für die Raumtemperatur bestimmt sich in Abhängigkeit des gleitenden Tagesmittels der Außentemperatur für drei definierte Komfortklassen (s. Bild 6, Komfortgrafik).

PMV

Gebäude, die durch Klimaanlage aber auch durch thermoaktive Bauteilsysteme aktiv konditioniert werden, sollten entsprechend dem PMV-Komfortmodell nach der DIN ISO 7730:2005 festgelegte Raumtemperatursollwerte, unabhängig von den Außentemperaturbedingungen, einhalten (s. Bild 6, Komfortgrafik).

Gemäß der definierten Komfortnorm berücksichtigt die standardisierte Auswertung der Messkampagnen in den acht europäischen Gebäuden folgende Randbedingungen:

- **Gebäudekategorie** Die Gebäude mit ihrem jeweiligen Kühlkonzept lassen sich nicht ohne weiteres einem Komfortmodell zuordnen. Die meisten Gebäude nutzen ein Nachtlüftungskonzept in Kombination mit einer aktiven bzw. unterstützenden Kühlung. Zudem stellen Kühlenergiekonzepte mit Nutzung von natürlichen Umweltsenken (z. B. direkte Kühlung mittels oberflächennaher Geothermie) für das mitteleuropäische Klima zwar eine energieeffiziente Lösung dar, können aber aufgrund von Systemträgheiten und systembedingten Temperaturen keine stringenten Raumtemperatursollwerte analog



maschinelle Lüftung (MV), freie Nachtlüftung (NV-f), maschinelle Nachtlüftung (NV-m), Wärmerückgewinnung (HR), Lüftungsgerät (AHU), Wärmepumpe (HP), Erdwärmesonde (BHEX), Kompressionskältemaschine (CC), Photovoltaik (PV), Splitgerät (SU)

Bild 2. Heiz-, Kühl- und Lüftungskonzept für die Demonstrationsgebäude
 Fig. 2. Heating, cooling, and ventilation concept of the demonstration buildings

des PMV-Komfortmodells gewährleisten. Weiterhin kann der Nutzer (bis auf das Geb. DEN) sowohl aktiv in seine Umgebung einreifen (Öffnen und Schließen von Fenstern und Sonnenschutz) als auch seine Kleidung den Umgebungstemperaturen entsprechend anpassen. Unter der Prämisse des energieeffizienten Kühlens mit möglichst geringem Kühlenergieeinsatz werden die vorgestellten Demonstrationsgebäude CZE, FRA, ITA, GER, GRE und ROU nach dem adaptiven Komfortmodell bewertet. Die zwei Gebäude (DEN, FIN) mit aktiver Kühlung (Kompressionskältemaschine und Fernkälte) sowie Kälteübergabe mittels Kühldecken und Zuluft werden nach dem PMV-Komfortmodell bewertet.

- *Nutzungszeiten* Der thermische Raumkomfort wird ausschließlich während der Anwesenheitszeit der Nutzer bewertet – werktags von 8:00 bis 19:00 Uhr, Bild 3. Feiertage und Urlaubszeiten werden nicht gesondert berücksichtigt.
- *Gebäudefläche* In den untersuchten Gebäuden wurden repräsentative Büroräume (Tabelle 1) vermessen, die zur Bewertung des thermischen Komforts im Gebäude herangezogen werden.
- *Saisonale Bewertung* Die Bewertung des thermischen Raumkomforts, d.h. die Überschreitungshäufigkeit der definierten Komfortklassen I bis III, erfolgt für die gesamte Sommerperiode und nicht auf Tages- oder Wochenbasis.
- *Definition Sommerperiode* Die Komfortnorm DIN EN 15251:2007-08 ist nicht konsistent in der Unterteilung zwischen Winter- und Sommerperiode, d.h. die Definition der Komfortgrenzen für Winter- und Sommer- bzw. Heiz- und Kühlperiode folgt für das adaptive und das PMV-Komfortmodell jeweils nach einem anderen Ansatz. Im PMV-Komfortmodell nach Fanger bestimmt der Bekleidungsgrad (clo) des Nutzers die jeweilige Periode (Winter 1,0 clo und Sommer 0,5 clo). Das adaptive Komfortmodell definiert obere Komfortgrenzen in der Som-

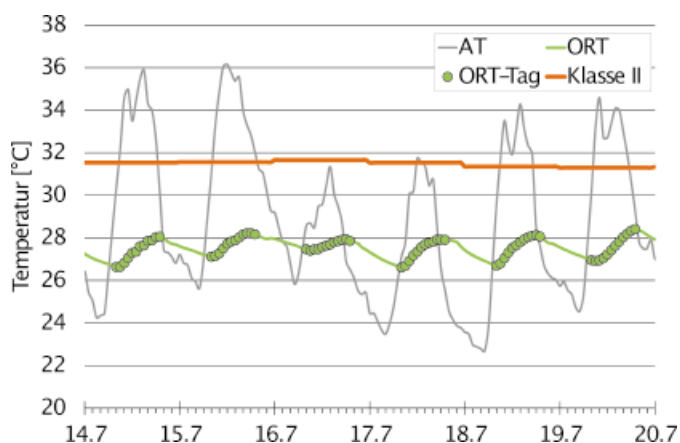


Bild 3. Gebäude GRE: stündlich gemessene Raumtemperatur (ORT), Raumtemperaturwerte während der Anwesenheitszeit der Nutzer (ORT-Tag), Außentemperatur (AT) und Sollwerte für die Komfortklasse II gemäß adaptivem Komfortmodell nach DIN EN 15251:2007-08

Fig. 3. Building GRE: Hourly measured room temperatures, room temperature values during the occupancy, ambient air temperature, and set point temperature for comfort class II according to the adaptive comfort approach of DIN EN 15251:2007-08

merperiode für eine gleitende Außenmitteltemperatur von 10 bis 30 °C und untere Komfortgrenzen für einen Temperaturbereich von 15 bis 30 °C. Unterschiedliche Studien auf Basis von Nutzerbefragungen und Messungen zeigen einen deutlichen Zusammenhang zwischen dem Bekleidungsgrad von Nutzern in Büroräumen und dem Tagesmittel bzw. gleitendem Tagesmittel der Außentemperatur. Niedrige Tagesmittel der Außentemperatur korrelieren mit clo-Werten von 0,7 bis 1,0 und erhöhte bzw. hohe Tagesmittel der Außentemperatur mit clo-Werten von 0,5 bis 1,0 – ein Bekleidungsgrad von clo 0,7 (typische Bürokleidung mit langem Hemd, aber ohne Jacke) entspricht in etwa einem Tagesmittel der Außentemperatur von 15 °C. Für die Unterscheidung von Winter- zu Sommerperiode wurde somit ein gleitender Tagesmittelwert für die Außentemperatur von 15 °C festgelegt.

- *Toleranzbereich der Komfortbewertung* In den Büroräumen weicht die gemessene Raumtemperatur während der Anwesenheitszeit der Nutzer in der Sommerperiode um nicht mehr als 5 % von den Grenzwerten der entsprechenden Kategorie I bis III ab.
- *Nutzerbefragung und Nutzereinfluss* In einigen Gebäuden wurden von den entsprechenden Projektteams während der Raumtemperaturmessungen auch Nutzerbefragungen durchgeführt. Die Methodik der Befragung, die Fragebögen und die Auswertung der Ergebnisse sind für die einzelnen Gebäude nicht direkt vergleichbar. Aufgrund dessen erfolgt die Bewertung des thermischen Raumkomforts ausschließlich auf Basis der Langzeitmessungen. Darüber hinaus wird in dieser Arbeit nicht diskutiert, ob die in der Komfortnorm DIN EN 15251:2007-08 definierten Komfortstandards die Zufriedenheit der Nutzer mit den thermischen Bedingungen am Arbeitsplatz hinreichend gut abbilden. Somit wurde das Nutzerverhalten am Arbeitsplatz in Bezug auf das Öffnen der Fenster, Betätigung des Sonnenschutzes und der Bekleidung nicht dokumentiert.
- *Komfortklasse für thermischen Raumkomfort* Der Raumkomfort wird entsprechend der definierten oberen und unteren Komfortklassen I bis IV bewertet (Klasse I – hohes Maß an Erwartung, Klasse II – normales Maß an Erwartung, Klasse III – annehmbares, moderates Maß an Erwartung und Klasse IV – Werte außerhalb der definierten Komfortkategorien).
- *Komfortklasse für Raumfeuchtekomfort* Die Bewertung der Raumfeuchte erfolgt ebenfalls nach den definierten Komfortklassen I bis III der DIN EN 15251:2007-08. Dabei ist zu berücksichtigen, dass diese Grenzwerte eigentlich für die Auslegung von Klimaanlage mit Entfeuchtungseinrichtung definiert wurden.
- *Ergebnisdarstellung* Die Ergebnisse der Messkampagnen werden in einer Komfortgrafik und in einem thermischen „Fußabdruck“ dargestellt. In der Komfortgrafik wird gemäß dem geforderten Komfortmodell die mittlere, stündlich gemessene Temperatur der Referenzräume über dem gleitenden Mittel der Außentemperatur dargestellt. Zusätzlich zeigt die Grafik die Raumtemperaturgrenzwerte der Klassen I bis III. Der thermische „Fußabdruck“ zeigt die prozentuale Anwesenheitszeit im Sommer, an der das Gebäude die oberen Grenzwerte der thermischen Komfortkategorien I bis III einhält.

In Bild 6 sind die Ergebnisse der Analyse des sommerlichen thermischen Komforts zusammengefasst. In den meisten dieser Gebäude werden die Komfortkriterien der Kategorie II nach DIN EN 15251 während 95 % der Nutzungszeit nicht überschritten. Kategorie II bedeutet ein „normales Maß an Erwartungen, empfohlen für neue und renovierte Gebäude“.

Zentral Ergebnisse der Komfortanalyse

Die zentralen Ergebnisse der Komfortanalyse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- **Passive Kühlung** Die Gebäude CZE und FRA erreichen während 98 bzw. 95 % der Anwesenheitszeit die Komfortklasse II. Die definierten Raumtemperatursollwerte für die Komfortklasse II und III werden nur an sehr wenigen Stunden überschritten. In der Übergangsjahreszeit und in kühlen Sommerperioden (Tagesmittel der Außentemperatur zwischen 15 und 17 °C) ist eine Unterschreitung der unteren Komfortgrenzen zu beobachten. Die Kühlung erfolgt in beiden Gebäuden mittels freier Nachtlüftung über Fenster und Lüftungsklappen, ohne die Möglichkeit, auf eine gewünschte Raumtemperatur zu regeln. Minimale Raumtemperaturen von 20 bis 21 °C werden jedoch kaum unterschritten. Im Vergleich zu den anderen Gebäuden schwanken die Raumtemperaturen stärker über der Anwesenheitszeit; im Mittel bis zu max. 3 Kelvin (Bild 4).
- **Wassergeführte Niedrigenergiekühlung** Im deutschen und im italienischen Gebäude erfolgt die Bereitstellung von Kälte über den Direktbetrieb des Erdwärmesondenfeldes und unterstützend durch ein Nachlüftungskonzept. Der Raumkomfort entspricht während 95 % der Anwesenheitszeit den geforderten Raumtemperaturen nach dem adaptiven Komfortmodell. Deutlich ist in beiden Gebäuden die Unterschreitung der unteren Komfortgrenzen – auch zu Zeiten erhöhter Außentemperaturen. Diese Raumtemperaturen können nach Annahmen des Komfortmodells vom Nutzer als „zu kalt“ und damit als unbehaglich empfunden werden. Durch eine außen- und raumtemperaturgeführte Regelung lässt sich die Unterschreitung der Komfortgrenzen vermeiden. Zudem wird auch der erforderliche thermische Nutzenergieaufwand reduziert.

- **Mixed-Mode Kühlung** Die Gebäude GRE und ROU werden vorrangig und wenn möglich mittels Nachtlüftung gekühlt. In Zeiten erhöhter Bedarfsanforderungen wird unterstützend über dezentrale Kühlaggregate gekühlt. Das Monitoring in den Gebäuden erlaubt es leider nicht, die Referenzräume nach Betriebszeiten und den jeweiligen Betriebsmodi (Nachtlüftung und/oder aktive Kühlung) zu analysieren. Auch zu Zeiten mit hohen Außentemperaturen (gleitendes Tagesmittel zwischen 26 und 32 °C) liegen die gemessenen Raumtemperaturen innerhalb der geforderten Komfortgrenzen. Über die gesamte Sommerperiode werden die Komfortanforderungen Klasse II während 95 % (ROU) bzw. 98 % (GRE) der Anwesenheitszeit erreicht.
- **Maschinelle Kühlung** Der thermische Raumkomfort in den nordeuropäischen Gebäuden erfüllt zu 94 bzw. 98 % der Anwesenheit die Komfortklasse II nach dem PMV-Komfortmodell, d. h. die Raumtemperaturen liegen in der Regel unter 26 °C und sind nur sehr geringen Tagesschwankungen unterworfen (Tagesamplitude der Raumtemperaturen zwischen 0,8 und 1,5 Kelvin). In diesen Gebäuden erfolgt die Bereitstellung von Kälte mittels aktiver Kompressionskälteerzeugung (DEN) bzw. Fernkälte (FIN).

4 Bewertung des Gesamtkonzepts

Heiz- und Kühlenergiekonzepte müssen gleichermaßen nach dem Energiebezug, der Energieeffizienz und dem thermischen Raumkomfort bewertet werden, um eine nachhaltige Energieversorgung und hohe Nutzerzufriedenheit zu gewährleisten. Ein Energiekonzept ist erst dann zufriedenstellend, wenn mit möglichst geringem Energieeinsatz und bei hoher Anlageneffizienz ein guter thermischer Raumkomfort zur Verfügung gestellt werden kann. Mit entsprechenden Gebäudesignaturen können diese Qualitätskriterien für Gebäude- und Energiekonzepte – Energiebezug, Energieeffizienz und thermischer Raumkomfort – in einen Zusammenhang gebracht und die Zielstellung aus der Planung überprüft werden. Das grüne Viereck in Bild 6 stellt die Zielwerte für die jeweiligen Parameter dar. Die orangefarbenen Vierecke (Bild 6) verdeutlichen die jeweilig gemessenen Energiekennzahlen und den Raumkomfort. Für

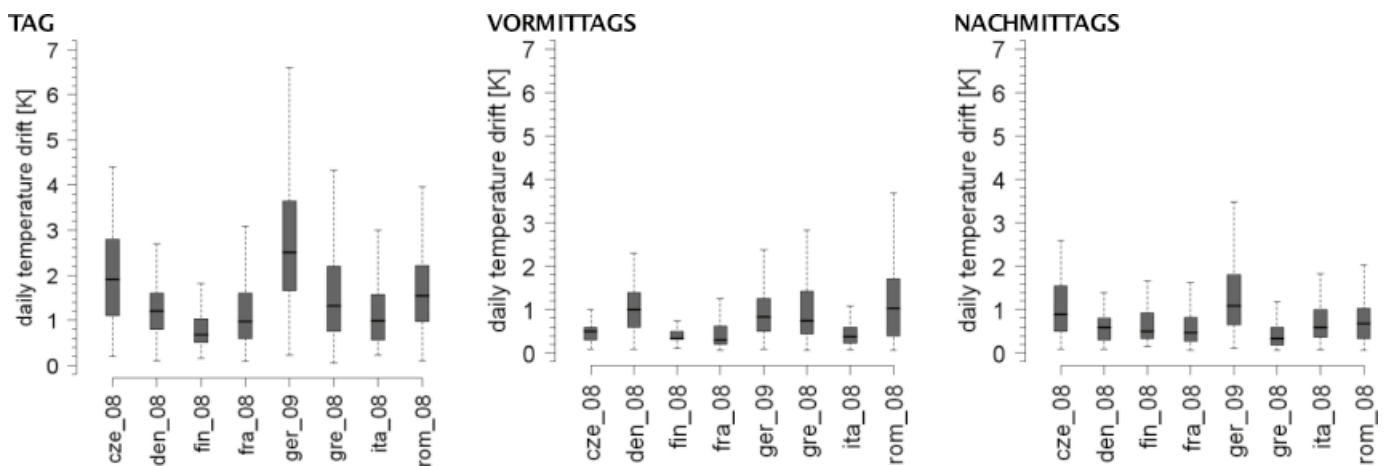


Bild 4. Gemessene Temperaturschwankungen im Sommer während der Anwesenheitszeit [K]; ganztägig, vormittags, nachmittags

Fig. 4. Measured temperature drifts in summer during occupancy [K], entire day, morning hours, and afternoon hours

ein möglichst optimal ausgelegtes und betriebenes Kühlkonzept werden folgende Zielwerte definiert:

- **Thermischer Raumkomfort** Das Gebäude erreicht einen thermischen Raumkomfort der Komfortklasse I (Geb. ITA, FIN und DEN), II (Geb. GER, FRA, CZE, ROU) bzw. III (Gebäude GRE) nach dem adaptiven bzw. PMV-Komfortmodell der DIN EN 15251:2007-08 (s. Abschn. 3). Die Sollwerte für die Raumtemperaturen bzw. die geforderte Komfortklasse wurden während der Planungsphase der jeweiligen Gebäude festgelegt. Angegeben wird die prozentuale Anwesenheitszeit in der definierten Komfortklasse. Die Ergebnisse basieren auf Langzeitmessungen. Es wird ausschließlich die Überschreitung der oberen Komfortklassen berücksichtigt.
- **Thermischer Kühlenergiebezug** Der erforderliche thermische Kühlenergiebedarf zur Gewährleistung des geforderten Raumkomforts ist abhängig von der Gebäudearchitektur und -physik, dem Nutzerverhalten und den klimatischen Bedingungen – sollte aber durch ein integrales Gebäude- und Energiekonzept im Vergleich zu vollklimatisierten Gebäuden deutlich reduziert werden. Mittels einer thermischen Simulationsrechnung wurde der Kühlenergiebedarf für ein typisches, dreigeschossiges Niedrigenergiegebäude in Nord-Südausrichtung mit Büronutzung für sechs europäische Standorte berechnet (Teil 2). Das Gebäudemodell ist in Kürze in Tabelle 1 bzw. in Teil 2 dieser Veröffentlichung beschrieben. Der berechnete Kühlenergiebedarf für Gebäudestandorte in Nord-, Mittel- und Südeuropa wird als Zielwert für die untersuchten Gebäude herangezogen. Bild 5 zeigt, dass der berechnete Kühlenergiebedarf von Nord- nach Südeuropa aufgrund höherer Außentemperaturen und – zu einem geringen Maße – höherer Solareinstrahlung von rund 22 bis 55 kWh_{therm}/(m²a) zunimmt. Die Aufrecht-

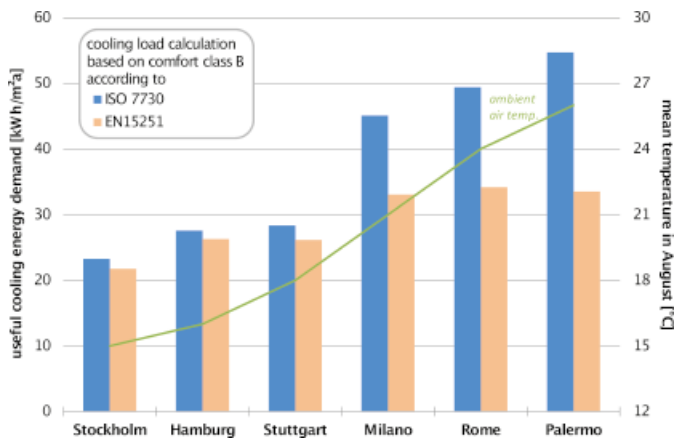


Bild 5. Berechneter, thermischer Kühlenergiebedarf [kWh_{therm}/m²a] für ein typisches Niedrigenergiegebäude mit Büronutzung für sechs europäische Standorte zur Gewährleistung des thermischen Raumkomfort nach Klasse II des PMV (blauer Balken) und des adaptiven Komfortmodells (oranger Balken) nach DIN EN 15251:2007-08; Zusätzlich dargestellt ist die mittlere Monatstemperatur im August [°C].

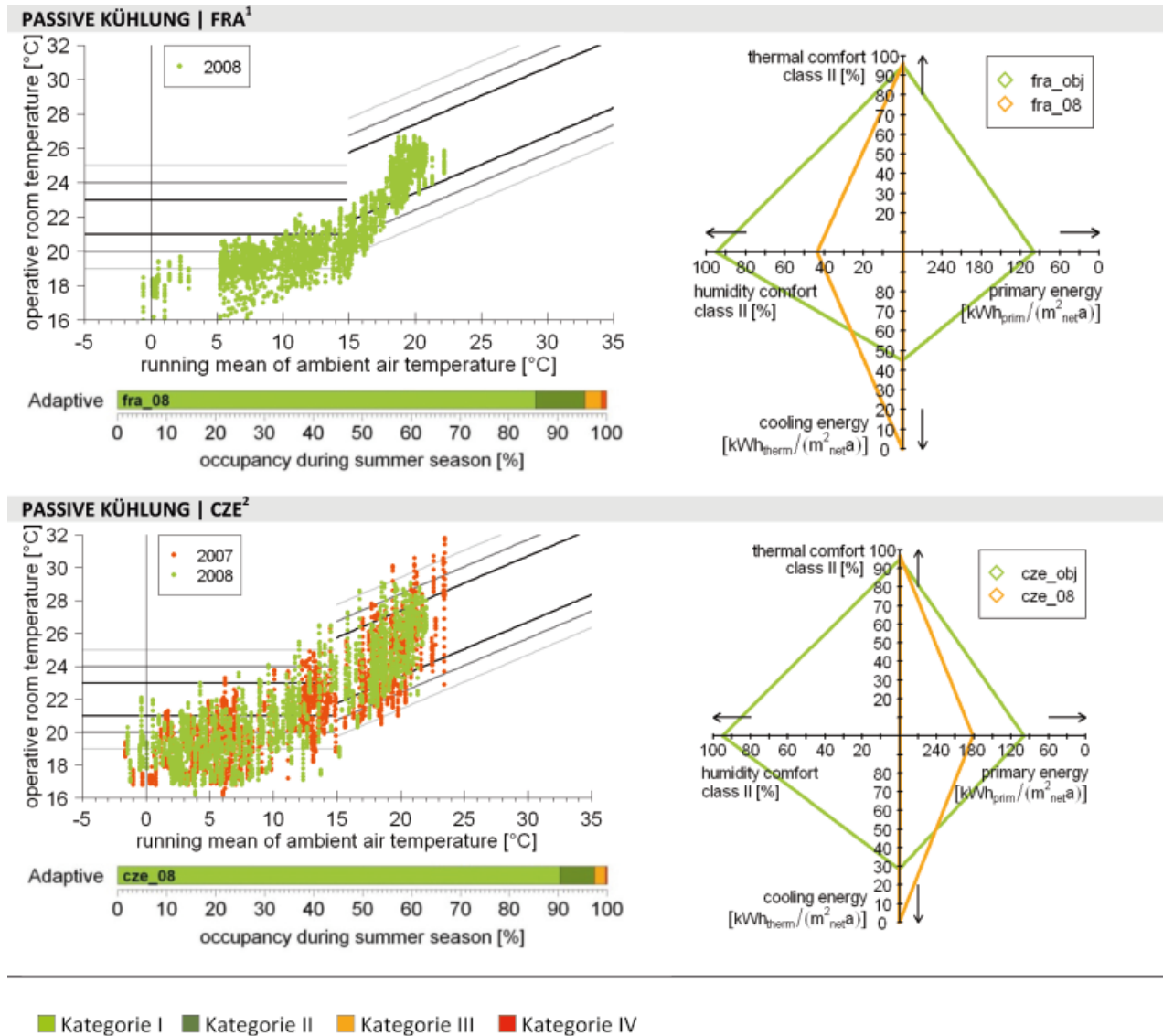
Fig. 5. Calculated, thermal cooling energy demand [kWh_{therm}/m²a] for a typical low-energy office building for six European locations required for achieving thermal comfort (class II) according to the PMV (blue bar) and adaptive comfort model (orange bar) of DIN EN 15251:2007-08

erhaltung des thermischen Raumkomfort für Klasse II nach dem PMV-Modell erfordert dabei einen um rund 10 % (Nordeuropa) bis zu 75 % (Südeuropa) erhöhten Bedarf im Vergleich zum adaptiven Komfortmodell. Die in Bild 6 dargestellten Ergebnisse zum Kühlenergiebezug der untersuchten Gebäude basieren auf Langzeitmessungen über ein Betriebsjahr bzw. beim griechischen Gebäude auf Simulationsrechnungen.

- **Raumfeuchte** Die Bewertung der Raumfeuchte erfolgt ebenfalls nach der definierten Komfortklasse der DIN EN 15251:2007-08. Dabei ist zu berücksichtigen, dass diese Grenzwerte für die Auslegung von Klimaanlage mit Entfeuchtungseinrichtung definiert wurden. Für alle Gebäude wird als Zielwerte die Komfortklasse II definiert – relative Raumfeuchte zwischen 25 und 60 %.
- **Primärenergiebezug** Der Quervergleich des Primärenergiebezugs der Gebäude erlaubt es, unterschiedliche Versorgungskonzepte wie zum Beispiel Nachtlüftung und aktive Kühlung mittels Kältemaschinen oder auch Fernkältesysteme miteinander zu vergleichen. Für den Primärenergiebezug des gesamten Gebäudes (Heizen, Kühlen, Lüften und Beleuchtung) wird ein Zielwert von 100 kWh_{prim}/(m²_{net}a) festgelegt. Der Energiebezug für Bürogeräte und Sondernutzung wird nicht berücksichtigt. Der Primärenergiefaktor für Strom beträgt 2,2 MWh_{prim}/MWh_{end} und für fossile Brennstoffe 1,0 MWh_{prim}/MWh_{end}.

Zentrale Ergebnisse des Quervergleichs

- Komfortanforderungen an Klasse II nach DIN EN 15251:2007-08 werden zu 90 bis 95 % der Anwesenheitszeit in der Sommerperiode in allen Bürogebäude erreicht.
- Auch zu Betriebszeiten mit erhöhten (Tagesmittel zwischen 20 und 26 °C) (GER, FRA, CZE) bzw. hohen Außentemperaturen (Tagesmittel zwischen 26 und 32 °C) (GRE, ROU, ITA) werden die Grenzwerte nicht oder nur selten an wenigen Stunden überschritten.
- Bei passiver Kühlung (hier freie Nachtlüftung) und Niedrigenergiekühlung unter Einsatz von Umweltwärmesenken steigen die gemessenen Raumtemperaturen mit der Außentemperatur; liegen aber zwischen den geforderten Grenzen von 24 bis 29 °C. Die Tagesamplituden der Raumtemperaturen bewegen sich im Mittel zwischen 0,8 und 2,5 K. Lediglich beim deutschen Gebäude treten aufgrund der erhöhten internen Lasten (Grafikerarbeitsplätze) Tagesamplituden der Raumtemperatur bis zu 3,8 Kelvin auf.
- Bei aktiver Kühlung mittels Kompressionskältemaschine bzw. Fernkälte (DEN und FIN) sind die gemessenen Raumtemperaturen nahezu konstant und schwanken nur geringfügig um 24 °C. Die Tagesamplituden der Raumtemperaturen liegen zwischen 0,8 und 1,5 K.
- In den untersuchten Nichtwohngebäuden wird während der Kühlperiode (insbesondere am Beginn der Sommerperiode) eine teilweise deutliche Unterschreitung der unteren Komfortgrenzen festgestellt. Dies trifft sowohl bei Anwendung des adaptiven als auch des PMV-Komfortmodells zu. Damit verbunden sind ein erhöhter thermischer Kühlenergieaufwand und unter Umständen Komforteinschränkungen. Betriebs- und Regelalgorithmen (z. B. Betriebszeiten, Vorlauftemperatur, Volumenströme) für die Kühlsysteme müssen die Raumtempera-



- 1 Gesamtprimärenergiebezug für Heizen, Kühlen, Lüften und Beleuchtung nicht bekannt. Kein Kühlenergiebezug; nur freie Nachtlüftung.
- 2 Messungen zur Raumluftfeuchte liegen nicht vor. Kein Kühlenergiebezug; nur freie Nachtlüftung.
- 3 Messungen zum thermischen Kühlenergiebezug liegen nicht vor.

Bild 6. Bewertung des Kühlkonzeptes hinsichtlich des thermischen Raumkomforts, des thermischen Kühlenergiebezugs und des Primärenergiebezugs für die Gewerke Heizen, Kühlen, Lüften und Beleuchten. (1) Komfortgrafik: Stündlich gemessene, operative Raumtemperatur [°C] aufgetragen über dem gleitenden Tagesmittel der Außentemperatur [°C] während der Anwesenheitszeit der Nutzer. (2) Thermischer Komfort-Fußabdruck: Prozentuale Anwesenheitszeit [%] an denen das Gebäude die Anforderungen der Komfortklasse I bis III erfüllt. (3) Gesamtheitliche Bewertung des Kühlenergiekonzeptes unter Berücksichtigung des thermischen Komforts und des Raumfeuchtekomforts (prozentuale Anwesenheitszeit innerhalb der Komfortklasse II), thermischer Kühlenergiebezug [kWh_{therm}/m²a] und Primärenergiebezug [kWh_{prim}/m²a]. Grün: Zielwerte, Orange: Messungen.

Anmerkung: Primärenergiefaktor Strom 2,2 kWh_{prim}/kWh_{end}
 Fig. 6. Evaluation of the cooling concept in terms of thermal comfort, thermal cooling energy use, and primary energy use for heating, cooling, ventilation and lighting. (1) Thermal comfort Fig.: hourly measured operative room temperature [°C] illustrated over the running mean of the ambient air temperature [°C] during the occupancy in the summer period. (2) Thermal comfort footprint: Exceedance of upper comfort boundaries during the time of occupancy in summer [%] for the buildings allocated to the proposed building categories I to III. The adaptive comfort approach according EN 15251:2007-08 is used for the buildings with passive, air-based mechanical, water-based mechanical and mixed-mode cooling. The PMV comfort approach is considered for the two buildings with air-conditioning. (3) Holistic evaluation of cooling concept considering the thermal comfort, humidity comfort (percentage of occupancy during comfort class II), thermal cooling energy use [kWh_{therm}/m²a], and primary energy use [kWh_{prim}/m²a]. Green: target values, orange: measurements.
 Note: primary energy factor for electricity is 2.2 kWh_{prim}/kWh_{end}

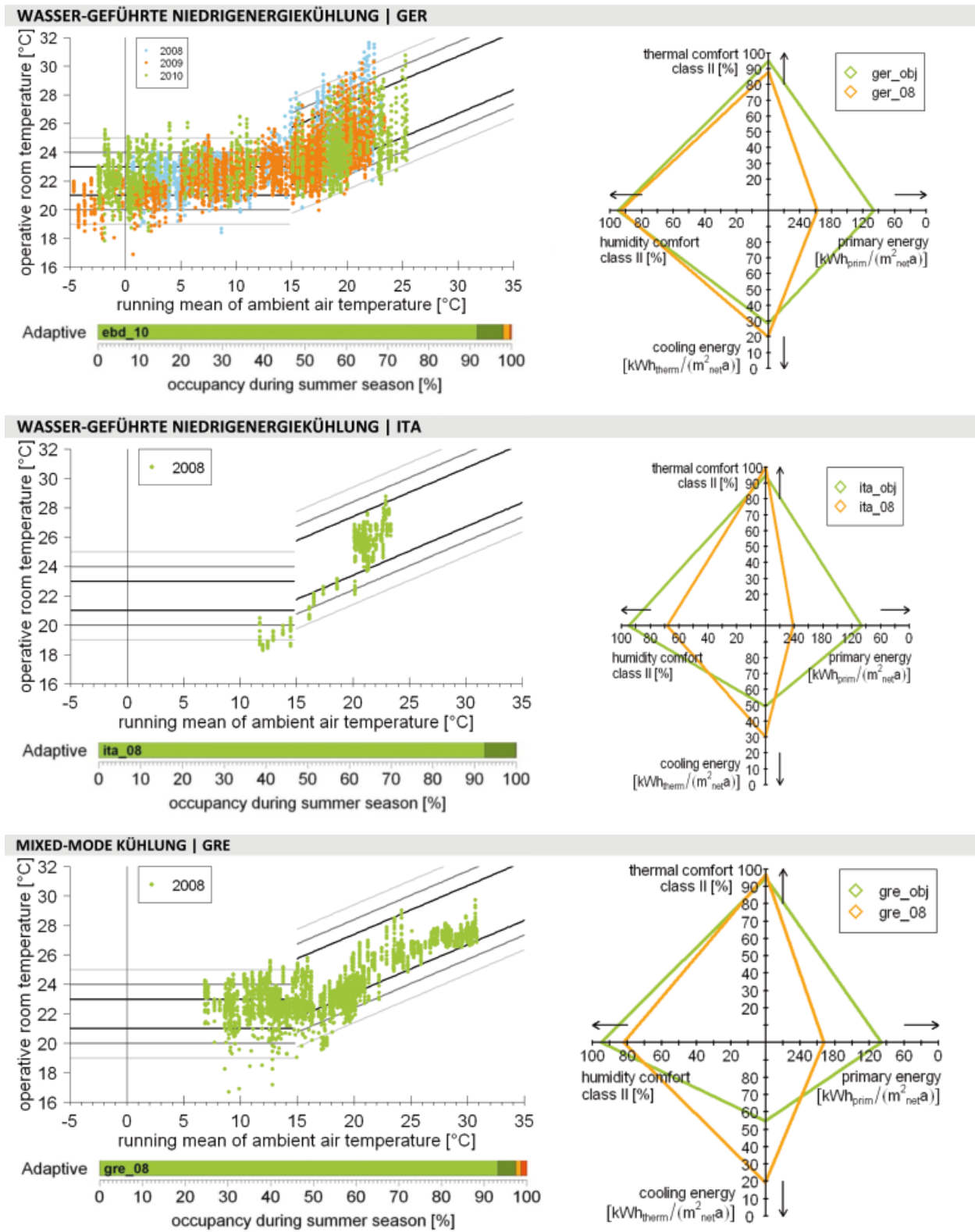


Bild 6. (Fortsetzung)
Fig. 6. (Continuation)

– tur der Büroräume oder ausgewählter Referenzräume für die jeweilige thermische Zone als Regelgröße berücksichtigen.

– Komfortanforderungen nach dem PMV-Modell erfordern einen deutlich höheren Kühlenergiebedarf im Vergleich zum adaptiven Modell und müssen in der Planungsphase festgelegt bzw. abgestimmt werden. Der Betrieb von effizienten Kühlsystemen mit Umweltener-

gie (Wärmesenke Luft, Erdreich, Grundwasser) erfordert eine gute und sorgfältige Planung, sowohl der Hydraulik als auch der thermischen Auslegung des Erdwärmesondenfeldes bzw. der Grundwasserbrunnenanlage. Falsche Annahmen in der Planung (z. B. ungestörte Erdreichtemperatur, zu geringe Entzugsleistung für Erdwärmesonden, verfügbare Fördermengen für Grundwasser) und Fehler bei der Dimensionierung führen zu unzureichen-

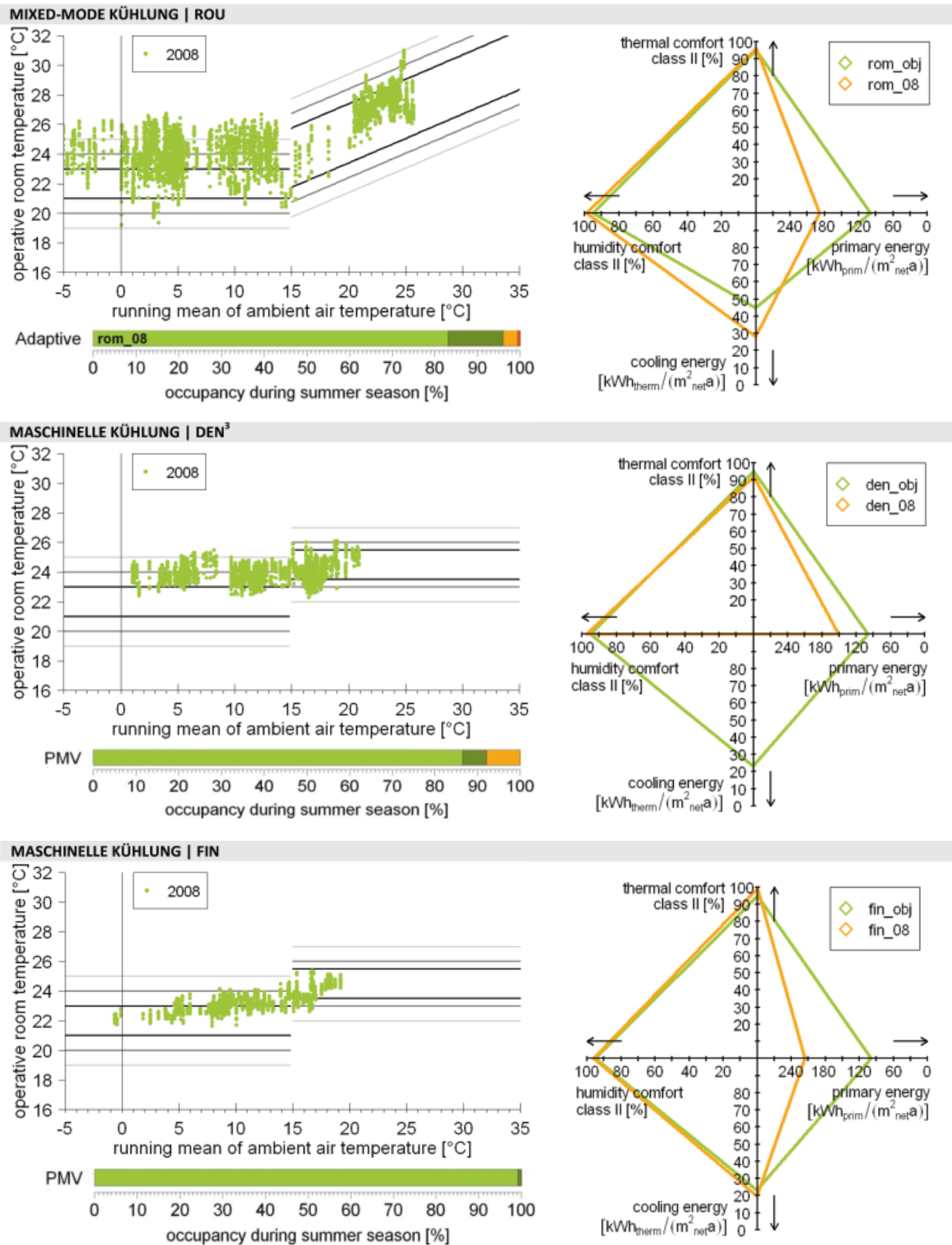


Bild 6. (Fortsetzung)
Fig. 6. (Continuation)

den Kühlleistungen und zu geringer Energieeffizienz, die im Betrieb der Anlage kaum kompensiert bzw. korrigiert werden können. Dann ist die Nachrüstung eines zusätzlichen Kälteerzeugers unumgänglich.

- Die Auswertung der Raumluftfeuchte zeigt, dass der Komfort für die Feuchte nach den Anforderungen der DIN ISO 7730:2006 in nord- und mitteleuropäischen

Gebäuden ohne Konditionierung der Zuluft in der Regel eingehalten werden kann. Zwischen 90 bis 98 % der Anwesenheitszeit wird die Komfortklasse II erreicht. In den feuchteren Klimaten sind die Raumtemperatur sowie die relative Feuchte an feuchtwarmen Tagen höher und die relative Feuchte liegt im Bereich des oberen Grenzwerts der Norm für bestehende Gebäude (Werte

- deutlich über 60 % rel. Luftfeuchte). Hier erscheint eine Entfeuchtung der Zuluft notwendig. Im Fall der Unterstützung durch eine Klimaanlage sollte die Abfuhr der sensiblen Kühllasten durch das Flächenkühlsystem erfolgen, um die Möglichkeit einer sehr effizienten Energiebereitstellung auszunutzen. Die Klimaanlage sollte daher primär nur den hygienischen Mindestluftwechsel gewährleisten und die Zuluft entsprechend den Anforderungen entfeuchten. Damit lässt sich der Energieaufwand deutlich reduzieren.
- In allen Gebäuden wurde der Zielwert für den thermischen Kühlenergiebedarf deutlich unterschritten. Messwerte liegen in den nord- und mitteleuropäischen Gebäuden bei rund $20 \text{ kWh}_{\text{therm}}/(\text{m}^2\text{a})$ und bei den südeuropäischen bei rund $30 \text{ kWh}_{\text{therm}}/(\text{m}^2\text{a})$. Mit einem abgestimmten Gesamtkonzept aus Architektur, Bauphysik und Kühlkonzept lässt sich der Aufwand für die Kühlung deutlich reduzieren – auch in den südeuropäischen Gebäuden.
 - Die Art (statisch bzw. beweglich) und Einsatz des Sonnenschutzes (Betätigung) haben einen entscheidenden Einfluss auf den thermischen Raumkomfort und den Kühlenergiebezug. Ist kein außen liegender, beweglicher Sonnenschutz vorgesehen, sollten die internen Lasten deutlich reduziert werden (geringe Personenbelegung und energieeffiziente Geräte).
 - Keines der Gebäude erreicht den gesetzten Zielwert der Primärenergie für Heizen, Kühlen, Lüften und Beleuchten von $100 \text{ kWh}_{\text{prim}}/(\text{m}^2\text{a})$ – die Messwerte liegen zwischen 140 und $240 \text{ kWh}_{\text{prim}}/(\text{m}^2\text{a})$.
 - Der Anteil der Kühlung am Primärenergiebezug liegt in Nord- und Mitteleuropa zwischen 5 und 15 %. Bei den südeuropäischen Gebäuden steigt der Anteil der Kühlung am Gesamtverbrauch auf 25 % bis 30 %. Bei allen Gebäuden – bis auf das griechische – dominiert der Anteil der Heizung.
 - Die Betriebserfahrungen und die systematische wissenschaftliche Auswertung zeigen, dass es in Planung, Ausführung und Betrieb noch Verbesserungsmöglichkeiten in Richtung einer besseren Ausschöpfung des Effizienzpotenzials gibt. Gerade bei Systemen mit Nutzung von Umweltenergie sind die richtige Auslegung des Gesamtsystems, eine korrekte Umsetzung auf der Baustelle und eine korrekte Betriebsführung von großer Wichtigkeit. Durch den sich stetig verringernden Bedarf und Verbrauch von Energie für die Gebäudetechnik bei Niedrigenergiegebäuden muss dem Hilfsenergieverbrauch für die Hydraulik von wassergeführten Systemen eine größere Bedeutung beigemessen werden (v. a. für Pumpen). Die Energie- und Effizienzanalyse der Messprojekte unterstreicht, wie wichtig die richtige Auslegung des Gesamtsystems ist, um das hohe Effizienzpotential von Energieversorgungskonzepten mit Umweltenergie wirklich auszuschöpfen. Ein abgestimmter und optimierter Betrieb unter Berücksichtigung von Energie, Effizienz und Arbeitsplatzkomfort ist von zentraler Bedeutung. Der gesamtheitliche Ansatz muss bereits in der Planungsphase verankert sein.
 - In nordeuropäischen Klimaten können interne und solare Wärmelasten durch eine natürliche Lüftung am Tag und eine Nachtlüftung aufgrund der kühleren Umgebungsluft effizient abgeführt werden. In bestimmten Ge-

bäuden erscheint eine maschinell unterstützte Nachtlüftung angebracht, um die Effektivität zu verbessern. Eine aktive wassergeführte Kühlung mittel Umweltwärmesenken oder sogar Kompressionskälte ist nur bei sehr hohen Komfortanforderungen oder eingeschränktem Nutzereinfluss (Bekleidungs Vorschriften, kein Öffnen der Fenster) unterstützend erforderlich.

- Kühlenergiekonzepte mit Flächenkühlung und Umweltenergie stellen für das mitteleuropäische Klima eine energieeffiziente Lösung dar, können aber aufgrund von Systemträgheiten und systembedingten Temperaturen keine stringenten Raumtemperatursollwerte gewährleisten. Sollen bestimmte Raumtemperaturen gewährleistet werden, ist ein zusätzliches, regelbares und schnell reagierendes Kühlsystem erforderlich.
- In südeuropäischen Klimaten ist aufgrund der lang anhaltenden Hitzeperioden mit hohen Außentemperaturen eine höhere Kühlleistung erforderlich. Aufgrund der geringen Temperaturdifferenz zwischen Raumtemperatur und Temperatur der Umweltwärmesenke (Außenluft, Erdreich) ist ein aktives Kühlsystem zum Beispiel mit Kompressionskälte – zu mindest unterstützend – erforderlich. Die mixed-mode Kühlung aus Nachtlüftung und aktiver Kühlung wurden in den zwei Demonstrationsgebäuden in Griechenland und Rumänien erfolgreich umgesetzt. Bei Aufrechterhaltung eines guten Arbeitsplatzkomforts konnte der Kühlenergiebezug auf maximal $30 \text{ kWh}_{\text{therm}}/(\text{m}^2\text{a})$ begrenzt. Ergänzend ist eine Entfeuchtung der Zuluft zu bestimmten Betriebszeiten erforderlich.

5 Zusammenfassung

Gebäude mit Niedrigenergiekühlung haben sich in den letzten Jahren etabliert. Die Analyse der Langzeitmessungen in den hier vorgestellten acht europäischen Gebäuden belegt, dass mit diesen Systemen ein hohes Maß an thermischer Behaglichkeit in Verbindung mit einer hohen Energieeffizienz unter Nutzung von Umweltwärmesenken (v. a. oberflächennaher Geothermie) erreicht werden kann. Betriebserfahrungen und die systematische wissenschaftliche Auswertung zeigen, dass es in Planung, Ausführung und Betrieb noch Verbesserungsmöglichkeiten in Richtung einer besseren Ausschöpfung des Effizienzpotenzials gibt. Gerade bei diesen Systemen sind die richtige Auslegung des Gesamtsystems, eine korrekte Umsetzung auf der Baustelle und eine korrekte Betriebsführung von großer Wichtigkeit.

Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen des EU-Projektes „ThermCo“ (Förderkennzeichen: EIE/07/026/SI2.466692) und des Projektes LowEx:Monitor, welches mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert wurde (Förderkennzeichen: 0327466B). Die Autoren danken den einzelnen europäischen Projektpartnern für die Durchführung der Messkampagnen und die Datenauswertung sowie für hilfreiche Diskussionen: *Werner Warmuth* (PSE, Deutschland), *Andreas Wagner* (KIT, Deutschland), *Bjarne Olesen* (DTU, Dänemark), *Jarek Kurnitski* (HUT, Finnland), *Mat Santamouris* (NKUA,


Griechenland), *Francis Allard* (ULR, Frankreich), *Christian Inard* (ULR, Frankreich), *Karel Kabele* (CTU, Tschechien), *Lorenzo Pagliano* (PdM, Italien) und *Adrian-Gabriel Ghiaus* (TUB, Rumänien).

Literatur

- [1] BMVBS, BBR (Hrsg.): Folgen des Klimawandels: Gebäude und Baupraxis in Deutschland, BBR-Online-Publikation 10/2008. urn:nbn:de:0093-ON1008R229.
- [2] VDMA (Hrsg.): Energiebedarf für Kältetechnik in Deutschland: Eine Abschätzung des Energiebedarfs von Kältetechnik in Deutschland nach Einsatzgebieten. Frankfurt am Main, 2011.
- [3] *Adnot, J.* et al.: Energy Efficiency and Certification of Central Air Conditioners (EECCAC), Abschlussbericht, Teile 1 bis 3. Study for the D. G. Transportation-Energy (DGTREN) of the Commission of the E. U. Paris/France, 2005.
- [4] *Bettgenhäuser, K.* et al.: Klimaschutz durch Reduzierung des Energiebedarfs für Gebäudekühlung. www.uba.de/uba-info-medien/3979.html (gesehen 2011).
- [5] *Schlomann, B.* et al.: Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2007 bis 2010. Erster Zwischenbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Karlsruhe, München, Nürnberg 2010.
- [6] *Schlomann, B.* et al.: Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2007 bis 2010. Bericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Projektnummer 53/09. Karlsruhe, München, Nürnberg 2011.
- [7] ECOHEATCOOL The European Cold Market. Workpackage 2. Abschlussbericht, 2005. www.ecoheatcool.org.
- [8] *Schlesinger, M.*: Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung. Studie für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. 2010.
- [9] *Kirchner, A., Matthes, F.*: Modell Deutschland Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken. www.prognos.com und www.oeko.de. (Erscheinungsjahr 2009).
- [10] *Adnot, J.* et al.: Energy Efficiency and Certification of Energy Efficiency of Room Air-Conditioners (EERAC). Study for the Directorate-General for Energy (DGXVII) of the Commission of the European Communities. Abschlussbericht 1999.
- [11] *Capros, P.* et al.: EU Energy Trends to 2030. Institute of Communication and Computer Systems of the National Technical University of Athens (ICCS-NTUA). Study for the European Commission Directorate – General for Energy in collaboration with Climate Action DG and Mobility and Transport DG. http://ec.europa.eu/energy/observatory/trends_2030. (gesehen 2010).
- [12] ThermCo – Thermal comfort in buildings with low-energy cooling – Establishing an annex for EPBD-related CEN-standards for buildings with high energy efficiency and good indoor environment. EIE/07/026/SI2.466692. http://www.thermco.org/cms/front_content.php?idcat=57 (gesehen 2010).
- [13] DIN EN 15251:2007–08 Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik. Berlin: Beuth-Verlag, 2007.

Autoren dieses Beitrages:

Dr.-Ing. Doreen Kalz, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE, Bereich Thermische Anlagen und Gebäude, Energieeffiziente und Solare Kühlung, Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg
Prof. Dr.-Ing. Jens Pfafferott, Hochschule Offenburg, Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Institut für Energiesystemtechnik (INES), Badstr. 24, 77652 Offenburg



EIN PROJEKT, BEI DEM MAN ÜBER SICH HINAUSWÄCHST.

Und ein zuverlässiger Partner, der einem
stets auf Augenhöhe begegnet.

Wer höchste Qualität im großen Maßstab plant, braucht einen Partner an seiner Seite, der den gleichen Anspruch hat. Einen Partner, der mit außergewöhnlich hochwertigen Produkten für die Bereiche Sanitär, Gas und Heizung überzeugt und selbst bei den größten Herausforderungen kein noch so kleines Detail aus dem Auge verliert. Ganz gleich ob persönlich auf der Baustelle, beratend an unserer Hotline oder in einem unserer Viega Seminarcenter.
Viega. Höchster Qualität verbunden.

Energieeffiziente Kühlung und thermischer Raumkomfort (Teil 2): Simulationsbasierte Evaluierung von Kühlkonzepten in verschiedenen europäischen Klimazonen

Unter dem europäischen Programm Intelligent Energy for Europe (IEE) fanden sich acht europäische Partner zusammen, um im Rahmen des Projektes ThermCo Lüftungs- und Kühlenergiekonzepte für Nichtwohngebäude mit niedrigem Energieeinsatz im Hinblick auf die Energieeffizienz und den thermischen Raumkomfort zu bewerten (siehe Teil 1 dieser Veröffentlichung in Bauphysik 34 (2012), Heft 6. Mit Hilfe einer Simulationsstudie für ein typisches Bürogebäude wird das Potenzial unterschiedlicher Lüftungs- und Kühlstrategien unter Berücksichtigung von Energieeffizienz und Raumkomfort für verschiedene europäische Klimazonen bewertet. Die Ergebnisse weisen eine hohe Wirksamkeit von Nachtlüftungskonzepten im nord-europäischen Sommerklima mit verhältnismäßig niedrigen Außentemperaturen nach. Im mitteleuropäischen Sommerklima bietet das Erdreich ein ausreichend niedriges Temperaturniveau für den effizienten Einsatz von wassergeführten Flächen temperiersystemen. Im südeuropäischen Sommerklima kann eine aktive Kühlung über Luft die hohen und schnell fluktuierenden Kühllasten effizient abführen.

Energy efficient cooling and ventilation concepts for thermal interior comfort: Simulation-based evaluation of cooling concepts in different European climate zones (Part 2). *Under the framework of the European Program Intelligent Energy for Europe (IEE), the project ThermCo evaluates low-energy ventilation and cooling concepts for non-residential buildings all-over Europe using a standardized method based on existing monitoring data from best practice examples (part 1, in Bauphysik 6/2012). A simulation study investigates the potential of different ventilation and cooling strategies with regard to energy efficiency and thermal comfort in different European climates. The results demonstrate a high potential for night ventilation strategies in North-European climate with low ambient air temperatures. In the Mid-European climate, water based low-energy cooling technologies based on radiant cooling make use of the cool ground in summer. Active cooling provides good thermal comfort in South-European climate with high and fluctuating cooling loads.*

1 Einleitung

In dem europäischen Programm Intelligent Energy for Europe (IEE) fanden sich acht europäische Partner zusammen, um im Rahmen des Projektes ThermCo [18] Lüftungs- und Kühlkonzepte für Nichtwohngebäude mit niedrigem Energieeinsatz im Hinblick auf die Energieeffizienz und den thermischen Raumkomfort zu bewerten.

Die Analyse erfolgte auf Basis von detaillierten Langzeitmessungen über ein Betriebsjahr in acht Demonstrations-

gebäuden in unterschiedlichen klimatischen Zonen Europas und einer standardisierten Datenauswertung. Im Quervergleich aller acht Gebäude werden die Kühlkonzepte gleichermaßen nach dem thermischen Kühlenergiebezug, dem thermischen Raumkomfort und dem Primärenergieeinsatz für die technische Gebäudeausrüstung und die Beleuchtung bewertet. Ein Energiekonzept ist erst dann zufriedenstellend, wenn mit möglichst geringem Energieeinsatz und bei hoher Anlageneffizienz ein guter thermischer Raumkomfort zur Verfügung gestellt werden kann. Die Autoren [11] bringen diese Parameter mit entsprechenden Gebäudesignaturen in einen Zusammenhang, überprüfen die Zielstellung und können daraus konkrete Handlungsempfehlungen ableiten.

In einer Simulationsstudie werden fünf Lüftungs- und Kühlenergiekonzepte für jeweils sechs Referenzstandorte in nord-, mittel- und südeuropäischen Klimazonen für ein Referenzgebäude untersucht und bewertet. Im Ergebnis stehen für diese Konzepte in den jeweiligen Klimazonen Kennzahlen für den thermischen Kühl- und dem damit einhergehenden elektrischen Endenergiebezug zur Verfügung. Gemeinsam mit der Bewertung des thermischen Raumkomforts können schließlich Vorschläge für geeignete Kühlkonzepte unterbreitet werden.

2 Gebäudemodell

Als Gebäudemodell wird ein dreistöckiges Bürogebäude mit zwei Büroreihen mit einer Raumbreite von 3,9 m, einer Raumlänge von 5,2 m und einer Raumhöhe von 3,0 m (lichte Raummaße), die über einen Flur mit einer lichten Raumbreite von 2,6 m erschlossen werden, angenommen. Dieser Gebäudtyp wird häufig als Referenzgebäude gewählt und wird von Voss und Pfafferott [21] detailliert beschrieben, Bild 1. Das Gebäude hat eine Nettogrundfläche von rund 1500 m² und wird in Ost/West-Richtung simuliert. Das A/V-Verhältnis beträgt 0,4 m²/m³ und das Fenster/Fassaden-Verhältnis 0,32 m²_{AF}/m²_{AW}.

Das Simulationsmodell erfüllt als europäisches Vergleichsgebäude die Anforderungen der EPBD 2002 [8]. Die bauphysikalischen Parameter wurden in Anlehnung an EnEV 2009 [7] und DIN 4108-2 [6] festgelegt:

- flächengewichteter, mittlerer U-Wert von Außenwand, Bodenplatte und oberster Geschossdecke $U_{\text{opak}} = 0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$, einschließlich Wärmebrückenverluste;
- U-Wert der Außenfenster $U_{\text{transparent}} = 1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ mit $g_{\perp} = 0,58$;



Bild 1. Gebäudesimulationsmodell: Typisches Bürogebäude für nord-, mittel- und südeuropäische Länder (Quelle: Harter + Kanzler Architekten)

Fig. 1. Building simulation model: Typical European office building for North-, Mid- and South-European countries (source: Harter + Kanzler Architekten)

– variable Verschattung mit externen Jalousien mit $F_{c,geschlossen} = 0,06$, wobei der mittlere F_c -Wert unter Berücksichtigung einer halbautomatischen Steuerung für eine Solarstrahlung von 200 W/m^2 auf die Fassade bei rund $0,2$ liegt.

Die Büronutzung orientiert sich an den Vorgaben der VDI 2078 [19] mit einer Nutzung von 08:00 bis 18:00 (UTC) während der Werktage. Die internen Wärmegewinne werden mit 156 Wh/m^2 pro Tag angenommen und entsprechend einem gemessenen Lastprofil [20] abgebildet.

3 Kühl- und Lüftungskonzepte

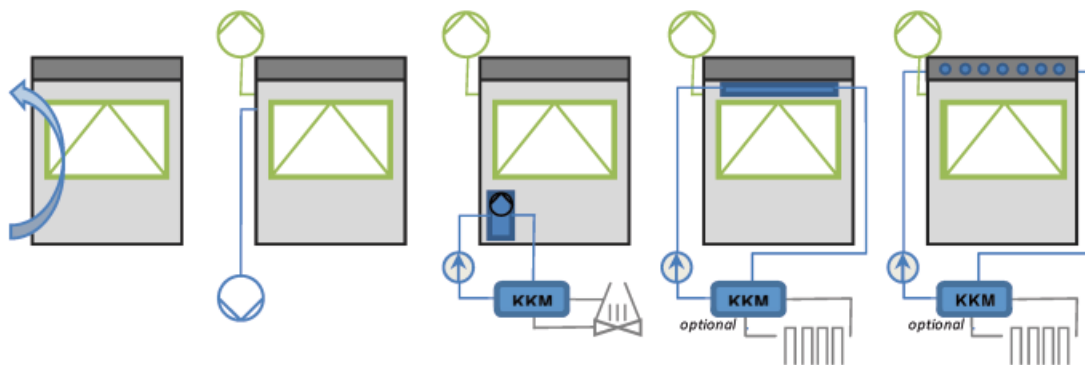
Bild 2 zeigt fünf Kühlkonzepte, wobei alle Konzepte eine Fensterlüftung zulassen. Das Nutzerverhalten wird dabei in Anlehnung an ein Modell von Herkel [9] abgebildet. In vier Konzepten wird ein Abluftventilator eingesetzt, der tagsüber einen hygienischen Luftwechsel von $40 \text{ m}^3/\text{h}$ pro Person gewährleistet.

Hinweis Zwar wird in konkreten Projekten oft eine Zu- und Abluftanlage eingesetzt, um im Winter eine Wärmehintergewinnung oder im Sommer eine Luftentfeuchtung realisieren zu können. Zur besseren Vergleichbarkeit der Konzepte werden hier jedoch nur die sensible Kühlung und eine einfache Abluftanlage berücksichtigt.

1. Die passive Kühlung umfasst alle Maßnahmen, um Wärmelasten zu reduzieren und die reduzierten Wärmegewinne so in der Gebäudemasse zu speichern, dass sie allein durch freie Nachtlüftung abgeführt werden können. Der tatsächliche freie Luftwechsel variiert von Tag zu Tag und von Ort zu Ort und überschreitet oft 2 h^{-1} in den nördlichen Sommerklimazonen und erreicht selten Werte über $1,8 \text{ h}^{-1}$ in den südlichen Sommerklimazonen.
2. Eine Lüftungsanlage gewährleistet eine gute Raumluftqualität und kann zur maschinellen Nachtlüftung eingesetzt werden. Die Nachtlüftung wird dann betrieben, wenn die Raumtemperatur 21 °C überschreitet und gleichzeitig die Außentemperatur mindestens 2 K unter der Abluft- bzw. mittleren Raumtemperatur liegt.
3. Ein Ventilator-konvektor liefert in diesem Modell ausschließlich sensible Kühlung, um den thermischen Komfort während der Nutzungszeit sicherzustellen. Die Kompressionskältemaschine wird unabhängig vom Standort

mit einer Vorlauftemperatur von 13 °C und einer Rücklauftemperatur von 18 °C betrieben, wobei ein Naßkühlturm als Wärmesenke genutzt wird. Die maximale Kühlleistung wird auf 90 W/m^2 limitiert. Die Jahresarbeitszahl verringert sich dabei von Nord nach Süd infolge der höheren Außentemperaturen während der Betriebszeit von $3,1$ in Stockholm auf $2,4 \text{ kWh}_{\text{therm}}/\text{kWh}_{\text{el}}$ in Palermo.

4. Eine abgehängte Kühldecke reagiert verhältnismäßig schnell auf Laständerungen und wird in dieser Studie nur während der Anwesenheitszeit betrieben. Die Kühlleistung ist direkt abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen Kühlmedium und Raum und liegt bei rund 100 W/m^2 bei einer Temperaturdifferenz von 8 K . Die Kühldecke nimmt 70% der Bürofläche ein. Die tatsächliche, maximale Kühlleistung liegt beispielsweise am Standort Mailand bei $77 \text{ W/m}^2_{\text{NGF}}$, wobei die Vorlauftemperatur nach einem Vorschlag von Olesen [18] gemäß geregelt und standortunabhängig auf minimal 16 °C begrenzt wird. Ein Erdsondenfeld dient als Wärmesenke, wobei die Jahresmitteltemperatur des Erdreichs für jede Klimazone separat bestimmt wird. Sie steigt von $6,3$ im Norden auf $19,6 \text{ °C}$ im Süden. Falls die Rücklauftemperatur aus dem Erdsondenfeld die Soll-Vorlauftemperatur überschreitet, sorgt eine Kompressionskältemaschine für die notwendige Zusatzkühlung. In diesem Fall wird die Erdsonde zur Rückkühlung des Kältekreislaufes genutzt. Da in Stuttgart die Rücklauftemperatur der Erdsonde ganzjährig zur Kühlung ausreicht, kann hier eine sehr hohe Jahresarbeitszahl von $14 \text{ kWh}_{\text{therm}}/\text{kWh}_{\text{el}}$ erreicht werden, weil nur die Hilfsenergie für die Umwälzpumpe aufgebracht werden muss. Demgegenüber sinkt die Jahresarbeitszahl in Rom auf nur $3,4 \text{ kWh}_{\text{therm}}/\text{kWh}_{\text{el}}$, weil oft aktiv gekühlt werden muss.
5. Die Bauteilaktivierung wird in dieser Studie nur während der Nachtstunden betrieben. Durch die hohe thermische Trägheit wird die Kühlleistung jedoch gantztägig mit einer spezifischen Kühlleistung von rund $40 \text{ W/m}^2_{\text{NGF}}$ wirksam. Damit geht eine spürbare Temperaturschwankung während der Nutzungszeit einher. Die Betriebsstrategie ist vergleichbar mit der Regelung der abgehängten Kühlsegel allerdings mit in die Nachtstunden verschobenen Betriebszeiten. Damit wird für Stuttgart nahezu die gleiche Jahresarbeitszahl von $14 \text{ kWh}_{\text{therm}}/\text{kWh}_{\text{el}}$ erreicht wie für die Kühlung über abgehängte Kühldecken. In Rom liegt die Jahresarbeitszahl mit $3,8 \text{ kWh}_{\text{therm}}/\text{kWh}_{\text{el}}$



Lüftung am Tag	freie Lüftung	hybride Lüftung	hybride Lüftung	hybride Lüftung	hybride Lüftung
Kühlung	freie Nachtlüftung	maschinelle Nachtlüftung	Kompressions-KM Ventilatorkonvektor	abgehängte Kühldecke	Bauteilaktivierung
Wärmesenke	Außenluft	Außenluft	Kühlturm	Erdsonden (Betrieb von 08:00- 18:00)	Erdsonden (Betrieb von 22:00- 06:00)

Bild 2. Fünf Kühlkonzepte: passive Kühlung, mechanische Nachtlüftung, aktive Kühlung mit Kompressionskältemaschine und wasserbasierte Niedrigenergiekühlung (abgehängte Kühldecke und Bauteilaktivierung) mit oberflächennaher Geothermie und Kompressionskältemaschine, falls erforderlich

Fig. 2. Five different cooling concepts: passive cooling, night ventilation, active cooling with compression chiller, and water-based low-energy cooling with compression chiller when needed to meet the cooling load (suspended cooling panel and concrete core conditioning)

wegen der höheren Vorlauftemperaturen für die Bauteilaktivierung gegenüber der abgehängten Kühldecke etwas höher.

