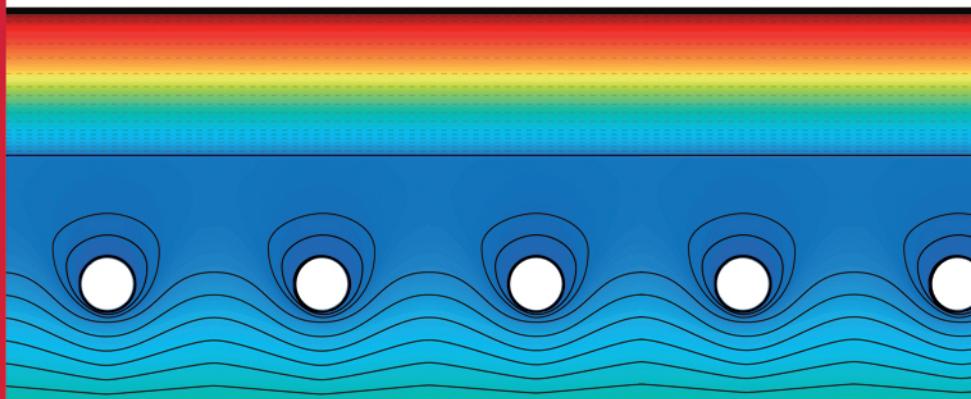


Jens Pfafferott | Doreen Kalz | Roland Koenigsdorff

Bauteilaktivierung

Einsatz – Praxiserfahrungen – Anforderungen



Fraunhofer IRB ■ Verlag

Jens Pfafferott | Doreen Kalz | Roland Koenigsdorff

Bauteilaktivierung

Jens Pfafferott | Doreen Kalz | Roland Koenigsdorff

Bauteilaktivierung

Einsatz – Praxiserfahrungen – Anforderungen

Fraunhofer IRB Verlag

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

ISBN (Print): 978-3-8167-9357-1
ISBN (E-Book): 978-3-8167-9358-8

Umschlaggestaltung: Martin Kjer
Herstellung: Angelika Schmid
Satz: Manuela Gantner – Punkt, STRICH.
Druck: BELTZ, Bad Langensalza

Die hier zitierten Normen sind mit Erlaubnis des DIN Deutsches Institut für Normung e.V. wiedergegeben. Maßgebend für das Anwenden einer Norm ist deren Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die bei der Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, erhältlich ist.

Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

© Fraunhofer IRB Verlag, 2015
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon +49 711 970-25 00
Telefax +49 711 970-25 08
irb@irb.fraunhofer.de
www.baufachinformation.de

Vorwort

Nichtwohngebäude, die mit thermoaktiven Bauteilsystemen, vor allem in Kombination mit der Nutzung oberflächennaher Geothermie, gekühlt und 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 erreicht werden kann. Unterschiedliche Wärme- und Kälteübergabesysteme sind heute am Markt verfügbar. Die wichtigsten Gebäudesimulationsprogramme verfügen zwischenzeitlich über eine Programmbibliothek mit LowEx-Komponenten, um diese Systeme zu planen. Darüber hinaus stehen für die Planung und den Betrieb produktsspezifische Planungsgrundlagen und teilweise Normen und Richtlinien zur Verfügung.

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. Oft fehlt es an der Systemabstimmung und effizienten Betriebsführung aller Teilkomponenten von erdgekoppelten Heiz- und Kühl-systemen sowie an der kritischen Betrachtung der aufgewandten Hilfsenergien. Weiterhin stellt sich im Projektgeschäft immer wieder die Frage nach der optimalen Regelung des Gesamtsystems mit hoher Effizienz und Sicherstellung eines hohen Arbeitsplatzkomforts.

Das Buch soll Planern, Architekten, Betreibern und Bauherren einen Überblick über Systemaspekte beim Einsatz der Bauteilaktivierung geben. Dabei haben wir versucht, sowohl die Grundlagen der Bauteilaktivierung zu vermitteln als auch intensiv Betriebserfahrungen zu nutzen. Monitoringergebnisse aus Laborversuchen und Felduntersuchungen bilden dabei die Grundlage, um Anforderungen an die Planung und einen erfolgreichen Betrieb zu definieren.

Allen Firmen, Bauherren, Betreibern, Verbänden und Privatpersonen, die uns Informationen, Messdaten, Betriebserfahrungen und Bildmaterial zur Verfügung gestellt haben, möchten wir für die umfangreiche und großzügige Unterstützung danken.

Weiterhin danken wir den privaten und öffentlichen Geldgebern, Förderern und Projektpartnern der Forschungsvorhaben, deren Ergebnisse zum Inhalt dieses Buches beigetragen haben. Hier wollen wir das EU-Projekt ThermCo (Thermal comfort in buildings with low-energy cooling) sowie die nationalen Projekte LowEx:MONITOR (Exergetisches Monitoring für Gebäude mit Erdwärmemutzung), LowEx:QS (Qualitätssicherung bei der Planung und Ausführung von Hydraulikkonzepten in niedrig-exergetischen Heiz- und Kühlsystemen) und PAkoGA (Prädiktive Algorithmen in der komplexen Gebäudeautomation) unter vielen anderen besonders hervorheben. Viele Messdaten wurden in den Demonstrationsgebäuden im Forschungsprogramm EnOB,

Forschung für Energieoptimiertes Bauen, von anderen Arbeitsgruppen erfasst und uns bereitgestellt.

Schließlich danken wir herzlich den Mitarbeitern in unseren Forschungsgruppen an der Hochschule Offenburg, am Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE und an der Hochschule Biberach. Unser besonderer Dank gilt Dominik Wystrcil (Fraunhofer ISE) für die umfangreichen Zuarbeiten zur Betriebsführung.

Text, Zeichnungen, Datenanalysen und Berechnungen in diesem Buch wurden mit größtmöglicher Sorgfalt erstellt. Dennoch können Fehler nie gänzlich ausgeschlossen werden. Zudem befinden sich Produkte, Verfahren und technische Regeln im Wandel. Für die Richtigkeit und Anwendbarkeit im konkreten Anwendungsfall kann daher keine Gewähr übernommen werden. Hinweise und Anregungen nehmen wir gerne auf.

Jens Pfafferott, Doreen Kalz und Roland Koenigsdorff
Offenburg, Freiburg und Biberach a.d. Riß im Juni 2015

Die Autoren

Prof. Dr. Jens Pfafferott, Hochschule Offenburg; Arbeits-/Forschungsschwerpunkte: Planung und Betrieb energietechnischer Anlagen, technische Gebäudeausrüstung, Heizen und Kühlen mit Umweltenergie

Dr. Doreen Kalz, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme; Arbeits-/Forschungsschwerpunkte: Wärme- und Kälteversorgung von Nichtwohngebäuden, Gebäude-Performanceanalyse, dynamische Gebäude- und Anlagensimulation

Prof. Dr. Roland Koenigsdorff, Hochschule Biberach; Arbeits-/Forschungsschwerpunkte: Systemanalyse und Simulationstechnik, Geothermie, thermische Bauteilaktivierung, Monitoring und Betriebsoptimierung von Gebäuden, Anlagen und Liegenschaften

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Einleitung	11
2 Raumkonditionierung mit Bauteilaktivierung	19
2.1 Flächentemperiersysteme an und in der Decke	19
2.2 Raumflächenintegrierte bzw. eingebettete Heiz- und Kühlsysteme in der Normung	21
2.2.1 DIN EN 1264: Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung	22
2.2.2 DIN EN 15377: Planung von eingebetteten Flächenheiz- und -kühlsystemen mit Wasser als Arbeitsmedium	23
2.2.3 VDI 6034: Raumkühlflächen – Planung, Bau und Betrieb.	24
2.3 Definition von Bauteilaktivierung bzw. thermoaktiven Bauteilsystemen	24
2.4 Aufbau und Montage von thermoaktiven Bauteilsystemen	26
2.5 Qualitätssicherung auf der Baustelle und Abnahme	28
2.6 Einsatz von Kühlsegeln mit thermischer Aktivierung der Betondecke	29
2.7 Gebäude- und Energiekonzepte mit thermoaktiven Bauteilsystemen	33
2.8 Wirkung der Bauteilaktivierung im Raum	34
2.8.1 Energiebilanz und zeitlicher Verlauf der Raumtemperatur	35
2.8.2 Vorauslegung einer Bauteilaktivierung am Beispiel eines Büro- und Seminargebäudes als Passivhaus	37
2.8.3 Bewertung betrieblicher Messungen im Sommer	40
2.9 Kombination mit anderen Übergabesystemen	42
3 Behaglichkeit und die Bewertung des thermischen Komforts	45
3.1 Thermischer Komfort in der Normung	45
3.2 Bewertung des thermischen Komforts	47
3.3 Erfahrungen aus Gebäuden mit unterschiedlichen Kühlkonzepten	49
3.4 Praxisbeispiel: Nutzerzufriedenheit mit dem thermischen Komfort in zwei Bürogebäuden mit Umweltenergiekonzepten	57
3.4.1 Auswertung nach dem Komfortmodell	62
3.4.2 Empfinden der Raumtemperatur	65
3.4.3 Zufriedenheit mit der Raumtemperatur	66
3.4.4 Ermittlung der Komforttemperatur	66
4 Planung und Auslegung von thermoaktiven Bauteilsystemen zur Raumkonditionierung	71
4.1 Leistungsfähigkeit von thermoaktiven Bauteilsystemen	71

4.1.1	Wärmeübertragung zwischen einer temperierten Bauteiloberfläche und dem Raum	75
4.1.2	Verfahren zur Bestimmung der Heiz- und Kühlleistung im stationären Zustand	78
4.1.3	Heiz- und Kühlleistung unter dynamischen Bedingungen	82
4.2	Konstruktive und räumliche Randbedingungen	86
4.3	Leistungsanforderungen an thermoaktive Bauteilsysteme.	89
4.4	Hydraulische Planung	93
5	Wärme- und Kälteversorgung für thermoaktive Bauteilsysteme	99
5.1	Voraussetzungen für eine hohe Energieeffizienz von thermoaktiven Bauteilsystemen	99
5.2	Oberflächennahe Geothermie und Wärmepumpen.	101
5.3	Besonderheiten der System- und Anlagenplanung	103
6	Betriebsführung und Optimierung	105
6.1	Grenzen der Regelbarkeit der Bauteilaktivierung	105
6.2	Betriebsführungsstrategie	109
6.2.1	Regelung der Vorlauftemperatur	109
6.2.2	UBB-Verfahren	110
6.2.3	Erweiterung der konventionellen Betriebsführung	112
6.2.4	Neue Ansätze der Betriebsführung und prädiktive Regelung	113
6.3	Vergleichende Analyse hydraulischer Anlagen mit Flächentemperiersystemen	116
6.3.1	Struktur Clustering und Klassifizierung der hydraulischen Systeme	120
6.3.2	Dimensionierung der hydraulischen Anlagen	129
6.3.3	Betriebsführung hydraulischer Anlagen mit Flächentemperiersystemen	137
7	Ausgeführte Projekte.	151
	AURON.	154
	MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR CHEMIE.	156
	PHARMACEUTICALS	158
	FRAUNHOFER ISE.	160
	VIATRAFFIC	162
	INFOSYS.	164
	SOLITÄR im Quartier Unterlinden.	166
	KREISSPARKASSE GÖPPINGEN	168
8	Praxiserfahrungen.	171
8.1	Feldmessungen und Messdatenauswertung	171
8.2	Gebäudesteckbriefe.	171
8.3	Erfolgsfaktoren und Anforderungen	177

8.3.1	Nutzung von Umweltenergie zum Heizen und Kühlen	177
8.3.2	Einsatz von Wärmepumpen und Kältemaschinen	180
8.3.3	Wärme- und Kälteverteilung im Gebäude	183
8.3.4	Wärme- und Kälteübergabe im Raum	186
8.3.5	Energieeffizienz im Gesamtkonzept	189
8.3.6	Thermischer Raumkomfort im Sommer und Winter	192
8.4	Fehlerquellen in Planung und Ausführung	194
8.5	Lessons learned	195
9	Energieeffiziente Kühlung in unterschiedlichen (europäischen) Klimazonen	197
9.1	Ergebnisse einer Simulationsstudie	197
9.1.1	Gebäude- und Anlagensimulation	200
9.1.2	Analyse der Simulationsergebnisse	203
9.2	Evaluation auf Basis von Messdaten	204
9.2.1	Gebäude und Konzepte	205
9.2.2	Komfortanalyse	208
9.2.3	Bewertung der Kühlkonzepte	209
9.2.4	Zentrale Ergebnisse des Quervergleichs	214
9.3	Fazit	215
	Literaturverzeichnis	217
	Stichwortverzeichnis	225

1 Einleitung

In Deutschland ist etwa die Hälfte der Büro- und Verwaltungsgebäude mit Kühl- oder Klimatisierungsvorrichtungen ausgestattet. Viele Studien prognostizieren weiterhin einen Anstieg des Energiebedarfs für die Gebäudekühlung in Deutschland und auch anderswo in Europa. Schon in wenigen Jahren werden voraussichtlich alle neu errichteten Büro- und Verwaltungsgebäude mit Klimaanlagen ausgerüstet sein und auch in erheblichem Maße im Bestand Nachrüstungen erfolgen. Neben einem verstärkten Auftreten heißer Sommer unterstützen die zunehmende Ausstattung von Dienstleistungsgebäuden mit Kühlsystemen/Klimaanlagen sowie gestiegene Nutzererwartungen an ein komfortables Raumklima diesen Trend. Die Bauteilaktivierung kann sowohl zum Heizen als auch zum Kühlen genutzt werden und bietet damit eine Alternative zu konventionellen Heiz- und Kühlsystemen bzw. Klimaanlagen.

Ziel ist es, mit Hilfe der Bauteilaktivierung Gebäude- und Anlagenkonzepte zu entwickeln, die sich im Winter durch einen geringen Heizenergiebedarf und 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.

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. Die Arbeiten von Oesterle und Koenigsdorff [66], Meierhans und Olesen [63], Koschenz [61] und Glück [28] aus den Jahren 1999 und 2000 gelten bis heute als richtungsweisend und zeigen, dass sich die Bauteilaktivierung etabliert hat. Mit den Arbeiten von Trogisch und Günther [95], Bockelmann, Plessner, Fisch und Kipry ([4] und [5]), Koenigsdorff [58] sowie Kalz [42] – um nur einige Arbeiten stellvertretend für viele zu nennen – rücken nun neben Planungshilfen auch die Betriebsführung und das Zusammenspiel in der gesamten Energiewandlung von der Umweltenergiequelle über die Energiebereitstellung und Wärmepumpensysteme bis hin zum dynamischen Verhalten des Übergabesystems in den Fokus der Forschung. In den vergangenen Jahren wurden so viele Forschungsarbeiten mit den unterschiedlichsten Aspekten der Bauteilaktivierung veröffentlicht, dass es selbst für Fachleute schwierig wird, hier den Überblick zu behalten.

Dieses Fachbuch basiert auf diesen vielfältigen Vorarbeiten von Wissenschaftlern, Anwendern und Herstellern. Es möchte aber kein (weiteres) Planungshandbuch sein. Denn für die konkrete Planung eines spezifischen Projektes finden Planer und Anwender heute hervorragende Literatur. Auch die Systemanbieter und Komponentenhersteller stellen fundiertes Wissen in praktisch umsetzbarer Form zur Verfügung. Das vorliegende Fachbuch möchte vielmehr die heute zur Verfügung stehenden Praxiserfahrungen und Ergebnisse aus langjährigen Forschungsarbeiten zusammenführen und daraus möglichst allgemeingültige Regeln und Anforderungen für den erfolgreichen und energieeffizienten Einsatz thermoaktiver Bauteilsysteme ableiten.

Begriffsbestimmung »Bauteilaktivierung«

Thermoaktive Bauteilsysteme (TABS) sind Rohrregister, die – im Gegensatz etwa zu Heizkörpern, zu in Trockenbausysteme eingebetteten Systemen oder zu abgehängten Kühldecken – in Bauteile der Gebäudestruktur integriert oder als oberflächennahe Rohrregister in den Deckenputz eingebracht werden.

Im Buch werden folgende Begriffe verwendet:

- Flächentemperierung als Oberbegriff für wasser durchströmte Überabesysteme, die Wärme bzw. Kälte vorteilhaft bei einer kleinen Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Wassertemperatur über eine (große) Fläche an den Raum abgeben
- Bauteilaktivierung oder auch thermoaktive Bauteilsysteme (TABS) für in die Decke, Fußboden oder Wand integrierte, wasser durchströmte Systeme zum Heizen und Kühlen
- Betonkerntemperierung (BKT) für Bauteilaktivierung in Mittellage.

Zur Bauteilaktivierung stehen zunächst alle Raum umschließenden Flächen zur Verfügung. Da sich die Anwendungsbereiche zwischen Fußboden- und Wandsystemen auf der einen und Deckensystemen auf der anderen Seite voneinander unterscheiden, werden im Folgenden nur in die Decke integrierte Systeme berücksichtigt. Viele Aspekte lassen sich jedoch einfach übertragen. In Nichtwohngebäuden (z. B. Bürogebäuden oder Schulen) finden sich fast ausschließlich in die Decke integrierte Systeme.

Bei der Herstellung der Betondecke werden Rohrleitungen verlegt, meist Kunststoffrohre. In eingeputzten Systemen kommen oft Kapillarrohrmatten zum Einsatz. Durch diese Rohre fließt Wasser als Heiz- bzw. Kühlmedium und aktiviert die Betondecke. Die massive Decke wirkt dabei gleichzeitig als Übertragungsfläche und thermischer Speicher. Zur Vermeidung lokaler Strahlungsasymmetrie werden die Systeme in der Regel im Heizfall mit Vorlauftemperaturen nicht über 28 °C und im Kühlfall selten unter 18 °C betrieben.

Die wasser durchströmte, deckenintegrierte Bauteilaktivierung ist eine Variante der Flächentemperierung. Sie hat sich heute in den Büro- und Verwaltungsbauten etabliert und wird meist genutzt, um im Winter eine Raumtemperatur zwischen 20 und 24 °C und im Sommer zwischen 23 und 26 °C zu gewährleisten, wobei die Schwankungen vor allem im Winter möglichst klein sein sollen. Im sommerlichen (Kühl-)

Betrieb werden zeitliche Temperaturänderungen bewusst genutzt und entsprechend in der Planung berücksichtigt.

Eine Sonderform ist die luftgeführte Bauteilaktivierung, die im Folgenden aber nicht beschrieben wird.

Der Begriff »Bauteilaktivierung« ist nicht in Normen oder Richtlinien eindeutig definiert und wird auch in der Planungs- und Baupraxis nicht einheitlich verwendet. Eine solche Einordnung wird in den *Kapiteln 2.2 und 2.3* vorgenommen.

Bauteilaktivierung als Möglichkeit zur Raumkühlung und -heizung

Häufig wird die Bauteilaktivierung in der Planung zunächst als Kühlkonzept diskutiert und bewertet. Nach dieser Systementscheidung ist es aber auch sinnvoll, die Bauteilaktivierung zum Heizen zu nutzen. Sowohl im Heiz- als auch im Kühlbetrieb kann eine Bauteilaktivierung sehr effizient betrieben werden.

Da die Betondecke über ihre gesamte Fläche Wärme aufnimmt bzw. abgibt, kann die Bauteilaktivierung mit vergleichsweise kleinen Temperaturdifferenzen zwischen Wärmeträgerfluid (Wasser) und Raum betrieben werden. Damit werden also die oben genannten niedrigen Vorlauftemperaturen zum Heizen und die hohen Vorlauftemperaturen zum Kühlen möglich, was wiederum den Einsatz von Wärmepumpen zum Heizen besonders effizient macht. Zum Kühlen können eine freie Rückkühlung (Nachtluft) oder das Erdreich bzw. Grundwasser genutzt werden. Kommt eine Kältemaschine zum Einsatz, erhöhen die geringen Temperaturdifferenzen deren Leistungszahl.

Da die Betondecke je nach Heiz- oder Kühlfall Wärme vom Wasser oder vom Raum aufnimmt und speichert, kommt es zu einer Phasenverschiebung zwischen Wärme- bzw. Kältebereitstellung für die TABS und der Wärme- bzw. Kälteübergabe an den Raum. Heiz- bzw. Kühllastspitzen im Raum werden so reduziert und gegenüber der Wärme- und Kältebereitstellung zeitlich verschoben. So kann beispielsweise im Sommer die nächtliche Abkühlung genutzt und der Betondecke Wärme entzogen werden. Tagsüber geben die Räume wieder die Wärme an die kühlen Bauteile ab. Im Winter kann dieser Effekt genutzt werden, um in den Nachtstunden dem Gebäude die Wärmegrundlast zuzuführen und tagsüber die Raumtemperatur bedarfsgerecht zu regeln. So kann die Erzeugungsleistung reduziert werden.

TABS ermöglichen die Reduzierung oder sogar den kompletten Verzicht auf konventionelle Heiz- und Kühlsysteme – zu Gunsten einer Nutzung von Umweltenergie aus dem Erdreich, dem Grundwasser oder der Außenluft, d.h. der Beheizung mit Wärmepumpen und der möglichst direkten Kühlung mit Umweltenergie.

Einmal jedoch gebaut, sind TABS zementierte Planung und Ausführung im wörtlichen Sinn, mit eigenen Grenzen der Leistungsfähigkeit und Regelbarkeit. Bei Standardanwendungen wie 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.

Ungenügende Annahmen zum Kühlbedarf in der Planung oder eine veränderte Gebäudenutzung lassen sich im späteren Gebäudebetrieb nur durch Nachinstallation eines Zusatzsystems, längere Betriebszeiten oder die aktive Konditionierung der Zuluft korrigieren. Es ist auch zu berücksichtigen, dass Räume mit hohen akustischen Anforderungen ein entsprechendes Raumakustikkonzept verlangen. Der Einsatz durchgehender abgehängter Decken mit dämmenden Elementen zur Gestaltung der Raumakustik (Nachhallzeit, Schallverteilung) ist in den Räumen mit Bauteilaktivierung nicht möglich bzw. in der Fläche und Anordnung stark eingeschränkt.

Bedingungen für den Einsatz der Bauteilaktivierung

Durch den Aufbau der Bauteilaktivierung und ihre Betriebsweise sind Heiz- und Kühlleistung beschränkt. Für einen erfolgreichen Einsatz sind also spezielle Randbedingungen zu berücksichtigen. Wenn sich die spezifischen Heiz- und Kühllasten durch architektonische und planerische Entscheidungen soweit reduzieren lassen, dass sie bei geringen Temperaturdifferenzen zwischen Raumluft und Übergabesystem bereitgestellt werden können, wird es möglich, bauteilintegrierte Heiz- und Kühlsysteme ohne Komforteinbußen einzusetzen.

Energie- und Leistungsbedarf für Heizung und Kühlung werden durch eine gut gedämmte und dichte Gebäudehülle, konsequent begrenzte solare Lasten (Sonnenschutzsysteme), eine effektive hygienische Lüftung mit Wärmerückgewinnung, ausreichende thermische Gebäudespeicherkapazität und begrenzte interne Lasten (effiziente Bürogeräte, Tageslichtnutzung) reduziert. Aufgrund der eingeschränkten Leistungsfähigkeit der Bauteilaktivierung ist ein integral geplantes Gebäudekonzept mit konsequenter Begrenzung der Heiz- und Kühllast also Grundvoraussetzung für deren Einsatz.

Nachtlüftung und thermoaktive Bauteilsysteme im Kühlbetrieb

Die Nachtlüftung kann eine wichtige Rolle im Kühlkonzept übernehmen – unabhängig davon, ob sie als mechanische, freie oder hybride Lüftung ausgeführt wird. Dabei ist in der Planung kritisch zu prüfen, inwieweit eine Nachtlüftung tatsächlich die Bauteilaktivierung unterstützt, denn die Oberflächentemperatur der Decke liegt normalerweise bereits unter der Raumtemperatur. Erst bei einer entsprechend niedrigen Außentemperatur kann die Nachtlüftung also einen Beitrag zur Kühlung liefern.

Die Erfahrung mit per Nachtlüftung gekühlten Niedrigenergie-Bürogebäuden zeigt, dass im Sommer angenehme Raumtemperaturen erreicht werden. Aber 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



Bild 1: Bauteilaktivierung für ein Seminargebäude in Passivhaus-Bauweise mit einer Hauptnutzfläche von ca. 3100 m²: Verlegung der Bauteilaktivierung, Anschluss der Versteller an der Decke (Bauphase) und (Grundwasser-)Wärmetauscher zur Kühlung des gesamten Büro- und Seminargebäudes [Quellen: Hochschule Offenburg (links) und Ulrich Marx (Mitte und rechts)]

unterstützte Nachtlüftung oft nicht aus, um tagsüber ein behagliches Raumklima zu gewährleisten [70].

Erheblich wirkungsvoller als die Nachtlüftung sind thermoaktive Bauteilsysteme [52]. Ihr Vorteil ist, dass man aufgrund der großen, kälteübertragenden Fläche bereits mit sehr kleinen Differenzen zwischen Decken- und Raumtemperatur effektiv kühlen kann. Die Kühlwassertemperaturen werden auf einen Bereich von (minimal) 16 bis 22 °C begrenzt und begünstigen so den Einsatz von Umweltwärmesensen (siehe *Bild 1*).

Bauteilaktivierung für energieeffiziente Gebäude

Bei der Planung nachhaltiger Gebäude hat sich seit den 1980er Jahren neben der aktiven Nutzung von Umweltenergie auch die Nutzung passiver Solargewinne im Winter und schließlich das Konzept der passiven Kühlung entwickelt. Ziel dieser passiven Bau- und Anlagentechnik war und ist es, durch bauliche Maßnahmen den Heiz- und Kühlenergiebedarf drastisch zu reduzieren und im besten Fall nahezu vollständig zu kompensieren. Die verbleibende Heiz- und Kühlenergie kann dann sehr effizient über verhältnismäßig klein dimensionierte Systeme bereitgestellt werden. Gebäude, die nach dem Passivhausstandard errichtet werden, nutzen entsprechende Heiz- und Kühlkonzepte. Ein prominentes Beispiel dieser frühen Effizienzhäuser ist das energieautarke Solarhaus ES in Freiburg aus dem Jahr 1992.

Aus den Erfahrungen mit energieeffizienten, integral geplanten Gebäuden hat sich in den 1990er Jahren unter anderem die Idee des isothermen Gebäudes abgeleitet. Durch Wärmeausgleich innerhalb des Gebäudes und – bei konsequenter Umsetzung des Planungsansatzes – Nutzung saisonaler Speicher erscheint es möglich, ganzjährig ein weitgehend ausgeglichenes Raumklima bereitzustellen. Die als Selbstregeleffekt beschriebene Wärmeübertragung bei kleinen Temperaturdifferenzen zwischen Raumluft und Übergabesystem macht die Flächentemperierung besonders interessant, um dynamische Wärmeströme aufzunehmen und so die Energiebilanz auszugleichen.

In der Planungspraxis hat sich seit den 2000er Jahren die »integrale Planung« etabliert: Für einen bestimmten Standort und ein definiertes Nutzungskonzept wird das Zusammenspiel zwischen Architektur, Bauphysik und Anlagentechnik [104] bedarfsgerecht abgestimmt. Ziel ist es, eine hohe Nutzungsqualität zu bieten, den Primärenergiebedarf für die Energiedienstleistungen Heizen, Kühlen, Lüften und Beleuchten zu reduzieren und diesen weitgehend durch lokale Energiebereitstellung zu decken.

In den 2010er Jahren errichtete Gebäude weisen verhältnismäßig geringe Heiz- und Kühllasten auf und können aufgrund ihrer Speichermasse Lastspitzen effektiv dämpfen. Damit bietet sich eine Bauteilaktivierung mit entsprechenden Wärmestromdichten zur Raumkonditionierung an. Die spezifischen Heiz- und Kühlleistungen sind durch den Aufbau der Bauteilaktivierung und aufgrund von Komfortbedingungen im Betrieb je nach System auf 30 bis 50 W/m² im Heizbetrieb und 50 bis 70 W/m² im Kühlbetrieb beschränkt. Diese Leistungen können durch auf die Bauteilaktivierung abgestimmte Zusatzsysteme im dynamischen Betriebsfall etwas erhöht werden. Damit ist es schließlich möglich, Umweltenergiequellen effizient zu nutzen.

Zunehmend werden auch die Vorteile der Bauteilaktivierung als thermisch trüges Übergabesystem diskutiert: So kann die Bauteilaktivierung zur Lastverschiebung genutzt werden, wenn eine (reversible) Wärmepumpe zum Einsatz kommt. Sowohl im Winter als auch insbesondere im sommerlichen Betrieb der Kältemaschine kann das Gebäude so zum Ausgleich von Mehr- und Minderlasten im Stromnetz genutzt werden. Dieses Konzept hat die Idee des »isothermen Gebäudes« mittlerweile abgelöst.

Kombination mit anderen gebäudetechnischen Systemen

Infolge der aktivierte Speichermasse ist eine Bauteilaktivierung ein trüges System, bietet aber gleichzeitig die Möglichkeit zur Lastverschiebung. Im Gegensatz zu thermoaktiven Bauteilsystemen sind abgehängte Flächentemperiersysteme wie geschlossene Metallkühldecken, Kühlsegel oder projektspezifische Einzellösungen leistungsfähiger, sie reagieren thermisch schneller und können so vorteilhaft eine Bauteilaktivierung ergänzen.

In vielen Gebäuden mit Bauteilaktivierung wird diese im Winter durch konventionelle Radiatoren unterstützt. Dieses Konzept ist allerdings aufgrund der damit einhergehenden Doppelinstallation und der Betriebsführungsstrategie kritisch zu hinterfragen. Eine zusätzliche Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung reduziert den Heiz- und Kühlenergiebedarf [kWh/(m²a)] sowie die spezifische Leistung [W/m²] der TABS und gleicht kurzzeitige Leistungsspitzen aus.

Die Kombination der Bauteilaktivierung mit einem regelbaren und schnell reagierenden Zusatzsystem (oberflächennahe TABS oder abgehängte Systeme) ist dann

sinnvoll, wenn in den Nutzungsbereichen erhöhte Komfortanforderungen gefordert sind oder sich die Nutzungsbedingungen ändern. Das zusätzliche Kühlsystem sollte dabei möglichst auf dem gleichen Temperaturniveau wie die Bauteilaktivierung betrieben werden. Dies ermöglicht die Nutzung des gleichen Verteilsystems und spart damit Investitionskosten.

Die Vorteile einer Bauteilaktivierung können also besonders gut genutzt werden, wenn dieses Übergabesystem mit anderen Übergabesystemen kombiniert wird. Hier sind insbesondere

- die Wechselwirkung zwischen Lüftungsanlagen und Bauteilaktivierung und
- das Zusammenspiel unterschiedlicher Flächentemperiersysteme

zu nennen.

Marktanteil der Bauteilaktivierung

Der Wunsch nach einem komfortablen Raumklima, verbunden mit der Forderung nach einem möglichst geringen Energieverbrauch und einer verbreiteten Skepsis gegenüber konventionellen Klimaanlagen, unterstützt die Entwicklung hin zu wassergeführten thermoaktiven Bauteilsystemen (TABS).

Eine Marktanalyse aus dem Jahr 2007 dokumentierte, dass in diesem Jahr allein in Deutschland rund 845 000 m² thermisch aktivierbare Flächen in Büro- und Verwaltungsgebäuden neu installiert wurden. Davon hatten Kühldecken und Bauteilaktivierung in etwa den gleichen Marktanteil. Knapp 60% der Büroneubauten wurden 2007 über Flächentemperiersysteme gekühlt und teilweise im Winter geheizt.

Die Autoren einer gemeinsamen Studie von Prognos und Öko-Institut gehen davon aus, dass spätestens ab 2015 alle Neubauten im GHD-Sektor (Gewerbe, Handel und Dienstleistungen) mit Klimaanlagen ausgerüstet sind und auch im Bestand in erheblichem Maße Nachrüstungen erfolgen werden.

Andere Studien erwarten für Geschäfts- und Bürogebäude voraussichtlich bis 2020 sogar einen Anstieg der Kühlung auf 70% des Gebäudebestandes. Begründet wird dies mit einem verstärkten Auftreten heißer Sommer und der zunehmenden Ausstattung von Dienstleistungsgebäuden mit Klimaanlagen.

Im Jahr 2013 wurden allein in Deutschland 750 000 m² Bauteilaktivierung neu installiert. Bei Kosten für die reine Bauteilaktivierung (ohne Wärme- und Kältebereitstellung) von ca. 20 €/m² entspricht dies einem jährlichen Marktvolumen von 15 Mio. €.

Damit haben sich thermoaktive Bauteilsysteme – seit der Realisierung erster Projekte in den 1980er Jahren in der Schweiz – als innovative Systeme zur Flächenheizung und -kühlung mit großem wirtschaftlichem und ökologischem Potenzial etabliert. Viele erfolgreiche und gut funktionierende Beispiele zeigen dies.

2 Raumkonditionierung mit Bauteilaktivierung

Dieses Kapitel stellt die Bauteilaktivierung als System vor und grenzt es gegenüber anderen Übergabesystemen zur Raumheizung und -kühlung ab. Es werden Einsatzmöglichkeiten und -grenzen für thermoaktive Bauteilsysteme diskutiert und Planungsgrundlagen eingeführt.

2.1 Flächentemperiersysteme an und in der Decke

Büro- und Verwaltungsgebäude werden seit Langem zur allgemeinen Nutzerzufriedenheit mit Flächensystemen beheizt und gekühlt. Ältester Vertreter ist die Fußbodenheizung, hinzu kamen Wandheizsysteme. Beide lassen sich innerhalb bestimmter Grenzen auch zur Raumkühlung verwenden. In Nichtwohngebäuden haben sich aus praktischen Gründen in vielen Fällen deckenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme durchgesetzt.

Am Anfang der Flächentemperiersysteme, die vornehmlich der Raumkühlung dienen, stand die abgehängte, geschlossene Kühldecke, die sich wegen ihrer hohen Kundenakzeptanz in ganz Europa verbreitet hat. Abgehängte, offene Kühlsegel sind eine Systemvariante, in der die Decke in großen Teilen sichtbar bleibt und thermisch aktiviert werden kann.



Bild 2: Projektbeispiele für Flächentemperiersysteme: Bauteilaktivierung mit Randstreifenelement [Quelle: Zent Frenger GmbH], abgehängte, offene Kühlsegel vor der Endmontage [Quelle: Zent Frenger GmbH] und abgehängte, geschlossene Kühldecke [Quelle: Fraunhofer ISE]

Eine weitere, sehr verbreitete Anwendungsform der Deckenkühlung ist die thermische Aktivierung von Betondecken. Dass diese nach dem Strahlungsprinzip funktionierenden Systeme auch zur Beheizung von Gebäuden geeignet sind, stellen viele erfolgreich ausgeführte Bauprojekte eindrucksvoll unter Beweis.

Obwohl sowohl die abgehängte als auch die bauteilintegrierte Systemvariante 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.

Geschlossene Kühldecke und offene Kühlsegel

Abgehängte, von der Baukonstruktion entkoppelte Heiz- und Kühldecken können entweder als geschlossene Kühldecke oder als hinterströmtes, offenes Kühlsegel ausgeführt werden.

Geschlossene, abgehängte Kühldecken übernehmen oft neben der thermischen Funktion die architektonische Aufgabe der Deckenverkleidung und der Verbesserung der Raumakustik. Sie werden üblicherweise auf 100% der erforderlichen Raumkühllast (oder in Abstimmung mit der Lüftungstechnik entsprechend geringer) ausgelegt und meist nach einer individuell eingestellten Raumtemperatur geregelt. Geschlossene Kühldecken nutzen die thermische Speicherfähigkeit der darüber liegenden Betondecke nicht aus, sodass anfallende Lasten praktisch zeitgleich mit ihrer Entstehung abgeführt werden müssen.

Offene Deckenkühlsegel können mit Betondecken eine sinnvolle Symbiose eingehen, wenn deren jeweilige Eigenschaften in ein technisches Gesamtkonzept eingebunden werden. Baupraktisch bedeutet dies, dass mehrere Gewerke koordiniert werden müssen. Deckenkühlsegel (auch für den Heizbetrieb) können zudem mit integrierter Zulufteinbringung, 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 (siehe Kapitel 2.6).

Nutzung der Betondecke als Wärmespeicher

Geschosstrenndecken in massiver Betonbauweise eignen sich bestens als thermischer Speicher für die Heizung und Kühlung. Mit den Bauteileigenschaften einer typischen Betondecke mit einer Dichte von $\rho = 2070 \text{ kg/m}^3$, einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 1,98 \text{ W/(mK)}$ und einer spezifischen Wärmekapazität von $c = 990 \text{ J/(kgK)}$ ergibt sich bei einer periodischen Anregung von 24 Stunden und einem kombinierten Wärmeübergangskoeffizienten $h_t = 12 \text{ W/m}^2\text{K}$ 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°C morgens und 26°C nachmittags

zugelassen, so kann die Betondecke eine Wärmemenge von knapp $160 \text{ Wh}/(\text{m}^2_{\text{NGF}} \text{d})$ speichern. Das entspricht beispielsweise der Energie einer Kühllast von $50 \text{ W}/\text{m}^2_{\text{NGF}}$ über rund drei Stunden.

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

Bauteilaktivierung

Zur thermischen Bauteilaktivierung werden meist Rohrregister aus Kunststoffrohren in der statisch neutralen Zone der Betondecke verlegt (auch als »Betonkerntemperierung« bezeichnet). Durch die Rohre zirkuliert temperiertes Wasser, das die Betondecke auf das vorgesehene Temperaturniveau bringt. Typische Kerntemperaturen in der Betondecke liegen im Sommer bei 19°C und im Winter zwischen 24 und 26°C . Wegen der hohen thermischen Trägheit und des so genannten »Selbstregeleffektes« schwankt die sich einstellende Raumtemperatur, je nach Raumlast und Beladungszustand der Betondecke, um bis zu 3 – 4 K, was aufgrund der hohen Trägheit mit dem System selbst nicht zuverlässig ausgeregelt werden kann.

Eine inzwischen in vielen Gebäuden bewährte Ergänzung für die Betonkerntemperierung sind so genannte Randstreifenelemente in bzw. an der Decke. Randstreifen-elemente werden als betonintegrierte Ausführung oder Kühldeckensegel (abgehängtes System) ausgeführt. Sie arbeiten ebenfalls nach dem Strahlungsprinzip und werden entlang der Fassade angeordnet, um dort die Strahlungstemperaturdifferenzen im Sommer und Winter auszugleichen. Ein wesentlicher Vorteil der Randstreifen-elemente, die typischerweise etwa 30 – 40 % der jeweiligen Raumheiz- oder Kühllast abdecken, besteht darin, dass mit Hilfe dieser Bauteile eine individuelle Regelung der Raumtemperatur möglich wird. Während die Betondecken häufig in den Nachtstunden über die Betonkerntemperierung geladen werden, erfolgt der Betrieb der thermisch autarken Randstreifenelemente während der Nutzungszeiten tagsüber. Diese Elemente werden vorteilhaft über einen separaten hydraulischen Anschluss im 3- oder im 4-Leitersystem versorgt.

2.2 Raumflächenintegrierte bzw. eingebettete Heiz- und Kühlsysteme in der Normung

Eine Vielzahl von Normen und Richtlinien regeln Planung, Auslegung und Installation von Flächentemperiersystemen. Für den Planer werden die einzelnen Normen und ihre Verknüpfung schnell unübersichtlich. Die Systemhersteller bzw. Anbieter gewährleisten in ihren Planungs- und Montagehandbüchern allerdings eine Konformität mit diesen Normen und Richtlinien. Im Folgenden werden die System-

unterscheidungen und Bezeichnungen aus drei wesentlichen Normen und Richtlinien vorgestellt: DIN EN 1264 [12], DIN EN 15377 [19] sowie VDI 6034 [101].

2.2.1 DIN EN 1264: Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung

Nach DIN EN 1264, Blatt 1 [12] ist ein »raumflächenintegriertes Heiz- und Kühlsystem« folgendermaßen definiert:

»Heiz- oder Kühlanlage, die in die Raumumschließungsflächen des zu heizenden/ kühlenden Raumes eingebettet ist, bestehend aus Heizkreisrohren, Verteilern und Regeleinrichtungen.«

Inhaltlich behandelt diese Norm allerdings nur die in ihrem Anhang A definierten Fußbodensysteme (mit Dämmschicht unter den Heiz- bzw. Kühlrohren), mit Rohren innerhalb des Estrichs (Typ A und C) und unter dem Estrich (Typ B) sowie Systeme mit Flächenelementen (Typ D), siehe *Bild 3*.

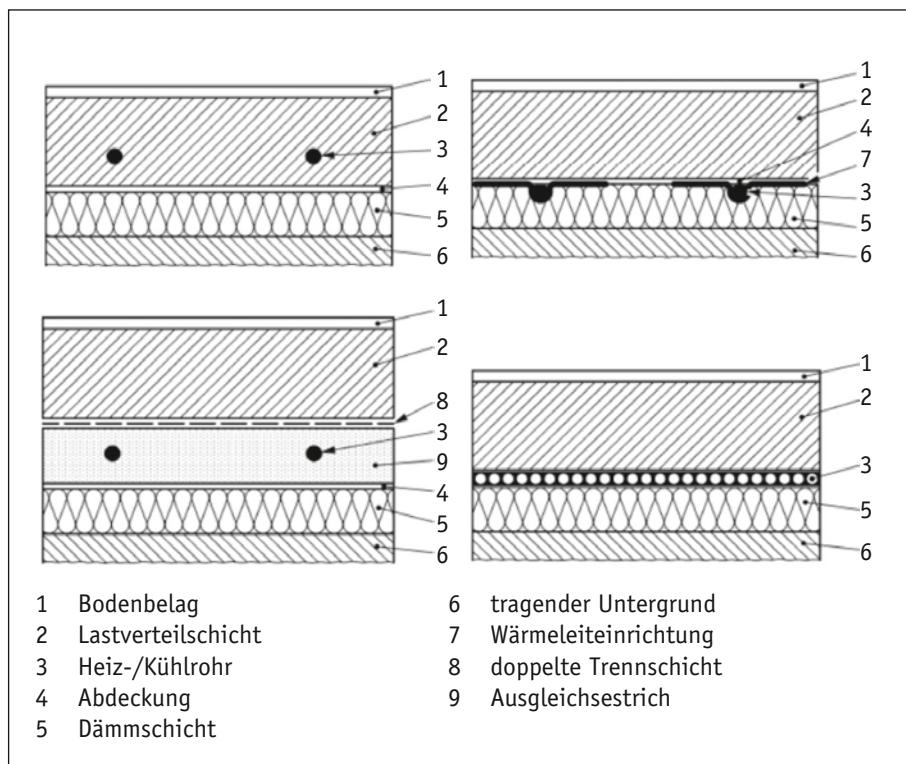


Bild 3: Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme nach DIN EN 1264, links oben: Typ A, rechts oben: Typ B, links unten: Typ C und rechts unten: Typ D [12]

2.2.2 DIN EN 15377: Planung von eingebetteten Flächenheiz- und -kühlsystemen mit Wasser als Arbeitsmedium

Nach DIN EN 15377, Blatt 1 [19] ist ein »eingebettetes Flächenheiz- und -kühl- system« wie folgt definiert:

»System, das aus in eine Fußboden-, Wand- oder Deckenkonstruktion eingebetteten Rohrkreisen sowie Verteilern und Regelungseinrichtungen besteht.«

Diese Definition unterscheidet sich zunächst nur unwesentlich von derjenigen in DIN EN 1264. Folglich verweist DIN EN 15377 auf das in DIN EN 1264, Blatt 2 [12] vorgestellte Berechnungsverfahren für die dort definierten Fußbodensysteme der Typen A bis D.

Darüber hinaus behandelt DIN EN 15377 drei weitere Systemtypen. Typ E (in eine massive Betonschicht eingebettete Rohre) und Typ F (in eine Schicht an der raumseitigen Oberfläche eingebettete Kapillarrohre) sind in Bild 4 dargestellt. Mit Typ G werden in Holzkonstruktionen eingebettete Rohre beschrieben.

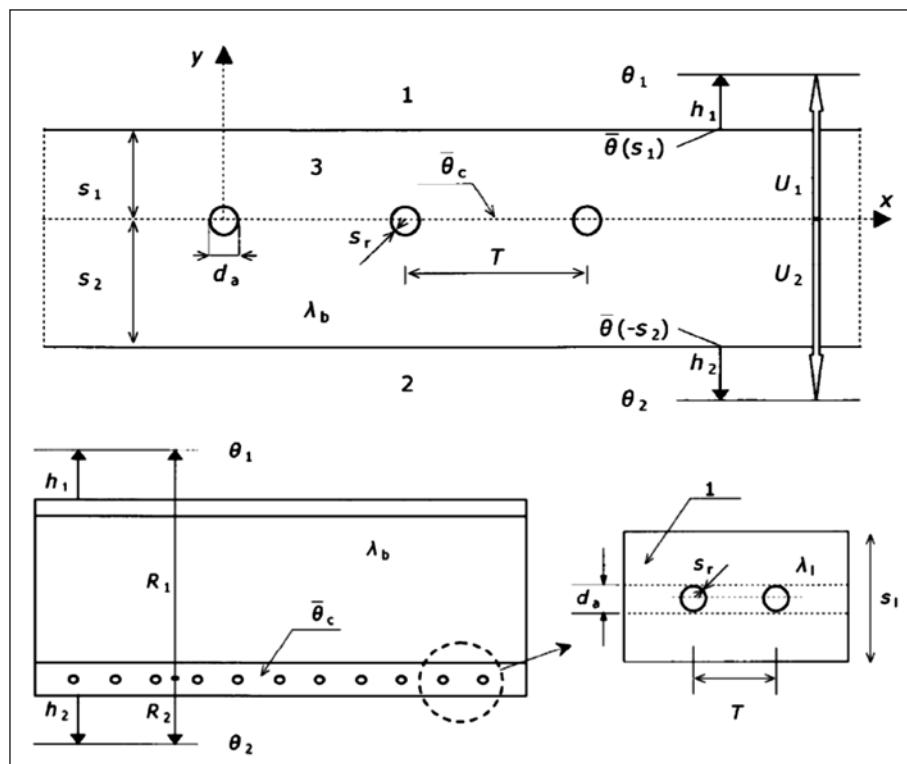


Bild 4: Eingebettete Heiz- und Kühlsysteme nach DIN EN 15377, oben: Typ E, unten: Typ F [19]. Hier werden Temperaturen abweichend von ϑ mit θ bezeichnet.

In Blatt 3 der DIN EN 15377 werden die Begriffe »thermoaktives Bauteilsystem« (TABS) und »Bauteilaktivierung« synonym verwendet für » [...] ein Heiz- und Kühl- system mit Wasser als Arbeitsmedium, dessen Rohre in den zentralen Betonkern eines Gebäudes eingelassen sind.«

2.2.3 VDI 6034: Raumkühlflächen – Planung, Bau und Betrieb

In VDI 6034 [101] sind Raumkühlflächen folgendermaßen definiert:

»Raumkühlflächen im Sinne dieser Richtlinie sind den Raum begrenzende Flächen (Decken, Wände, Böden), die zur gezielten Kühlung eingesetzt werden können. Weiter gelten als Raumkühlflächen großflächige, von der Decke abgehängte oder den Wänden vorgesetzte Kühlflächen sowie großflächige Kühlflächen, die als Raumteiler aufgestellt sind. Diese Flächen weisen einen nennenswerten Strahlungsanteil auf.«

Bild 5 stellt die Systeme gemäß VDI 6034 schematisch dar.

2.3 Definition von Bauteilaktivierung bzw. thermoaktiven Bauteilsystemen

Die vorstehend beschriebenen Normen und Richtlinien beziehen sich durchweg auf flüssigkeits- bzw. wasserdurchströmte Systeme. Ferner werden in DIN EN 15377, Blatt 3 und in VDI 6034 ausschließlich Systeme im (zentralen) Betonkern als (thermische) »Bauteilaktivierung« bzw. »thermoaktive Bauteilsysteme« (TABS) bezeichnet. Die Systeme F nach DIN 15377, Blatt 1 bzw. D2 und W2 nach VDI 6034 sowie D3 und W3 nach VDI 6034 fallen dort nicht unter Bauteilaktivierung oder TABS; die mitunter eingesetzte Variante von fußbodennahen Rohrsystemen im Beton oder im Estrich ohne Wärmedämmung ist gar nicht aufgeführt. Mit der Betonkerntemperierung haben diese Systeme die feste bauliche Verbindung mit den Massivbauteilen des Baukörpers gemeinsam. Aufgrund des Fehlens einer Wärmedämmung zum Baukörper hin ist zudem die Nutzung von dessen Speicherfähigkeit vergleichbar. Ferner ist der Übergang zwischen ihnen und der Betonkerntemperierung in Abhängigkeit von der Lage der Heiz-Kühl-Rohre fließend, und die Grundmechanismen der Wärmeübertragung und -speicherung gleichen einander. Deshalb wird in diesem Buch die folgende Definition verwendet:

»Thermoaktive Bauteilsysteme (TABS) und (thermische) Bauteilaktivierung sind synonyme Begriffe. Unter diese fallen alle Rohrsysteme zur Heizung und zur Kühlung, die in Betonbauteile oder andere Massivbauteile integriert sind oder sich in einem ohne zwischenliegende Wärmedämmung auf derartigen Bauteilen aufgebrachten Putz oder Estrich befinden und so Oberflächen und Speichermasse der Bauteile gleichermaßen nutzen.«

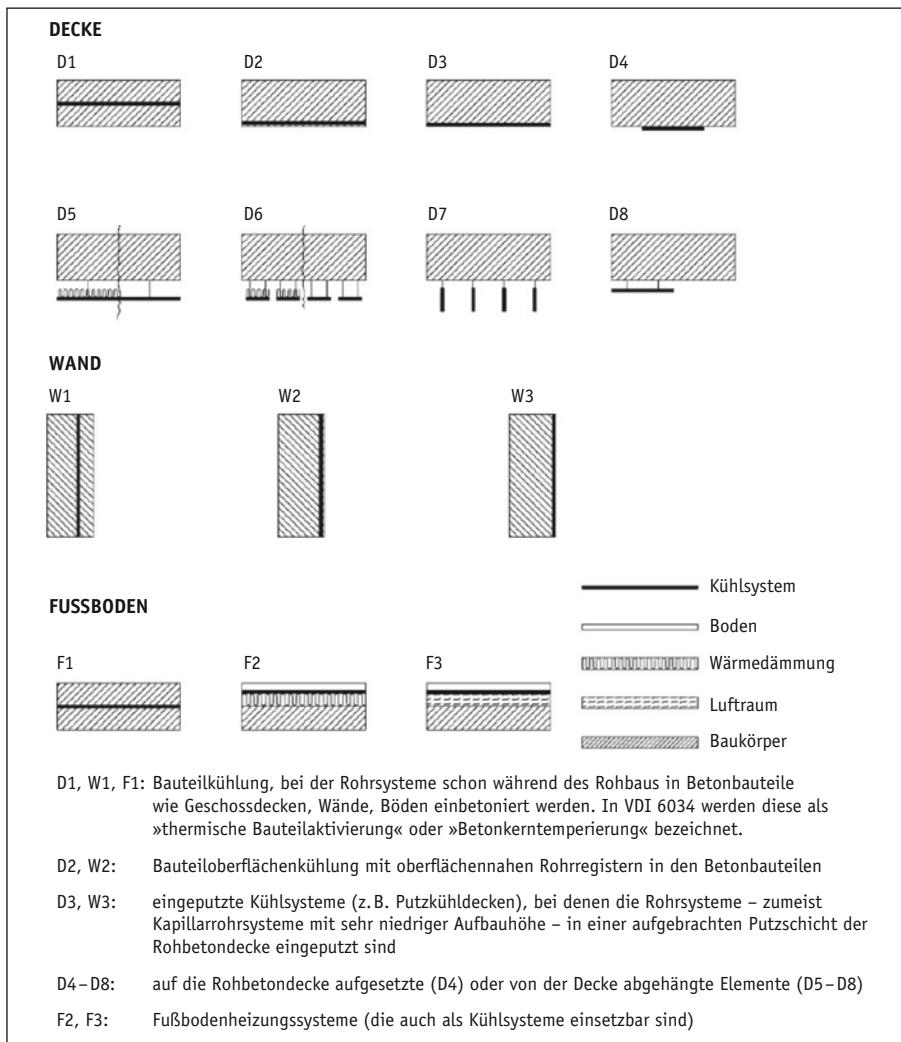


Bild 5: Raumkühlflächen nach VDI 6034 [101]

Diese Definition umfasst zunächst gleichermaßen Decken-, Boden- und Wandbauteile sowie Systeme mit flüssigen Arbeitsmedien (Wasser) als auch mit dem Arbeitsmedium Luft. Insbesondere fallen darunter die Typen E und F nach DIN EN 15377, siehe Bild 4, sowie die Systeme D1 bis D3, W1 bis W3 und F1 nach VDI 6034, siehe Bild 5. Nicht unter Bauteilaktivierung in diesem Sinne fällt Typ G nach DIN 15377 mit in Holzkonstruktionen eingebetteten Rohren, weil die Rohre hierbei nicht fest mit dem Bauteil verbunden sind. Ebenso zählen übliche Fußbodenheizungen – d.h. die Typen A bis D nach DIN EN 1264 sowie F2 und F3 nach VDI 6034 – nicht zur Bauteilaktivierung, weil sie mit einer rückseitigen Wärmedämmung bzw. trennenden Luftsicht versehen sind.