Die Investitionskosten für diese fünf Konzepte können auf Basis dokumentierter Projekte [20] und Erfahrungswerte [21] für die Gesamtinstallation abgeschätzt werden.

1. Passive Kühlung: 20 €/m². Überströmöffnungen und vergrößerte Lüftungsdurchlässe zur Minimierung des Druckverlustes bei freier Strömung.
2. Maschinelle Nachtlüftung: 32 €/m². Überströmöffnungen, Abluftventilator, einfache Kanalführung und MSR-Technik.
3. Aktive Kühlung: 85 €/m². Überströmöffnungen, Abluftventilator, einfache Kanalführung, Kompressionskältemaschine mit Kühlturm, Ventilatorkonvektoren, Kaltwasserverrohrung und MSR-Technik (Kombination mit Heizung möglich).
4. Abgehängte Kühldecken: 138 €/m². Überströmöffnungen, Abluftventilator, einfache Kanalführung, Kompressionskältemaschine mit Erdsonde, abgehängte Kühldecke, Kaltwasserverrohrung und MSR-Technik (Kombination mit Heizung üblich).
5. Bauteilaktivierung: 117 €/m². Überströmöffnungen, Abluftventilator, einfache Kanalführung, Kompressionskältemaschine mit Erdsonde, Bauteilaktivierung, Kaltwasserverrohrung und MSR-Technik (Kombination mit Heizung sinnvoll).

4 Wetterdaten

Die Simulationsstudie wird für 6 europäische Klimazonen durchgeführt, wobei jede Klimazone hier durch eine Referenzstation beschrieben und durch die Monatsmitteltemperatur im August charakterisiert werden soll:

- Stockholm $AT_{\text{August}} < 16 \text{ }^\circ\text{C}$
- Hamburg $16 < AT_{\text{August}} < 18 \text{ }^\circ\text{C}$
- Stuttgart $18 < AT_{\text{August}} < 20 \text{ }^\circ\text{C}$
- Mailand $20 < AT_{\text{August}} < 22 \text{ }^\circ\text{C}$
- Rom $22 < AT_{\text{August}} < 24 \text{ }^\circ\text{C}$
- Palermo $AT_{\text{August}} > 24 \text{ }^\circ\text{C}$.

Als Klimadatenbank wird METEONORM [12] verwendet, wobei die oben genannten Sommerklimazonen in guter Näherung mit den USDA Hardiness Zones (Kategorisierung von Klimazonen) 5 für Nordeuropa bis 10 für Südeuropa entsprechen.

5 Gebäude- und Anlagensimulation

Die Simulation wird entsprechend des so genannten Klimarlasses [1] und unter Berücksichtigung der BBR-Richtlinie zur dynamisch-thermischen Simulationsrechnung für den Sommerlastfall [2] durchgeführt. Als Simulationsprogramm wird IDA-ICE [10] verwendet. Die gebäudetechnischen Systeme werden aus der vorhandenen und am Fraunhofer ISE weiterentwickelten Modellbibliothek übernommen, wobei das Wärmepumpen/Kältemaschinen-Modell von Salvalai [15] verwendet wird.

Das gekoppelte Simulationsmodell wird von Salvalai et al. [16] detailliert beschrieben. Eine detaillierte simulationsbasierte Auswertung eines Demonstrationsgebäudes nach gleicher Methode wird beispielhaft von Pfafferoth et al. [13] vorgestellt.

Die gekoppelte Gebäude- und Anlagensimulation wird für den Zeitraum 1. Mai bis 30. September durchgeführt.

Der Nutzkältebedarf wird sowohl für das PMV-Modell als auch das adaptive Komfortmodell der EN 15251 [5] bestimmt. Der jährliche Endenergiebedarf für Lüftung und Kühlung wird gemäß EN 15241 [3] und EN 15243 [4] be-

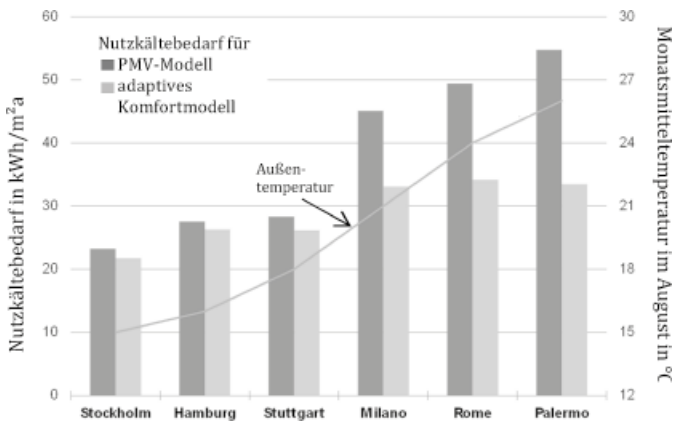


Bild 3. Nutzkältebedarf: der Kühlenergiebedarf steigt von Nord nach Süd, wobei der Nutzkältebedarf jeweils höher ist, wenn der thermische Komfort gemäß dem PMV-Modell statt des adaptiven Komfortmodells nach EN 15251 eingehalten werden soll

Fig. 3. Useful cooling energy demand: the cooling energy demand increases from North to South. The PMV-model results in a higher cooling energy demand than the adaptive comfort model according to EN 15251

rechnet, wobei der Endenergiebedarf für maschinelle Lüftung während der Nutzungszeit mit 2,9 kWh/m²a unabhängig vom Standort angenommen wird [14].

Erwartungsgemäß steigt die spezifische Kühllast [W/m²] von Nord nach Süd in erster Linie infolge der höheren Außentemperaturen und zu einem geringeren Anteil infolge der steigenden solaren Wärmelasten an. Bild 3 zeigt, dass der Nutzkältebedarf [kWh/m²a] nicht nur eine Funktion des Standortes sondern auch des gewählten Komfortmodells ist. Liegen die mittleren Außentemperaturen deutlich unter der geforderten Raumtemperatur, so ist dieser Unterschied gering ausgeprägt. In Hamburg sinkt der Nutzkältebedarf lediglich von 27,6 auf 26,3 kWh/m²a, wenn statt des PMV-Modells das adaptive Komfortmodell gewählt wird. Bei deutlich höheren Außentemperaturen ist der Unterschied zwischen den beiden Komfortmodellen jedoch stark ausgeprägt, so steigt der Nutzkältebedarf in Rom von 34,1 für das adaptive Komfortmodell auf 49,4 kWh/m²a für das PMV-Modell. Damit bestätigt die Simulationsstudie auch die Ergebnisse aus dem COMMONSENSE Projekt [17].

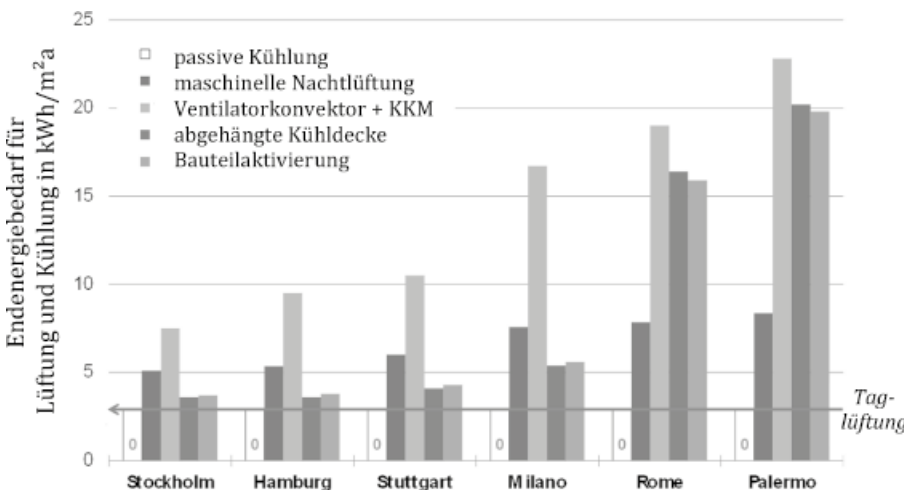


Bild 4. Endenergiebedarf für Lüftung und Kühlung
Fig. 4. End energy demand for ventilation and cooling

Bild 4 zeigt deutlich, dass der Endenergiebedarf für die luftgeführte Kühlung mit Ventilator-konvektoren (bei Kältebereitstellung über eine Kompressionskältemaschine und einem Kühlturm als Wärmesenke) in jedem Klima am höchsten ist und von Norden nach Süden deutlich ansteigt. In den nördlichen Klimazonen ist der Unterschied zwischen den einzelnen Kühlstrategien weniger stark ausgeprägt als in den südlichen Klimazonen. Der Endenergiebedarf für die maschinelle Nachtlüftung steigt nur geringfügig, für die wasserbasierten Systeme allerdings markant an. Denn die Erdtemperatur in Südeuropa ist so hoch, um direkt über die Erdsonde als Wärmesenke genutzt werden zu können. Hier kann die Erdsonde lediglich zur Rückkühlung der Kompressionskältemaschine eingesetzt werden.

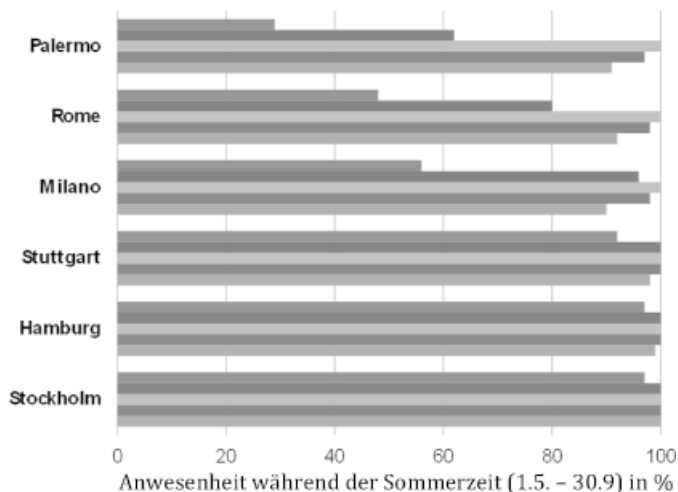
Diese Auswertung zeigt nicht, ob die Komfortkriterien tatsächlich eingehalten werden können.

Bild 5 zeigt die Grenzen der einzelnen Kühlkonzepte im Hinblick auf den thermischen Komfort auf:

- Passive Kühlung ist nur in Nordeuropa als Kühlkonzept gut geeignet. Vorausgesetzt, die Gebäude werden explizit für dieses Konzept unter den spezifischen Bedingungen vor Ort geplant.
- Eine maschinelle Nachtlüftung kann bei höheren Außentemperaturen in Südeuropa keinen ausreichend guten thermischen Komfort gewährleisten.
- Eine aktive, luftgeführte Kühlung kann in allen Klimazonen durchgängig eine ausreichend hohe Kühlleistung bereitstellen, um auch hohe Komfortansprüche zu erfüllen.
- Wassergeführte Flächentemperiersysteme sind grundsätzlich in allen Klimazonen gut geeignet, wobei die thermisch träge Bauteilaktivierung bei hohen und fluktuierenden Wärmelasten unter südeuropäischen Bedingungen an die Leistungsgrenze stößt. Hier sind abgehängte Kühlsysteme im Vorteil.

6 Analyse der Simulationsergebnisse

Die Einzelergebnisse der Simulation zeigen kein einheitliches Bild. Erst eine Kombination der beiden Aspekte „Endenergiebedarf für Lüften und Kühlen“ sowie „thermischer Komfort“ liefert eine Auswertung unter planerischen Aspekten. Da einige Kombinationen zu vergleichbaren Ergeb-



Komfortklasse B für das adaptive Komfortmodell nach EN 15251 für:

- passive Kühlung
- maschinelle Nachtlüftung
- Ventilator-konvektor + KKM
- abgehängte Kühldecke
- Bauteilaktivierung

Bild 5. Thermischer Komfort für das adaptive Komfortmodell nach EN 15251

Fig. 5. Thermal comfort according to the adaptive comfort model according to EN 15251

nissen führen, wird der Aspekt „Investitionskosten“ in diesen Fällen als dritter Parameter im Rahmen einer multikriteriellen Analyse hinzugezogen.

Bild 6 gibt einen Überblick über bevorzugte Kühlkonzepte für die sechs Sommer-Klimaregionen in Europa. Das Referenzgebäude wird in allen Klimazonen gleich ausgestattet, unterliegt einer identischen Nutzung und soll die

thermischen Anforderungen gemäß dem adaptiven Komfortmodell erfüllen. Unter diesen Voraussetzungen

- können im nordeuropäischen Sommerklima die verhältnismäßig hohen solaren Wärmegewinne infolge der langen Sonnenscheindauer bei tiefstehender Sonne effizient durch die verhältnismäßig kühle Außenluft abgeführt werden. Eine maschinell unterstützte Nachtlüftung verbessert die Regelbarkeit und die Wärmeabfuhr während hochsommerlicher Perioden.
- kann im mitteleuropäischen Sommerklima die oberflächennahe Geothermie die erforderliche Kühlleistung zur Verfügung stellen. Falls eine zusätzliche aktive Kälteerzeugung (z. B. reversible Wärmepumpe) erforderlich wird, können thermisch träge Übergabesysteme zur Lastverschiebung genutzt werden.
- muss im südeuropäischem Sommerklima eine vergleichsweise hohe Kühlleistung bereitgestellt werden, um auch stark schwankende Kühllasten abführen zu können. Da der Temperaturunterschied zwischen der Umgebungstemperatur und der Komforttemperatur gering ist, ist oft eine aktive Kühlung erforderlich, um die Komfortanforderungen zu erfüllen.

7 Zusammenfassung

Gebäude mit Niedrigenergiekühlung haben sich in den letzten Jahren etabliert. Die systematische Analyse der Langzeitmessungen von acht europäischen Gebäuden (s. Teil 1 der Veröffentlichung, [11]) belegt, dass mit diesen Systemen ein hohes Maß an thermischer Behaglichkeit in Verbindung mit einer hohen Energieeffizienz unter bei Nutzung von erneuerbarer Umweltenergie erreicht werden kann.

Die Simulationsstudie bestätigt die Ergebnisse dieser Messdatenauswertung, verallgemeinert diese und stellt

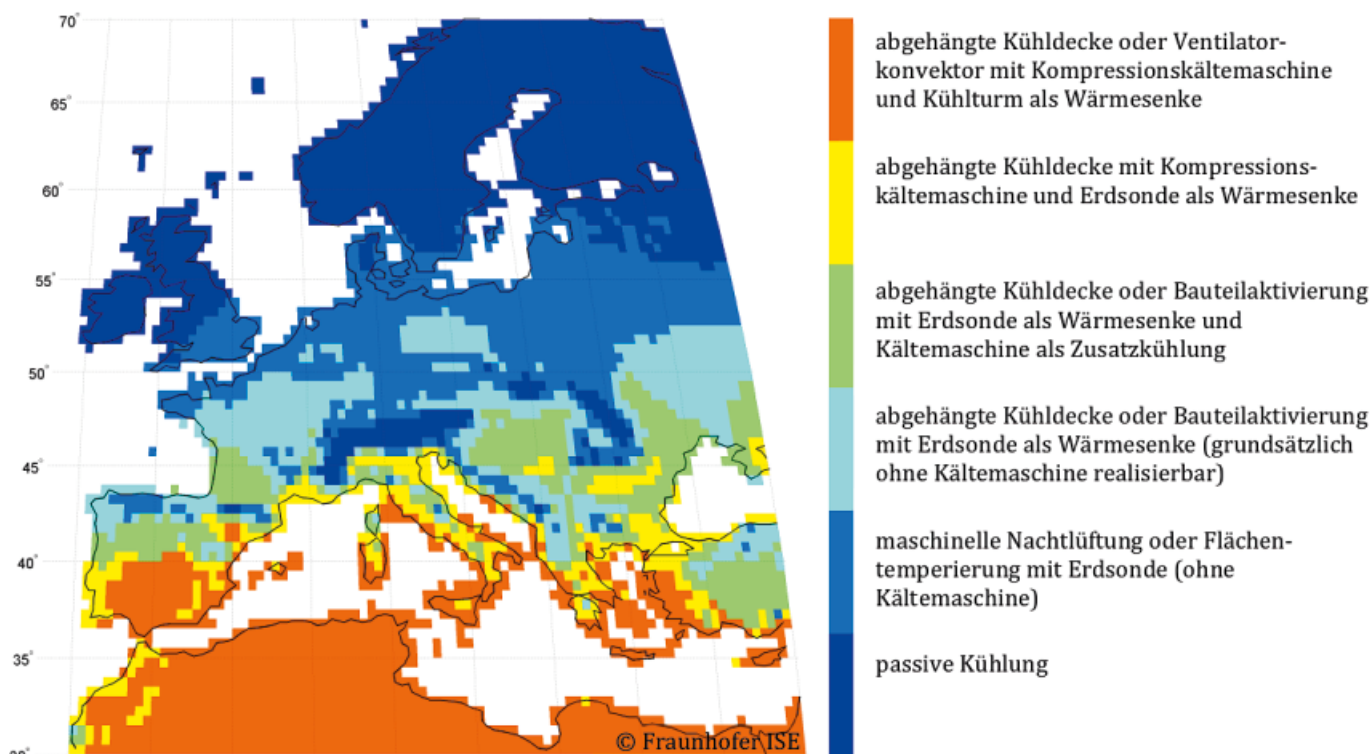


Bild 6. Thermischer Komfort für das adaptive Komfortmodell nach EN 15251

Fig. 6. Thermal comfort according to the adaptive comfort according to EN 15251

grundlegende Planungsvorschläge vor. So können zeitgemäße Bürogebäude mit typischer Büronutzung in sommerkühlen Klimazonen besonders vorteilhaft allein mit der Umgebungsluft, in gemäßigten Klimazonen sehr effizient über Flächentemperiersysteme in Verbindung mit oberflächennaher Geothermie und in sommerheißen Klimazonen am besten über schnell reagierende, aktive Kühlsysteme gekühlt werden.

Diese Studie kann und soll die planerische Leistung bei der Gestaltung von Gebäude- und Energiekonzepten nicht ersetzen. In der großen Bandbreite von Konzepten und Nutzungsbedingungen müssen in der Planung ohnehin vielfältige Kriterien berücksichtigt werden. Es geht daher hier vielmehr darum, eine standortabhängige Einordnung der am Markt befindlichen Kühlsysteme als Hilfestellung für die Evaluierung in der Planungsphase zur Verfügung zu stellen.

Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen des EU-Projektes „ThermCo“ (Förderkennzeichen: EIE/07/026/SI2.466692) und des Projektes „LowEx:Monitor“, das mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert wurde (Förderkennzeichen: 0327466B).

Die Europa-Karte mit der Darstellung der sechs Sommer-Klimazonen wurde von Dr. *Dirk Riemann* (Institut für Physische Geographie, Universität Freiburg) erstellt.

Literatur

- [1] BMVBS-Richtlinie zu baulichen und planerischen Vorgaben für Baumaßnahmen des Bundes zur Gewährleistung der thermischen Behaglichkeit im Sommer. B12 – 8132.1/0 vom 05. 12. 2008.
- [2] Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. Richtlinie zur Durchführung einer dynamisch thermischen Simulationsrechnung für den Sommerlastfall in Gebäuden. Bericht 10.08.17-06.12, 2006.
- [3] DIN EN 15241:2011-06 Lüftung von Gebäuden – Berechnungsverfahren für den Energieverlust aufgrund der Lüftung und Infiltration in Gebäuden. Deutsches Institut für Normung e. V., 2011.
- [4] DIN EN 15243:2007-10. Lüftung von Gebäuden – Berechnung der Raumtemperaturen, der Last und Energie von Gebäuden mit Klimaanlage. Deutsches Institut für Normung e. V., 2007.
- [5] DIN EN 15251:2007-08 Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden. Deutsches Institut für Normung e. V., 2007.
- [6] DIN 4108-2:2003-07 Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden. Deutsches Institut für Normung e. V., 2003.
- [7] EnEV 2009. Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden.

Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung vom 29. April 2009. BGBl. I S. 643.

- [8] EPBD 2002. Richtlinie 2002/91/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2002 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden. Aktualisiert am 19. Mai 2010 durch Richtlinie 2010/31/EU.
- [9] *Herkel, S., Knapp, U., Pfafferoth, J.*: Towards a model of user behaviour regarding the manual control of windows in office buildings. *Building and Environment* 43, 2008.
- [10] IDA Indoor Climate and Energy 3.0. <http://www.equa.se> [Januar 2013]
- [11] *Kalz, D., Pfafferoth, J.*: Energieeffiziente Kühlung und thermischer Raumkomfort: Vergleichende Analyse von acht europäischen Nichtwohngebäuden (Teil 1). *Bauphysik* 34 (2012), H. 6, S. 256–267.
- [12] *meteonorm 6. METEOTEST, Bern (CH), 2009.*
- [13] *Pfafferoth, J., Jacob, D., Kalz, D., Salvalai, G.*: Evaluation of a low-energy cooling concept using a coupled building and plant simulation model. *PALENC 2010 Conference on Passive and Low-energy Cooling, Rhodos/GR, 2010.*
- [14] *Salvalai, G.*: Passive devices for summer climate control in buildings design tools and technological issues for mediterranean climate. *Politecnico di Milano, Building Environment Science and Technology, 2010.*
- [15] *Salvalai, G.*: Implementation and validation of simplified heat pump model in IDA-ICE energy simulation environment. *Energy and Buildings* 49, 2012.
- [16] *Salvalai, G., Pfafferoth, J., Jacob, D.*: Validation of a low-energy whole building simulation model. *Fourth National Conference of IBPSA-USA, New York, 2010.*
- [17] *Santamouris, M., Sfakianaki, K.*: Predicted energy consumption of major types of buildings in European climates based on the application of EN 15251. Report for EIE/07/190/SI2.467619, COMMONCENSE, Comfort monitoring for CEN standard EN15251 linked to EPBD. www.commoncense.info [Juni 2011].
- [18] *ThermCo – Thermal comfort in buildings with low-energy cooling – Establishing an annex for EPBD-related CEN-standards for buildings with high energy efficiency and good indoor environment.* EIE/07/026/SI2.466692. <http://www.thermco.org> [Januar 2013].
- [19] *VDI 2078:1996-07 Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume.* Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 1996.
- [20] *Voss, K., Löhnert, G., Herkel, S., Wagner, A., Wambsganß, M.*: Bürogebäude mit Zukunft. *SOLARPRAXIS, 2006.*
- [21] *Voss, K., Pfafferoth, J.*: Energieeinsparung contra Behaglichkeit? Heft 121, BBR, Bonn, 2007.

Autoren dieses Beitrages:

Prof. Dr.-Ing. Jens Pfafferoth, Hochschule Offenburg, Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Institut für Energiesystemtechnik (INES), Badstr. 24, 77652 Offenburg

Dr.-Ing. Doreen Kalz, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE, Abt. Thermische Anlagen und Gebäude, Energieeffiziente und Solare Kühlung, Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg

Doreen Kalz
 Sebastian Herkel
 Martin Sonntag
 Jens Pfafferott

Energieeffiziente Kühlung und thermischer Raumkomfort: Erfahrungen aus dem Langzeitmonitoring von 42 Bürogebäuden

In 35 deutschen und 7 europäischen Büro- und Verwaltungsgebäuden wurden auf Basis von Monitoringkampagnen über mehrere Betriebsjahre Raum- und Außentemperaturwerte in zeitlich hoher Auflösung erfasst und der thermische Raumkomfort im Sommer standardisiert nach der Komfortnorm DIN EN 15251:2007-08 detailliert ausgewertet. Ergänzt wird die Auswertung um Kurzzeitmesskampagnen über zwei sehr warme Wochen im Sommer in unsanierten bzw. teilsanierten Bürogebäuden, errichtet im Zeitraum von 1960 bis 1975. Die untersuchten Gebäude mit ihrem jeweiligen Kühlkonzept lassen sich in sechs Kategorien einteilen: ohne Kühlung, passive, luftgeführte und wassergeführte Kühlung sowie Mixed-mode-Kühlung und Vollklimatisierung. Im Quervergleich aller Gebäude werden die Kühlkonzepte gleichermaßen nach dem thermischen Raumkomfort und thermischen Kühlenergiebezug bewertet. Detaillierte Komfortuntersuchungen nach der Europäischen Komfortnorm DIN EN 15251:2007-08 geben Hinweise auf die Wirksamkeit der eingesetzten Kühltechnologien in den jeweiligen Klimazonen. Daraus lassen sich Handlungsempfehlungen für die Planungspraxis und den Gebäudebetrieb ableiten.

Energy efficient cooling and thermal comfort for office buildings – long-term monitoring in 42 buildings. *Long-term monitoring campaigns were carried out in 35 German and 7 European office and administrative buildings, recording the operative room and ambient air temperature in fine time resolution. Further, short-term monitoring campaigns over two hot weeks in summer were conducted in non or partially retrofitted office buildings in Germany, built from 1960 to 1975. The buildings studied can be divided into six categories according to the cooling concept employed: without cooling, passive, air-based and water-based cooling, mixed-mode cooling and full air conditioning. Thermal comfort in summer is evaluated in detail using a standardized methodology in accordance with the comfort standard DIN EN 15251:2007-08. Thermal comfort is quantified by measurements of operative room temperatures and local meteorological conditions. In addition, useful cooling energy and electricity consumption were recorded. It is clearly demonstrated that it is feasible and valuable to compare different cooling strategies based on a consistent methodology. Furthermore, this methodology can be applied in day-to-day practice in the planning, commissioning and operation of buildings since these parameters are well-established and easily accessible.*

1 Einleitung

In Deutschland sind etwa die Hälfte der Büro- und Verwaltungsgebäude mit Kühl- oder Klimatisierungsvorrichtun-

gen ausgestattet. Viele Studien prognostizieren weiterhin einen Anstieg des Energiebedarfs für die Gebäudekühlung in Deutschland und auch in Europa. Es wird davon ausgegangen, dass spätestens ab 2015 die meisten Neubauten im GHD-Sektor (Gewerbe, Handel, Dienstleistungen) mit Kühlung oder Klimatisierung ausgerüstet und auch im Bestand in erheblichem Maße Nachrüstungen erfolgen werden [1]. Begründet wird dies mit einem verstärkten Auftreten heißer Sommer und der zunehmenden Ausstattung von Dienstleistungsgebäuden. Ziel ist es daher, Gebäude- und Anlagenkonzepte zu entwickeln, die sich im Sommer durch einen geringen Kühlenergiebedarf und eine hohe Anlageneffizienz auszeichnen, aber die Anforderungen an einen qualitativ hochwertigen Arbeitsplatz erfüllen. Neben akustischen und visuellen Komfortanforderungen kommt dabei dem thermischen Komfort eine zentrale Rolle zu.

2 Zielstellung und Methodik

In der Planungsphase von Gebäuden werden bauphysikalische und anlagentechnische Randbedingungen berücksichtigt, dennoch stellt sich in der Praxis oft die Frage, ob die Gebäude im Betrieb tatsächlich die in der Planung formulierten Anforderungen im Hinblick auf das sommerliche Temperaturverhalten einhalten. Unter Umständen entspricht auch das subjektiv empfundene Raumklima nicht den Erwartungen der Nutzer [2]–[5]. Eine messtechnische Untersuchung bietet hier die Möglichkeit, objektive Daten bereitzustellen und den thermischen Raumkomfort unter Betriebs- und Nutzungsbedingungen und damit die Wirksamkeit des Kühl- und Lüftungskonzeptes zu bewerten.

Ziel der vorliegenden Studie ist es, auf Basis von Langzeitmessungen den thermischen Raumkomfort in Anhängigkeit unterschiedlicher Kühlkonzepte zu bewerten. Im Folgenden werden Praxiserfahrungen und Betriebsauswertungen zum thermischen Raumkomfort im Sommer von sieben europäischen und 35 deutschen Büro- und Verwaltungsgebäuden vorgestellt. Die dargestellten quantitativen Auswertungen basieren auf mehrjährigen Monitoringkampagnen mit hoher Messwertauflösung aus den Förderprogrammen „Energieoptimiertes Bauen, EnOB“, „LowEx:Monitor“ und „ModQS“ des BMWi [6]–[8], dem Förderprogramm „Zukunft Bau“ des BMVBS sowie dem europäischen Projekt „ThermCo“ [9].

Die neuen und sanierten Nichtwohngebäude weisen unterschiedliche architektonische und planerische Ansätze

auf. Allen gemein ist jedoch das Ziel, den Kühlenergiebedarf durch passive Technologien (Reduzierung der solaren Lasten durch Sonnenschutzsysteme, kontrollierte Lüftung, thermische Gebäudespeichermasse) und durch Nutzung von natürlichen Umweltwärmesenken deutlich zu senken – dabei aber die Anforderungen an den thermischen Raumkomfort zu gewährleisten. Bis auf zwei Gebäude können die Nutzer Fenster öffnen/schließen, den Sonnenschutz manuell bedienen und ihre Kleidung den Umgebungstemperaturen anpassen. Ergänzt wird die Auswertung um Kurzeitmesskampagnen über zwei sehr warme Wochen im Sommer in unsanierten bzw. teilsanierten Bürogebäuden, errichtet im Zeitraum von 1960 bis 1975. Informationen zur Bauphysik und zum Kühlkonzept der untersuchten Gebäude sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

3 Gebäude- und Energiekonzepte

Technologien und Konzepte zur Reduzierung des Energiebedarfs für die Kühlung von Nichtwohngebäuden sind bekannt und werden erfolgreich in Sanierungsvorhaben und Neubauten für Niedrigenergiegebäude eingesetzt. Mit einem energieoptimierten Gesamtkonzept aus Architektur, Bauphysik und Gebäudetechnik weisen diese Gebäude einen deutlich geringeren Kühlbedarf auf. Somit können diese Gebäude bei vergleichbarem Arbeitsplatzkomfort auf eine Vollklimatisierung zugunsten von direkter Kühlung mit Umweltenergie aus dem Erdreich, dem Grundwasser oder der Außenluft verzichten.

Für die Bewertung des thermischen Raumkomforts im Sommer lassen sich viele Büro- und Verwaltungsgebäude allerdings nicht ohne weiteres anhand des jeweiligen Kühlkonzepts einem bestimmten Komfortmodell zuordnen. Beispielsweise nutzen Gebäude freie oder maschinelle Nachtlüftungskonzepte in Kombination mit einer aktiven bzw. unterstützenden Kühlung. Zudem stellen Kühlenergiekonzepte mit Nutzung von natürlichen Umweltsenken (z. B. direkte Kühlung mittels oberflächennaher Geothermie) für das mitteleuropäische Klima zwar eine energieeffiziente Lösung dar, können aber aufgrund von Systemträgheiten und systembedingten Temperaturen bzw. Temperaturdifferenzen oft keine stringenten Raumtemperatursollwerte analog dem PMV-Komfortmodell gewährleisten.

Da die Normung zweifelsfreie Bedingungen formulieren muss, wird in DIN EN 15251 [17] eine klare Zuordnung getroffen:

„Gebäude ohne maschinelle Kühlung: Gebäude, die nicht über maschinelle Kühlung verfügen und bei denen zur Senkung hoher Innentemperaturen in der warmen Jahreszeit auf andere Verfahren zurückgegriffen wird, wie z. B. nicht zu große Fenster, angemessene Abschirmung gegen Sonneneinstrahlung, Verwendung der Gebäudemasse, freie Lüftung, nächtliche Lüftung usw. zur Verhinderung der Überhitzung.“

In diesem Zusammenhang wird auch die „maschinelle Kühlung“ definiert und mit einer expliziten Anmerkung gegenüber passiven Kühlmethode im Sinne dieser Norm abgegrenzt:

„Kühlung eines Raums oder eines Gebäudes mit maschinellen Hilfsmitteln zur Kühlung der Zuluft durch z. B. Ventilatorkonvektoren, gekühlte Oberflächen usw. ANMERKUNG: Die Definition steht in Zusammenhang mit den von

den Nutzern erwarteten Innentemperaturen während der warmen Jahreszeit. Das Öffnen von Fenstern am Tag und in der Nacht gilt nicht als maschinelle Kühlung. Als maschinelle Kühlung gilt hingegen jede maschinell unterstützte Lüftung (Ventilatoren).“

Diese streng am Kühlkonzept orientierte Definition weicht allerdings deutlich von den in den adaptiven Komfortkriterien formulierten Bedingungen ab, die sich an der Möglichkeit zum effektiven Nutzereinfluss und nicht am Kühlkonzept orientieren, z. B. in [10], [11]. Eine Studie zur Nutzerzufriedenheit mit dem thermischen Raumkomfort in Bürogebäuden zeigt [2], dass eine Komfortnorm zwei Komfortmodelle zur Verfügung stellen sollte. Die strenge Zuordnung der Gebäudeklassen (Gebäude mit/ohne maschinelle Kühlung) in [17] konnte allerdings nicht belegt werden. Ebenso wird das Erwartungsmodell, wie es beispielsweise der ISSO 74 [18] zugrunde liegt, nicht bestätigt. Vielmehr erscheint eine Unterteilung der Gebäude in luft- und wassergeführte Systeme oder eine Unterteilung nach dem Grad der Kopplung zwischen Innen- und Außenklima sinnvoll. Im ersten Fall wird die Unterteilung anlagentechnisch über die Leistungsbeschränkung, im zweiten Fall bauphysikalisch über die Entwicklung der Raumtemperatur definiert. In beiden Fällen stehen die entsprechenden Bewertungsgrößen aus der Planungspraxis zur Verfügung.

Empfohlen wird, Gebäude mit freier und maschineller Lüftung sowie Gebäude mit passiven Kühlmaßnahmen (z. B. Sonnenschutz, Fensterlüftung) nach dem adaptiven Komfortmodell nach [17] zu bewerten. Hingegen sollte der Raumkomfort in Gebäuden mit einer Voll-/Teilklimatisierung, Umluftkühlung und wassergeführten Flächenkühlung (z. B. thermoaktive Bauteilsysteme, Kühldecken) nach dem PMV-Komfortmodell bewertet werden. Auch in diesen Gebäuden scheinen sich die Nutzer an das Außenklima zu adaptieren. Dennoch haben die Nutzer eine entsprechend höhere Erwartungshaltung an den Raumkomfort [2].

Damit werden die in der vorliegenden Studie untersuchten Nichtwohngebäude mit ihrem jeweiligen Kühlkonzept in folgende sechs Kategorien eingeteilt:

1. Gebäude ohne Kühlung

In zumeist unsanierten Bestandsgebäuden gibt es oft keine oder nur unzureichende Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz. Diese Gebäude werden nach dem *adaptiven Komfortmodell* [17] bewertet. Im Rahmen dieser Studie wurden Raumtemperaturen in 7 un- bzw. teilsanierten Büro- und Verwaltungsgebäuden aus den 1960er und 1970er Jahren über warme Perioden im Sommer gemessen und ausgewertet. In drei der untersuchten Gebäude müssen die Fenster nachts aufgrund von Sicherheitsbestimmungen geschlossen bleiben.

2. Gebäude mit passiver Kühlung

Die passive Kühlung umfasst alle Maßnahmen, um solare und interne Wärmelasten zu reduzieren und die verbleibenden Wärmegewinne so in der Gebäudemasse zu speichern, dass sie allein durch freie Nachtlüftung, d. h. Fensterlüftung, abgeführt werden können. In den fünf untersuchten Gebäuden ist oft nur eine einseitige Fensterlüftung möglich. Der tatsächliche freie Luftwechsel variiert von Tag zu Tag und von Ort zu Ort und überschreitet oft 2 h^{-1} in den nördlichen Sommerklimazonen und erreicht selten Werte

über $1,8 \text{ h}^{-1}$ in den südlichen Sommerklimazonen. Diese Gebäude werden ebenfalls nach dem *adaptiven Komfortmodell* [17] bewertet.

3. Gebäude mit luftgeführter, maschineller Kühlung

Eine Lüftungsanlage gewährleistet eine gute Raumluftqualität und kann zur maschinellen Nachtlüftung eingesetzt werden. Die Nachtlüftung wird in der Regel dann betrieben, wenn die Raumtemperatur 21 °C überschreitet und gleichzeitig die Außentemperatur mindestens 2 K unter der Abluft- bzw. mittleren Raumtemperatur liegt. Luftwechselraten liegen typischerweise in einem Bereich von 2 bis 4 h^{-1} . Die Anwendung eines adaptiven Komfortmodells für die Bewertung des thermischen Raumkomforts in Gebäuden mit maschinellern Nachtlüftungskonzept erscheint angebracht [2]. Nach diesem Modell tolerieren die Mitarbeiter höhere Raumtemperaturen bei höheren Außentemperaturen. Jedoch ist bei Raumtemperaturen über 27 °C mit einem deutlichen Rückgang der Nutzerzufriedenheit zu rechnen. Langfristige Nutzerbefragungen [2] in einem Bürogebäude mit Nachtlüftungskonzept und die daraus ermittelte Komforttemperatur bestätigen das *adaptive Komfortmodell* [17]. Die Untersuchung zeigt, dass sich Nutzer den Raum- und Außentemperaturbedingungen anpassen, indem sie bei steigenden Temperaturen im Laufe des Tages Maßnahmen ergreifen, um ihr Temperaturempfinden positiv zu beeinflussen. Dies setzt voraus, dass Nutzer Möglichkeiten haben, auf den Raumkomfort Einfluss zu nehmen. In der vorliegenden Studie werden 10 Bürogebäude mit einem maschinellern Nachtlüftungskonzept bewertet, d. h. Konzepte mit Abluft- oder Zu- und Abluftanlagen.

4. Gebäude mit wassergeführter, maschineller Kühlung

Thermoaktive Bauteilsysteme (TABS) sind Rohrregister, die in Bauteile der Gebäudestruktur integriert werden. Bei der Betonkerntemperierung (BKT) werden die Rohrregister direkt in den Betonkern der Decken bzw. Fußböden eingegossen. Oberflächennahe Systeme werden dagegen als Kapillarrohrmatten in den Deckenputz eingebracht oder als Randstreifenelemente oberflächennahe in der Betondecke verlegt. Der Vorteil von thermoaktiven Bauteilsystemen ist, dass man aufgrund der großen Kälte übertragenden Fläche bereits mit sehr kleinen Temperaturdifferenzen zwischen Decken- und Raumtemperatur effektiv kühlen kann. Die Kühlwassertemperaturen werden auf einen Temperaturbereich von 16 bis 22 °C begrenzt und begünstigen so den Einsatz von Umweltwärmesenken. Im Sommer wird oft ausschließlich das Erdreich bzw. das Grundwasser als natürliche Umweltwärmesenke zur direkten Kühlung (Einsatz eines Wärmetauschers) der Gebäude genutzt, sodass lediglich Hilfsenergie zur Verteilung der Kühlenergie, nicht aber zu deren Erzeugung, aufgewendet werden muss. Dies ermöglicht die Bereitstellung von Klimakälte mit hoher Energieeffizienz – eine korrekte Auslegung, Installation und Betrieb der Geothermie- und Anlagensysteme vorausgesetzt [14]. Das Erdreich und das Grundwasser sind von der Außentemperatur weitgehend unabhängige Wärmesenken, die es ermöglichen, Gebäude auch bei höheren Außentemperaturen effektiv zu kühlen. Aufgrund der begrenzten Leistungsfähigkeit der Betonkerntemperierung ist ein integral geplantes Gebäudekonzept (optimale Abstimmung von Architektur, Bauphysik

und Gebäudetechnik) mit konsequenter Begrenzung der Kühllast Voraussetzung für deren Einsatz. Im stationären Zustand werden durch thermoaktive Bauteilsysteme Kühlleistungen von 30 bis $40 \text{ W}_{\text{therm}}/\text{m}^2$ erreicht. Nach oben ist die Kühlleistung durch den Taupunkt der Raumlufttemperatur begrenzt, da sich andernfalls Tauwasser an der Decke bildet. Der Taupunkt liegt bei etwa 15 °C für 26 °C Raumlufttemperatur und 50% relative Luftfeuchte. Oberflächennahe System (Kapillarrohrmattensystem, oberflächennahe Betonkerntemperierung, abgehängte Kühlpaneele) können unter entsprechenden Betriebsbedingungen Kühlleistungen von 70 bis $100 \text{ W}_{\text{therm}}/\text{m}^2$ erreichen. Untersuchung zur Nutzerzufriedenheit [2] in diesen Gebäuden bestätigen die Komfortanforderungen des *PMV-Komfortmodells* [17]. Die meisten der 17 untersuchten Gebäude verfügen über eine Kühlung mittels TABS. In drei Gebäuden werden abgehängte Kühlpaneele eingesetzt. Im Großteil der Gebäude wird zusätzlich die Zuluft für den hygienischen Frischluftbedarf mittels direkter Kühlung über die Umweltwärmesenke (in der Regel Luft-Wasser-Wärmetauscher) etwas gekühlt. Die Kältebereitstellung für die wassergeführte Kühlung erfolgt in den meisten Gebäuden primär mittels direkter Kühlung über die entsprechende Umweltwärmesenke. In Zeiten erhöhter Bedarfsanforderung kann in 8 Gebäuden zusätzlich aktiv Kälte mittels einer reversiblen Wärmepumpe bzw. Kältemaschine bereitgestellt werden.

5. Gebäude mit Mixed-Mode-Kühlung

„Mixed-Mode“-Kühlung beschreibt ein hybrides Lüftungs- und Kühlkonzept, bei dem Gebäude bzw. Räume bei zulässigen Außenbedingungen mittels freier Lüftung über Fenster oder Lüftungsklappen (manuelle oder automatische Ansteuerung) konditioniert werden. Zusätzlich werden Räume in Zeiten einer erhöhten Bedarfsanforderung mittels dezentraler oder zentraler Klimaanlage gekühlt und die Zuluft wird in der Regel entfeuchtet [12], [13]. Teilweise wird in den Gebäuden automatisch über implementierte Betriebsalgorithmen zwischen passiver Kühlung und Teil-/Vollklimatisierung geschaltet. Besonders in den USA gibt es Bestrebungen, dieses Konzept umzusetzen. Die zwei für diese Kategorie untersuchten Beispielgebäude in Griechenland und Rumänien werden vorrangig und wenn möglich mittels Nachtlüftung gekühlt. In Zeiten erhöhter Bedarfsanforderungen wird unterstützend über dezentrale Kühlaggregate gekühlt. Das Monitoring in den Gebäuden erlaubt es leider nicht, die Referenzräume nach Betriebszeiten und den jeweiligen Betriebsmodi (Nachtlüftung und/oder aktive Kühlung) zu analysieren. In der vorliegenden Studie werden die zwei Demonstrationsgebäude nach dem *adaptivem Komfortmodell* [17] bewertet.

6. Gebäude mit Teil-/Vollklimatisierung

Zwei der untersuchten Demonstrationsgebäude werden mit einer Klimaanlage aktiv gekühlt. Die Zuluft wird dabei im Sommer entfeuchtet. Die Bewertung des thermischen Raumkomforts erfolgt nach dem *PMV-Komfortmodell* [17].

4 Feldmessungen und Messdatenauswertung

In den untersuchten Gebäuden wurden Daten zur operativen Raumtemperatur und relativen Raumluftfeuchte in

Tabelle 1. Untersuchte Gebäude: Verhältnis Hüllfläche zu Volumen (A/V), Kühlturm (CT), wassergeführte, abgehängte Kühlpaneele (CP), Sonnenschutz im SZR des Fensters (b), außen (e), innen (i), Sanierung (r), Woche (W), Jahr (J), maschinelle Lüftung (m), Nachtlüftung (NL), Wärmerückgewinnung (WRG), Spalte „Kältebereitstellung“ kennzeichnet die thermische Kälteleistung der Kälteerzeuger [kWh_{therm}/m²·net·a], z. B. Kompressionskältemaschine und Umweltwärmesenke und Umweltschlammmaschine und Umweltschlammmaschine für Kältebereitstellung und -erzeugung [kWh_{therm}/m²·net·a], aber ohne Berücksichtigung der Hilfsenergie im Gebäude (d. h. keine Berücksichtigung der Stromaufwand für Kompressor und Primärpumpen) [kWh_{therm}/kWh_{end}] für Kältebereitstellung durch Umweltwärmesenke und rev. Wärmepumpe/Kältemaschine (d. h. berücksichtigt Stromaufwand für Kompressor und Primärpumpen) Table 1. Information on studied buildings. Area-to-volume ratio (A/V), cooling tower (CT), water-based, ceiling-suspended cooling panel (CP), shading device between the glass panes (b), exterior (e), interior (i), retrofit (r), weeks (W), years (J), mechanical ventilation (m), night ventilation (NL). Values in the section “Kältebereitstellung” (cooling) indicate the thermal cooling power [kWh_{therm}] of the compression chiller and the environmental heat sinks, energy use for cooling [kWh_{therm}/m²·net·a], final energy demand for cooling [kWh_{end}/m²·net·a], annual performance factor (JAZ) indicating the efficiency of cooling generation (thermal cooling energy use related to electricity use for compressor or heat pump and primary pumps)

Gebäude	GEBÄUDE UND BAUPHYSIK										MONITORING										KÄLTEÜBERGABE						KÄLTEERZEUGUNG						LÜFTUNG				BETRIEBSANALYSE	
	Ort	Errichtung	saniert (r)	NGF [m ²]	U Wert AW [W/m ² ·K]	U Wert Fenster [W/m ² ·K]	g Wert Fenster	A/V [m ⁻¹]	Fenster zu Fassade [%]	Verschattung	Referenzraum	Zeitraum	Konvektor	TABS	CP	Luft	KM WP	Fernkälte	Splitgerät	Erdrreich	Luft	frei	m	NL	WRG [%]	Nutzkältebezug [kWh/m ² ·a]	Endenergiebezug [kWh/m ² ·a]	JAZ										
OHNE KÜHLUNG (7)																																						
AA	GER	n/k	r	n/k	1,4	0,6	n/k	60	i	1	2W										x	x			keine													
AB	GER	n/k	r	11,915	0,26	0,58	n/k	32	n/k	1	2W										x	x			keine													
AC	GER	1996		1,000	0,47	0,6	0,55	70	e	5	4J										x	x			keine													
AD	GER	1975	r	290	0,16	0,6	n/k	n/k	e	2	7W										x	x			keine													
AE	GER	1970		4,032	0,6	0,77	0,3	40	e	2	4W										x	x			keine													
AF	GER	n/k	r	n/k	0,5	0,78	n/k	50	i	6	2W										x	x			keine													
AG	GER	1960		4,243	0,53	0,7	0,29	40	n/k	2	2W										x	x			keine													
PASSIVE KÜHLUNG (5)																																						
AH	CZE	2005		250	0,2	0,7	0,4	20-80	i	1	1J										x	x			keine													
AI	FRA	2005		3,900	0,45	n/k	0,1	40	i	9	1J										x	x			55													
AJ	GER	2001		13,150	0,23	0,58	0,31	25-55	e	5	2J										x	x			keine													
AK	GER	n/k		n/k	0,45	0,34	n/k	54	b	1	1W										x	x			keine													
AL	GER	1953	r	30,570	0,61	0,7	0,23	70	i+e	14	3J										x	x			keine													
LUFTGEFÜHRTE KÜHLUNG (10)																																						
AM	GER	1999		5,974	0,5	0,6	0,27	31	e	9	3J										x	x			65													
AN	GER	1950	r	986	0,14	0,52	0,49	20	i	1	3J										x	x			80													
AO	GER	2001		13,150	0,23	0,58	0,31	25	e	16	2J										x	x			46													
AP	GER	2002		8,762	0,35	0,4	0,7	31	e	20	6J										x	x			keine													
AQ	GER	1999		1,000	0,2	0,6	0,40	44	e	2	3J										x	x			80													
AR	GER	2001		3,510	0,2	0,6	0,32	51	e	1	2J										x	x			keine													
AS	GER	1968		2,544	0,46	0,64	0,32	n/k	e	2	4J										x	x			36													
AT	GER	2003		13,833	0,19	0,6	0,29	49	e	42	5J										x	x			keine													
AU	GER	2002		8,120	0,2	0,5	0,6	n/k	e	7	2J										x	x			80													
AV	GER	2000		4,113	0,22	0,58	0,25	13-55	e	6	1J										x	x			68													
WASSERGEFÜHRTE KÜHLUNG (16)																																						
AW	GER	2002		2,151	0,17	0,80	0,5	37-49	i	9	3J										x	x			75													
AX	DEN	2002		21,199	0,20	1,12	0,58	3	i	5	1J										CT	x			70													
AY	GER	2008		2,500	0,21	1,0	n/k	n/k	e	22	3J										15	x			73													
AZ	GER	2007		4,878	0,20	1-1,4	0,58	3	e	11	2J										88	CT	x		75													
BA	GER	1976	r	7,640	0,46	1,6	n/k	30	e	3	2J											x			keine													
BB	GER	1978	r	1,100	0,30	1,4	0,55	27-40-80	e	3	3J										10	x			60													
BC	GER	2002		6,911	0,13	0,84	0,5	22-48	e	20	2J										140	x			65													
BD	FIN	2005		6,900	0,22	1,1	0,38	n/k	i+e	12	1J											x			80													
BE	GER	2004		10,650	0,20	1,3	0,55	3	e	2	2J										250	x			70													
BF	GER	2008		4,327	0,21	1,5	0,5	29-95	e	22	3J										20	x			n/k													
BG	ITA	2007		752	0,34	1,4	0,6	20	e	3	1J										x				52													
BH	GER	2011		6,352	0,32	n/k	n/k	n/k	i	21	1J											CT	x		n/k													
BI	GER	2009		19,500	n/k	n/k	n/k	n/k	e	100	1J										100	x			n/k													
BJ	GER	2009		4,500	0,53	1,1	0,5	n/k	e	14	1J											CT	x		n/k													
BK	GER	2007		2,264	n/k	n/k	0,5	n/k	e	25	3J											n/k	x		n/k													
BL	GER	2001		1,347	0,11	0,8	0,6	34-85	e	22	2J										10	x			73													
MIXED-MODE KÜHLUNG (2)																																						
BM	GRE	1995		600	0,28	2,7	0,7	20-80	i+e	9	1J											x			keine													
BN	ROU	1940		292	0,82	2,5	0,42	30-40	e	4	1J											x			keine													
VOLLKLIEMATISIERUNG (2)																																						
BO	GER	2000		6,880	0,2	1,3	0,6	n/k	e	87	2J														90													
BP	GER	86/92		10,984	n/k	n/k	0,39	n/k	e	9	2J											CT	x															

zeitlich hoher Auflösung (Zeitschrittweite: 5 bis 12 Minuten) raumweise bzw. am Arbeitsplatz erhoben und über die Gebäudeleitsysteme zur Verfügung gestellt. Zusätzlich stehen in vielen Gebäuden Werte zum Kälte- und Strombezug sowie anlagentechnischen Parametern (Systemtemperaturen, Betriebszeiten, etc.) zur Verfügung. In einigen Gebäuden (vor allem die Demonstrationsgebäude ohne Kühlvorrichtungen) wurden Feldmessungen mit mobiler Messtechnik über mehrere Wochen im Sommer durchgeführt, in denen teilweise neben den Raumkomfortparametern auch das Nutzerverhalten (Öffnen/Schließen von Fenstern und Sonnenschutz) und bauphysikalische Eigenschaften des Raumes (Oberflächentemperaturen, thermische Wirksamkeit der Lüftung, Luftgeschwindigkeiten an Lüftungsein- und -auslässen, etc.) erfasst wurden. Daten zum Wetter wurden lokal am Gebäudestandort – in wenigen Messprojekten an einer entfernter liegenden Wetterstation – gemessen: Außentemperatur, Solarstrahlung, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Windrichtung.

Der thermische Raumkomfort in Nichtwohngebäuden wird nach [17] bewertet, die gemäß dem implementierten Kühlkonzept zwei Komfortmodelle definiert: adaptives und PMV-Modell. Gemäß der definierten Komfortnorm berücksichtigt die standardisierte Auswertung der Messkampagnen folgende Randbedingungen:

Nutzungszeiten

Der thermische Raumkomfort wird ausschließlich während der Anwesenheitszeit der Nutzer bewertet, z. B. werktags von 8:00 bis 19:00 Uhr. Feiertage und Urlaubszeiten werden nicht gesondert berücksichtigt. Die individuelle Anwesenheit der einzelnen Nutzer am Arbeitsplatz wurde nicht erfasst.

Gebäudefläche

Im untersuchten Gebäude werden repräsentative Büroräume vermessen, die zur Bewertung des thermischen Komforts im Gebäude herangezogen werden (s. Tabelle 1).

Saisonale Bewertung

Die Bewertung des thermischen Raumkomforts, d. h. die Überschreitungshäufigkeit der definierten Komfortklassen I bis III, erfolgt für die gesamte Sommerperiode und nicht auf Tages- oder Wochenbasis.

Definition Sommerperiode

Die Komfortnorm DIN EN 15251 ist nicht konsistent in der Unterteilung zwischen Winter- und Sommerperiode, d. h. die Definition der Komfortgrenzen für Winter- und Sommer- bzw. Heiz- und Kühlperiode folgt für das adaptive und das PMV-Komfortmodell jeweils nach einem anderen Ansatz. Im PMV-Komfortmodell nach *Fanger* bestimmt der Bekleidungsgrad (clo) des Nutzers die jeweilige Periode (Winter 1,0 clo und Sommer 0,5 clo). Das adaptive Komfortmodell definiert obere Komfortgrenzen in der Sommerperiode für eine gleitende Außenmitteltemperatur von 10 bis 30 °C und untere Komfortgrenzen für einen Temperaturbereich von 15 bis 30 °C. Unterschiedliche Studien auf Basis von Nutzerbefragungen und Messungen zeigen einen deutlichen Zusammenhang zwischen dem Bekleidungsgrad von Nutzern in Büroräumen und dem Tagesmittel bzw. gleitendem Tagesmittel der Außentemperatur. Nied-

rige Tagesmittel der Außentemperatur korrelieren mit clo-Werten von 0,7 bis 1,0 und erhöhte bzw. hohe Tagesmittel der Außentemperatur mit clo-Werten von 0,3 bis 0,5 – ein Bekleidungsgrad von clo 0,7 (typische Bürokleidung mit langem Hemd, aber ohne Jacke) entspricht in etwa einem Tagesmittel der Außentemperatur von 15 °C. Für die Unterscheidung von Winter- zu Sommerperiode wird ein gleitender Tagesmittelwert für die Außentemperatur von 15 °C empfohlen.

Toleranzbereich der Komfortbewertung

In den Büroräumen weicht die gemessene Raumtemperatur während der Anwesenheitszeit der Nutzer in der Sommerperiode um nicht mehr als 5 % von den Grenzwerten der entsprechenden Kategorien I bis III ab.

Komfortklasse für thermischen Raumkomfort

Der Raumkomfort wird entsprechend den definierten oberen und unteren Komfortklassen I bis IV bewertet (Klasse I – hohes Maß an Erwartung, Klasse II – normales Maß an Erwartung, Klasse III – annehmbares, moderates Maß an Erwartung und Klasse IV – Werte außerhalb der definierten Komfortkategorien).

Ergebnisdarstellung

Die Ergebnisse der Messkampagnen werden in einer Komfortgrafik und in einem thermischen „Fußabdruck“ (s. Bilder 5 und 6) dargestellt. In der Komfortgrafik wird gemäß dem geforderten Komfortmodell die mittlere, stündlich gemessene Temperatur der Referenzräume über dem gleitenden Tagesmittel der Außentemperatur dargestellt. Zusätzlich zeigt die Grafik die Raumtemperaturgrenzwerte der Klassen I bis III. Der thermische „Fußabdruck“ zeigt die prozentuale Anwesenheitszeit im Sommer, an der das Gebäude die oberen Grenzwerte der thermischen Komfortkategorien I bis III einhält. Nutzerbefragungen in Gebäuden [2] geben einen Hinweis darauf, dass eine Unterschreitung der in der Norm definierten Komfortgrenzen (21 bis 24 °C) eher unkritisch ist. Raumtemperaturen von 21 bis 24 °C werden als „etwas kühl“ bis „neutral“ empfunden, dennoch ist ein hoher Prozentsatz der Nutzer mit dem thermischen Raumkomfort zufrieden.

5 Ergebnisse aus dem Langzeitmonitoring der Gebäude

5.1 Raumkomfort und Nutzerverhalten

Die Nutzung des Gebäudes, d. h. das Nutzerprofil und die Ausstattung der Büroräume sowie die Anforderungen an den Raumkomfort, müssen in der Planungsphase klar definiert und im Gebäudebetrieb berücksichtigt werden. Denn die Nutzung des Gebäudes und das Nutzerverhalten haben einen entscheidenden Einfluss auf den Raumkomfort und den Energieverbrauch. Bild 1 zeigt gemessene Raumtemperaturen in einzelnen Büroräumen während der Anwesenheit der Nutzer über die gesamte Sommerperiode für jeweils ein Beispielgebäude pro Kühlkonzept. Raumtemperaturen zwischen den einzelnen untersuchten Räumen unterscheiden sich aufgrund interner und solarer Lasten (Belegungsichte pro Raum und Ausrichtung der Fenster) und auf aufgrund des Nutzerverhaltens teilweise erheblich voneinander.

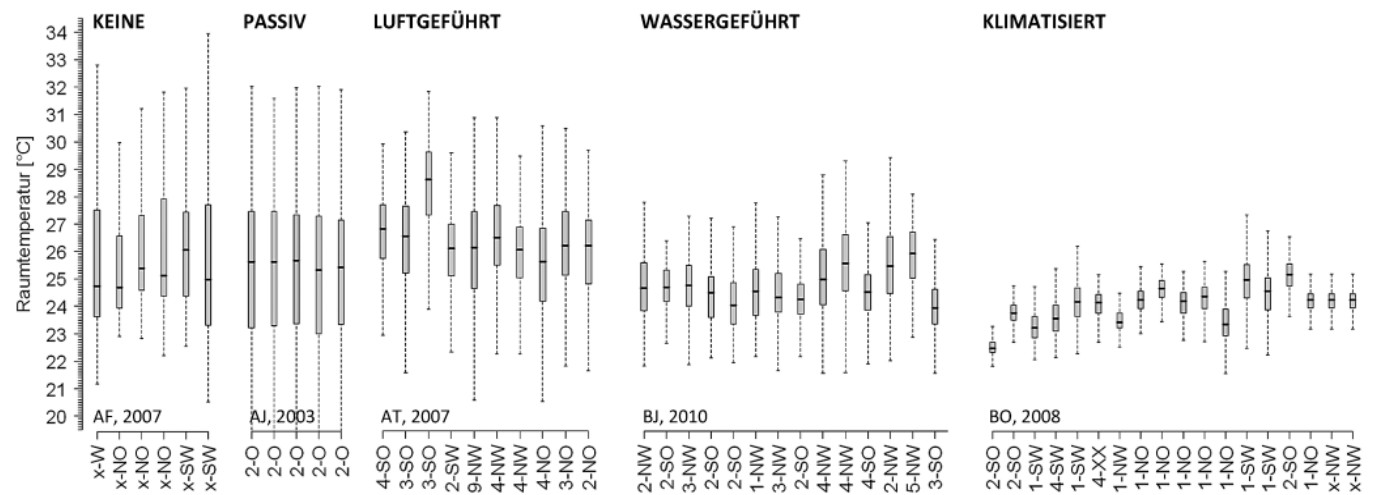
RAUMTEMPERATUREN WÄHREND DER ANWESENHEIT IM SOMMER: DARSTELLUNG FÜR JEDEN BÜROAUM


Bild 1. Operative Raumtemperaturen [°C] in den Büroräumen während der Anwesenheit der Nutzer, dargestellt als Boxplot für die gesamte Sommerperiode für jeweils ein Beispielgebäude pro Kühlkonzept; zusätzlich Anzahl der Personen pro Büroraum während der Messung und Fensterausrichtung; Anmerkung: (1) Raumbelegung beim Gebäude ohne Kühlung nicht vorhanden, (2) beim Gebäude ohne Kühlung nur Kurzzeitmessung über zwei Wochen

Fig. 1. Operative room temperatures [°C] of the particular offices during occupancy of users, illustrated as boxplot for the entire summer season –one case study building per cooling category; additionally given is the number of occupants per room during the period of monitoring and the geographical orientation of the windows; Note: (1) information on the occupancy of the building without cooling is not available, (2) short-term monitoring campaigns of two weeks only for the building without cooling

Im Gebäude ohne Kühlvorrichtung liegen die maximal gemessenen Raumtemperaturen zwischen 30 und sogar 34 °C. Auch die Mittelwerte (Median) der Raumtemperaturen für die einzelnen Gebäude unterscheiden sich um mehr als 1 K über die gesamte Sommerperiode. Ähnlich stellt es sich bei den Gebäuden mit luft- und wassergeführter maschineller Kühlung dar. Beim Gebäude mit luftgeführter Kühlung, d. h. maschinelles Nachtlüftungskonzept, liegen die Mittelwerte der Raumtemperaturen zwischen 25,5 und 27,0 °C. Ein Büroraum in Südostausrichtung ist durch deutlich erhöhte Raumtemperaturen gekennzeichnet (Median 28,5 °C).

Beim Gebäude mit wassergeführter Kühlung (hier Betonkerntemperierung) schwanken die Raumtemperaturen geringfügiger als im Gebäude mit luftgeführter Kühlung; die mittleren 50 % der gemessenen Tagesamplituden schwanken in den einzelnen Räumen zwischen 1 und 2 K. Unterschiede zwischen den Temperaturen der einzelnen Büros sind etwas geringer ausgeprägt, aber auch hier haben offensichtlich Belegungsdichte und Raumausrichtung und damit unterschiedliche interne und solare Lasten einen Einfluss auf die Raumtemperaturen. Die Mittelwerte der Raumtemperaturen über die gesamte Sommerperiode liegen zwischen 24 und 26 °C.

Selbst im Gebäude mit Vollklimatisierung gibt es Unterschiede zwischen den einzelnen Büroräumen, die auf das Nutzerverhalten bzw. die vom Nutzer eingestellten Raumsolltemperaturen zurückgeführt werden können. Die Schwankungen der Raumtemperaturen liegen aber in einem engen Band von 23,5 bis 25 °C. In diesem Gebäude hat der Nutzer keine Möglichkeit, das Fenster zu öffnen, kann aber den außen liegenden Sonnenschutz manuell einstellen und individuell die Raumsolltemperaturen durch einen Temperaturregler vorgeben.

Lediglich im Gebäude mit passiver Kühlung ist das Verhalten der Raumtemperaturen in den fünf Räumen nahezu identisch. Diese Räume werden als 2-Personenbüros genutzt und sind alle nach Osten ausgerichtet. Zudem wird hier versucht, interne und solare Lasten konsequent zu begrenzen (individuelle Arbeitsplatzbeleuchtung mittels Stehleuchten, Tageslichtnutzung durch Oberlichter und geteilten Sonnenschutz, entsprechende Drucker- und Kopierräume).