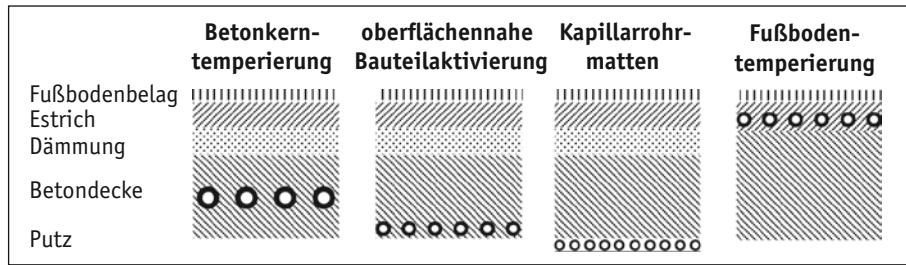


Bild 6: In diesem Buch behandelte thermoaktive Bauteilsysteme (TABS) bzw. Bauteilaktivierung in Decke/Boden: Betonkerntemperierung, oberflächennahe Bauteilaktivierung, eingeputzte Kapillarrohrmatten, Fußboden temperierung als TABS

Nach dieser Definition zählen so genannte Randstreifenelemente in der Decke ohne Dämmung nach oben zur Bauteilaktivierung, während solche mit Dämmung streng genommen nicht als Bauteilaktivierung gelten. Da diese Elemente aber häufig in dieser Form als dynamische Systeme eingesetzt werden, soll hier die Definition aus praktischen Gründen alle bauteilintegrierten Randstreifenelemente berücksichtigen. Aufgesetzte oder im Trockenbau integrierte Systeme sind aber ausdrücklich keine Bauteilaktivierung.

Innerhalb der so definierten thermoaktiven Bauteilsysteme bzw. Bauteilaktivierung fokussiert dieses Buch auf die Behandlung von Decken- und Bodensystemen, die mit Wasser betrieben werden. Diese sind in *Bild 6* dargestellt. Auch die Kombination der gezeigten Systeme zu zweilagigen Systemen ist denkbar und wird in bestimmten Fällen eingesetzt.

2.4 Aufbau und Montage von thermoaktiven Bauteilsystemen

Bild 7 zeigt Beispiele aus der Bauphase von TABS. Bei der Betonkerntemperierung (BKT) kommen Rohrdurchmesser von meist 14 bis 20 mm zum Einsatz, in Einzelfällen auch größere. Die Rohre liegen in Abständen von 15 bis 30 cm meist in mittlerer Höhe innerhalb der statisch neutralen Zone der Betondecke. Oberflächennahe TABS werden mit Rohrdurchmessern von meist 10 bis 14 mm und ähnlichen oder auch geringeren Rohrabständen von 7,5 cm ausgeführt. Als Rohrschlangen werden in diesen Fällen im Regelfall Kunststoffrohre aus vernetztem PE (PEX) eingesetzt, häufig als Mehrschichtverbundrohre, z. B. mit Aluminium.

Die Rohre von Kapillarrohrmattsystmen sind mit ca. 3–5 mm deutlich dünner. Im Regelfall wird hierbei Polypropylen (PP) als Rohrwerkstoff eingesetzt, welches nicht diffusionsdicht gegenüber Sauerstoff ist. Um Korrosion und damit Verschlammung oder weitergehende Schäden zu vermeiden, müssen in diesen Fällen alle Bauteile in den Anbindekreisen der Kapillarrohrmatten aus korrosionsbeständigen



Bild 7: Thermoaktive Bauteilsysteme in der Bauphase 1: Rohrregister zwischen oberer und unterer Bewehrung [Quelle: Fraunhofer ISE], zweilagig mit mittiger und oberflächennaher Verlegung [Quelle: Hochschule Offenburg] und Kapillarrohrmatten vor dem Verputzen [Quelle: Fraunhofer ISE]

Werkstoffen bestehen, und mit einem korrosionsbeständigen Wärmeübertrager muss eine Systemtrennung zur restlichen Anlage erfolgen.

Bei den einbetonierten Systemen mit PEX-Rohren werden sauerstoffdiffusionsdichte Rohre nach DIN 4726 (z.B. Verbundrohre mit Aluminium oder Mehrschichtrohre aus Kunststoff) verwendet, um die Notwendigkeit einer Systemtrennung in Primär- und Sekundärkreis zu vermeiden. Bei sehr großen Anlagen sollte trotzdem auf die spezifischen Eigenschaften des jeweils verwendeten Rohrmaterials geachtet werden, da bei entsprechenden Rohrlängen in der Anlage auch eine zulässige Restdiffusion von Sauerstoff zur Verschlammung führen kann, siehe auch *Kapitel 4.4*. Von den einschlägigen Herstellern speziell für das Einbetonieren angebotene PEX-Rohre sind darüber hinaus den mechanischen Belastungen bei der Montage, beim Betonievorgang und beim langjährigen Betrieb gewachsen. PE-Xa-Rohre weisen bei Betriebstemperaturen von max. 30 °C eine sehr hohe Zeitstandfestigkeit mit Sicherheitsbewerten von über 6 noch nach 50 bis 100 Jahren auf [102].

Bei Bauteilaktivierungssystemen auf dem Rohfußboden und an der Rohdecke erfolgt die Installation (d. h. die Verlegung und das Eingießen bzw. Einputzen) grundätzlich genauso im Rahmen des Ausbaus wie bei anderen vergleichbaren und seit Langem üblichen Arbeiten (z. B. Fußbodenheizung, Unterputzverlegung von Installationen). Auch die Installation gebäudetechnischer Komponenten im Beton (z. B. Lüftungsrohre, Elektroleerrohre, Elektroleitungen, Leuchten usw.) ist nicht neu. Trotzdem existierten anfangs Bedenken und Unsicherheiten hinsichtlich der Qualitätssicherung im Bauablauf bei der Betonkerntemperierung. Diese sind inzwischen ausgeräumt; erfahrene Firmen haben den Bauablauf und die Qualitätssicherung bei der Erstellung von Massivbauteilen mit integrierten TABS im Griff. TABS in Betondecken und -böden werden in den folgenden Schritten montiert, ohne dass dies den Bauablauf verzögern muss [66]:

- Herstellung der Deckenschalung
- Einbringen der unteren Bewehrungslage



Bild 8: Thermoaktive Bauteilsysteme in der Bauphase 2: vorgefertigte Rohrregister (hier: sechs Stück auf der Schalung für ein Betonfertigteile), Druckprüfung, Deckenschluss mit Setzkasten (hier: von oben vor dem Betonieren; in *Bild 1*: von unten nach dem Betonieren) [Quelle: Hochschule Offenburg]

- Installation von Setzkästen auf der Schalung zum Führen der Leitungen aus der Decke für die Anbindung (siehe *Bild 8*)
- Installation der TABS-Rohre
- Setzen der Abstandsböcke für die obere Bewehrungslage
- vertikale Justierung der TABS-Rohrregister in der gewünschten Lage
- Betonieren.

Die Installation der TABS-Rohre im Deckenaufbau als Rohrregister kann zwar durch Verlegen der Rohre auf bauseits vorhandenen Baustahlmatten erfolgen; zweckmäßiger und inzwischen üblich ist jedoch die Verwendung von im Werk auf Baustahlmatten vorgefertigten Registern (siehe *Bild 8*). Neben einer drastischen Verkürzung der Montagezeit erlaubt dies auch die Verlegung bei niedrigen Außentemperaturen, weil die Rohre bereits im Werk gebogen wurden.

2.5 Qualitätssicherung auf der Baustelle und Abnahme

Die Installation einer Bauteilaktivierung bedeutet, dass Rohbau und technischer Ausbau für viele Projektbeteiligte in ungewohnter Weise miteinander verknüpft sind.

Zudem sind in Betondecken installierte Rohre nach dem Betonieren nicht mehr bzw. nur im Notfall einer Leckage mit hohem Aufwand zugänglich. Außerdem stellt die Anschlussstelle der TABS-Rohre häufig eine Schnittstelle zwischen verschiedenen Gewerken oder Firmen dar, z. B. wenn die Rohbau-Firma die Betondecke inklusive der verlegten TABS-Rohre liefert. Deshalb ist vor dem Betonieren eine einvernehmliche Sichtabnahme der TABS-Rohrregister auf korrekte Verlegung (Rohrabstände,

Verlegetiefe, korrekte Rohrlängen und Lage der Kreise, Anschlussstellen, korrekte Fixierung) und Beschädigungen vorzunehmen. Es folgt eine Druckprüfung, z. B. mit Luft unter 7 bis 10 bar, die während des Betonierens und darüber hinaus fortgeführt wird, d. h. die Rohre bleiben unter Druck.

Baustellenschäden (siehe *Kapitel 8.4*) lassen sich durch Beachtung der entsprechenden Regeln vermeiden, was eine kundige und aufmerksame Bauleitung voraussetzt.

Die Abnahme der betriebsfertigen Anlage sollte z. B. nach VDI 6031 [100] erfolgen, d. h. neben den vorstehend genannten Punkten müssen auch die Einregulierung der Hydraulik geprüft werden sowie ein Leistungsnachweis (z. B. auch rechnerisch anhand der nachgewiesenen Installation und sonstiger Betriebsdaten) und Temperaturmessungen (insbesondere Wasser- und Bauteiloberflächentemperatur, Raumluft- und Raum- bzw. Globetemperatur) erfolgen. Neben entsprechenden berührenden Temperaturfühlern ist für Oberflächentemperaturen auch die thermografische Temperaturmessung geeignet. Der Einsatz einer Thermografiekamera hat sich darüber hinaus bei der Lecksuche bewährt. Im Normalbetrieb einer unbeschädigten Betonkerntemperierung lassen sich die einzelnen Rohre allerdings nicht thermografisch orten. Hierfür existieren jedoch spezielle Suchgeräte.

2.6 Einsatz von Kühlsegeln mit thermischer Aktivierung der Betondecke

Kühldecken und Kühlsegel werden nicht den thermoaktiven Bauteilsystemen zugeordnet, weil diese nicht ins Bauteil integriert werden. Abgehängte Kühlsegel bieten allerdings die Möglichkeit,

- eine »Bauteilaktivierung« auch in der Sanierung umzusetzen,
- die Leistung einer Bauteilaktivierung zu erhöhen und deren Regelbarkeit zu verbessern.

Da diese Systeme die Speicherfähigkeit der Betondecke nicht unterbinden sondern vielmehr nutzen, sollen sie hier als Alternativ- bzw. Zusatzsystem vorgestellt werden.

Im Unterschied zu geschlossenen Kühldecken sind Deckenkühlsegel hinsichtlich ihrer Abmessungen und Anordnung im Wesentlichen auf die thermische Funktion beschränkt. Deshalb bleiben Teilflächen der Betondecke unverkleidet, sodass bei entsprechender Temperaturdifferenz zwischen deren Oberfläche und der Raumtemperatur die Wärmespeicherkapazität ihrer unverkleideten Teile zur Entfaltung kommen kann. Darüber hinaus ist eine deutliche Leistungssteigerung der Deckenkühlsegel zu beobachten, wenn diese 10 bis 16 cm von der Betondecke abgehängt werden und somit frei umströmt werden können.

Deckenkühlsegel mit zusätzlichen Kontaktprofilen zwischen Deckensegel und Betondecke sollen die Wärmeübertragung dazwischen verbessern, um direkt die Wärmespeicherfähigkeit zu nutzen. In der Praxis hat sich allerdings gezeigt, dass ein gut wärmeleitender Kontakt zwischen einer Metallschiene und der Rohbetondecke sehr montageaufwändig ist und wegen der üblichen Bautoleranzen nur unzureichend hergestellt werden kann.

Bei Deckenkühlsegeln mit einem zusätzlichen wassergekühlten Konstruktionsprofil ist der Strahlungswärmeaustausch zur darüber liegenden Decke im Wesentlichen auf das periphere Konstruktionsprofil begrenzt. Mit einem integrierten Luftauslass kann der konvektive Anteil der Wärmeübertragung zur Betondecke etwas gesteigert werden. Erst die Aktivierung der Oberseite erhöht die Leistung deutlich.

Die thermische Kopplung zur Betondecke kann dann nennenswert nutzbar gemacht werden, wenn das Deckenkühlsegel eine zusätzliche glattflächige Strahlungsfläche auf der Oberseite erhält. Entsprechend der Temperaturdifferenz zwischen dem aktiven Deckenkühlsegel und der passiven Betondecke 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 Deckenkühllement absorbiert mit der dem Raum zugewandten Seite die Wärmestrahlung der Raumumschließungsflächen und steht zusätzlich mit seiner Oberseite in direktem Strahlungsaustausch mit der Betondecke. Auch der konvektive Leistungsanteil ist größer als bei geschlossenen Kühldecken, denn die offene Bauform intensiviert die freie Konvektion.

Praxisnahe Messungen in einem thermisch schweren, in Beton ausgeführten Versuchsraum [74] mit einer aufwändigen Datenauswertung belegen die Leistungsfähigkeit von beidseitig aktivierten Kühlsegeln in Kombination mit der Betondecke und zeigen beispielhaft das Zusammenwirken von Speicherfähigkeit und Wärmeübertragung. Die Leitungsführung ist in beidseitig aktivierten Kühlsegeln mittig so angeordnet, dass Ober- und Unterseite thermisch möglichst gleichmäßig aktiviert werden. Durch Verzicht auf eine Dämmung bzw. ein Akustikvlies auf der oberen Seite wird die Wärmeübergabe deutlich erhöht. Im stationären Zustand konnten unter Normbedingungen die technischen Angaben zur Kühlleistung dieser Elemente mit $110 - 130 \text{ W/m}^2$ bei $\Delta\vartheta = 9,15 \text{ K}$ bestätigt werden. Die Kühlleistung ist damit also deutlich höher als bei einer Bauteilaktivierung.

Wird der Raum während der Nacht gekühlt und die Raumtemperatur während der Betriebszeit geregelt, stellt sich während der Anwesenheitszeit eine mittlere Raumtemperatur von $25,2^\circ\text{C}$ ein (siehe Bild 9). In diesem Szenario betragen Küllast und abgeführte Kühlenergie $500 \text{ Wh/m}^2\text{d}$. Von 22:00 bis 06:00 Uhr werden 228 Wh/m^2 bei einer Vorlauftemperatur von 18°C (typischer Wert für eine freie Kühlung) abgeführt und von 08:00 bis 20:00 Uhr 272 Wh/m^2 bei einer Vorlauftemperatur von 16°C .

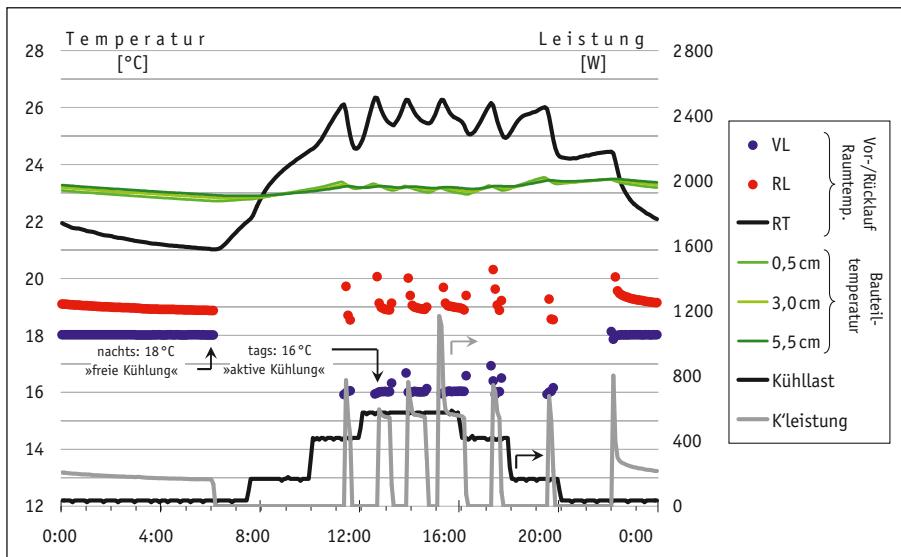


Bild 9: Kühlbetrieb in der Nacht mit 18°C und am Tag mit 16°C mit typischem Kühllastprofil [Quelle: Fraunhofer ISE]

(typischer Wert für eine maschinelle Kühlung). Die Bauteiltemperaturen werden oberflächennah, in 3 cm und in 6 cm Höhe gemessen. Es ist deutlich zu erkennen, wie die Temperaturamplitude von der Oberfläche (Messstelle in 0,5 cm Bauteiltiefe) ausgehend in das Bauteil eindringt. Die Temperaturschwankung vor und nach der Nachtkühlung liegt in der Mitte der 6 cm starken Schicht (Messstelle in 3 cm Bauteiltiefe) bei 0,7 K und beträgt in diesem Beispiel in 5,5 cm Tiefe noch 0,5 K.

Die operative Raumtemperatur liegt wegen der kühlen Oberfläche immer unter der Lufttemperatur, die sich zwischen Kühlsegel und Betondecke erwartungsgemäß etwa als Mittelwert der beiden Oberflächentemperaturen einstellt (nicht im Bild dargestellt). Mit Hilfe von Thermografieaufnahmen und einer Strömungsvisualisierung konnte die sich daraus entwickelnde Raumluftwalze messtechnisch nachgewiesen werden. Bild 10 skizziert die dreidimensionale Raumluftwalze schematisch. Die Hauptströmungspfade entwickeln sich 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.

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

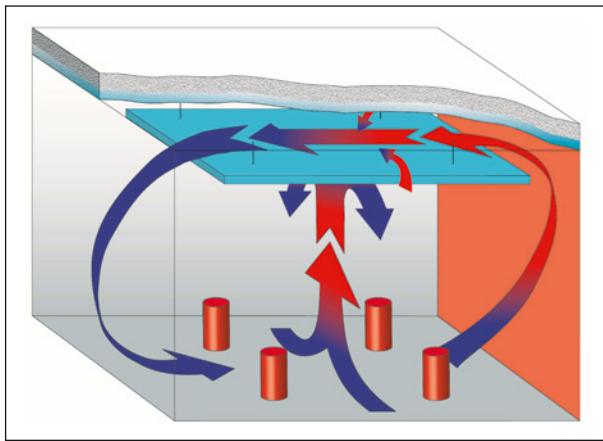


Bild 10: Schematische Darstellung der Raumluftwalze. Die Kühllastsimulatoren und die warme Wand sind rot, das Deckenkühlsegel und die indirekt gekühlte Betondecke blau dargestellt [Quelle: Zent-Frenger GmbH]

Nachtstunden gekühlten Betondecke ab und rezirkuliert ohne Zuglufterscheinung wieder in den Aufenthaltsbereich.

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 Versuchsräum. 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. einem Kühlturn) betrieben werden. Damit können nachts rund 40% der Kühlenergie mit einer hohen Arbeitszahl bereitgestellt werden. Im Tagbetrieb müssen dann nur 60% der Kühlenergie mit einer aktiven Kälteerzeugung erreicht werden. Mit einem entsprechenden Rechenmodell können Energieeinsparungen von mehr als 30% für die eingesetzte elektrische Energie bestimmt werden.
- 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. Wird die im Kühlfall zur Verfügung stehende Bandbreite der Raumtemperatur von 23 bis 26 °C tatsächlich regelungstechnisch genutzt, so können die Kühlsegel an bis zu drei Stunden außer Betrieb sein.
- Der Speichereffekt kann alternativ dazu genutzt werden, das Kühlsystem – bestehend aus Kältebereitstellung (z. B. reversibler Wärmepumpe/Kältemaschine) und -verteilung – entsprechend kleiner zu dimensionieren. Die Leistungsreduzierung liegt bei typischen Wärmelasten in der Größenordnung von 30% bei

gleicher Fläche der Deckensegel. Alternativ kann bei gleicher Kälte- bzw. Wärmeleistung die Wärmeübertragungsfläche um rund 10 % verringert werden, ohne dass sich die freie Kühlung im Nachtbetrieb verschlechtert.

2.7 Gebäude- und Energiekonzepte mit thermoaktiven Bauteilsystemen

Nichtwohngebäude, in denen TABS eingesetzt werden, weisen unterschiedliche architektonische und planerische Ansätze auf. Im einfachsten Fall wird ein konventionelles Gebäudekonzept zur Raumkühlung um TABS ergänzt, und die gesetzlichen Anforderungen an Wärmeschutz und Energiebedarf werden mehr oder weniger stark unterschritten. In Niedrigenergie-Nichtwohngebäuden liegt dagegen der Primärenergiebezug für die technische Gebäudeausrüstung und die Beleuchtung um bis zu einem Faktor 3 niedriger (siehe *Bild 11*). Im Förderprogramm »Energieoptimiertes Bauen« (EnOB) galt hierfür bisher ein Zielwert von $100 \text{ kWh}_{\text{prim}}/(\text{m}^2_{\text{NGFa}})$.

Derartige Gebäude sind ein idealer (wenngleich nicht der einzige sinnvolle) Einsatzfall für eine Heizung und Kühlung mit thermoaktiven Bauteilsystemen in Kombination mit natürlichen Umweltenergiequellen bzw. -senken (oberflächennahe Geothermie und Außenluft).

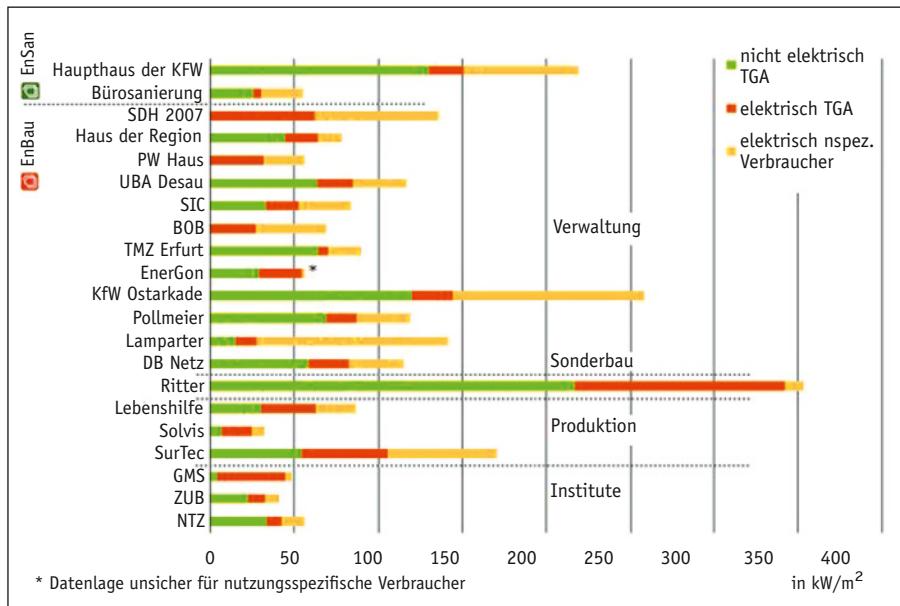


Bild 11: Energiebedarf von ausgewählten Nichtwohngebäuden aus dem EnOB-Forschungsprogramm [Quelle: Bergische Universität Wuppertal [23]]

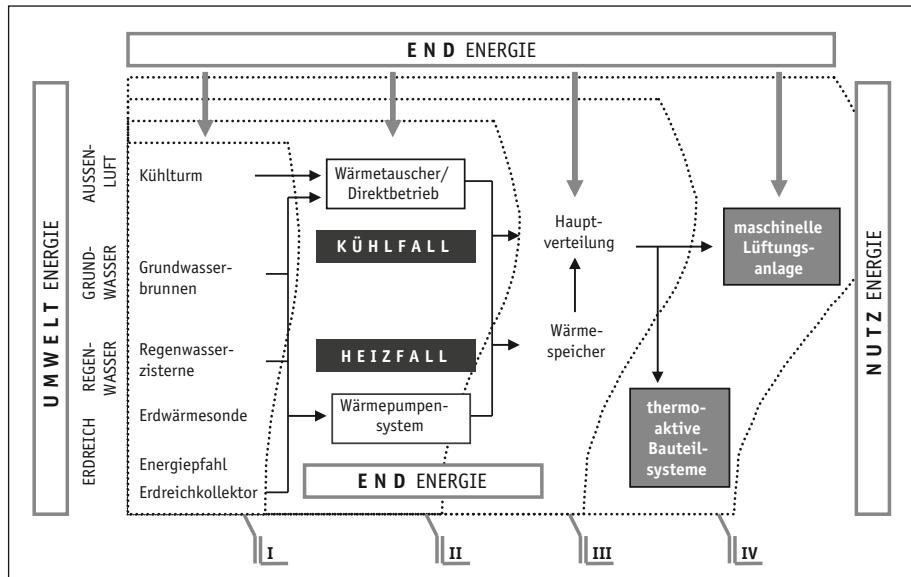


Bild 12: Allgemeine Systemdarstellung der Heizung und Kühlung von Gebäuden mit TABS in Kombination mit natürlichen Umweltenergiequellen sowie den Energie-Bilanzgrenzen I bis IV zur Bewertung

Bild 12 zeigt 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 (reversiblem) **Wärmepumpensystem** (aktives Heizen und Kühlen) oder Wärmetauscher (direktes Kühlen)
- III. Thermische **Speicherung** sowie **Wärme- und Kälteverteilung** im Gebäude
- IV. **Wärme- und Kälteübergabe** im Raum mittels TABS und maschineller Lüftungsanlage.

2.8 Wirkung der Bauteilaktivierung im Raum

Die Bauteilaktivierung wird für ein bestimmtes Gebäude (Geometrie und bauphysikalische Größen) und dessen Nutzung ausgelegt und wirkt mit anderen Systemen zur Raumkonditionierung zusammen.

Diese komplexen, dynamischen Zusammenhänge werden in der Planung oft mit Hilfe der numerischen Gebäude- und Anlagensimulation bewertet. Diese Vorgehensweise ist anerkannt und liefert verlässliche Werte, wenn die Simulation mit plausiblen Werten parametert und richtig durchgeführt wird. Mehrere Normen und Richtlinien geben hier zwar klare Vorgaben, sind aber nicht durchgängig aufeinander abgestimmt. Für Vorhaben des Bundes wurde daher eine Richtlinie [6] erlassen, um die Simulation mit klaren Vorgaben verlässlicher zu machen.