Nach der Realisierung oder Sanierung des Gebäudes sollten die Nutzer über das Gebäude- und Energiekonzept informiert werden und verständliche Hinweise erhalten, wie sie sich verhalten sollen bzw. können, um einen hohen Raumkomfort bei niedrigem Energieverbrauch und -kosten sicherzustellen. Überzeugende Gebäudekonzepte zeichnen sich dadurch aus, dass dem Nutzer in großem Umfang Einfluss ermöglicht wird, denn die Nutzerzufriedenheit mit dem Raumkomfort erhöht sich nachweislich durch die Möglichkeiten zur effektiven Einflussnahme auf Raumbedingungen. Daneben hat aber auch die Erwartungshaltung des Nutzers an Raum- und Komfortbedingungen einen entscheidenden Einfluss auf das Empfinden und die Zufriedenheit: Informierte Nutzer erwarten in Gebäuden mit Nachtlüftung höhere Raumtemperaturen und akzeptieren diese auch. Im Gebäude mit wassergeführter Kühlung hat der Nutzer eine höhere Erwartungshaltung an den Raumkomfort und ist mit höheren Raumtemperaturen somit unzufriedener [2].

5.2 Raumtemperaturen und thermischer Raumkomfort

Ergebnisse zu gemessenen Raumtemperaturen und thermischen Raumkomfort nach [17] werden wie folgt dargestellt:

Operative Raumtemperaturen

Bild 2 zeigt die gemessenen Raumtemperaturen aller Gebäude während der Sommerperiode (gleitendes Tagesmittel der Außentemperatur größer 15 °C), dargestellt als Boxplots. Die untersuchten Gebäude sind nach dem jeweiligen Kühlkonzept gruppiert. Weiterhin wird in Bild 5 exemplarisch für zwei Büroräume pro Kühlkonzept der Tages- und

Wochenverlauf der Raumtemperaturen während einer heißen Sommerperiode aufgezeigt.

Schwankungen der operative Raumtemperatur

Bilder 3 und 4 stellen die täglichen Schwankungen der operativen Raumtemperatur [K] zur Anwesenheit der Nutzer im Sommer dar. In Bild 3 werden die Messwerte als Box-

RAUMTEMPERATUREN WÄHREND DER ANWESENHEIT IM SOMMER

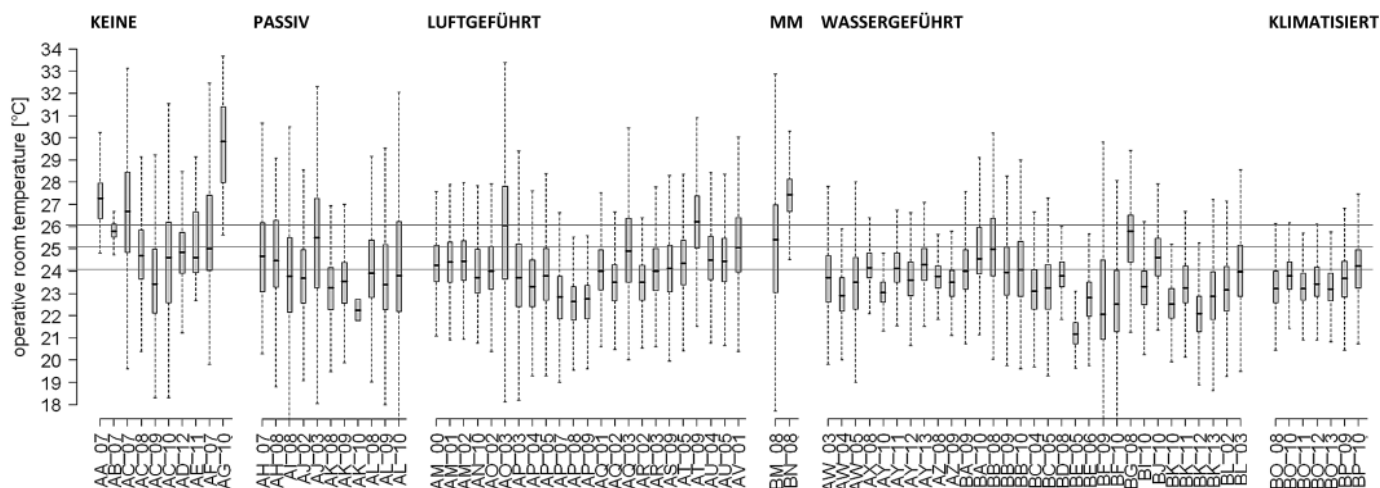


Bild 2. Operative Raumtemperaturen während der Anwesenheit im Sommer [°C], dargestellt als Boxplots; Gebäude sind nach dem jeweiligen Kühlkonzept kategorisiert. Das Boxplot stellt folgende Größen dar: Median (durchgezogene Linie), 50 % der mittleren Werte (Rechteck) sowie maximale und minimale Werte (gestrichelte Linie); Kühlkonzepte: keine Kühlung, passive Kühlung, luftgeführte maschinelle Kühlung, wassergeführte maschinelle Kühlung, Mixed-mode-Kühlung und Teil-/Vollklimatisierung

Fig. 2. Operative room temperatures during occupancy in summer [°C] given as boxplots; buildings are grouped in accordance with the building categories introduced. Further given values are the median (solid line), the 75th and the 25th percentiles (grey rectangle). Building categories: no cooling, passive cooling, air-based mechanical cooling, water-based mechanical cooling, mixed-mode cooling, and air-conditioning

SCHWANKUNGEN DER RAUMTEMPERATUR WÄHREND DER ANWESENHEIT IM SOMMER

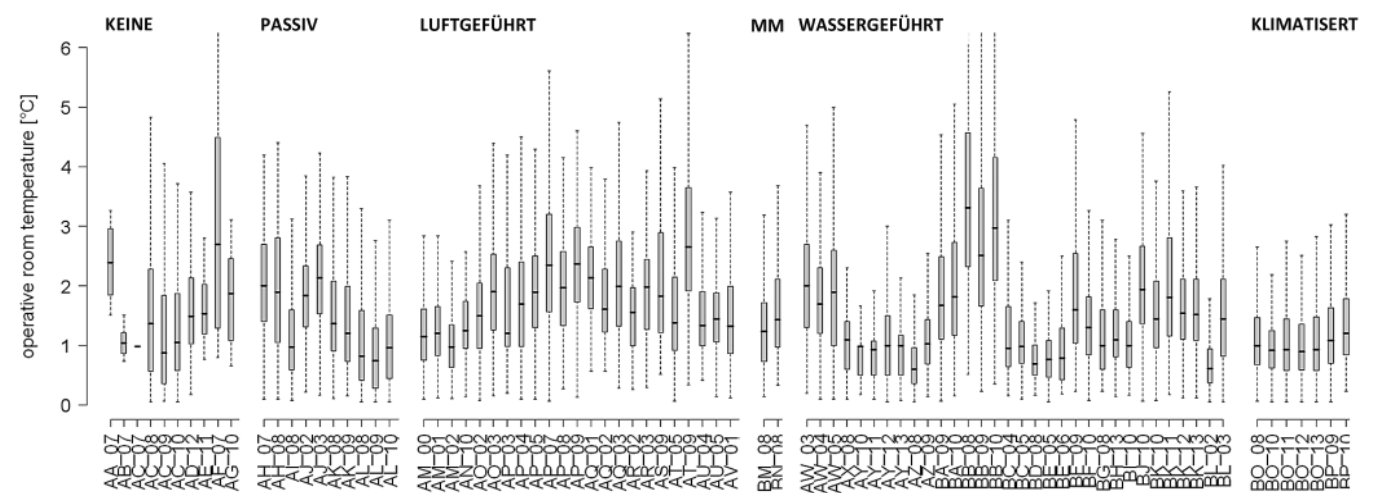


Bild 3. Schwankungen der operativen Raumtemperaturen während der Anwesenheit im Sommer [K] dargestellt als Boxplots (alle Räume pro Gebäude). Gebäude sind nach dem jeweiligen Kühlkonzept kategorisiert. Das Boxplot stellt folgende Größen dar: Median (durchgezogene Linie), 50 % der mittleren Werte (Rechteck) sowie maximale und minimale Werte (gestrichelte Linie). Kühlkonzepte: keine Kühlung, passive Kühlung, luftgeführte maschinelle Kühlung, wassergeführte maschinelle Kühlung, Mixed-Mode Kühlung und Teil-/ Vollklimatisierung.

Bild 3. Measured temperature drifts in summer during occupancy [K] given as boxplots (all rooms per building are considered). Buildings are grouped in accordance with the building categories introduced. Further given values are the median (solid line), the 75th and the 25th percentiles (grey rectangle). Building categories: no cooling, passive cooling, air-based mechanical cooling, water-based mechanical cooling, mixed-mode cooling, and air-conditioning

SCHWANKUNGEN DER RAUMTEMPERATUREN WÄHREND DER ANWESENHEIT IM SOMMER

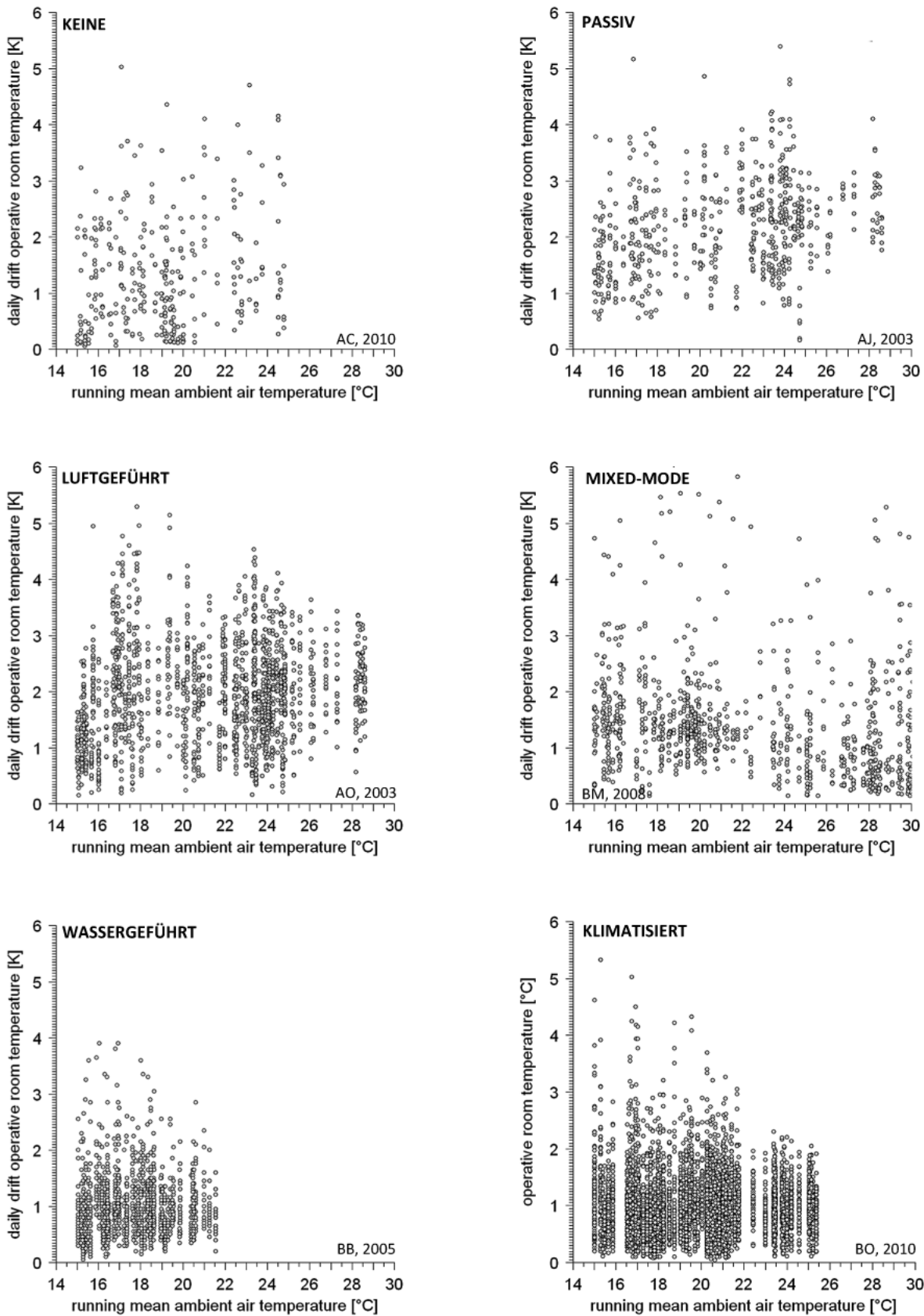


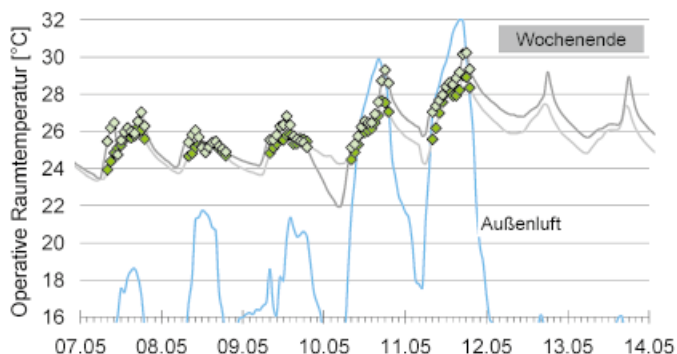
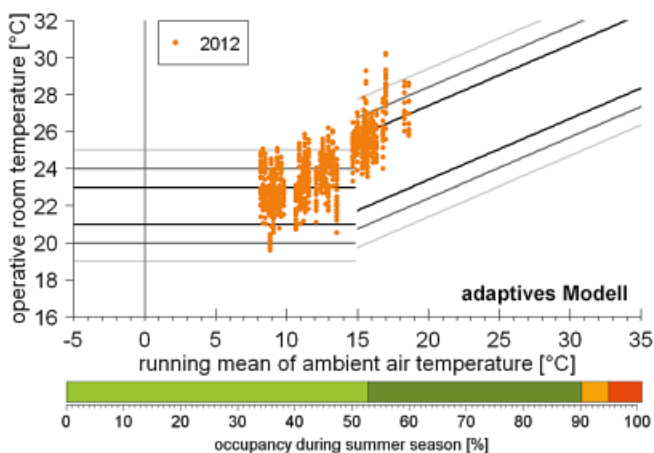
Bild 4. Schwankungen der operativen Raumtemperaturen während der Anwesenheit im Sommer [K], aufgetragen über dem gleitenden Tagesmittel der Außentemperatur für alle vermessenen Räume pro Gebäude. Darstellung für ausgewählte Gebäude pro Kühlkonzept. Berechnung des gleitenden Tagesmittels der Außentemperatur [°C] nach [17]
 Fig. 4. Measured temperature drifts in summer during occupancy [K], portrayed over the running mean ambient air temperature [°C] (all measured rooms per building). Results are presented for one case study building per cooling category. Calculation of daily running mean of ambient air temperature in accordance with [17]

plot dargestellt, d. h. Raumtemperaturamplituden aller vermessenen Räume pro Gebäude. In Bild 4 sind exemplarisch für ausgewählte Gebäude die täglichen Raumtemperaturschwankungen über dem gleitenden Tagesmittel der Außentemperatur [°C] dargestellt.

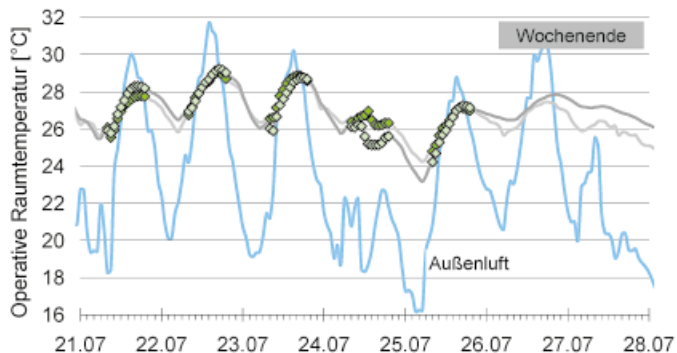
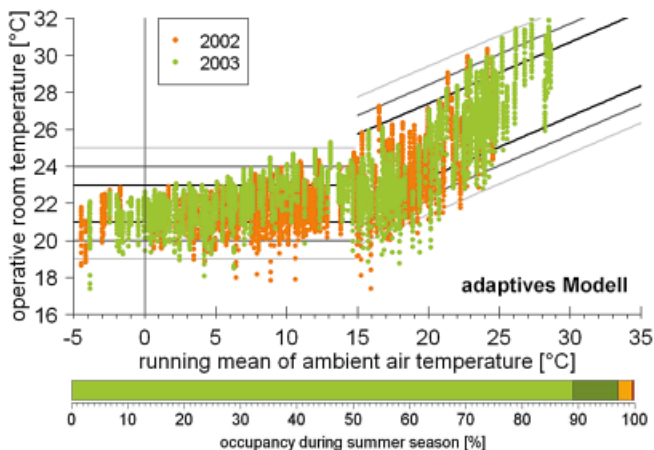
Komfortgrafik

Bild 5 stellt den thermischen Raumkomfort während der Anwesenheit der Nutzer im Sommer exemplarisch für ein Demonstrationsgebäude pro Kühlkonzept da. Dabei wird die stündliche operative Raumtemperatur während der An-

KEINE KÜHLUNG



PASSIVE KÜHLUNG



LUFTGEFÜHRTE KÜHLUNG

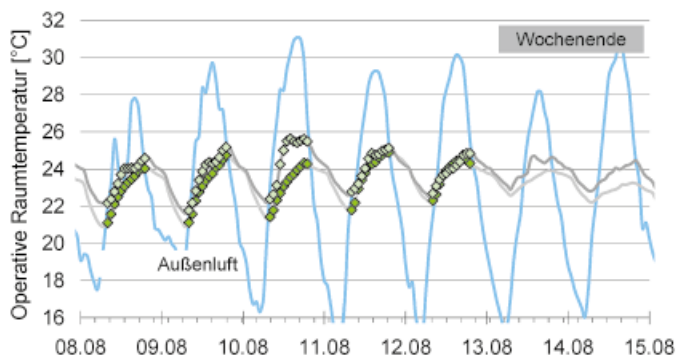
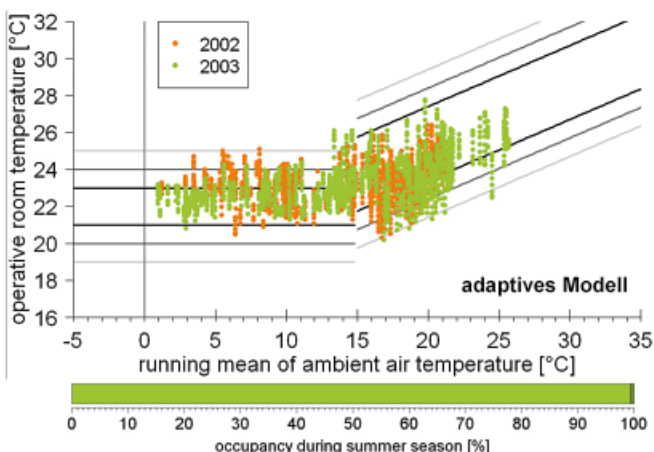


Bild 5. Thermischer Raumkomfort während der Anwesenheit der Nutzer im Sommer, exemplarisch dargestellt für ein Gebäude pro Kühlkonzept. Links: stündliche operative Raumtemperatur [°C] während der Anwesenheit der Nutzer, dargestellt über dem gleitenden Tagesmittel der Außentemperatur [°C], rechts: stündliche operative Raumtemperatur [°C] für zwei Referenzräume sowie Außentemperatur für eine warme Sommerwoche. Die Anwesenheitszeit ist durch farbige Rauten gekennzeichnet.

Fig. 5. Results on thermal comfort are given for one building per category. Left: hourly operative room temperatures [°C] during occupancy are portrayed above the running mean ambient air temperature [°C]. Results are given for up to two operation years. Adaptive-comfort approach for buildings without, with passive, air-based and mixed-mode cooling. PMV-comfort approach for buildings with water-based cooling and air-conditioning. Right: hourly room temperatures for two reference rooms and the prevailing ambient air temperature is given for one hot summer week. Time of daily occupancy is indicated by markers

wesenheit der Nutzer über dem gleitenden Tagesmittel der Außentemperatur aufgetragen. Die Auswertung wird – sofern vorhanden – für zwei Betriebsjahre vorgestellt (für die Zuordnung zum entsprechenden Komfortmodell, s. Abschn. 3).

Thermischer Raumkomfort

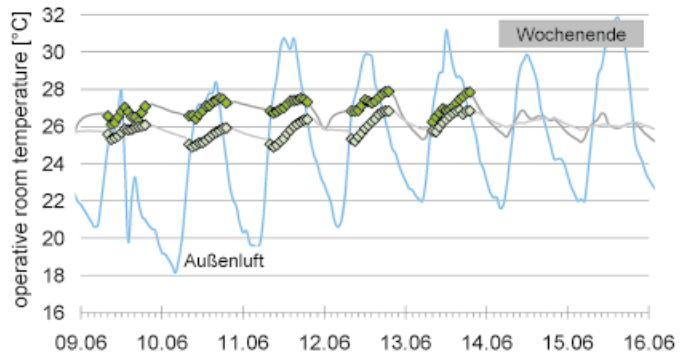
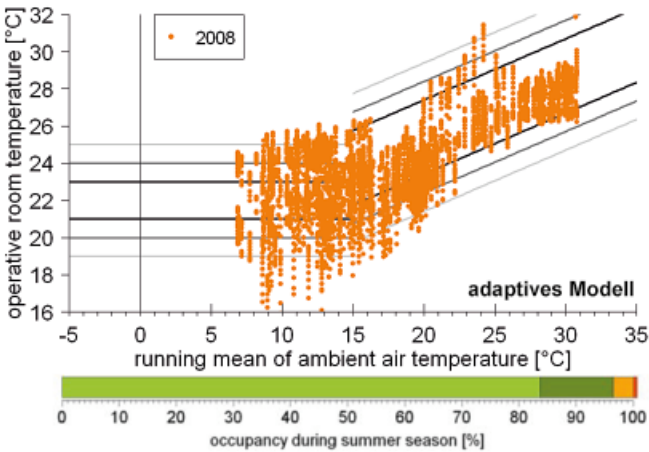
Bild 6 zeigt abschließend Auswertungen zum thermischen Raumkomfort nach [17] aller Gebäude während der Anwesenheit der Nutzer im Sommer. Dargestellt ist die prozen-

tuale Anwesenheitszeit [%], wenn das entsprechende Gebäude die Anforderung der definierten Komfortklassen I bis III erfüllt. Dargestellt ist ausschließlich die Überschreitung der oberen Komfortgrenzen (für Zuordnung zum entsprechenden Komfortmodell, s. Abschn. 3).

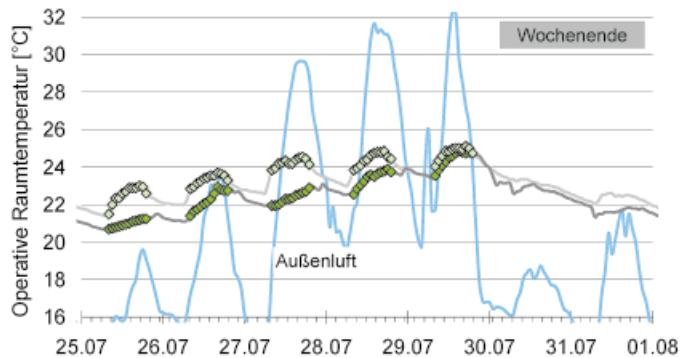
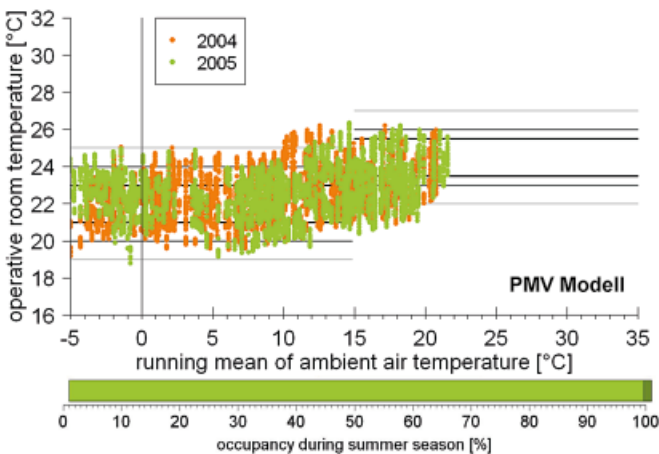
Gebäude ohne Kühlung

Bei den untersuchten Gebäuden liegen bis auf ein Gebäude nur Kurzeitmessungen über zwei bis vier Wochen vor. Damit lassen sich diese Messergebnisse nicht in den

MIXED-MODE-KÜHLUNG



WASSERGEFÜHRTE KÜHLUNG



VOLLKLIMATISIERUNG

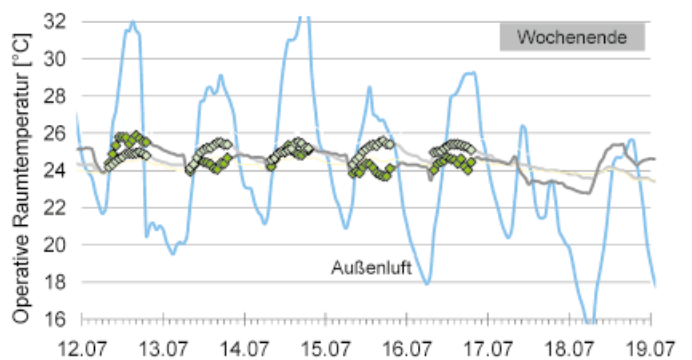
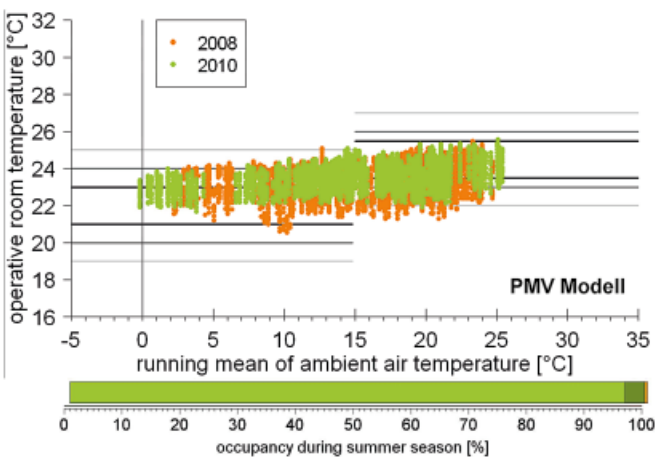
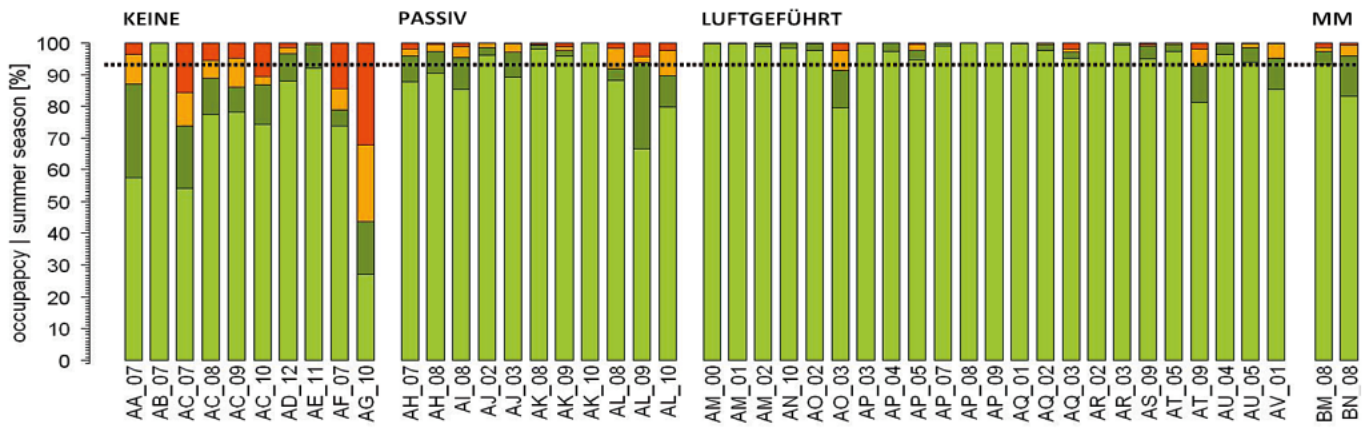


Bild 5. Fortsetzung
Fig. 5. Continue

BEWERTUNG NACH DIN EN 15251: ADAPTIVES KOMFORTMODELL



BEWERTUNG NACH DIN EN 15251: PMV KOMFORTMODELL

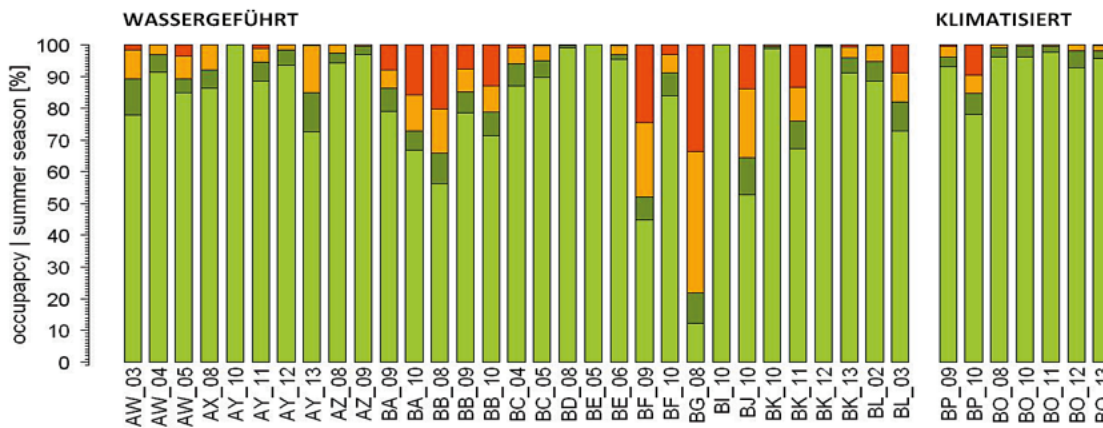


Bild 6. Thermischer Raumkomfort während der Anwesenheit der Nutzer im Sommer für alle Gebäude nach [17] (ausschließlich Überschreitung der oberen Komfortgrenzen). Dargestellt ist die prozentuale Anwesenheitszeit [%], wenn die Anforderungen der Komfortklassen I (hellgrün), II (dunkelgrün), III (orange) und IV (rot) erfüllt sind. Methodik der Komfortbewertung nach Darstellung in Abschn. 4. Bewertung nach adaptivem Komfortmodell: Gebäude ohne Kühlung, mit passiver und luftgeführter Kühlung. Bewertung nach PMV-Komfortmodell: Gebäude mit wassergeführter Kühlung und Vollklimatisierung Fig. 6. Thermal comfort footprint for all demonstration buildings. This figure shows the time of occupancy [%] during summer season when the comfort requirements of classes I, II, and III are achieved in accordance with the adaptive- or PMV-comfort approach of the EN 15251 standard. Only exceedance of upper comfort limits is considered. Dashed line indicates 95 % of time of occupancy. Legend: comfort class I (light green), II (dark green), III (orange), and outside the defined comfort classes (red)

direkten Vergleich mit den Langzeitmessungen der anderen Gebäude stellen. Dennoch wird deutlich, dass die operativen Raumtemperaturen während der Anwesenheit der Nutzer sehr hoch sind; die Mittelwerte liegen über 25 °C und die maximalen Temperaturen liegen in einem Bereich von 29 bis 34 °C. Während der Messperiode wird nur die Komfortklasse III des adaptiven Komfortmodells in 75 bis 95 % der Anwesenheitszeit erreicht. Im unsanierten Gebäude (AG) aus den 60er Jahren liegen die gemessenen Raumtemperaturen im Mittel sogar zwischen 28 und 31 °C, so dass in der Messperiode die Komfortklasse III nur zu 65 % der Anwesenheit erreicht wird. Im Allgemeinen sind die Gebäude ohne ausreichenden sommerlichen Wärmeschutz und ohne Kühlmaßnahmen eng an das Außenklima gekoppelt. Operative Raumtemperaturen steigen relativ schnell während warmen Sommerperioden. Die Tagesamplituden der Raumtemperaturen während der Anwesenheitszeit betragen mitunter über 4 K. Sogar während moderaten Au-

ßentemperaturen mit einem gleitenden Tagesmittel zwischen 18 und 22 °C werden in diesen Gebäuden vergleichsweise hohe Raumtemperaturen erreicht. Außerhalb der Anwesenheit bzw. in den Nachtstunden sinken die Raumtemperaturen nur langsam und geringfügig um 1 bis 2 K, da die Wärmeabfuhr weitestgehend nur mittels Transmission über opake und transparente Bauteile stattfindet.

Gebäude mit passiver Kühlung

Durch die zunehmende Ausstattung der Bürogebäude und die gegebenenfalls dichte Raumebelegung sind in der Sommerperiode relativ hohe Raumtemperaturen zu erwarten. Die Komfortanforderungen der Klasse II nach dem adaptiven Komfortmodell der DIN EN 15251 werden zu 88 bis 98 % der Anwesenheit eingehalten. Die mittleren 50 % der gemessenen Temperaturwerte (s. Boxplot) während der Anwesenheit im Sommer liegen in einem Bereich von 23 bis 27,5 °C. Während sommerlicher Hitzeperioden steigen die

Raumtemperaturen deutlich über 28 °C. Jedoch werden nur bei hohen Außentemperaturen über 30 °C die Komfortanforderungen der Klasse III des adaptiven Komfortmodells sehr selten und an wenigen Stunden verletzt. Weiterhin wird deutlich, dass die Raumtemperaturen bei erhöhten Außentemperaturen sehr schnell ansteigen; die Raumtemperaturen schwanken über der Anwesenheitszeit im Mittel bis zu 3 K pro Tag. Außerhalb der Anwesenheit bzw. in den Nachtstunden sinken die Raumtemperaturen auch nur langsam und geringfügig im Mittel um 1 bis maximal 3 K. Die Wärmeabfuhr in der Nacht mittels freier Nachtlüftung ist zum einen abhängig vom Nutzerverhalten (Öffnen von Fenstern und Klappen) und zum anderen durch die Lüftungseffektivität, d. h. Außentemperaturen, Windverhältnisse und Anströmung der Fassade, effektive Querschnittsöffnung von geöffneten Fenstern und Klappen, Luftströmung in Gebäude (einseitige Fensterlüftung oder Querlüftung). Unerwartet werden in Sommerperioden mit moderaten Außentemperaturen bzw. in der Übergangszeit mit gleitenden Tagesmitteln der Außentemperatur von 15 bis 20 °C die unteren Komfortgrenzen unterschritten, da die freie Lüftung über Fenster und Lüftungsklappen keine „aktive“ Regelung der Raumtemperatur erlaubt. Die Raumtemperaturen fallen jedoch nur sehr selten unter Werte von 20 bis 21 °C.

Passive Kühlung ist nur in Nordeuropa als Kühlkonzept gut geeignet, denn im nordeuropäischen Sommerklima können die verhältnismäßig hohen solaren Wärmegevinne infolge der langen Sonnenscheindauer bei tief stehender Sonne effizient durch die verhältnismäßig kühle Außenluft abgeführt werden. Vorausgesetzt, die Gebäude werden explizit für dieses Konzept unter den spezifischen Bedingungen vor Ort geplant. Dennoch verbessert auch hier eine unterstützte Nachtlüftung die Regelbarkeit und die Wärmeabfuhr während hochsommerlicher Perioden [15], [16].

Gebäude mit luftgeführter Kühlung

Die maschinelle Nachtlüftung kann eine wichtige Rolle im Kühlkonzept übernehmen. Die Erfahrung mit per Nachtlüftung gekühlten Niedrigenergie-Bürogebäuden zeigt, dass im Sommer angenehme Raumtemperaturen erreicht werden und dass die Nutzer das Raumklima in der Regel positiv bewerten. Bei den untersuchten Gebäuden wird die Komfortklasse II nach adaptivem Komfortmodell zu 80 bis 100 % erreicht. Bei nur zwei Gebäuden werden lediglich die Komfortanforderungen der Klasse III erreicht. Die mittleren operativen Raumtemperaturen liegen bei den meisten Gebäuden zwischen 23 und 27,5 °C, die maximalen Raumtemperaturen zwischen 26 und 30,5 °C. Die Tagesamplituden der Raumtemperatur zur Anwesenheit der Nutzer liegen in gleicher Größenordnung wie bei den Gebäuden mit passiver Kühlung; im Mittel liegt der Temperaturanstieg über der Anwesenheitszeit zwischen 1 bis 3 K. Bei zwei Gebäuden wurden Temperaturschwankungen im Mittel bis zu 4,5 K und maximal bis zu 6 K gemessen. Der Einsatz einer maschinellen Lüftung mit Abluft- oder Zu- und Abluftanlage ermöglicht feste Luftwechsel zwischen 2 bis 4 h⁻¹, unabhängig der vorherrschenden Außenbedingungen (Wind und Temperatur). Damit lässt sich in der Regel eine höhere Wärmeabfuhr sicherstellen. Die Raumtemperaturen sinken in der Nacht um bis zu 4 K. Aber insbesondere bei lang anhaltenden Hitzeperioden – so z. B. in den Sommern 2003 und 2006 – verhindern relativ

hohe Außentemperaturen in der Nacht eine ausreichende Kühlung der thermischen Gebäudemasse. Dann reichen bauliche Maßnahmen und eine mechanisch unterstützte Nachtlüftung oft nicht aus, um tagsüber die Raumtemperaturen auf Werte von 28 °C zu begrenzen (Bild 2, Gebäude AO, AP und AQ im Betriebsjahr 2003). Zum Beispiel: das Bürogebäude AO in Südwest-Deutschland erreicht im Betriebsjahr 2002 die Anforderungen der Komfortklasse II (adaptives Komfortmodell) während 99 % der Anwesenheit, im heißen Sommer 2003 hingegen nur zu 92 % der Anwesenheit. Die gemessene Raumtemperatur lag trotzdem deutlich unter den Außentemperaturen. Im Gegenteil dazu war es im Bürogebäude AW mit wassergeführter Kühlung mittels Betonkerntemperierung möglich, auch im Sommer 2003 die Klasse II des PMV-Komfortmodells zu gewährleisten. Durch die konsequente Reduzierung der Kühllast (außenliegender Sonnenschutz, Tageslichtkonzept, moderater Verglasungsanteil) konnte in den zwei relativ kleinen Bürogebäuden AQ und AR im Sommer 2003 auch mit einem Nachtlüftungskonzept ein hoher thermischer Raumkomfort sichergestellt werden.

Gebäude mit wassergeführter Kühlung

Erheblich wirkungsvoller als Nachtlüftungskonzepte sind thermoaktive Bauteilsysteme. Hierbei wird die Gebäudestruktur mit bauteilintegrierten Rohrregistern gekühlt, um das Raumklima komplett oder unterstützend zu konditionieren. Detaillierte Auswertungen zu den Gebäuden zeigen, dass durch Kühlung mit thermoaktiven Bauteilsystemen (im Speziellen Betonkernaktivierung) die geforderten Raumtemperaturen unter Berücksichtigung des Nutzerverhaltens fast immer eingehalten werden können. Die mittleren Raumtemperaturen liegen in einem Bereich von 22,5 bis 25,5 °C und damit deutlich unter den gemessenen Werten in den Gebäuden mit passiver und luftgeführter Kühlung. Die maximalen Raumtemperaturen liegen zwischen 25 und 28 °C, nur in fünf Gebäuden werden Grenzwerte von 28 °C überschritten. Auch bei erhöhten Außentemperaturen mit einem gleitenden Tagesmittel größer 22 °C sind die maximalen Raumtemperaturen in der Regel auf einen Bereich von 27 bis maximal 28 °C begrenzt. Die Raumtemperaturen schwanken nur relativ geringfügig über den Tag, d. h. bei den meisten Gebäuden liegt der Temperaturanstieg über die Anwesenheit im Mittel zwischen 0,5 und 2,5 K.

Berücksichtigt man das adaptive Komfortmodell, zeigt sich, dass die Anforderungen für die Komfortklasse II für 90 % zufriedene Nutzer nur sehr selten und an einzelnen Stunden überschritten werden. Wird jedoch das PMV-Komfortmodells für die Bewertung herangezogen, wird deutlich, dass nur 8 der 16 untersuchten Gebäuden die strengen Anforderungen der Klasse II im Sommer einhalten können.

In vier Gebäuden liegen die Raumtemperaturen vergleichsweise deutlich höher: die Gebäude BB und BA wurden saniert; abgehängte Kühlpaneele wurden nachgerüstet. Das Gebäude BB verfügt nur über eine unterstützende Kühlung mittels Erdwärmesonden und abgehängten Kühlpaneelen. Die hohe Ausstattung der Grafikerarbeitsplätze verursacht relativ hohe interne Wärmelasten. Dies spiegelt sich auch im großen Anstieg der Raumtemperatur über der Anwesenheit von im Mittel 2 bis 5 K wider. Das Gebäude BG befindet sich in Italien. Weitere Gründe für den – nach

PMV Komfortmodell – unzureichenden thermischen Raumkomfort liegen in Auslegung der Kühlkonzepte sowie im Gebäude- und Anlagenbetrieb: nicht korrekt dimensioniert Kühlsystem (z. B.: Kühlleistung der Wärmesenke bei Gebäuden BA und BK nicht ausreichend) oder eine unzureichende Steuerung und Regelung (z. B. Gebäude während des ersten Betriebsjahres). In einigen Gebäuden (BA, BB, BG und BL) wurde in der Planung nur eine unterstützende Kühlung im Sommer vorgesehen, ohne Anspruch, die Raumtemperaturen im Sommer durchgehend auf 26 °C zu begrenzen (z. B. verfügt das Gebäude BL nur über eine erdgekoppelte Sohlplatte mit 10 kW_{therm} Kühlleistung).

In den untersuchten Nichtwohngebäuden wird während der Kühlperiode (insbesondere am Beginn der Sommerperiode) eine teilweise deutliche Unterschreitung der unteren Komfortgrenzen festgestellt. Dies trifft sowohl bei Anwendung des adaptiven als auch des PMV-Komfortmodells zu. Damit verbunden sind ein erhöhter thermischer Kühlenergieaufwand und unter Umständen Komforteinschränkungen. Betriebs- und Regelalgorithmen (z. B. Betriebszeiten, Vorlauftemperatur, Volumenströme) für die Kühlsysteme müssen die Raumtemperatur der Büroräume oder ausgewählter Referenzräume für die jeweilige thermische Zone als Regelgröße berücksichtigen.

Der thermische Raumkomfort in den zwei nordeuropäischen Gebäuden (Dänemark und Finnland) erfüllt zu 94 bzw. 98 % der Anwesenheit die Komfortklasse II nach dem PMV-Komfortmodell, d. h. die Raumtemperaturen liegen in der Regel unter 26 °C und sind nur sehr geringen Tagesschwankungen unterworfen (Tagesamplitude der Raumtemperaturen zwischen 0,8 und 1,5 K). In diesen Gebäuden erfolgt die Bereitstellung von Kälte mittels aktiver Kompressionskälteerzeugung (DEN) bzw. Fernkälte (FIN). In nordeuropäischen Klimaten können interne und solare Wärmelasten durch eine natürliche Lüftung am Tag und eine Nachtlüftung aufgrund der kühleren Umgebungsluft effizient abgeführt werden. In bestimmten Gebäuden erscheint eine maschinell unterstützte Nachtlüftung angebracht, um die Effektivität zu verbessern. Eine aktive wassergeführte Kühlung mittel Umweltwärmesenken oder sogar Kompressionskälte ist nur bei sehr hohen Komfortanforderungen oder eingeschränktem Nutzereinfluss (Bekleidungsrichtlinien, kein Öffnen der Fenster) unterstützend erforderlich. Kühlenergiekonzepte mit thermoaktiven Bauteilsystemen und Umweltenergie stellen für das mitteleuropäische Klima eine energieeffiziente Lösung dar, können aber aufgrund von Systemträgheiten und systembedingten Temperaturen keine stringenten Raumtemperatursollwerte gewährleisten. Sollen bestimmte Raumtemperaturen gewährleistet werden, ist ein zusätzliches, regelbares und schnell reagierendes Heiz- und Kühlsystem erforderlich. In südeuropäischen Klimaten ist aufgrund der lang anhaltenden Hitzeperioden mit hohen Außentemperaturen eine höhere Kühlleistung erforderlich. Aufgrund der geringen Temperaturdifferenz zwischen Raumtemperatur und Temperatur der Umweltwärmesenke (Außenluft, Erdreich) ist ein aktives Kühlsystem zum Beispiel mit Kompressionskälte – zumindest unterstützend – erforderlich.

Gebäude mit Mixed-mode-Kühlung

Die Gebäude GRE und ROU werden vorrangig und wenn möglich mittels Nachtlüftung gekühlt. In Zeiten erhöhter

Bedarfsanforderungen wird unterstützend über dezentrale Kühlaggregate gekühlt. Das Monitoring in den Gebäuden erlaubt es leider nicht, die Referenzräume nach Betriebszeiten und den jeweiligen Betriebsmodi (Nachtlüftung und/oder aktive Kühlung) zu analysieren. Auch zu Zeiten mit hohen Außentemperaturen (gleitendes Tagesmittel zwischen 26 und 32 °C) liegen die gemessenen Raumtemperaturen innerhalb der geforderten Grenzen des adaptiven Komfortmodells. Über die gesamte Sommerperiode werden die Komfortanforderungen Klasse II während 95 % (ROU) bzw. 98 % (GRE) der Anwesenheitszeit erreicht.

Gebäude mit Teil-/Vollklimatisierung

Eine aktive, luftgeführte Klimatisierung kann in allen Klimazonen durchgängig eine ausreichend hohe Kühlleistung bereitstellen, um auch hohe Komfortansprüche zu erfüllen. Auch zu Zeiten mit hohen Außentemperaturen (gleitendes Tagesmittel zwischen 26 und 32 °C) liegen die gemessenen Raumtemperaturen innerhalb der geforderten Komfortgrenzen des PMV-Komfortmodells, d. h. Raumtemperaturen liegen in der Regel zwischen 24 und 26 °C und sind nur sehr geringen Tagesschwankungen unterworfen. Im Mittel liegt der Temperaturanstieg während der Anwesenheit unter 2 K. Während in nord- und mitteleuropäischen Gebäuden ohne Klimatisierung die Anforderungen an die Raumluftfeuchte in der Regel eingehalten werden, sind in südeuropäischen Klimaten die Raumtemperatur sowie die relative Feuchte an feuchtwarmen Tagen höher, d. h. die relative Feuchte liegt im Bereich des oberen Grenzwerts der Norm. Hier erscheint eine Entfeuchtung der Zuluft – zumindest zeitweise – notwendig. Im Fall der Unterstützung durch eine Klimaanlage kann aber die Abfuhr der sensiblen Kühllasten durch ein wassergeführtes Flächenkühlsystem erfolgen, um die Möglichkeit einer sehr effizienten Energiebereitstellung auszunutzen.

5.3 Thermischer Raumkomfort und Kühlenergieaufwand

In den meisten Gebäuden wurden die Zielwerte für den thermischen Kühlenergiebedarf deutlich unterschritten (Tabelle 1). Messwerte für thermischen Nutzkältebezug liegen in den nord- und mitteleuropäischen Gebäuden bei rund 20 kWh_{therm}/(m²a) und bei den Südeuropäischen bei rund 30 kWh_{therm}/(m²a). Mit einem abgestimmten Gesamtkonzept aus Architektur, Bauphysik und Kühlkonzept lässt sich der Aufwand für die Kühlung deutlich reduzieren – auch in den südeuropäischen Gebäuden.

Die direkte Kühlung mittels oberflächennaher Geothermie oder Außenluft ermöglicht die Bereitstellung von Klimakälte mit hoher Energieeffizienz – eine korrekte Auslegung, Installation und Betrieb der Geothermiesysteme vorausgesetzt. Für das Primärsystem im Betriebsmodus „Direkte Kühlung“ (ohne den Einsatz einer reversiblen Wärmepumpe bzw. Kältemaschine) wurden Jahresarbeitszahlen zwischen 6 und 16 kWh_{therm}/kWh_{el} erreicht. Die maschinellen Kühlkonzepte bieten zwar nur eine unterstützende Kühlung – mit teilweise Einschränkungen des thermischen Raumkomforts – stellen die „Klimakälte“ aber mit hoher Effizienz zur Verfügung (Jahresarbeitszahlen größer 10 kWh_{therm}/kWh_{el}).

Die Nutzung von erdreichgekoppelten Kältemaschinen stellt ein effizientes und nachhaltiges Konzept zur Gebäudekühlung dar. Auch hier bedingen die relativ hohen Vorlaufemperaturen zur Kühlung von 16 bis 20 °C gute Energieeffizienzen. Messtechnisch wurden in Projekten Jahresarbeitszahlen von 4,8 bis 5,8 kWh_{therm}/kWh_{el} nachgewiesen (thermische Kältebereitstellung zu elektrischem Stromaufwand von Primärpumpen und Kompressor) (ausführliche Darstellung der energetischen Bewertung in [14]).

Der Betrieb von hocheffizienten Geothermieanlagen erfordert eine gute und sorgfältige Planung, sowohl der Hydraulik als auch der thermischen Auslegung des Erdwärmesondenfeldes bzw. der Grundwasserbrunnenanlage. Falsche Annahmen in der Planung (z. B. ungestörte Erdreichtemperatur, zu geringe Entzugsleistung für Erdwärmesonden, verfügbare Fördermengen für Grundwasser) und Fehler bei der Dimensionierung führen zu unzureichenden Kühlleistungen und zu geringer Energieeffizienz, die im Betrieb der Anlage kaum kompensiert bzw. korrigiert werden können. Dann ist die Nachrüstung eines zusätzlichen Kälteerzeugers unumgänglich.

6 Zusammenfassung

In 42 Büro- und Verwaltungsgebäuden wurden auf Basis von Monitoringkampagnen über mehrere Betriebsjahre Raum- und Außentemperaturwerte in zeitlich hoher Auflösung erfasst und der thermische Raumkomfort im Sommer nach der Komfortnorm DIN EN 15251:2007-08 detailliert ausgewertet. Darunter befinden sich auch 7 Europäische Gebäude (Finnland, Dänemark, Tschechische Republik, Frankreich, Italien, Rumänien, Griechenland). Ergänzt wird die Auswertung um Kurzzeitmesskampagnen über zwei sehr warme Wochen im Sommer in unsanierten bzw. teilsanierten Bürogebäuden, errichtet im Zeitraum von 1960 bis 1975. Die untersuchten Gebäude mit ihrem jeweiligen Kühlkonzept lassen sich in sechs Kategorien einteilen: ohne Kühlung, passive, luftgeführte und wassergeführte Kühlung sowie Mixed-mode-Kühlung und Vollklimatisierung. Gebäude mit freier und maschineller Lüftung sowie Gebäude mit passiven Kühlmaßnahmen (z. B. Sonnenschutz, Fensterlüftung) werden nach dem adaptiven Komfortmodell der DIN EN 15251 bewertet. Die Bewertung des Raumkomforts in Gebäuden mit einer Voll-/Teilklimatisierung, Umluftkühlung und wassergeführten Flächenkühlung erfolgt nach dem PMV-Komfortmodell.

Gebäude mit Niedrigenergiekühlung haben sich in den letzten Jahren etabliert. Die systematische Analyse der Langzeitmessungen belegt, dass mit diesen Systemen ein hohes Maß an thermischer Behaglichkeit in Verbindung mit einer hohen Energieeffizienz unter Nutzung von erneuerbarer Umweltenergie erreicht werden kann.

So können zeitgemäße Bürogebäude mit typischer Büronutzung in sommerkühlen Klimazonen besonders vorteilhaft allein mit der Umgebungsluft mittels freier oder auch maschinell unterstützten Nachtlüftungskonzepten gekühlt werden. In gemäßigten Klimazonen stoßen Nachtlüftungskonzepte insbesondere während heißen Sommerperioden an ihre Grenzen, d. h. dann werden in der Regel nur noch die Anforderungen der Komfortklasse III erfüllt. Die mittleren operativen Raumtemperaturen liegen bei

den meisten Gebäuden zwischen 23 und 27,5 °C, die maximalen Raumtemperaturen zwischen 26 und 30,5 °C. Keines der Demonstrationsgebäude mit maschinellern Nachtlüftungskonzept erfüllt die Anforderungen des PMV-Komfortmodells.

In gemäßigten Klimazonen stellen Kühlkonzepte mit Flächentemperiersystemen in Verbindung mit oberflächennaher Geothermie energieeffiziente Lösungen dar. Die mittleren Raumtemperaturen liegen in einem Bereich von 22,5 bis 25,5 °C und damit deutlich unter den gemessenen Werten in den Gebäuden mit passiver und luftgeführter Kühlung. Die maximalen Raumtemperaturen liegen zwischen 25 und 28 °C, nur in fünf Gebäuden werden Grenzwerte von 28 °C überschritten. Dennoch erfüllen nicht alle der untersuchten Gebäude die Anforderungen des PMV-Komfortmodells, d. h. maximal zulässige Raumtemperaturen von 26 °C. Aufgrund der begrenzten Leistungsfähigkeit insbesondere der zum Großteil eingesetzten Betonkerntemperierung ist ein integral geplantes Gebäudekonzept (optimale Abstimmung von Architektur, Bauphysik und Gebäudetechnik) mit konsequenter Begrenzung der Heiz- und Kühllast Voraussetzung für deren Einsatz. Ungenügende Annahmen zu Heiz- und Kühlbedarf in der Planung oder veränderte Gebäudenutzung lassen sich im späteren Gebäudebetrieb nur durch Nachinstallation eines Zusatzsystems, längere Betriebszeiten oder die aktive Konditionierung der Zuluft korrigieren, um die Komfortanforderungen zu erfüllen. Die Kombination der Betonkerntemperierung mit einem regelbaren und schnell reagierenden Zusatzsystem ist dann sinnvoll, wenn in den Nutzungsbereichen erhöhte Komfort- oder sich verändernde Nutzungsbedingungen gefordert sind.

Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen der Projekte LowEx: Monitor (BMW 0327466B) und EnOB:Monitor (BMW 0335007P/C), welche mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert wurden. Besonderer Dank gilt auch dem Projektträger Jülich für die Unterstützung des Vorhabens. Die Autoren danken den einzelnen Evaluierungsteams und Forschungseinrichtungen für die Bereitstellung und Aufbereitung der Messdaten sowie den Bauherren für die Möglichkeit, ihre Gebäude zu untersuchen.

Die Untersuchung in den europäischen Gebäuden entstand im Rahmen des EU-Projektes „ThermCo“ (Förderkennzeichen: EIE/07/026/SI2.466692). Die Autoren danken den einzelnen Europäischen Projektpartnern für die Durchführung der Messkampagnen und die Datenauswertung sowie für hilfreiche Diskussionen: *A. Wagner* (Karlsruhe Institute of Technology, Germany), *B. Olesen* und *P. Strøm-Tejse* (Technical University of Denmark), *J. Kurnitski* (Helsinki University of Technology, Finland), *M. Santamouris* und *T. Karlessi* (National and Kapodistrian University of Athens, Greece), *F. Allard* und *Chr. Inard* (University of La Rochelle, France), *K. Kabele* und *M. Kabrhel* (Czech Technical University), *L. Pagliano* und *P. Zangheri* (Politecnico di Milano, Italy), *A.-G. Ghiaus* (Technical University of Civil Engineering Bucharest, Romania), *O. Seppanen* (REHVA, Belgium), *W. Warmuth* und *J. Farian* (PSE, Germany).

Literatur

- [1] *Kirchner, A., Matthes, F.*: Modell Deutschland Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken. 2009. www.prognos.com und www.oeko.de
- [2] *Kalz, D., Hölzenbein, F., Pfafferott, J., Vogt, G.*: Nutzerzufriedenheit mit dem thermischen Komfort in Bürogebäuden mit Umweltenergiekonzepten. *Bauphysik* 35 (2013), H. 6, S. 377–391.
- [3] *Gossauer, E.*: Nutzerzufriedenheit in Bürogebäuden: eine Feldstudie. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2008.
- [4] *Wagner, A., Gossauer, E., Moosmann, C., Gropp, T., Leonhart, R.*: (2007) Thermal comfort and workplace occupant satisfaction – Results of field studies in German low energy office buildings. *Energy and Buildings* 39 (2007), No. 7, pp. 758–769.
- [5] *Schweiker, M., Brasche, S., Bischof, W., Hawighorst, M., Voss, K., Wagner, A.*: (2012) Development and validation of a methodology to challenge the adaptive comfort model. *Building and Environment* 49 (2012), pp. 336–347.
- [6] Forschung für Energieoptimiertes Bauen EnOB. Förderprogramm vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. www.enob.info
- [7] Exergetisches Monitoring für Gebäude mit Erdwärmenutzung (LowEx:Monitor). Forschungsprojekt gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. 2009–2012.
- [8] Modellbasierte Methoden für die Fehlererkennung und Optimierung im Gebäudebetrieb (ModBen). Forschungsprojekt gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. 2009–2012.
- [9] ThermCo Thermal comfort in buildings with low-energy cooling – Establishing an annex for EPBD-related CEN-standards for buildings with high energy efficiency and good indoor environment. 2010. EIE/07/026/SI2.466692.
- [10] *van der Linden, A. C., Boersta, A. C., Raue, A. K., Kuvers, S. R., de Dear, R. J.*: Adaptive temperature limits: A new guideline in The Netherlands – A new approach for the assessment of building performance with respect to thermal indoor climate. *Energy and Buildings* 3 (2006), No. 1, pp. 8–17.
- [11] Thermische Behaaglijkheid, Publication 74, ISSO, Rotterdam.
- [12] College of Environmental Design, University of California Berkeley. <http://www.cbe.berkeley.edu/mixedmode>
- [13] *Brager, G., Borgeson, S., Lee, Y.*: Summary report: control strategies for mixed-mode buildings. Technical Report. University of California, Berkeley, CA: Center for the Built Environment; 2007.
- [14] *Winiger, S., Kalz, D. E., Sonntag, M., Vellei, M.*: Feldtesterfahrungen: Erdgekoppelte Wärmepumpensysteme in Nichtwohngebäuden. *BBR* 9:60-65, 2013.
- [15] *Pfafferott, J., Kalz, D. E.*: (2012) Energieeffiziente Kühlung und thermischer Raumkomfort: Simulationsbasierte Evaluierung von Kühlkonzepten in verschiedenen europäischen Klimazonen (Teil 2). *Bauphysik* 35 (2012), H. 1, S. 51–56.
- [16] *Kalz, D. E., Pfafferott, J.*: Energieeffiziente Kühlung und thermischer Raumkomfort: Vergleichende Analyse von acht europäischen Nichtwohngebäuden (Teil 1). *Bauphysik* 34 (2012), H. 6, S. 256–267.
- [17] DIN EN 15251:2007-08: Eingangsparameter zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik.
- [18] ISSO-Publicatie 74: Thermische Behaaglijkheid. Eisen voor de binnentemperatuur in gebouwen. Rotterdam: Stichting ISSO, 2004.

Autoren dieses Beitrages:

Dr.-Ing. Doreen Kalz
 Dipl.-Ing. Sebastian Herkel
 Dipl.-Ing. Martin Sonntag
 Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
 Thermische Anlagen und Gebäude, Kühlung und
 Klimatisierung von Gebäuden
 Heidenhofstraße 2, D-79110 Freiburg

Prof. Dr.-Ing. Jens Pfafferott
 Hochschule Offenburg
 Maschinenbau und Verfahrenstechnik
 Institut für Energiesystemtechnik (INES)
 Badstraße 24, D-77652 Offenburg



Inspired by temperature

Hochgenau temperieren in Forschung und Industrie



Wussten Sie, dass sich der kälteste Punkt der Ortenau in Elgersweier befindet? In der Tangofabrik im Industriegebiet Elgersweier entwickeln und produzieren wir seit fast 50 Jahren hochgenaue Temperierlösungen von -125 °C bis $+425\text{ °C}$ für Anwendungen in Forschung und Industrie.

Mehr Informationen: www.huber-online.com

huber

Doreen Kalz
 Fabian Hölzenbein
 Jens Pfafferott
 Gisela Vogt

Nutzerzufriedenheit mit dem thermischen Komfort in Bürogebäuden mit Umweltenergiekonzepten

Mit längerfristigen Nutzerbefragungen in zwei unmittelbar benachbarten Bürogebäuden in Freiburg wurden das Temperaturempfinden der Nutzer und deren Zufriedenheit mit dem thermischen Raumkomfort zweimal täglich erfasst. Ein Bürogebäude wird im Sommer mit einem maschinellen Nachtlüftungskonzept konditioniert und das zweite verfügt über eine Betonkerntemperierung und eine Zu- und Abluftanlage. Auf Basis der vorhandenen Daten aus der Erhebung wurde mit Hilfe von Regressionsanalysen ein Modell zur Vorhersage der Komforttemperatur berechnet und mit den Modellen in DIN EN 15251 verglichen.

User satisfaction with thermal comfort in office buildings applying environmental energy concepts. *This paper presents results of a long-term evaluation of occupant perception of and satisfaction with thermal comfort in two neighbouring office buildings in Freiburg. They were obtained in field surveys by daily questioning and accompanying measurements in high temporal resolution. One office building is conditioned during summer according to a night-time ventilation concept and the second uses concrete core conditioning and a supply/exhaust ventilation system. Based on the survey data and a regression analysis, a model was calculated to predict the comfort temperature depending on the cooling concept employed. Results were compared to the comfort models of DIN EN 15251.*

1 Einleitung

In Deutschland ist in etwa die Hälfte der Büro- und Verwaltungsgebäude mit Kühl- oder Klimatisierungsvorrichtungen ausgestattet [1]. Viele Studien prognostizieren weiterhin einen Anstieg des Energiebedarfs für die Gebäudekühlung in Deutschland und auch in Europa. Die Autoren einer gemeinsamen Studie von Prognos und Öko-Institut [2] gehen davon aus, dass spätestens ab 2015 alle errichteten Neubauten im GHD-Sektor mit Klimaanlage ausgerüstet und auch im Bestand in erheblichen Maße Nachrüstungen erfolgen werden. Andere Studien erwarten für Geschäfts- und Bürogebäude voraussichtlich bis 2020 sogar einen Anstieg der Kühlung auf 70 % des Gebäudebestandes [3], [4]. Begründet wird dies mit einem verstärkten Auftreten heißer Sommer und der zunehmenden Ausstattung von Dienstleistungsgebäuden.

Ziel ist es, Gebäude- und Anlagenkonzepte zu entwickeln, die sich im Sommer durch einen geringen Kühlenergiebedarf auszeichnen, aber die Anforderungen an einen

qualitativ hochwertigen Arbeitsplatz erfüllen. Neben akustischen und visuellen Komfortanforderungen kommt dabei dem thermischen Komfort eine zentrale Rolle zu.

Thermischer Raumkomfort in Nichtwohngebäuden wird nach der Europäischen Richtlinie DIN EN 15251 bewertet, die gemäß dem implementierten Kühlkonzept zwei Komfortmodelle definiert:

– *DIN EN 15251:2007-08, adaptives Modell* [5]

Gebäude ohne maschinelle Kühlung (ausschließlich freie Kühlung) werden mit einem adaptiven Komfortmodell bewertet, welches sowohl Änderungen des Außenklimas als auch die Einflussnahme des Nutzers auf seine unmittelbare Umgebung (z. B. durch Öffnen von Fenstern, Betätigung des Sonnenschutzes, keine Bekleidungs Vorschrift) berücksichtigt. Nach dem „Erwartungsmodell“ stellt sich thermische Behaglichkeit dann ein, wenn das Umgebungsklima der Erwartung der Nutzer entspricht, d. h. an heißen Tagen werden auch höhere Innentemperaturen toleriert. Der geforderte Sollwert für die Raumtemperatur bestimmt sich in Abhängigkeit des gleitenden Tagesmittels der Außentemperatur $\theta_{e,rm}$ in °C: $RT_c = 18,8 \text{ °C} + 0,33 \cdot \theta_{e,rm}$ mit RT_c in °C als operative Raumtemperatur und mit einem Komfortband von $\pm 3 \text{ K}$ für Komfortklasse II.