Ein vereinfachtes Energiebilanzmodell gibt Hinweise auf Wahl und Dimensionierung der thermoaktiven Bauteilsysteme und kann damit als Vorarbeit für eine aufwändige Simulationsstudie genutzt werden. Gleichzeitig können diese Vorüberlegungen im Laufe der Planung herangezogen werden, um die Plausibilität späterer Planungsergebnisse zu prüfen. Ein solches Modell wird im Folgenden vorgestellt und zur Analyse von Messdaten aus dem realen Anlagenbetrieb genutzt.

2.8.1 Energiebilanz und zeitlicher Verlauf der Raumtemperatur

In der Auslegung thermoaktiver Bauteilsysteme kann deren thermische Trägheit berücksichtigt werden. Die thermische Speicherfähigkeit gleicht Temperaturschwankungen und Lastspitzen aus, sodass das System nicht auf die maximale Kühl- bzw. Heizlast ausgelegt werden muss:

- Im Winter muss die Bauteilaktivierung so dimensioniert oder mit einem Zusatzsystem kombiniert werden, dass die Solltemperatur im Raum während der gesamten Aufenthaltszeit gewährleistet wird.
- Im Sommer ist die Kühlleistung in Gebäuden mit Bauteilaktivierung bauphysikalisch und anlagentechnisch begrenzt, insbesondere wenn mit Umweltenergie gekühlt wird. Hier ist zu beurteilen, wie oft und wie stark es zu Komforteinbußen kommt.

Grundsätzlich orientiert sich die Planung dabei stärker an der täglichen Heiz- bzw. Kühlenergie [$\text{kWh}/(\text{m}^2\text{d})$] als an der maximalen Heiz- bzw. Kühlleistung [W/m^2], da durch die thermische Speicherfähigkeit der Bauteilaktivierung die momentane Heiz- bzw. Küllast und die tatsächlich verfügbare Heiz- bzw. Kühlleistung stark entkoppelt sind.

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

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

Während der tatsächliche Temperaturverlauf von der idealen, einfachen Schwingung erheblich abweichen kann, wird die mittlere Raumtemperatur $\bar{\vartheta}_{\text{Raum}}$ und deren Schwankung $\Delta\vartheta_{\text{Raum}}$ in guter Näherung durch die mittlere Außentemperatur $\bar{\vartheta}_{\text{außen}}$

deren Schwankung $\Delta\vartheta_{\text{außen}}$, die Wärmegewinne G , deren Schwankung ΔG , die Verlustkoeffizienten H_T und H_V und die Speicherkapazität C beschrieben [69]:

$$\bar{\vartheta}_{\text{Raum}} = \bar{\vartheta}_{\text{außen}} \cdot G/H \quad \text{mit } H = H_T + H_V \quad (2)$$

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

Darin bildet die Summe der 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 kann für die Mittelwerte aus einer täglichen Bilanz ermittelt werden. Die Schwankung wird mit der ersten Fourierkomponente für typische Nutzungsprofile (interne Wärmelasten) bzw. für die Solarstrahlung (solare Wärmelasten) bewertet. Die Leistungsspitzen sind dementsprechend für typische Büroarbeitszeiten mit einem Faktor von ca. $1,1 \pm 0,05$ für die internen Lasten und für die solaren Wärmelasten von ca. 1,7 im Winter und ca. 1,2 im Sommer zu multiplizieren.
- Während die Berechnung des Transmissionswärmestroms meist unproblematisch ist, müssen bei der Berechnung des thermisch wirksamen Luftwechsels die Lüftungseffektivität und der zeitliche Verlauf berücksichtigt werden. Bei typischen Verhältnissen ist es zulässig, den arithmetischen Mittelwert der Stundenwerte (ohne Berücksichtigung der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen) zu verwenden und mit 80 % anzusetzen [72]. Bei ausgeprägten zeitlichen Unterschieden des Luftwechsels ist der Mittelwert ingenieurmäßig zu bestimmen. Oft können punktuelle Luftwechselmessungen 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 Bauteileigenschaften und des Wärmeübergangs von der Raumluft an das Bauteil zu bestimmen [69].
- Heiz- und Kühlleistung können in gleicher Weise wie die internen Wärmelasten mit positivem Vorzeichen für die Heiz- und negativem für die Kühlleistung eingeführt werden.

Die einzelnen Parameter (H , G , ΔG und C) können also auf Basis einfacher Bestimmungsgleichungen mit Hilfe bekannter oder einfach zu schätzender Gebäudeparameter (z. B. Raumgeometrie, U -Werte, g_{\perp} -Wert der transparenten Flächen, F_C -Wert der statischen und beweglichen Verschattung, Luftwechsel) berechnet werden. Dieses Gebäudemodell kann so zur Analyse von Umweltenergiopotenzialen für die Heizung und Kühlung [39] genutzt und schließlich zur Vorauslegung einer Bauteilaktivierung herangezogen werden.

Fazit: Die Reduzierung des thermischen Gebäudeverhaltens auf die wesentlichen Bilanzgrößen liefert eine transparente, leicht nachvollziehbare Methode zur Dimensionierung der Bauteilaktivierung für eine konkrete Planungssituation.

2.8.2 Vorauslegung einer Bauteilaktivierung am Beispiel eines Büro- und Seminargebäudes als Passivhaus

Am Beispiel des neuen Seminargebäudes der Hochschule Offenburg (*Bild 13*), das als Passivhaus geplant und errichtet wurde, kann die Auslegung einer Bauteilaktivierung nach der vorgestellten Methode exemplarisch für ein Standardbüro (für Heiz- und Kühlfall) und die Systemkombination mit einem schnellen Übergabesystem für die Seminarräume (nur Kühlfall) gezeigt werden.

Um die Vorgaben des Passivhausstandards mit einem möglichst geringen Primärenergieaufwand umsetzen zu können, werden an diesem Gebäude folgende Maßnahmen umgesetzt:

- Außenfassade mit 30 cm Wärmedämmung ($U=0,113 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- Außenfenster: Glasanteil an Außenfassade 36 %, 3-fach Wärmeschutzverglasung mit optimiertem Fensterrahmen ($U=0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$), außen liegender Sonnenschutz mit zentraler fassadenorientierter Steuerung
- optimierte Wärmebrücken mit $\Psi < 0,15 \text{ W/mK}$
- Flachdach mit U -Wert ca. $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$.



Bild 13: Seminargebäude der Hochschule Offenburg [Quelle: Ulrich Marx]

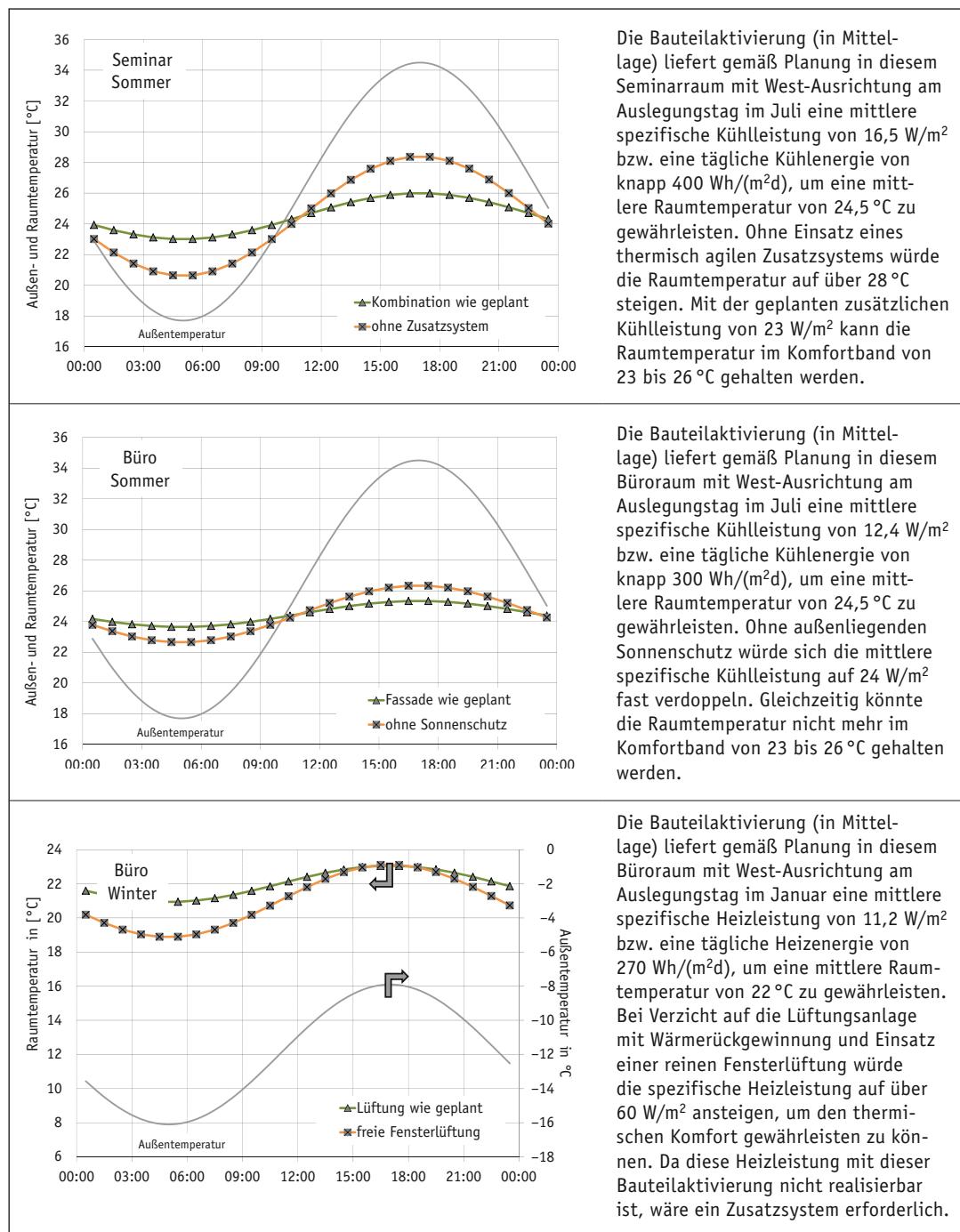


Bild 14: Vorauslegung der Bauteilaktivierung für drei Beispielsituationen in einem Passivhaus-Seminargebäude

- Boden und Wände gegen Erdreich mit $U=0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$.
- Luftdichtigkeit der Gebäudehülle $n_{50}=0,5 \text{ h}^{-1}$
- RLT-Anlage mit einem Wärmerückgewinnungsgrad von über 85 % und hocheffizienten FU-geregelten Ventilatoren; Regelung über Temperatur- und CO_2 -Fühler
- Nutzung der auch im Winter anfallenden Abwärme aus Serverräumen und PC-Pool-Räumen für die Beheizung der übrigen Räume
- Nutzung von Grundwasser für die Raumkühlung
- Bauteilaktivierung der Geschoszswischendecken für Raumheizung und -kühlung.

Die mit dem Passivhausprojektierungspaket (PHPP) durchgeführten Berechnungen ergeben einen spezifischen Jahres-Heizenergiebedarf von voraussichtlich 19 kWh/m^2 . Der spezifische Jahres-Kühlenergiebedarf liegt rechnerisch bei 66 kWh/m^2 . Diese hohe Kühllast ergibt sich vorrangig aus den hohen inneren Lasten der Seminarräume und Serverräume. Diese Räume werden mit zusätzlichen Umluftkühlgeräten ausgestattet.

Bild 14 zeigt exemplarisch, welchen Einfluss Bauphysik und Nutzung auf die Dimensionierung der Bauteilaktivierung haben. Alle Beispiele werden für die kritische West-Situation bewertet. Das einfache Bilanzmodell liefert für die einzelnen Situationen klare Vorgaben an Auslegung und Betrieb:

- Die verhältnismäßig kurze, aber intensive Nutzung des Seminarraums führt zu einer starken Schwankung der internen Lasten, die nur durch ein agiles Zusatzsystem kompensiert werden kann.
- Ein außenliegender Sonnenschutz reduziert die solaren Wärmelasten und deren Schwankung im Tagesverlauf soweit, dass eine behagliche Raumtemperatur mit verhältnismäßig geringer Kühlleistung gewährleistet werden kann.

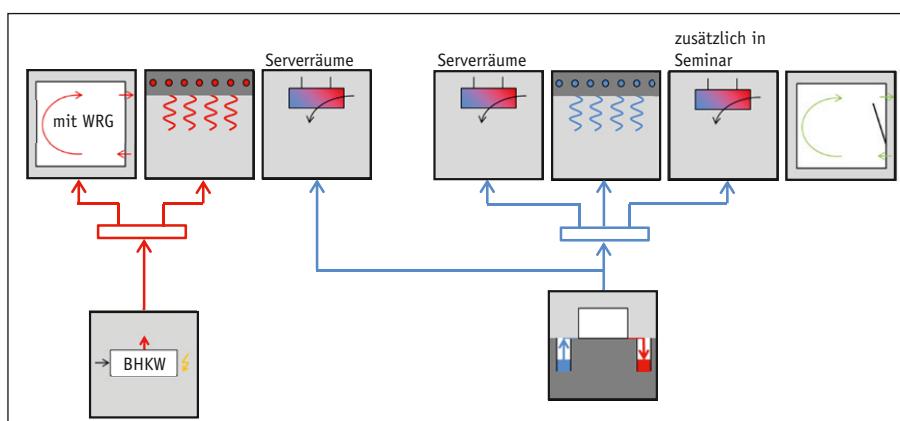


Bild 15: Wärme- und Kältebereitstellung für die Büros: Heizfall (links) und Kühlfall (rechts); zur Symbolik siehe *Kapitel 7*

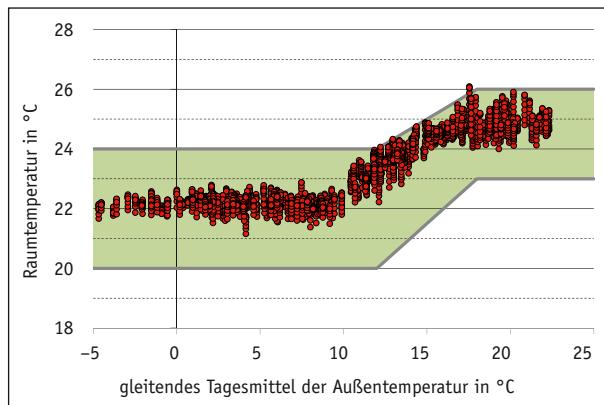


Bild 16: Komfortdiagramm (nur Anwesenheitszeit) als Ergebnis der weiterführenden Planung auf Basis einer numerischen Gebäude- und Anlagensimulation. Der grüne Bereich markiert den Temperaturbereich gemäß Komfortklasse II.

- Eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung reduziert die Heizlast soweit, dass die spezifische Heizleistung einer Bauteilaktivierung für die Heizung ausreicht.

Auf Grundlage dieser Überlegungen wurde das Lüftungs- und Klimakonzept erarbeitet. *Bild 15* zeigt eine Kombination aus maschineller Lüftung mit Wärmerückgewinnung (überwiegend im Winter) und Bauteilaktivierung in den Büros, wobei die Fenster im Gebäude (überwiegend im Sommer) geöffnet werden können. Im Sommer werden schnell wechselnde Kühllasten über zusätzliche Umluftkühlgeräte kompensiert. Zur Wärmeversorgung steht Wärme aus dem hochschulinternen Wärmenetz zur Verfügung. Die Kühlung wird über Grundwasser realisiert.

Eine numerische Gebäude- und Anlagensimulation liefert in der Planung genauere Informationen über das Betriebsverhalten. *Bild 16* zeigt beispielhaft das Komfortdiagramm für die Simulation eines Standardbüros in Westausrichtung gemäß der anlagentechnischen Ausstattung nach *Bild 15* für eine modell-prädiktive Regelstrategie. Die Simulation bestätigt damit die Vorplanung (mittlere Grafik in *Bild 14*), wonach im sommerlichen Auslegungsfall während der Anwesenheitszeit Raumtemperaturen um 25 °C zu erwarten sind. Die numerische Simulation liefert wertvolle Zusatzinformationen zum dynamischen Betriebsverhalten des Raumes und der Bauteilaktivierung.

2.8.3 Bewertung betrieblicher Messungen im Sommer

In Gebäuden mit Bauteilaktivierung ist die Kühlleistung bauphysikalisch und anlagentechnisch begrenzt. Folglich kann bei zu hohen Kühllasten der thermische Komfort im Sommer nicht zu jedem Zeitpunkt gewährleistet werden. Dieses Gebäudeverhalten wird zwar bereits in der Planung berücksichtigt. Im realen Betrieb ist aber oft schwer einzuschätzen, ob und – wenn ja – warum sich das Gebäude thermisch



Bild 17: Mobile Messtechnik zur Datenerfassung, -speicherung und -übertragung von Wetter (links), Mikroklima an der Fassade und Raumklima (rechts) [Quelle: Fraunhofer ISE]

anders verhält als geplant. Ein Gebäudemodell zur Auswertung von betrieblichen Kurzzeitmessungen muss dabei auf die Unsicherheiten in der bauphysikalischen und anlagentechnischen Beschreibung des Raumes und die eingeschränkten Möglichkeiten bei Messaufbau und -durchführung angepasst sein. Das Gebäude muss dabei durch wenige charakteristische Größen beschrieben werden. Damit bietet sich das kompakte Bilanzmodell als inverses, graues Modell zur Analyse an. 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.

Zur messtechnischen Gebäude- und Anlagenbewertung werden die Innen- und Außenbedingungen erfasst, siehe Bild 17. Neben den zur Anwendung des Gebäude- modells unbedingt erforderlichen Daten (Raum- und Außentemperatur sowie Solarstrahlung) werden in betrieblichen Messkampagnen auch weitere Messdaten, z. B. weitere Komfortparameter, Nutzerverhalten, interne Wärmegewinne, Luftwechsel nach der CO₂-Abklingmethode, Fassadentemperaturen oder Luftgeschwindigkeiten an Lüftungsein- und -auslässen, erfasst.

Bild 18 zeigt aus diesen umfangreichen Meskampagnen im Sommer 2006 über einen Zeitraum von zwei Wochen die beiden Messdatenreihen der Raum- und Außentemperatur für ein Büro mit Bauteilaktivierung.

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 $C=277,2 \text{ Wh/m}^2$. Sowohl die mittleren Werte als auch die Schwankungen von Innen- und Außentemperatur werden mit einer Genauigkeit von kleiner als 0,2 K berechnet. Während der Aufenthaltszeit liegt die Raumtemperatur durchgängig im Komfort-

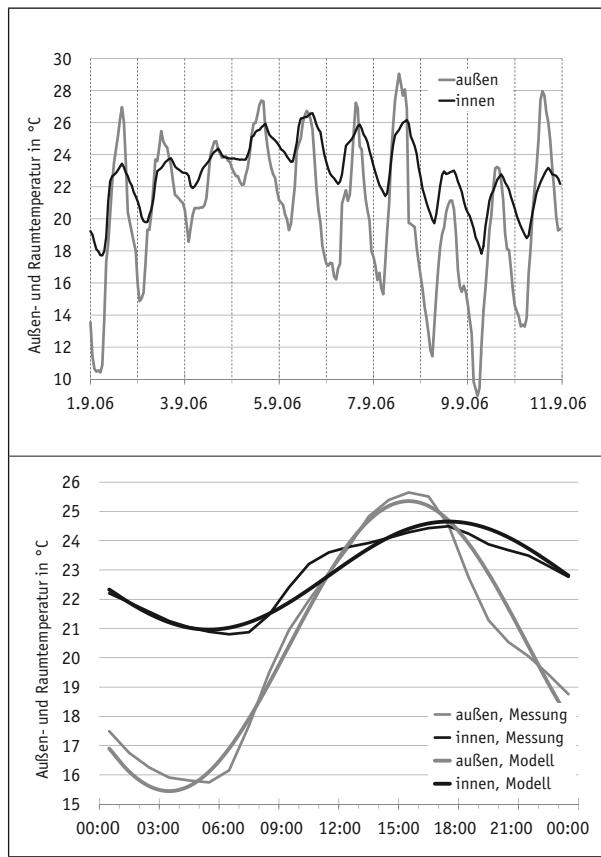


Bild 18: Messwerte aus einer zehn-tägigen Messkampagne (oben) und deren standardisierte Auswertung des mittleren Tagesverlaufs (unten)

bereich. Gleichzeitig zeigt die Analyse, dass bei der tatsächlich wirksamen Speicherkapazität C die abgeführte Leistung (hier ausgedrückt durch H) ausreicht, um die mittleren Wärmelasten G und deren Schwankung ΔG wirkungsvoll auszugleichen. Diese Messkampagne bestätigt gemeinsam mit diesem Rechenmodell, dass die Abstimmung der Bauteilaktivierung auf das Gesamtgebäude bzw. diesen typischen Bürorraum gut gelungen ist.

2.9 Kombination mit anderen Übergabesystemen

Sowohl Systemkombinationen innerhalb eines Raumes (z. B. Bauteilaktivierung plus Radiator) als auch Kombinationen unterschiedlicher Übergabesysteme für Nutzungszenen innerhalb eines Gebäudes (z. B. Büro und Seminar) haben Einfluss auf Energieeffizienz und Behaglichkeit. Auch Wärme- und Kältebereitstellung und -verteilung sowie deren Betriebsführung haben Einfluss auf die Energieeffizienz, siehe auch *Kapitel 8* und *Simulationsstudie in Kapitel 9.1*:

- Standard-Büroräume können dann gut mit Bauteilaktivierung betrieben werden, wenn sie mit einer Zuluftkonditionierung (isotherme Zuluft, evtl. mit Entfeuchtung) und einem außen liegenden Sonnenschutz ausgestattet sind. In diesem Fall liegt der Deckungsanteil der Bauteilaktivierung zwischen 60 und 80% und der raumlufttechnischen Anlage entsprechend zwischen 20 und 40%, wobei der Anteil der Bauteilaktivierung im Kühlfall etwas höher als im Heizfall ist.
- In Niedrigenergie-Bürogebäuden kann die Bauteilaktivierung in gemäßigten Klimaten (alle nord- und mitteleuropäischen Länder) und bei entsprechender Systemkombination auch in wärmeren Klimaten (z. B. südeuropäische Länder) eingesetzt werden, siehe auch *Kapitel 9*.
- Die Betonkernaktivierung kommt als alleiniges Übergabesystem bei Extremwetterlagen im Sommer und Winter an ihre Leistungsgrenzen, sodass ein behagliches Raumklima dann nicht mehr uneingeschränkt gewährleistet werden kann, siehe auch *Kapitel 4.1*.
- Es gibt keine allgemein gültige Aussage zur optimalen Betriebsführung. So kann bei entsprechender hydraulischer Auslegung ein ausschließlicher Nachtbetrieb genauso sinnvoll sein wie ein getakteter 24-Stundenbetrieb, siehe auch *Kapitel 6*.
- Eine zeitversetzte Nutzung unterschiedlicher Übergabesysteme (z. B. Bauteilaktivierung in der Nacht kombiniert mit Zuluftkonditionierung am Tag oder Bauteilaktivierung in Mittellage kombiniert mit flinken Flächentemperiersystemen wie Randstreifenelementen oder Kühlsegeln) ermöglicht eine Leistungsreduktion und eine bessere Auslastung der Wärme- und Kälteversorgung, siehe auch *Kapitel 5*.
- In typischen Bürogebäuden bietet sich ein so genannter Change-Over-Betrieb an. In dem gesamten Gebäude wird entweder geheizt oder gekühlt. Damit kann das gesamte System als Zweirohrsystem ausgelegt und die gesamte Mess- und Regeltechnik entsprechend vereinfacht werden, siehe auch *Kapitel 4.4*. Voraussetzung hierfür ist ein ausreichend breites Temperaturband, in dem weder geheizt noch gekühlt wird.
- Reversible Wärmepumpen bieten sich wegen der geringen Über- bzw. Untertemperaturen zur Wärme- und Kältebereitstellung an (vgl. auch *Kapitel 5*). Hier ist unbedingt auf das gleiche Temperaturniveau in allen Übergabesystemen zu achten. In Gebäuden mit unterschiedlichen Nutzungsbereichen kann die Wärmepumpe auch zur gleichzeitigen Bereitstellung von Wärme und Kälte (Wärmeverschiebung innerhalb eines Gebäudes) genutzt werden. Ferner ist die Auskopplung eines geringen Wärmestroms durch Heißgasnutzung oft sinnvoll möglich.
- Sondernutzungsbereiche sollten über getrennte, oft dezentrale Systeme klimatisiert werden. Wenn eine gemeinsame Versorgung möglich und gewollt ist, sollten die Systeme möglichst für die gleichen Systemtemperaturen ausgelegt werden. Abweichende Temperaturen (z. B. für Radiatoren im Heiz- oder Luftkühler im Kühlfall) verursachen eine deutliche Reduzierung der Leistungszahl der Wärmepumpe bzw. Kältemaschine um bis zu 20 %.

- Bei der Nutzung des Erdrechts ist auf eine saisonal ausgeglichene Wärmebilanz zu achten, um einen effizienten Wärmepumpenbetrieb zu gewährleisten. Die Mehraufwendungen können dabei 10% und mehr betragen, insbesondere wenn das Potenzial für die freie Kühlung nicht gut genutzt werden kann. Unabhängig davon wird eine ausgeglichene Wärmebilanz oft gesetzlich gefordert.

Diese groben Anhaltswerte geben zwar eine Orientierung für die Auslegung der Bauteilaktivierung, ersetzen aber nie eine auf das konkrete Gebäude angepasste Planung mit Simulation. Die Systemabstimmung einschließlich der Betriebsführungsstrategie orientiert sich dabei an Standort und Nutzung und ist dem einzelnen Gebäude anzupassen.

3 Behaglichkeit und die Bewertung des thermischen Komforts

Ziel ist es, Gebäude- und Anlagenkonzepte zu entwickeln, die sich durch einen geringen Heiz- und Kühlenergiebedarf und eine hohe Anlageneffizienz auszeichnen, aber insbesondere auch die Anforderungen an einen qualitativ hochwertigen Arbeitsplatz erfüllen. Neben akustischen und visuellen Komfortanforderungen kommt dabei dem thermischen Komfort eine zentrale Rolle zu.

3.1 Thermischer Komfort in der Normung

Der thermische Raumkomfort in Nichtwohngebäuden wird nach der europäischen Richtlinie DIN EN 15251 bewertet, die gemäß dem implementierten Kühlkonzept zwei Komfortmodelle definiert, das adaptive und das PMV-Modell.