– *DIN EN 15251:2007-08, PMV-Modell* [5]

Gebäude, die durch eine maschinelle Kühlung (Klimaanlagen, aber auch durch thermoaktive Bauteilsysteme) aktiv konditioniert werden, sollten entsprechend dem PMV-Komfortmodell festgelegte Raumtemperatursollwerte, unabhängig von den Außentemperaturbedingungen, einhalten: $RT_c = 24,5 \text{ °C}$ mit RT_c in °C als operative Raumtemperatur und mit einem Komfortband von $\pm 1,5 \text{ K}$ für Komfortklasse II.

Seit Februar 2012 wird die Norm um einen nationalen Anhang ergänzt (DIN EN 15251/NA:2012-02).

– *DIN EN 15251:2012-02, quasi-adaptives Modell* [6]

Für die Bewertung behaglichkeitsrelevanter Parameter differenziert die Norm nicht nach dem Anlagenkonzept für die Kühlung. Die definierte Komforttemperatur beträgt 22 °C bei Außentemperaturen (Stundenmittelwerte) unter 16 °C und 26 °C bei Außentemperaturen über 32 °C . Dazwischen wird die Komforttemperatur durch $RT_c = 18 \text{ °C} + 0,25 \cdot \theta_e$ beschrieben, mit RT_c in °C als operative Raumtemperatur, θ_e in °C als aktuelle Außentemperatur und ei-

nem Komfortband von $\pm 2,0$ K für die fest vereinbarte Komfortklasse II.

Viele Büro- und Verwaltungsgebäude lassen sich allerdings nicht ohne weiteres anhand des jeweiligen Kühlkonzepts einem bestimmten Komfortmodell zuordnen. Beispielsweise nutzen Gebäude freie oder maschinelle Nachtlüftungskonzepte in Kombination mit einer aktiven bzw. unterstützenden Kühlung. Zudem stellen Kühlenergiekonzepte mit Nutzung von natürlichen Umweltsenken (z. B. direkte Kühlung mittels oberflächennaher Geothermie) für das mitteleuropäische Klima zwar eine energieeffiziente Lösung dar, können aber aufgrund von Systemträgheiten und systembedingten Temperaturen bzw. Temperaturdifferenzen keine stringenten Raumtemperatursollwerte analog dem PMV-Komfortmodell gewährleisten.

Da die Normung zweifelsfreie Bedingungen formulieren muss, wird in DIN EN 15251 eine klare Zuordnung getroffen:

Gebäude ohne maschinelle Kühlung: Gebäude, die nicht über maschinelle Kühlung verfügen und bei denen zur Senkung hoher Innentemperaturen in der warmen Jahreszeit auf andere Verfahren zurückgegriffen wird, wie z. B. nicht zu große Fenster, angemessene Abschirmung gegen Sonneneinstrahlung, Verwendung der Gebäudemasse, freie Lüftung, nächtliche Lüftung usw. zur Verhinderung der Überhitzung.

In diesem Zusammenhang wird auch die „maschinelle Kühlung“ definiert und mit einer expliziten Anmerkung gegenüber passiven Kühlmethode im Sinne dieser Norm abgegrenzt:

Kühlung eines Raums oder eines Gebäudes mit maschinellen Hilfsmitteln zur Kühlung der Zuluft durch z. B. Ventilator-konvektoren, gekühlte Oberflächen usw. ANMERKUNG: Die Definition steht in Zusammenhang mit den von den Nutzern erwarteten Innentemperaturen während der warmen Jahreszeit. Das Öffnen von Fenstern am Tag und in der Nacht gilt nicht als maschinelle Kühlung. Als maschinelle Kühlung gilt hingegen jede maschinell unterstützte Lüftung (Ventilatoren).

Diese streng am Kühlkonzept orientierte Definition weicht allerdings deutlich von den in den adaptiven Komfortkriterien formulierten Bedingungen ab, die sich an der Möglichkeit zum effektiven Nutzereinfluss und nicht am Kühlkonzept orientieren, z. B. in [7], [8]. Daran orientiert sich auch die „Richtlinie zu baulichen und planerischen Vorgaben für Baumaßnahmen des Bundes zur Gewährleistung der thermischen Behaglichkeit im Sommer“ vom Dezember 2008 [9].

Frage: Beschreibt eher eine an der technischen Ausstattung oder eher eine an den Nutzererwartungen orientierte Definition besser das anzuwendende Komfortmodell in Gebäuden mit technisch limitierter Kühlleistung? In Publikationen wird zwar auf diese offene Frage hingewiesen (z. B. in [10] und [11]), ein konkreter Vorschlag scheitert aber an der geringen Stichprobenmenge solcher Gebäude in den Feldstudien [12].

2 Zielstellung

Ziel der vorliegenden Studie ist es, auf Basis von längerfristigen, täglichen Nutzerbefragungen in zwei Bürogebäuden

das Temperaturempfinden der Nutzer und deren Zufriedenheit mit dem thermischen Raumkomfort in Abhängigkeit von zwei unterschiedlichen Kühlkonzepten zu bewerten. Auf Basis der vorhandenen Daten aus der Erhebung soll mit Hilfe von Regressionsanalysen ein Modell zur Vorhersage der Komforttemperatur berechnet und mit den Modellen in DIN EN 15251 verglichen werden.

Mit der Untersuchung sollten folgende Fragen beantwortet werden:

1. Gilt ein adaptives Komfortmodell für die Bewertung des thermischen Raumkomforts? Tolerieren Menschen in Bürogebäuden, in denen sie einen Einfluss auf das Raumklima nehmen können, also höhere Raumtemperaturen bei steigenden Außentemperaturen?
2. Haben Nutzer ein geändertes Temperaturempfinden in Abhängigkeit des Kühlkonzeptes?
3. Ändert sich die Zufriedenheit der Nutzer mit dem thermischen Raumkomfort in Abhängigkeit des Kühlkonzeptes?
4. Wie bestimmt sich die Komforttemperatur für unterschiedliche Kühlkonzepte als Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Raumtemperatur, Außentemperatur und Nutzerzufriedenheit? Wie lassen sich Kühlkonzepte den bestehenden Modellen in der Norm zuordnen? Müssen Modelle ggf. erweitert bzw. ergänzt werden?

Den Autoren ist keine Studie bekannt, in der die 2. und 3. Frage beantwortet werden konnte.

3 Methodik

3.1 Untersuchungszeitraum und Teilnehmer

Die Untersuchung wurde in zwei Bürogebäuden in Freiburg durchgeführt, die sich in unmittelbarer Nachbarschaft befinden. Ein Bürogebäude (SIC) wird im Sommer mit einem maschinellen Nachtlüftungskonzept (Abluftanlage) konditioniert und das zweite (SCF) verfügt über eine Betonkerntemperierung und eine Zu- und Abluftanlage (s. Abschnitt 4). In beiden Gebäuden haben die Nutzer Einfluss auf das Raumklima, d. h. die Nutzer können individuell Fenster öffnen/schließen, den außen liegenden Sonnenschutz bedienen und es gibt keine Bekleidungs Vorschriften.

Die Untersuchung wurde im Sommer 2009 (1. Juli bis 30. September) in den Räumen des SIC und im darauf folgenden Jahr 2010 (1. Juni bis 30. September) in den Räumen des SCF durchgeführt (Bild 1). Dabei wurde im Rahmen einer täglichen, computerbasierten Befragung das Empfinden und die Zufriedenheit der Nutzer mit dem thermischen Raumkomfort erfasst.

Im SIC (2009, Nachtlüftungskonzept) beteiligten sich 26 Nutzer und im Gebäude SCF (2010, wassergeführte Kühlung) 29 Nutzer (Tabelle 1). Einige der befragten Nutzer im Gebäude SIC sind im Frühjahr 2010 in das Gebäude SCF umgezogen. Daher nahmen 12 der befragten Personen an beiden Befragungen teil.

3.2 Befragung zu Empfinden und Zufriedenheit

Im Untersuchungszeitraum fanden tägliche, computerbasierte Erhebungen statt. Bei den Nutzern erschien jeweils um 11:00 Uhr und um 15:00 Uhr auf dem Bildschirm ein

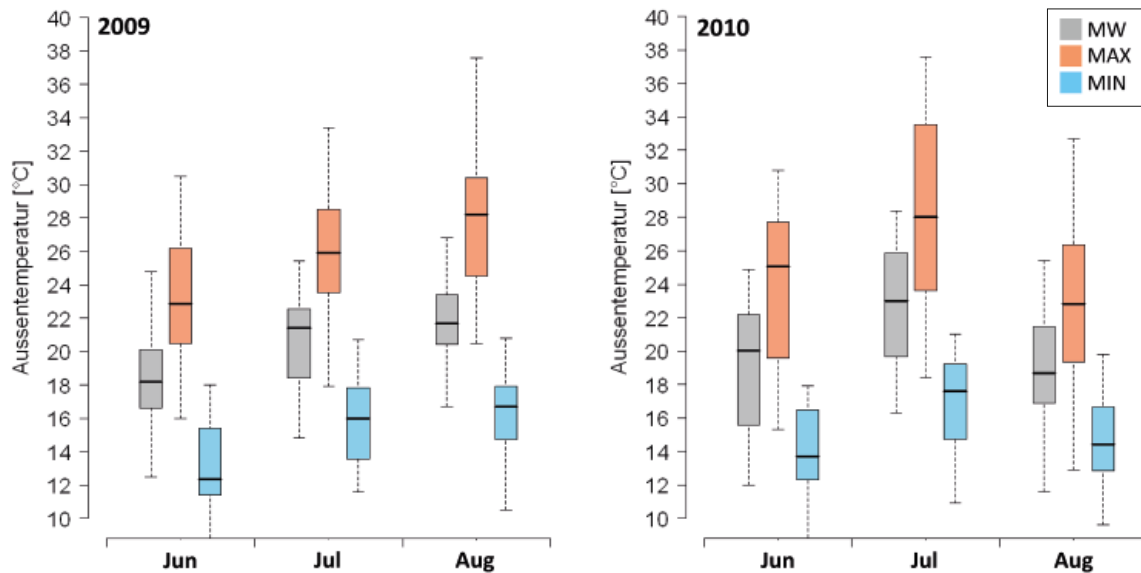


Bild 1. Monatliche Außentemperaturen [°C] im Sommer, 2009 und 2010, Standort Freiburg: Tagesmittel (MW), Tagesmaximum (MAX), Tagesminimum (MIN); das Rechteck entspricht dem Bereich, in dem die mittleren 50 % der Daten liegen, zusätzlich Angabe der maximalen und minimalen Werte

Fig. 1. Monthly ambient air temperature [°C] in summer, 2009 and 2010, location Freiburg: daily mean (MW), daily maximum (MAX), daily minimum (MIN); the rectangles present the data between first and third quartile, additionally given are the maximum and minimum values

Tabelle 1. Informationen zur Methodik und Durchführung der Befragung und Messungen

Table 1. Information on method and execution of post-occupancy evaluation as well as measurements

	Luftgeführte Kühlung (SIC)	Wassergeführte Kühlung (SCF)
Befragte Nutzer		
Anzahl	26 (9 weibliche und 17 männliche Nutzer)	29 (9 weibliche und 20 männliche Nutzer)
Alter (tägliche Kurzbefragung)	bis 25 Jahre: 4 Nutzer zwischen 26 und 35 Jahren: 18 Nutzer zwischen 36 und 45 Jahren: 3 Nutzer zwischen 46 und 55 Jahren: keine über 55 Jahre: 1 Nutzer	bis 25 Jahre: 2 Nutzer zwischen 26 und 35 Jahre: 19 Nutzer zwischen 36 und 45 Jahre: 8 Nutzer zwischen 46 und 55 Jahre: keine über 55 Jahre: keine
Befragung		
Zeitraum	1.07.09–30.09.09	1.6.10–30.9.2010
Häufigkeit	täglich, jeweils vormittags 11:00 Uhr und nachmittags 15:00 Uhr Hinweis: Die Nachricht erscheint auf dem Bildschirm, bis der Nutzer die Frage beantwortet. Daher variieren die Antwortzeitpunkte leicht, wenn eine Person zum Befragungszeitpunkt nicht am Arbeitsplatz ist.	
Methodik	computerbasierte Befragung	
Fragen	1. Wie empfindest Du die Raumtemperatur im Moment? (mit 7 = heiß; 1 = kalt) 2. Wie zufrieden bist Du mit der Raumtemperatur? (mit 4 = sehr unzufrieden; 1 = sehr zufrieden) 3. Verspürst Du im Moment eine Luftbewegung/Zugluft? (mit 5 = gar nicht ; 1 = sehr stark) 4. Wie empfindest Du die Luftfeuchte im Moment? (mit 5 = sehr trocken; 1 = sehr feucht)	
Messung		
Ort	am Arbeitsplatz der befragten Nutzer	
Innenraumklima	Raumtemperatur [°C] und Raumlufffeuchte [%] in 12-Minuten-Auflösung	
Nutzerverhalten	Stellung Fensteröffnung und Sonnenschutz	keine Messung
Anzahl der Räume	10	14
Außenklima	Außenlufttemperatur [°C], Solarstrahlung [W/m ²], Windgeschwindigkeit [m/s], Außenluftfeuchte [%] in 1-Minuten-Auflösung an lokaler Wetterstation	
Möglichkeiten der Einflussnahme des Nutzers		
	keine Bekleidungs Vorschrift	
	manuelle Bedienung des Sonnenschutzes	
	manuelle Bedienung der Fenster	
	mindestens 1 Fenster pro 2 Nutzer	
	keine Beeinflussung des Raumtemperatursollwertes, da Nachlüftungskonzept	Sollwertregler in 2-Kelvin-Schritten

Abfragefenster, in dem sie Fragen nach dem Raumklima beantworten sollten. Es wurden vormittags und nachmittags folgende vier Fragen mit entsprechender Skalierung gestellt:

1. Wie empfindest Du die Raumtemperatur im Moment? (mit 7 = heiß; 1 = kalt)
2. Wie zufrieden bist Du mit der Raumtemperatur? (mit 4 = sehr unzufrieden; 1 = sehr zufrieden)
3. Verspürst Du im Moment eine Luftbewegung/Zugluft? (mit 5 = gar nicht ; 1 = sehr stark)
4. Wie empfindest Du die Luftfeuchte im Moment? (mit 5 = sehr trocken; 1 = sehr feucht)

Die Einschätzung des Raumklimas erfolgte auf einer 7-stufigen Skala, die Veränderungswünsche auf einer 5-stufigen Skala. Bei beiden Skalen waren nur die Endpunkte, nicht die Zwischenabstufungen explizit benannt („sehr zufrieden“ – „sehr unzufrieden“). Die Skala der Frage nach der Zufriedenheit wurde geradzahlig gehalten, um neutrale Antworten zu vermeiden und damit eine klare Unterscheidung zwischen „zufrieden“ und „unzufrieden“ zu erhalten.

3.3 Zusätzliche Befragung zu ergriffenen Maßnahmen

An vier Sommertagen mit sehr hohen Außentemperaturen wurden die Nutzer im Gebäude SIC mit einem ausführlichen, schriftlichen Fragebogen befragt, welche Maßnahmen sie jeweils vormittags und nachmittags ergriffen haben, um den (empfundenen) thermischen Komfort zu verbessern. In diesem Fragebogen wurde auch um eine Selbsteinschätzung zur Produktivität gebeten.

3.4 Messung

Parallel zur Befragung wurden zur Bewertung des thermischen Raumkomforts folgende Parameter in zeitlich hoher Auflösung (Zeitschrittweite: 12 Minuten) raumweise bzw. am Arbeitsplatz erhoben:

- Messungen am Arbeitsplatz der Nutzer: operative Raumtemperatur und relative Luftfeuchtigkeit
- Messungen im Büroraum: Fensteröffnung und Status der Jalousien
- Wetter an lokaler Wetterstation: Außentemperatur, Solarstrahlung, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Windrichtung



3.5 Auswertung

Die computerbasiert erhobenen Daten der Befragung und die arbeitsplatzbezogenen Messdaten zum Befragungszeitpunkt wurden zu einem Gesamtdatensatz zusammengeführt und mit dem Programm SPSS [15] analysiert. Zur Aufstellung eines Komfortmodells bzw. zur Bestimmung einer Raumsolltemperatur wurden Regressionsanalysen zur Modellierung des Zusammenhangs zwischen Außentemperatur, Raumtemperatur und Zufriedenheit verwendet.

4 Gebäude- und Energiekonzepte der Demonstrationsgebäude

Die für die Befragung genutzten Demonstrationsgebäude (Bild 2) haben zum Ziel, durch passive Maßnahmen und den Einsatz von Umweltwärmesenken (Außenluft, Grundwasser) den Kühlenergiebedarf (ca. $25 \text{ kW}_{\text{therm}}/\text{m}^2\text{a}$) und den Gesamtenergiebedarf des Gebäudes für die Bereiche Heizen, Kühlen und Lüften deutlich zu senken. Dies wird erreicht durch eine gut gedämmte und dichte Gebäudehülle, konsequent begrenzte solare Lasten (außen liegender Sonnenschutz), eine effektive hygienische Lüftung mit Wärmerückgewinnung, ausreichend thermische Gebäudespeicherkapazität (in erster Linie durch nicht abgehängte Betondecken) und begrenzte interne Lasten (effiziente Bürogeräte, Tageslichtnutzung), Tabelle 2. In beiden Gebäuden hat der Nutzer die Möglichkeit, durch Öffnung der Fenster, Benutzen des Sonnenschutzes und Verstellen von Raumtemperatursollwerten (nur SCF) Einfluss auf das Innenraumklima zu nehmen. Die Nutzer arbeiten in Zwei-, Vier-Personen und Gruppenbüros. Das Energiekonzept der Gebäude für Heizen, Kühlen und Lüften ist schematisch in Bild 3 dargestellt.

Lüftungssystem

Während der Anwesenheitszeit der Nutzer wird das Gebäude SIC manuell über Fenster belüftet. Das Gebäude SCF verfügt über eine Zu- und Abluftanlage. Die Zuluft wird über einen grundwassergekoppelten Wasser-Luft-Wärmeübertrager etwas gekühlt.

Kühlkonzept

Im Gebäude SIC wird zur Kühlung im Sommer ein maschinelles Nachtlüftungskonzept mit Abluftanlage (1,5-fa-



Bild 2. Bürogebäude: SIC (links) mit maschinellern Nachtlüftungskonzept und SCF (rechts) mit wassergeführter Kühlung (Quelle: Energieoptimiertes Bauen (EnOB), www.enob.info und UNMÜSSIG GmbH)

Fig. 2. Office buildings: SIC (left) with mechanical night ventilation concept and SCF (right) with water-driven cooling concept (source: Research for Energy Optimized Buildings (EnOB), www.enob.info/eng/ and UNMÜSSIG GmbH)

Tabelle 2. Informationen zu den Gebäuden SIC und SCF
Table 2. Information on buildings SIC and SCF

	SCF	SIC
Gebäude und Nutzung		
Nutzung, Anzahl Nutzer	Büro, –	Büro, 400
Nutzungszeit	8:00–20:00	6:00–20:00
Fertigstellung	2010	2003
Anzahl Geschosse	5	5
beh. Nettogrundfläche [m ²]	4.500	13.833
A-V-Verhältnis [m ⁻¹]	0,33	0,29
Gebäudehülle		
Verschattung	außenliegende Jalousie, zentrale Steuerung, Verschattungsfaktor 0,2	außenliegende Jalousie, zentrale Steuerung, Verschattungsfaktor 0,2
U-Wert [W/(m ² K)]	keine Information	Außenwand 0,19 Fenster 1,3 Dach 0,19
Fenster	2-Scheiben WSG	2-Scheiben WSG g-Wert 0,60 Anteil Fenster an Fassade 33 bis 49 %
Kühlkonzept		
Umweltwärmesenke	Außenluft, Grundwasser	Außenluft
Energieträger	Strom	Strom
Kühlsystem	freie Kühlung mittels Grundwasser und Kältemaschine + Rückkühlwerk	maschinelle Nachtlüftung
Leistung [kW _{therm}]	227	–
Übergabesystem	thermoaktive Bauteilsysteme	Luft
Lüftungskonzept		
öffnbare Fenster	ja	ja
Nachtlüftung	nein	ja
maschinelle Lüftung	ja	ja
Luftentfeuchtung	nein	nein
Vorkühlung Zuluft	ja	nein

cher Luftwechsel) eingesetzt. Die Nachtlüftung wird über einen Temperaturvergleich zwischen dem Mittelwert der Raumtemperaturen und der Außentemperatur sowie einer Freigabe über das Jahresprogramm geregelt. Die Außenluft strömt dabei über die in die Fensterrahmen integrierten Zuluftelemente im oberen Fensterbereich in den Raum nach und gelangt über eine Blende in den Abluftkanal.

Das Gebäude SCF wird aktiv über thermoaktive Bauteilsysteme (hier: Betonkerntemperierung, BKT) gekühlt. Die Rohrregister sind zentral in den Decken der Büroräume verlegt (Rohrdurchmesser 20 mm, Verlegeabstand 150 mm). Das System ist auf eine Vorlauftemperatur von 16 °C und eine Temperaturspreizung von 3 K ausgelegt. Jeder Büroraum verfügt über eine individuelle Raumtemperaturregelung (Sollwertregler in 2-K-Schritten). Damit gibt es im ge-

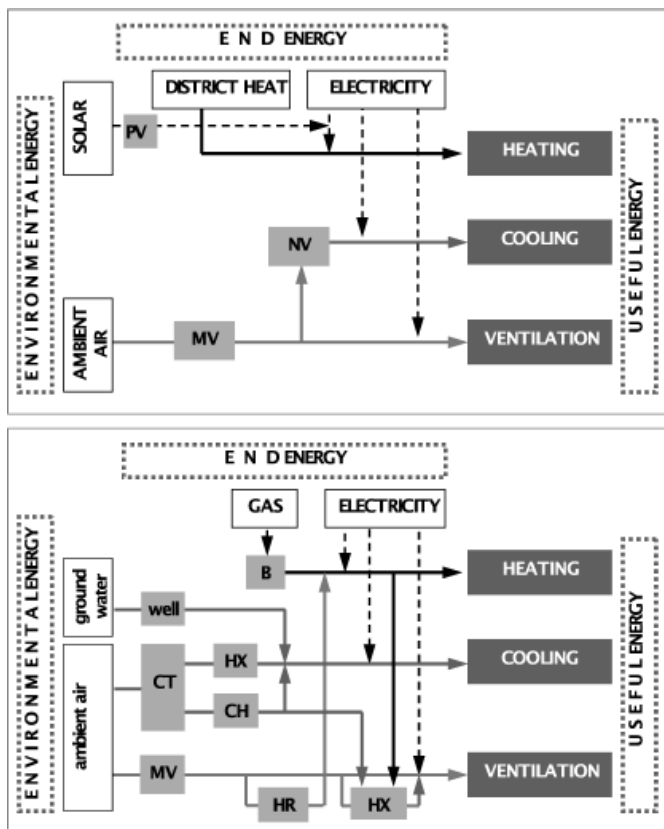


Bild 3. Versorgungsschema der Gebäude SIC und SCF; Anmerkungen: maschinelle Lüftung (MV), Nachtlüftung (NV), Photovoltaik (PV), Gaskessel (B), Wärmerückgewinnung (HR), Wärmeübertrager (HX), Kühlturm (CT), Grundwasserbrunnen (well), Kältemaschine (CH)
Fig. 3. Energy scheme of buildings SIC and SCF; note: mechanical ventilation (MV), night ventilation (NV), photovoltaics (PV), gas boiler (B), heat recovery (HR), heat exchanger (HX), cooling tower (CT), chiller (CH)

samten Gebäude 263 BKT-Kreise, die jeweils über einen elektronischen Stellantrieb gesteuert werden. Die Bereitstellung von Kälte erfolgt zum einen direkt über die Nutzung von Grundwasser (Temperaturniveau im Sommer zwischen 14 und 19 °C, Leistung ca. 200 kW_{therm}) und zum anderen über Rückkühlung an die Außenluft mittels Nasskühltürmen (200 kW_{therm}). In Zeiten einer höheren Bedarfsanforderung kann Kälte auch über zwei außenluftgekühlte Kompressionskältemaschinen bereitgestellt werden.

5 Ergebnisse der Feldstudie

Thermischer Raumkomfort in den zwei Nichtwohngebäuden wird anhand der Europäischen Richtlinie DIN EN 15251:2007-08 bewertet: (i) PMV Komfortmodell, (ii) adaptives Komfortmodell und (iii) adaptives Komfortmodell nach dem nationalen Anhang (DIN EN 15251/NA:2012-02). Gemäß der definierten Komfortnorm berücksichtigt die standardisierte Auswertung der Messkampagnen folgende Randbedingungen:

Nutzungszeiten

Der thermische Raumkomfort wird ausschließlich während der Anwesenheitszeit der Nutzer bewertet, werktags von 8:00 bis 19:00 Uhr. Feiertage und Urlaubszeiten werden nicht gesondert berücksichtigt.

Gebäudefläche

In den untersuchten Gebäuden wurden in 10 (SIC) bzw. 14 (SCF) repräsentativen Büroräumen Größen gemessen, die zur Bewertung des thermischen Komforts im Gebäude herangezogen werden.

Saisonale Bewertung

Die Bewertung des thermischen Raumkomforts, d. h. die Überschreitungshäufigkeit der definierten Komfortklassen I bis III, erfolgt für die gesamte Sommerperiode und nicht auf Tages- oder Wochenbasis.

Definition Sommerperiode

Die Komfortnorm DIN EN 15251 ist nicht konsistent in der Unterteilung zwischen Winter- und Sommerperiode, d. h. die Definition der Komfortgrenzen für Winter- und Sommer- bzw. Heiz- und Kühlperiode folgt für das adaptive und das PMV-Komfortmodell jeweils nach einem anderen Ansatz. Im PMV-Komfortmodell nach *Fanger* bestimmt der Bekleidungsgrad (clo) des Nutzers die jeweilige Periode (Winter 1,0 clo und Sommer 0,5 clo). Das adaptive Komfortmodell definiert obere Komfortgrenzen in der Sommerperiode für eine gleitende Außenmitteltemperatur von 10 bis 30 °C und untere Komfortgrenzen für einen Temperaturbereich von 15 bis 30 °C. Unterschiedliche Studien auf Basis von Nutzerbefragungen und Messungen zeigen einen deutlichen Zusammenhang zwischen dem Bekleidungsgrad von Nutzern in Büroräumen und dem Tagesmittel bzw. gleitendem Tagesmittel der Außentemperatur. Niedrige Tagesmittel der Außentemperatur korrelieren mit clo-Werten von 0,7 bis 1,0 und erhöhte bzw. hohe Tagesmittel der Außentemperatur mit clo-Werten von 0,5 bis 1,0 – ein Bekleidungsgrad von clo 0,7 (typische Bürokleidung mit langem Hemd, aber ohne Jacke) entspricht in etwa einem Tagesmittel der Außentemperatur von 15 °C. Für die Unterscheidung von Winter- zu Sommerperiode wurde somit ein gleitender Tagesmittelwert für die Außentemperatur von 15 °C festgelegt.

Toleranzbereich der Komfortbewertung

In den Büroräumen weicht die gemessene Raumtemperatur während der Anwesenheitszeit der Nutzer in der Sommerperiode um nicht mehr als 5 % von den Grenzwerten der entsprechenden Kategorie I bis III ab.

Komfortklasse für thermischen Raumkomfort

Der Raumkomfort wird entsprechend der definierten oberen und unteren Komfortklassen I bis IV bewertet (Klasse I – hohes Maß an Erwartung, Klasse II – normales Maß an Erwartung, Klasse III – annehmbares, moderates Maß an Erwartung und Klasse IV – Werte außerhalb der definierten Komfortkategorien).

Komfortklasse für Raumfeuchte

Die Bewertung der relativen Luftfeuchtigkeit erfolgt ebenfalls nach den definierten Komfortklassen I bis III der DIN EN 15251:2007-08. Dabei ist zu berücksichtigen, dass diese Grenzwerte für die Auslegung von Klimaanlage mit Entfeuchtungseinrichtung definiert sind.

Ergebnisdarstellung

Die Ergebnisse der Messkampagnen werden in einer Komfortgrafik und in einem thermischen „Fußabdruck“ darge-

stellt. In der Komfortgrafik wird gemäß dem geforderten Komfortmodell die mittlere, stündlich gemessene Temperatur der Referenzräume über dem gleitenden Mittel der Außentemperatur dargestellt. In der Bewertung nach dem nationalen Anhang wird die aktuelle Außentemperatur als Referenztemperatur für die Komfortbewertung gewählt.

In den Bildern 4 bis 6 sind die Ergebnisse der Komfortauswertung für die gemessene Raumtemperatur und relative Luftfeuchtigkeit dargestellt.

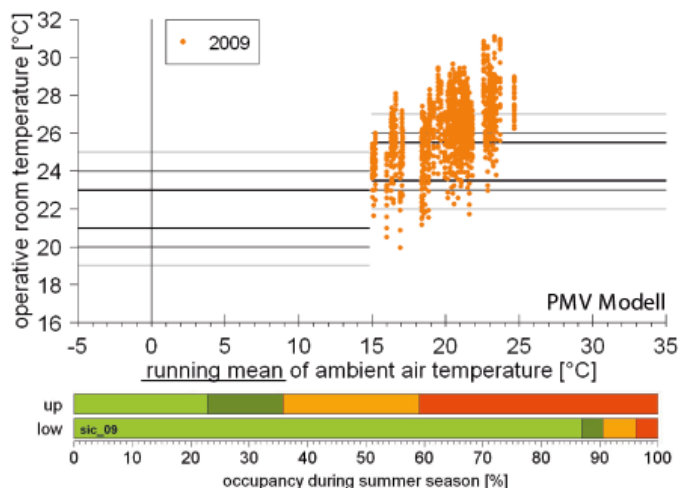
Zentrale Ergebnisse für das Gebäude SIC mit luftgeführter Kühlung:

- Nach dem PMV-Komfortmodell wird die definierte obere Komfortklasse II nur in 35 % der Anwesenheitszeit erreicht.
- Nach dem adaptiven Komfortmodell kann Komfortklasse II während 93 % der Anwesenheitszeit der Nutzer eingehalten werden.
- Die Komfortanforderung nach DIN EN 15251/NA können nur an wenigen Stunden eingehalten werden; Klasse III wird zu 18 % der Anwesenheitszeit erfüllt.
- Insbesondere bei Außentemperaturen mit einem gleitenden Tagesmittel größer 22 °C steigen die Raumtemperaturen deutlich über 28 °C.
- Auch bei höheren Außentemperaturen erfolgt eine Unterschreitung der unteren Komfortgrenzen, d. h. die Raumtemperaturen liegen zwischen Werten von 21 und 23,5 °C. Dies kann von den Nutzern als „zu kühl“ bzw. als unbehaglich empfunden werden.
- Die Temperaturen innerhalb eines Raumes schwanken über die Sommerperiode deutlich. Die mittleren 50 % der Werte umfassen einen Temperaturbereich von 2 bis 3 K.
- Raumtemperaturen zwischen den einzelnen untersuchten Räumen unterscheiden sich aufgrund interner und solarer Lasten (Belegungsdichte pro Raum und Ausrichtung der Fenster) und auf aufgrund des Nutzerverhaltens teilweise erheblich voneinander. Die Mittelwerte der Raumtemperaturen über die gesamte Sommerperiode liegen zwischen 25,5 und 28,5 °C. Das Verhalten der Nutzer wurde messtechnisch erfasst (Stellung Sonnenschutz und Fenster) und in einem ausführlichen Fragebogen an vier heißen Sommertagen abgefragt (z. B. Anpassung der Bekleidung), wird aber in diesem Artikel nicht ausgewertet und analysiert.
- Über die gesamte Sommerperiode werden die Grenzwerte für einen behaglichen Raumfeuchtekomfort mit Werten für die relative Feuchte zwischen 30 und 65 % zu 90 % der Anwesenheitszeit eingehalten. Während ca. 10 % der Anwesenheitszeit liegen die gemessenen Werte über der Schwülegrenze von 12 g_{Wasser}/kg_{Luft} nach DIN EN ISO 7730:2005 [13].

Zentrale Ergebnisse für das Gebäude SCF mit wassergeführter Kühlung:

- Nach dem PMV-Komfortmodell wird die obere Komfortklasse II an 65 % der Anwesenheitszeit gewährleistet.
- Nach dem adaptiven Komfortmodell kann die definierte obere Komfortklasse II während 93 % der Anwesenheitszeit der Nutzer eingehalten werden.
- Die Komfortanforderung nach nationalem Anhang der DIN EN 15251 werden für Klasse II zu 18 % und für

Luftgeführte Kühlung, SIC



Wassergeführte Kühlung, SCF

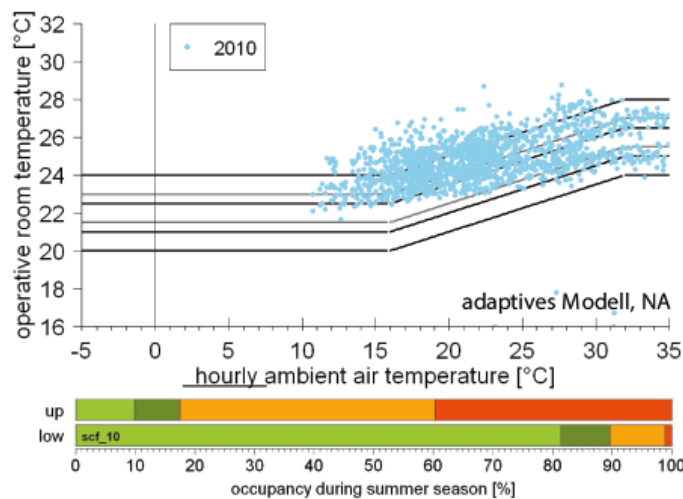
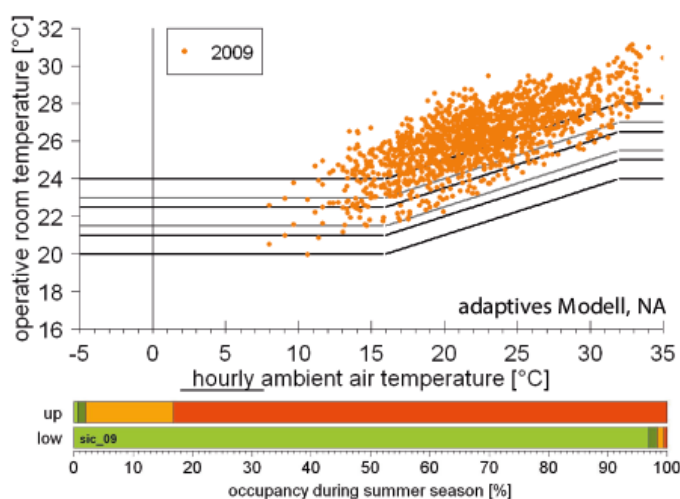
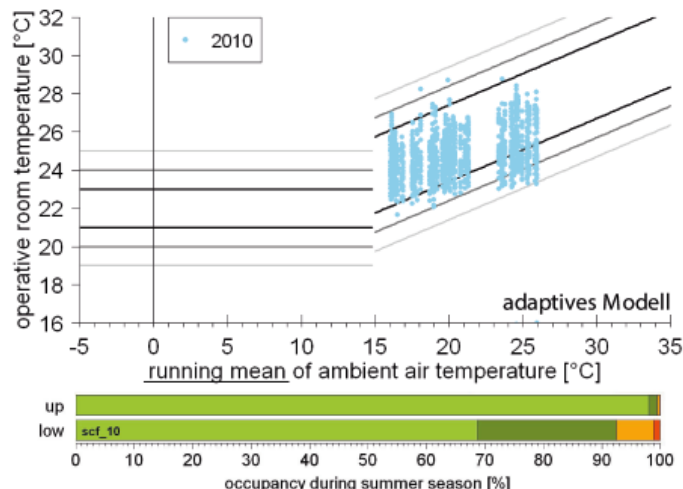
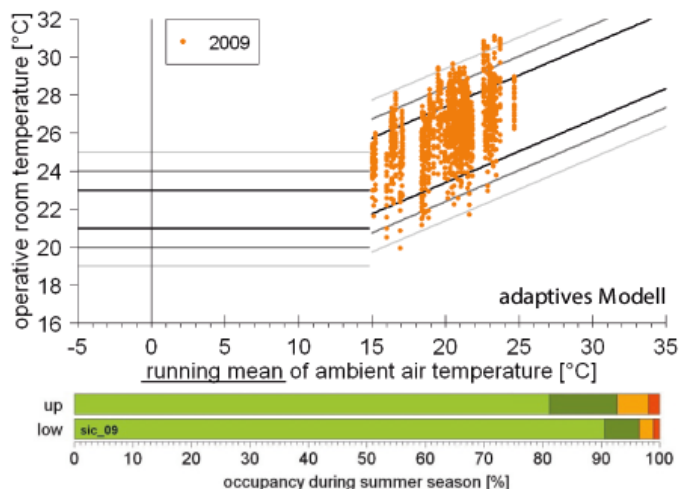
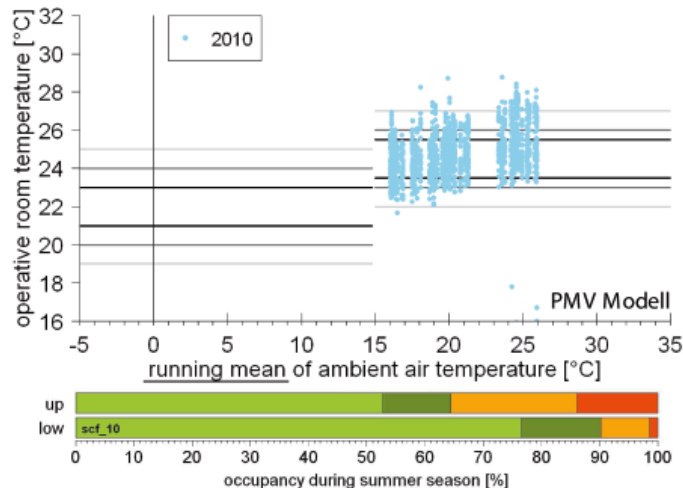


Bild 4. Thermischer Raumkomfort: (1) Komfortgrafik: stündlich operative Raumtemperatur [°C] über dem gleitenden Mittel der Außentemperatur [°C] während der Anwesenheitszeit der Nutzer nach DIN EN 15251:2007-08; oben: adaptives Komfortmodell, Mitte: PMV-Komfortmodell, unten: adaptives Komfortmodell nach nationalem Anhang DIN EN 15251/NA:2012:02; graue und schwarze Linien kennzeichnen die oberen und unteren Komfortgrenzen I bis III. (2) thermischer Komfort-Fußabdruck: prozentuale Anwesenheitszeit [%], an denen das Gebäude die Anforderungen der Komfortklasse I bis III erfüllt; Klasse I (hellgrün), Klasse II (dunkelgrün), Klasse III (orange) und außerhalb der definierten Komfortgrenzen; Hinweis: Änderung der Referenz-Außentemperatur

Fig. 4. Thermal comfort: (1) comfort figure: hourly operative room temperature of the building [°C] during the time of occupancy plotted against the running mean ambient air temperature [°C] according to DIN EN 15251:2007-08; top: adaptive comfort model, middle: PMV comfort model, and bottom: national appendix DIN EN 15251/NA:2012:02; grey and black lines indicate the upper and lower comfort boundaries I, II, and III. (2) the thermal comfort footprint for buildings indicates the time during occupancy in summer season [%], when thermal comfort complies with upper and lower boundaries of comfort class I to IV; note: class I (light green), class II (dark green), class III (orange), and outside the defined comfort classes (red); note: reference ambient air temperature changes

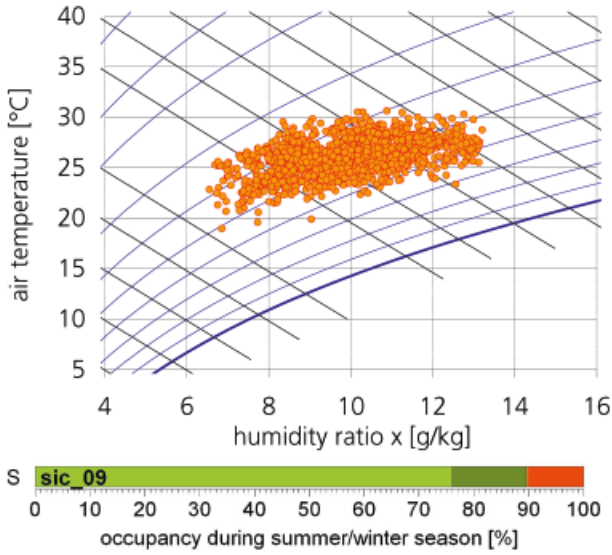
Klasse III zu 65 % der Anwesenheitszeit erfüllt. Die Auswertung zeigt, dass eine Überschreitung der Komfortgrenzen insbesondere bei Außentemperaturen (aktuelle Werte) zwischen 16 und 25 °C erfolgt. In Zeiten höherer Außentemperaturen mit Raumtemperatursollwerten zwischen 26 und 28 °C werden die Anforderungen der Klassen II und III erreicht.

- Auch bei Außentemperaturen mit einem gleitenden Tagesmittel größer 22 °C sind die maximalen Raumtempe-

raturen auf einen Bereich von 27 bis maximal 28 °C begrenzt.

- Wie beim Gebäude SIC findet eine deutliche Unterschreitung der unteren Komfortgrenzen der Klasse II statt. Nach PMV-Komfortmodell (Bild 4, oben rechts) findet die Unterschreitung eher zu Zeiten mit niedrigeren Außentemperaturen statt, wohingegen beim adaptiven Komfortmodell die Unterschreitung bei höheren Außentemperaturen auftritt.

Luftgeführte Kühlung, SIC



Wassergeführte Kühlung, SCF

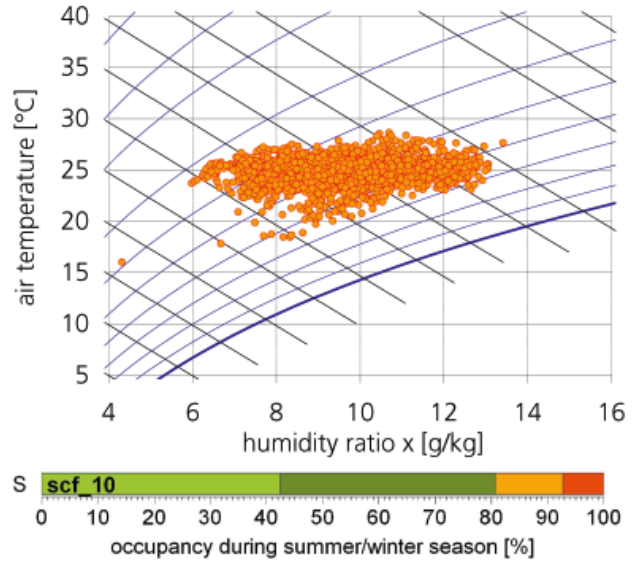
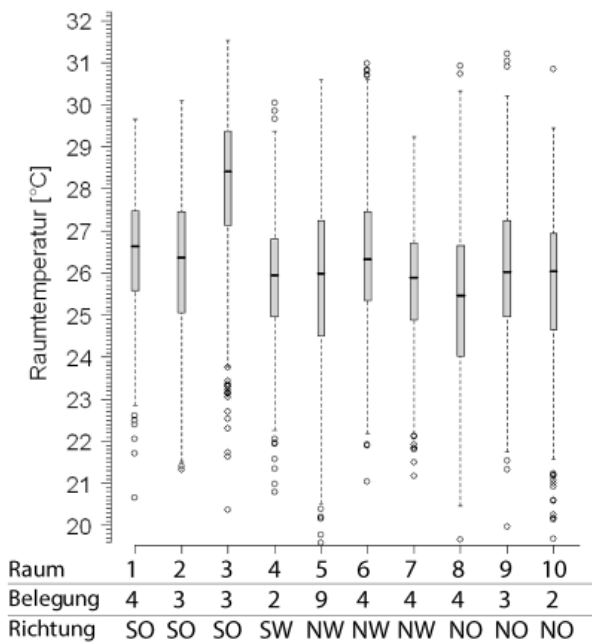


Bild 5. Raumfeuchtekomfort: stündlich gemessene Raumtemperatur und Raumfeuchte; dargestellt im h,x-Diagramm und Auswertung als Komfortfußabdruck

Fig. 5. Humidity comfort: hourly measured room temperature and humidity; presented as an hx diagram and as comfort footprint

Luftgeführte Kühlung, SIC



Wassergeführte Kühlung, SCF

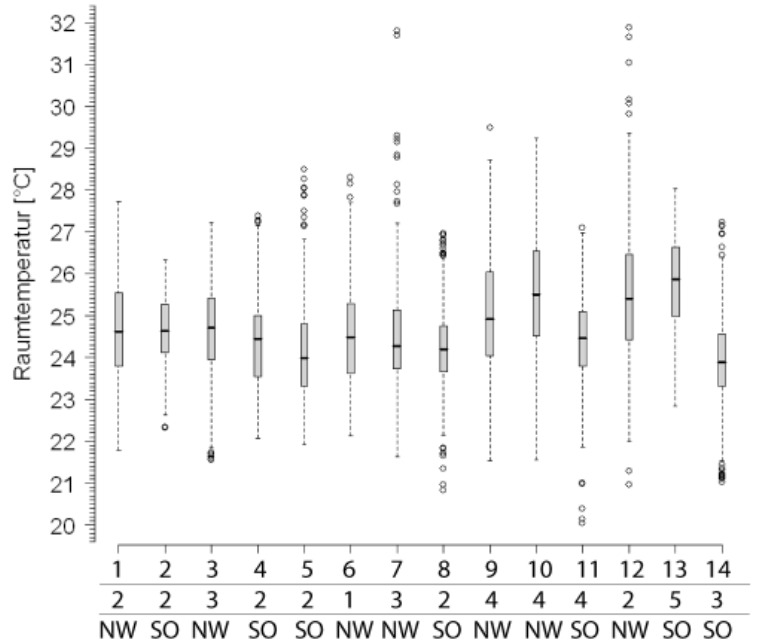


Bild 6. Raumtemperatur in den Büroräumen, dargestellt als Boxplot für die gesamte Sommerperiode; zusätzlich Anzahl der Personen pro Büroraum während der Befragung und Fensterausrichtung

Fig. 6. Room temperature in office rooms presented as boxplot for the summer; additionally number of persons per room during the period of questioning and window orientation

- Die Raumtemperaturen schwanken geringfügiger als im Gebäude SIC; die mittleren 50 % der gemessenen Tagesamplituden liegen in den einzelnen Räumen zwischen 1 und 2 K.
- Unterschiede zwischen den Temperaturen der einzelnen Büros sind etwas geringer ausgeprägt als im Gebäude SIC, aber auch hier haben offensichtlich Belegungsdichte und Raumausrichtung und damit unterschiedliche interne und solare Lasten einen Einfluss auf die Raumtemperaturen. Die Mittelwerte der Raumtemperaturen über die gesamte Sommerperiode liegen zwischen 24 und 26 °C.
- Der Raumfeuchtekomfort nach Klasse II und III wird nicht über die gesamte Sommerperiode gewährleistet. Die relative Feuchte liegt zwischen 30 und 70 %; an einigen Stunden wird die Schwülegrenze überschritten.

6 Ergebnisse zu Befragungen und Nutzerzufriedenheit

6.1 Empfinden der Raumtemperatur

In der täglichen Befragung gaben die Nutzer an, wie sie die Raumtemperatur zum Zeitpunkt der Befragung empfinden (7-stufige Skala von „kalt“ bis „heiß“) und wie zufrieden sie sind. Die Ergebnisse von empfundener und tatsächlich gemessener Temperatur sind in den Bildern 7 und 8 dargestellt. Bild 7 zeigt die stündlichen Raumtemperaturen über die gesamte Sommerperiode (graue Markierungen) sowie das Empfinden der Raumtemperatur zum Zeitpunkt der Befragung (farbige Rauten). Beide Befragungen in den Gebäuden machen deutlich, dass Raumtemperaturen über 26 °C in der Regel als „etwas warm“ bis „warm“ empfunden werden. Raumtemperaturen höher als 28 °C bewerteten die Befragten als „warm“ bis „heiß“. Raumtemperaturen bis zu einem gemessenen Wert von 20 °C wurden in der Untersuchung nie als

- „kalt“ empfunden. Bild 8 stellt das Empfinden der Raumtemperatur in den Zusammenhang mit der Zufriedenheit:
- Temperaturen unter 22 °C werden als „etwas kühl“ empfunden.
- Zufriedene Nutzer bewerten im Mittel bei beiden Kühlkonzepten eine Raumtemperatur bis 25 °C als „neutral“, von 26 bis 28 °C als „etwas warm“ und darüber hinaus als „warm“.
- Unerwartet gibt es recht viele unzufriedene Nutzer bei Raumtemperaturen bis 26 °C: 11 % im Gebäude SIC und 8 % beim Gebäude SCF. Das Temperaturempfinden streut dabei in einem weiten Bereich von „kühl“ bis „warm“.
- Bei beiden Kühlkonzepten bewerten die unzufriedenen Nutzer Raumtemperaturen von über 26 °C im Mittel als „warm“.

6.2 Zufriedenheit mit der Raumtemperatur

Bild 9 zeigt die Zufriedenheit der befragten Nutzer mit der Raumtemperatur. Sowohl die Angaben „sehr zufrieden“ und „zufrieden“ werden zusammengefasst als auch „sehr unzufrieden“ und „unzufrieden“. Bei der Gesamtzufriedenheit mit den Raumtemperaturen ergeben sich offensichtliche Unterschiede zwischen den Kühlkonzepten. Bild 9 zeigt die stündliche Raumtemperatur aufgetragen über dem gleitenden Tagesmittel der Außentemperatur, mit der Angabe der Nutzerzufriedenheit:

- Im Gebäude SIC (Nachtlüftung) sind 77 % der Nutzer über der gesamten Untersuchungsperiode mit der Raumtemperatur zufrieden. Anders im Gebäude SCF mit wassergeführter Kühlung; hier waren sogar 91 % der Befragten zufrieden mit der Raumtemperatur.

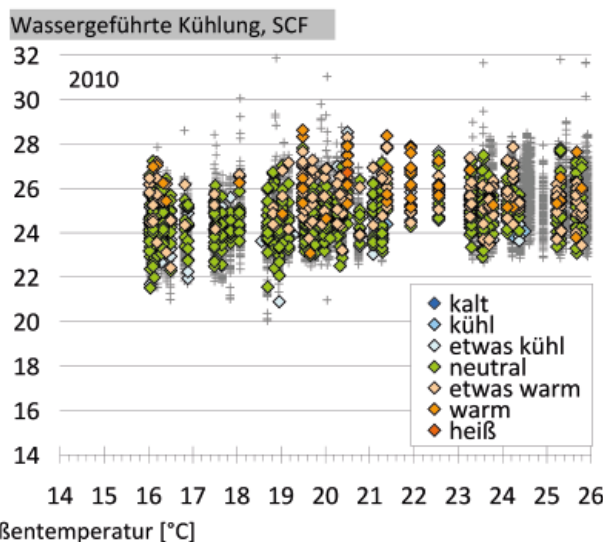
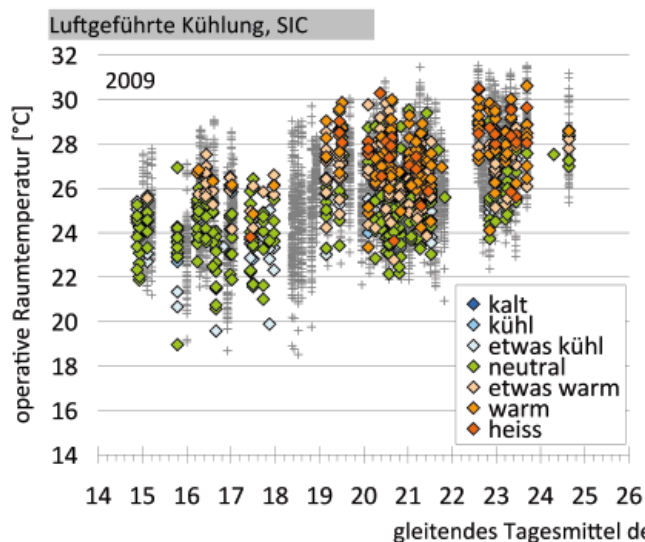


Bild 7. Empfinden der Nutzer mit der Raumtemperatur: stündliche operative Raumtemperatur [°C] an allen Arbeitsplätzen der befragten Nutzer, aufgetragen über dem gleitenden Mittel der Außentemperatur [°C]; zusätzlich dargestellt ist das Empfinden der Nutzer mit der Raumtemperatur nach 7-stufiger Bewertung von „kalt“ bis „heiß“; Anmerkung: farbige Punkte stellen die Raumtemperaturmessung zum Zeitpunkt der Befragung dar; graue Punkte stellen alle Messungen innerhalb der Anwesenheitszeit dar

Fig. 7. Perception of the room temperature by the user: hourly operative room temperature [°C] at all working places of the users interviewed plotted against the running mean of the daily ambient air temperature [°C]; additionally given is the perception of the user with the room temperature following a 7-point scale from “cold” to “hot”; note: colored markers present the measurement at the time of questioning; grey markers present all measurements during occupancy

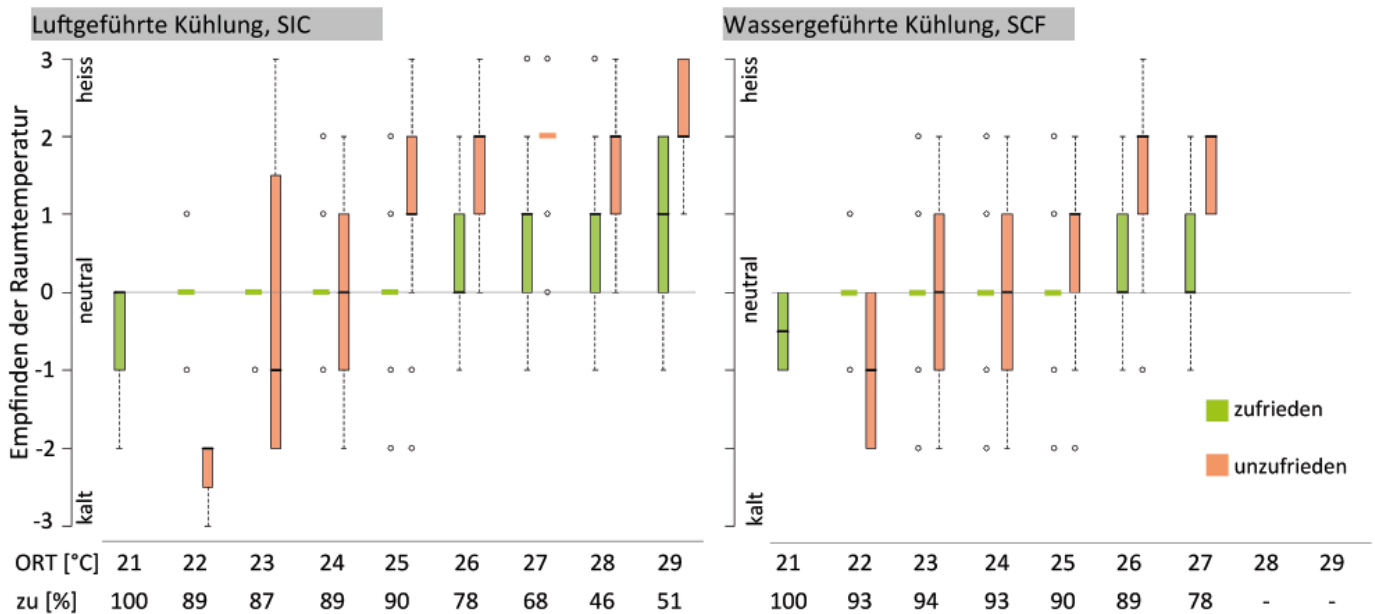


Bild 8. Empfinden und Zufriedenheit der Nutzer mit der Raumtemperatur: Nutzerempfinden der Raumtemperatur nach 7-stufiger Bewertung und Vergleich mit den gemessenen Raumtemperaturen (ORT) zum Zeitpunkt der Befragung [°C]; die Darstellung ist getrennt nach der Zufriedenheit mit der Raumtemperatur (zufrieden mit der Raumtemperatur: grün, unzufrieden mit der Raumtemperatur: orange); Anmerkung: Raumtemperaturen sind in Klassen eingeteilt; von < 21, 21-22, 22-23, 23-24, 24-25, 26-27, 28, 29, > 29 °C; zusätzlich angegeben ist der prozentuale Anteil zufriedener Nutzer mit der Raumtemperatur [%] in den jeweiligen Temperaturklassen

Fig. 8. Users' perception of room temperature compared to measurements of room temperature and satisfaction with room temperature: perception of the room temperature by the users on a 7-point scale (from "cold" to "hot") at a given operative room temperature (x-axis) at the time of questioning. Results are colour-coded according to the degree of satisfaction, i.e., users are "very satisfied"/"satisfied" (green) and "dissatisfied"/"very dissatisfied" (orange) with prevailing room temperature. Note: measured operative room temperature (ORT) is categorized into < 21, 21-22, 22-23, 23-24, 24-25, 26-27, 28, 29, > 29 °C. Additionally, percentage of satisfied users with the room temperature [%] in the temperature classes

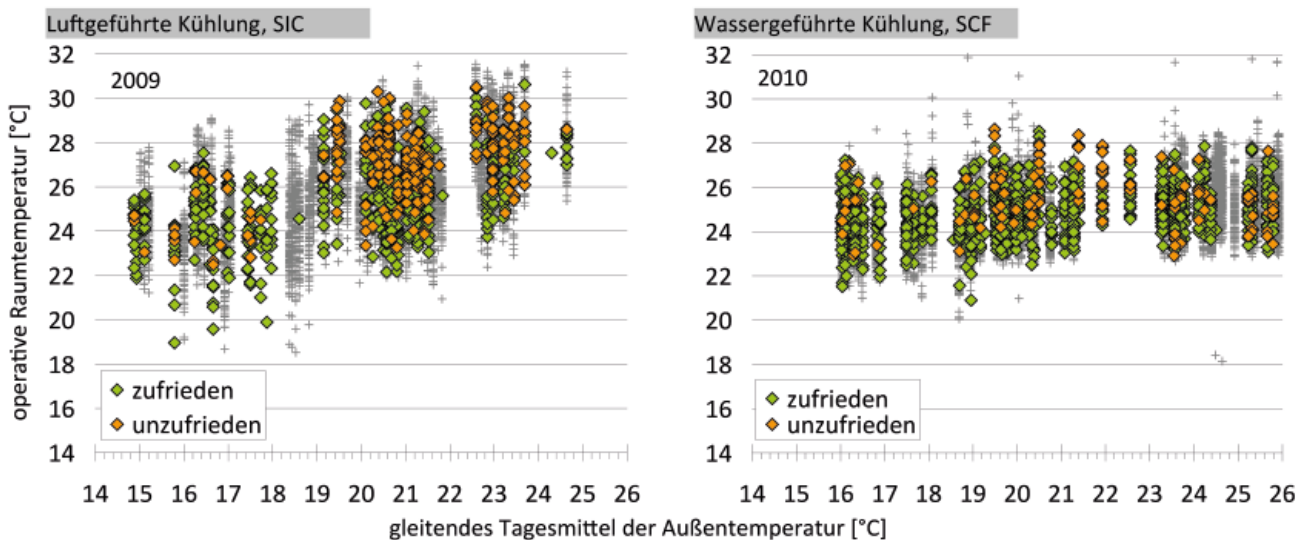


Bild 9. Nutzerzufriedenheit mit der Raumtemperatur: stündlich gemessene, operative Raumtemperatur [°C], aufgetragen über dem gleitenden Mittel der Außentemperatur [°C] während der Anwesenheitszeit der Nutzer: Raumtemperaturmessung (grau), Nutzer ist „sehr zufrieden“ oder „zufrieden“ mit der Raumtemperatur (hellgrün) und Nutzer ist „unzufrieden“ oder „sehr unzufrieden“ mit der Raumtemperatur (orange); zusätzlich dargestellt sind die Komforttemperatur: nach DIN EN 15251:2007-08 (rot) und gemäß der Befragungsanalyse (schwarz) sowie die entsprechenden Komfortgrenzen für die Klassen I bis III

Fig. 9. Occupant satisfaction with room temperature: hourly measured operative room temperature [°C] plotted against the running mean ambient air temperature [°C] during time of occupancy: room temperature measurements (grey), user is "very satisfied" or "satisfied" with the room temperature (bright green) and user is "unsatisfied" or "very unsatisfied" with the room temperature (orange); further, comfort temperature is plotted: according to DIN EN 15251:2007-08 (red) and according to post occupancy evaluation (black) as well as comfort boundaries for classes I to III

- Die Anzahl der mit der Raumtemperatur unzufriedenen Nutzer im Gebäude SIC korreliert mit der Raumtemperatur, d. h. die Anzahl unzufriedener Nutzer erhöht sich mit steigenden Raumtemperaturen.
- Offensichtlich ist eine Raumtemperatur von 26 °C eine markante Grenze für Unzufriedenheit mit dem thermischen Raumkomfort. Ungeachtet der vorherrschenden Außentemperaturen sind 89 % der Nutzer mit Raumtemperaturen kleiner 26 °C zufrieden. Mit Raumtemperaturen zwischen 26 und 28 °C sind immerhin noch 74 % der Nutzer zufrieden. Noch höhere Raumtemperaturen führen zu einem beachtlichen Anteil Unzufriedener von 52 %.
- Im Gebäude SCF wurden maximale Raumtemperaturen von nur 28 °C und das an relativ wenigen Stunden gemessen. Dies erlaubt keinen direkten Vergleich mit dem Gebäude SIC – hier lagen maximale Raumtemperaturen über 29 °C. Dennoch scheint auch beim Gebäude SCF die Unzufriedenheit der Nutzer mit Raumtemperaturen größer 26 °C signifikant zuzunehmen.

6.3 Empfinden der Luftfeuchte

In der täglichen Untersuchung sollten die Nutzer angeben, wie sie die Raumlufffeuchte zum Zeitpunkt der Befragung empfanden (5-stufige Skala von „sehr trocken“ bis „sehr feucht“). Bild 10 zeigt die stündlich gemessene relative Luftfeuchtigkeit am Arbeitsplatz sowie das Empfinden der Raumlufffeuchte zum Zeitpunkt der Befragung, aufgetragen über der gemessenen operativen Raumtemperatur. In beiden Gebäuden wird vom Großteil der Nutzer (SIC: 64 % und SCF: 70 %) die Luftfeuchte über den Befragungszeitraum als „neutral“ empfunden. Die Analyse der Nutzerantworten zeigt keine Korrelation zwischen der gemessenen Raumlufffeuchte und dem Empfinden der Nutzer. Dieses Ergebnis bestätigen auch andere Studien auf Basis von Nutzerbefragungen, z. B. [14]. Das Nutzerempfinden

mit der Raumlufffeuchte streut sowohl stark über der gemessenen relativen Raumlufffeuchtigkeit als auch über der gemessenen Raumtemperatur.