- **DIN EN 15251:2012-12, adaptives Modell:** Gebäude ohne maschinelle Kühlung (mit ausschließlich freier Kühlung) werden mit einem adaptiven Komfortmodell bewertet, welches sowohl Änderungen des Außenklimas als auch die Einflussnahme des Nutzers auf seine unmittelbare Umgebung berücksichtigt (z. B. durch das Öffnen von Fenstern, die Nutzung des Sonnenschutzes, keine Bekleidungsvorschrift). 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 $\vartheta_{e,rm}$ in °C: $\vartheta_{Raum,c} = 18,8^{\circ}\text{C} + 0,33 \cdot \vartheta_{e,rm}$, mit $\vartheta_{Raum,c}$ in °C als operativer Raumtemperatur und einem Komfortband von ±3 K für Komfortklasse II.
- **DIN EN 15251:2012-12, PMV-Modell:** Gebäude, die durch eine maschinelle Kühlung (Klimaanlagen, aber auch thermoaktive Bauteilsysteme) aktiv konditioniert werden, sollten entsprechend dem PMV-Komfortmodell festgelegte Raumtemperatursollwerte einhalten, unabhängig von den Außentemperaturbedingungen: $\vartheta_{Raum,c} = 24,5^{\circ}\text{C}$, mit $\vartheta_{Raum,c}$ in °C als operativer Raumtemperatur und einem Komfortband von ±1,5 K für Komfortklasse II.

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

- **DIN EN 15251:2012-12, quasi-adaptives Modell:** Für die Bewertung behaglichkeitsrelevanter Parameter differenziert die Norm nicht nach dem Anlagenkonzept für die Kühlung. Die definierte Komforttemperatur beträgt 22 °C bei Außentemperaturen (Stundenmittelwerten) unter 16 °C sowie 26 °C bei Außentemperaturen über 32 °C. Dazwischen wird die Komforttemperatur durch

$\vartheta_{\text{Raum},c} = 18^\circ\text{C} + 0,25 \cdot \vartheta_e$ beschrieben, mit $\vartheta_{\text{Raum},c}$ in °C als operativer Raumtemperatur, ϑ_e in °C als aktueller Außentemperatur und einem Komfortband von ±2,0 K für die fest vereinbarte Komfortklasse II.

Viele Büro- und Verwaltungsgebäude lassen sich allerdings anhand des jeweiligen Kühlkonzepts nicht ohne Weiteres einem bestimmten Komfortmodell zuordnen. Beispielsweise nutzen einige Gebäude freie oder maschinelle Nachtlüftungskonzepte in Kombination mit einer aktiven bzw. unterstützenden Kühlung. Zudem stellen Kühlenergiekonzepte mit Nutzung von (natürlichen) Umweltenergiequellen (z.B. direkte Kühlung mittels oberflächennaher Geothermie) für das mittel-europäische Klima zwar eine energieeffiziente Lösung dar, können aber aufgrund von Systemtrügheiten und systembedingten Temperaturen bzw. Temperaturdifferenzen keine stringenten Raumtemperatursollwerte analog zum 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 Kühlmethoden 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. Hinweis: 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. So fordert auch die *Richtlinie zu baulichen und planerischen Vorgaben für Bau-maßnahmen des Bundes zur Gewährleistung der thermischen Behaglichkeit im Sommer* vom Dezember 2008 [8] die Wahl des Komfortmodells in Abhängigkeit von der Nutzererwartung und nicht vom technischen Kühlkonzept.

Weitere internationale Normen, wie die ASHRAE 55 [2] und ISSO 74 [93], definieren vergleichbare Kriterien für die Bewertung des thermischen Raumkomforts in Nichtwohngebäuden mit einem umfangreichen Vergleich in [6] und [52].

3.2 Bewertung des thermischen Komforts

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 hinsichtlich des sommerlichen Temperaturverhaltens erfüllen, siehe auch *Kapitel 2.8.3*. Unter Umständen entspricht auch das subjektiv empfundene Raumklima nicht den Erwartungen der Nutzer. Eine messtechnische Untersuchung bietet hier die Möglichkeit, objektive Daten bereitzustellen und den thermischen Raumkomfort unter Betriebs- und Nutzungsbedingungen und somit die Wirksamkeit des Kühl- und Lüftungskonzeptes zu bewerten.

Sowohl in der Planung als auch in der Auswertung betrieblicher Messdaten stellt sich also die Frage, wie der thermische Komfort in Gebäuden mit Bauteilaktivierung bewertet werden kann. Unter Zugrundelegung der normativen Festlegungen kann folgende Vorgehensweise definiert werden:

- **Komfortmodell:** Der thermische Komfort wird – wie im vorangegangenen *Kapitel 3.1* dargestellt – grundsätzlich nach dem PMV-Modell bewertet. Hinweis: Im nationalen Anhang DIN EN 15251:2012-12 wird bei der Bewertung behaglichkeitsrelevanter Parameter nicht zwischen maschineller und freier Kühlung unterschieden.
- **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.
- **Gebäudefläche:** Im untersuchten Gebäude werden repräsentative Büroräume, die zur Bewertung des thermischen Komforts herangezogen werden, messtechnisch bzw. planerisch bewertet.
- **Komfortklassen für thermischen Raumkomfort:** Der Raumkomfort wird entsprechend der definierten oberen und unteren Komfortklassen I bis IV gemäß DIN EN 15251:2012-12 bewertet (Klasse I: hohes Maß an Erwartung; Klasse II: normales Maß an Erwartung; Klasse III: annehmbares, moderates Maß an Erwartung; Klasse IV: Werte außerhalb der definierten Komfortkategorien). Grundsätzlich wird die Komfortklasse II gewählt. Die Klassen I, II und III entsprechen in DIN EN ISO 7730:2006-05 den Klassen A, B und C.
- **Saisonale Bewertung:** Die Bewertung des thermischen Raumkomforts, d.h. die Überschreitungshäufigkeit der definierten Komfortklassen I bis III, erfolgt für die gesamte Sommer-/Winterperiode 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 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. gleitenden Tagesmittel der Außentemperatur: Niedrige Tagesmittel der Außentemperatur korrelieren mit clo-Werten von 0,7 bis 1,0 und erhöhte bzw. hohe Tagesmittel mit clo-Werten von 0,5 bis 1,0 – ein Bekleidungswert 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. Für die praktische Darstellung in einer Komfortgrafik wird ein gleitender Bereich zwischen 12 °C (entsprechend Tageshöchsttemperaturen von ca. 20 °C in der Übergangszeit) und 18 °C (entsprechend Tageshöchsttemperaturen von ca. 26 °C im Sommer) angenommen.

Hinweis: Dieses Modell folgt der Methodik gemäß DIN EN ISO 7730 und weicht von dem im nationalen Anhang NA 3.2.2 zu DIN EN 15251:2012-12 vorgeschlagenen Temperaturgang ab.

- **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.

Hinweis: Dieses Modell weicht damit von dem im nationalen Anhang NA 3.2.3 zu DIN EN 15251:2012-12 vorgeschlagenen Gradstundenkriterium ab.

- **Ergebnisdarstellung:** Die Ergebnisse der Messkampagnen bzw. Planung werden in einer Komfortgrafik und einem thermischen »foot print« (Fußabdruck für statistische Datenauswertung) dargestellt, Beispiel in *Bild 19*. In der Komfortgrafik wird gemäß dem geforderten PMV-Komfortmodell die mittlere, stündlich

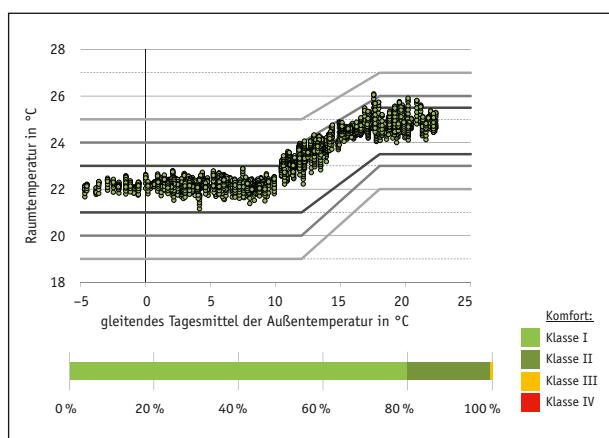


Bild 19: Bewertung des thermischen Komforts in Gebäuden mit Bauteilaktivierung. In diesem Gebäude wird Klasse II in den untersuchten Bereichen ganzjährig erreicht. Die durchgezogenen Linien kennzeichnen jeweils die obere und untere Grenze der Komfortklassen I, II und III.

gemessene bzw. simulierte Temperatur der Referenzräume über dem gleitenden Mittel der Außentemperatur dargestellt. Zusätzlich zeigt die Grafik die Raumtemperaturgrenzwerte der Klassen I bis III. Der thermische »foot print« zeigt die prozentuale Anwesenheitszeit, während der das Gebäude die Grenzwerte der thermischen Komfortkategorien I bis III einhält.

3.3 Erfahrungen aus Gebäuden mit unterschiedlichen Kühlkonzepten

Empfohlen wird, Gebäude mit freier und maschineller Lüftung sowie mit passiven Kühlmaßnahmen (z. B. Sonnenschutz, Fensterlüftung) nach dem adaptiven Komfortmodell nach DIN EN 15251 zu bewerten, da sich die Nutzer hier an das Außenklima anpassen. 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 anzupassen, haben aber eine höhere Erwartungshaltung an den Raumkomfort, was sich so in einem anderen Komfortbereich widerspiegelt.

In 28 deutschen und 7 anderen europäischen Büro- und Verwaltungsgebäuden wurden auf Basis von Monitoringkampagnen über mehrere Betriebsjahre hinweg Raum- und Außentemperaturwerte in zeitlich hoher Auflösung erfasst und der thermische Raumkomfort im Sommer nach dem in *Kapitel 3.2* vorgestellten Verfahren ausgewertet. Ergänzt wurde die Auswertung um Kurzzeitmesskampagnen über zwei sehr warme Wochen im Sommer in 7 un- bzw. teilsanierten Bürogebäuden, errichtet im Zeitraum von 1960 bis 1975. Damit stehen Messwerte aus 42 Gebäuden zur Verfügung. Zusätzlich standen in vielen Gebäuden Werte zum Kälte- und Strombezug sowie zu anlagentechnischen Parametern (Systemtemperaturen, Betriebszeiten etc.) zur Verfügung. In einigen Gebäuden wurden Feldmessungen mit mobiler Messtechnik über mehrere Sommerwochen hinweg durchgeführt, in denen neben den Raumkomfortparametern teilweise 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. Die Messkampagnen und ihre Auswertung werden detailliert in [43] vorgestellt. Einzelne Gebäude werden in *Kapitel 9* genauer vorgestellt, dort unter dem Aspekt »klimagerechte Kühlkonzepte«.

Die neuen und sanierten 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 Nutzung von natürlichen Umweltwärmesensen deutlich zu reduzieren, dabei aber die Anforderungen an den thermischen Raumkomfort zu gewährleisten. Informationen zur Bauphysik und zum Kühlkonzept der untersuchten Gebäude sind in *Tabelle 1* zusammengefasst.

In den meisten Gebäuden wurden die Zielwerte für den thermischen Kühlenergiebedarf erreicht. Messwerte für thermischen Nutzkaltebezug liegen in den nord- und mitteleuropäischen Gebäuden bei rund $20 \text{ kWh}_{\text{therm}}/(\text{m}^2\text{a})$ und in 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 direkte Kühlung mittels oberflächennaher Geothermie oder Außenluft ermöglicht die Bereitstellung von Klimakälte mit hoher Energieeffizienz – eine korrekte Auslegung, Installation und ein korrekter Betrieb der Geothermiesysteme vorausgesetzt. Für das Primärsystem im Betriebsmodus »direkte Kühlung« (ohne den Einsatz einer reversiblen Wärmepumpe bzw. Kältemaschine) wurden Jahresarbeitszahlen zwischen 6 und $16 \text{ kWh}_{\text{therm}}/\text{kWh}_{\text{el}}$ erreicht.

Die Nutzung von erdreichgekoppelten Kältemaschinen stellt ein effizientes und nachhaltiges Konzept zur Gebäudekühlung dar. Auch hier bedingen die relativ hohen Vorlauftemperaturen zur Kühlung von 16 bis 20°C eine hohe Energieeffizienz. Messtechnisch wurden in diesen Projekten Jahresarbeitszahlen von 4,8 bis $5,8 \text{ kWh}_{\text{therm}}/\text{kWh}_{\text{el}}$ nachgewiesen.

In der anonymisierten Querauswertung dieser Gebäude zeigen die Komfort-Footprints in *Bild 20*, wie sich der thermische Raumkomfort einstellt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die TABS-Gebäude nach dem (strengeren) PMV-Komfortmodell bewertet werden:

1: Ohne Kühlung

In unsanierten Bestandsgebäuden gibt es oft keine oder nur unzureichende Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz.

In diesen untersuchten Büro- und Verwaltungsgebäuden aus den 60er und 70er Jahren steigen die operativen Raumtemperaturen während der Anwesenheitszeit im Sommer sehr stark an. Die Mittelwerte liegen bei über 25°C und die maximalen Temperaturen in einem Bereich von 29 bis 34°C . Während der Messperiode wird nur die Komfortklasse III des adaptiven Komfortmodells während 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 , sodass in der Messperiode die Komfortklasse III nur in 65 % der Anwesenheitszeit erreicht wird. Im Allgemeinen sind die Gebäude ohne ausreichenden sommerlichen Wärmeschutz und Kühlmaßnahmen eng an das Außenklima gekoppelt.

Die operative Raumtemperatur steigt relativ schnell während warmer Sommerperioden. Die Tagesamplituden der Raumtemperaturen während der Anwesenheitszeit betragen mitunter über 4 Kelvin. Sogar bei moderaten Außentemperaturen mit einem gleitenden Tagesmittel zwischen 18 und 22 °C werden in diesen Gebäuden vergleichsweise hohe Raumtemperaturen erreicht. Außerhalb der Anwesenheitszeit bzw. in den Nachtstunden sinken die Raumtemperaturen nur langsam und geringfügig um 1 bis 2 Kelvin, da die Wärmeabfuhr weitestgehend mittels Transmission über opake und transparente Bauteile stattfindet.

2: Passive Kühlung (ohne maschinelle Unterstützung)

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 abgeführt werden können. Der tatsächliche freie Luftwechsel variiert von Tag zu Tag und von Ort zu Ort; er überschreitet oft 2 h^{-1} in kühlen Nächten und erreicht selten Werte über $1,8 \text{ h}^{-1}$ in wärmeren Nächten. Durch die zunehmende Ausstattung der Bürogebäude und die gegebenenfalls dichte Raumbelegung sind in der Sommerperiode relativ hohe Raumtemperaturen zu erwarten. Passive Kühlung ist als Kühlkonzept nur dann gut geeignet, wenn die Gebäude explizit dafür unter den spezifischen Bedingungen vor Ort geplant werden.

In diesen untersuchten Büro- und Verwaltungsgebäuden liegen die mittleren Temperaturen während der Anwesenheitszeit im Sommer in einem Bereich von 23 bis 27,5 °C. Während sommerlicher Hitzeperioden steigen die Raumtemperaturen auf deutlich über 28 °C. Zudem schwanken die Raumtemperaturen im Mittel um bis zu 3 Kelvin pro Tag während der Anwesenheitszeit. Dennoch werden selbst bei hohen Außentemperaturen von über 30 °C die Anforderungen des adaptiven Komfortmodells nur während weniger Stunden verletzt. Außerhalb der Anwesenheitszeit bzw. in den Nachtstunden sinken die Raumtemperaturen nur langsam und geringfügig, im Mittel um 1 bis maximal 3 Kelvin. Die Wärmeabfuhr in der Nacht mittels freier Nachtlüftung ist zum einen abhängig vom Nutzerverhalten (Öffnen von Fenstern und Klappen) und zum anderen von der Lüftungseffektivität, d. h. von Außentemperaturen, Windverhältnissen und der Anströmung der Fassade, vom effektiven Querschnitt geöffneter Fenster und Klappen sowie von der Luftströmung im Gebäude (einseitige Fensterlüftung oder Querlüftung). Unerwarteterweise 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 allerdings nur sehr selten unter Werte von 20 bis 21 °C.

Tabelle 1: Informationen zur Bauphysik und zum Kühlkonzept der untersuchten Gebäude.

Gebäude und Bauphysik		Monitoring		Kälteübergabe		Kälteerzeugung/-quelle		Lüftung		Betriebsanalyse			
		Zeitraum	Referenzraum	Verschattung	Fenster zu Fassade [%]	A/V [m ⁻¹]	g Wert Fenster	U-Wert Fenster [W/m ² K]	U-Wert AW [W/m ² K]	NGF [m ²]	saniert (s)	Errichtung	Ort
Ohne Kühlung (7)													
AA	GER	n/k	s	η/k	0,8	1,4	0,6	η/k	60	i	1	2W	
AB	GER	n/k	s	11 915	0,26	1,4	0,58	n/k	32	n/k	1	2W	
AC	GER	1996	1 000	0,47	1,8	0,6	0,55	70	e	5	4J		
AD	GER	1975	s	290	0,16	1,5	0,6	n/k	n/k	e	2	7W	
AE	GER	1970	4 032	0,6	2,8	0,77	0,3	40	e	2	4W		
AF	GER	n/k	s	η/k	0,5	1,2	0,78	n/k	50	i	6	2W	
AG	GER	1960	4 243	0,53	2,9	0,7	0,29	40	n/k	2	2W		
Passive Kühlung (5)													
AH	CZE	2005	230	0,2	1,2	0,7	0,4	20-80	i	1	1J		
AI	FRA	2003	3 900	0,43	2,2	n/k	0,1	40	i	9	1J	x	x
AJ	GER	2001	13 150	0,23	1,4	0,58	0,31	25-55	e	5	2J	x	x
AK	GER	n/k	n/k	0,45	1,2	0,34	n/k	54	b	1	1W	x	x
AL	GER	1953	s	30 570	0,61	3,0	0,7	0,23	70	i+e	14	3J	x
Luftgeführte Kühlung (10)													
AM	GER	1999	5 974	0,3	1,6	0,6	0,27	31	e	9	3J	x	x
AN	GER	1950	s	986	0,14	0,8	0,52	0,49	20	i	1	3J	x
AO	GER	2001	13 150	0,23	1,4	0,58	0,31	25	e	16	2J	x	x
AP	GER	2002	8 762	0,35	1,4	0,4-0,7	0,25	31	e	20	6J	x	x
AQ	GER	1999	1 000	0,2	1,1	0,6	0,40	44	e	2	3J	x	x
AR	GER	2001	3 510	0,2	1,4	0,6	0,32	51	e	1	2J	x	x

AS	GER	1968	2 544	0,46	1,4	0,64	0,32	n/k	e	2	4J	x	x	x	x	x	56	-	-	-	
AT	GER	2003	13 833	0,19	1,3	0,6	0,29	49	e	42	5J	x	x	x	x	m	5,0	3,0	1,7		
AU	GER	2002	8 120	0,2	1,4	0,5-0,6	0,36	n/k	e	7	2J	x	x	x	x	m	80	-	-	-	
AV	GER	2000	4 113	0,22	0,85	0,58	0,25	13-55	e	6	1J	x	x	x	x	m	68	-	-	-	
Wassergeführte Kühlung (16)																					
AW	GER	2002	2 151	0,17	0,80	0,5	0,37	37-49	i	9	3J	x	x	x	x	x	75	18,2	3,0	6,2	
AX	DEN	2002	21 199	0,20	1,12	0,58	0,3	31-60	i	3	1J	x	x	955	KT	x	70	-	-	-	
AY	GER	2008	2 500	0,21	1,0	n/k	n/k	n/k	e	22	3J	x	x	x	15	x	73	15,0	1,1	14,0	
AZ	GER	2007	4 878	0,20	1-1,4	0,58	0,3	48	e	11	2J	x	x	155	88	KT	x	75	-	-	
BA	GER	1976	s	7 640	0,46	1,6	n/k	0,36	30	e	3	2J	x	x	x	x	x	keine	-	-	
BB	GER	1978	s	1 100	0,30	1,4	0,55	0,27	40-80	e	3	3J	x	x	10	x	x	60	20,3	5,6	3,5
BC	GER	2002	6 911	0,13	0,84	0,5	0,22	48	e	20	2J	x	x	x	140	x	x	65	13,2	1,4	9,5
BD	FIN	2005	6 900	0,22	1,1	0,38	n/k	n/k	i+e	12	1J	x	x	x	345	x	x	80	-	20,8	-
BE	GER	2004	10 650	0,20	1,3	0,55	0,3	48-53	e	2	2J	x	x	x	250	x	x	70	16,3	1,5	11,1
BF	GER	2008	4 527	0,21	1,5	0,5	0,29	30-95	e	22	3J	x	x	75	20	x	x	n/k	13,7	2,3	5,9
BG	ITA	2007	752	0,34	1,4	0,6	0,6	20	e	3	1J	x	x	64	x	x	f+m	52	30,5	18,2	1,6
BH	GER	2011	6 352	0,32	n/k	n/k	n/k	n/k	i	21	1J	x	x	x	KT	x	x	n/k	-	-	-
BI	GER	2009	19 500	n/k	n/k	n/k	n/k	n/k	e	100	1J	x	x	197	100	x	x	n/k	-	-	-
BJ	GER	2009	4 500	0,33	1,1	0,5	n/k	n/k	e	14	1J	x	x	227	KT	x	x	n/k	-	-	-
BK	GER	2007	2 264	n/k	n/k	n/k	n/k	n/k	e	25	3J	x	x	n/k	x	x	n/k	12,8	0,78	16,8	
BL	GER	2001	1 347	0,11	0,8	0,6	0,34	35-85	e	22	2J	x	x	10	x	x	73	4,3	0,14	31,6	
Mixed-Mode Kühlung (2)																					
BM	GRE	1995	600	0,28	2,7	0,7	0,24	20-80	i+e	9	1J	x	x	x	40	x	x	x	19,5	-	-
BN	ROU	1940	292	0,82	2,5	0,42	0,8	30-40	e	4	1J	x	x	x	x	x	x	f	keine	28,3	11,3
Vollklimatisierung (2)																					
B0	GER	2000	6 880	0,2	1,3	0,6	n/k	64	e	87	2J	x	x	110	x	x	x	90	24,2	4,5	5,9
BP	GER	86/92	10 984	n/k	n/k	n/k	0,39	n/k	e	9	2J	x	x	400	KT	x	x	-	-	-	-
Verhältnis Hüllefläche zu Volumen (A/V), Kühlturn (KT), Kältemaschine oder reversible Wärmepumpe (KM/WP), Sonnenschutz im Scheibenzwischenraum des Fensters (b), außen (e), innen (i), Sanierung (r), Woche (W), Jahr (J), maschinelle Lüftung (m), Nachtlüftung (NL), Wärmerückgewinnung (WRG). Information nicht bekannt (n/k), beheizte Nettogrundfläche (NGF). Zahlenangabe in der Spalte »Kältebereitstellung« kennzeichnet die thermische Kälteleistung der Kälteerzeuger [kWh_{therm}/m^2_{netal}], zum Beispiel Kompressionskältemaschine und Umweltwärmesekne, thermische Nutzenegie für Kälte [kWh_{therm}/m^2_{netal}], Endenergieaufwand für Kältebereitstellung und -erzeugung [kWh_{end}/m^2_{netal}], aber ohne Kälteverteilung im Gebäude (d. h. keine Berücksichtigung der Hilfsenergie für Pumpen), Jahresarbeitszahl JAZ [kWh_{therm}/kWh_{end}] für Kältebereitstellung durch Umweltwärmesekne und rev. Wärmepumpe/Kältemaschine (d. h. berücksichtigter Stromaufwand für Kompressor und Primärpumpen).																					

3: Luftgeführte Kühlung (mit maschineller Nachtlüftung)

Eine Lüftungsanlage gewährleistet eine gute Raumluftqualität und kann zur maschinellen Nachtlüftung eingesetzt werden. Diese wird meist angewandt, 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} , und zwar weitgehend unabhängig von den vorherrschenden Außenbedingungen (Wind und Temperatur). Die Erfahrung mit per Nachtlüftung gekühlten Niedrigenergie-Bürogebäuden zeigt, dass im Sommer angenehme Raumtemperaturen erreicht werden und die Nutzer das Raumklima in der Regel positiv bewerten. Bei lang anhaltenden Hitzeperioden verhindern aber 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 28 °C zu begrenzen.

In diesen untersuchten Büro- und Verwaltungsgebäuden liegen die mittleren operativen Raumtemperaturen zwischen 23 und 27,5 °C, die maximalen zwischen 26 und 30,5 °C. Die Tagesamplituden der Raumtemperatur zur Anwesenheitszeit der Nutzer liegen in der gleichen Größenordnung wie bei den Gebäuden mit passiver Kühlung; im Mittel liegt der Temperaturanstieg über die Anwesenheitszeit hinweg zwischen 1 und 3 Kelvin. Die Raumtemperaturen sinken in der Nacht um bis zu 4 Kelvin.

4: Wassergeführte Kühlung

In den untersuchten Büro- und Verwaltungsgebäuden mit Flächentemperiersystemen (hier überwiegend mit TABS) werden die geforderten Raumtemperaturen unter Berücksichtigung des Nutzerverhaltens fast immer eingehalten. Die mittleren Raumtemperaturen liegen in einem Bereich von 22,5 bis 25,5 °C und damit deutlich unter den gemessenen Werten in Gebäuden mit passiver und luftgeführter Kühlung. Die maximalen Raumtemperaturen liegen zwischen 25 und 28 °C, nur in fünf Gebäuden wird der Grenzwert von 28 °C überschritten. Auch bei erhöhten Außentemperaturen mit einem gleitenden Tagesmittel von mehr als 22 °C sind die maximalen Raumtemperaturen in der Regel auf einen Bereich von 27 bis 28 °C begrenzt. Die Raumtemperaturen schwanken nur relativ geringfügig im Lauf des Tages, d. h. bei den meisten Gebäuden liegt der Temperaturanstieg über die Anwesenheitszeit hinweg im Mittel zwischen 0,5 und 2,5 Kelvin.

In der Komfortanalyse der einzelnen Gebäude zeigt sich kein ausgeprägter Unterschied in Abhängigkeit der jeweils eingesetzten Umweltenergiesenken – eine ausreichende Dimensionierung und eine vernünftige Betriebsführung vorausgesetzt. Erdreich und Grundwasser sind von der Außentemperatur weitgehend unabhängige Wärmesenken, die es ermöglichen, Gebäude auch bei höheren Außentemperaturen effektiv zu kühlen.

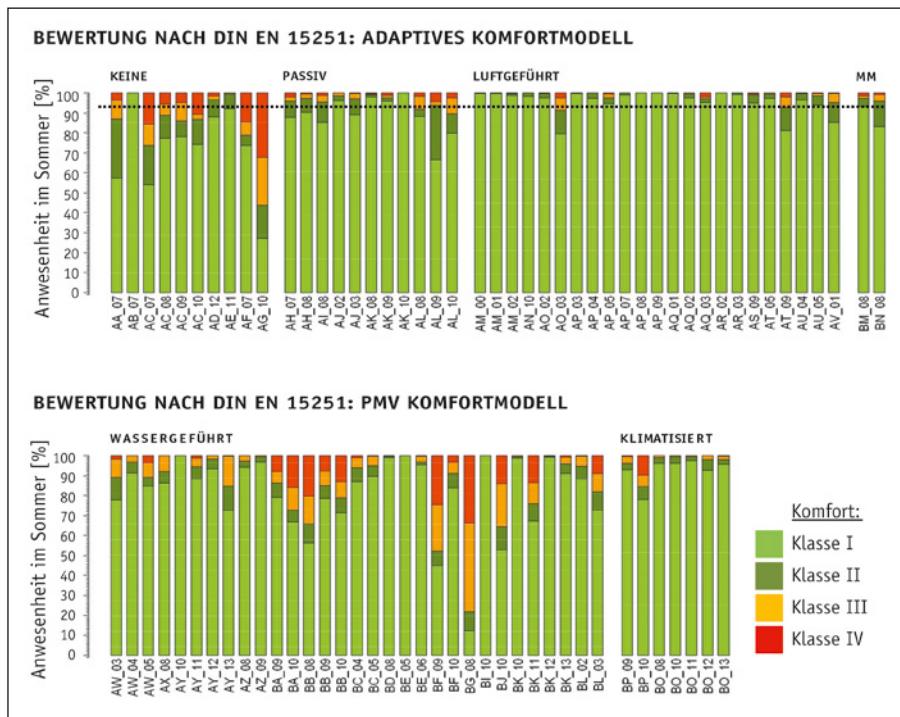


Bild 20: Thermischer Raumkomfort während der Anwesenheit der Nutzer im Sommer für alle Gebäude nach der Komfortnorm DIN EN 15251 (ausschließlich Überschreitung der oberen Komfortgrenzen). Dargestellt ist die prozentuale Anwesenheitszeit [%], wenn die Anforderungen der Komfortklassen I (hellgrün), II (dunkelgrün), III (orange) und IV (rot) erfüllt sind. Methodik der Komfortbewertung nach Darstellung in *Kapitel 3*. Bewertung nach adaptivem Komfortmodell: Gebäude ohne Kühlung, mit passiver und mit luftgeführter Kühlung sowie Hybridkonzepte (MM für mixed mode). Bewertung nach PMV-Komfortmodell: Gebäude mit wassergeführter Kühlung und mit Vollklimatisierung

Deutlich wird in fast allen untersuchten Gebäuden die Unterschreitung der unteren Komfortgrenzen im Sommer – auch zu Zeiten erhöhter Außentemperaturen. Raumtemperaturen in diesem Bereich werden von Nutzern zwar als »etwas kühl«, aber nicht als unbehaglich empfunden. Sie sind mit diesen Temperaturen in der Regel sehr zufrieden. Durch eine Außen- und Raumtemperaturgeführte Regelung ließe sich die Unterschreitung der Komfortgrenzen vermeiden und der erforderliche thermische Nutzenergieaufwand reduzieren.

In der Detailauswertung zeigen sich einige charakteristische Besonderheiten der Bauteilaktivierung: In vier Gebäuden liegen die Raumtemperaturen deutlich höher: Die Gebäude BB und BA wurden saniert; abgehängte Kühlpanele wurden nachgerüstet. Das Gebäude BB verfügt nur über eine unterstützende Kühlung mittels Erdsonden und abgehängten Kühlpaneelen. Die hochwertige, energieintensive

Ausstattung der Grafikerarbeitsplätze verursacht relativ hohe interne Wärmelasten. Dies spiegelt sich auch im großen Anstieg der Raumtemperatur über die Anwesenheitszeit hinweg von im Mittel 2 bis 5 Kelvin wider. Weitere Gründe für den – nach PMV-Komfortmodell – unzureichenden thermischen Raumkomfort liegen in der Auslegung der Kühlkonzepte sowie im Gebäude- und Anlagenbetrieb: nicht korrekt dimensionierte Kühlsysteme (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 bei der Planung nur eine unterstützende Kühlung im Sommer vorgesehen, ohne den Anspruch, die Raumtemperaturen im Sommer durchgehend auf 26 °C zu begrenzen. So verfügt z. B. das Gebäude BL nur über eine erdgekoppelte Sohlplatte mit 10 kW_{therm} (entsprechend 7 W/m²_{NGF}) Kühlleistung.

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 Klimaanlagen gekühlt; die Zuluft wird in der Regel entfeuchtet. Teilweise wird in den Gebäuden automatisch über implementierte Betriebsalgorithmen zwischen passiver Kühlung und Teil-/Vollklimatisierung hin- und hergeschaltet. Besonders in den USA gibt es Bestrebungen, dieses Konzept umzusetzen.

In diesen untersuchten Büro- und Verwaltungsgebäuden liegen die gemessenen Raumtemperaturen auch zu Zeiten mit hohen Außentemperaturen (gleitendes Tagesmittel zwischen 26 und 32 °C) innerhalb der geforderten Grenzen des adaptiven Komfortmodells.

6: Teil- und Vollklimatisierung

Eine luftgeführte Klimatisierung kann in allen Klimazonen durchgängig eine ausreichend hohe Kühlleistung bereitstellen, um auch hohe Komfortansprüche zu erfüllen.

In diesen untersuchten Büro- und Verwaltungsgebäuden liegen die gemessenen Raumtemperaturen auch zu Zeiten mit hohen Außentemperaturen (gleitendes Tagesmittel zwischen 26 und 32 °C) innerhalb der geforderten Komfortgrenzen des PMV-Komfortmodells, d. h. in der Regel zwischen 24 und 26 °C und sind nur sehr geringen Tagesschwankungen unterworfen. Im Mittel liegt der Temperaturanstieg während der Anwesenheitszeit unter 2 Kelvin.



Bild 21: Drei unterschiedliche Gebäudetypen mit Bauteilaktivierung: Bürogebäude in Kopenhagen [Quelle: Danish Technical University], Berufsschule in Biberach [Quelle: Lichtbildner Albrecht Immanuel Schnabel] und Multifunktionsgebäude inHaus in Duisburg [Quelle: Fraunhofer Gesellschaft]



3.4 Praxisbeispiel: Nutzerzufriedenheit mit dem thermischen Komfort in zwei Bürogebäuden mit Umweltenergiekonzepten

Mit längerfristigen Nutzerbefragungen in zwei unmittelbar benachbarten Bürogebäuden in Freiburg (siehe *Bild 22*) wurde das Temperaturempfinden der Nutzer und deren Zufriedenheit mit dem thermischen Raumkomfort zweimal täglich erfasst. Ein Bürogebäude wird im Sommer mit einem maschinellen Nachtlüftungskonzept konditioniert; das zweite verfügt über eine Bauteilaktivierung 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 [46].

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 Raum- bei steigenden Außentemperaturen?
2. Haben Nutzer ein unterschiedliches Temperaturempfinden je nach Kühlkonzept?
3. Ändert sich die Zufriedenheit der Nutzer mit dem thermischen Raumkomfort bei verändertem Kühlkonzept?



Bild 22: Bürogebäude mit maschinellem Nachtlüftungskonzept (links) und wassergeführter Kühlung (rechts) [Quellen: Solar Info Center GmbH und Unmüssig Bauträgergesellschaft Baden mbH]

4. Wie bestimmt sich die Komforttemperatur für unterschiedliche Kühlkonzepte als Beschreibung des Zusammenhangs von Raumtemperatur, Außentemperatur und Nutzerzufriedenheit? Wie lassen sich Kühlkonzepte den bestehenden Modellen in der Norm zuordnen? Müssen Modelle ggf. erweitert bzw. ergänzt werden?

Untersuchungszeitraum und Teilnehmer

In beiden Gebäuden haben die Nutzer Einfluss auf das Raumklima, d. h. sie können individuell Fenster öffnen und schließen sowie den außen liegenden Sonnenschutz bedienen, und es gibt keine Bekleidungsvorschriften.

Die Untersuchung wurde während der gesamten Sommerperiode in den Jahren 2009 und 2010 durchgeführt. Dabei wurde im Rahmen einer täglichen, computerbasierten Befragung das Empfinden und die Zufriedenheit der Nutzer mit dem thermischen Raumkomfort erfasst:

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

Die Einschätzung von Raumklima und Zufriedenheit erfolgte auf einer sieben-stufigen, die der Veränderungswünsche auf einer fünf-stufigen Skala. Bei beiden Skalen waren nur die Endpunkte, nicht jedoch 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.

Zusätzliche Befragung zu ergriffenen Maßnahmen

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

Die Untersuchung zeigte, 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. Vor allem versuchen die Nutzer das Raumklima dadurch zu regulieren, dass sie die Fenster öffnen oder den Sonnenschutz herunterfahren.

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.

Auswertung

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

Tabelle 2: Informationen zur Methodik und Durchführung der Befragung und Messungen

	Luftgeführte Kühlung	Wassergeführte Kühlung
Befragte Nutzer		
Anzahl	26 (9 weibliche und 17 männliche Nutzer)	29 (9 weibliche und 20 männliche Nutzer)
Alter	bis 25 Jahre: 4 Nutzer 26 bis 35 Jahre: 18 Nutzer 36 bis 45 Jahre: 3 Nutzer 46 bis 55 Jahre: keine Nutzer über 55 Jahre: 1 Nutzer	bis 25 Jahre: 2 Nutzer 26 bis 35 Jahre: 19 Nutzer 36 bis 45 Jahre: 8 Nutzer 46 bis 55 Jahre: keine Nutzer über 55 Jahre: keine Nutzer

Fortsetzung auf nächster Seite

Fortsetzung von Tabelle 2

	Luftgeführte Kühlung	Wassergeführte Kühlung
Befragung		
Zeitraum	1.7.09 – 30.9.09	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? (7=heiß; 1=kalt) 2. Wie zufrieden bist du mit der Raumtemperatur? (4=sehr unzufrieden; 1=sehr zufrieden) 3. Spürst du im Moment eine Luftbewegung/Zugluft? (5=gar nicht ; 1=sehr stark) 4. Wie empfindest du die Luftfeuchte im Moment? (5=sehr trocken; 1=sehr feucht)	
Messungen		
Ort	am Arbeitsplatz der befragten Nutzer	
Innenraumklima	Raumtemperatur [°C] und Raumluftfeuchte [%] 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 Bekleidungsvorschrift	
	manuelle Bedienung des Sonnenschutzes	
	manuelle Bedienung der Fenster	
	mindestens ein Fenster pro zwei Nutzer	
	keine Beeinflussung des Raumtemperatursollwertes, da Nachtlüftungskonzept	Sollwertregler in 2-Kelvin-Schritten

Gebäude- und Energiekonzepte der Demonstrationsgebäude

Die für die Befragung genutzten Demonstrationsgebäude haben zum Ziel, durch passive Maßnahmen und den Einsatz von Umweltwärmesensenken (Außenluft und Grundwasser) den Kühlenergiebedarf (ca. 25 kWh_{therm}/m²a) 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). In beiden Gebäuden hat der Nutzer die Möglichkeit, durch Öffnen der Fenster, Benutzen des Sonnenschutzes und Verstellen von Raumtemperatursollwerten (nur Gebäude mit wassergeführter Kühlung) Einfluss auf das Innenraumklima zu nehmen. Die Nutzer arbeiten in Zwei- und Vier-Personen- sowie Gruppenbüros. Das Energiekonzept der Gebäude für Heizen, Kühlen und Lüften ist schematisch in *Bild 23* dargestellt.

Lüftungssystem: Während der Anwesenheitszeit der Nutzer wird das Gebäude mit Nachtlüftung manuell über Fenster belüftet. Das Gebäude mit wassergeführter Kühlung verfügt über eine Zu- und Abluftanlage. Die Zuluft wird über einen grundwassergekoppelten Wasser-Luft-Wärmeübertrager etwas gekühlt.

Kühlkonzept: Im Gebäude mit luftgeführter Kühlung wird im Sommer ein maschinelles Nachtlüftungskonzept mit Abluftanlage (1,5-facher 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 mit wassergeführter Kühlung 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 Kelvin ausgelegt. Jeder Büroraum verfügt über eine individuelle Raumtemperaturregelung (Sollwertregler in 2-Kelvin-Schritten). Damit gibt es im gesamten 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.

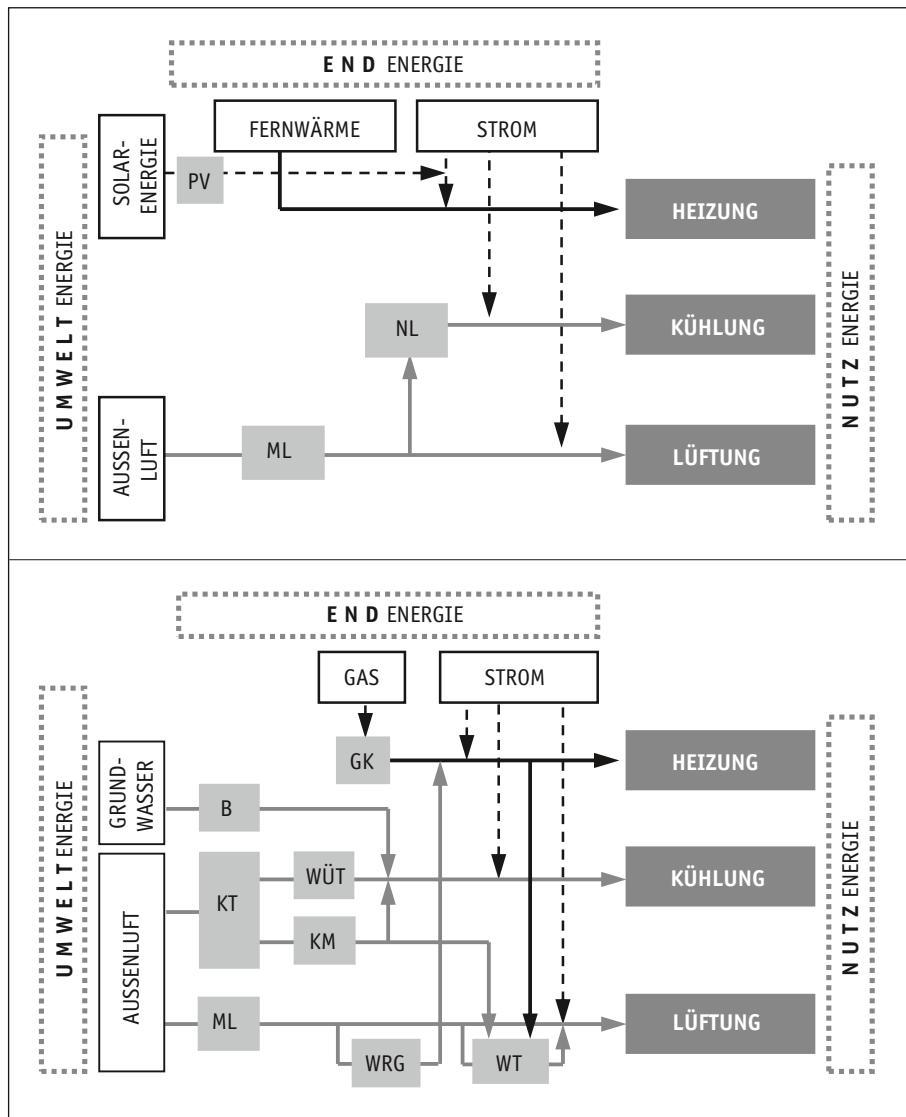


Bild 23: Versorgungsschema der Gebäude: (oben) luftgeführte und (unten) wassergeführte Kühlung; Anmerkungen: maschinelle Lüftung (ML), Nachtlüftung (NL), Photovoltaik (PV), Gaskessel (GK), Wärmerückgewinnung (WRG), Wärmeübertrager (WÜT), Kühlturm (KT), Grundwasserbrunnen (B), Kältemaschine (KM)

3.4.1 Auswertung nach dem Komfortmodell

In *Bild 24* und *Bild 25* sind die Ergebnisse der Komfortauswertung für die gemessene Raumtemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit dargestellt.

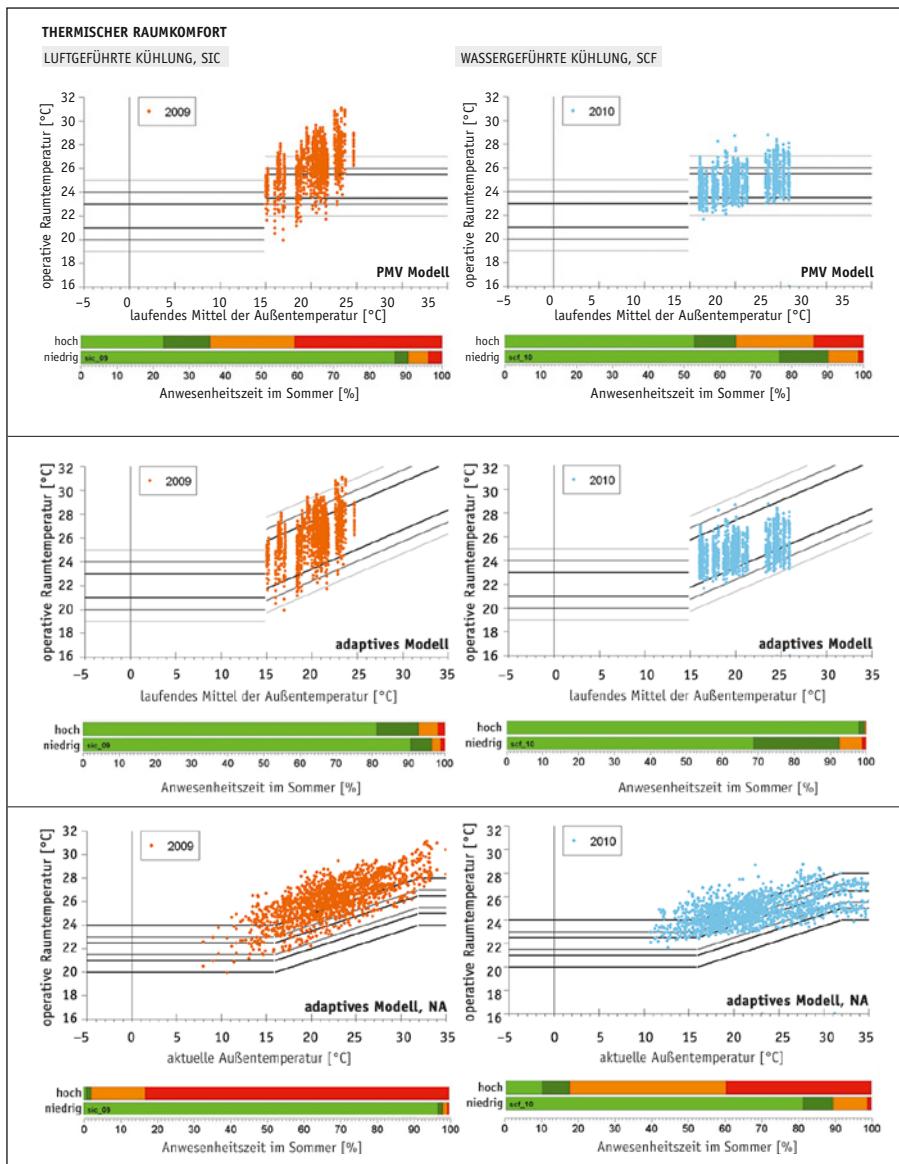


Bild 24: Thermischer Raumkomfort: (1) Komfortgrafik: stündliche operative Raumtemperatur [°C] über dem gleitenden Mittel der Außentemperatur [°C] während der Anwesenheitszeit der Nutzer nach DIN EN 15251; oben: PMV-Komfortmodell; Mitte: adaptives Komfortmodell; unten: adaptives Komfortmodell nach nationalem Anhang DIN EN 15251/NA:2012:12. Graue und schwarze Linien kennzeichnen die oberen und unteren Komfortgrenzen I bis III.
 (2) Thermischer Komfort-Fußabdruck: prozentuale Anwesenheitszeit [%], während derer das Gebäude die Anforderungen der Komfortklassen I bis III erfüllt: Klasse I (hellgrün), Klasse II (dunkelgrün), Klasse III (orange) und außerhalb der definierten Komfortgrenzen (rot).

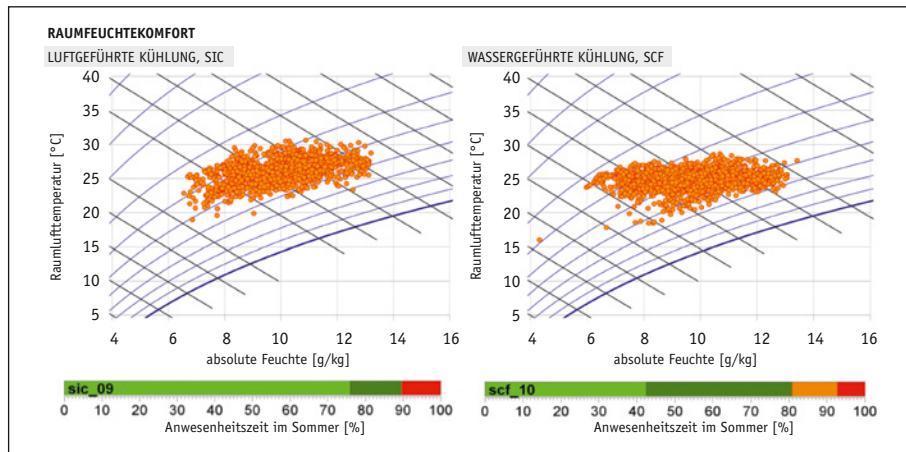


Bild 25: Raumfeuchtekomfort: stündlich gemessene Raumtemperatur und Raumfeuchte; dargestellt im hx-Diagramm und Auswertung als Komfort-Fußabdruck für den Sommerfall

Zentrale Ergebnisse für das Gebäude mit luftgeführter Kühlung

- Nach dem adaptiven Komfortmodell kann Komfortklasse II während 93 % der Anwesenheitszeit der Nutzer eingehalten werden.
- Die Komfortanforderungen nach DIN EN 15251/NA können nur während weniger Stunden eingehalten werden; Klasse III wird zu 18% der Anwesenheitszeit erfüllt.
- Insbesondere bei Außentemperaturen mit einem gleitenden Tagesmittel von mehr als 22 °C steigen die Raumtemperaturen deutlich über 28 °C.
- 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 hinweg deutlich. Die mittleren 50% der Werte umfassen einen Temperaturbereich von 2 bis 3 Kelvin.
- Raumtemperaturen zwischen den einzelnen untersuchten Räumen unterscheiden sich voneinander aufgrund interner und solarer Lasten (Belegungsdichte pro Raum und Ausrichtung der Fenster) und aufgrund des Nutzerverhaltens teilweise erheblich. Die Mittelwerte der Raumtemperaturen während der gesamten Sommerperiode liegen zwischen 25,5 und 28,5 °C.
- Über die gesamte Sommerperiode hinweg 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 im Sommer liegen die gemessenen Werte über der Schwülegrenze von 12 g_{Wasser}/kg_{Luft}.

Zentrale Ergebnisse für das Gebäude mit wassergeführter Kühlung

- Nach dem PMV-Komfortmodell wird die obere Komfortklasse II während 65 % der Anwesenheitszeit gewährleistet.
- Auch bei Außentemperaturen mit einem gleitenden Tagesmittel von mehr als 22 °C sind die maximalen Raumtemperaturen auf einen Bereich von 27 bis maximal 28 °C begrenzt.
- Wie beim Gebäude mit luftgeführter Kühlung findet eine deutliche Unterschreitung der unteren Komfortgrenzen der Klasse II statt. Nach dem PMV-Komfortmodell findet die Unterschreitung eher zu Zeiten mit niedrigeren Außentemperaturen statt, wohingegen beim adaptiven Komfortmodell die Unterschreitung bei höheren Außentemperaturen auftritt.
- Die Raumtemperaturen schwanken geringfügiger als im anderen Gebäude; die mittleren 50 % der gemessenen Tagesamplituden liegen in den einzelnen Räumen zwischen 1 und 2 Kelvin.
- Unterschiede zwischen den Temperaturen in den einzelnen Büros sind etwas geringer ausgeprägt als im Gebäude mit luftgeführter Kühlung, aber auch hier haben offensichtlich Belegungsdichte und Raumausrichtung und damit unterschiedliche interne und solare Lasten einen Einfluss auf die Raumtemperaturen. Die Mittelwerte der Raumtemperaturen während der gesamten Sommerperiode liegen zwischen 24 und 26 °C.
- Der Raumfeuchtekomfort nach Klassen II und III wird nicht über die gesamte Sommerperiode hinweg gewährleistet. Die relative Feuchte liegt zwischen 30 und 70 %. Für einige Stunden wird die Schwülegrenze überschritten.

3.4.2 Empfinden der Raumtemperatur

In der täglichen Befragung gaben die Nutzer an, wie sie die Raumtemperatur zum Zeitpunkt der Befragung empfanden (sieben-stufige Skala von »kalt« bis »heiß«) und wie zufrieden sie damit waren. Beide Befragungen in den Gebäuden machen deutlich, dass Raumtemperaturen über 26 °C in der Regel als »etwas warm« bis »warm« empfunden werden. Eine Raumtemperatur von mehr als 28 °C bewerten die Befragten als »warm« bis »heiß«. Raumtemperaturen bis zu einem gemessenen Wert von 20 °C wurden in der Untersuchung nie als »kalt« empfunden. *Bild 26* zeigt das Empfinden der Raumtemperatur:

- 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«.
- Wider Erwarten gibt es recht viele unzufriedene Nutzer bei Raumtemperaturen bis 26 °C. 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«.

3.4.3 Zufriedenheit mit der Raumtemperatur

Aus der Gesamtzufriedenheit mit den Raumtemperaturen in *Bild 27* ergeben sich offensichtliche Unterschiede zwischen den Kühlkonzepten:

- Im Gebäude mit luftgeführter Kühlung sind 77 % der Nutzer über die gesamte Untersuchungsperiode hinweg mit der Raumtemperatur zufrieden. Anders im Gebäude mit wassergeführter Kühlung: Hier waren sogar 91 % der Befragten zufrieden mit der Raumtemperatur. Die Anzahl der unzufriedenen Nutzer korreliert mit der Raumtemperatur, d. h. sie 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 von unter 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 von 52 % unzufriedenen Nutzern.
- Im Gebäude mit wassergeführter Kühlung wurden maximale Raumtemperaturen von nur 28 °C gemessen und das während relativ weniger Stunden. Dennoch scheint auch beim Gebäude mit wassergeführter Kühlung die Unzufriedenheit der Nutzer mit Raumtemperaturen von mehr als 26 °C signifikant zuzunehmen.