Interessant ist der Zusammenhang zwischen der empfundenen Raumlufffeuchte und der Zufriedenheit mit der Raumtemperatur (Bild 11):

- Sind die Nutzer mit der Raumtemperatur „zufrieden“ oder „sehr zufrieden“, wurde die Raumlufffeuchte bei beiden Kühlkonzepten immer als „neutral“ bewertet.
- Nutzer, die mit Raumtemperaturen bis 24 °C im Nachtlüftungsgebäude unzufrieden sind, bewerten die Raumlufffeuchte im Mittel als „neutral“ bis „feucht“.
- Bei Raumtemperaturen über 25 °C empfinden unzufriedene Nutzer die Raumlufffeuchte im Mittel als „trocken“.
- Die Nutzerzufriedenheit mit der Raumtemperatur im wassergeführten Kühlkonzept ist über den gesamten Befragungszeitraum sehr hoch. Selten empfinden die Nutzer die Raumlufffeuchte als „trocken“ bzw. „feucht“ (6 bzw. 8 % der Nutzerantworten).

6.4 Ermittlung der Komforttemperatur

Auf Basis der vorhandenen Daten aus der Erhebung wurde mit Hilfe von Regressionsanalysen ein Modell zur Vorhersage der Komforttemperatur entwickelt. Nach mehreren Testläufen liefert die Kombination aus gleitendem Mittel der Außentemperatur (Berechnung nach DIN EN 15251:2007-08), momentaner Raumtemperatur zum Zeitpunkt der Online-Erhebung und der Frage „Wie zufrieden bist Du mit der Raumtemperatur?“ die verlässlichste Korrelation.

Gesucht wurde nach dem Modell, das am besten vorhersagt, wann der Anteil der mit der Temperatur zufriedenen Mitarbeiter bei einer gegebenen Raumtemperatur in Abhängigkeit von dem gleitenden Mittel der Außentemperatur am größten ist. Daher wurde zunächst eine Regres-

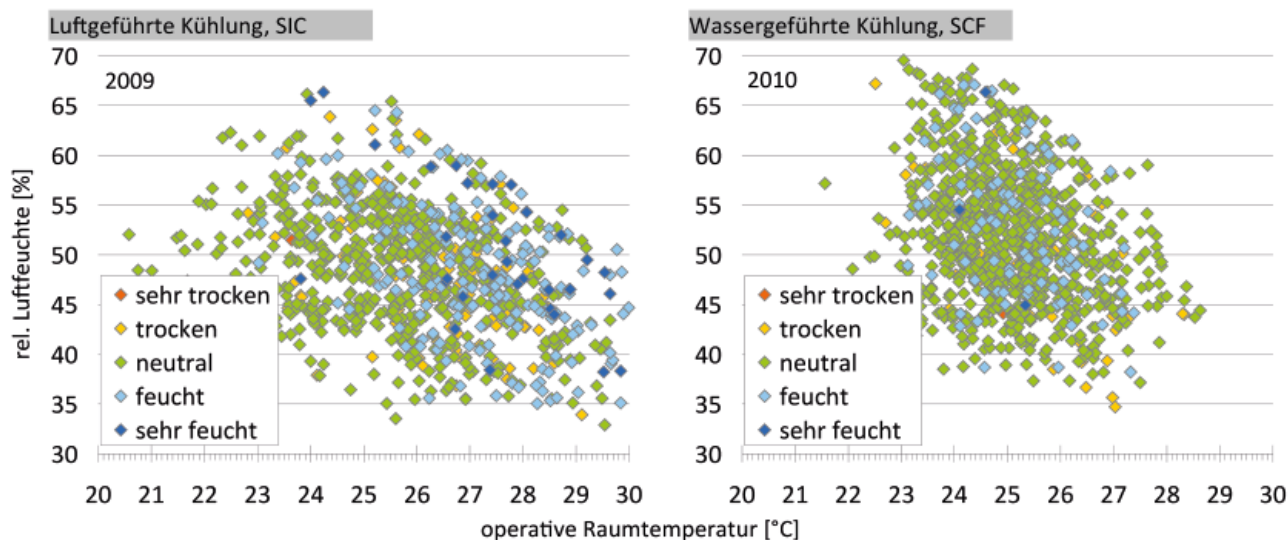


Bild 10. Empfundene Raumlufffeuchte: stündliche relative Luftfeuchte [%] an allen Arbeitsplätzen der befragten Nutzer, aufgetragen über der operativen Raumtemperatur [°C]; zusätzlich dargestellt ist das Empfinden der Nutzer mit der Luftfeuchte nach 5-skaliiger Bewertung von „sehr trocken“ bis „sehr feucht“

Fig. 10. Perceived humidity: hourly relative humidity [%] at all working places of the users interviewed plotted against operative room temperature [°C]; additionally given is the perception of the user with the relative humidity following a 5-point scale from “very dry” to “very humid”

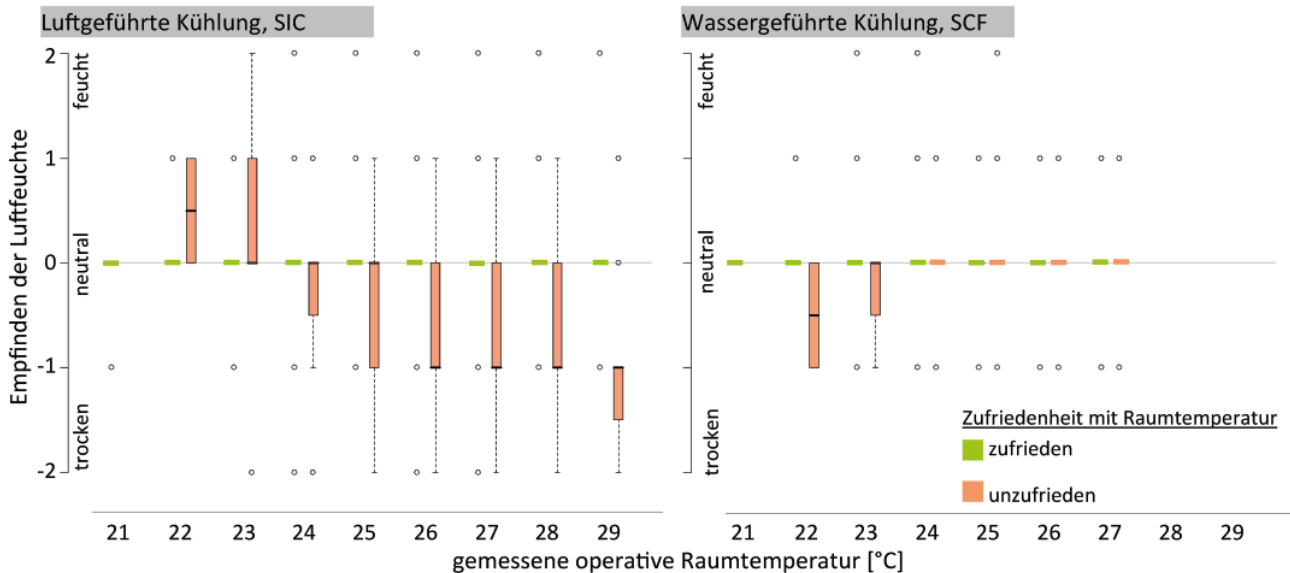


Bild 11. Empfinden der Nutzer mit der Luftfeuchte im Vergleich zur gemessenen Raumtemperatur und der Zufriedenheit mit der Raumtemperatur: Empfinden der Nutzer mit der Luftfeuchte nach 5-stufiger Bewertung und Vergleich mit den gemessenen Raumtemperaturen zum Zeitpunkt der Befragung [°C]; die Darstellung ist getrennt nach der Zufriedenheit mit der Raumtemperatur; Anmerkung: Raumtemperaturen sind in Klassen eingeteilt; von < 21, 21–22, 22–23, 23–24, 24–25, 26–27, 28, 29, > 29 °C

Fig. 11. Perception of user with humidity compared with measurements of room temperature and satisfaction with room temperature: perception of user with indoor humidity following a 5-point scale compared to the measurements of room temperature at the time of questioning; results are presented according to the satisfaction with the room temperature; note: measured room temperature is categorized in < 21, 21–22, 22–23, 23–24, 24–25, 26–27, 28, 29, > 29 °C

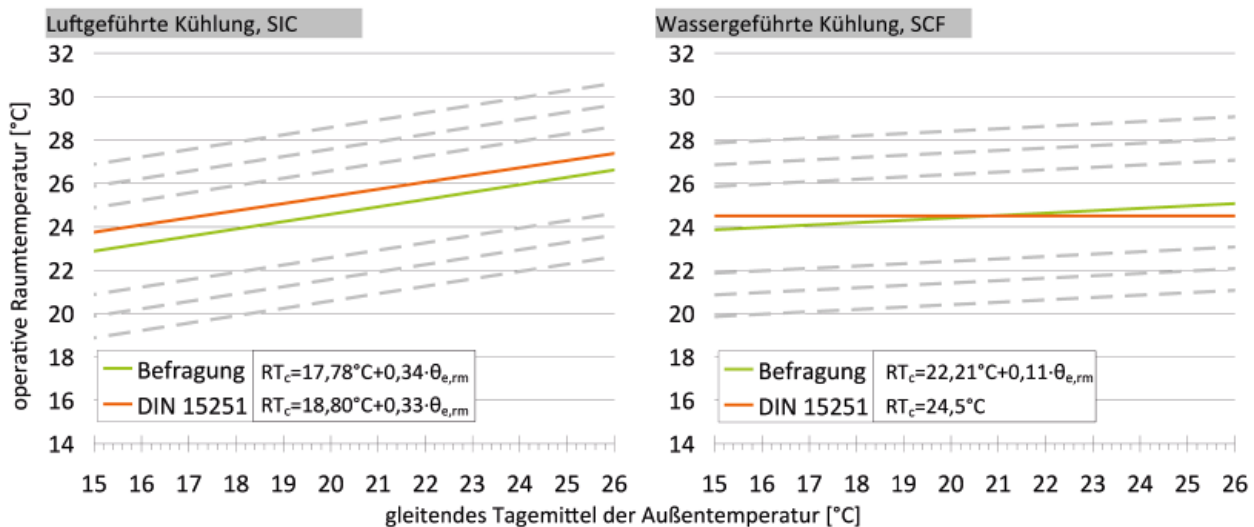


Bild 12. Vergleich der ermittelten Komforttemperatur auf Basis der Nutzerbefragung und der Komfortnorm DIN EN 15251
Fig. 12. Comparison of comfort temperature derived by occupancy evaluation and guideline DIN EN 15251

sion von der Raumtemperatur auf das gleitende Mittel der Außentemperatur nur für die mit der Raumtemperatur zufriedenen Nutzer berechnet, d. h. es wurde berechnet, unter welchen Bedingungen die Nutzer zufrieden sind. Die berechnete Gleichung wurde mit einer Regression der Raumtemperatur auf das gleitende Mittel der Außentemperatur nur für die mit der Raumtemperatur unzufriedenen Nutzer verrechnet, d. h. wann die Nutzer unzufrieden sind. So entsteht ein pareto-optimales Vorhersagemodell, das die Bedingungen vorhersagt, bei denen die Anzahl der Zufriedenen maximal und gleichzeitig die Anzahl der Un-

zufriedenen minimal ist. Die Ergebnisse sind in Bild 12 dargestellt.

Zentrale Ergebnisse für das Gebäude SIC mit luftgeführter Kühlung sind:

- Die Raumkomforttemperatur bestimmt sich zu $RT_c = 17,78^\circ\text{C} + 0,34 \cdot \theta_{e,rm}$. Mit den vorliegenden Daten konnte das Modell für Tagesmittel der Außentemperatur ab ca. 16 °C entwickelt werden.
- Die von der Norm definierten Komfortklassen I bis III von 2, 3 bzw. 4 K von der Komforttemperatur führen zu rund 85, 81 bzw. 77 % zufriedenen Nutzern.

- In der ermittelten Gleichung der Komforttemperatur ist neben einer Konstante ein deutlich linearer Einfluss des gleitenden Tagesmittels der Außentemperatur zu beobachten. Je wärmer die Außentemperatur, desto höher die Raumtemperaturen, bei denen die Nutzer noch zufrieden mit der Raumtemperatur sind.
 - Das gleitende Tagesmittel der Außentemperatur liefert damit eine sinnvolle Referenzgröße für die Bewertung des Raumkomforts.
 - Die Analyse der Befragung und die daraus ermittelte Komforttemperatur bestätigen das adaptive Komfortmodell der DIN EN 15251:2007-08. Die Gleichungen der Komforttemperatur sind nahezu identisch: Nutzerbefragung $RT_c = 17,78 \text{ °C} + 0,34 \cdot \theta_{e,rm}$ und Norm $RT_c = 18,8 \text{ °C} + 0,33 \cdot \theta_{e,rm}$. Aus der Nutzerbefragung ergibt sich lediglich eine geringfügige Korrektur um 0,8 K hin zu geringeren Raumtemperaturen.
 - Nach Analyse der Befragungen erscheint die Anwendung eines adaptiven Komfortmodells für die Bewertung des thermischen Raumkomforts in Gebäuden mit Nachtlüftungskonzept angebracht. Nach diesem Modell tolerieren die Mitarbeiter höhere Raumtemperaturen, je höher die Außentemperatur ist. Jedoch ist ab Raumtemperaturen größer 27 °C mit einem deutlichen Rückgang der Nutzerzufriedenheit mit der Raumtemperatur zu rechnen. Die Definition einer oberen Grenze für maximal zulässige Raumtemperaturen erscheint also als sinnvoll.
 - Eine Unterschreitung der in der Norm definierten Komfortgrenzen (21 bis 24 °C) erscheint unkritisch. Raumtemperaturen von 21 bis 24 °C werden als „etwas kühl“ bis „neutral“ empfunden. Die Zufriedenheit liegt bei rund 89 %. Durch eine außen- und raumtemperaturgeführte Regelung lässt sich die Unterschreitung der Komfortgrenzen vermeiden. Zudem wird auch der erforderliche thermische Nutzenergieaufwand reduziert.
 - Die Untersuchung zeigt, dass sich Nutzer den Raum- und Außentemperaturbedingungen anpassen, indem sie bei steigenden Temperaturen im Laufe des Tages Maßnahmen ergreifen, um ihr Temperaturempfinden positiv zu beeinflussen. Dies setzt voraus, dass Nutzer Möglichkeiten haben, auf den Raumkomfort Einfluss zu nehmen. Die durch die Nutzer ergriffenen Maßnahmen wurden an vier heißen Sommertagen durch einen ausführlichen, schriftlichen Fragebogen jeweils vormittags und nachmittags abgefragt. Es zeigt sich, dass die Nutzer das Raumklima vor allem dadurch versuchen zu regulieren, dass sie die Fenster öffnen oder den Sonnenschutz herunterfahren. Einzelne Kleidungsstücke werden eher selten an- oder ausgezogen. Insgesamt werden am Vormittag etwas mehr Maßnahmen durchgeführt als am Nachmittag, obwohl die Temperaturen am Nachmittag höher liegen.
- fragung kann die Komforttemperatur mit der gleichen Formel unabhängig davon berechnet werden, ob aktuelle Außentemperatur, Tagesmittel der Außentemperatur oder gleitendes Tagesmittel der Außentemperatur als Referenz herangezogen werden.
- Die ermittelte Komforttemperatur entspricht nahezu dem PMV-Komfortmodell der DIN EN 15251:2007-08. Die von der Norm definierten Komfortklassen I bis III von 2, 3 bzw. 4 K von der Komforttemperatur führen zu rund 92, 91 bzw. 90 % zufriedenen Nutzern.
 - Im Vergleich der ermittelten Komforttemperatur mit den Anforderungen des nationalen Anhangs der DIN EN 15251/NA:2012-02 zeigt sich für Außentemperaturen größer 26 °C eine gute Übereinstimmung. Bei geringeren Außentemperaturen fordert die Norm zwischen 0,5 und 1 K niedrigere Raumtemperatursollwerte.
 - Die Definition einer maximal zulässigen Raumtemperatur in der Norm DIN EN 15251/NA:2012-02 zur Gewährleistung einer hohen Nutzerzufriedenheit erscheint sinnvoll. Bei einer Raumtemperatur von 26 °C liegt die Nutzerzufriedenheit bei 89 % und ab einer Raumtemperatur von 27 °C bei 78 %.
 - Eine Unterschreitung der in der Norm definierten Komfortgrenzen (22 bis 24 °C) erscheint auch hier nicht kritisch. Raumtemperaturen in diesem Bereich werden zwar als „etwas kühl“ bis „neutral“ empfunden, die Nutzerzufriedenheit ist aber mit rund 92 % sehr hoch. Durch eine außen- und raumtemperaturgeführte Regelung lässt sich die Unterschreitung der Komfortgrenzen vermeiden. Zudem wird auch der erforderliche thermische Nutzenergieaufwand reduziert.
 - In einem Temperaturbereich für das Tagesmittel der Außentemperaturen von 16 bis 26 °C liegt der ermittelte Komfortbereich für die Raumtemperaturen zwischen 24 und 25 °C. Damit lässt sich die Akzeptanz der Nutzer von höheren Raumtemperaturen bei steigenden Außentemperaturen nur eingeschränkt auf aktiv gekühlte Gebäude übertragen. Eine Bestimmung der Raumtemperaturen, bei denen mehr Nutzer unzufrieden sind, ist auf Basis der Daten aber nur unter Vorbehalt möglich, da aufgrund der Kühlung hohe Raumtemperaturen größer 27 °C nur sehr selten erreicht wurden. Darüber hinaus liegt die Zufriedenheit der Mitarbeiter selbst bei völliger Nichtbeachtung der Komforttemperatur immer noch bei über 90 %.

Zentrale Ergebnisse für das Gebäude SCF mit wassergeführter Kühlung sind:

- Die Raumkomforttemperatur bestimmt sich zu $RT_c = 22,21 \text{ °C} + 0,11 \cdot \theta_{e,rm}$. Das Modell gilt für Tagesmittel der Außentemperatur ab ca. 16 °C.
- Im Vergleich zur ersten Studie spielt also die Außentemperatur eine wesentlich geringere Rolle bei der Bestimmung der Komforttemperatur.
- Damit spielt auch der Referenzwert der Außentemperatur eine untergeordnete Rolle. Auf Basis der Nutzerbe-

Die signifikanten Unterschiede der Zufriedenheit mit der Raumtemperatur bzw. der Komforttemperatur in Abhängigkeit des Kühlkonzeptes sind nicht zuletzt deswegen bemerkenswert, da an den Befragungen zu einem großen Teil die gleichen Nutzer teilnahmen, d. h. 12 aus 26 bzw. 29 Befragten. Die gleichen Nutzer bewerten also ihr Empfinden und ihre Zufriedenheit mit der Raumtemperatur unterschiedlich für das jeweilig eingesetzte Kühlkonzept im Gebäude, obwohl die Gebäude – abgesehen von dem Kühlkonzept – nahezu identisch ausgerüstet sind.

Verschiedene Untersuchungen auf Basis von Befragungen belegen, dass die Nutzerzufriedenheit mit dem Raumkomfort durch die Möglichkeiten der Einflussnahme auf Raumbedingungen und deren Effektivität nachhaltig beeinflusst wird [14]. Die vorliegenden Ergebnisse lassen aber auch darauf schließen, dass die Erwartungshaltung des

Nutzers an Raum- und Komfortbedingungen einen entscheidenden Einfluss auf das Empfinden und die Zufriedenheit haben: Nutzer erwarten in einem Gebäude ohne Kühlung bzw. mit limitierter Kühlleistung (wie zum Beispiel bei einem Nachtlüftungskonzept) höhere Raumtemperaturen und akzeptieren diese auch, wenn sie sich den Gegebenheiten anpassen können. In Gebäuden mit wassergeführter Kühlung hat der Nutzer dann eine entsprechend höhere Erwartungshaltung an den Raumkomfort und ist folglich mit höheren Raumtemperaturen unzufriedener.

7 Zusammenfassung

Auf Basis von längerfristigen Nutzerbefragungen in zwei unmittelbar benachbarten Bürogebäuden in Freiburg wurden das Temperaturempfinden der Nutzer und deren Zufriedenheit mit dem thermischen Raumkomfort zweimal täglich erfasst. Ein Bürogebäude wird im Sommer mit einem maschinellen Nachtlüftungskonzept (Abluftanlage) konditioniert und das zweite verfügt über eine Betonkern-temperierung und eine Zu- und Abluftanlage. Auf Basis der vorhandenen Daten aus der Erhebung wurde mit Hilfe von Regressionsanalysen ein Modell zur Vorhersage der Komforttemperatur berechnet und mit den Modellen in DIN EN 15251 verglichen. Zentrale Ergebnisse:

1. Das Raumklima in Gebäuden mit begrenzter Kühlleistung wird von den Nutzern positiv bewertet: Im Gebäude mit Nachtlüftungskonzept sind 77 % der Nutzer über der gesamten Untersuchungsperiode mit der Raumtemperatur zufrieden und im Gebäude mit wassergeführter Kühlung sogar 91 %.
2. Die Anzahl der mit der Raumtemperatur unzufriedenen Nutzer korreliert mit der Raumtemperatur, d. h. die Anzahl unzufriedener Nutzer erhöht sich mit steigenden Raumtemperaturen. Offensichtlich ist eine Raumtemperatur von 26 bis 27 °C eine markante Grenze für die Zufriedenheit mit dem thermischen Raumkomfort.
3. Die Anwendung eines adaptiven Komfortmodells für die Bewertung des thermischen Raumkomforts in Gebäuden mit freiem oder maschinellem Nachtlüftungskonzept erscheint angebracht. Nach diesem Modell tolerieren die Mitarbeiter höhere Raumtemperaturen bei höheren Außentemperaturen. Jedoch ist bei Raumtemperaturen über 27 °C mit einem deutlichen Rückgang der Nutzerzufriedenheit zu rechnen. Die Analyse der Befragung und die daraus ermittelte Komforttemperatur bestätigen das adaptive Komfortmodell der DIN EN 15251:2007-08 für Gebäude mit Nachtlüftung.
4. Für wassergeführte Kühlkonzepte mit einer höheren Kühlleistung liegt der ermittelte Komfortbereich für die Raumtemperaturen zwischen 24 und 25 ° und ist damit dem PMV-Komfortmodell der DIN EN 15251:2007-08 sehr ähnlich. Damit lässt sich die Nutzerakzeptanz von höheren Raumtemperaturen bei steigenden Außentemperaturen nur eingeschränkt auf Gebäude mit wassergeführten Kühlkonzepten übertragen.
5. Die Nutzerzufriedenheit mit dem Raumkomfort erhöht sich nachweislich durch die Möglichkeiten zur effektiven Einflussnahme auf Raumbedingungen. Die vorliegenden Ergebnisse lassen zudem darauf schließen, dass die Erwartungshaltung des Nutzers an Raum- und Komfortbedingungen einen entscheidenden Einfluss auf das

Empfinden und die Zufriedenheit hat: Nutzer erwarten in dem Gebäude mit Nachtlüftung höhere Raumtemperaturen und akzeptieren diese auch. Im Gebäude mit wassergeführter Kühlung hat der Nutzer eine höhere Erwartungshaltung an den Raumkomfort und ist mit höheren Raumtemperaturen somit unzufriedener.

Die vorliegende Studie bestätigt, dass eine Komfortnorm zwei Komfortmodelle zur Verfügung stellen sollte. Die strenge Zuordnung der Gebäudeklassen (Gebäude mit/ ohne maschinelle Kühlung) in DIN EN 15251 konnte allerdings nicht belegt werden. Ebenso wird das Erwartungsmodell, wie es beispielsweise der ISO 74 zugrunde liegt, nicht bestätigt. Vielmehr erscheint eine Unterteilung der Gebäude in luft- und wassergeführte Systeme oder eine Unterteilung nach dem Grad der Kopplung zwischen Innen- und Außenklima sinnvoll. Im ersten Fall wird die Unterteilung anlagentechnisch über die Leistungsbeschränkung, im zweiten Fall bauphysikalisch über die Entwicklung der Raumtemperatur definiert. In beiden Fällen stehen die entsprechenden Bewertungsgrößen aus der Planungspraxis zur Verfügung.

Im Ergebnis der Feldstudie halten die Autoren eine normative Änderung für angebracht. Es geht hierbei in erster Linie nicht um die Anpassung der Komforttemperatur oder der Komfortgrenzen, sondern um die Zuordnung einzelner Kühlkonzepte zum jeweiligen Komfortmodell. Wir empfehlen, Gebäude mit freier und maschineller Lüftung sowie Gebäude mit passiven Kühlmaßnahmen (z. B. Sonnenschutz, Fensterlüftung) nach dem adaptiven Komfortmodell zu bewerten.

Hingegen sollte der Raumkomfort in Gebäuden mit einer Voll-/Teilklimatisierung, Umluftkühlung und wassergeführten Flächenkühlung nach dem PMV-Komfortmodell bewertet werden. Auch in diesen Gebäuden scheinen sich die Nutzer an das Außenklima zu adaptieren. Dennoch haben die Nutzer eine entsprechend hohe Erwartungshaltung an den Raumkomfort und akzeptieren folglich nur geringfügig höhere Raumtemperaturen im Vergleich zu den definierten Sollwerten der DIN 15251.

Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Projektes LowEx: Monitor, welches mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert wurde (Förderkennzeichen: 0327466B).

Literatur

- [1] BMVBS/BBR (Hrsg.): Folgen des Klimawandels: Gebäude und Baupraxis in Deutschland. BBR-Online-Publikation 10/2008. urn:nbn:de:0093-ON1008R229.
- [2] Kirchner, A., Matthes, F.: Modell Deutschland Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken. www.prognos.com und www.oeko.de, 2009.
- [3] Adnot, J. et al.: Energy Efficiency and Certification of Central Air Conditioners (EECCAC). Abschlussbericht, Teil 1 bis 3. Study for the D. G. Transportation-Energy (DGTREN) of the Commission of the E.U., Paris. Frankreich 2003.
- [4] Bettgenhäuser, K. et al.: Klimaschutz durch Reduzierung des Energiebedarfs für Gebäudekühlung. 2011. www.uba.de/uba-info-medien/3979.html.

- [5] DIN EN 15251:2007-08: Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [6] DIN EN 15251/NA:2012-02: Nationaler Anhang. Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik. Nationale Ergänzungen und Hinweise zur Verwendung dieser Europäischen Norm für die Umsetzung der Energieeinsparverordnung (VDI 4706, Kriterien für das Raumklima. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [7] *van der Linden, A. C., Boersta, A. C., Raue, A. K., Kuvers, S. R., de Dear, R. J.* (2006) Adaptive temperature limits: A new guideline in The Netherlands – A new approach for the assessment of building performance with respect to thermal indoor climate. *Energy and Buildings* 38 (2006), No. 1, pp. 8–17.
- [8] Thermische Behaaglijkheid, Publication 74, ISSO, Rotterdam.
- [9] Richtlinie B12-8132.1/0, BMVBS: Richtlinie zu baulichen und planerischen Vorgaben für Baumaßnahmen des Bundes zur Gewährleistung der Behaglichkeit im Sommer Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2008.
- [10] *de Dear, R., Brager, G.*: Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. *ASHRAE Transactions: Research* RP-884. 1998.
- [11] *Humphreys, M., Nicol, F.*: Outdoor temperature and indoor thermal comfort: Raising the precision of the relationship for the 1998 ASHRAE database of field studies. *ASHRAE Transactions* 206(2). 2000.
- [12] *de Dear, R., Brager, G.*: Thermal comfort in naturally ventilated buildings – revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings* 34 (2002), No. 6, pp. 549–561.
- [13] DIN EN ISO 7730:2006-05: 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. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [14] *Gossauer, E.*: Nutzerzufriedenheit in Bürogebäuden: eine Feldstudie. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2008. ISBN 978-3-8167-7622-2.
- [15] Statistical Packages for the Social Sciences, Version 20.0.

Autoren dieses Beitrages:

Dr.-Ing. Doreen Kalz
Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE
Abt. Thermische Anlagen und energieeffiziente Gebäude
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg

Dipl.-Psych. Fabian Hölzenbein
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Institut für Psychologie
Abt. Sozialpsychologie und Methodenlehre
Engelbergstraße 41, 79085 Freiburg

Prof. Dr.-Ing. Jens Pfafferoth
Hochschule Offenburg
Maschinenbau und Verfahrenstechnik,
Institut für Energiesystemtechnik (INES)
Badstraße 24, 77652 Offenburg

Dipl.-Psych. Gisela Vogt
SolarSpring GmbH
Hanferstraße 28, 79108 Freiburg

Jens Pfafferott
 Sebastian Herkel
 Florian Kagerer
 Doreen Kalz
 Martin Sonntag

Kurzzeitmessungen zum thermischen Komfort im Sommer

Viele Gebäude werden mit Umweltenergie (z. B. über Nachtlüftung oder über Flächentemperiersysteme mit reversibler Wärmepumpe) gekühlt. In diesen Gebäuden ist die Kühlleistung bauphysikalisch und anlagentechnisch begrenzt und folglich kann der thermische Komfort im Sommer nicht zu jedem Zeitpunkt gewährleistet werden. Dieses Gebäudeverhalten wird zwar bereits in der Planung berücksichtigt, dennoch stellt sich in der Praxis oft die Frage, ob die Gebäude im Betrieb tatsächlich die in der Planung formulierten Anforderungen im Hinblick auf das sommerliche Temperaturverhalten einhalten. Eine messtechnische Untersuchung über einen Zeitraum von ca. zwei Wochen mit mobiler Messtechnik bietet die Möglichkeit, objektive Daten bereitzustellen. Wegen des sehr dynamischen Temperaturverhaltens kann jedoch nur eine modellbasierte Evaluation darauf aufbauend einen verlässlichen Vergleich zwischen Planungswerten und tatsächlichem Gebäudebetrieb liefern.

Eine umfangreiche, messtechnische und simulationsgestützte Analyse realisierter Bundesbauten [2] kommt zu dem Ergebnis, dass sich die thermische Gebäudesimulation durchaus als Planungshilfsmittel eignet. Mit Hilfe der Simulation gelingt es nachweislich, das reale Gebäudeverhalten in guter Näherung abzubilden. Abweichungen zwischen dem prognostizierten und tatsächlichen Raumklima konnten im Rahmen dieses Projektes meist auf Fehler bzw. falsche Annahmen in der Simulation oder Nutzungsänderungen insbesondere in Bezug auf die internen und solaren Wärmelasten zurückgeführt werden. Gleichzeitig wurde die thermische Wirksamkeit der Lüftung, insbesondere der Nachtlüftung (falls vorhanden), in allen untersuchten Projekten durch die Simulation überschätzt. Demgegenüber wurde die thermische Speicherkapazität in allen Projekten sehr genau abgebildet und korrekt berücksichtigt.

Trotzdem entspricht das subjektiv empfundene Raumklima oft nicht den Erwartungen der Nutzer. Liegt tatsächlich ein Planungsfehler vor, wurden falsche Annah-

men getroffen oder haben sich die Nutzungsbedingungen geändert? Welche Rolle können Messkampagnen spielen, um diesen Unterschied zwischen Planung und realem Betrieb zu bewerten? Einerseits bietet nur eine Messkampagne verlässliche Daten, um ein Gebäudekonzept objektiv bzw. auf Basis messbarer Größen bewerten zu können. Andererseits sind Kurzzeitmessungen kaum geeignet, Aussagen über die Funktionsfähigkeit eines kompletten Gebäudekonzeptes für den Sommerfall zu machen, denn:

- Unter Berücksichtigung eines wirtschaftlich und organisatorisch vertretbaren Aufwandes können im Rahmen einer Feldmessung nur ausgewählte Daten über einen verhältnismäßig kurzen Zeitraum erfasst werden.
- Gleichzeitig können die bauphysikalischen Eigenschaften des Raumes, in dem die Messtechnik aufgestellt ist, häufig nur näherungsweise bestimmt werden.
- Darüber hinaus spielen insbesondere im Sommerfall die Speichereffekte insbesondere in den thermisch trägen Bauteilen eine große Rolle. Bei stark schwankenden Wetterbedingungen ist dieser Raum zudem nicht in einem stationären bzw. eingeschwungenen thermischen Zustand.

Eine modellbasierte Auswertung kann die unter ganz bestimmten Nutzungs- und Wetterbedingungen erfassten Messdaten so aufbereiten, dass eine Beurteilung des Betriebsverhaltens im Vergleich mit der Planung möglich wird. Dafür können entweder projektspezifische Vereinbarungen oder Standardauslegungsbedingungen z. B. nach DIN 4108-2 [3] berücksichtigt werden.

Modellbasierte Datenauswertung

Ein Gebäudemodell zur Auswertung von Kurzzeitmessungen muss auf die Unsicherheiten in der bauphysikalischen und anlagentechnischen Beschreibung des Raumes und



Bild 1. Mobile Messtechnik zur Datenerfassung, -speicherung und -übertragung von Wetter (links), Mikroklima an der Fassade (Mitte) und Raumklima (rechts)

die eingeschränkten Möglichkeiten von Kurzzeitmessungen (Kompromisse bei Messaufbau und -durchführung) angepasst sein. Das Gebäude soll dabei durch wenige charakteristische Größen beschrieben werden.

Zur Anwendung kommt dabei ein „inverses, graues Modell“. Darin beschreibt die inverse Modellierung, dass (bekannte) Messdaten in die Berechnung einfließen. Das graue Modell lässt sich gegenüber den mathematisch-statistischen Black-Box-Modellen dadurch abgrenzen, dass die physikalischen Phänomene tatsächlich beschrieben werden. Gegenüber den weißen Modellen werden die physikalischen Zusammenhänge jedoch nicht einzeln modelliert, sondern zu praktisch zugänglichen Größen für die Energiebilanzierung im Raum zusammengefasst.

Der Tagesverlauf der Raumtemperatur kann durch eine phasenverschobene, harmonische Schwingung beschrieben werden:

$$\vartheta_{Raum}(t) = \bar{\vartheta}_{Raum} + \Delta\vartheta_{Raum} \cdot \sin(\omega t + \varphi) \text{ mit } \omega = 2\pi/24h \quad (1)$$

Während der tatsächliche Temperaturverlauf von der idealen, einfachen Schwingung erheblich abweichen kann, wird die mittlere Raumtemperatur $\bar{\vartheta}_{Raum}$ und deren Schwankung $\Delta\vartheta_{Raum}$ in guter Näherung durch die mittlere Außentemperatur $\bar{\vartheta}_{au\beta en}$, deren Schwankung $\Delta\vartheta_{au\beta en}$, die Wärmegewinne G , deren Schwankung ΔG , den Verlustkoeffizienten H und die Speicherkapazität C beschrieben:

$$\bar{\vartheta}_{Raum} = \bar{\vartheta}_{au\beta en} \cdot G/H \quad (2)$$

$$\Delta\vartheta_{Raum} = \frac{24 h}{2\pi \cdot \tau} \cdot \left(\Delta\vartheta_{au\beta en} + \frac{\Delta G}{H} \right) \text{ mit } \tau[h] = C/H \quad (3)$$

Darin bilden die beiden Verlustkoeffizienten H_T (temperaturbezogener Transmissionswärmeverlust) und H_V (temperaturbezogener Lüftungswärmeverlust) den Kopplungsfaktor H zwischen innen und außen. G und ΔG umfassen alle Wärmegewinne, insbesondere die solaren Wärmegewinne durch opake und transparente Bauteile und interne Wärmegewinne. C beschreibt die dynamische Speicherkapazität des Raumes für eine periodische Anregung von 24 Stunden.

So lässt sich das thermische Raumverhalten durch die Hauptkomponenten der dynamischen Energiebilanz Wärmegewinn, Wärmeverlust und Wärmespeicherung beschreiben:

- Der mittlere, tägliche Wärmegewinn und dessen Schwankung wird mit den entsprechenden Fourierkomponenten für typische Nutzungsprofile (interne Wärmelasten) bzw. für die Solarstrahlung (solare Wärmelasten) bewertet [6].
- Während die Berechnung des Transmissionswärmestroms meist unproblematisch ist, müssen bei der Berechnung des thermisch wirksamen Luftwechsels die Lüftungseffektivität und der zeitliche Verlauf berücksichtigt werden [8]. Oft können punktuelle Luftwechsellmessungen herangezogen werden, um die Unsicherheit bei der Abschätzung des Luftwechsels in freien und hybriden Lüftungssystemen zu reduzieren.
- Die Speicherfähigkeit der Bauteile ist für eine Periodenlänge von 24 h unter Berücksichtigung der Bauteileigen-

schaften und des Wärmeübergangs von der Raumluft an das Bauteil zu bestimmen [7].

Diese Zusammenhänge sind programmtechnisch so hinterlegt, dass die einzelnen Parameter (H , G , ΔG und C) auf Basis einfacher Bestimmungsgleichungen mit Hilfe bekannter oder einfach zu schätzender Gebäudeparameter (z. B. Raumgeometrie, U-Werte, g_{\perp} der transparenten Flächen, F_C -Wert der statischen und beweglichen Verschattung, Luftwechsel) und den erfassten Messwerten (insbesondere Außentemperatur und Globalstrahlung) berechnet werden können [9].

Dieses Gebäudemodell wird in vereinfachter Form auch zur Analyse von Umweltenergiepotenzialen zur Heizung und Kühlung [5] und in angepasster Form zur Bewertung des Anlagenbetriebs [1] herangezogen.

Zur messtechnischen Gebäude- und Anlagenbewertung werden die Innen- und Außenbedingungen erfasst (Bild 1). Neben den zur Anwendung des Gebäudemodells unbedingt erforderlichen Daten (Raum- und Außentemperatur sowie Solarstrahlung) werden in den meisten Messkampagnen auch weitere Messdaten, z. B. weitere Komfortparameter, Nutzerverhalten, interne Wärmegewinne, Luftwechsel nach der CO₂-Abklümmethode, Fassadentemperaturen oder Luftgeschwindigkeiten an Lüftungsein- und -auslässen.

Auswertung von Kurzzeitmessungen zum thermischen Komfort

Neben dem thermischen Raumklima wird während der Messkampagne auch das Mikroklima am Gebäude erfasst. Bild 2 zeigt beispielhaft die Auswertung für ein Gebäude.

Die Auswertung für dieses Gebäude liefert z. B. folgende, auf die Grundfläche des Raumes bezogenen Werte: $H = 14,8 \text{ W/m}^2\text{K}$, $G = 35,8 \text{ W/m}^2$, $\Delta G = 60,7 \text{ W/m}^2$ und $C = 277,2 \text{ Wh/m}^2$. Dabei ist zu beachten, dass diese Werte auf Basis einer Fourieranalyse bestimmt wurden. Besonders auffällig ist dies bei den Wärmegewinnen, deren Schwankung größer als der Mittelwert ist. Bei einer einfachen harmonischen Schwankung würde dies an einzelnen Stunden zu negativen Gewinnen führen. Sowohl die mittleren Werte als auch die Schwankungen von Innen- und Außentemperatur werden mit einer Genauigkeit von kleiner als 0,2 K berechnet.

Damit können die Messungen auch unter einheitlichen Randbedingungen dargestellt werden. Bild 3 stellt beispielhaft Messdaten aus sechs Gebäuden mit unterschiedlichen Energiekonzepten vor. Die Messdaten aus Bild 2 sind hier als Gebäude „mech NightVent“ unter standardisierten Wetterdaten berücksichtigt.

Diese beliebig gewählten Messkampagnen können folgendermaßen interpretiert werden, wobei diese Interpretationen nicht allgemein für bestimmte Energiekonzepte sondern projektspezifisch gelten:

- Das Gebäude ohne Kühlkonzept „no Cooling“ erfüllt nicht einmal die Mindestanforderung, dass die maximale Raumtemperatur unter der maximalen Außentemperatur liegen sollte. Eine Nachrüstung eines aktiven Kühlsystems ist dringend erforderlich.

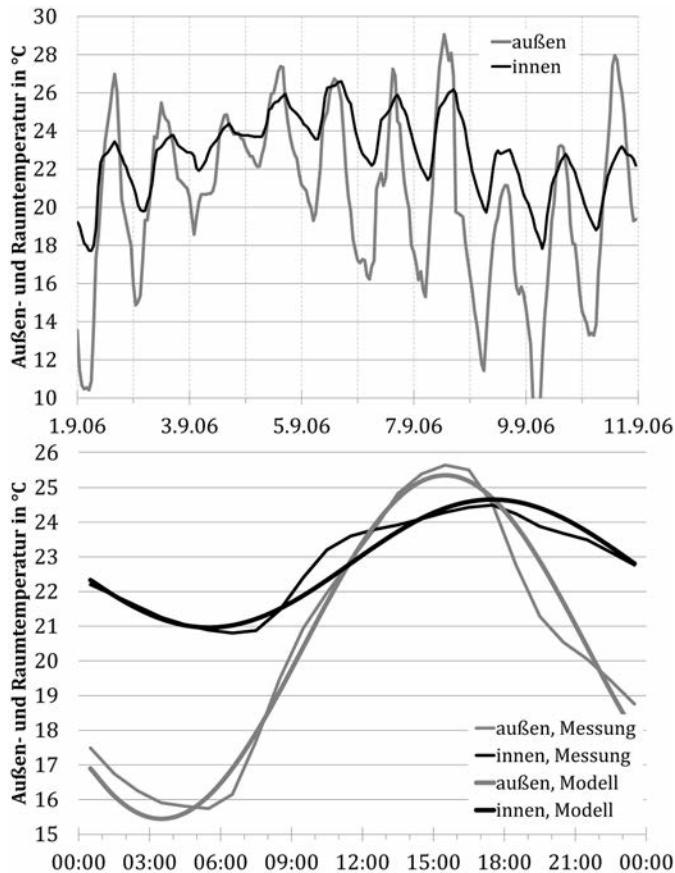


Bild 2. Messwerte aus einer 10-tägigen Messkampagne (oben) und deren standardisierte Auswertung des mittleren Tagesventen (unten)

- Das passiv gekühlte Gebäude „free NightVent“ hat vergleichsweise hohe solare Wärmegewinne, so dass ein effektiverer Sonnenschutz die sommerliche Situation deutlich verbessern könnte.
- Die beiden Gebäude mit maschineller Nachtlüftung „mech NightVent“ und Erde/Luft-Wärmetauscher „e2a+free NightVent“ erfüllen die Komfortanforderungen des adaptiven Modells. Hier ist offensichtlich eine gute bauphysikalische und anlagentechnische Abstimmung im Gebäudekonzept gelungen.
- Das Sanierungsprojekt „TABS+g'water“ reduziert mit einem effektiven Sonnenschutzkonzept die Wärmelasten und nutzt Grundwasser zur Kühlung über oberflächen-nahe Bauteilaktivierung. Damit werden hohe Komfortanforderungen bei geringem Energieverbrauch gewährleistet.
- Die Messkampagne im Gebäude „AirConditioning“ wurde nach Optimierung der Gebäudeautomation durchgeführt. Während des Zweischichtbetriebs werden hohe Komfortanforderungen bei deutlich reduziertem Energieverbrauch gewährleistet.

Fazit

Ein vergleichsweise einfaches Parametermodell ist gut geeignet, Messkampagnen, die unter nahezu beliebigen, sommerlichen Wetter- und realen Nutzungsbedingungen durchgeführt wurden, unter standardisierten Randbedingungen (gemäß Planung) zu analysieren. In der praktischen Anwendung sind außer den erforderlichen Geo-

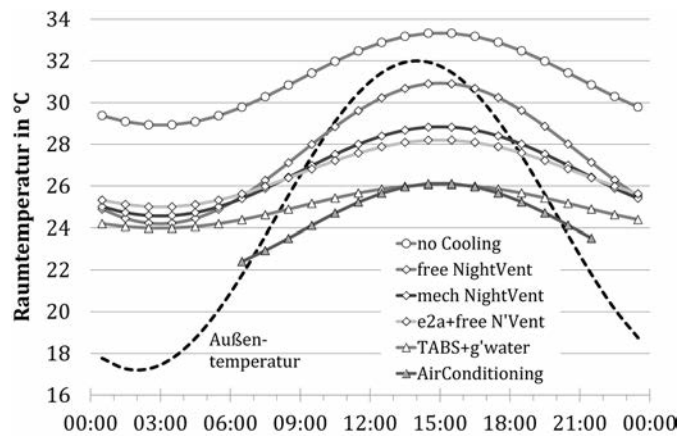


Bild 3. Messdaten aus sechs Messkampagnen in standardisierter Auswertung für das Wetter gemäß Kühllastzone 3 nach VDI 2078 [10]. Hinweis: Unter diesen Randbedingungen (14-tägige Schönwetterperiode) liegt die Komforttemperatur nach EN 15251 [4] für das PMV-Modell zwischen 23 und 26 °C und für das adaptive Komfortmodell zwischen 23,8 und 29,8 °C, jeweils für Komfortklasse II (Fotos/Grafiken: Prof. Dr. Jens Pfafferoth)

metrieangaben weniger als 20 weitere beschreibende Parameter erforderlich, wobei die meisten dieser Parameter wiederum aus einfachen Wertetabellen gewählt werden können. Eine belastbare Analyse der Messdaten ist so unter Auslegungsbedingungen (z. B. 14-tägige Schönwetterperiode gemäß VDI 2078, Ausgabe 1996) in wenigen Minuten möglich. Damit können Planung und Betrieb vergleichend auf Basis objektiver Daten bewertet und schließlich Varianten und Optimierungsvorschläge transparent vorgestellt werden.

In den vergangenen Jahren wurden ca. 25 Gebäude auf Basis einer sommerlichen Messkampagne unter kommerziellen Randbedingungen mit der vorliegenden Methode bewertet. In allen Fällen konnten auf Grundlage dieser messtechnischen Analysen Vorschläge zur Optimierung in Hinsicht auf Komfort und/oder Energieeffizienz erarbeitet werden. Dabei konnte auf eine aufwändige Simulation verzichtet werden.

Die Methode wird darüber hinaus erfolgreich in der Lehre eingesetzt. Die grundlegenden Zusammenhänge zwischen Energiebilanz und Raumtemperatur sowie planerische Entscheidungen können transparent und praxisnah vorgestellt und analysiert werden.

Das Rechenmodell (mit Parametersatz für typische Baukonstruktionen und Nutzungsbedingungen) sowie Hinweise zur Durchführung der sommerlichen Messkampagne werden von den Autoren gerne zur Verfügung gestellt.

Danksagung

Die modellbasierte Komfortbewertung wurde im Rahmen des Projektes SolarBau:Monitor (BMW, 2000–2005) entwickelt, im Projekt QUALIPASS (BMW, 2004–2007) validiert und in den Projekten ThermCo (EU, 2008–2009) und LowEx:MONITOR (BMW, 2009–2012) angewendet.

Aktuell wird das Gebäudemodell in dem Projekt PAkoGA (BMBF, 2012–2015) weiterentwickelt.

In anonymisierter Form wurden für die vorliegende Studie Messungen aus insgesamt 16 Bürogebäuden aus den Jahren 2006 bis 2009 analysiert. Die Autoren danken

den Projektpartnern und Betreibern der Gebäude Fraunhofer ISE, Solar Info Center, Fraunhofer Haus, Solar Campus Freiburg, Kaserne Foch, Pathologisches Institut, tri Haus, Solar Building Innovation Center, Engelhardt & Bauer, Bundesministerien BMVBS, BMJ, BMBF und BMZ, Lamparter, Pollmeier und DB Netz AG.

Literatur

- [1] Allard, F.; Ghiaus, C.: Estimation of energy performance of buildings by using the free-running temperature. Journée thématique SFT-IBPSA, 3/2006.
- [2] Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung: Richtlinie zur Durchführung einer dynamisch thermischen Simulationsrechnung für den Sommerlastfall in Gebäuden. Bericht 10.08.17.7-06.12, 2006.
- [3] DIN 4108-2:2003-07: Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin 2003.
- [4] DIN EN 15251:2007-08: Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin 2007.

- [5] Inard, C.; Pfafferott, J.; Ghiaus, C.: Free-running temperature and potential for free cooling by ventilation: A case study. Energy and Buildings 43, 2011.
- [6] Keller, B.: Klimagerechtes Bauen. Stuttgart 1997.
- [7] Pfafferott, J.: Enhancing the design and the operation of passive cooling concepts. Stuttgart 2004.
- [8] Pfafferott, J.; Herkel, S.; Wapler, J.: Thermal building behaviour in summer: long-term data evaluation using simplified models. Energy and Buildings 37, 2005.
- [9] Pfafferott, J.; Voss, K. et al.: Qualit tiszertifikat f r Bürogebäude mit passiver Kühlung. Stuttgart 2007.
- [10] VDI 2078:1996-07: Berechnung der Kühlleistung klimatisierter Räume. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf 1996.

Weitere Informationen:

Prof. Dr. Jens Pfafferott, Hochschule Offenburg,
Badstraße 24, 77652 Offenburg,
Tel. (0781) 205-46 04, jens.pfafferott@hs-offenburg.de

Sebastian Herkel, Florian Kagerer, Dr. Doreen Kalz,
Martin Sonntag: Fraunhofer ISE, Heidenhofstraße 2,
79110 Freiburg



Heiz- und Kühldecken-Systeme. Passende Lösung für jedes Gebäude.

- Behagliches Raumklima
- Hohe Leistungsfähigkeit
- Lieferbar in vielen Varianten: z.B. Bandrastersystem oder als Segelausf hrung
- Komplettlösung nach Maß: Beratung, Planung, Produktion, Installation und Abnahme

www.zehnder-systems.de

always around you **zehnder**

Abwärmstens empfohlen: Kühlen mit Adsorptions- technik.

FAHRENHEIT ist Marktführer für
Adsorptionskühlung – und setzt Maßstäbe in
Energieeffizienz und Umweltverträglichkeit:
www.fahrenheit.cool

Kühldeckensystem mit Aktivierung der Speichermasse der Betondecke

Büro- und Verwaltungsgebäude werden seit vielen Jahren zur allgemeinen Nutzerzufriedenheit mit Flächensystemen beheizt und gekühlt. Am Anfang dieser Entwicklung stand die abgehängte Kühldecke, die sich wegen ihrer hohen Kundenakzeptanz in ganz Europa verbreitet hat. Eine weitere, inzwischen ebenfalls weitverbreitete Anwendungsform von Strahlungssystemen ist die thermische Aktivierung von Betondecken, auch als Betonkerntemperierung bezeichnet. Dass diese nach dem Strahlungsprinzip funktionierenden Systeme auch zur Beheizung von Gebäuden geeignet sind, stellen viele erfolgreich ausgeführte Bauprojekte eindrucksvoll unter Beweis, [9] und [10]. Obwohl beide Systemvarianten nach demselben Strahlungsprinzip arbeiten, bestehen signifikante Unterschiede. Vor der Entscheidung für die eine oder andere Systemvariante müssen die typischen Merkmale sorgfältig geprüft und gegeneinander abgewogen werden. Dieser Fachbericht beschreibt eine Mischform, die aus beiden Systemvarianten heraus entwickelt wurde und immer häufiger Anwendung findet. Messungen in einem thermisch schweren Versuchsraum belegen die Leistungsfähigkeit von beidseitig aktivierten Kühlsegele in Kombination mit der Betondecke.

Suspended radiant cooling system with thermally activated concrete ceiling. *Office buildings are heated and cooled by thermo-active building systems for many years. These energy efficient heating and cooling concepts provide excellent thermal comfort. The first systems were installed as suspended cooling ceilings which are applied all-over Europe and go along with a high user satisfaction. Another widely adopted construction principle is the concrete conditioning. Monitoring campaigns in energy efficient office buildings show clearly that radiant systems can be successfully operated for both cooling and heating. Although both the radiant ceiling and the concrete core conditioning use the same long-wave radiative heat transfer the operation is different due to the thermal storage effect. Architects and HVAC planners have to decide for one of these solutions based on the pros and cons for each system. This article presents a hybrid form which can be used for new buildings and refurbishment projects. Laboratory measurements in a thermally heavy test chamber prove the thermal performance of a double-sided suspended radiant panel in interaction with the concrete ceiling.*

1 Thermoaktive Betondecken als Energiespeicher

Geschosstrenndecken in massiver Betonbauweise eignen sich bestens zur Speicherung von Wärme- und Kühlenergie. Werden die Bauteileigenschaften einer typischen Betondecke mit $\rho = 2070 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 1,98 \text{ W/mK}$ und $c = 990 \text{ J/kgK}$ (aus Labormessungen einer typischen Betondecke im Versuchs-

raum) verwendet, ergibt sich unter Berücksichtigung einer periodischen Anregung von 24 Stunden und einem kombinierten Wärmeübergangskoeffizient $\alpha = 12 \text{ W/m}^2\text{K}$ eine flächenbezogene Wärmekapazität von $31,3 \text{ Wh/m}^2\text{K}$ in Bezug auf die Amplitude der Lufttemperatur. Wird im Raum eine Temperaturschwankung zwischen $21 \text{ }^\circ\text{C}$ morgens und $26 \text{ }^\circ\text{C}$ nachmittags zugelassen, so kann die Betondecke eine Wärmemenge von knapp $160 \text{ Wh/m}^2_{\text{NGFD}}$ speichern. Das entspricht beispielsweise der Energie für eine Kühllast von $50 \text{ W/m}^2_{\text{NGF}}$ über rund 3 Stunden.

Wird zusätzlich auch die Speicherkapazität leichter Bauteile berücksichtigt, ergeben sich für typische Büros mit einem normalen Kühllastprofil nennenswerte Speichereffekte, die bei entsprechender Betriebsführung die Energieeffizienz der Raumkühlung deutlich verbessern können.

2 Betonkernaktivierung

Zur Betonkernaktivierung werden meist Rohrregister aus Kunststoffrohren in der neutralen Zone der Betondecke verlegt. Durch die Rohre zirkuliert temperiertes Wasser, das die Betondecke während der Nacht auf das vorgesehene Temperaturniveau bringt. Typische Kerntemperaturen in der Betondecke liegen im Sommer bei $19 \text{ }^\circ\text{C}$ und im Winter zwischen 24 und $26 \text{ }^\circ\text{C}$. Charakteristika der Betonkernaktivierung sind:

- geeignet zum Heizen und Kühlen von Aufenthaltsräumen,
- hohe thermische Speicherfähigkeit,
- Energiebereitstellung im Wesentlichen außerhalb der Raumnutzungszeit, Nutzung von Umweltenergie im Sommer (freie Kühlung) und Strombezug außerhalb der Spitzenlastzeit beim Kältemaschinen- bzw. Wärmepumpenbetrieb im Sommer oder Winter,
- Leistungsanpassung durch Selbstregelleffekt,
- individuelle Raumtemperaturregelung mit Einschränkung und nur mit zusätzlicher technischer Ausstattung möglich,
- Betondecken fehlt Schallabsorptionseigenschaft.

Wegen des typischen Selbstregelleffektes schwankt die sich einstellende Raumtemperatur. Je nach Raumlast und Beladungszustand der Betondecke variiert die Schwankung zwischen 3 und 4 K. Der Raumnutzer hat wegen der hohen Trägheit keine Möglichkeit, darauf zu reagieren.

Die einfachste Möglichkeit für eine individuelle Raumtemperaturregelung ist der Einbau von zusätzlichen Raum-

heizflächen. Weil Heizkörper üblicherweise für eine höhere Temperatur ausgelegt werden, muss einerseits in ein separates Leitungssystem investiert werden. Andererseits ist ein energieeffizienter Betrieb mit niedrigen Heizmitteltemperaturen nicht möglich. Hinzu kommt die nachteilige Eigenschaft, dass bei zu hoch eingestelltem Raumthermostat der Heizkörper die Raumheizfunktion übernimmt und die Betondecke nur noch eingeschränkt wirkt.

Eine gute und inzwischen in vielen Gebäuden bewährte Ergänzung für thermoaktive Decken sind Randstreifenelemente, die entlang der Fassade an der Decke angeordnet werden. Sie arbeiten nach demselben Strahlungsprinzip wie die thermoaktiven Betondecken und werden entlang der Fassade angeordnet, um dort die Strahlungstemperaturdifferenzen im Sommer und im Winter auszugleichen. Ein wesentlicher Vorteil der Randstreifenelemente, die etwa 30 bis 40 % der jeweiligen Raumheiz- oder Kühllast abdecken, besteht darin, dass mit Hilfe dieser Bauteile eine individuelle Regelung der Raumtemperatur möglich wird. Grundsätzlich werden 2 verschiedene Bauarten verwendet:

- Die integrierte Ausführung als Beton-Fertigteilbauelement mit oberflächennah angeordneter Rohrführung und thermischer Entkopplung zur Rohdecke wirkt optisch wie eine durchgehende thermoaktive Betondecke.
- Randstreifenelemente werden als von der Rohdecke abgehängte Kühlelemente ausgeführt. Weil die metallischen Werkstoffe eine geringe Masse und gute Wärmeleitfähigkeiten aufweisen, werden höhere flächenbezogene Leistungen erzielt. Ein wichtiger Zusatznutzen besteht in den hervorragenden Schallabsorptionseigenschaften, die mit zusätzlicher Integration von Breitbandabsorbieren noch erheblich gesteigert werden kann.

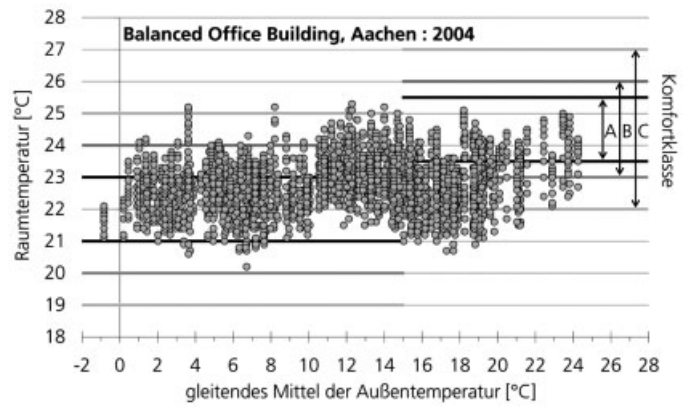
Gemeinsam ist beiden Ausführungen, dass sie über einen separaten hydraulischen Anschluss entweder im 3- oder 4-Leitersystem versorgt werden. Während die Betondecken vorzugsweise in den Nachtstunden über die Betonkernaktivierung geladen werden, erfolgt der Betrieb der thermisch autarken Randstreifenelemente während der üblichen Büro-nutzungszeiten.

Das Balanced Office Building in Aachen [3] wird ausschließlich über eine Betonkernaktivierung beheizt und gekühlt, Bild 1. Eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung und die Passivhausbauweise reduzieren Heiz- und Kühllasten. Die Auswertung der Messdaten [5] weist nach, dass mit diesem System ein sehr guter thermischer Komfort [6] bei geringem Energieeinsatz erreicht wurde, Bild 2



Bild 1. Balanced Office Building, Aachen (NGF 2076 m²): Betonkernaktivierung ist alleiniges Wärme- und Kälteübertragungssystem (Quelle: Jörg Hempel)

Fig. 1. Balanced Office Building, Aachen (net floor area 2,076 m²): Heating and cooling is provided only by concrete core conditioning (source: Jörg Hempel)



Betriebsjahr 2004	Winter	Sommer
Nutzenergie ¹ [kWh/m ² _{TABSa}]	31	24
JAZ _{WP} ² [kWh _{Nutzenergie} /kWh _{Strom}]	3,5	6,5

Bild 2. Balanced Office Building, Aachen: thermischer Komfort nach ISO[°]7730, Nutzenergiebedarf und Energieeffizienz; ¹) Jahresheizwärme- bzw. Jahreskühlenergiebedarf bezogen auf die gekühlte Bürofläche (TABS), ²) Wärmepumpe inkl. Primärpumpe (Sondenfeld). Im Sommer nur freie Kühlung. (Quelle: Fraunhofer ISE)

Fig. 2. Balanced Office Building, Aachen: thermal comfort according to ISO[°]7730 during occupancy, energy use, and energy efficiency of the energy supply system; ¹) specific annual energy use for heating and cooling; ²) seasonal performance factor for heat pump system including primary pump for the bore-hole heat exchanger. Only free cooling in summer time. (source: Fraunhofer ISE)

3 Geschlossene Kühldecke

Geschlossene Kühldecken übernehmen oft neben der thermischen Funktion die architektonische Aufgabe der Deckenverkleidung (z. B. in der Sanierung) und verbessern die Raumakustik. Kühldecken werden üblicherweise auf 100 % der erforderlichen Raumkühllast ausgelegt. Charakteristika der geschlossenen Kühldecke sind:

- geeignet zum Heizen und Kühlen von Aufenthaltsräumen,
- geringe thermische Speicherfähigkeit und kurze Reaktionszeit,
- Energiebereitstellung während der Raumnutzungszeit,
- hohe Leistungsdichte,
- Beleuchtung, Lüftung und Sprinkler können gut integriert werden,
- Gute Schallabsorptionseigenschaft.

Kühldecken werden meist nach der aktuellen Raumtemperatur geregelt und reagieren damit spontan auf Laständerungen. Ein Lastmanagement ist in der Regel nicht vorgesehen.

Das Labor- und Bürogebäude PFIZER in Freiburg [4] wird über eine akustisch wirksame Heiz- und Kühldecke beheizt und gekühlt, Bild 3. Die Auswertung der Messdaten (hier: aus dem Jahr 2008) weist nach, dass ein sehr guter thermischer Komfort mit einer guten Energieeffizienz erreicht wurde, Bild 4.

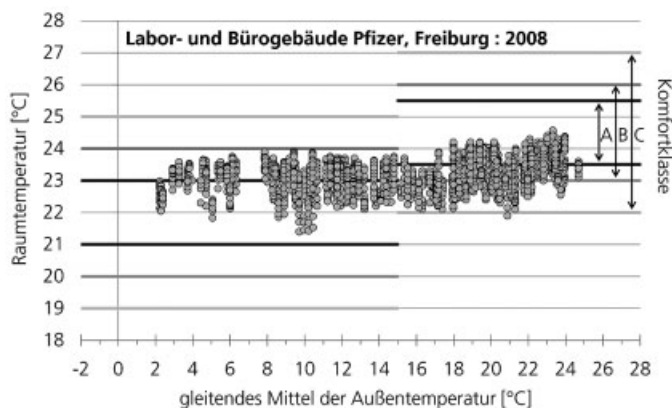
4 Hybrides Kühlsystem mit Deckenkühlsegeln

Im Unterschied zu geschlossenen Kühldecken sind Deckenkühlsegel hinsichtlich ihrer Abmessungen und An-



Bild 3. PFIZER, Freiburg (NGF 6880 m²): geschlossene Kühldecke (Quelle: Fototeam Vollmer)

Fig. 3. PFIZER, Freiburg (net floor area 6,880 m²): Heating and cooling is provided by a suspended radiant cooling and heating panel (source: Fototeam Vollmer)



Betriebsjahr 2008	Winter	Sommer
Nutzenergie ¹ [kWh/m ² TABSa]	37	43
JAZ _{WP} ² [kWh _{Nutzenergie} /kWh _{Strom}]	5,1	5,8

Bild 4. PFIZER, Freiburg: thermischer Komfort nach ISO 7730, Nutzenergiebedarf und Energieeffizienz; ¹ Jahresheizwärme- bzw. Jahreskühlenergiebedarf bezogen auf die gekühlte Bürofläche (TABS), ² reversible Wärmepumpe inkl. Primärpumpe (Sondensfeld). Im Sommer kombinierter Betrieb mit freier Kühlung und aktiver Kälterzeugung. Nur sensible Wärme-/Kühlenergie, ohne Be- und Entfeuchtung. (Quelle: Fraunhofer ISE)
 Fig. 4. PFIZER, Freiburg: thermal comfort according to ISO 7730 during occupancy, useful energy, and energy efficiency of the energy supply system; ¹ specific annual energy use for heating and cooling; ² seasonal performance factor for heat pump system including primary pump for the bore-hole heat exchanger. Combined operation of free and active cooling by reversible heat pump in summer time. (source: Fraunhofer ISE)

ordnung im Wesentlichen auf die thermische Funktion beschränkt. Deshalb bleiben Teilflächen der Betondecke unverkleidet. Die Wärmespeicherkapazität der Betondecke kommt dann zur Entfaltung, wenn Temperaturdifferenzen zwischen der Oberfläche der Betondecke und der Raumtemperatur bestehen. Darüber hinaus ist eine deutliche Leistungssteigerung der Deckenkühlsegel zu beobachten, wenn diese 10 bis 16 cm von der Betondecke abgehängt werden und so frei umströmt werden können. Ausführungsformen von hybriden Deckenkühlssystemen:

Deckenkühlsegel mit zusätzlichen Kontaktprofilen zwischen Deckensegel und Betondecke, über die eine Wärmeübertragung zwischen Deckensegel und Rohdecke und umgekehrt erfolgt. In der Praxis hat sich gezeigt, dass ein guter wärmeleitender Kontakt zwischen einer Metallschiene und der Rohbetondecke sehr montageaufwändig ist und wegen der üblichen Bautoleranzen nur unzureichend hergestellt werden kann. Überdies ist der horizontale Verlegeabstand der Kontaktschienen zwischen Deckenelement und Rohdecke aus wirtschaftlichen und technischen Gründen für eine flächige Wärmeübertragung meist viel zu groß. Die Funktion dieses Deckentyps beschränkt sich im Wesentlichen auf die direkte Wirkung des Deckensegels. Ein konvektiver oder radiativer Wärmeaustausch zwischen Rohdecke zum Deckensegel ist wegen der zwischenliegenden Akustikdämmschicht nicht möglich.

Deckenkühlsegel mit zusätzlichem, wassergekühltem Konstruktionsprofil, das mit einem geringen Abstand von wenigen cm zur Betondecke an der Peripherie des Deckensegels angeordnet ist. Bei dieser Ausführung ist der Strahlungswärmeaustausch im Wesentlichen auf das periphere Konstruktionsprofil begrenzt. Mit einem integrierten Luftauslass kann der konvektive Anteil der Wärmeübertragung zur Betondecke etwas gesteigert werden.

Thermische Kopplung zur Betondecke mittels Strahlungsaustausch zwischen einer glattflächigen, zusätzlichen Strahlungsfläche auf der Oberseite des Deckenkühlsegels. Sobald sich eine Temperaturdifferenz zwischen den aktiven und passiven Flächen einstellt, entwickelt sich über die gesamte Segelfläche ein wirksamer Strahlungswärmeaustausch. Eine speziell für diesen Einsatzfall konzipierte Bauform von Deckenkühlsegeln mit einer zweiten, auf der Oberseite angeordneten Strahlungsfläche entwickelt eine deutlich höhere flächenbezogene Kühlleistung als herkömmliche Kühldecken. Das Deckenkühlelement absorbiert die Wärmestrahlung der Raumumschließungsflächen. Zusätzlich steht die Oberseite des Deckenelements in direktem Strahlungsaustausch mit der thermisch schweren Betondecke. Auch der im Kühlfall besonders wichtige konvektive Leistungsanteil ist größer als bei geschlossenen Kühldecken, denn die offene Bauform intensiviert die freie Konvektion.

Flächentemperiersysteme werden üblicherweise auf 100 % der erforderlichen Raumkühllast bzw. Raumheizlast ausgelegt. Wenn offene, von der Raumluft umströmbare Deckenkühlsegel eingesetzt werden, wirkt die Betondecke als Wärmespeicher. Je nach Betrachtung liefert die Auslegung für den Spitzenkühllastfall entweder geringere aktive Be-

legungsflächen (also geringere Investitionskosten) oder bei gleich großer Belegungsdichte eine niedrigere Kühllastdichte bzw. die Möglichkeit zum Lastmanagement.

Besonders wirtschaftlich ist der hybride Betriebsfall bzw. eine asynchrone Betriebsweise: An warmen Sommertagen werden die Deckenkühlsegel tagsüber nach Bedarf und während der Nachtstunden unregelmäßig zur Abkühlung der passiven gebäudeeigenen Speichermassen betrieben. Leistungsmessungen dieses Systems in einem thermisch schweren Versuchsraum zeigen, dass die Betondecke in einem Büroraum mit typischen Wärmelasten eine Leistungsreserve von 3 Stunden zur Verfügung stellt. Dieser Effekt kann je nach Projektanforderung unterschiedlich genutzt werden:

- Kleinere Auslegung der Kältemaschine, weil die täglich zu erbringende Kältearbeit auf mehr Vollbenutzungsstunden verteilt werden kann.
- Zeitweise Abschaltung der Kältemaschine bei Stromspitzen zum Lastmanagement.
- Der Einschaltzeitpunkt für die Raumkühlung erfolgt zeitversetzt, weil die Räume zu Arbeitsbeginn eine niedrige Tagesstarttemperatur aufweisen.
- Nutzungsmöglichkeit der freien Nachtkühlung.
- Die Effektivität des Gesamtsystems kann durch einen Asynchronbetrieb mit Wetterprognose gesteigert werden.

Mit der „hybriden Betriebsweise“ eröffnen sich also Möglichkeiten in der Anlagenkonzeption, die trotz der bekannten physikalischen Effekte bisher nur in wenigen TGA-Konzepten genutzt werden. Eine wichtige Voraussetzung für diese energie- und kostensparende Betriebsweise ist ein ganzheitliches Anlagenkonzept mit geeigneten Systemkomponenten bis hin zu einer entsprechend ausgelegten Meß-, Steuer- und Regeltechnik.

Die zwischen Deckenkühlsegel und Betondecke übertragene Strahlungswärme ergibt sich aus der Strahlungsfläche, der Temperaturdifferenz und den Emissionsfaktoren der Oberflächen. Der konvektive Wärmeübergang entwickelt sich aufgrund des natürlichen Auftriebs. Die erwärmte Raumluft steigt in den offenen Bereich zwischen Deckensegel und Betondecke, kühlt sich ungehindert an der während der Nachtstunden gekühlten Betondecke ab und rezirkuliert ohne Zuglufterscheinung wieder in den Aufenthaltsbereich.

5 Messkampagne

5.1 Versuchsraum

Mit Hilfe einer umfangreichen Messkampagne [7] wurde die Wechselwirkung zwischen einem geschlossenen, beidseitig aktivierten Deckenkühlsegel [8] und einer Betondecke in Anlehnung an EN 14240 [2] bewertet. Der adiabate Versuchsraum am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) mit Sichtbetondecke hat eine Prüfraumfläche A_t von $9,9 \text{ m}^2$. Getestet wurde eine Plattenfläche A_p von $5,6 \text{ m}^2$. Die Kühllast wird für diese Versuche über zwei Systeme eingebracht: Die im Sommer erwärmte Fassade wird über die Temperierung einer kurzen Wandfläche simuliert. Die übrigen Lasten werden über Kühllastsimulatoren eingebracht. Der Versuchsraum bildet die bauphysikalischen Eigenschaften eines typischen Büroraums ab und erfüllt damit nicht die Anforderungen aus EN 14240. Dennoch konnten im stationären Zustand unter Normbedingungen die tech-

nischen Angaben $P_a = 110$ bis 130 W/m^2 bei $\Delta\theta = 9,15 \text{ K}$ bestätigt werden. Damit gilt die Messung als validiert.

5.2 Messtechnik

Im Versuchsraum kommt eine umfangreiche Messtechnik mit insgesamt 53 Messstellen zum Einsatz: Temperaturen in der Decke in 5 verschiedenen Tiefen an zwei Orten, Lufttemperaturen in 3 verschiedenen Höhen ($0,1 \text{ m}/1,1 \text{ m}/1,7 \text{ m}$), operative Raumtemperatur (Globethermometer), Oberflächentemperaturen der Deckenkühlsegel raumseitig und raumabgewandt an mehreren Stellen, Luftfeuchte, Volumenstromzähler und Vor-/Rücklauftemperaturen für die Flächentemperierung, Leistungsmessgerät zur Erfassung der Kühllasten. Die eingesetzten Thermometer und Psychrometer sind einschließlich der Messstrecke kalibriert. Die Volumenstromgeber haben im verwendeten Messbereich einen Fehler von 1 %.

Einzelne Betriebszustände wurden zusätzlich mit Hilfe von Thermographieaufnahmen bewertet. Damit konnten mögliche Totbereiche überprüft bzw. ausgeschlossen und die Aktivierung der Deckenkühlsegel und der Betondecke im Modulrandbereich identifiziert werden.

Die Luftströmungen im Messraum wurden für einzelne Betriebszustände visualisiert, um den konvektiven Wärmeübergang zwischen Kühlsegel und Betondecke durch die Raumluftwalze beschreiben zu können.

5.3 Messung bei asynchronem Betrieb

Wird der Raum während der Nacht gekühlt und die Raumtemperatur während der Betriebszeit geregelt, stellt sich während der Anwesenheitszeit eine mittlere Raumtemperatur von $25,2 \text{ °C}$ ein, Bild 5. In diesem Szenario beträgt die Kühllast $4,9 \text{ kWh/d}$ bzw. $500 \text{ Wh/m}^2\text{d}$. Die abgeführte Kühlenergie beträgt $4,8 \text{ kWh/d}$. Die Differenz zwischen Kühllast und Kühlleistung liegt mit 2 % im Bereich der Messgenauigkeit. In der Nacht ($22:00\text{--}06:00$) werden 228 Wh/m^2 und am Tag ($08:00\text{--}20:00$) 272 Wh/m^2 abgeführt. Die Bauteiltemperaturen werden oberflächennah („unten“), in 3 cm („mitte“) und in 6 cm („oben“) gemessen. Es ist deutlich

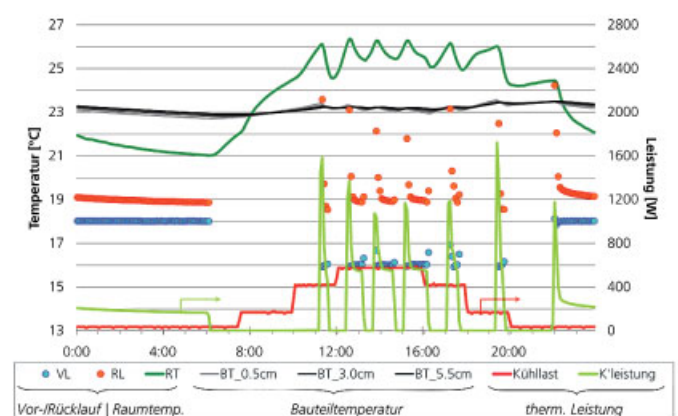


Bild 5. Kühlbetrieb in der Nacht mit 18 °C und am Tag mit 16 °C mit typischem Kühllastprofil (Quelle: Fraunhofer ISE)
Fig. 5. Operation of the cooling system with supply temperature of 18 °C (uncontrolled free cooling during nighttime) and 16 °C (thermostatically controlled day time operation with active cooling). (source: Fraunhofer ISE)

zu erkennen, wie die Temperaturamplitude ausgehend von der Oberfläche bis in ca. 6 cm Bauteiltiefe eindringt. Die Temperaturschwankung vor und nach der Nachtkühlung liegt in der Mitte der 6cm starken Schicht bei 0,7 K und beträgt in 6 cm Tiefe noch 0,5 K.

5.4 Temperaturverhalten und Raumlufthalze

Die operative Raumtemperatur liegt wegen der kühlen Oberfläche immer unter der Lufttemperatur. Die Lufttemperatur zwischen Kühlsegel und Betondecke stellt sich erwartungsgemäß in etwa als Mittelwert der beiden Oberflächentemperaturen ein. Mit Hilfe von Thermographieaufnahmen und einer Strömungsvisualisierung konnte die sich daraus entwickelnde Raumlufthalze messtechnisch nachgewiesen werden. Bild 6 skizziert die dreidimensionale Raumlufthalze schematisch. Die Hauptströmungspfade entwickeln sich ausgehend von der warmen „Außenwand“ zur gegenüberliegenden „Innenwand“ und über den Kühllastsimulatoren zu den „Seitenwänden“. An den Längsseiten des Deckenkühlsegels wird ein kleinerer Luftvolumenstrom in den Bereich zwischen Kühlsegel und Betondecke gezogen.

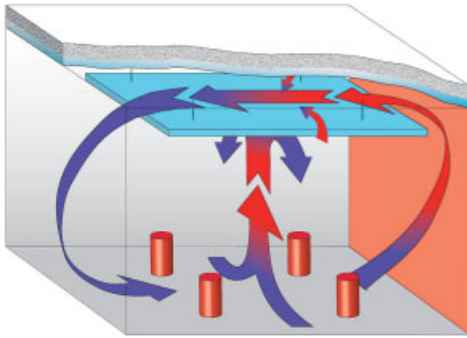


Bild 6. Schematische Darstellung der Raumlufthalze. Die Kühllastsimulatoren und die warme Wand sind rot, das Deckenkühlsegel und die indirekt gekühlte Betondecke blau dargestellt (Quelle: Zent-Frenger GmbH)

Fig. 6. Principal drawing of thermally driven air movement. The cooling load cylinders and the heated wall are indicated in red. The suspended cooling panel and the indirectly cooled concrete ceiling are indicated in blue. (source: Zent-Frenger GmbH)

6 Analyse der Ergebnisse

Die Messergebnisse werden im Folgenden unter den Aspekten Leistungsfähigkeit, Betriebsverhalten und Energieeinsparung analysiert. Die Messkampagnen bestätigen die thermische Wechselwirkung zwischen dem Kühlsegel und einer Betondecke:

- Die Messungen im stationären Zustand bestätigen die Leistungsfähigkeit aus den Labormessungen für den Kühlbetrieb im Versuchsraum.
- Die spezifische Kühlleistung ist so hoch, dass bei moderaten Kühllasten eine ausreichend große Leistungsreserve für Lastspitzen zur Verfügung steht.
- Eine über ein Deckensegel aktivierte Betondecke kann zwischen 50 (im Experiment) und 100 Wh/m²d (bei entsprechend angepasster Betriebsweise) speichern.
- Durch den Speichereffekt der Betondecke in Verbindung mit den thermisch leichten Raumumschließungsflächen

kann das Deckenkühlsegel in der Nacht sehr energieeffizient allein mit Umweltenergie (z. B. Kühlturm) betrieben werden. Damit können rund 40 % der Kühlenergie nachts mit einer hohen Arbeitszahl bereitgestellt werden. Im Tagbetrieb muss dann nur 60 % der Kühlenergie mit einer aktiven Kälteerzeugung bereitgestellt werden.

6.1 Energieeinsparung

Werden die Ergebnisse aus dem Experiment (tägliche Kühlenergie 500 Wh/m²d) mit einer Arbeitszahl von 10 für den Nachtbetrieb (freie Kühlung) und einer Arbeitszahl von 3 für die maschinelle Kühlung bewertet, ergibt sich eine Energieeinsparung von rund 30 %:

- In der Nacht wird mit 18 °C gekühlt. Die Arbeitszahl in diesem Betriebsfall wird mit 10 angenommen (nur Kühlturbetrieb an 8 Stunden/Tag). Außerhalb der Anwesenheitszeit werden 228 Wh/m²d abgeführt bei einem elektrischen Energiebedarf von 23 Wh/m²d.
- Am Tag wird mit 16 °C gekühlt. Die Arbeitszahl in diesem Betriebsfall wird mit 3 angenommen (Kompressionskältemaschine inkl. Kühlturm). Innerhalb der Anwesenheitszeit werden 272 Wh/m²d abgeführt bei einem elektrischen Energiebedarf von 91 Wh/m²d.
- Würden die Kühllasten in Höhe von 500 Wh/m²d ausschließlich am Tag abgeführt, wäre bei einer Arbeitszahl von 3 ein elektrischer Energiebedarf von 166 Wh/m²d erforderlich.

Damit ergibt sich bei vergleichbarer Raumtemperatur bzw. gleichem thermischen Komfort eine Endenergieeinsparung (Strom) von 52 Wh/m²d bzw. 32 %.

6.2 Lastmanagement und Dimensionierung des Kühlsystems

Im Experiment reduziert sich die Betriebszeit der Kühldecke – bei einer Hysterese von nur 1 K zwischen 25 und 26 °C – von 5,25 auf 4 Stunden während der Anwesenheitszeit. Der damit dokumentierte Speichereffekt kann entweder zum Lastmanagement oder zur Reduzierung der Kühlleistung (bei gleicher Dimensionierung der Kühlsegel) oder zur Reduzierung der Kühlsegelfläche (bei gleicher Betriebszeit) genutzt werden:

Lastmanagement

Durch Aktivierung der Betondecke verringert sich der Temperaturgradient von 1,4 K/h (abgehängte Kühldecke, typischer Büroraum) auf 1,0 K/h (Deckenkühlsegel, typischer Büroraum). Wird die nach ISO 7730 [1] im Kühlfall zur Verfügung stehende Bandbreite der Raumtemperatur von 23 bis 26 °C tatsächlich regelungstechnisch genutzt, können die Kühlsegel an bis zu 3 Stunden außer Betrieb sein. Vorausgesetzt, die Kühlsegel sind entsprechend groß dimensioniert. Hier nehmen die Kühlsegel knapp 60 % der Grundfläche ein. Die Kühllast beträgt 500 Wh/m²_{NGFd} in Bezug auf die Grundfläche bzw. 880 Wh/m²_{TABsd} in Bezug auf die Fläche der Kühlsegel.

Reduzierung der Kälte-/Wärmebereitstellung bei gleicher Fläche der Deckensegel

Der Speichereffekt kann alternativ dazu genutzt werden, das Kühlsystem bestehend aus Kältebereitstellung (z. B. rever-

sible Wärmepumpe/Kältemaschine) und -verteilung entsprechend kleiner zu dimensionieren. Die Leistungsreduzierung liegt bei typischen Wärmelasten in der Größenordnung von 30 %, muss aber projektspezifisch entsprechend dimensioniert werden.

Reduzierung der Fläche der Deckensegel bei gleicher Kälte-/Wärmeleistung

Unter Berücksichtigung des Speichereffektes kann die Wärmeübertragungsfläche um rund 10 % verringert werden, ohne dass sich die freie Kühlung im Nachtbetrieb verschlechtert.

6.3 Deckenkühlsegel als multifunktionale Bauteile

Während früher abgehängte Decken ausschließlich zur Verkleidung von Betondecken und unattraktiven technischen Installationen dienten, wirken sie heute als multifunktionale Bauelemente auch zum Temperieren von Gebäuden. Dabei können offene Deckenkühlsegel mit Betondecken eine sinnvolle Symbiose eingehen, wenn deren jeweilige Eigenschaften erkannt und in ein technisches Konzept eingebunden werden. Baupraktisch bedeutet dies, dass mehrere Gewerke koordiniert werden müssen.

Deckenkühlsegel (auch für den Heizbetrieb) können mit integrierter Zuluft einbringung, breitbandig schallabsorbierenden Eigenschaften und Lichtreflexion auf den Arbeitsplatz als multifunktionale Bauelemente ausgebildet werden und genügen hohen architektonischen Ansprüchen. Sie arbeiten sehr effizient, wenn sie in ein intelligentes Energieversorgungskonzept eingebunden werden. Dabei trägt die Meß-, Steuer- und Regelungstechnik eine besondere Verantwortung, denn diese ist entscheidend verantwortlich dafür wie die Energieressourcen genutzt werden.

7 Fazit

Die Eigenschaften von hybriden Deckenkühlssystemen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Verteilung der Tageskühlarbeit auf eine längere Betriebszeit reduziert die Spitzenkühlleistung und erlaubt eine Reduzierung der aktiven Kühlfläche.
- Durch Einbeziehung der Speicherkapazität der Betondecke kann temporär tagsüber Kältemaschinenleistung zur Vermeidung von Stromspitzen abgeschaltet werden.
- Der nächtliche Kühlbetrieb kann größtenteils durch eine energieeffiziente und kostengünstige freie Kühlung erbracht werden.
- Ist ein Kältemaschinenbetrieb während der Nachtstunden erforderlich, erfolgt dieser zum günstigen Nachtstromtarif und bedeutet eine Leistungsabnahme in lastschwacher Zeit.

- Hybride Systeme vereinen die Vorteile der Speichereigenschaften von Betonkerntemperierung mit den positiven Eigenschaften der reaktionsschnellen Multifunktionsflächen. Die doppelten Strahlungsflächen erhöhen die thermische Leistungsfähigkeit bei geringem baulichen Aufwand.
- Die thermische Behaglichkeit wird zu jedem Zeitpunkt sichergestellt.
- Energiekostensparnis durch geringere elektrische Stromaufnahme der Kälteerzeugung.
- Einsatz in Neubau und Sanierung möglich.

Beidseitig aktivierte Deckensegel können vorteilhaft zur energieeffizienten und kostengünstigen Kühlung eingesetzt werden.

Literatur

- [1] DIN EN ISO 7730:2006-05 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. Berlin: Beuth Verlag, 2006.
- [2] DIN EN 14240:2004-04. Lüftung von Gebäuden – Kühldecken – Prüfung und Bewertung. Berlin: Beuth Verlag, 2004.
- [3] <http://www.enob.info>. Informationen zu dem Projekt Balanced Office Building, Aachen unter „Neubau“.
- [4] <http://lowexmonitor.ise.fraunhofer.de>. Informationen zu dem Projekt PFZER, Freiburg unter „Demonstrationsgebäude“.
- [5] Kalz, D. E., Pfafferott, J., Herkel, S.: Building signatures: A holistic approach to the evaluation of heating and cooling concepts. Building and Environment 45 (2010) 632–646
- [6] Kalz, D. E., Pfafferott, J.: Comparative Evaluation of Natural Ventilated and Mechanical Cooled Non-Residential Buildings in Germany: Thermal Comfort in Summer. Proceedings of Conference: Adapting to Change – New Thinking on Comfort. Cumberland Lodge, Windsor, UK, 9–11 April, 2010. London: Network for Comfort and Energy Use in Buildings, <http://nceub.org.uk>
- [7] Pfafferott, J. et al.: Vermessung eines Kühldeckensystems mit Aktivierung der Speichermasse der Betondecke. Abschlussbericht zu AN10-0105, Fraunhofer ISE, September 2010.
- [8] Produktdatenblatt, Prospekt und Prüfzeugnisse VARICOOL velum unter www.zent-frenger.de.
- [9] Themeninfo 1/2007. Thermoaktive Bauteilsysteme. BINE Informationsdienst, 2007.
- [10] Voss, K., Herkel, S., Löhnert, G., Wagner, A., Wambsgans, M. (Hrsg.): Bürogebäude mit Zukunft – Konzepte, Analysen, Erfahrungen. Solarpraxis Verlag, 2006.

Autoren dieses Beitrages:

Dipl.-Ing. Fritz Nüßle, ZENT-FRENGER Gesellschaft für Gebäudetechnik mbH, Schwarzwaldstraße 2, 64646 Heppenheim
Dr.-Ing. Jens Pfafferott, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg

FORSCHEN FÜR DIE ENERGIEWENDE

Das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE schafft technische Voraussetzungen für eine effiziente und umweltfreundliche Energieversorgung. Mit seinen Forschungsschwerpunkten Energiegewinnung, Energieeffizienz, Energieverteilung und Energiespeicherung trägt es zur breiten Anwendung neuer Technologien für die Transformation unseres Energiesystems hin zu nachhaltigen und erneuerbaren Quellen bei.

Das Fraunhofer ISE entwickelt Materialien, Komponenten, Systeme und Verfahren in fünf Geschäftsfeldern.

Das Geschäftsfeld Gebäudeenergie-technik adressiert die Energieeffizienz und Nutzung erneuerbarer Energien in Gebäuden. In Ergänzung zu Forschung und Entwicklung bietet das Institut seinen Kunden Prüf- und Zertifizierungsverfahren an.

www.ise.fraunhofer.de

Kalorische Messungen an thermisch aktivierten Bauteilsystemen

In der Forschung zur technischen Gebäudeausrüstung ist die Energieversorgung von Nullenergie- und Plusenergiegebäuden ein zentrales Thema. Die geringen Wärmestromdichten im Heiz- und Kühlfall können hier besonders effizient über Flächentemperiersysteme bereitgestellt werden. Mit kalorischen Messungen in Verbindung mit darauf abgestimmten einfachen Messverfahren gelingt es, im Laboraufbau sowohl thermisch träge als auch agile Flächentemperiersysteme unter praxisnahen, dynamischen Bedingungen (gemeinsam mit Fassadentechnik und Lüftungskonzept) zu bewerten.

Das Raumklimalabor Smart Building Technology Lab am Institut für Energiesystemtechnik der Hochschule Offenburg besteht aus einer begehbaren Klimakammer und zwei angeschlossenen, baugleichen Testkammern (Bild 1):

- Die Klimakammer kann in dem ca. 39 m³ fassenden Innenvolumen Temperaturen von -40 C bis +80 C bei variabler relativer Feuchte bereitstellen. Dadurch können unabhängig von der Jahreszeit und dem aktuellen Klima über den Zeitraum eines Versuchs bestimmte klimatische Bedingungen eingehalten oder nach Vorgaben verändert werden.
- Die beiden aus Beton gefertigten baugleichen Testkammern sind thermisch träge und mit entsprechender



Bild 1. Raumklimalabor mit begehbaren Klimakammer und zwei baugleichen Testkammern (hier mit unterschiedlichen Fassadensystemen und Kühllastsimulatoren nach DIN EN 14240)

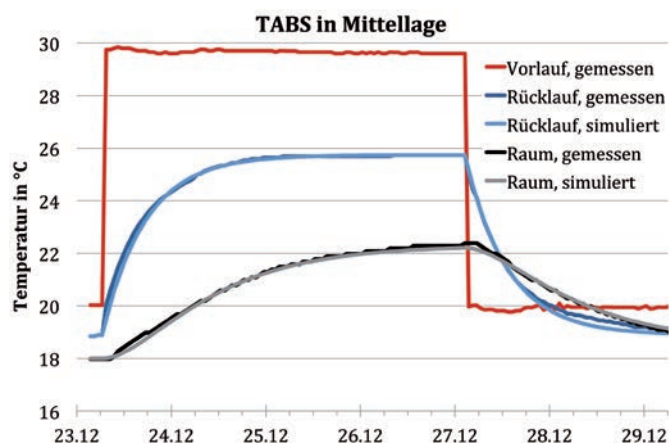


Bild 2. Sprungantworten von je zwei Flächentemperiersystemen in einer Testkammer im Vergleich mit einer modellbasierten Auswertung

- Holzfaserdämmung nahezu adiabatisch. Sie entsprechen in etwa einem Standardbüroraum.
- Klima- und Testkammern sind über ein 4 m² großes Einflügelgtor verbunden, das durch verschiedene Fassadensysteme (auch mit fassadenintegrierter Klima- und Lüftungstechnik) ersetzt werden kann.
- In die Decken sind ein träges System zur Bauteilaktivierung in Mittellage und ein agiles, oberflächennahes System eingelegt. In den Testkammern können alternativ oder additiv andere Flächentemperiersysteme oder konvektiv wirkende Systeme installiert werden.
- Zusätzlich steht für jede Testkammer ein zentrales Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung zur Verfügung. In den Testkammern können verschiedene Lüftungskonzepte realisiert werden.

In diesem Labor können unterschiedliche Heiz-, Kühl- und Lüftungskomponenten einzeln oder im Zusammenspiel mit anderen Komponenten unter praxisnahen statischen oder dynamischen Betriebsbedingungen umfassend untersucht werden. Dabei werden sowohl Energieeffizienz als auch Behaglichkeit bewertet.

Hierfür ist das Raumklimalabor mit einer umfangreichen Messtechnik ausgestattet, welche z. B. Temperatursensoren im Beton in drei unterschiedlichen Ebenen, Oberflächensensoren, ein Messsystem zur thermischen Behaglichkeit und Luftqualität, Wärmeflussplatten, Durchflusssensoren und Thermografie umfasst. Die ca. 100 Messgrößen werden über ein PXI-Messsystem erfasst und in LabVIEW verarbeitet. Von hier aus werden die einzelnen Anlagenkomponenten (insb. Pumpen, Ventilatoren, Kühllastsimulatoren) gesteuert bzw. geregelt.

Laborversuche ergänzen simulationsgestützte Systemanalysen

Während DIN EN 14240 die Leistungsbestimmung an Kühldecken definiert, fehlt eine entsprechende Vorschrift

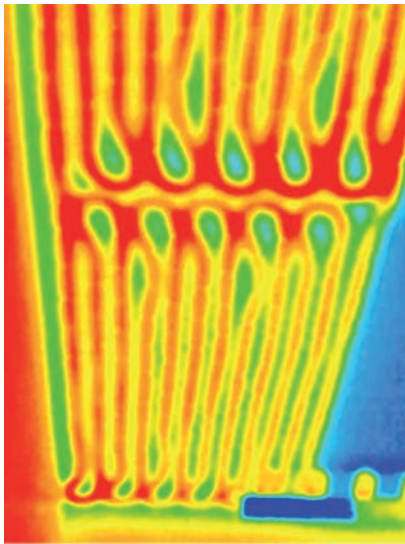


Bild 3. Thermografie der Decke einer Testkammer zu Beginn des Aufheizvorgangs des oberflächennahen TABS – hier nur qualitativ, ohne Temperaturskala

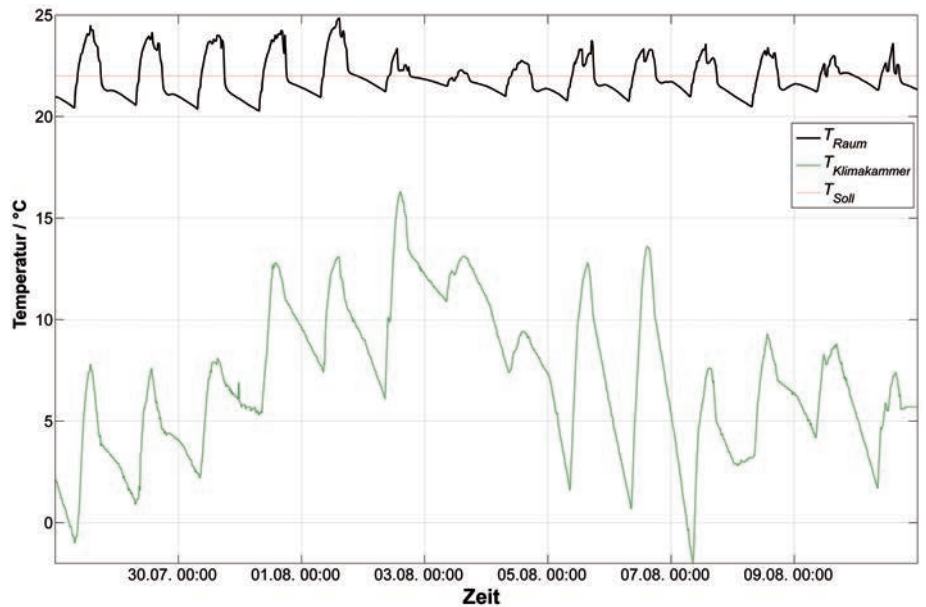


Bild 4. Temperaturverlauf des „Außenklimas“ in der begehbaren Klimakammer und in einer Testkammer beim Test eines prädiktiven Regelalgorithmus

für die Bauteilaktivierung. Da die messtechnische Leistungsbestimmung für die Bauteilaktivierung aufwändig ist, wird in DIN EN 15377-1 eine rechnerische Leistungsbestimmung definiert. Grundsätzlich gibt DIN EN 1264-2 in Verbindung mit Teil 5 ein experimentelles Verfahren an, dieses Verfahren berücksichtigt aber den Wärmeübergang an der Oberfläche nur rechnerisch.

Einerseits werden aufgrund des aufwändigen Laboraufbaus Leistungsdaten nur selten messtechnisch bestimmt und sind kaum dokumentiert, z. B. [1]. Andererseits basieren viele Systemuntersuchungen zur Bauteilaktivierung auf Simulationsstudien, z. B. [2], [3] und [4], und werden durch Feldmessungen bzw. Monitoringkampagnen begleitet, z. B. [5] und [6].

Die Messkampagnen im Smart Building Technology Lab schließen die Lücke zwischen rechnerischer und messtechnischer Bestimmung von Heiz- und Kühlleistung unter praxisnahen Randbedingungen.

Versuchsergebnisse, Beispiele aus dem laufenden Betrieb

Bild 2 zeigt die Sprungantworten der beiden TABS. Eine stationäre Messung bestätigte zunächst die spezifische Heizleistung nach DIN EN 15377-1 gemäß Produktdatenblatt. Die Datenanalyse liefert die für eine Systemcharakterisierung wichtigen Zeitkonstanten von 3 Stunden für die oberflächennahe und 11 Stunden für die Bauteilaktivierung in Mittellage. Eine modellbasierte Datenauswertung auf Basis eines einfachen RC-Modells liefert für das träge System eine hervorragende Übereinstimmung. Für das oberflächennahe System ist dieser Modellansatz nur eingeschränkt nutzbar.

Während dieser Versuche können nach Auswertung aller Oberflächen- und der Lufttemperatur in Kombination mit Thermografie (Bild 3) und den Messdaten der Wärmestromplatten lokale Wärmeübergangskoeffizienten zeitlich aufgelöst bestimmt werden. Die Berechnung liefert dabei sowohl den kombinierten Übergangskoeffizienten als auch den konvektiven und den langwelligen Anteil. Die kombi-

nierten Wärmeübergangskoeffizienten liegen zwischen ca. 6 W/m²K im Heizfall und knapp 12 W/m²K im Kühlfall.

Auf Basis dieser Systemcharakterisierung wurde mit einer multiplen linearen Regression ein adaptiv-prädiktiver Regelalgorithmus entwickelt und in LabVIEW implementiert. Bild 4 zeigt den zweiwöchigen Temperaturverlauf aus einem Versuch unter praxisnahen Randbedingungen, der die Wirkungsweise des Reglers unter konkreten Einsatzbedingungen zeigt und bestätigt, dass die Komfortbedingungen von 22±2 °C eingehalten werden. In diesen Komfortband liegen die Temperaturen nicht immer, wie z. B. am Freitag. Aber die internen Lasten sind auch sehr hoch gewählt worden.

Bild 5 zeigt beispielhaft den Verlauf der kalorischen Größen an einem ausgewählten Tag zwischen 19:00 und 19:00 Uhr. Hier sind einerseits gut die bedarfsgerechte Beladestrategie (\dot{Q}_{TABS}), die zeitlich versetzte Wärmeabgabe an den Raum (\dot{Q}_{Decke}) und die internen Gewinne (\dot{Q}_{intern}) und andererseits der zu diesen Wärmeströmen zeitlich versetzte Verlauf der Bauteiltemperatur ($T_{Bauteil}$) gut zu erkennen.

Kalorische Messungen an Bauteilen und gebäudetechnischen Systemen

Werden Temperatur-, Durchfluss- und Wärmestrommessungen an thermisch aktivierten Bauteilen und den Versorgungssystemen in einem Messsystem zusammengeführt und gemeinsam ausgewertet, gelingt eine vollständige, kalorische Bestimmung der Heiz- und Kühlleistung unter praxisnahen Randbedingungen. Die Auswertung der Komfortmessgrößen liefert parallel zur Leistungsbestimmung eine Bewertung des thermischen Komforts und der Raumluftqualität. Im Smart Building Technology Lab kann die Energieeffizienz komplexer Heiz-, Kühl- und Lüftungssysteme für Gebäude mit sehr geringem Heiz- und Kühlbedarf kalorisch bestimmt werden. Eine Umrechnung der Ergebnisse aus stationären Temperatur- und Wärmestrommessungen (insbesondere an thermisch schweren Flächentemperiersystemen) mit Hilfe numerischer Verfahren kann so entfal-

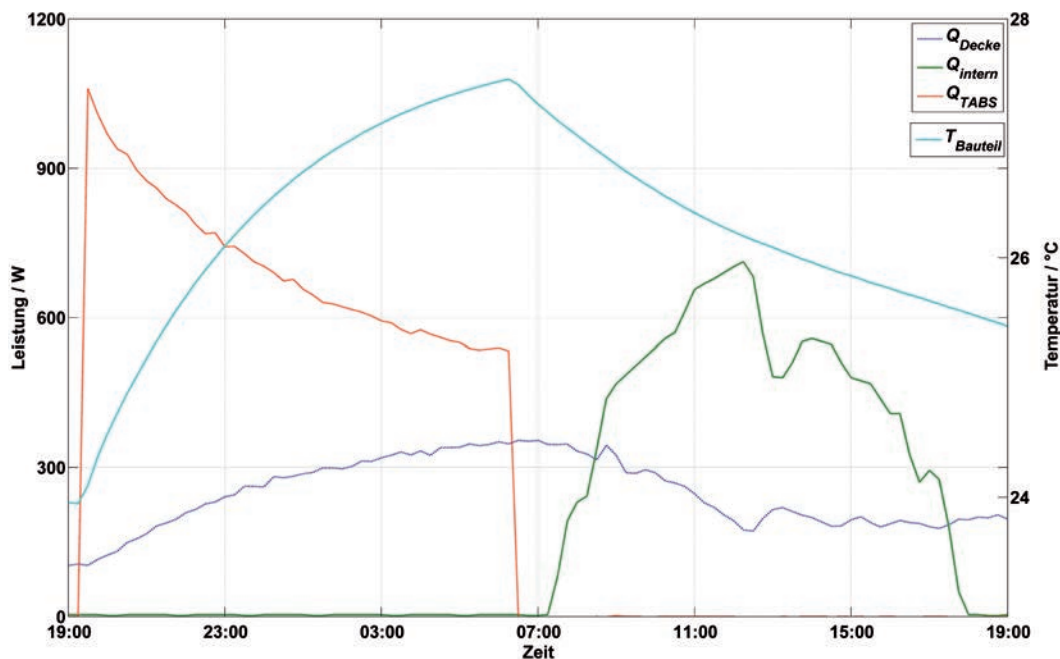


Bild 5. Verlauf der kalorischen Messgrößen an einem ausgewählten Tag; die Bauteiltemperatur wird auf der rechten y-Achse informativ gezeigt (Fotos/Grafiken: Hochschule Offenburg)

len bzw. wird durch die explizite Messung der relevanten Größen unter stationären, dynamischen oder transienten Randbedingungen ergänzt.

Literatur

- [1] Osterle, Eberhard; Koenigsdorff, Roland: Thermische Aktivierung von Bauteilen zum Heizen und Kühlen von Gewerbebauten. In: HLH 50 (1999), Nr. 1, S. 22–30.
- [2] Koschenz, Markus; Lehmann, Beat: Thermoaktive Bauteilsysteme tabs. 1. Aufl. Dübendorf: EMPA Dübendorf Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Zentrum für Energie und Nachhaltigkeit ZEN, 2000.
- [3] Olesen, Bjarne, W.; Dossi, Francesco Curro: Neue Erkenntnisse über Regelung und Betrieb für die Betonkernaktivierung. Flächenheiz- und Kühlsysteme. Tl.1. In: HLH 56 (2005), Nr. 1, S. 29–34.
- [4] Glück, Bernd: Thermische Bauteilaktivierung. In: HLH 50 (1999), Nr. 5, S. 40–46.
- [5] Kalz, Doreen E.; Pfafferott, Jens: Thermal Comfort and Energy-Efficient Cooling of Nonresidential Buildings. Cham 2014 (SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology).
- [6] Heinrich, S.; Koenigsdorff, R. u. a.: Wissenschaftliche Begleitung und messtechnische Evaluierung des Neubaus der Gebhard-Müller-Schule des Kreisberufsschulzentrums Biberach. In: Wissenschaft und Praxis (Hrsg.: Bauakademie Biberach & Hochschule Biberach), Bd. 152 (2008).

Genannte Normen

- DIN EN 15377 Heizungsanlagen in Gebäuden – Planung von eingebetteten Flächenheiz- und Kühlsystemen mit Wasser als Arbeitsmedium. Teil 1: Bestimmung der Auslegungs-Heiz- bzw. Kühlleistung (Februar 2009).
- DIN EN 1264 Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung. Teil 2: Fußbodenheizung: Prüfverfahren für die Bestimmung der Wärmeleistung unter Benutzung von Berechnungsmethoden und experimentellen Methoden (März 2013).
- DIN EN 1264 Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung. Teil 5: Heiz- und Kühlflächen in Fußböden, Decken und Wänden – Bestimmung der Wärmeleistung und der Kühlleistung (Januar 2009).
- DIN EN 14240 Lüftung von Gebäuden – Kühldecken – Prüfung und Bewertung (April 2004).

Weitere Informationen

Prof. Dr.-Ing. Jens Pfafferott,
 Hochschule Offenburg,
 Institut für Energiesystemtechnik INES,
 Badstraße 24, 77652 Offenburg,
 Tel. (0781) 205-46 04,
 jens.pfafferott@hs-offenburg.de

// Energiewende mit uns



**E-Werk
Mittelbaden**

Daher gut versorgt



www.e-werk-mittelbaden.de/e-welt

Kostenfreie Beratung zum Energiesparen

- >> Energieeffiziente Beleuchtung
- >> Heizen mit Umweltenergie
- >> Ökologische Warmwasserbereitung
- >> Fachvorträge von Experten

**Terminvereinbarung unter Telefon: 0781 280-223 oder
per E-Mail: kontaktformular@e-werk-mittelbaden.de**



Öffnungszeiten:

Mo. - Do. 09:00 - 12:00 Uhr, 13:00 - 16:00 Uhr
Fr. 09:00 - 12:00 Uhr, 13:00 - 15:00 Uhr

E>welt, Freiburger Straße 23 a, 77652 Offenburg



Unser Leistungsspektrum umfasst die Fachplanung in den Bereichen

- Versorgungstechnik
(Heizung, Lüftung, Sanitär, Klima, Kälte)
- Elektrotechnik
- Energietechnik
- Verfahrenstechnik
- Lichtplanung
- Energieberatung
- Gebäudesimulation
- Thermografie
- Sicherheitspläne
- Reinraumtechnik
- MSR-Technik



Messtechnische Bestimmung von Aufwandszahlen unterschiedlicher Flächentemperiersysteme

Mit der Messung des Wärme- und Kälteverbrauchs im Labor gelingt es, sowohl thermisch träge als auch agile Flächentemperiersysteme unter praxisnahen, dynamischen Bedingungen messtechnisch zu bewerten. Werden Nutzwärme- und Nutzkältebedarf berechnet und ins Verhältnis zu den gemessenen Verbräuchen gesetzt, können die Aufwandszahlen für die Nutzenübergabe e_{ce} für verschiedene Flächentemperiersysteme und in Kombinationen mit anderen Übergabesystemen unter verschiedenen Nutzungsbedingungen und für unterschiedliche Betriebsführungsstrategien bestimmt werden. Damit stehen Aufwandszahlen auf Basis kalorischer Messungen zur Verfügung, die je nach Aufgabenstellung entweder produkt- oder objektbezogen in der Planung komplexer Energiekonzepte verwendet werden können und die tatsächlichen Aufwandszahlen $e_{h,ce}$ für den Heizfall bzw. $e_{c,ce}$ für den Kühlfall genauer als Literaturwerte bzw. projektbezogen beschreiben.

Measurement of energy expenditure factors of various radiant heating and cooling systems. *The measurement of heating/cooling consumption is used to evaluate both thermally inert and agile radiant heating and cooling systems under realistic, dynamic conditions in a laboratory. If the net heating/cooling energy demand is calculated, the ratio between calculated demand and measured consumption defines the energy expenditure factor for the heat transfer e_{ce} . Thus, e_{ce} can be determined under different conditions of use and for different operation strategies and in combination with other heat transfer systems. This provides energy expenditure factors based on caloric measurement which are available either product or object specific. The actual energy expenditure factors $e_{h,ce}$ for the heating mode or $e_{c,ce}$ for the cooling mode can be used in the planning of complex energy concepts since these specific values are more accurate than literature values.*

1 Motivation und Literatur

Die Energieversorgung von Nullenergie- und Plusenergiegebäuden ist in der Forschung zur technischen Gebäudeausrüstung ein zentrales Thema. Die geringen Wärmestromdichten im Heiz- und Kühlfall können hier besonders effizient über Flächentemperiersysteme bereitgestellt werden, weil Flächentemperiersysteme mit geringen Über- bzw. Untertemperaturen und damit effizient mit Umweltenergie/Wärmepumpen betrieben werden können.

Allerdings ist die Übergabe der Wärme/Kälte an den Raum aufgrund der thermischen Trägheit von Flächentem-

periersystemen mit Verlusten verbunden, die in der Planung mit der Aufwandszahl e_{ce} für die Nutzenübergabe berücksichtigt werden. Dabei ist die Bestimmung dieser Aufwandszahl schwierig:

- Bereits die Leistungsbestimmung von Flächentemperiersystemen ist nicht einheitlich vereinbart: Während EN 14240 [1] die Leistungsbestimmung an Kühldecken definiert, fehlt eine entsprechende Vorschrift für die Bauteilaktivierung. Da zudem die messtechnische Leistungsbestimmung für die Bauteilaktivierung aufwändig ist, wird in EN 15377 [2] eine rechnerische Leistungsbestimmung vorgestellt. EN 1264 lässt in Teil 2 [3] in Verbindung mit Teil 5 [4] daher auch ein experimentelles Verfahren zur Leistungsbestimmung zu, wobei dieses Verfahren den Wärmeübergang an der Oberfläche nur rechnerisch berücksichtigt. Eine Aufwandszahl kann mit diesen normativen Verfahren nicht bestimmt werden.
- Aufgrund des aufwändigen Laboraufbaus werden (stationäre) Leistungsdaten und Energieaufwände (über einen längeren Zeitraum) der Bauteilaktivierung nur selten messtechnisch bestimmt und sind kaum dokumentiert, z. B. von Oesterle [5] oder Treiber [6]. Viele Systemuntersuchungen zur Bauteilaktivierung basieren daher auf Simulationsstudien, z. B. von Koschenz [7], Olesen [8] oder Glück [9], und werden durch Feldmessungen bzw. Monitoringkampagnen begleitet, z. B. im Projekt LowEx:MONITOR [10] oder in der Forschungsinitiative Energieoptimiertes Bauen EnOB [11].
- Kalz [12] (mit einem umfangreichen Literaturverzeichnis und exzellenter Analyse verfügbarer Studien) wertet viele umfangreiche Monitoringprojekte in Nichtwohngebäuden mit unterschiedlichen Flächentemperiersystemen aus und beschreibt die Energieeffizienz entlang der gesamten Energieumwandlungskette ausgehend von der Umweltenergiequelle und dem Primärenergieeinsatz bis zur Bereitstellung der nutzbaren Wärme bzw. Kälte im Raum, s. a. [13], [14] und [15]. Daraus können sowohl Aufwandszahlen für die einzelnen Energieumwandlungen abgeleitet als auch deren breite Streuung in der Praxis beschrieben werden. Methodisch bedingt kann aber die Aufwandszahl für die Nutzenübergabe aus Feldmessungen nicht bestimmt werden, weil dazu der Nutzwärme- bzw. -kältebedarf bekannt sein müsste.
- Pfafferoth et al. [16] leiten auf Basis bekannter Arbeiten und mit Hilfe von Praxis- und Betriebserfahrungen vie-

ler realisierter und gut dokumentierter Projekte sowohl Planungsregeln als auch geeignete Betriebsführungsstrategien für die Bauteilaktivierung her. Auch hier kann methodisch bedingt die Nutzenübergabe der Bauteilaktivierung an den Raum nicht betrachtet werden. Vielmehr werden Anlage und Betrieb auf Grundlage des gemessenen, täglichen Heiz- bzw. Kälteverbrauchs bestimmt.

- *Treiber* [6] und *Kempkes et al.* [17] haben auf Basis validierter Simulationsmodelle Aufwandszahlen für die Nutzenübergabe auf Basis einer numerischen Gebäude- und Anlagensimulation bestimmt, s. a. Abschnitt 4.

Ziel der vorliegenden Studie ist es, einen Beitrag zur messtechnischen Bestimmung von Aufwandszahlen für die Nutzenübergabe $e_{c,ce}$ unterschiedlicher Flächentemperiersysteme zu liefern. Dabei konzentriert sich die messtechnische Bewertung auf vier Systeme bzw. Systemkombinationen, die jeweils mit der gleichen Betriebsführungsstrategie (Beschreibung der Betriebsführung in Anlehnung an DIN 18599) betrieben werden:

1. Bauteilaktivierung in Mittellage, optimierter 24-h-Betrieb;
2. oberflächennahe Bauteilaktivierung, optimierter 24-h-Betrieb;
3. Bauteilaktivierung in Mittellage (verbesserte Steuerung mit Freigabe zwischen 22:00 und 06:00 Uhr) in Kombination mit oberflächennaher Bauteilaktivierung (Regelung zwischen 08:00 und 17:00 Uhr);
4. Bauteilaktivierung in Mittellage (verbesserte Steuerung mit Freigabe zwischen 22:00 und 06:00 Uhr) in Kombination mit Kühlsegel (Regelung zwischen 08:00 und 17:00 Uhr).

2 Aufwandszahlen für die Nutzenübergabe in der Normung

Aufwandszahlen beschreiben in pauschaler Form die Effizienz einzelner Umwandlungsschritte der Energiebereitstellung. Sie werden einerseits in der Planung verwendet, um die Leistung einzelner Anlagenteile zu dimensionieren. Andererseits dienen sie zur Berechnung des (jährlichen) Energiebedarfs im Rahmen der gesetzlichen Mindestanforderungen, hier EnEV 2014 [18].

- DIN 4701 definiert in Teil 10 [19] die Aufwandszahl (e) als „Verhältnis von Aufwand zu erwünschtem Nutzen (Bedarf) bei einem Energiesystem“. Basis für alle Energiebetrachtungen (insb. für Heizung in Wohngebäuden) ist dabei der Heizenergiebedarf $q_{h,H}$ in kWh/(m²a), wobei darin eine Wärmerückgewinnung in der Lüftung nicht berücksichtigt ist. Für eine Fußbodenheizung werden die spezifischen Übergabeverluste $q_{h,ce}$ zu 0,4 bis 3,3 kWh/(m²a) in Abhängigkeit von Bedarf $q_{h,H}$ und Regelkonzept bestimmt. Damit ergeben sich Aufwandszahlen $e_{h,ce}$ zwischen 1,0 für einen hohen spezifischen Wärmebedarf von 90 kWh/(m²a) und optimierte Regelung bis 1,08 für einen geringen spezifischen Wärmebedarf von 40 kWh/(m²a) und Zweipunktregler mit großer Schaltdifferenz. Aufwandszahlen für Kühlung oder Deckensysteme werden hier allerdings nicht genannt.
- DIN 18599 definiert in Teil 1 [20] die Aufwandszahl als „Faktor, welcher den Aufwand eines Prozesses gegen-

über dessen Nutzen beschreibt.“ Anders als in DIN 4701-10 wird eine Wärmerückgewinnung bereits im Heizwärme- bzw. Kältebedarf berücksichtigt [21]. In Teil 5 [22] wird für dieses Berechnungsmodell die Aufwandszahl für den jährlichen Wärmebedarf bestimmt. Ausgehend von einem hydraulischen Abgleich, einem intermittierenden Betrieb, einem optimierten Regler mit Zeitsteuerung und von einer verbesserten Dämmung ergibt sich $e_{h,ce} = 1,14$ für die Deckenheizung. Eine Temperaturabsenkung sowie der Strahlungsanteil bleiben dabei unberücksichtigt. In Teil 7 [23] wird die Aufwandszahl für den jährlichen Kühlenergiebedarf bestimmt, wobei eine Flächentemperierung dort (mit Verweis auf Teil 5) nicht detailliert berücksichtigt wird. Im Rahmen eines Kurzverfahrens wird die Aufwandszahl mit $e_{c,ce} = 1,0$ für eine Kühldecke und $e_{c,ce} = 1,1$ für eine Bauteilaktivierung vereinbart.

3 Versuchsaufbau und Messtechnik

Bild 1 zeigt das Raumklimalabor (2,7 m breit, 5,0 m tief und 2,7 m hoch) mit einer Grundfläche von ca. 13,5 m² und einem Raumvolumen von ca. 36 m³ und den Versuchsaufbau (hier mit bauteilintegrierten Systemen in der Decke und Mischlüftung). Der spezifische Wärmeverlust über die einzelnen Flächen wurde messtechnisch bestimmt und berücksichtigt dabei auch die (ungewünschte) Infiltration durch nicht vermeidbare Leckagen:

- $UA_{\text{Prüfraum/Klimakammer}} = 25 \text{ W/K}$ (Kopplung zwischen Innen- und Außenraum)
- $UA_{\text{Decke/Technikum}} = 8 \text{ W/K}$ (Verluste von der aktivierten Decke an die Versuchsumgebung, entspricht in guter Näherung der Wärmeübertragung an den darüber liegenden Raum)
- $UA_{\text{Prüfraum/Technikum}} = 17 \text{ W/K}$ (unerwünschte Wärmeübertragung an die Versuchsumgebung)

Die Prüfräume sind in Beton ausgeführt. Abweichend von EN 14240 [1] werden die Umschließungsflächen nicht temperiert. Damit steht die gesamte Bauteilmasse als thermischer Speicher zur Verfügung. Das dynamische Temperaturverhalten wird dabei durch eine Temperierung der Oberflächen nicht beeinflusst. Es kommen folgende Anlagenkomponenten zum Einsatz:

- Lüftungsanlage (hier mit konstantem Volumenstrom von 75 m³/h während der Anwesenheitszeit betrieben) mit einer gemessenen Rückwärmzahl Φ_{WRG} von 0,86.
- Bauteilaktivierung in Mittellage mit ca. 86 m PE-Xa-Rohren in der Dimension 20 mm × 2,3 und einem Verlegeabstand von 15 cm in einer Tiefe von 8,5 cm. Diese Bauteilaktivierung wird auf einer aktivierten Fläche von 13,5 m² und einem Volumenstrom von 13,7 l/(h m²_{NGF}) betrieben.
- oberflächennahe Bauteilaktivierung mit ca. 156 m PE-Xa-Rohren in der Dimension 14 mm × 2,0 und einem Verlegeabstand von 7,5 cm in einer Tiefe von 2,5 cm. Im Versuch wird die aktivierte Fläche auf 10,0 m² reduziert und mit einem Volumenstrom von knapp 40 l/(h m²_{TABS}) bzw. 28,4 l/(h m²_{NGF}) betrieben.
- 1,8 m² Kühlsegel, doppelseitig aktiviert, mit einer Kühlleistung von 130 W/m² bei $\Delta\vartheta_{\text{Fluid-Raum}} = -10 \text{ K}$ und einer Heizleistung von 120 W/m² bei $\Delta\vartheta_{\text{Fluid-Raum}} = +12 \text{ K}$.



Bild 1. Links: Raumklimalabor mit begehbare Klimakammer (im Hintergrund, weiß) und zwei baugleichen Prüfkammern (grün). An der grünen Wand sind gut Lüftungstechnik sowie Heiz- und Kühlsysteme mit zwei Thermostaten zu erkennen. Rechts: Blick in eine Prüfkammer mit Fassade zur Klimakammer, Kühllastsimulatoren und Messtechnik (Quelle: Hochschule Offenburg)

Fig. 1. Left: Room climate laboratory with climate chamber (in the background, white) and two identical test chambers (green). Air handling units and heating and cooling systems with two thermostats are located on the green wall. Right: View into a test chamber with facade to the climate chamber, cooling load simulators and measurement equipment (Source: Hochschule Offenburg)

Die umfangreiche Messtechnik und die gesamte Regelung werden über ein gemeinsames Messdatenerfassungssystem mit hoher zeitlicher Auflösung realisiert. Die Auswertung basiert auf 5-Minuten-Messdaten. Komfort und Energiebedarf werden auf Stunden- und Tagesbasis ausgewertet.

Der komplette Versuchsaufbau und die Messumgebung wurden in mehreren Arbeiten validiert [24]. In vorausgegangenen Versuchsreihen konnten die Herstellerangaben zu den spezifischen Heiz- und Kühlleistungen gemäß EN 14240 bzw. EN 15377 durch kalorische Messungen unter stationären Bedingungen bestätigt werden, obwohl das Labor den Anforderungen der EN 14240 hinsichtlich der Forderung nach temperierten Oberflächen nicht entspricht.

Aus den dynamischen Tests können die Zeitkonstanten für den Raum mit $\tau_{\text{Raum}} = 20$ Stunden (ohne Betrieb der Lüftungsanlage) sowie für die Bauteilaktivierung in Mittellage mit $\tau_{\text{Bauteilaktivierung}} = 11$ Stunden und $\tau_{\text{obf.nah}} = 3$ Stunden für das oberflächennahe System bestimmt werden [16].

4 Methode zur messtechnischen Bestimmung von Aufwandszahlen für die Nutzenübergabe

Zur Bestimmung der Übergabeverluste mittels thermischer Gebäudesimulation gibt es seit Ende der 1980-er Jahre verschiedene Studien, stellvertretend sei hier die Arbeit von Bauer [25] genannt. Die Simulationsstudien werden dabei grundsätzlich von Messkampagnen unterstützt. Methodisch unterscheiden sich die Arbeiten in erster Linie darin, ob der Referenzheiz- bzw. kühlenergiebedarf (ohne Berücksichtigung der Wärmerückgewinnung einer Lüftungs-

anlage) oder der Nutzwärme- bzw. kältebedarf als Bezugsgröße gewählt wird.

– *Treiber* [6] hat ausgehend von der Heizlast (ohne jede technische Einrichtung) und dem damit bestimmten Referenzheiz- bzw. -kühlenergiebedarf den Aufwand für die Nutzenübergabe $e_{1,H}$ bzw. $e_{1,K}$ getrennt für den Heiz- und Kühlfall einschließlich der technischen Einrichtung bestimmt. *Treiber* bestimmt die Aufwandszahlen für bestimmte technische Lösungen und Betriebsstrategien, wobei Aufwandszahlen kleiner als 1 möglich sind, wenn eine Wärmerückgewinnung eingesetzt wird. Dabei ist das Jahresmittel der relativen Heiz- $\beta_{Q,H}$ bzw. Kühllast $\beta_{Q,K}$ (vergleichbar mit der Auslastung) die wesentliche Einflussgröße. Die Aufwandszahlen werden mit Hilfe einer gekoppelten Gebäude- und Anlagensimulation bestimmt. Dazu wurde das Simulationsmodell mit umfangreichen Messungen in einer Prüfkabine validiert. Diese Messungen bauen auf den umfangreichen Studien von Beck [26] auf. Im Heizfall zeigt *Treiber* eine enorme Bandbreite der Aufwandszahlen $e_{1,H}$ für thermoaktive Flächen in Kombination mit einer raumlufttechnischen Anlage zwischen 0,9 bis 1,4 für große relative Heizlasten und zwischen 2,0 und 4,8 für kleine relative Heizlasten. Für den Kühlfall reichen die Aufwandszahlen $e_{1,K}$ von 1,1 bis 1,3 für große relative Kühllasten und von 2,2 bis 4,9 für kleine relative Kühllasten. Diese großen Unterschiede resultieren aus verschiedenen technischen Lösungen und Regelkonzepten, für die jeweils konkrete Aufwandszahlen beschrieben werden. Zwar lassen sich aus dieser Studie die Aufwandszahlen e_{ce} für die Bauteilaktivierung selbst nicht ableiten, diese Studie gibt aber grundlegende Hinweise zu den wesentlichen Abhängigkeiten, insb. der Abhän-

- gigkeit von spezifischer Heiz- und Kühllast sowie zur Auslastung.
- Diese Ergebnisse werden von *Schmidt et al.* [27] verallgemeinert und übersichtlich dargestellt. Die Aufwandszahlen beziehen sich ebenfalls auf den Referenzheiz- bzw. kühlenergiebedarf und beinhalten damit auch die Wärmerückgewinnung der raumlufttechnischen Anlagen. Mit sinkendem Nutzwärmebedarf steigt die Aufwandszahl $e_{1,W}$ der thermisch trägen Bauteilaktivierung von 1,4 auf 4,8 und für die oberflächennahen Bauteilaktivierung von 0,9 auf 1,9 an. Die Autoren geben darauf basierend zusätzlich Kennzahlen für den Strombedarf und optimierte Regelkonzepte an. Methodisch bedingt ist auch hier eine Rückrechnung auf die Aufwandszahl für die Nutzenübergabe $e_{c,ce}$ der Bauteilaktivierung nicht möglich.
 - *Burkard* [28] hat die Wärmeübergabeverluste thermisch aktivierter Bauteile nach gleicher Methode sowohl für den Heiz- als auch für den Kühlfall bestimmt. Erwartungsgemäß treten bei unregelmäßigen Systemen die höchsten Aufwandszahlen auf. Bei hohen Deckungsraten liegen die Aufwandszahlen im Kühlfall bei $e_{1,K} = 1,7$ und im Heizfall bei $e_{1,W} = 1,8$, wenn in der Übergangszeit die Flächentemperierung ausgeschaltet bleibt. Die Werte bei Betrieb während der Übergangszeit sind in beiden Fällen höher und bei Wochenendabschaltung niedriger. Die Regelung nach Raumlufttemperatur oder Rücklauftemperatur liefert höhere und die Kombination eines thermisch trägen mit einem agilen System niedrigere Aufwandszahlen. Bei einer entsprechenden Systemkombination werden Aufwandszahlen zwischen $e_{1,W} = 1,2$ im Heizfall und $e_{1,K} = 1,5$ im Kühlfall erreicht.
 - *Kempkes et al.* [17] (mit einer fundierten Analyse bestehender Arbeiten) bestimmen den Übergabeverlust, also den Aufwand für die Wärme- bzw. Kälteübergabe im Raum und verwenden dabei die Rechenmethode nach DIN 18599 und die Randbedingungen nach EN 15251 [29]. Nach einer aufwändigen Validierung des Referenzmodells mit verschiedenen Simulationswerkzeugen wird eine Simulationsstudie mit insgesamt 23 Varianten über bauphysikalische, anlagentechnische, regelungstechnische und nutzungsbedingte Größen durchgeführt. Aus den Übergabeverlusten wird ein Nutzungsgrad bzw. als dessen Kehrwert die Aufwandszahl bestimmt. Der Mittelwert der Aufwandszahl für Heizen von $e_{h,ce} = 1,37$ entspricht in guter Näherung dem in DIN 18599-5 genannten Wert von $e_{h,ce} = 1,4$ bis 1,43 (dort als Nutzungsgrad angegeben). Für den Kühlfall wird der Nutzungsgrad als Funktion vom Nutzkältebedarf $Q_{c,b}$ bis 40 kWh/(m²a) angegeben: $\eta_{c,ce} = 0,27 \cdot Q_{c,b}^{0,31}$. Eine Vorlauftemperaturregelung führt im Mittel zu einer 4 %-igen Verbesserung gegenüber einem Betrieb mit konstanter Vorlauftemperatur. Darüber hinaus zeigen die Autoren die starke Abhängigkeit vom Komfortanspruch zwischen einer Aufwandszahl von 0,81 für Komfortklasse III über 1,21 für Komfortklasse II bis zu 1,36 für Komfortklasse I im Vergleich zu einer idealen Kühlung auf 24,5 °C.
 - *Schnieders* [30] zeigt, dass unter Zugrundelegung eines Nutzermodells, welches Abweichungen von der gewünschten Temperatur nach oben und unten zulässt, keine nennenswerten Übergabeverluste an Fußboden-

heizungen auftreten. Dies bestätigt die Aussagen von *Kempkes et al.* zum Einfluss des Komfortanspruchs.