3.4.4 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), momentaner Raumtemperatur zum Zeitpunkt der Online-Erhebung und der Frage »Wie zufrieden bist du mit der Raumtemperatur?« die verlässlichste Korrelation.

Zentrale Ergebnisse für das Gebäude mit luftgeführter Kühlung

- Die von der Norm definierten Komfortklassen I bis III von 2, 3 bzw. 4 Kelvin Abweichung 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, mit denen die Nutzer zufrieden sind.

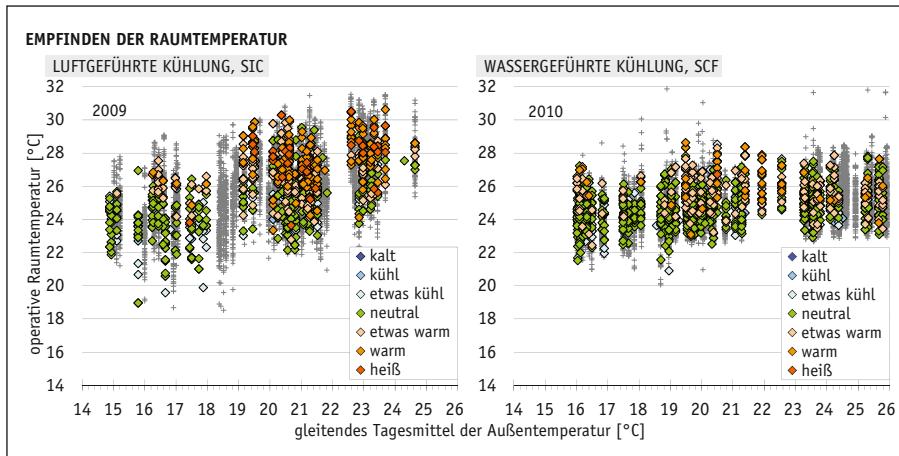


Bild 26: Empfinden der Raumtemperatur durch die Nutzer: stündliche operative Raumtemperatur [°C] an allen Arbeitsplätzen der befragten Nutzer, aufgetragen über dem gleitenden Mittel der Außentemperatur [°C]. Zusätzlich dargestellt ist das Empfinden der Raumtemperatur durch die Nutzer laut sieben-skaliger 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.

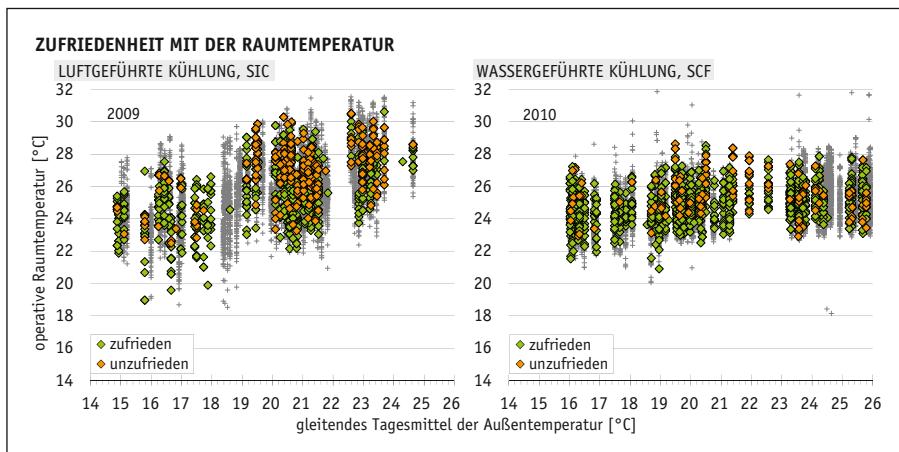


Bild 27: Nutzerzufriedenheit mit der Raumtemperatur: stündlich gemessene operative Raumtemperatur [°C], aufgetragen über dem gleitenden Mittel der Außentemperatur [°C] während der Anwesenheitszeit der Nutzer; Raumtemperaturmessung (grau), Nutzer ist »sehr zufrieden« oder »zufrieden« mit der Raumtemperatur (hellgrün) und Nutzer ist »unzufrieden« oder »sehr unzufrieden« mit der Raumtemperatur (orange). Zusätzlich dargestellt ist die Komforttemperatur: nach DIN EN 15251:2007-08 (rot) und gemäß der Befragungsanalyse (schwarz) sowie die entsprechenden Komfortgrenzen für die Klassen I bis III.

- 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 $\vartheta_{\text{Raum},c} = 17,8 \text{ }^{\circ}\text{C} + 0,34 \cdot \vartheta_{\text{e,rm}}$ und Norm $\vartheta_{\text{Raum},c} = 18,8 \text{ }^{\circ}\text{C} + 0,33 \cdot \vartheta_{\text{e,rm}}$. Aus der Nutzerbefragung ergibt sich lediglich eine geringfügige Korrektur um 1 Kelvin 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 von mehr als 28 °C mit einem deutlichen Rückgang der Nutzerzufriedenheit 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 %.

Zentrale Ergebnisse für das Gebäude mit wassergeführter Kühlung

- Die Raumkomforttemperatur bestimmt sich zu $\vartheta_{\text{Raum},c} = 22,21 \text{ }^{\circ}\text{C} + 0,11 \cdot \vartheta_{\text{e,rm}}$. 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 Nutzerbefragung kann die Komforttemperatur mit derselben Formel unabhängig davon berechnet werden, ob aktuelle Außentemperatur, deren Tagesmittel oder ihr gleitendes Tagesmittel als Referenz herangezogen werden.
- Die ermittelte Komforttemperatur entspricht nahezu dem PMV-Komfortmodell der DIN EN 15251. Die von der Norm definierten Komfortklassen I bis III von 2, 3 bzw. 4 Kelvin Abweichung 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:2012-12 zeigt sich für Außentemperaturen von mehr als 26 °C eine gute Übereinstimmung. Bei geringeren Außentemperaturen fordert die Norm zwischen 0,5 und 1 Kelvin 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 %.

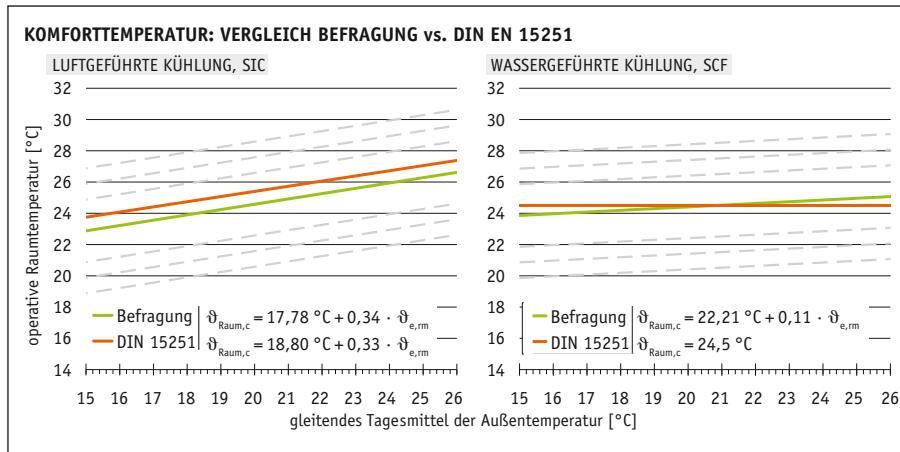


Bild 28: Vergleich der ermittelten Komforttemperatur auf Basis der Nutzerbefragung und der Komfortnorm DIN EN 15251

- 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.
- 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 von mehr als 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 %.

Bild 28 zeigt das Ergebnis dieser Korrelation im Vergleich mit dem adaptiven Komfortmodell (für das Gebäude mit Nachtlüftung) und dem PMV-Modell (für das TABS-Gebäude). Die signifikanten Unterschiede in der Zufriedenheit mit der Raum- bzw. der Komforttemperatur in Abhängigkeit des Kühlkonzeptes sind nicht zuletzt deswegen bemerkenswert, da an den Befragungen zu einem großen Teil dieselben Nutzer teilnahmen, nämlich 12 von 26 bzw. 29 Befragten. Dieselben Nutzer bewerten also ihr Empfinden und ihre Zufriedenheit mit der Raumtemperatur unterschiedlich für das jeweilig eingesetzte Kühlkonzept, obwohl die beiden Gebäude ansonsten nahezu identisch ausgerüstet sind.

Praktische Anwendung der Komfortmodelle auf Gebäude, die mit Umweltenergie gekühlt werden

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. 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:

1. Das Raumklima in Gebäuden mit begrenzter Kühlleistung wird von den Nutzern positiv bewertet: Im Gebäude mit Nachtlüftungskonzept sind 77 % der Nutzer über die gesamte Untersuchungsperiode hinweg mit der Raumtemperatur zufrieden und im Gebäude mit wassergeführter Kühlung sind es sogar 91 %.
2. Die Anzahl der mit der Raumtemperatur unzufriedenen Nutzer korreliert mit der Raumtemperatur, d.h. sie 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 Raum- bei höheren Außentemperaturen. Jedoch ist bei Raumtemperaturen von 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 bei 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 Raum- 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.

4 Planung und Auslegung von thermoaktiven Bauteilsystemen zur Raumkonditionierung

Die Nutzung eines Gebäudes, die Anforderungen an den Raumkomfort und die Erwartungen an den Energieverbrauch müssen in der Planungsphase klar definiert und im Gebäudebetrieb berücksichtigt werden. Bei der Planung von thermoaktiven Bauteilsystemen zur Raumkonditionierung sind darauf basierend vier unterschiedliche Aspekte zu berücksichtigen:

- **Leistungsfähigkeit:** Spezifische Heiz- bzw. Kühlleistungen der ausgewählten Bauteilaktivierung bei den vorliegenden Auslegungsparametern.
- **Konstruktive und räumliche Randbedingungen:** Für die Bauteilaktivierung zur Verfügung stehende Bauteile und Oberflächen im Raum sowie evtl. Einschränkungen, die sich aus der Baukonstruktion, anderen gebäudetechnischen Gewerken sowie den raumbildenden Ausbauten ergeben.
- **Leistungsanforderungen:** Durch die Bauteilaktivierung zu erbringende teilweise oder vollständige Lastabdeckung (ggf. im Zusammenspiel mit anderen Heiz- oder Kühlseinrichtungen im Raum), Abhängigkeit der Lasten von den bauphysikalischen Parametern der Fassade (Transmission, solare Lasten, Infiltration), des Raumes sowie der Nutzung (innere Lasten) und den Anforderungen an das zeitliche Betriebsregime (auch Lüftung).
- **Hydraulische Planung:** Länge, Anzahl und Anordnung der Verlege- und Verteilkreise, Massenströme und Energieaufwand zur Förderung des Wärmeträgers sowie Anzahl und Anordnung der Regelzonen.

Alle diese Bereiche sind dabei miteinander sowie mit der Wärme- und Kälteversorgung (siehe *Kapitel 5*) in Einklang zu bringen. Aufgrund der Speicherfähigkeit und thermischen Trägheit der Bauteilaktivierung ist zusätzlich eine starke Abhängigkeit von der Betriebsführungsstrategie gegeben (siehe *Kapitel 6*). Bauphysikalische und nutzerseitige Randbedingungen und Anforderungen an Raumkonditionierung, Wärme- und Kälteversorgung sowie Betriebsführung sind deshalb gerade beim Einsatz von TABS besonders eng gekoppelt. Für den erfolgreichen Einsatz der Bauteilaktivierung ist somit eine durchgängige Systemplanung der Raum- und Gebäudeklimatik, Gebäudetechnik und Energieversorgung erforderlich.

4.1 Leistungsfähigkeit von thermoaktiven Bauteilsystemen

Im stationären Zustand liefert eine Bauteilaktivierung bei typischem Deckenaufbau mit Trittschalldämmung oder Doppelboden Kühlleistungen von rund 50 W/m^2 . Oberflächennahe Systeme können unter entsprechenden Betriebsbedingungen und Dimensionierung höhere Kühlleistungen von bis zu 70 W/m^2 und abgehängte Hochleistungssysteme (als ergänzendes System) solche von über 100 W/m^2 erreichen,

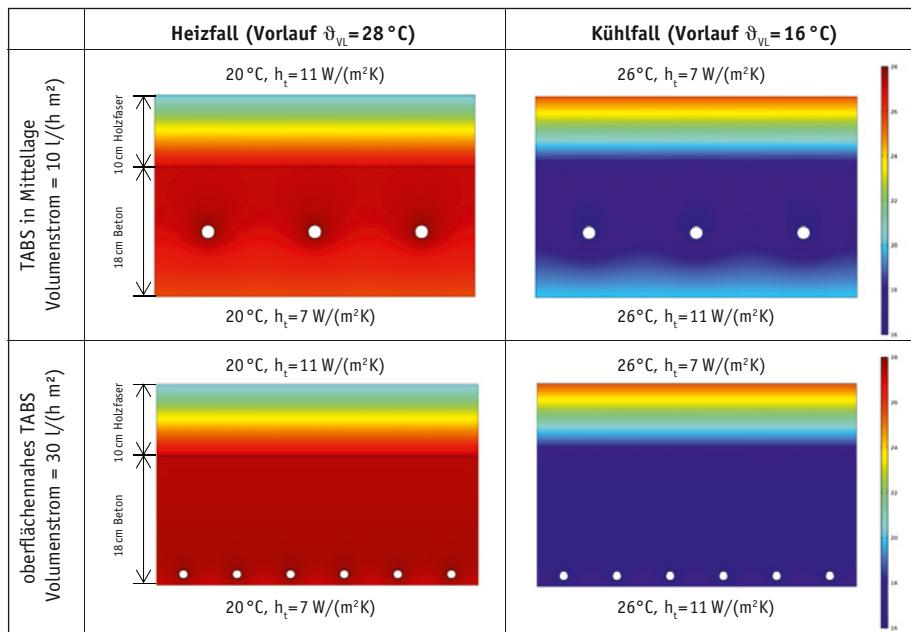


Bild 29: Simulierter Temperaturverlauf für eine Bauteilaktivierung in Mittellage (15 cm Rohrabstand, PE-Xa 20 · 2,3) und eine oberflächennahe Bauteilaktivierung (7,5 cm Rohr-abstand, PE-Xa 14 · 2,0)

siehe *Bild 30*. Die Kühlleistung ist dabei 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.

Die Heizleistung ist durch Komfortanforderungen begrenzt. Bei typischen Raumgeometrien und vollständiger Belegung soll die Oberflächentemperatur 27–28 °C nicht überschreiten. Damit ist wiederum die Vorlauftemperatur auf max. 38 °C (in der Regel deutlich niedriger) begrenzt. Im Heizfall liefert eine Bauteilaktivierung damit rund 30 W/m², siehe *Bild 30*. Entsprechend dimensionierte oberflächennahe Systeme können Heizleistungen von 40 bis 50 W/m² und abhängige Hochleistungssysteme (als ergänzendes System, in Teilflächen) Leistungen von über 80 W/m² bereitstellen.

Bild 29 zeigt für zwei typische Betriebszustände den Temperaturverlauf in der Betondecke. In diesem Versuchsaufbau (siehe auch *Bild 35* in *Kapitel 4.1.3*) ist die Betondecke 18 cm dick und ist nach oben mit 10 cm Holzfaserdämmstoff gegen das temperierte Technikum gedämmt. Messungen für den dynamischen Betriebsfall zeigt *Bild 36* in *Kapitel 4.1.3*.

Die Heiz- bzw. Kühlleistung thermoaktiver Bauteilsysteme hängt ab von der Temperaturdifferenz zwischen dem Wärmeträgermedium (Heiz- bzw. Kühlmittel) und den

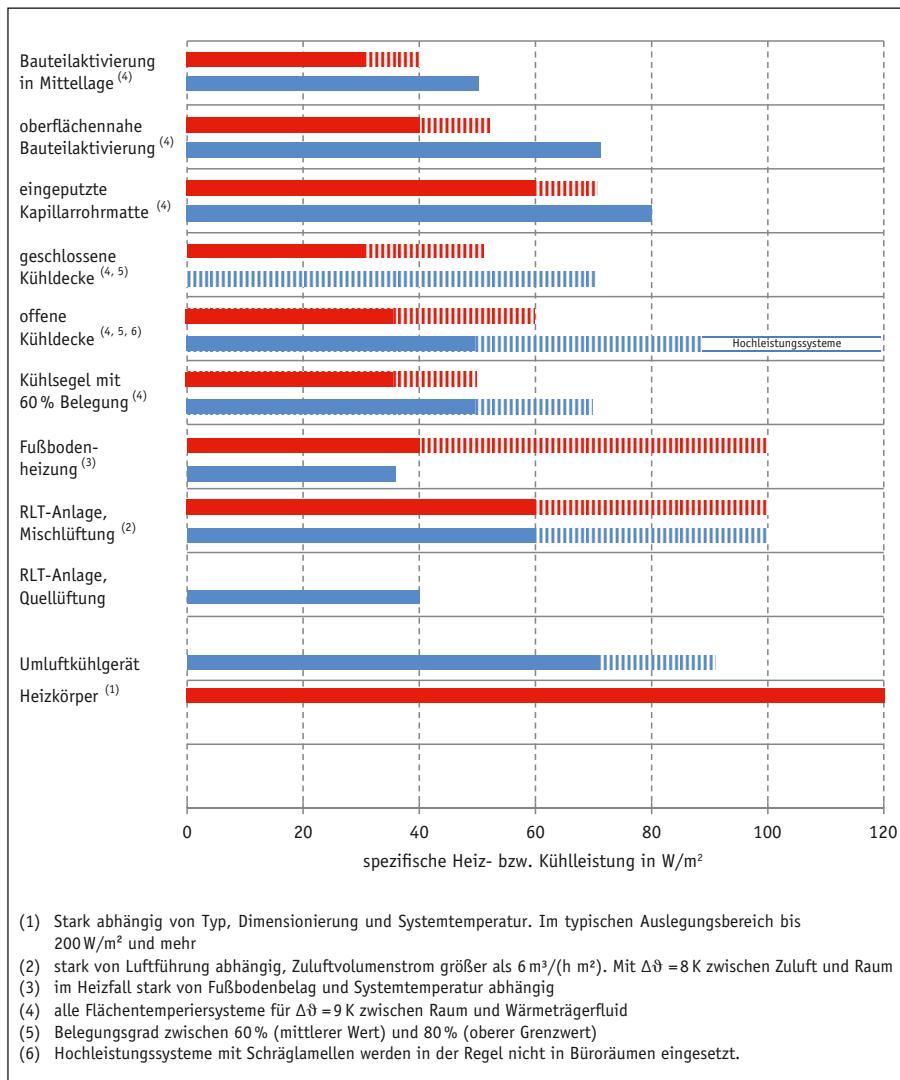


Bild 30: Heiz- und Kühlleistung ausgewählter Übergabesysteme für Büroräume im Vergleich mit der Bauteilaktivierung. Alle Werte bezogen auf Fußbodenfläche und für einen spezifischen Zuluftvolumenstrom von 6 m³/(h m²). Der obere Grenzwert (bei entsprechender Berücksichtigung von Betriebsweise und Auslegung) ist gestrichelt dargestellt.

angrenzenden Räumen bzw. sonstigen angrenzenden Bereichen (Erdreich, Außenumgebung usw.) sowie von den Wärmetransportvorgängen im Bauteil und an den Bauteiloberflächen. In *Bild 31* sind die beteiligten thermischen Vorgänge beispielhaft skizziert.

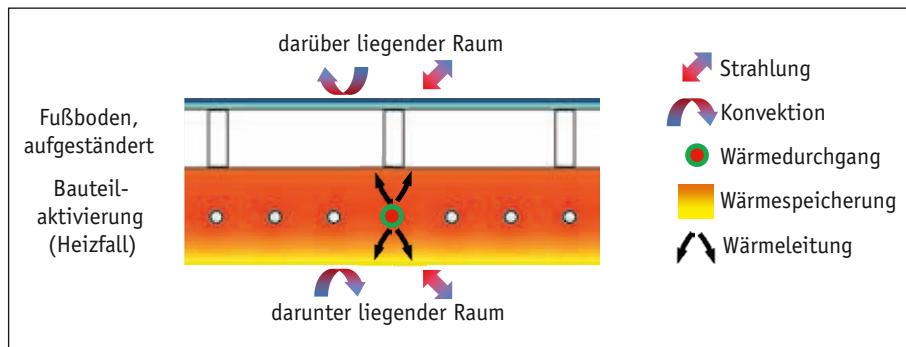


Bild 31: Thermische Vorgänge beim Einsatz thermisch aktiver Bauteile am Beispiel einer Betonkerntemperierung in der Zwischendecke zwischen zwei Räumen

Bei der Ermittlung der Heiz- bzw. Kühlleistung eines TABS ist das Zusammenwirken der folgenden Prozesse und Parameter zu berücksichtigen:

- Temperaturänderung des Wärmeträgermediums entlang des Strömungswegs durch das TABS
- Wärmedurchgang durch das Wärmeübertragerohr: Wärmeübergang vom Wärmeträgermedium an die Rohrinnenoberfläche und Wärmeleitung in der Rohrwandung
- mehrdimensionale dynamische, d. h. mit Wärmespeicherung gekoppelte Wärmeleitung im Bauteil, das meist aus mehreren Schichten und Materialien besteht
- Randbedingungen für den Wärmeübergang an den Bauteiloberflächen an die jeweilige Umgebung; in der Regel asymmetrische Verhältnisse auf beiden Bauteilseiten (z. B. nach oben und unten), abhängig vom Bauteilaufbau und den Randbedingungen der thermischen Wirkung in beide Richtungen
- zulässiger Bereich der Betriebsparameter: Temperaturen und Massenströme des Wärmeträgermediums sowie Oberflächentemperaturen in Aufenthaltsbereichen.

Die Norm DIN EN 15377 [19] beinhaltet wichtige Grundlagen für die Planung und Auslegung von mit Wasser betriebenen »eingebetteten Flächenheiz- und -kühlsystemen« (siehe Kapitel 2.2.2). In dieser Norm sind u. a. unterschiedliche Methoden zur Bestimmung der Leistung und des thermisch-energetischen Verhaltens verschiedener Bauarten und Anwendungsfälle eingebetteter Flächenheiz- und -kühlsysteme aufgeführt. Bei TABS ist dabei insbesondere zwischen der Betrachtung des statio-nären und des transienten (dynamischen) Verhaltens des thermisch aktivierten Bauteils zu unterscheiden. Die Gesetzmäßigkeiten des Wärmeübergangs und der Wärmestromdichte zwischen einer temperierten Bauteiloberfläche und einem an-grenzenden Raum sind dagegen unabhängig vom Typ des eingebetteten Systems.

4.1.1 Wärmeübertragung zwischen einer temperierten Bauteilloberfläche und dem Raum

Die einem (Innen-)Raum von einer geschlossenen, temperierten Fläche zugeführte Heizleistung bzw. abgeführte Kühlleistung hängt von der Oberflächentemperatur der Fläche und den raumseitigen Temperaturen und Randbedingungen ab. Grundsätzlich wird dabei Wärme sowohl durch Strahlung als auch durch Konvektion in vergleichbarer Größenordnung übertragen, sodass stets beide Prozesse berücksichtigt werden müssen.

Wärmestrahlung wird in Innenräumen zwischen den Oberflächen der temperierten und der nicht temperierten Raumumschließungsflächen, des Inventars sowie der anwesenden Personen übertragen. Konvektiv steht eine Raumumschließungsfläche mit der angrenzenden Luftschicht im Austausch, wobei der Anteil der Wärmeleitung i. d. R. unter den konvektiven Wärmeübergang subsumiert wird. Entsprechend der Ursachen der Luftbewegung wird der konvektive Wärmetransport unterteilt in die durch thermische Auftriebskräfte hervorgerufene freie Konvektion und in die erzwungene Konvektion, die aus einer durch Lüftung aufgeprägten Luftströmung resultiert. In belüfteten Innenräumen liegt häufig auch eine Überlagerung beider Mechanismen in vergleichbarer Stärke vor, was als Mischkonvektion bezeichnet wird [35].

Der genormten Leistungsbestimmung von temperierten Flächen im Beharrungszustand liegen zwei Vereinfachungen der vorgenannten Vorgänge zugrunde. Erstens werden die Wärmeübertragung durch Konvektion und Strahlung in einem Gesamt-Wärmeübergangskoeffizienten zusammengefasst und als raumseitige Bezugstemperatur die operative Raumtemperatur ϑ_i (Norm-Innentemperatur in DIN EN 15377) verwendet, in die die Lufttemperatur und die (Strahlungs-)Temperaturen der Raumumschließungsflächen eingehen. Zweitens wird der Fall ausschließlicher bzw. dominierender freier Konvektion betrachtet. Für den Fall der Wärmezufuhr über den Boden (Heizung) sowie der Wärmeabfuhr über die Decke (Kühlung) gilt aus Symmetriegründen identisch die so genannte Basiskennlinie für die Wärmestromdichte \dot{q} der Fußbodenheizung, wie sie in DIN 1264-2, DIN 15377-1 und [86] beschrieben wird:

$$\dot{q} = 8,92 \cdot (\vartheta_{s,m} - \vartheta_i)^{1,1} \quad [W/m^2] \quad (4)$$

mit

$\vartheta_{s,m}$ mittlere Oberflächentemperatur der thermisch aktivierten Fläche
 ϑ_i operative Raumtemperatur, auch Norm-Innentemperatur

Aus dieser Beziehung ergibt sich mit

$$\dot{q} = h_t \cdot (\vartheta_{s,m} - \vartheta_i) \quad (5)$$

für den Gesamt-Wärmeübergangskoeffizienten:

$$h_t = 8,92 \cdot (\vartheta_{S,m} - \vartheta_i)^{0,1} \quad [W/(m^2K)] \quad (6)$$

In DIN EN 15377 werden darüber hinaus noch konstante Werte des Gesamt-Wärmeübergangskoeffizienten h_t für die Fälle Wandheizung und Wandkühlung von $8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, Deckenheizung von $6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und Fußbodenkühlung von $7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ festgelegt. Die beiden letztgenannten Werte gelten für stabile Schichtungen, die bei einer warmen Decke bzw. einem kalten Boden auftreten, solange die Schichtung nicht gestört wird (z. B. durch erzwungene Konvektion). In den anderen Fällen stellt sich eine freie Konvektionsströmung der Luft ein. Der für einen warmen Boden bzw. eine kalte Decke mitunter angegebene Wert von $h_t = 11 \text{ W}/\text{m}^2$ ergibt sich aus *Gleichung 6* für eine Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Raum von 8 K.