- *Koenigsdorff et al.* [31] validieren ein Gebäudemodell mit Messdaten aus einem realen Gebäudebetrieb und nutzen diese thermische Gebäudesimulation zur Bestimmung von Aufwandszahlen. Die Autoren nennen einen zwei- bis dreifachen Kühlenergiebedarf für ein Gruppenbüro in einem typischen Bürogebäude gegenüber einer idealen Kühlung und begründen dies mit der Trägheit der Bauteilaktivierung und dem damit verbundenen, deutlich niedrigeren Tagesmittel der Raumtemperatur.
- Sowohl als Planungshilfe als auch zur laufenden Betriebsoptimierung haben sich in den letzten Jahren aus dem realen Anlagenbetrieb abgeleitete Teilenergiekennwerte zur Beschreibung der Anlagenperformance etabliert, z. B. TEK-Tool [32] und [33] oder Energie-Navigator [34]. Zwar sind diese Kennzahlen gut nutzbar, um Planung und Betrieb zu unterstützen, und können in gesetzlichen Nachweisverfahren verwendet werden. Um die Nutzenübergabe selbst zu beschreiben, eignen sie sich allerdings aus methodischen Gründen nicht, denn hierfür müsste der (unter diesen Nutzungsbedingungen berechnete) Nutzwärme- bzw. -kältebedarf vorliegen.

Im Rahmen der messtechnischen Untersuchungen über den Messzeitraum t wird die Aufwandszahl in dieser Studie für die Wärme- bzw. Kälteübergabe in Abhängigkeit vom berechneten Nutzwärme- und -kältebedarf (wie auch in DIN 18599 vereinbart) beschrieben:

$$e_{h,ce} = \frac{\int_{\tau=0}^t \dot{Q}_{\text{Messung}} d\tau \nabla \dot{Q}_{\text{Messung}} > 0}{Q_{h,\text{ideal}}}$$

$$e_{c,ce} = \frac{\int_{\tau=0}^t \dot{Q}_{\text{Messung}} d\tau \nabla \dot{Q}_{\text{Messung}} < 0}{Q_{c,\text{ideal}}}$$

Die im Folgenden vorgestellten Messungen werden für ein Regelkonzept (Regelung der Vorlauftemperatur in Verbindung mit Zeitsteuerung) durchgeführt und unter Berücksichtigung des thermischen Komforts der Kategorie II gemäß EN 15251 ausgewertet.

Damit können die Aufwandszahlen $e_{h,ce}$ und $e_{c,ce}$ mit Hilfe einer labortechnischen Untersuchung und ohne Nutzung einer numerischen Gebäude- und Anlagensimulation für einzelne Systeme bestimmt werden.

5 Messergebnisse

Alle verwendeten Messergebnisse wurden zwischen März und November 2015 aufgenommen. Für die Auswertung wurden vier vollständige Messreihen ausgewählt, die erfolgreich reproduziert werden konnten, soweit dies bei dynamischen Messungen möglich ist.

Interne Lasten (zwei Personen mit durchschnittlicher Büroausstattung) und solare Lasten (Wärmeschutzverglasung mit außenliegendem Sonnenschutz und Sonnenschutzregelung bei 200 W/m²) werden für eine typische Büronutzung über Kühllastsimulatoren eingebracht. In allen Messungen wurde die minimale/maximale Außen-

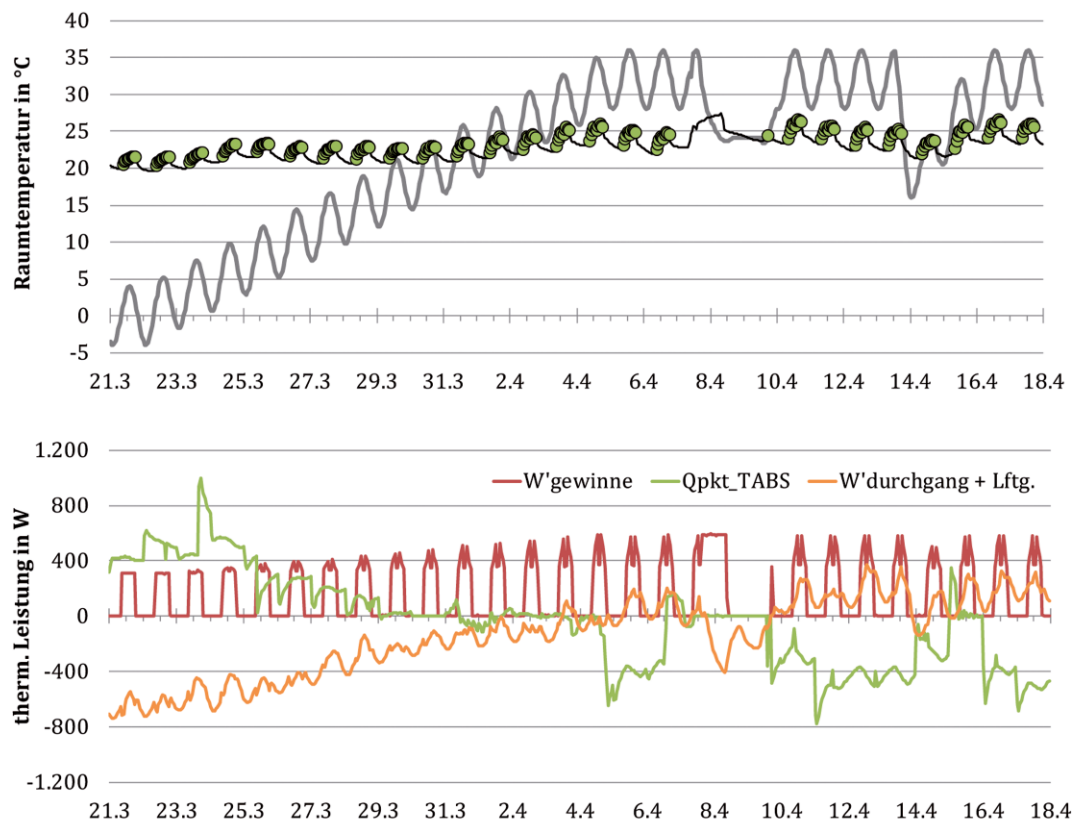


Bild 2. Bauteilaktivierung in Mittellage, 24-h-Betrieb; Ausfall der Klimakammer und Regelung zwischen dem 7.4. und 9.4.2015, aber mit durchgängiger Messdatenerfassung
 Fig. 2. Concrete core conditioning in 24 h-operation mode: breakdown of climate chamber operation and automation equipment between the 7.4. and 4.9.2015, but with continuous data acquisition

temperatur von 0 °C bzw. 32 °C im Tagesmittel so gewählt, dass für die Bauteilaktivierung in Mittellage eine maximale Wärmestromdichte von jeweils ca. 40 W/m² (Mittelwert für 24-h-Betrieb) im Heiz- und Kühlfall erreicht wird. Zwischen diesen Außentemperaturen wird ein Übergang vom Winter über die Übergangsjahreszeit bis zum Sommer simuliert, wobei jede Messung mit einem Sprung endet, um einen unvorhergesehenen Lastwechsel zu simulieren.

Die Betriebsführung wird dabei jeweils mit einem gut abgestimmten, konventionellen Betriebsführungskonzept betrieben [16], das dem Stand der Technik entspricht und die zeitlich stark verzögerte Reaktion auf Laständerungen berücksichtigt [35].

Versuch 1: Bauteilaktivierung in Mittellage

Die erste Messung wird für die Bauteilaktivierung in Mittellage durchgeführt. Die Vorlauftemperatur wird in Abhängigkeit der Tagesmitteltemperatur von gestern eingestellt, wobei die Parameter nach dem Verfahren *TABSControl* [36] und [37] bestimmt werden:

$$\vartheta_{VL,h} = 31,05 \text{ °C} - 0,59 \cdot \vartheta_{\text{außen,gestern}} \text{ [°C]} \text{ und}$$

$$\vartheta_{VL,c} = 32,24 \text{ °C} - 0,47 \cdot \vartheta_{\text{außen,gestern}} \text{ [°C]}$$

Die neutrale Zone ohne Kühl-/Heizbetrieb liegt zwischen $16 \text{ °C} \leq \vartheta_{\text{außen,gestern}} \leq 17 \text{ °C}$. Die Pumpe wird abgestellt, wenn die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf kleiner als 0,5 K ist (mit Wiederanfahrbetrieb nach einer Stunde).

Bild 2 zeigt den Temperaturverlauf sowie die Leistungsbilanz im Prüfraum. Gut erkennbar sind der Anstieg der Außentemperatur, die Raumtemperatur in einem Bereich zwischen 21 und 27 °C, der Anstieg der solaren Lasten vom Winter- zum Sommerbetrieb, die Wärmeverluste und -gewinne sowie die Wärmeübergabe der Bauteilaktivierung. An den Prüfraum werden knapp 90 % der Heiz- und Kühlenergie abgegeben. Die Wärmeübertragung an den darüber liegenden Raum in Höhe von rund 10 % entspricht in sehr guter Näherung den Produktangaben für einen vergleichbaren Deckenaufbau.

Versuch 2: Oberflächennahe Bauteilaktivierung

Die zweite Messung wird für die oberflächennahe Bauteilaktivierung (auf 10 m² reduzierte aktive Fläche) unter nahezu identischen Randbedingungen durchgeführt. Die Vorlauftemperatur wird ebenfalls in Abhängigkeit der Tagesmitteltemperatur von gestern eingestellt, allerdings mit angepassten Parametern:

$$\vartheta_{VL,h} = 30,36 \text{ °C} - 0,55 \cdot \vartheta_{\text{außen,gestern}} \text{ [°C]} \text{ und}$$

$$\vartheta_{VL,c} = 31,15 \text{ °C} - 0,41 \cdot \vartheta_{\text{außen,gestern}} \text{ [°C]}$$

Die neutrale Zone liegt ebenfalls zwischen $16 \text{ °C} \leq \vartheta_{\text{außen,gestern}} \leq 17 \text{ °C}$. Die Pumpe wird abgestellt, wenn die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf kleiner als 1 K ist (mit Wiederanfahrbetrieb nach einer Stunde).

Bild 3 zeigt einen mit Bild 2 vergleichbaren Temperaturverlauf. In der Leistungsbilanz ist hier gut die schnelle

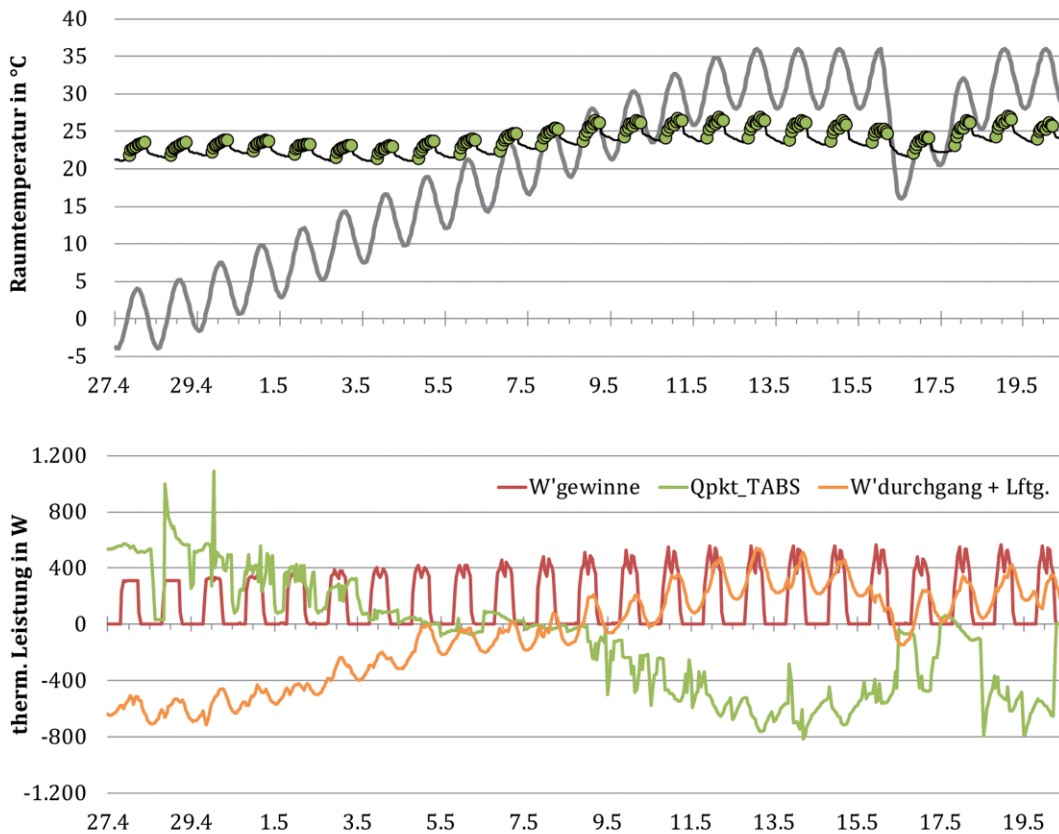


Bild 3. Oberflächennahe Bauteilaktivierung, 24-h-Betrieb
 Fig. 3. Surface near concrete conditioning in 24 h-operation mode

Reaktion der Bauteilaktivierung auf Wärmegewinne und -verluste zu erkennen. Auch in diesem Betriebsfall werden rund 90 % der Heiz- und Kühlenergie an den Prüfraum abgegeben. Die Wärmeübertragung an den darüber liegenden Raum liegt also in vergleichbarer Größenordnung wie für die Bauteilaktivierung in Mittellage.

Versuch 3: Kombination von oberflächennaher und Bauteilaktivierung in Mittellage

Die dritte Messung wird für eine Kombination durchgeführt. Die Vorlauftemperatur der Bauteilaktivierung in Mittellage wird wie im ersten Versuch außentemperaturabhängig, allerdings nur in der Zeit von 20:00 bis 06:00 Uhr betrieben. Zwischen 08:00 und 18:00 Uhr wird die oberflächennahe Bauteilaktivierung mit einer konstanten Vorlauftemperatur von 30 °C im Heizfall und 16 °C im Kühlfall betrieben, wobei eine Temperaturdifferenz von 1 K zwischen Vor- und Rücklauf-temperatur als Abschaltkriterium verwendet wird.

Bild 4 zeigt einen beschleunigten, aber vergleichbaren Temperaturverlauf. In der Leistungsbilanz ist hier gut der Wechselbetrieb zwischen dem trägen und dem agilen System zu erkennen.

Versuch 4: Kombination von Kühlsegel und Bauteilaktivierung in Mittellage

Auch die vierte Messung wird für eine Kombination durchgeführt. Die Bauteilaktivierung in Mittellage wird wie im dritten Versuch betrieben. Zwischen 08:00 und 18:00 Uhr wird das Kühlsegel wie die oberflächennahe Bauteilakti-

vierung im dritten Versuch mit einer konstanten Vorlauf-temperatur von 30 °C im Heizfall und 16 °C im Kühlfall betrieben.

Bild 5 zeigt wieder einen vergleichbaren Temperaturverlauf. In der Leistungsbilanz ist gut zu erkennen, dass das Kühlsegel nur mit einem geringen Energieanteil für die Regelung betrieben wird.

6 Auswertung und Aufwandszahlen $e_{h,ce}$ und $e_{c,ce}$

Der Komfort wird gemäß EN 15251 nach dem PMV-Modell bewertet. Abweichend von dem von Kalz und Pfafferott [38] vorgestellten Algorithmus zur Evaluation von Feldmessungen wird hier die Tagesmitteltemperatur von gestern und nicht das gleitende Mittel der Außentemperatur verwendet, weil die Außenbedingungen sich im Versuch deutlich schneller ändern als im realen Gebäudebetrieb.

Bild 6 zeigt, dass in allen Versuchen der Komfortbereich gut eingehalten und die zulässige Schwankung regelungstechnisch gut ausgenutzt wird. In den Versuchen wurde aus Gründen der Reproduzierbarkeit auf eine Anpassung der Regelparameter verzichtet. In einem realen Gebäudebetrieb würden demgegenüber die Vorlauftemperaturen für den ersten, zweiten und dritten Versuch im Heizfall und für den zweiten und dritten Versuch im Kühlfall abgesenkt werden.

Werden alle Wärmeströme bilanziert, kann die Genauigkeit der Messungen aus der Energiebilanz abgeleitet werden:

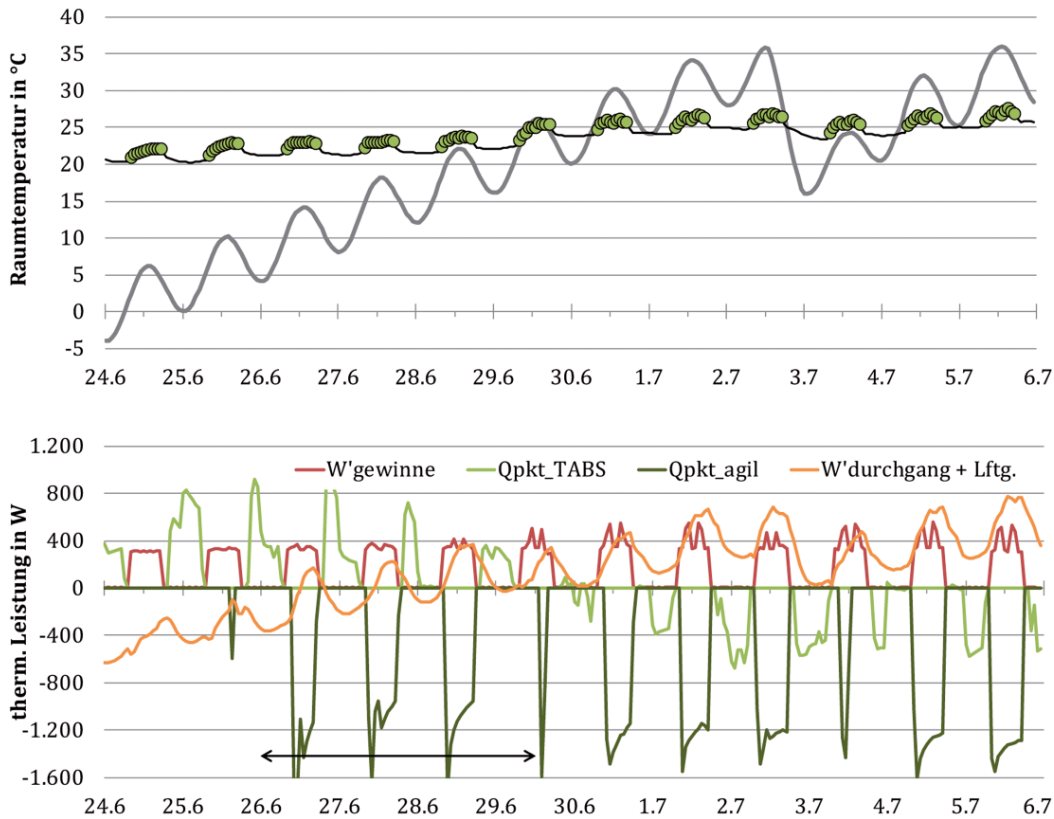


Bild 4. Kombination Bauteilaktivierung in Mittellage (nachts) und oberflächennahe Bauteilaktivierung (tags). Zwischen dem 16. und 29.6. kommt es in Folge einer markanten Störgröße zu einem provozierten Wechselbetrieb zwischen Kühlen und Heizen. Hinweis: Skalierung in der unteren Grafik angepasst

Fig. 4. Combination of concrete core (night operation) and surface near concrete conditioning (day operation). As a result of a strong disturbance, there is an alternating cooling and heating operation between 6/16 and 6/29. Note: Scaling is adjusted in the graph below

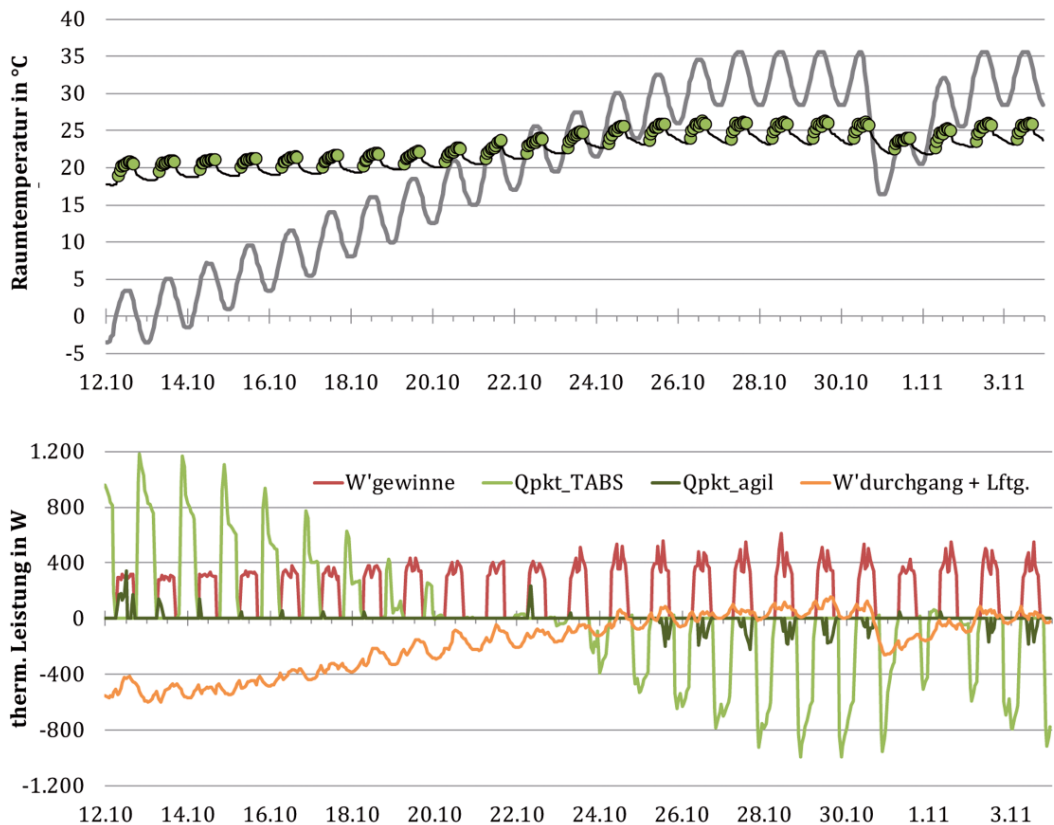


Bild 5. Kombination Bauteilaktivierung in Mittellage (nachts) und Kühlsegel (tags)

Fig. 5. Combination of concrete core conditioning (night operation) and a radiant ceiling (day operation)

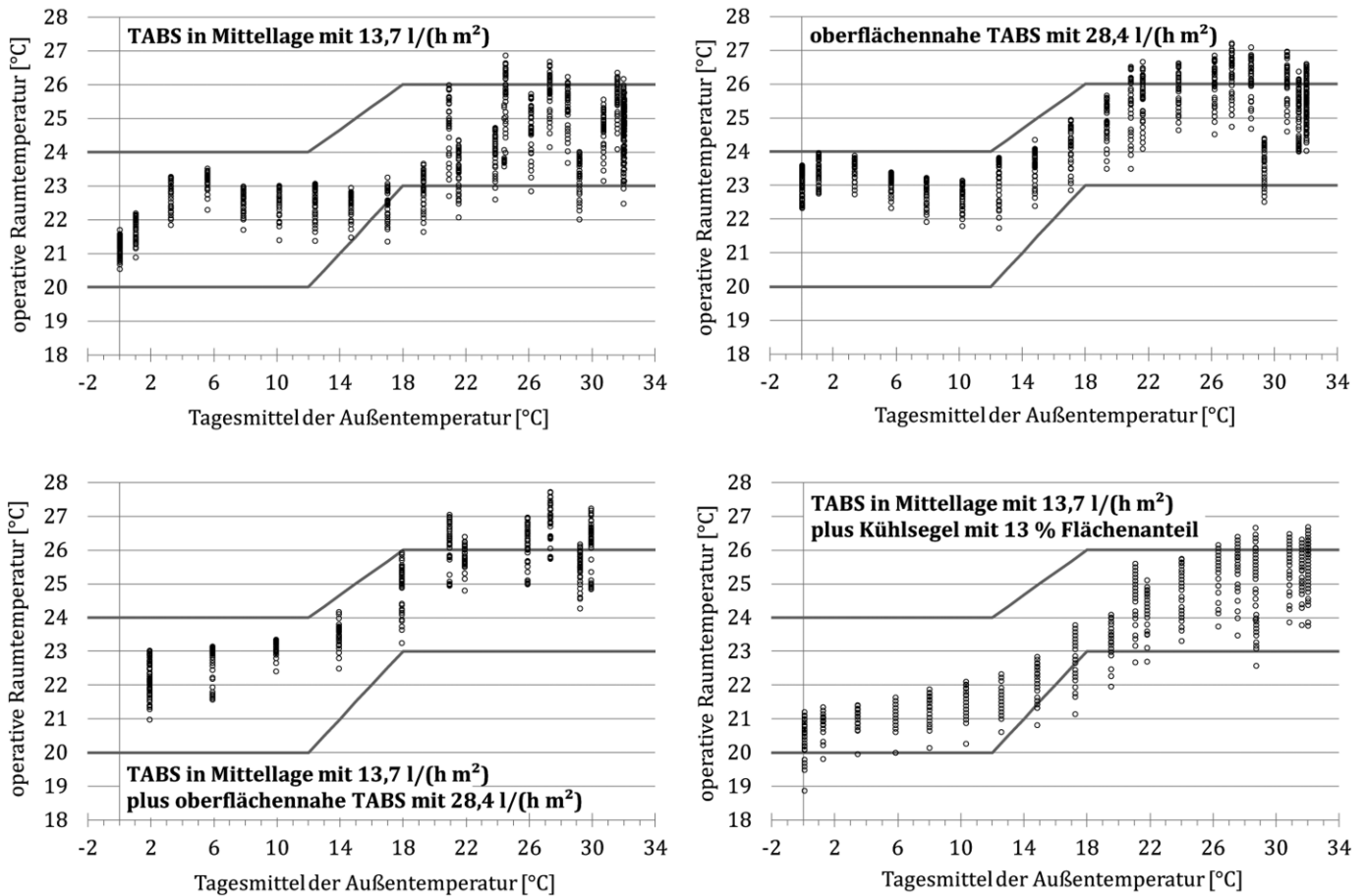


Bild 6. Thermischer Komfort mit Komfortbereich der Kategorie II
 Fig. 6. Thermal comfort chart considering the comfort range according to class II

- Der größte Fehler liegt bezogen auf die Tagesbilanz im Heizfall bei 18 % für die Bauteilaktivierung in Mittellage und im Kühlfall bei 12 % für die Kombination von oberflächennaher und Bauteilaktivierung in Mittellage.
- In der Gesamtbilanz über die gesamte Versuchsperiode liegen die Bilanzierungsfehler in jeder der vier Versuchsreihen deutlich unter 10 %.

Unter Berücksichtigung der typischen Unsicherheiten und des dynamischen Betriebsverhaltens gelten damit alle Versuchsreihen als vertrauenswürdig.

Heiz- und Kühllast sowie Nutzwärme- und -kältebedarf werden für die einzelnen Versuche mit dem Simple-Hourly-Method-Gebäudemodell nach ISO 13790 [39] unter Berücksichtigung des tatsächlich im Versuch erreichten thermischen Komforts bestimmt.

Im Vergleich von tatsächlich gemessenen Nutzwärme- und Kälteverbrauch mit dem theoretisch berechneten Nutzwärme- und -kältebedarf werden die Aufwandszahlen bestimmt. Tabelle 1 zeigt die Aufwandszahlen, die mit Hilfe der Messungen im praxisnahen Labor bestimmt wurden:

- Im Heizfall fällt die Aufwandszahl niedriger aus als im Kühlfall: $e_{h,ce} < e_{c,ce}$
- Je flexibler die Flächentemperierung auf die aktuelle Heizlast reagieren kann, desto niedriger fällt die Aufwandszahl aus: $e_{h,ce,agil} < e_{h,ce,träge}$
- Im Kühlfall ist die Bestimmung der Aufwandszahl mit größerer Unsicherheit als im Heizfall behaftet.

Tabelle 2 stellt die Aufwandszahlen aus Messung und Literatur im Vergleich gegenüber, wobei die beiden unsicheren, mit (1) und (2) gekennzeichneten Werte aus der Messdatenanalyse unberücksichtigt bleiben.

Nach DIN 18599 liegen die Aufwandszahlen für vergleichbare Systeme bei $e_{h,ce} = 1,4$ und $e_{c,ce} = 1,1$. Die tatsächlich bestimmten Aufwandszahlen liegen für den Heizfall $e_{h,ce}$ niedriger und für den Kühlfall $e_{c,ce}$ höher als in DIN 18599.

Die umfangreichere Studie von Kempkes et al. [17] differenziert stärker und nennt für die Bauteilaktivierung in Mittellage Werte für $e_{h,ce} = 1,38 \dots 1,54$ im Heizfall und für $e_{c,ce} = 1,61 \dots 1,73$ im Kühlfall und für die Kombination der Bauteilaktivierung mit einem (idealen) Zusatzsystem Werte für $e_{h,ce} = 1,15$ im Heizfall und $e_{c,ce} = 1,33 \dots 1,58$ im Kühlfall. Die Werte von Kempkes et al. können näherungsweise durch die Messung bestätigt werden.

Die von Treiber [6] vorgestellten Aufwandszahlen können rechnerisch (ohne Berücksichtigung der Wärmerückgewinnung) bestimmt und unter Berücksichtigung der Ausnutzungsgrade ($\beta_h = 0,06 \dots 0,08$ für den Heizfall und $\beta_c = 0,11 \dots 0,13$ für den Kühlfall) verglichen werden. Die gemessenen Aufwandszahlen liegen mit Werten zwischen 0,8 und 1,8 dabei deutlich unter den von Treiber angegebenen Werten zwischen 1,1 und 2,4. Auf eine gesonderte Vorstellung der einzelnen Werte wird hier verzichtet, weil das Verfahren zwar noch Anwendung in DIN 4701-10 (für Wohngebäude), nicht aber in DIN 18599 findet.

Tabelle 1. Gemessene Aufwandszahlen $e_{h,ce}$ und $e_{c,ce}$
Table 1. Energy expenditure factors $e_{h,ce}$ and $e_{c,ce}$ from measurement

	TABS in Mittellage	oberflächennahe TABS	TABS in Mittellage + oberflächennahe TABS	TABS in Mittellage + Kühlsegel	
Versuch	672	552	288 ^(*)	552	Stunden
Komfort	21–26	22–27	21–27	20–26	°C
$Q_{h,mess}$	74,3	60,5	17,1	53,8	kWh, gemessen
$Q_{c,mess}$	-93,7	-109,1	-51,8	-40,1	kWh, gemessen
$Q_{h,sim}$	55,8	50,1	10,0	43,6	kWh, ideal
$Q_{c,sim}$	-62,8	-67,4	-48,7	-28,3	kWh, ideal
$e_{h,ce}$	1,33	1,21	1,71 ⁽²⁾	1,24	-
$e_{c,ce}$	1,19	1,62 ⁽¹⁾	1,06	1,42 ⁽³⁾	-

(*) Alle Werte werden auf den Zeitraum ohne gleichzeitigen Heiz- und Kühlbetrieb bezogen.

(1) $e_{c,ce}$ für die oberflächennahe Bauteilaktivierung ist unsicher (kursiv).

(2) $e_{h,ce}$ für die Kombination der beiden Systeme zur Bauteilaktivierung wird aufgrund der wenigen Messdaten im Heizbetrieb verworfen (durchgestrichen).

(3) $e_{c,ce}$ für die Bauteilaktivierung in Kombination mit einem Kühlsegel erscheint zu hoch und wenig plausibel. Da aber weder in der Messung des Nutzkälteverbrauchs $Q_{c,mess}$ noch der Berechnung des Nutzkältebedarfs $Q_{c,ideal}$ Fehler identifiziert werden konnten, wird der Wert nicht ausgeschlossen, aber als Ausreißer behandelt (kursiv).

Tabelle 2. Gemessene Aufwandszahlen $e_{h,ce}$ und $e_{c,ce}$ im Vergleich mit Literaturwerten
Table 2. Measured energy expenditure factors $e_{h,ce}$ and $e_{c,ce}$ in comparison to literature values

	Bauteilaktivierung ohne Zusatzsystem		Bauteilaktivierung mit Zusatzsystem	
	$e_{h,ce}$	$e_{c,ce}$	$e_{h,ce}$	$e_{c,ce}$
Messung	1,2 .. 1,3	1,5	1,2	1,1 .. 1,4
DIN V 18599	1,4	1,1	1,4	1,1
Literatur ^(#)	1,4 .. 1,5	1,6 .. 1,7	1,15	1,3 .. 1,6

(#) Literaturwerte aus Kempkes et al. [17], verallgemeinert.

7 Anwendung der Aufwandszahlen $e_{h,ce}$ und $e_{c,ce}$ in der Planungspraxis

Das EnEV-Nachweisverfahren nach DIN 18599 ist trotz der sehr detaillierten, monatsweisen Berechnung der Energieaufwände für die Anlagenplanung kaum nutzbar [40]. In der Planungspraxis wird daher entweder auf eigene Praxiserfahrungen, Auslegungshinweise und Produktdatenblätter bekannter Systemanbieter zurückgegriffen oder eine numerische Gebäudesimulation (mit entsprechenden anlagentechnischen Komponenten) objektbezogen durchgeführt.

Die Aufwandszahlen $e_{h,ce}$ und $e_{c,ce}$ können dabei für eine Plausibilitätsprüfung genutzt werden, wenn sie ingenieurmäßig aus den verfügbaren Informationen (z. B. mit Hilfe der Wertetabellen in DIN 18599-5) objektbezogen abgeschätzt werden.

Da DIN 4701-10 in erster Linie auf Wohngebäude und hier nur auf den Winterfall angewendet wird, ist das dort beschriebene Verfahren nur eingeschränkt auf die Bauteilaktivierung anwendbar. Zudem erschwert der Bezug auf den so genannten Referenzheizenergiebedarf und die Berücksichtigung der gesamten Anlagentechnik in einer einzigen Kennzahl die separate Anwendung auf die Bauteilaktivierung.

Unabhängig vom EnEV-Nachweisverfahren wird in der Planungspraxis oft der Gesamtendenergieaufwand $q_{h,f}$ und $q_{c,f}$ [$\text{kWh}_{\text{Endenergie}}/\text{m}^2\text{a}$] ausgehend vom Nutzwärme- $q_{h,b}$ und -kältebedarf $q_{c,b}$ [$\text{kWh}_{\text{Nutzenergie}}/\text{m}^2\text{a}$] mit Aufwandszahlen für Übergabe (ce), Verteilung (d), Speicherung (s) und Erzeugung (gen) bestimmt. So können einerseits einzelne Umwandlungsschritte optimiert und andererseits Alternativtechnologien im Gesamtsystem bewertet werden:

$$q_{h,f} = q_{h,b} \cdot e_{h,ce} \cdot e_{h,d} \cdot e_{h,s} \cdot e_{h,gen} \quad \text{für den Heizfall}$$

$$q_{c,f} = q_{c,b} \cdot e_{c,ce} \cdot e_{c,d} \cdot e_{c,s} \cdot e_{c,gen} \quad \text{für den Kühlfall}$$

Da die Bauteilaktivierung mit verhältnismäßig hohen Übergabeverlusten verbunden ist, sind diese Konzepte dann besonders erfolgreich, wenn ein hoher Anteil an Umweltenergie genutzt wird. Werden die einzelnen Energiebedarfe getrennt für elektrische und thermische Energie ausgewiesen, kann ein Projekt mit den entsprechenden Primärenergiefaktoren im Gesamtkonzept bewertet werden. Viele erfolgreiche Projekte zeigen, dass Gebäude mit Bauteilaktivierung und einem darauf abgestimmten Anlagenkonzept einen sehr geringen Primärenergiebedarf aufweisen, z.B. [11], [16], [38], [41] oder [42].

Die in der vorliegenden Studie messtechnisch bestimmten Aufwandszahlen für die Nutzenübergabe e_{ce} liefern hierfür wichtige Eingangsparameter zur Evaluation der gesamten Anlagentechnik.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Mit kalorischen Messungen im praxisnahen Raumklimalabor ist es möglich

- einzelne Übergabesysteme oder Kombinationen mehrerer Übergabesysteme
- für verschiedene bauphysikalische Randbedingungen,
- für typische Nutzerbedingungen und
- für angepasste Regelstrategien
- unter dynamischen Verhältnissen

zu evaluieren. So können – neben der messtechnischen Leistungsbestimmung – auch Übergabeverluste unter realitätsnahen Betriebsbedingungen bestimmt werden.

Werden die Messungen mit dem berechneten Nutzwärme- und -kältebedarf bewertet, können die Aufwandszahlen $e_{h,ce}$ und $e_{c,ce}$ bestimmt werden. Für verschiedene Systeme wurden Aufwandszahlen für die Nutzenübergabe der Bauteilaktivierung von 1,2 bis 1,5 bestimmt. Diese Werte liegen im Bereich anderer Studien, in denen Aufwandszahlen mit einer numerischen Gebäude- und Anlagensimulation bestimmt wurden. Die Spannweite dieser Werte zeigt deutlich, dass eine detaillierte Bewertung erforderlich ist, um energetisch und wirtschaftlich günstige Anlagenkonzepte realisieren zu können.

Die dynamische Messung der geplanten Systeme einschließlich der Regelstrategie in praxisnaher Umgebung und unter wechselnden Klimabedingungen gibt wichtige Hinweise auf den künftigen Energieverbrauch und mögliche Optimierungsansätze. Dabei werden Komfortanforderung, spezifischer Nutzwärme- und -kältebedarf sowie Auslastung als wesentliche Einflussgrößen auf die Aufwandszahl variiert.

Ausblick

Speicherbasierte Nutzenübergabesysteme reagieren nur sehr zeitverzögert auf Laständerungen. Die Folge ist eine größere Schwankungsbreite in den Raumtemperaturen. Die (tägliche) Schwankungsbreite darf dabei den vereinbarten Komfortbereich nicht verletzen. Deshalb müssen Steuerungs- bzw. Regelalgorithmen weiterentwickelt werden, um die große Streubreite in realen Projekten verringern zu können. In der Praxis herrscht im Bereich der Betriebsführung von thermisch aktivierten Bauteilsystemen (TABS) noch große Unsicherheit [43]. Aus Sicht der Hersteller und Nutzer sind die Inbetriebnahmezeiträume viel zu lang, bis die Systeme im gewünschten Betriebszustand geführt werden. Praxisnahe Laboruntersuchungen können hier eine wichtige Rolle spielen, um die geplante Betriebsführung projektbezogen zu validieren und zu optimieren. Damit kann die Raumtemperatur besser geregelt und schließlich die Inbetriebnahme deutlich verkürzt werden.

Danksagung

Diese Studie wurde durch das Projekt PAkoGA Prädiktive Algorithmen in komplexen Systemen der Gebäudeautomation unter dem Förderkennzeichen 03FH02212 durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Programms Forschung an Fachhochschulen finanziert.

Die Autoren möchten C. Felsmann, S. Herkel, D. Jacob, D. Kalz, R. Koenigsdorff, F. Nüßle, S. Plessner, M. Schmela, W. Stahl und M. Ufheil für Hinweise und Kommentare danken.

Viele Anregungen zur Analyse der umfangreichen Labormessungen und zur Anwendung der Aufwandszahlen in der Praxis wurden während des Workshops „Freunde der Bauteilaktivierung“ am 23. und 24. Juli 2015 an der Hochschule Offenburg gemeinsam diskutiert.

Literatur

- [1] DIN EN 14240:2004-04 Lüftung von Gebäuden – Kühldecken – Prüfung und Bewertung.
- [2] DIN EN 15377:2009-02 Heizungsanlagen in Gebäuden – Planung von eingebetteten Flächenheiz- und Kühlsystemen mit Wasser als Arbeitsmedium. Teil 1: Bestimmung der Auslegungs-Heiz- bzw. Kühlleistung.
- [3] DIN EN 1264_32013-03 Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung. Teil 2: Fußbodenheizung: Prüfverfahren für die Bestimmung der Wärmeleistung unter Benutzung von Berechnungsmethoden und experimentellen Methoden.
- [4] DIN EN 1264:2009-01 Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung. Teil 5: Heiz- und Kühlflächen in Fußböden, Decken und Wänden – Bestimmung der Wärmeleistung und der Kühlleistung.
- [5] Oesterle, E., Koenigsdorff, R.: Thermische Aktivierung von Bauteilen zum Heizen und Kühlen von Gewerbebauten. HLH 50 (1999), Nr. 1, S. 22–30.
- [6] Treiber, M.: Nutzenübergabe thermoaktiver Decken. Dissertation an der Universität Stuttgart, 2007.
- [7] Koschenz, M., Lehmann, B.: Thermoaktive Bauteilsysteme tabs. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt EMPA, Zentrum für Energie und Nachhaltigkeit ZEN, Dübendorf, 2000.
- [8] Olesen, B. W., Dossi, F. C.: Neue Erkenntnisse über Regelung und Betrieb für die Betonkernaktivierung. Flächenheiz- und Kühlsysteme. HLH 56 (2005), Nr. 1, S. 29–34.
- [9] Glück, B.: Thermische Bauteilaktivierung. HLH 50 (1999), Nr. 5, S. 40–46.
- [10] LowEx:MONITOR: Exergetisches Monitoring für Gebäude mit Erdwärmenutzung. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, 2012. DOI:10.2314/GBV:78258182X (freier Zugriff).
- [11] Voss, K., Herkel, S., Kalz, D.: Performance von Gebäuden: Kriterien, Konzepte, Erfahrungen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2016.
- [12] Kalz, D.: Heating and Cooling Concepts employing Environmental Energy and Thermo-Active Building Systems for Low-Energy Buildings. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2010.
- [13] Kalz, D., Pfafferott, J.: Energieeffiziente Kühlung und thermischer Raumkomfort: Vergleichende Analyse von acht europäischen Nichtwohngebäuden (Teil 1). Bauphysik 34 (2012), H. 6, S. 256–267. DOI: 10.1002/bapi.201200037
- [14] Pfafferott, J., Kalz, D.: Energieeffiziente Kühlung und thermischer Raumkomfort: Simulationsbasierte Evaluierung von Kühlkonzepten in verschiedenen europäischen Klimazonen (Teil 2). Bauphysik 35 (2013), H. 1, S. 51–56. DOI: 10.1002/bapi.201310046
- [15] Kalz, D., Pfafferott, J., Herkel, S., Sonntag, M.: Energieeffiziente Kühlung und Thermischer Raumkomfort: Erfahrungen aus dem Langzeitmonitoring von 42 Bürogebäuden. Bauphysik 36 (2014), H. 5, S. 221–235. DOI: 10.1002/bapi.201410030
- [16] Pfafferott, J., Kalz, D., Koenigsdorff, R.: Bauteilaktivierung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2015.
- [17] Kempkes, Ch., Schalk, K., Felsmann, C., Oschatz, B., Günther, M.: Energetische Bewertung thermisch aktivierter Bauteile. Dynamisch thermische Simulation, messtechnische Validation, vereinfachte Bewertungsansätze. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2009.
- [18] EnEV 2014: Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden. Energieeinsparverordnung vom 24. Juli 2007 (BGBl. I S. 1519), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 24. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1789) geändert worden ist.

- [19] DIN V 4701:2003-08 Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen. Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung.
- [20] DIN V 18599:2011-12 Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung. Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen.
- [21] DIN V 18599:2011-12 Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung. Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger.
- [22] DIN V 18599:2011-12 Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung. Teil 5: Endenergiebedarf von Heizsystemen.
- [23] DIN V 18599:2011-12 Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung. Teil 7: Endenergiebedarf von Raumluftechnik- und Klimakältesystemen für den Nichtwohnungsbau.
- [24] Pfafferoth, J., Frietsch, M., Lang, T., Schmelas, M.: Kalorische Messungen an thermisch aktivierten Bauteilsystemen. In: Messtechnik im Bauwesen 2015.
- [25] Bauer, M.: Methode zur Berechnung und Bewertung des Energieaufwandes für die Nutzenübergabe bei Warmwasserheizungen. Dissertation an der Universität Stuttgart, IKE Lehrstuhl für Heiz- und Raumluftechnik, 1999.
- [26] Beck, C.: Thermisches Verhalten von Kühldecken. Dissertation an der Universität Stuttgart, 2002.
- [27] Schmidt, M. et al.: Energiesparende Raumklimatechnik für die regenerative Wärme- und Kälteerzeugung. INNOREG-Abschlussbericht HLK 03-05, Universität Stuttgart, 2005.
- [28] Burkard, T.: Das Nutzenübergabeverhalten von Systemen zur Bauteilaktivierung. Band 1 der Abert-Tichelmann-Reihe der VDI-Gesellschaft Technische Gebäudeausrüstung, 2003.
- [29] DIN EN 15251:2007-04 Eingangsparmeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumlufqualität, Temperatur, Licht und Akustik.
- [30] Schnieders, J.: Simulationen zur Effizienz der Wärmeübergabe. Protokollband Nr. 28, Wärmeübergabe- und Verteilverluste im Passivhaus, Darmstadt, 2004.
- [31] Koenigsdorff, R. et al.: Entwicklung eines Entscheidungs- und Auslegungswerkzeuges für die energieeffiziente Heizung und Kühlung durch bauteilintegrierte und geothermische Gebäudetemperierung. Abschlussbericht 18343 der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Hochschule Biberach, 2004.
- [32] Hörner, M., Knissel, J.: Teilenergiekennwerte von Nicht-Wohngebäuden – Methodische Grundlagen, empirische Erhebungen und systematische Analyse. Institut Wohnen und Umwelt, 2014.
- [33] Hörner, M., Jedek, C., Cischinsky, H.: Die Diskrepanz zwischen Energiebedarf und -verbrauch bei Nichtwohngebäuden – ein empirischer Ansatz. Bauphysik 37 (2015), H. 5, S. 284–295. DOI: 10.1002/bapi.201510033
- [34] Plesser, S.: Aktive Funktionsbeschreibungen zur Planung und Überwachung des Betriebs von Gebäuden und Anlagen. Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig, 2013.
- [35] Nüßle, F., Pfafferoth, J.: Kühldeckensystem mit Aktivierung der Speichermasse der Betondecke. Bauphysik 33 (2011), H. 1, S. 43–48. DOI: 10.1002/bapi.201110005
- [36] Tödtli, J.: TABS Control. Steuerung und Regelung von thermoaktiven Bauteilsystemen – Handbuch für Planung, Auslegung und Betrieb. Zürich: Faktor-Verlag, 2009.
- [37] Tödtli, J., Gwerder, M., Renggli, F., Güntensperger, W., Lehmann, B., Dorer, V., Hildebrand, K.: Regelung und Steuerung von thermoaktiven Bauteilsystemen (TABS). Bauphysik 31 (2009), H. 5, S.319–325. DOI: 10.1002/bapi.200910042
- [38] Kalz, D., Pfafferoth, J.: Thermal Comfort and Energy-Efficient cooling of non-residential buildings. Springer, 2014.
- [39] DIN EN ISO 13790:2008-09 Energieeffizienz von Gebäuden – Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung.
- [40] Bundesamt für Bauwesen und Raumentwicklung (BBR): Simulationsprogramme und sonstige Verfahren als Nachweisinstrumente für die EnEV. Online-Publikation 10.08.17.7–10.18, 2011.
- [41] Bockelmann, F., Fisch, N. M., Kipry, H.: Erdwärme für Bürogebäude nutzen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2011.
- [42] Bockelmann, F., Plesser, S., Soldaty, H.: Advanced system design and operation of GEOTABS buildings. Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations REHVA, Brüssel, 2013.
- [43] Kalz, D. E., Pfafferoth, J., Koenigsdorff, R.: Betriebserfahrungen mit Thermoaktiven Bauteilsystemen. Bauphysik 34 (2012), H. 2, S. 66–75. DOI: 10.1002/bapi.201200011

Autoren dieses Beitrages:

Prof. Dr.-Ing. Jens Pfafferoth
 Dipl.-Ing. (FH) Sascha Himmelsbach
 M.Sc. Tobias Lang
 Hochschule Offenburg
 Institut für Energiesystemtechnik INES
 Badstraße 24, 77652 Offenburg,

B.Eng. Mario Frietsch
 SEF Ingenieurgesellschaft mbH
 Ohiostraße 13, 76149 Karlsruhe

Firmenprofil

Die solares bauen GmbH mit Hauptsitz in Freiburg im Breisgau und Niederlassungen in Berlin und Strasbourg (Frankreich) wurde 1999 aus dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE) heraus gegründet.

Im Sinne einer integralen Planung bearbeiten wir die Arbeitsgebiete Energie- und Haustechnik, Wärmeschutz, Raumklima und Tageslichtnutzung als Gesamtaufgabe.

Unser Ziel ist es Gebäude und Energieversorgung exakt aufeinander abzustimmen, um so ein kostenoptimales Ergebnis sowohl hinsichtlich der Investitions- als auch der Betriebskosten zu erzielen; ganz nach unserem Motto.

Besonders wichtig ist uns neben einem guten Konzept vor allem die Umsetzung. Aus diesem Grund werden unsere Projekte in aller Regel vollständig durch uns geplant und auch über weite Entfernungen im Rahmen der Ausführung überwacht (Bauleitung).

Mit derzeit 52 Mitarbeitern bearbeiten wir u.a. folgendes Leistungsspektrum:

Bauen & Wärmeschutz

Beratung und Erstellung von Wärmeschutznachweisen (z.B. EnergieEinsparverordnung (EnEV) oder Passivhausnachweis (PHPP)) und Erstellung von bauphysikalischen Berechnungen. Wir beraten zu allen energetisch relevanten Komponenten wie: Verglasungen, Fassaden, Dämmstoffe, Luftdichtheit, Wärmebrücken, etc. Zur Qualitätssicherung führen wir IR-Thermografie sowie Blower Door Messungen durch.

TGA - Planung & Bauleitung

Für die Bereiche Heizung, Lüftung, Sanitär und MSR bieten wir alle Leistungsphasen nach HOAI §55. Die besonderen Leistungen nach HOAI (Wirtschaftlichkeitsberechnung, Systemanalyse, Energiekonzept, etc.) bilden dabei eines unserer wichtigsten Planungsinstrumente.

Kühlen & Lüften

Wir berechnen das dynamische Verhalten von Gebäuden und beantworten Fragen wie: Kann auf eine externe Abschattung verzichtet werden? In welchem Umfang ist eine künstliche Klimatisierung erforderlich? Wie entwickelt sich das Raumklima (Temperatur, Feuchte)?

Licht & Sonne

Mit Hilfe von Computersimulationen berechnen wir die Tageslichtverhältnisse in Gebäuden und erstellen Verschattungsanalysen. Die Simulationen ermöglichen detaillierte Aussagen über die erforderlichen Glasflächen sowie über deren optimale Anordnung.

Kosten-Nutzen-Optimierung

Konzeption eines wirtschaftlich optimierten Gebäudekonzepts in Zusammenarbeit mit Architekt, Bauherrn und weiteren Fachplanern. Hierzu bewerten wir die Vielzahl von Energiesparsystemen (Solaranlage, Dämmung, Verglasung, Lüftung, Blockheizkraftwerk, etc.) nach deren Investitionskosten sowie der zu erwartenden Energieeinsparung.

Kontakt: solares bauen GmbH, Ingenieurgesellschaft für Energieplanung
www.solares-bauen.de
info@solares-bauen.de
Tel: 0761 - 45 688 30



Europäischer Solarpreis



Architecture + Energy Award



Global Energy Award



PROM des Jahres



Deutscher Fassadenbaupreis



ZDF Energiesparmeister



Deutscher Klimaschutzpreis

Anlagenaufwandszahlen für die Bauteilaktivierung in Abhängigkeit des Regelkonzeptes

Welche Betriebsführungsstrategie passt zu welchem Gebäude?

In der Planungs- und Betriebspraxis herrscht im Bereich der Betriebsführung von thermisch aktivierten Bauteilsystemen und insbesondere der thermisch trägen Bauteilaktivierung noch große Unsicherheit. Trotz einer weiten Verbreitung dieser Systeme im Neubau von Nichtwohngebäuden hat sich bis heute keine einheitliche Betriebsführungsstrategie durchgesetzt. Vielmehr kritisieren Bauherren und Nutzer regelmäßig zu hohe bzw. niedrige Raumtemperaturen in den Übergangsjahreszeiten und bei Wetterwechsel sowie generell eine mangelhafte Regelbarkeit. Demgegenüber weisen Monitoringprojekte immer wieder einen hohen thermischen Komfort in diesen Gebäuden nach. Offensichtlich unterscheiden sich hier subjektiv empfundene Behaglichkeit und objektiv gemessener Komfort. Gleichzeitig sind Heiz- und Kühlkonzepte mit Flächentemperierung dann besonders energieeffizient, wenn das Regelkonzept auf deren thermische Trägheit angepasst ist. Eine gute Regelung gewährleistet also einen hohen thermischen Komfort und sorgt für einen möglichst niedrigen Energieeinsatz. Das Rechenverfahren mit Anlagenaufwandszahlen (in Anlehnung an DIN V 18599) bietet eine gute Möglichkeit, Anlagenkonzepte inklusive deren Betriebsführungsstrategie zu bewerten. Damit ist es möglich, eine auf das Gebäude angepasste Betriebsführungsstrategie für die Bauteilaktivierung zu finden und einheitlich zu bewerten.

Energy performance factors for thermally activated building systems considering the control strategy. *There is still great uncertainty in the field of operation management of thermally activated building systems and, in particular, the thermally inert concrete core conditioning. Despite the widespread use of these systems in new non-residential buildings, a uniform management strategy has not yet been established. On the contrary, builders and users regularly criticize too high or low room temperatures during the transitional seasons and in the event of a change of weather or, in general, a lack of controllability. On the other hand, monitoring projects often show high thermal comfort in these buildings. Obviously, subjectively perceived comfort and objectively measured comfort differ here. At the same time, radiant heating and cooling concepts are energy-efficient when the control concept is adapted to their thermal inertia. Good control therefore ensures high thermal comfort and results in the lowest possible energy consumption. The calculation method based on energy performance factors (in accordance with DIN V 18599) offers a good opportunity to evaluate plant concepts, including their operational management strategy. This makes it possible to adapt the operation strategy for radiant heating and cooling concepts to a specific building and to evaluate it uniformly.*

1 Allgemeines

Die kritische Auseinandersetzung mit der thermischen Speicherfähigkeit von Bauteilen im Zusammenhang mit dem energieeffizienten Bauen wurde stark durch die Arbeiten von *Hauser* [1] und *Gertis* [2] bestimmt und lieferte schließlich die theoretischen Grundlagen für den Einsatz von thermisch aktivierten Bauteilsystemen (TABS) und insbesondere der thermisch trägen Bauteilaktivierung. Das Gebäude von DOW Europe in Horgen [3] wurde ab 1988 als erstes Gebäude mit Bauteilaktivierung von *Meierhans* [4] geplant und 1991 in Betrieb genommen. Seither hat sich die Bauteilaktivierung technisch rasant weiterentwickelt und verbreitet. Stellvertretend für die vielen technischen, produktneutralen Informationen zur Bauteilaktivierung (neben einer Vielzahl an Fachveröffentlichungen) seien hier die grundlegenden Arbeiten von *Lehmann* und *Koschenz* [5] aus den späten 1990er Jahren und die Systemanalyse von *Pfafferott* und *Kalz* [6] von 2007 genannt. Die Vorteile der Bauteilaktivierung in energieeffizienten Gebäuden haben zu ihrer Marktverbreitung geführt:

- Der reduzierte Heiz- und Kühlenergiebedarf neuer Bürogebäude bildet die Grundlage für den Einsatz von Energiekonzepten mit limitierter Übergabeleistung.
- Der Trend zu Fast-Nullenergiegebäuden [7] fördert den vermehrten Einsatz von Umweltenergie zum Heizen und Kühlen. Die Bauteilaktivierung ist aufgrund der geringen Über- bzw. Untertemperaturen hier in Kombination mit energieeffizienten erdreichgekoppelten (reversiblen) Wärmepumpen als Übergabesystem besonders gut geeignet.
- Die Bauteilaktivierung bietet eine kostengünstige und architektonisch ansprechende Alternative zu konventionellen Klimasystemen.
- Die ausgeglichene Raumtemperatur in Gebäuden mit Bauteilaktivierung liefert einen hohen thermischen Komfort und führt zu einer hohen Nutzerzufriedenheit.

Mit der zunehmenden Verbreitung der Bauteilaktivierung konnten im Rahmen der nationalen und europäischen Begleitforschung viele Gebäude mit Flächentemperiersystemen messtechnisch begleitet und detailliert evaluiert werden. Die Veröffentlichungen von *Voss et al.* [8], *Bockelmann et al.* [9] und *Pfafferott et al.* [10] aus den Jahren 2006, 2011 und 2015 stellen viele erfolgreiche Projekte vergleichend vor. Eindrucksvoll weisen diese umfangrei-

chen Arbeiten nach, dass Projekte dann erfolgreich sind, wenn sie integral geplant wurden.

Mit dem Einsatz der Bauteilaktivierung stellt sich gleichzeitig die Frage nach der Betriebsführung. Obwohl es sich bei der thermisch trägen Bauteilaktivierung aus regelungstechnischer Sicht um ein „gutmütiges“ Streckenverhalten handelt, machen die großen Zeitkonstanten eine Regelung mit den in der Gebäudetechnik üblichen Verfahren unmöglich. Viele Autoren haben auf unterschiedliche Weise nachgewiesen, dass eine Bauteilaktivierung eher gesteuert als geregelt werden muss, weil die Rückkopplung der Messgröße „Raumtemperatur“ eine inakzeptabel große Zeitverzögerung hat und in der praktischen Umsetzung daher zu einem ungewollten Wechsel zwischen Heiz- und Kühlbetrieb führt. Vor diesem Hintergrund haben sich unterschiedliche Betriebsführungsstrategien entwickelt:

- Aus den Erfahrungen mit energieeffizienten, integral geplanten Gebäuden hat sich in den 1990er Jahren die Idee des isothermen Gebäudes abgeleitet. Durch Wärmeausgleich innerhalb des Gebäudes (und Nutzung saisonaler Speicher) erschien es möglich, ganzjährig ein weitgehend ausgeglichenes Raumklima bereitzustellen. Die als Selbstregeleffekt beschriebene Wärmeübertragung bei kleinen Temperaturdifferenzen zwischen Raumluft und Übergabesystem geht allerdings mit einem verhältnismäßig hohen Energieverbrauch für den Transport des Wärmeträgers einher. Zudem ist eine (aktive) Beeinflussung des Raumklimas damit nur eingeschränkt möglich.
- *Olesen* [11] hat ab den 1990er Jahren die Energieeffizienz des Gesamtsystems, ausgehend von der Wärme- und Kältebereitstellung über die -verteilung bis hin zur -übergabe, bewertet und schließlich einen Vorschlag zur Außentemperaturgeführten Vorlauftemperaturregelung unterbreitet. Da *Olesen* einen positiven Einfluss der prädiktiven Regelung nicht nachweisen konnte, nutzt dieser Algorithmus das gleitende Mittel der Außentemperatur als Eingangsgröße für die Steuerung der Vorlauftemperatur.
- *Tödli et al.* haben diesen Ansatz weiterentwickelt und berücksichtigen bei Auslegung und Betrieb neben der Unsicherheit der Wärmequellen [12] auch die Netztopologie [13] und die Betriebsweise der Pumpen in der Verteilung [14]. Auf Grundlage einer umfangreichen Simulationsstudie und Laborversuchen werden die Effizienzvorteile der vorgeschlagenen Betriebsführungsstrategie nachgewiesen. Das vorgestellte Auslegungstool *TABSdesign* [16] ist seit dem Jahr 2009 frei verfügbar und in der Planung leicht anwendbar.
- Die Veröffentlichungen zu diversen TABS-Betriebsführungsstrategien haben in den vergangenen Jahren enorm zugenommen. Die Autoren vergleichen die von ihnen vorgeschlagenen Algorithmen dabei meist auf Basis einer Simulationsstudie mit den bekannten, veröffentlichten Algorithmen. Eine sehr fundierte Analyse (Literaturstudie, Monitoringkampagnen und kombinierte Anlagen- und Gebäudesimulation) legte *Kalz* [17] im Jahr 2010 vor und schlägt eine praktikable Kombination konventioneller Regel- und Steueralgorithmen vor.
- Werden die Arbeiten von *Kalz* und das Planungswerkzeug *TABSdesign* zusammengeführt, kann ein sehr ro-

buster Algorithmus entwickelt werden, der allein mit konventionellen Methoden eine fast-optimale Betriebsführung ermöglicht, wie Laborversuche aus dem Jahr 2015 belegen [18].

- *Wystrcil et al.* analysieren realisierte Projekte mit Flächentemperiersystemen sehr detailliert mit besonderem Fokus auf der hydraulischen Topologie [19], der Dimensionierung der einzelnen Anlagenkomponenten [20] und der Betriebsführung [21]. Die Ergebnisse münden in einer Bestandsaufnahme und werden – soweit möglich – in praktischen Planungshinweisen umgesetzt.
- Ein *REHVA Guidebook* zur Planung und zum energieeffizienten Betrieb von TABS-Gebäuden mit erdreichgekoppelter Wärme- und Kältebereitstellung [22] stellt Empfehlungen für die Praxis zusammen. Vergleichbare Empfehlungen werden von Systemherstellern in deren Planungshandbüchern, beispielsweise [23] und [24], gegeben und finden in der täglichen Planungspraxis breite Anwendung.
- In den vergangenen Jahren ist die Zahl von Veröffentlichungen zur modell-prädiktiven Regelung (englisch: MPC für Model Predictive Control) sprunghaft angestiegen. Immer mehr Arbeiten beschäftigen sich dabei auch mit der prädiktiven Regelung der Bauteilaktivierung. Diese Algorithmen sind sehr rechenintensiv, fehleranfällig und aufwendig in der Parametrierung. *Henze* [25] stellte bereits 2007 einen MPC-Algorithmus (hier noch zur prädiktiven Regelung von Nachtlüftungskonzepten) vor, der getrennt vom Gebäude ausgeführt werden kann und über eine Sollwertverschiebung die vorhandene Regelung beeinflusst. Die Kommunikation zwischen Gebäudeautomation vor Ort und dem MPC-Algorithmus bei einem externen Dienstleister findet über gängige Protokolle statt. Mehrere Projekte in den USA haben die Umsetzbarkeit dieses Konzeptes nachgewiesen. Damit ist es möglich, die Hürden zum Einsatz einer modell-prädiktiven Regelung durch Auslagerung an einen Experten deutlich zu senken. Die Patentierung entsprechender Algorithmen durch Systemhersteller [26] bestätigt diese Ergebnisse und lässt erwarten, dass prädiktive Algorithmen künftig verstärkt in der Gebäudeautomation ihren Einsatz finden werden.
- Eine andere Möglichkeit, den praktischen Einsatz von prädiktiven Regelalgorithmen zu vereinfachen, ist die Ableitung von einfach umsetzbaren Regeln. *Jacob* [27] legte hierzu eine simulationsbasierte Methode vor, die auch Unsicherheiten in Planung und Betrieb berücksichtigt.
- Regressionsmodelle können nicht nur Vorhersagen in der Betriebsführung berücksichtigen, sondern bieten auch eine vergleichsweise einfache Möglichkeit zur Adaption. Hierzu werden in der Literatur unterschiedliche Regressionsverfahren, unterschiedliche Modellansätze für Bauphysik und technische Gebäudeausrüstung sowie verschiedene Mechanismen zur Adaption an unsichere oder sich ändernde Randbedingungen beschrieben. Stellvertretend für diese Ansätze seien die Arbeiten von *Feldmann* [28] und *Schmelas* [29] genannt, die zudem erfolgreich im täglichen Gebäudebetrieb implementiert werden konnten, z. B. im Seminargebäude der Hochschule Offenburg [30].

Für den Gebäudeplaner sind Vor- und Nachteile der vorgeschlagenen Algorithmen schwer zu bewerten. (Und eine fundierte Literaturstudie hierzu würde den Rahmen dieser Studie bei weitem überschreiten.) Die von einzelnen Autoren dokumentierten Effizienzgewinne allein durch Anpassung der Betriebsführungsstrategie bei einem Übergang von konventionellen zu prädiktiven Methoden erscheinen oft zu hoch. Mitunter werden dabei die durch die Aufwandszahlen der Wärme- und Kälteversorgung gegebenen Grenzen deutlich überschritten. Zudem können oft hohe Effizienzgewinne allein durch eine ingenieurmäßige Kombination robuster und in der Praxis eingeführter Methoden erreicht werden. Der Effizienzvorteil neuartiger Konzepte relativiert sich damit – ganz abgesehen vom Implementierungs- und Wartungsaufwand komplexer Betriebsführungsstrategien.

Im Planungs- und Betriebsalltag stellt sich die Frage: Welche Betriebsführungsstrategie eignet sich für ein konkretes Gebäude? Und wie kann diese Strategie in konkreten Algorithmen formuliert werden?

2 Planungs- und Inbetriebnahmepraxis

Naturgemäß liegen zur Planungs- und Inbetriebnahmepraxis [31] nur wenige belastbare Aussagen vor. Aus Stellungnahmen (z. B. bei Schulungen oder Kongressen) und dokumentierten Aussagen (z. B. in Projektberichten) lassen sich vor dem Erfahrungshorizont vieler umgesetzter TABS-Projekte jedoch folgende Aussagen mit konkretem Bezug auf die Rolle der TABS-Betriebsführung im Planungsprozess formulieren:

- Integrale Planungsansätze haben sich im Bereich des energieeffizienten Bauens weitgehend durchgesetzt und sind in vielen Planungsgruppen etabliert. Dennoch erfolgt die anlagentechnische Planung immer noch oft getrennt von der bauphysikalischen Planung. Dies hat oft Auswirkungen auf die (nicht optimale) Auslegung der Übergabesysteme.
- In Planungsgruppen ist das Zusammenwirken von Architektur/Baukörper und Anlagentechnik in TABS-Projekten bekannt und wird berücksichtigt.
- Installationsmaterial und Systemtechnik sind seit vielen Jahren technisch ausgereift. Dem TGA-Planer stehen leistungsstarke und bewährte Planungswerkzeuge und technische Informationen der Systemanbieter zur Auslegung der Bauteilaktivierung zur Verfügung. Das betrifft das gesamte TABS-System ausgehend von Wärme- und Kältebereitstellung, -verteilung bis hin zur -übergabe. Diese Planungsleitfäden werden in den meisten TABS-Projekten eingesetzt.
- Immer wieder wird in TABS-Projekten über einen möglichen Verzicht auf eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung diskutiert. Dies ist sowohl aus Sicht der limitierten Übergabeleistung einer Bauteilaktivierung als auch der sehr dynamischen Wärmeströme bei der freien Fensterlüftung sehr problematisch.
- In TABS-Projekten, in denen eine Anlagen- und Gebäudesimulation durchgeführt wird, werden die (tägliche) Schwankungsbreite der Raumtemperaturen und der vereinbarte Komfortbereich berücksichtigt, um den Selbstregeleffekt der Bauteilaktivierung effektiv ausnutzen zu können.

- In TABS-Projekten, in denen auf einfache Auslegungswerkzeuge zurückgegriffen wird, wird zwar oft die Tagesenergiebilanz für den Winter- bzw. Sommer-Auslegungstag (zumindest überschlagsweise) berücksichtigt, die Übergabeleistung aber anhand einer (abgeschätzten) Raumkühllast bestimmt.
- Volumenströme, Vorlauftemperaturen (inkl. deren Regelung) und erwartete Temperaturdifferenzen zwischen Vor- und Rücklauf werden grundsätzlich anhand der Planungsunterlagen bekannter Systemanbieter festgelegt und im Planungsverlauf mit dem MSR-Techniker abgestimmt.
- Die Netztopologie entwickelt sich grundsätzlich aus der mit dem Architekten abgestimmten Gebäudestruktur und berücksichtigt nicht immer die spätere Betriebsführung. Nur selten wird daher die Netztopologie vereinfacht.
- Obwohl der Grundsatz „Keep it simple!“ in vielen Projekten verfolgt wird, fallen gerade Bereitstellungssysteme und die Hauptverteilung oft zu komplex aus. Zu selten wird berücksichtigt, dass eine angepasste Betriebsführung unter Ausnutzung der thermischen Trägheit das hydraulische System deutlich vereinfachen kann.
- Während hydraulischer Abgleich und zonenweise Regelung dank ausgereifter Systemtechnik in TABS-Projekten etabliert ist, wird der Dimensionierung von Verteilung und Pumpe(n) nur wenig Aufmerksamkeit gewidmet.
- Der Einsatz von kombinierten Übergabesystemen führt gelegentlich zur Wahl eines zu hohen (im Heizfall) bzw. niedrigen (im Kühlfall) Vorlauftemperaturniveau, was wiederum in einer schlechteren Effizienz der Energiebereitstellung resultiert. Hierzu gehört in erster Linie die Kombination einer thermisch trägen Bauteilaktivierung mit oberflächennahen Systemen und/oder mit einer raumluftechnischen Anlage.
- Ebenso sind in der Planung Sondernutzungsbereiche gesondert zu behandeln. Hierzu gehören neben Kantinen oder Seminarräumen insbesondere auch Server-Räume. Aber auch Zonen mit höheren Energiebedarfen (z. B. Eckräume, Erdgeschoss oder Dachgeschoss) werden mitunter nicht gesondert geplant oder betrieben.
- Aus Sicht der Hersteller und Nutzer sind die Inbetriebnahmezeiträume viel zu lang, bis die Systeme im gewünschten Betriebszustand geführt werden. Heiz- und Kühlkurven werden durch Personal vor Ort oder den TABS-Systemanbieter über mindestens ein Jahr und oft auch über mehrere Jahre immer wieder angepasst, um den thermischen Komfort im Gebäude zu gewährleisten. Ein optimaler Betrieb des Gesamtsystems wird dabei meist nicht (mehr) berücksichtigt.
- Die Inbetriebnahme orientiert sich in den meisten Projekten an den Vorgaben der DIN EN 12599 [32] (oder vergleichbar), berücksichtigt dabei aber selten die Möglichkeiten, die sich aus dem Gebäudemonitoring [33] ergeben.

Diese Liste ist nicht vollständig und beleuchtet mit den Worten „oft“, „viel“, „selten“ oder „grundsätzlich“ die Ingenieurspraxis nur schlaglichtartig. Dennoch gibt diese

Liste Hinweise darauf, wie ein praxistauglicher Leitfaden für die passende Betriebsführungsstrategie gestaltet werden kann.

3 Gebäudebetrieb in der Praxis

In der Praxis herrscht im Bereich der Betriebsführung von thermisch aktivierten Bauteilsystemen (TABS) noch große Unsicherheit.

Viele Arbeitsgruppen beschäftigen sich seit Jahrzehnten mit wechselndem Schwerpunkt wissenschaftlich mit den Fragen der Betriebsführung. In den 2000er Jahren gaben mehrere Forschungsinitiativen der modellbasierten Betriebsanalyse einen starken Impuls. Einen kurzen Einblick in die Arbeiten aus dieser Zeit gibt die Dokumentation eines Statusseminars aus dem Jahr 2006 [34]. Diese Arbeiten wurden seitdem fortgeführt und sind heute in Systemen der Gebäudeautomation sowohl bei den Marktführern als auch spezialisierten Anbietern marktvföhrbar. Damit stehen die Werkzeuge von der einfachen, grafisch aufbereiteten Betriebsanalyse über die automatische Fehlererkennung bis hin zur laufenden Betriebsoptimierung in neuen und existierenden Gebäuden grundsätzlich zur Verfügung [35].

Während in Pilot- und Leuchtturmprojekten die Einsatzfähigkeit und die Nützlichkeit dieser Methoden demonstriert werden konnte, fehlt bis heute aber deren breite Anwendung. Die Gründe dafür sind vielfältig, wobei häufig die Wirtschaftlichkeit einer Optimierung des Anlagenbetriebs in Frage gestellt wird. *Neumann et al.* [36] analysieren in einer umfangreichen Arbeit nicht nur viele erfolgreiche Anwendungen der zur Verfügung stehenden Methoden. Vielmehr weisen sie nach, dass bereits ein überschaubarer Mindestdatensatz zur erfolgreichen Betriebsanalyse ausreicht und die Betriebsanalyse dann wirtschaftlich ist, wenn die Investitionskosten bei maximal 20% und der Betreuungsaufwand bei maximal 3% der Jahresenergiekosten vor der Optimierung liegen. Eine Optimierung der TABS-Betriebsführung erscheint auch vor diesem Hintergrund lohnend.

Neben den vielen erfolgreichen TABS-Gebäuden gibt es auch weniger erfolgreiche Projekte. Tatsächlich können viele Probleme in diesen Gebäuden auf Planungsfehler – auch im Bereich der MSR-Technik – zurückgeführt werden [31]. Gleichzeitig ist es auffällig, dass in den Gebäuden mit engagiertem und geschultem Personal eine höhere Nutzerzufriedenheit und ein niedrigerer Energieverbrauch festzustellen ist. Trotz leistungsstarker Komponenten der Gebäudeautomation für die Bauteilaktivierung, hängt der Betrieb also weiterhin stark vom Betreiber bzw. dem Betriebspersonal vor Ort ab.

Mit der Diskussion über einen netzdienlichen Betrieb von Gebäuden im Kontext der Energiewende stellt sich die Frage, inwieweit die Speichervfähigkeit von Übergabesystemen zur Lastglättung im Stromnetz genutzt werden kann [37]. *Klein et al.* [38] leiten auf Basis detaillierter Untersuchungen zur Netzdienlichkeit von Gebäuden eine Kennzahl ab, wenden diese Methode auf ein Beispielgebäude mit erdgekoppelter Wärmepumpe und Bauteilaktivierung an und zeigen, dass der Wärmepumpenbetrieb in diesem Gebäude im Winter weniger netzdienlich ist als im Sommer.

Eine messtechnische Evaluation, inwieweit sich Flächentemperiersysteme zum Lastmanagement eignen, hat *Nüßle* [39] vorgelegt. *Arteconia et al.* [40] bestätigen, dass die Bauteilaktivierung dem Lastmanagement als flexible Komponente zur Verfügung steht. Dabei kann die außengeführte Vorlaufregelung gut mit übergeordneten Signalen gekoppelt werden. Während der thermische Komfort durch ein übergeordnetes Lastmanagement kaum beeinflusst wird, steigt der Energieverbrauch. Selbst nach einer Optimierung von Effizienzvorteilen in der Stromversorgung gegenüber dem Mehrverbrauch in der Wärme- und Kältebereitstellung, sind nur sehr begrenzte Verbesserungen zu erwarten. In der Betriebsführung bestehender Anlagen spielen heute jedoch weder der Aspekt Netzdienlichkeit noch das Lastmanagement eine Rolle.

Direkt verbunden mit der Betriebsführung der Bauteilaktivierung ist die Betriebsführung der Wärme- und Kältebereitstellung. Die meisten TABS-Gebäude werden über erdgekoppelte Wärmepumpen – oft mit reversiblen Betrieb als Kältemaschine ausgestattet – mit Wärme und Kälte versorgt. Je nach Anlagengröße und -ausführung kommen heute hocheffiziente Verdichter zum Einsatz, die entweder leistungsgeregelt (Invertertechnologie) oder stufenweise geregelt werden und im Betrieb hohe Jahresarbeitszahlen erreichen [41]. Insbesondere größere Wärmepumpensysteme werden dabei häufig als Energiezentrale mit eigenständiger Optimierung ausgeführt. *Bockelmann* [42] analysiert den Betrieb von Großwärmepumpen, stellt optimierte Regelstrategien und deren erfolgreichen Einsatz vor und weist auf die Wichtigkeit eines Anlagenmonitorings hin, um Fehler und Mängel frühzeitig erkennen und einen energieoptimalen Anlagenbetrieb sicherstellen zu können. Die Bauteilaktivierung wird in vielen Gebäuden betrieben, ohne die Anforderungen des Wärmepumpensystems zu berücksichtigen. Die Folge ist nicht selten der Einsatz von (zu) komplexen Speicher- und Verteilsystemen.

4 Bewertung der Energieeffizienz in der Planungspraxis

Unabhängig von gesetzlichen oder normativen Festlegungen wird in der Planungspraxis oft der Gesamtenergieaufwand $q_{h,f}$ und $q_{c,f}$ [$\text{kWh}_{\text{Endenergie}}/\text{m}^2\text{a}$] ausgehend vom Nutzwärme- $q_{h,b}$ und -kältebedarf $q_{c,b}$ [$\text{kWh}_{\text{Nutzenergie}}/\text{m}^2\text{a}$] mit Aufwandszahlen für Übergabe (ce), Verteilung (d), Speicherung (s) und Erzeugung (gen) bestimmt. So können einerseits einzelne Umwandlungsschritte optimiert und andererseits Alternativtechnologien im Gesamtsystem bewertet werden:

$$q_{h,f} = q_{h,b} \cdot e_{h,ce} \cdot e_{h,d} \cdot e_{h,s} \cdot e_{h,gen} \quad \text{für den Heizfall} \quad (1)$$

$$q_{c,f} = q_{c,b} \cdot e_{c,ce} \cdot e_{c,d} \cdot e_{c,s} \cdot e_{c,gen} \quad \text{für den Kühlfall} \quad (2)$$

Werden die einzelnen Energiebedarfe getrennt für elektrische und thermische Energie ausgewiesen und mit den entsprechenden Primärenergiefaktoren bewertet, kann ein Projekt bzw. unterschiedliche Varianten bewertet und verglichen werden.

Die Aufwandszahlen werden in der Planungspraxis aus Erfahrungswerten, aus der Fachliteratur, aus Normen, aus Leitfäden und Herstellerangaben oder über eine Gebäude- und/oder Anlagensimulation bestimmt. Auch wenn

sich die Herangehensweise oder Nomenklatur von Planer zu Planer unterscheidet, bleibt die Methode grundsätzlich die gleiche. Diese ingenieurmäßige Herangehensweise ist gemäß den gängigen Normen und Richtlinien zulässig, wird aber für die gesetzlichen Nachweisverfahren in der Regel nicht eingesetzt.

Die Wechselwirkung zwischen Anlagenplanung und -betrieb ist bei TABS-Gebäuden besonders stark ausgeprägt. Jede der einzelnen Aufwandszahlen wird daher stark durch das (geplante) Betriebsführungskonzept beeinflusst.

5 Welche Betriebsführungsstrategie passt zu welchem Gebäude?

Der praktische Einsatzbereich der Bauteilaktivierung wird von unterschiedlichen Autoren [43] und Systemherstellern für verschiedene Systeme leicht unterschiedlich angegeben, lässt sich bei Sichtbetondecken mit typischen Bodenaufbauten aber auf einen Lastbereich zwischen 20 bis 30 W/m² im Heiz- und 40 bis 50 W/m² im Kühlfall eingrenzen, wobei angepasste Zusatzsysteme die Leistung entsprechend vergrößern. In jedem Fall ist die thermische Trägheit der Bauteilaktivierung [44] ebenso wie die Effizienz des Gesamtsystems [45] in der Betriebsführung zu berücksichtigen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Bauteilaktivierung (systembedingt) mit verhältnismäßig hohen Übergabeverlusten verbunden ist. TABS-Konzepte sind dann erfolgreich, wenn ein hoher Anteil an Umweltenergie genutzt wird.

Vor diesem Hintergrund und unter Berücksichtigung langjähriger Planungs- und Betriebserfahrungen mit TABS-Gebäuden [10] kann ein Leitfaden entwickelt werden, um eine gute TABS-Betriebsführungsstrategie unter den Aspekten Energieeffizienz und thermischer Komfort zu identifizieren. Zunächst sollen folgende Erfolgsfaktoren berücksichtigt werden:

- Erfolgreiche TABS-Gebäude zeichnen sich durch geringe spezifische Heiz- bzw. Kühllasten [W/m²] und einen geringen Heiz- bzw. Kühlenergiebedarf [Wh/(m² d)] aus. Grundvoraussetzung dafür ist neben reduzierten internen und solaren Kühllasten (insb. zur Reduzierung der Kühllast im Sommer) vor allen Dingen der Einsatz einer Wärmerückgewinnung in der Lüftungsanlage (besonders zur Reduzierung der Heizlast im Winter).
- Reduzierte Heiz- und Kühllasten sind (in Verbindung mit der hohen Speicherkapazität der wärmeübertragenen Betondecke) darüber hinaus Grundvoraussetzung, um den Selbstregeleffekt der Bauteilaktivierung nutzen zu können und einen Change-Over-Betrieb zu realisieren.
- Ein Pufferspeicher ist in diesem Fall nicht erforderlich, weil die Gebäudestruktur selbst als thermischer Speicher wirkt. Eventuell ist ein klein dimensionierter Speicher erforderlich, um einen stabilen Wärmepumpen- bzw. Kältemaschinenbetrieb zu gewährleisten.
- Netztopologie und Betriebsführungskonzept müssen aufeinander abgestimmt sein. Stabile Betriebsbedingungen sind unkompliziert mit einem Zwei-Leiter-System zu erreichen, wenn im Gebäude oder zumindest in zusammenhängenden Zonen gleichzeitiger Heiz- und Kühlbetrieb ausgeschlossen werden kann.
- In der Bauteilaktivierung (und den angeschlossenen Zusatzsystemen) soll auf Beimisch- oder vergleichbare

hydraulische Schaltungen verzichtet werden. Diese sind mit exergetischen Verlusten verbunden und – wegen des Selbstregelungseffektes der Bauteilaktivierung – auch nicht erforderlich.

- Eine vollständige Verriegelung zwischen heizungs- und kühlungsseitiger Regelung der Übergabe und/oder Verteilung stellt in diesem Fall sicher, dass ein gleichzeitiges Heizen und Kühlen ausgeschlossen ist.
- Sondernutzungszonen und Zonen mit unterschiedlichen Anforderungen bzw. Betriebsbedingungen bilden separate Regelgruppen.
- Zusatzheiz- bzw. -kühlsysteme dürfen nicht mit einem höheren bzw. niedrigeren Temperaturniveau betrieben werden als die Bauteilaktivierung. Ansonsten bleiben einerseits die Effizienzvorteile auf der Erzeugerseite ungenutzt. Andererseits wird so die Leistungsfähigkeit der Flächentemperiersysteme gemindert. Besondere Beachtung verdient dabei die Entfeuchtung im Sommer, falls erforderlich bzw. gewünscht. Hier ist der Einsatz eines Systems mit Taupunktunterschreitung sehr kritisch gegenüber sorptiv arbeitenden Entfeuchtungskonzepten zu prüfen.
- Liegt im Gebäude gleichzeitiger Heiz- und Kühlbedarf vor, kann dieser vorteilhaft über ein Energieverbundsystem gedeckt werden, der gleichzeitig Wärme und Kälte bereitstellt, z.B. als Kraft/Wärme/Kälte-Kopplung oder als Wärmeverschiebung mit technischer Nutzung der Wärmequelle- und -senke einer Kompressionskältemaschine/-wärmepumpe.

Damit ist es schließlich möglich, eine robuste Betriebsführungsstrategie zu entwickeln. Einige dieser Aspekte werden in DIN V 18599 und EN 15232 bei der Energiebedarfsberechnung berücksichtigt.

- Übergabe: Eine erweiterte, zentrale, automatische Regelung mit intermittierendem Betrieb ist dafür ausgelegt und abgestimmt, eine optimale Selbstregelung der Raumtemperatur innerhalb des erforderlichen Komfortbereichs zu erreichen. Während der Betriebszeiten sollen die Raumtemperaturen aller Räume im Behaglichkeitsbereich bleiben, um die Behaglichkeitsanforderungen zu erfüllen. Gleichzeitig soll der Komfortbereich möglichst vollständig genutzt werden, um den Heizwärme- und Kühlbedarf zu senken.
- Übergabe/Verteilung: Das automatische Umschalten zwischen Heizung und Kühlung erfolgt nicht nur in Abhängigkeit von der Außentemperatur, sondern auch unter Berücksichtigung der Wärmegewinne. Die Wärmegewinne können statisch (z. B. über eine Sollwertanpassung) oder dynamisch (z. B. über Regressionsmodelle) berücksichtigt werden.
- Übergabe und/oder Verteilung: Eine automatische Regelung mit Bedarfsbeurteilung führt bei intermittierendem Betrieb (z. B. angepasster Tag-/Nachtbetrieb) zur Verringerung/Erhöhung der Innentemperatur und der Betriebszeit im Winter/Sommer.
- $\Delta\theta/\Delta p$ -Regelung in der Verteilung: Einzelne Übergabekreise werden in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf abgeschaltet. Die zugehörige Verteilungspumpe reduziert dementsprechend die Drehzahl entsprechend einer einfachen Differenzdruckregelung.

- Verteilung/Erzeugung: Der Sollwert der Vorlauftemperatur wird in Abhängigkeit der (erwarteten) Lastsituation im Gebäude (witterungs- und bedarfsgeführte Regelung) zentral vorgegeben. Idealerweise wird die Solltemperatur mit der Raumtemperatur an nicht vorhersagbare tägliche Schwankungen der Wärmegevinne angepasst. Dies kann vorteilhaft über eine adaptive Regelung realisiert werden. Da die Bauteilaktivierung nur langsam reagiert, wird nur eine tageweise Korrektur der Raumtemperatur angewendet.
- Erzeugung: Von der Last abhängige variable Temperaturregelung entsprechend der Vorgabe der Vorlauf-Solltemperatur.

6 Laborversuch zum Regelkonzept

Diese in Abschnitt 5 vorgestellte Strategie auf Basis konventioneller Regelstrategien wurde in mehreren Versuchsreihen am Institut für Energiesystemtechnik (INES) an der Hochschule Offenburg evaluiert. Der Laboraufbau und die Versuchsumgebung werden von Pfafferoth *et al.* [18] vorgestellt. Im Folgenden werden beispielhaft Ergebnisse aus einem Experiment mit statistisch wechselnden Kühllasten diskutiert.

In einer Klimakammer werden Außentemperaturen zwischen 0°C und 5°C mit typischen Tagesschwankungen von ± 6 K simuliert. Mit dieser Klimakammer sind zwei Testräume (2,7 m breit, 5,0 m tief und 2,7 m hoch mit einer Grundfläche von ca. 13,5 m² und einem Raumvolumen von ca. 36 m³) über eine 4 m²-Glasfassade verbunden, siehe Bild 1. Beide Räume werden während der Anwesenheitszeit mit 80 m³/h maschinell belüftet, wobei der Wärmebereitstellungsgrad der Lüftungsanlage in beiden Fällen bei rund 80% – bezogen auf den Lüftungswärmebedarf – liegt.

Während einer zweiwöchigen Winterperiode werden die internen Lasten über Kühllastsimulatoren eingebracht. Die Wärmebilanz in beiden Räumen ist nahezu ausgeglichen, wobei eine Wärmemenge von 560 Wh/(m²d) über die Bauteilaktivierung in Mittellage (Freischaltung nur für Nachtbetrieb) und nur rund 35 Wh/(m²d) über ein Heiz- und Kühlsegel (Freischaltung nur für Tagbetrieb) zugeführt wird. Mit einer separaten Messkampagne [18] konnte die Aufwandszahl für die Wärmeübergabe für dieses System (inkl. Regelung) zu $e_{h,ce} = 1,24$ bestimmt werden.

Bild 2 zeigt den Temperaturverlauf während der zweiwöchigen Messung bei schwankenden internen Wärmegevinnen. Im gesamten Zeitraum liegen die Raumtemperaturen – trotz stark variierender Wärmegevinne zwischen 100 und 600 W bzw. 90 und 540 Wh/(m²d) – durchgängig im Komfortbereich von 22 ± 2 °C. Zudem zeigt die Analyse der Heizleistung, dass die Kühlsegel während der Anwesenheitszeit nur selten in Betrieb waren. Der Anlagenbetrieb führt in Verbindung mit der gewählten Betriebsführungsstrategie – nahezu unabhängig von der aktuellen Raumnutzung – zu einem guten thermischen Komfort.

7 Bewertung der Effizienzsteigerung durch die Gebäudeautomation

Die DIN V 18599 stellt ein Konzept zur vollständigen Bilanzierung aller Energiebereitstellungssysteme zur Verfü-



Bild 1. Versuchsaufbau: Blick in eine der beiden Testkammern mit mobiler und fest installierter Messtechnik. Sowohl das Heiz- und Kühlsegel als auch die Kühllastsimulatoren sind gut zu erkennen. Die Zuluftöffnungen liegen fassaden-nah hinter dem Heiz- und Kühlsegel. Der Raum ist thermisch über die Glasfassade und lüftungstechnisch über die Lüftungsanlage mit der (Außen-) Klimakammer verbunden Fig. 1. Experimental setup: View into one of the two test chambers with mobile and fixed monitoring equipment. Both the heating and cooling sails as well as the cooling load simulators are clearly visible. The supply air inlets are located near the front of the heating and cooling sails. The room is thermally connected to the (outside) climatic chamber via the glass facade and via the ventilation system

gung. Im Teil 11 dieser Normenreihe wird der Einfluss der Gebäudeautomation bewertet. Ein vergleichbares Verfahren stellt die EN 15232 im EPBD-Normenpaket bereit. Die Richtlinie VDI 3814 gibt ergänzend dazu Hinweise zur Systemintegration.

DIN V 18599, Teil 11

Die Normenreihe DIN V 18599 [46] berechnet den Endenergiebedarf eines Gebäudes mithilfe von Aufwandszahlen ausgehend von der Nutzenergie für Heizen, Kühlen, Lüften und Beleuchten für die einzelnen Energiewandlungsschritte von der Erzeugung über Speicherung und Verteilung bis zur Übergabe. Der Einfluss der Regelung wird dabei in den einzelnen Aufwandszahlen berücksichtigt (für die Bauteilaktivierung siehe auch [47]). Der Teil 11 „Gebäudeautomation“ selbst liefert weder eine Rechenmethode noch konkrete Aufwandszahlen, sondern dient in erster Linie einer übersichtlichen Darstellung mit Verweisen auf die einzelnen Normteile. Darüber hinaus werden betriebliche Maßnahmen vorgestellt, die für einen energieeffizienten Gebäudebetrieb berücksichtigt werden sollten. Die Ausstattung der Gebäudeautomation wird vier Automatisierungsgraden A–D zugeordnet, wobei Klasse C als Referenzklasse definiert wird. Mit der Berechnungsmethode nach DIN V 18599 geht einher, dass einzelne Systemparameter in verschiedenen Rechenschritten eingehen

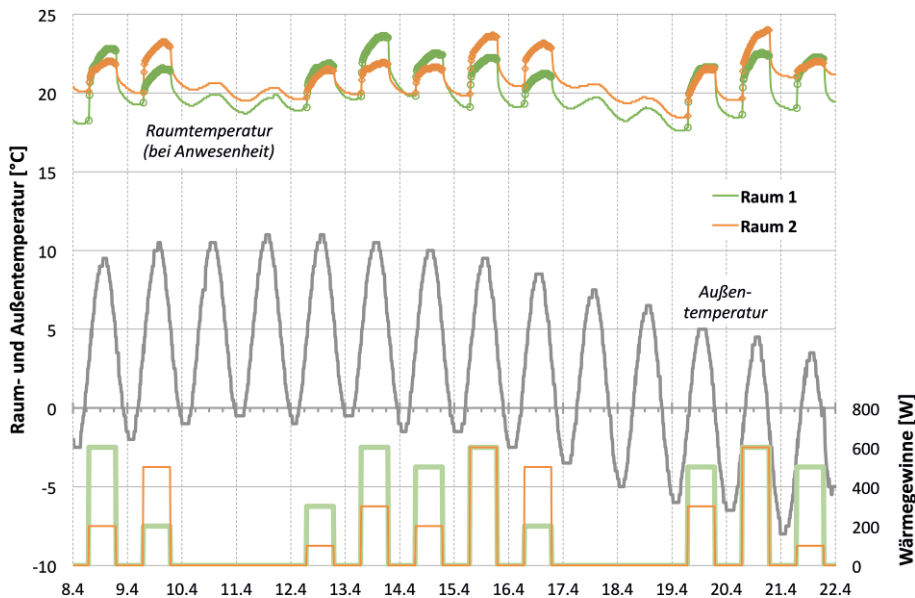


Bild 2. Messreihe für eine zweiwöchige Winterperiode mit stark variierenden Wärmegewinnen
 Fig. 2. Laboratory test for a two-week winter period with strongly varying heat gains

und sich gegenseitig beeinflussen. Damit ist es kaum möglich, den Einfluss der Gebäudeautomation auf den Energiebedarf separat zu bestimmen. Dabei sollen folgende Möglichkeiten des Einflusses der Gebäudeautomation auf den Anlagen- und Gebäudebetrieb berücksichtigt werden, wobei auch einzelne, gewerkespezifische Funktionen berücksichtigt werden:

- Festlegung der Betriebszeiten;
- Anpassung der Ein- und Ausschaltzeiten;
- Verschiebung von Sollwerten und Sollwertbändern;
- gegenseitige Verriegelung von Anlagen;
- Erfassung und Einbeziehung des Raum-Belegungsprofils in die Steuerungs-/Regelungsstrategien;
- Erfassung und Einbeziehung realer Lastzustände in die Steuerungs-/Regelungsstrategie.

EN 15232 im EPB-Normenpaket

Auf europäischer Ebene wird die Berechnung des Endenergiebedarfs von Gebäuden durch das EPB-Normenpaket (englisch: für Energy Performance of Buildings) geregelt. Hierin wird der Einfluss der Gebäudeautomation auf die Energieeffizienz separat in DIN EN 15232 [50] berücksichtigt. Dazu werden in einem Faktor-Verfahren vier Klassen A–D gebildet, wobei Klasse C als Referenzklasse definiert ist (ähnlich zu DIN V 18599). Diese Referenzklasse wird für TABS-Bürogebäude mit folgenden Mindestanforderungen definiert:

- Übergabesystem: zentrale automatische Regelung;
- Verteilung: witterungsgeführte Regelung, feststehendes Zeitprogramm, Ein/Aus-Regelung der Pumpen;
- Speicher: Betrieb mit zeitgesteuerter Speicherung;
- Erzeuger: von der Außentemperatur abhängige variable Temperaturregelung, ggf. Betriebsabfolge nach Lastanforderung, Verriegelung Heizen/Kühlen.

Darauf basierend werden die Faktoren f_{BAC} (englisch: für Building Automation and Control) getrennt für Heizung

(Index H), Kühlung (Index C) und Hilfsenergie mit dem Index el,aux beschrieben und für die Referenzklasse C zu 1 definiert. Anhand einer Funktionsliste werden Klassen der GA-Energieeffizienz zugeordnet. So liegen die sogenannten GA-Effizienzfaktoren

- für die Heizung bei $f_{BAC,h} = 0,79$ für Klasse B bzw. $f_{BAC,h} = 0,70$ für Klasse A,
- für die Kühlung bei $f_{BAC,c} = 0,80$ für Klasse B bzw. $f_{BAC,c} = 0,57$ für Klasse A und
- für die Hilfsenergie bei $f_{BAC,el,aux} = 0,86$ für Klasse B bzw. $f_{BAC,el,aux} = 0,72$ für Klasse A.

Damit lassen sich die Heiz- bzw. Kühlenergiebedarfe durch einfache Multiplikation der GA-Faktoren mit dem Nutzwärme- bzw. -kältebedarf (einschließlich deren Systemverluste) sowie mit dem Hilfsenergiebedarf für die Referenzklasse C (mit $f_{BAC,ref} = 1$) bestimmen.

DIN EN 15232 zeigt den Rechenweg, wobei die Faktoren f_{BAC} auf die einzelnen Energiedienstleistungen angewendet werden, siehe Bild 3.

Typische TABS-Gebäude erreichen im Bereich der Gebäudeautomation planmäßig in der Regel mindestens Klasse B gemäß Funktionsliste. (Allzu oft werden allerdings die geplanten Ansätze nicht oder nur mangelhaft umgesetzt oder während der Inbetriebnahme durch vermeintlich robustere Regelkonzepte ersetzt.)

Wird die Gebäudeautomation für die Bauteilaktivierung entsprechend dem in Abschnitt 5 beschriebenen Algorithmus ausgerüstet und betrieben, wird eine GA-Energieeffizienz entsprechend Klasse A erreicht, und zwar entsprechend der in EN 15232 vereinbarten Funktionsliste, siehe Tabelle 1.

VDI 3814 Gebäudeautomation

Die VDI 3814 ist eine Richtlinienreihe zur Gebäudeautomation. Hier soll zukünftig [48] in einem überarbeiteten Blatt 5 „Hinweise zur Systemintegration“ [49] neben Sicherheit, Komfort und Barrierefreiheit auch der Beitrag

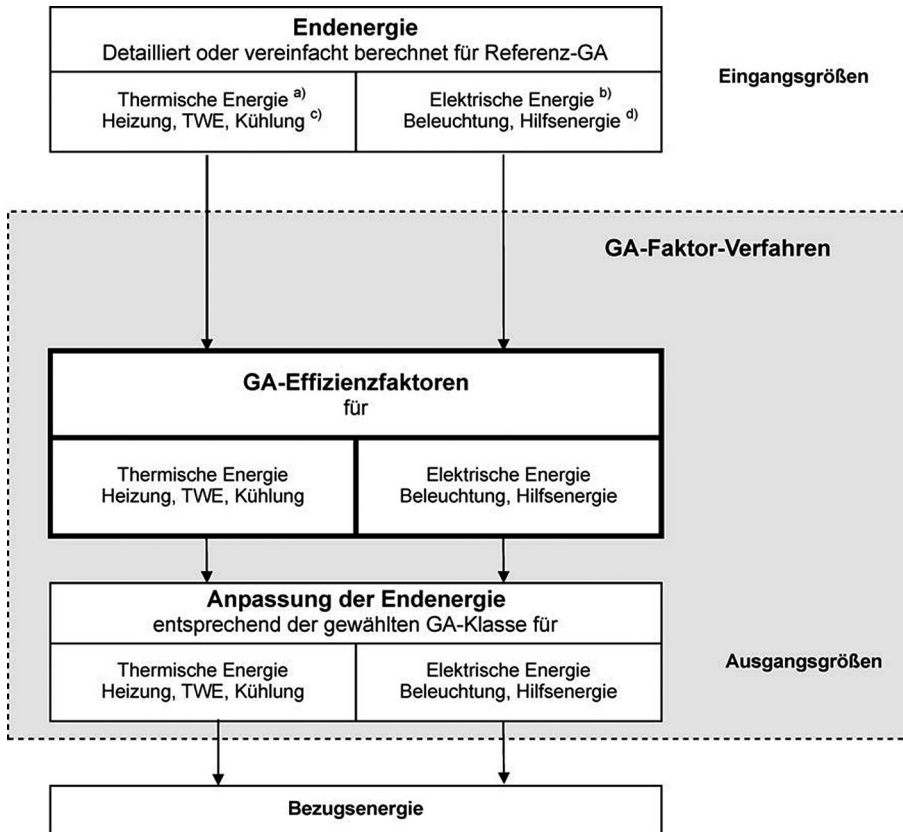


Bild 3. GA-Faktor-Verfahren aus DIN EN 15232, Rechenweg zur Berechnung der Bezugsenergie je Energieträger (Endenergie)

Fig. 3. Energy performance factors for building automation systems according to DIN EN 15232, calculation procedure for final energy

Tabelle 1. Gebäudeautomation bei Bauteilaktivierung für GA-Energieeffizienz-Klasse A

Table 1. Building automation with thermal activated component systems according to EN 15232

Funktion	Ausführung
Regelung der Übergabe für TABS (Heiz- und Kühlbetrieb)	erweiterte zentrale automatische Regelung mit intermittierendem Betrieb
Regelung der Warm- bzw. Kaltwassertemperatur im Verteilungsnetz	Regelung der Warmwassertemperatur im Verteilungsnetz (Vor- oder Rücklauf)
Regelung der Übergabe und/oder Verteilung bei intermittierendem Betrieb	automatische Regelung mit Bedarfsbeurteilung
Regelung des Wärmeerzeugers (Wärmepumpe)	variable Regelung der Wärmeerzeuger-Kapazität in Abhängigkeit von der Last oder dem Bedarf
Verriegelung zwischen heizungs- und kühlungsseitiger Regelung	vollständige Verriegelung der Übergabe und/oder Verteilung

der Gebäudeautomation zu einem energieeffizienten Gebäudebetrieb berücksichtigt werden. Die Richtlinie zeigt, mit welchen Funktionen die Ziele in welcher Tiefe erreicht werden können.

Energieeinsparung durch verbesserte Gebäudeautomation in TABS-Gebäuden

Unter der Annahme, dass Nutzwärme- und -kältebedarf eines typischen Bürogebäudes in etwa in der gleichen Größenordnung liegen und eine (reversible) Wärmepumpe eingesetzt wird, liegt die Energieeinsparung allein durch eine verbesserte Gebäudeautomation (gegenüber der Referenzklasse) bei über 30%. Diese vermeintlich hohe Einspa-

rung kann auf Basis von Praxiserfahrungen in zwei Richtungen auf Plausibilität geprüft werden:

- Häufig werden bei der kontinuierlichen Betriebsoptimierung Einsparpotenziale zwischen 5 und 20% (gelegentlich 30%) dokumentiert, die allein durch die korrekte Einstellung von Regel- und Steuerparametern erreicht werden können [36].
- Langjährige Monitoringergebnisse aus TABS-Gebäuden mit vergleichbaren bauphysikalischen Kennwerten, ähnlicher Nutzung und nahezu identischer anlagentechnischer Ausstattung zeigen eine breite Streuung der spezifischen Energieverbräuche [10]. Bleiben dabei Auslegungsfehler und Ausführungsmängel unberücksichtigt,

kann der Einfluss der Betriebsführung auf den Endenergiebedarf abgeschätzt werden: Hier kann das Energie-sparpotenzial zwischen vergleichbaren Gebäude mit teilweise deutlich über 30% allein aufgrund der Betriebsführung abgeschätzt werden.

Damit wird deutlich, dass bereits eine Optimierung der TABS-Betriebsführung allein mit konventionellen Methoden eine hohe Energieeinsparung erzielt. Diese Maßnahmen sind mit geringen oder keinen Mehrkosten verbunden. Bei einer entsprechenden Vereinfachung des hydraulischen Systems aufgrund verbesserter Regel- und Steuerkonzepte können vielmehr Investitionskosten eingespart werden.

8 Berechnungsverfahren ausgehend vom Nutzenergiebedarf und Aufwandszahlen

Gebäude mit Bauteilaktivierung weisen regelmäßig sowohl eine hohe Energieeffizienz der Wärme- und Kältebereitstellung als auch eine hohe Behaglichkeit nach [10] auf. Allerdings: Könnten diese Gebäude – bei gleicher konstruktiver und bauphysikalischer Realisierung und gleicher Nutzung – nicht ebenso komfortabel und energieeffizient über eine entsprechend dimensionierte Klimaanlage betrieben werden?

Eine Antwort auf diese Frage fällt schwer: Ein luftgeführtes Übergabesystem ist thermisch agil und heizt bzw. kühlt den Raum bedarfsgerecht. Demgegenüber sind thermisch träge Übergabesysteme mit entsprechend höheren Aufwandszahlen für die Nutzenübergabe verbunden, z. B. $e_{ce} = 1,1$ bis $1,5$ mit starker Abhängigkeit von den Lastzuständen [18].

Hierzu fehlt eine breite Queranalyse über realisierte Gebäude, die zumindest ein ähnliches Gebäude- und Nutzerprofil bei verschiedenen Heiz- und Kühlkonzepten haben. Daher wird im Folgenden der Endenergiebedarf unterschiedlicher Übergabesysteme unter Berücksichtigung der entsprechenden Betriebsführungsstrategien auf Basis der Messkampagne im Labor vergleichend bewertet.

Damit gelingt es schließlich, TABS-Betriebsführungsstrategien in der gesamten Energieumwandlungskette zu bewerten.

Endenergiebedarf für den Laborversuch

Im gebäudetechnischen Labor sind die spezifischen Verteilverluste vergleichsweise hoch, weil die Rohrlängen versuchsbedingt länger sind als in einem tatsächlichen Gebäude. Ferner wird auf eine Wärmespeicherung verzichtet. Daher sollen hier die Aufwandszahlen für die Verteilung $e_{h,d}$ und Speicherung $e_{h,s}$ zu 1 gesetzt werden. Zudem werden im Labor Laborthermostate zum Heizen und Kühlen eingesetzt. Eine vergleichbare Aufwandszahl für die Erzeugung $e_{h,gen}$ wird daher über die Jahresarbeitszahl SCOP einer typischen Wärmepumpenanlage (hier: $4,54 \text{ kWh}_{th}/\text{kWh}_{el}$) bestimmt.

Ausgehend von der (gemessenen) Wärmeübergabe an den Raum kann mithilfe von Gl. (1) für diesen konkreten Fall vereinfacht berechnet werden:

$$q_{h,f} = q_{h,b} \cdot e_{h,ce} \cdot e_{h,gen} \quad (3)$$

mit

$q_{h,b} = 480 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{d})$, Nutzwärmeverbrauch berechnet mit $e_{h,ce}$ und der gemessenen Wärmeübergabe an den Raum $q_{h,b} \cdot e_{h,ce} = 595 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{d})$, $e_{h,ce} = 1,24$, aus separater Messdatenauswertung (siehe Abschn. 6), wobei der Messfehler mit $\pm 6\%$ abgeschätzt werden konnte, und $e_{h,gen} = 0,22$ (entspricht $1/\text{SCOP}$), nach EN 14825 [51] für eine monovalente Sole/Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonde und ohne Warmwasserbereitung (konkretes Produktbeispiel).

Damit ergibt sich auf Basis dieser Messungen im Raumklimalabor ein (elektrischer) Endenergieverbrauch von $131 \text{ Wh}_{el}/(\text{m}^2\text{d})$.

Ob das gewählte Anlagenkonzept mit dem darauf abgestimmten Regelkonzept tatsächlich energieeffizient bzw. energieeffizienter als Vergleichssysteme ist, kann erst im Vergleich zu anderen Anlagenkonzepten mit den dazugehörigen Regelkonzepten bewertet werden.

Endenergiebedarf unter Berücksichtigung anderer versorgungstechnischer Systeme und Betriebsführungsstrategien

Wird der Endenergiebedarf in Anlehnung an das saisonale Rechenverfahren der DIN V 18599 [46] in der vereinfachten Form der Gl. (1) bzw. für den konkreten Anwendungsfall nach Gl. (3) bestimmt, können einzelne versorgungstechnische Konzepte (inkl. der darauf angepassten Regelkonzepte) übersichtlich verglichen werden. Im Sinne der Normung verwendet die Berechnung dabei im Folgenden den Begriff „Energiebedarf“ (im Sinne von Rechenwert) und nicht mehr den Begriff „Energieverbrauch“ (im Labor gemessen). Damit werden die Messwerte verallgemeinert. Im Einzelnen werden folgende Annahmen im Rechenverfahren der DIN V 18599 getroffen:

- Die Aufwandszahl $e_{h,ce}$ für die Flächentemperierung ist stark von der technischen Umsetzung (hier besonders der Einfluss der Raumtemperaturregelung) abhängig. Für die Bauteilaktivierung werden Werte $\eta_{h,ce}$ mit $0,7$ bzw. $0,73$ in Abhängigkeit der Vorlauftemperaturregelung angegeben.
- Für Heizkörper werden zahlreiche technische Varianten beschrieben. Hier wird die typische technische Lösung für Bürogebäude mit P-Regler, 55/45-Zweirohranlage und HK-Anordnung an der Außenwand gewählt, womit sich $\eta_{h,ce} = 0,87$ ergibt.
- Für RLT-Anlagen ergibt sich ein Wertebereich $e_{h,ce}$ zwischen $1,11$ und $1,23$ für Konzepte mit Nachheizung in der Zuluft in Abhängigkeit des Regelkonzeptes.
- Mit diesen Werten ergibt sich auf Basis des Nutzwärmebedarf $q_{h,b} = 480 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \text{ d})$ die Erzeugernutzwärmeabgabe. Für alle gewählten Anlagenkonzepte wird darauf basierend der Endenergiebedarf einer monovalenten Wärmepumpe mit Erdsonde bestimmt.
- Für die Bauteilaktivierung ergibt mit einer maximalen Vorlauftemperatur von 30°C die Anlagenaufwandszahl $e_{h,gen}$ zu $0,22$ und für die technische Realisierung mit Heizkörpern oder RLT-Anlage mit einer maximalen Vorlauftemperatur von 55°C zu $0,27$ nach EN 14825.

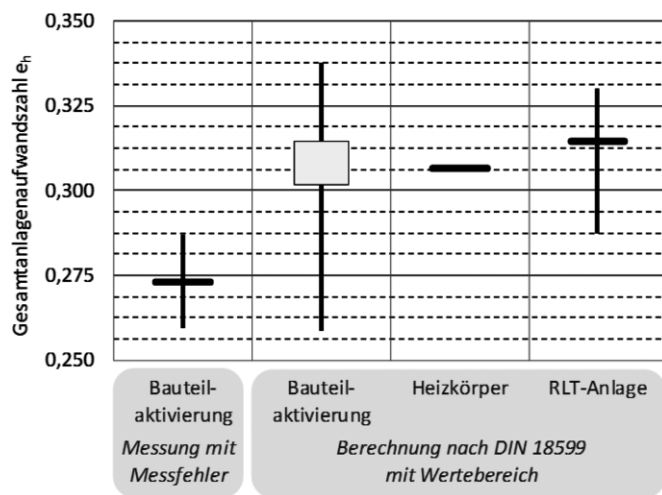


Bild 4. Anlagenaufwandszahl für den Laborversuch im Vergleich zu anderen regelungstechnischen und/oder anlagentechnischen Lösungen

Fig. 4. Energy performance factor for the laboratory test compared to other control and/or plant technologies

Damit ergeben sich schließlich Gesamtanlagenaufwandszahlen e_h zwischen 0,26 und 0,29 $\text{kWh}_{\text{el}}/\text{kWh}_{\text{th}}$ für die Messung (mit Vertrauensbereich der Messung) und 0,26 und 0,34 $\text{kWh}_{\text{el}}/\text{kWh}_{\text{th}}$ für die Berechnung.

Auffällig ist dabei (nicht in Bild 4 dargestellt), dass eine Rückrechnung mit $f_{\text{BAC, Laborversuch}} = 0,7$ und $f_{\text{BAC, Referenz}} = 1$ nach EN 15232 mit $e_h = 0,39 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{kWh}_{\text{th}}$ eine verhältnismäßig hohe Gesamtanlagenaufwandszahl liefert, die deutlich über allen anderen Vergleichswerten liegt.

Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die rechnerische Bewertung auf Basis von Messungen zunächst nur auf diesen Einzelfall zutrifft. Allerdings zeigt eine einfache Parametervariation aufgrund der linearen Abhängigkeiten ein robustes Verhalten, so dass die Ergebnisse in einem weiten praktischen Bereich Gültigkeit haben. So führt beispielsweise eine höhere/niedrigere Aufwandszahl für die Erzeugung zwar zu einem absolut höheren/niedrigeren Endenergieaufwand, das Verhältnis zwischen den verschiedenen Übergabesystemen (inkl. deren Regelung) wird davon aber nicht oder nur geringfügig beeinflusst. In diesem Sinne kann die Methode zur Bestimmung der Gesamtanlagenaufwandszahlen e_h für das Heizsystem auch auf vergleichbare technische Lösungen angewendet werden.

Zunächst fällt in Bild 4 auf, dass die Anlagenaufwandszahlen sich für die drei Systeme Bauteilaktivierung, Heizkörper und RLT-Anlage nur geringfügig unterscheiden, wobei die Flächentemperiersysteme je nach System und Regelkonzept eine sehr große Streuung aufweisen. Zudem zeigt Bild 4, dass ein optimiertes Anlagen- und darauf abgestimmtes Regelkonzept (hier: Laborversuch) eine deutlich bessere Energieeffizienz – bei gleichem thermischen Komfort – erreicht als vergleichbare Systeme gemäß Rechenverfahren. Hier werden Verbesserungen zwischen 15% gegenüber einem guten Konzept mit Bauteilaktivierung (gemäß DIN V 18599) und 30% gegenüber dem Referenzsystem nach EN 15232 erreicht.

9 Zusammenfassung und Fazit

Zusammenfassung

Eine systematische Analyse konventioneller Regelstrategien lieferte in dieser Studie ein auf das Anlagen- (hier: oberflächennahe und Bauteilaktivierung in Mittellage in Kombination mit einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung) und Nutzungskonzept (hier: Energiegewinne eines typischen Zwei-Personen-Büros) angepasstes Regelkonzept. Dieses Regelkonzept basiert auf einfachen Regeln und Zusammenhängen und gewährleistet selbst bei stark schwankenden Energiegewinnen einen hohen thermischen Komfort (siehe Bild 2). Das ist die Grundvoraussetzung, um die Energieeffizienz (siehe Bild 4) zu bewerten.

Damit ist es gelungen, Effizienzgewinne auch quantitativ zu bewerten. Nach EN 15232 sind mit einer optimierten Regelstrategie bei diesen thermisch trägen Übergabesystemen Effizienzgewinne von bis zu 30% gegenüber der dort definierten Referenz-Gebäudeautomation zu realisieren.

Eine Bewertung nach DIN 18599 ist wegen des Referenzgebäudeverfahrens schwierig. Allerdings gelingt eine Bewertung des Endenergiebedarf auf Basis saisonaler Werte für die Anlagenaufwandszahlen und/oder Teilwirkungsgrade. Hier können im Praxisbeispiel Effizienzgewinne von 15% im Vergleich zum Referenzgebäude nachgewiesen werden.

Fazit

Wird dieses Verfahren im Planungsalltag eingesetzt, entfällt in der Planung (nicht im Nachweisverfahren!) eine aufwendige, fehleranfällige und unübersichtliche Simulation zugunsten einer etablierten Rechenmethode mit Kennzahlen bzw. Teilwirkungsgraden.

Einfache, gut eingeführte und überschaubare Regelalgorithmen können unkompliziert kombiniert werden, um eine hohe Effizienz der Bauteilaktivierung zu gewährleisten. Dann erreicht dieses thermisch träge Übergabesystem in Niedrigenergiegebäuden eine vergleichbare Aufwandszahl für die Nutzenübergabe wie thermisch agile Übergabesysteme. Werden gleichzeitig die Effizienzvorteile in der Wärme- und Kältebereitstellung aufgrund geringer Über- bzw. Untertemperaturen genutzt, ist die Bauteilaktivierung tatsächlich energieeffizienter als andere Übergabesysteme bei gleichem thermischem Komfort.

Allerdings zeigt die vorliegende Studie auch, dass ein unpassendes Anlagen- und Regelkonzept die Effizienzvorteile bei der Wärme- und Kältebereitstellung überkompensiert. Erst ein abgestimmtes Regelkonzept macht die Bauteilaktivierung tatsächlich zu einem komfortablen und energieeffizienten Heiz- und Kühlsystem.

Danksagung

Diese Studie wurde durch das Projekt PAkoGA „Prädiktive Algorithmen in komplexen Systemen der Gebäudeautomation“ unter dem Förderkennzeichen 03FH02212 durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Programms Forschung an Fachhochschulen finanziert.

Die Publikation entstand im Rahmen eines Forschungsaufenthalts an der University of Colorado in Boulder.

Literatur

- [1] Hauser, G.: Rechnerische Vorbestimmung des Wärmeverhaltens großer Bauten. Stuttgart: Universität Stuttgart 1977.
- [2] Gertis, K.: Energieeinsparung und Solarenergienutzung im Hochbau – Erreichtes und Erreichbares. Rheinisch-Westfälische Akademie der Wissenschaften. Wiesbaden: Springer Fachmedien 1985.
- [3] http://www.meierhans.ch/projekte_dow.html [September 2016]
- [4] Meierhans, R.: Slab cooling and earth coupling. ASHRAE Trans. 99 (1993), S. 99.
- [5] Koschenz, M.; Lehmann, B.: Thermoaktive Bauteilsysteme (tabs). Dübendorf: EMPA 2000.
- [6] Pfafferoth, J.; Kalz, D.: Thermoaktive Bauteilsysteme in Nichtwohngebäuden (BINE themeninfo I/07). Karlsruhe: FIZ GmbH 2007.
- [7] Despret, C.; Economidou, M.; Griffiths, N.; Maio, J.; Nolte, I.; Rapf, O. (Hrsg.): Principles for nearly zero-energy Buildings – Paving the way for effective implementation of policy requirements. Buildings Performance Institute Europe (BPIE) 2011.
- [8] Voss, K.; Löhnert, G.; Herkel, S.; Wagner, A.; Wambsganß, M. (Hrsg.): Bürogebäude mit Zukunft – Konzepte, Analysen, Erfahrungen. Berlin: Solarpraxis Verlag 2006.
- [9] Bockelmann, F.; Fisch, N.; Kipry, H.: Erdwärme für Bürogebäude nutzen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2011.
- [10] Pfafferoth, J.; Kalz, D.; Koenigsdorff, R.: Bauteilaktivierung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2015.
- [11] Olesen, B. W.; Dossi, F. C.: Neue Erkenntnisse über Regelung und Betrieb für die Betonkernaktivierung. Flächenheiz- und Kühlsysteme. HLH 56 (2005), H. 1, S. 29–34 (Teil 1) und H. 3, S. 35–40 (Teil 2).
- [12] Tödli, J.; Gwerder, M.; Renggli, F.; Güntensperger, W.; Lehmann, B.; Dorer, V.; Hildebrand, K.: Regelung und Steuerung von thermoaktiven Bauteilsystemen (TABS). Bauphysik 31 (2009), S. 319–325.
- [13] Gwerder, M.; Lehmann, B.; Tödli, J.; Dorer, V.; Renggli, F.: Control of thermally-activated building systems (TABS). Applied Energy 85 (2008), S. 565–581.
- [14] Gwerder, M.; Tödli, J.; Lehmann, B.; Dorer, V.; Güntensperger, W.; Renggli, F.: Control of thermally activated building systems (TABS) in intermittent operation with pulse width modulation. Applied Energy 86 (2009), S. 1606–1616.
- [15] Lehmann, B.; Dorer, V.; Gwerder, M.; Renggli, F.; Tödli, J.: Thermally activated building systems (TABS): Energy efficiency as a function of control strategy, hydronic circuit topology and (cold) generation system. Applied Energy 88 (2011), S. 180–191.
- [16] Tödli, J.: TABS Control. Steuerung und Regelung von thermoaktiven Bauteilsystemen – Handbuch für Planung, Auslegung und Betrieb. Zürich: Faktor-Verlag 2009.
- [17] Kalz, D.: Heating and Cooling Concepts employing Environmental Energy and Thermo-Active Building Systems for Low-Energy Buildings. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2010.
- [18] Pfafferoth, J.; Frietsch, M.; Himmelsbach, S.; Lang, T.: Messtechnische Bestimmung von Aufwandszahlen unterschiedlicher Flächentemperiersysteme. Bauphysik 37 (2016), S. 389–399.
- [19] Wystrcil, D.; Kaatz, C.; Kalz, D.: Vergleichende Analyse hydraulischer Anlagen mit Flächentemperiersystemen – Teil 1: Struktur. Berlin: GI – Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis 136 (2015), S. 384–396.
- [20] Wystrcil, D.; Kaatz, C.; Kalz, D.: Vergleichende Analyse hydraulischer Anlagen mit Flächentemperiersystemen – Teil 2: Dimensionierung. Berlin: GI – Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis 137 (2016), S. 26–42.
- [21] Wystrcil, D.; Kaatz, C.; Kalz, D.: Vergleichende Analyse hydraulischer Anlagen mit Flächentemperiersystemen – Teil 3: Betriebsführung. Berlin: GI – Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis 137 (2016), S. 120–132.
- [22] Bockelmann, F.; Plessner, S.; Soldaty, H.: Advanced system design and operation of GEOTABS buildings. REHVA Guidebook 20. Brüssel: Federation of European Heating and Air-conditioning Associations 2013.
- [23] Technische Information Flächenheizung/-Kühlung – Nichtwohnbau. Rehau: Rehau AG 2014.
- [24] UPONOR: Technischer Gesamtkatalog. Verbundrohrinstallation, PE-Xa Installation, Flächenheizung, Flächenkühlung, Versorgung, Geothermie. Hassfurt: UPONOR GmbH 2013.
- [25] Henze, G.; Pfafferoth, J.; Herkel, S.; Feldmann, C.: Impact of adaptive comfort criteria and heat waves on optimal building thermal mass control. Energy and Buildings 39 (2007), S. 221–235.
- [26] Patentblatt 2011/25: Verfahren und Anordnung zum prädiktiven Steuern von Raumtemperaturen in einem Gebäude unter Berücksichtigung der Kosten verschiedener Energiequellen. Europäische Patentanmeldung, Anmeldenummer 09179340.6
- [27] Jacob, D.: Gebäudebetrieboptimierung – Verbesserungen von Optimierungsmethoden und Optimierung unter unsicheren Randbedingungen. Karlsruhe: Universität Karlsruhe (TH) 2012.
- [28] Feldmann, T. et al.: Verbesserung von Energieeffizienz und Komfort im Gebäudebetrieb durch den Einsatz prädiktiver Betriebsverfahren (PräBV). Offenburg: Hochschule Offenburg 2012.
- [29] Schmelas, M.; Feldmann, T.; Bollin, E.: Adaptive predictive control of thermo-active building systems (TABS) based on a multiple regression algorithm. Energy and Buildings 103 (2015), S. 14–28.
- [30] Schmelas, M.; Bollin, E.; Feldmann, T.; Pfafferoth, J.: PAkoGA – Prädiktive Algorithmen in komplexen Systemen der Gebäudeautomation. Offenburg: Hochschule Offenburg 2016.
- [31] Kalz, D.; Pfafferoth, J.; Koenigsdorff, R.: Betriebserfahrungen mit thermoaktiven Bauteilsystemen. Bauphysik 34 (2012), S. 66–75.
- [32] DIN EN 12599:2013-01: Lüftung von Gebäuden – Prüf- und Messverfahren für die Übergabe raumlufttechnischer Anlagen.
- [33] Voss, K.; Herkel, S.; Kalz, D.; Lützkendorf, T.; Maas, A.; Wagner, A. (Hrsg.): Performance von Gebäuden – Kriterien, Konzepte, Erfahrungen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2016.
- [34] ENOB-Statusseminar Konzepte zur optimierten Betriebsführung von Gebäuden. FGK Nr. 123 09/06, 2006.
- [35] Neumann, C. et al.: Commissioning Tools for Existing and Low Energy Buildings. NIST Technical Note 1744, 2010.
- [36] Neumann, C.; Jacob, D.; Burhenne, S.; Florita, A.; Burger, E.; Schmidt, F.: ModBen – Modellbasierte Methoden für die Fehlererkennung und Optimierung im Gebäudebetrieb. Freiburg: Fraunhofer ISE 2011.
- [37] Lükking, R.; Hauser, G.: Die thermische Konditionierung von Gebäuden im Kontext eines zukünftigen Energieversorgungssystems. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2011.
- [38] Klein, K.; Kalz, D.; Herkel, S.: Netzdienlicher Betrieb von Gebäuden: Analyse und Vergleich netzbasierter Referenzgrößen und Definition einer Bewertungskennzahl. Bauphysik 36 (2014), S. 49–58.
- [39] Nüßle, F.; Pfafferoth, J.: Kühldeckensystem mit Aktivierung der Speichermasse der Betondecke. Bauphysik 33 (2011), S. 43–48.

- [40] *Arteconia, A.; Costolab, D.; Hoesb, P.; Hensen, J.*: Analysis of control strategies for thermally activated building systems under demand side management mechanisms. *Energy and Buildings* 80 (2014), S. 384–393.
- [41] *Miara, M. et al.*: Wärmepumpen. Heizen – Kühlen – Umweltenergie nutzen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2013.
- [42] *Bockelmann, F.*: Systemoptimierung erdgekoppelter Wärme- und Kälteversorgung von Bürogebäuden – reversible Wärmepumpen und freie Kühlung. Braunschweig: TU Braunschweig 2015.
- [43] *Lehmann, B.; Dorer, V.; Koschenz, M.*: Application range of thermally activated building systems tabs. *Energy and Buildings* 39 (2007), S. 593–598.
- [44] *Olesen, B.*: Thermo Active Building Systems: Using building mass to heat and cool. *ASHRAE Journal* (2012), S. 44–52.
- [45] *Nüßle, F.*: Klimadesign als zentrale Planungsdisziplin – Raumkonditionierungskonzepte zum Kühlen und Heizen. Heppenheim: ZENT-FRENGER Gesellschaft für Gebäudetechnik mbH 2007.
- [46] DIN V 18599:2011-12: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung.
- [47] *Schalk, K.; Felsmann, C.*: DIN V 18599 und die Bewertung von thermisch aktivierten Bauteilen. *Bauphysik* 31 (2009), S. 192–195.
- [48] VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik: Gebäudeautomation (GA) – VDI-Richtlinien zur Zielerreichung. Düsseldorf: VDI 2016.
- [49] VDI 3814 Gebäudeautomation. Blatt 5: Hinweise zur Systemintegration (März 2010)
- [50] DIN EN 15232:2012-09: Energieeffizienz von Gebäuden – Einfluss von Gebäudeautomation und Gebäudemanagement. Beuth, Berlin.
- [51] DIN EN 14825:2016-10: Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern zur Raumbeheizung und -kühlung – Prüfung und Leistungsbemessung unter Teillastbedingungen und Berechnung der saisonalen Arbeitszahl.

Autoren dieses Beitrages:

Prof. Dr.-Ing. Jens Pfafferott, jens.pfafferott@hs-offenburg.de
Hochschule Offenburg
Institut für Energiesystemtechnik INES
Badstraße 24
77652 Offenburg

Prof. Dr.-Ing. Gregor P. Henze, gregor.henze@colorado.edu
University of Colorado
Civil Environmental and Architectural Engineering
428 UCB 428, Boulder, Colorado 80309-0428 USA

Tobias Lang, M.sc., tobias.lang@hs-offenburg.de
Hochschule Offenburg
Institut für Energiesystemtechnik INES
Badstraße 24
77652 Offenburg

uponor

Effektive Bürogebäude bauen auf Uponor

Ganzheitliche Konzepte für die Erzeugung, Verteilung und Übertragung von Energie im Gewerbebau

- ✓ Sichere, vom Nutzerverhalten unabhängige Trinkwasserhygiene
- ✓ Höchster Wohlfühlkomfort bei niedrigem Energieverbrauch
- ✓ Effiziente Wasser- und Wärmeversorgung



www.uponor.com

FORSCHEN FÜR NACHHALTIGE ENERGIETECHNIK



Im Fokus der Forschungsaktivitäten am Institut für Energiesystemtechnik (INES) steht die Entwicklung und Evaluation von Systemen zur nachhaltigen Energienutzung.

Das INES bietet ein Dach für fünf Forschungsgruppen:

- ABT - Advanced Building Technology
- EES - Elektrische Energiespeicherung
- NET - Nachhaltige Energietechnik
- NEW - Nachhaltige Energiewirtschaft
- PVT - Photovoltaik-Technik

In den Laboren am INES werden Systemaspekte der Energieerzeugung, -verteilung und -nutzung messtechnisch und mit Hilfe numerischer Methoden untersucht. Mit dem Ziel, die Energieeffizienz in der gesamten Energieumwandlungskette zu verbessern, Ressourcen zu schonen, erneuerbare Energien vorrangig zu nutzen und unsere Strom-, Wärme- und Kälteversorgung energiewirtschaftlich zu optimieren.

Sonderdruck Bauteilaktivierung (2017)