Bei detaillierteren Betrachtungen und Berechnungen (z. B. in der thermisch-energetischen Gebäudesimulation sowie für mehrdimensionale, lokal aufgelöste thermische Modelle und Behaglichkeitsanalysen) müssen Wärmestrahlung \dot{q}_r und Konvektion \dot{q}_k getrennt betrachtet werden. Dies kann entweder durch eine direkte physikalische Berechnung der Wärmeströme oder durch die Verwendung getrennter Wärmeübergangskoeffizienten für den Strahlungs- und den Konvektionsanteil an der Wärmeübertragung geschehen:

$$\dot{q}_{\text{ges}} = \dot{q}_r + \dot{q}_k = h_r \cdot (\vartheta_{S,m} - \vartheta'_{S,m}) + h_k \cdot (\vartheta_{S,m} - \vartheta_L) \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (7)$$

mit

$$\begin{aligned} \vartheta_{S,m} & \text{ mittlere Oberflächentemperatur des TABS-Bauteils} \\ \vartheta'_{S,m} & \text{ mittlere Oberflächentemperatur der anderen Bauteile} \\ \vartheta_L & \text{ Lufttemperatur} \end{aligned}$$

Die in der vorstehenden Gleichung verwendete Vereinfachung der Wärmeübertragung durch thermische Strahlung in einem Raum mit Hilfe eines Strahlungs-Wärmeübergangskoeffizienten h_r führt z. B. zu einer Beziehung der Form

$$h_r = \varepsilon_{\text{res}} \cdot \sigma \cdot b \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (8)$$

mit

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{res}} & \text{ resultierender Emissionsgrad der beteiligten Oberflächen [-]} \\ \sigma & \text{ Stefan-Boltzmann-Konstante } (5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)) \\ b & \text{ Temperaturfaktor } [\text{K}^3]. \end{aligned}$$

In Innenräumen resultieren daraus Werte im Bereich von $h_r \approx 5 - 5,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Konvektive Wärmeübergangskoeffizienten (h_k) lassen sich als Funktionen entsprechender Ähnlichkeitskennzahlen (Nusselt-, Raleigh-, Prandtl-, Reynoldszahl usw.) darstellen, wobei je nach Strömungsregime der Luft (freie, erzwungene oder Misch-

konvektion) unterschiedliche Ansätze gelten. Korrelationen greifen oft auf folgende Form zurück:

$$h_k = C \cdot (\vartheta_{s,m} - \vartheta_i)^n \quad [W/(m^2K)] \quad (9)$$

Dies ist eine Grundform für die Beschreibung des Wärmeübergangs durch freie Konvektion in Innenräumen üblicher Größe und Geometrie. Die Konstante C und der Exponent n hängen von der Lage der Raumumschließungsfläche und der Richtung des Wärmestroms ab. Typische Werte sind [35], [55]:

- $n \approx 0,3$ [-]
- $C \approx 2$ $[W/(m^2K^n)]$ für beheizten Boden und gekühlte Decke
- $C \approx 1,08$ $[W/(m^2K^n)]$ für gekühlten Boden und beheizte Decke.

Die realitätsnahe Beschreibung der Wärmeübertragung in Räumen mithilfe derartiger Korrelationen für Auslegungs- und Simulationsmodelle ist auch heute noch Gegenstand experimenteller und theoretischer Untersuchungen, z.B. [35] und [113]. Hierbei wird z. B. untersucht

- unter welchen Randbedingungen (Oberflächen- und Lufttemperaturen, die aus Belüftung herrührende Strömungssituation usw.) freie, erzwungene oder Mischkonvektion vorherrscht
- welche Wärmeübergangskoeffizienten sich bei (in Räumen häufig auftretenden) sehr geringen Temperaturdifferenzen zwischen Oberfläche und Raumluft einstellen oder
- welchen Einfluss Hindernisse, wie z. B. (Teil-)Abhängungen an Decken, auf die Wärmeübertragung haben.

Darüber hinaus finden sich in DIN DN 15377 Empfehlungen zur Einhaltung bestimmter maximaler bzw. minimaler Oberflächentemperaturen, die aus bauphysikalischen und technischen Randbedingungen sowie den Anforderungen an die thermische Behaglichkeit resultieren. Die Oberflächentemperatur von Fußböden soll z. B. 29 °C (Aufenthaltszone) bzw. 35 °C (Randzone) nicht über- und 19 °C nicht unterschreiten. Für Wände werden 35 – 50 °C (Vorzugswert: 40 °C) als maximale Oberflächentemperatur angegeben, die minimale Oberflächentemperatur ist je nach Randbedingungen zur Vermeidung von Taupunktunterschreitung sowie Kaltluftabfall zu bestimmen. Daneben ist für die thermische Behaglichkeit die Strahlungstemperatursymmetrie von Bedeutung. Hierfür sind insbesondere die Normen DIN EN 15377 und DIN EN ISO 7730 maßgeblich.

Im Falle von TABS sind allerdings meist nicht diese Grenzen der Oberflächentemperaturen maßgebend. Aus der Auslegung und der Betriebsführung resultieren im Regelfall Temperaturen des Arbeitsmediums und daraus der Bauteiloberflächen, welche die hier genannten Grenzen nicht ausschöpfen.

4.1.2 Verfahren zur Bestimmung der Heiz- und Kühlleistung im stationären Zustand

Grundsätzlich kann die Heiz- bzw. Kühlleistung eines TABS im stationären Zustand bzw. dem so genannten Beharrungszustand experimentell oder rechnerisch bestimmt werden.

Unabhängig von einer experimentellen oder rechnerischen Bestimmung werden die ermittelten Leistungswerte meist über die gesamte Bauteilfläche gemittelt, d.h. es werden örtlich gemittelte Wärmeträger- und Bauteiloberflächentemperaturen verwendet und flächenspezifische Leistungswerte angegeben, die als Mittelwerte über die gesamten Bauteiloberfläche gelten. Die flächenspezifischen Leistungswerte werden auf die jeweilige Über- bzw. Untertemperatur des Arbeitsmediums (i.d.R. Wasser oder selten Luft) bezogen, die als logarithmisch bestimmte mittlere Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_{H/K}$ aus Vor- und Rücklauftemperatur des Arbeitsmediums (ϑ_{VL} und ϑ_{RL}) und operativer Raumtemperatur ϑ_i sowohl für den Heizfall (Index H) und den Kühlfall (Index K) definiert ist:

$$\Delta\vartheta_{H/K} = \frac{|\vartheta_{VL} - \vartheta_{RL}|}{\ln\left(\frac{|\vartheta_{VL} - \vartheta_i|}{|\vartheta_{RL} - \vartheta_i|}\right)} \quad [K] \quad (10)$$

Für Fußbodenheizungen sind der Prüfstand und die Durchführung der messtechnischen Prüfung hierfür in DIN EN 1264-2:2013-03 [12] festgelegt. Analoge Festlegungen für (abgehängte) »Kühldecken und andere größere Kühlflächen« enthält DIN EN 41240. Die experimentelle Prüfung nach DIN EN 1264 kann gemäß DIN EN 15377-3:2007-12 für alle eingebetteten Flächenheiz- und Kühlsysteme angewandt werden, also auch für TABS. Für TABS, insbesondere die Betonkerntemperierung, ist dies jedoch aufwändig, da entsprechende Probekörper im Originalmaßstab hergestellt werden müssen und sehr lange Versuchszeiten bis zur exakten Einstellung stationärer Verhältnisse erforderlich sind.

Eine der ersten in Deutschland durchgeführten derartigen experimentellen Ermittlungen der stationären Heiz- und Kühlleistungen von TABS in einem 1:1-Mock-Up ist in [66] beschrieben. Dort wurden u.a. stationäre Leistungen von Temperierungen im Betonkern, im Beton nahe der Deckenoberfläche sowie in einem direkt auf die Betondecke aufgebrachten Fußbodenestrich ohne zwischenliegende Wärmedämmung ermittelt. *Tabelle 3* enthält die in [66] veröffentlichten stationären Leistungswerte.

Tabelle 3: Experimentell ermittelte stationäre Heiz- und Kühlleistungen von TABS bei 5 K logarithmischer Temperaturdifferenz zwischen Arbeitsmedium und Raum, Dicke der Betondecke: 28 cm [66]

Ausführung	Betondecke mit direkt aufgebrachtem Estrich		Hohlrumboden auf der Betondecke	
Rohrschlangen	Rohrabstand 15 cm, Rohre auf Rohdecke im Estrich		Rohrabstand 30 cm, mittig in der Betondecke	
Betriebsart	Heizung	Kühlung	Heizung	Kühlung
Gesamtleistung [W/m ²]	35	28	27	28
Anteil Leistungsabgabe nach oben [%]	70	46	42	23
Anteil Leistungsabgabe nach unten [%]	30	54	58	77

Als Alternative zu Messungen stehen Methoden zur rechnerischen Leistungsermittlung zur Verfügung. Hierbei ist nach DIN EN 15377-3 zu unterscheiden zwischen vereinfachten Berechnungsverfahren, die jeweils für bestimmte Systemtypen und Parameterbereiche gelten und der Anwendung so genannter fundamentaler Rechenprogramme. Unter Letzteren wird die Anwendung numerischer, i.d.R. mehrdimensionaler Finite-Elemente- oder Finite-Differenzen-Methoden verstanden, welche die Wärmetransportvorgänge im Detail mit Hilfe der fundamentalen physikalischen Gesetzmäßigkeiten abbilden. Diese können direkt für die Leistungsermittlung oder zur Bestimmung von Parametern und Näherungsansätzen für die vereinfachten Berechnungsverfahren verwendet werden.

Die vereinfachten Berechnungsverfahren unterteilen sich wiederum in Potenzfunktionen (Potenzprodukt-Ansatz) und Wärmewiderstandsverfahren. Für Systeme der Typen A bis D nach DIN EN 1264, Blatt 1 (siehe *Bild 3 in Kapitel 2.2.1*) wird in dieser Norm ein Potenzprodukt-Ansatz angegeben:

$$\dot{q} = B \cdot \prod_i (a_i^{m_i}) \cdot \Delta \vartheta_{H/K} \quad [W/m^2] \quad (11)$$

mit

B, a und m systemabhängige Koeffizienten
 $\Delta \vartheta_{H/K}$ Norm-Temperaturdifferenz

Für den Betriebsfall der Fußbodenheizung sind die jeweiligen Werte bzw. Berechnungsansätze der Parameter und Koeffizienten in DIN EN 1264, Blatt 2 system-spezifisch festgelegt. Die Umrechnung der Ergebnisse für die Fußbodenheizung (Typen A bis D) auf die Wand- und Deckenheizung sowie auf den Kühlbetrieb (Fußboden-, Wand- und Deckenkühlung) ist in Blatt 5 der DIN EN 1264 beschrieben.

Für thermoaktive Bauteilsysteme verweist die DIN EN 15377 auf das Wärmewiderstandsverfahren, dessen Konzept in *Bild 32* am Beispiel einer Betonkerntemperierung dargestellt ist. Ausgehend von einem Ersatzschaltbild, welches die auftretenden Wärmeströme beschreibt (links im Bild), wird ein reduziertes Widerstandsmodell entwickelt (rechts im Bild). Das Grundkonzept der Reduktion besteht darin, eine Mitteltemperatur der so genannten Wärmeleitschicht $\bar{\vartheta}_c$ in der Ebene der verlegten Wärmeträgerrohre zu definieren. Die Wärmeübertragung von dort an die beiden an das Bauteil angrenzenden Bereiche (Räume, Erdreich, Außenluft) wird mit Hilfe der Wärmedurchgangswiderstände R_1 und R_2 für den stationären Wärmedurchgang durch ebene Bauteile beschrieben. Diese Widerstände sind die Kehrwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten (»Teil-U-Werte«) U_1 und U_2 des Bauteils von der thermisch aktivierte Schicht (und deren Mitteltemperatur) zum jeweiligen angrenzenden Bereich. Der Widerstand R_t ist der Wärmewiderstand zwischen der Vorlauftemperatur ϑ_v des Wärmeträgers und der Mitteltemperatur der Wärmeleitschicht $\bar{\vartheta}_c$. Die mehrdimensionale Wärmeübertragung (zweidimensional in einem Schnitt senkrecht zu den Heiz-/Kühlrohren und in einer dritten Dimension entlang des Strömungswegs des Arbeitsmediums) wird dabei auf eine eindimensionale Situation senkrecht durch das thermisch aktivierte Bauteil hindurch reduziert.

Im stationären Zustand kann R_t aus den Wärmedurchgangskoeffizienten U_1 und U_2 , dem flächenspezifischen Massenstrom der Heiz- oder Kühlflüssigkeit \dot{m}_{sp} , deren spezifischer Wärmekapazität c sowie den thermischen Widerständen des inneren Wärmeübergangs im Rohr R_w , der Wärmeleitung in der Rohrwand R_r und dem Widerstand R_x zwischen der (mittleren) Temperatur der Rohraußenwand und der Mitteltemperatur $\bar{\vartheta}_c$ der Wärmeleitschicht nach DIN EN 15377-1 wie folgt bestimmt werden:

$$R_t = \frac{1}{\dot{m}_{sp} \cdot c \cdot \left[1 - \exp \left(- \frac{1}{\left(R_w + R_r + R_x + \frac{1}{U_1 + U_2} \right) \cdot \dot{m}_{sp} \cdot c} \right) \right]} - \frac{1}{U_1 + U_2} \quad [m^2 K/W] \quad (12)$$

Die darin enthaltenen einzelnen Teilwiderstände können größtenteils mit bekannten Ansätzen bestimmt werden. Zum Beispiel werden U_1 und U_2 nach den Regeln der Bauphysik sowie R_w und R_r nach den einschlägigen Gesetzen der Wärmeübertragung berechnet. Der von der Geometrie der Rohranordnung und dem Aufbau des thermisch aktivierte Bauteils abhängende Widerstand R_x ist entweder mit einer mehrdimensionalen numerischen Berechnung zu ermitteln oder aus analytischen Näherungsansätzen zu bestimmen. Derartige Näherungsformeln sind in Blatt 1 der DIN EN 15377 für Typ E (Betonkerntemperierung) und Typ F (an der Bauteiloberfläche eingebettete Kapillarrohrmatten) angegeben.

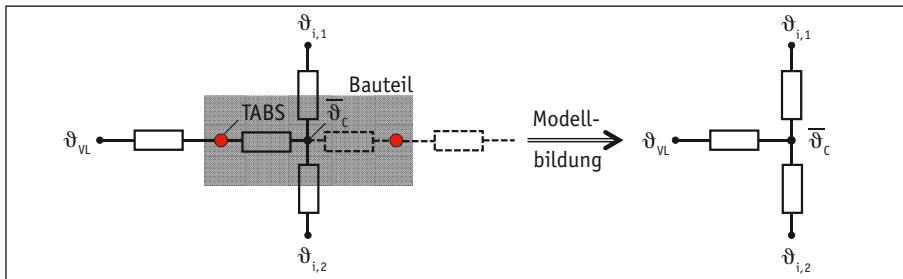


Bild 32: Darstellung der stationären Wärmeübertragung bei einem thermoaktiven Bauteilsystem als Ersatzschaltbild mit Wärmewiderständen (links) und als reduziertes Widerstandsmodell (rechts)

Bild 33: Stationäre Heiz- und Kühlleistung einer Betonkerntemperierung (Gesamtleistung nach oben und unten) bei 5 K logarithmischer Temperaturdifferenz zwischen Heiz-/Kühlmedium und den Räumen darüber und darunter nach DIN EN 15377 (Wärmewiderstandsverfahren)

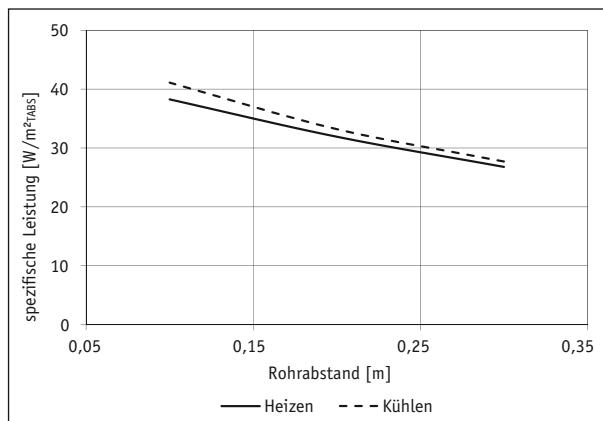


Bild 33 enthält nach dem Wärmewiderstandsverfahren der DIN EN 15377 berechnete flächenspezifische Heiz- und Kühlleistungen einer Betonkerntemperierung bei 5 K logarithmischer Temperaturdifferenz zwischen dem Heiz-/Kühlmedium (Wasser) und dem Raum. Die Heiz-/Kühlrohre (PE-Xa, 17 · 2 mm) liegen mittig in der 28 cm dicken Betondecke, auf der sich ein Hohlraumboden befindet. Die Leistungswerte zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten aus *Tabelle 3* (rechts) und verdeutlichen darüber hinaus den starken Einfluss des Rohrabstands. Sowohl die Messungen als auch die Berechnungen führen im Kühlfall zu etwas größeren Leistungen als im Heizfall. Dies liegt am asymmetrischen Deckenaufbau, weil der Wärmewiderstand in den Bauteilen wegen des Hohlraumbodens nach oben größer ist als nach unten. Zusammen mit den unterschiedlichen konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten an den beiden Oberflächen in Abhängigkeit von den Richtungen der Wärmeströme ergibt sich im Kühlfall eine größere flächenspezifische Leistung, weil dabei der bessere Wärmeübergang an der unteren Bauteiloberfläche (Decke) und der geringere Wärmewiderstand im Bauteil nach unten in der Summe eine größere übertragende Wärmeleistung ergeben.

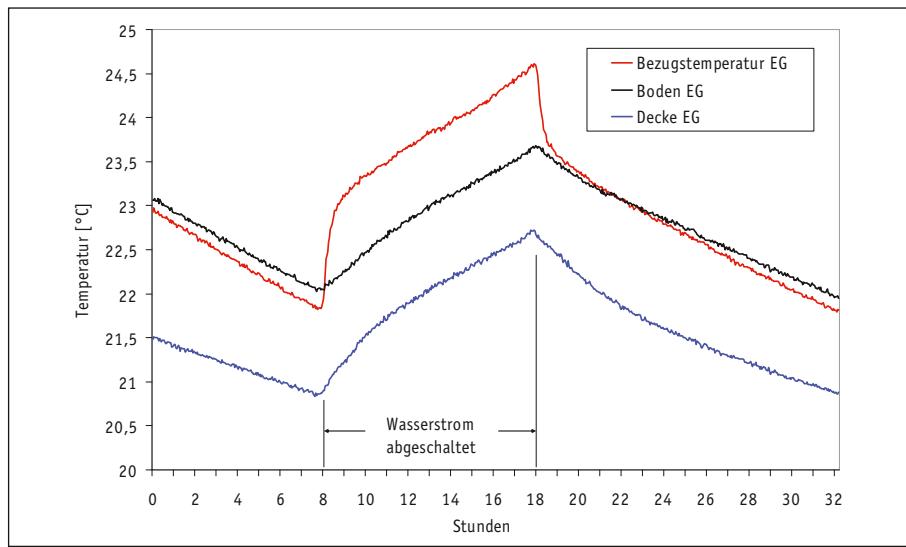


Bild 34: Laborversuch: Temperaturverläufe bei zeitlichem Wechsel von Wärmeeintrag (tagsüber) und Lastabfuhr über eine Betonkerntemperierung (nachts) [66]

4.1.3 Heiz- und Kühlleistung unter dynamischen Bedingungen

Unter dynamischen Betriebsbedingungen, die im realen Betrieb den Regelfall darstellen, ist die Speicherfähigkeit und thermische Trägheit thermoaktiver Bauteilsysteme maßgebend. Grundsätzlich ist hierbei in einem bestimmten Zeitpunkt die wasserseitig im Bauteil übertragene Wärmeleistung ungleich der zwischen den Bauteiloberflächen und den angrenzenden Räumen übertragenen Wärmeleistung, weil Wärme im Bauteil zwischengespeichert wird.

Im Extremfall sind der Anfall der raumseitigen Lasten und die wasserseitige Leistungsbereitstellung nahezu vollständig voneinander entkoppelt. Bild 34 zeigt beispielhaft hierfür gemessene Temperaturverläufe aus [66], die unter dynamischen Bedingungen im dort aufgebauten Versuchsräum aufgenommen wurden. In diesem Versuch wurde das thermisch aktivierte Bauteil nachts gekühlt und der Wasserstrom tagsüber zwischen 8 und 18 Uhr abgeschaltet. Die abzuführende thermische Last wurde dagegen ausschließlich zwischen 8 und 18 Uhr in einer Höhe von ca. 35 bis 40 W/m² thermisch aktiver Fläche aufgeprägt.

Diese dynamischen Effekte, die bei TABS aufgrund der großen Trägheit besonders ausgeprägt sind, werden häufig als »Selbstregeleffekt« bezeichnet.

Experimentelle Bestimmung

Im Experiment oder realen Betrieb kann die wasserseitig übertragende Wärmeleistung auch im dynamischen Betrieb messtechnisch verhältnismäßig einfach



Bild 35: Labor für die Messung der Heiz- und Kühlleistung unter dynamischen Bedingungen: Fertigung der Prüfräume, Laboraufbau am Institut für Energiesystemtechnik und Blick in den Prüfraum mit Fassade zur Klimakammer [Quelle: Hochschule Offenburg]

(z. B. mit einem Wärme- bzw. Kältezähler) ermittelt werden. Die Wärmeströme an den Bauteiloberflächen unter dynamischen Bedingungen und in realitätsnahen Raumsituationen müssen dagegen aus gemessenen Oberflächen- und Raumtemperaturen und den weiteren relevanten Randbedingungen an den Bauteiloberflächen des bzw. der TABS berechnet werden. Dies ist allerdings eine indirekte und deutlich ungenauere Methode als die direkte Messung auf der Wasserseite. Untersuchungen des dynamischen Verhaltens und der dabei auftretenden Heiz- und Kühlleistungen sollten deshalb auf dynamische Berechnungen zurückgreifen, zumindest in Ergänzung zu Experimenten oder Feldmessungen.

Bild 35 zeigt ein Labor, das für die Messung von Heiz- und Kühlleistungen unter praxisnahen, dynamischen Betriebsbedingungen genutzt wird. Exemplarisch für diese Art der Messungen zeigt *Bild 36* den Temperaturverlauf in der Decke. Neben der zeitlichen Verschiebung der Temperaturamplitude im Bauteil, ist hier auch die zeitliche Verschiebung zwischen Wärmelast (infolge von Transmissions- und Lüftungswärmeverlusten abzüglich der internen und solaren Wärmegewinne im Raum) und Heizleistung (die vom Wärmeträgermedium an das Bauteil abgegebene Leistung) zu erkennen.

Simulationsgestützte Bewertung

Detaillierte Simulationen des dynamischen Verhaltens von TABS sind mit entsprechenden mehrdimensional und dynamisch arbeitenden Finite-Elemente- oder Finite-Differenzen-Programmen möglich (fundamentale Rechenprogramme nach DIN EN 15377). Zusätzlich müssen dabei jedoch die raumseitigen dynamischen Randbedingungen entweder separat ermittelt oder es muss ein Gesamtmodell aus TABS, Raum und Raumluftströmung erstellt werden. Beides ist grundsätzlich möglich (Beispiel einer kompletten, gekoppelten Raum- und Bauteilsimulation in [113]), der Aufwand ist allerdings erheblich, sodass derartige Methoden für die breite Planungspraxis bislang nicht geeignet sind.

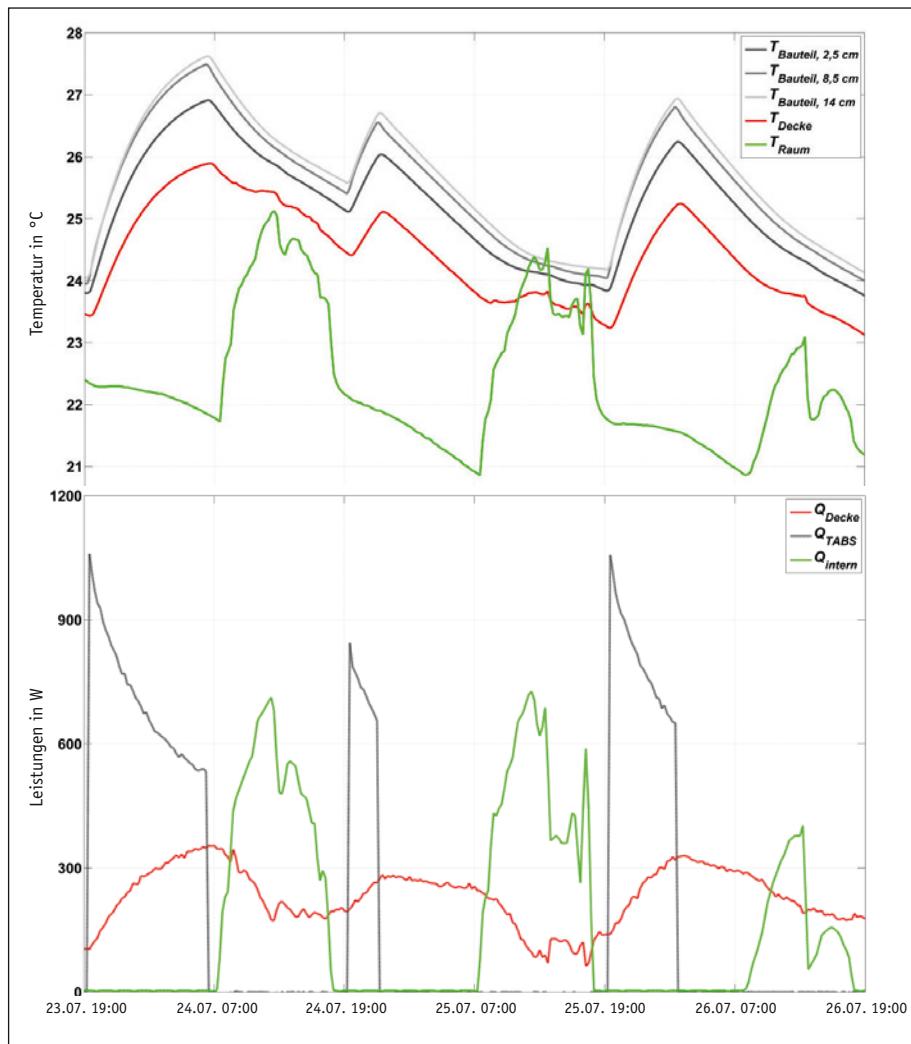


Bild 36: Labormessung unter dynamischen Betriebsbedingungen: zeitlicher Verlauf von Bauteil-, Oberflächen- und Raumlufttemperatur (oben) und den dazugehörigen Wärmeströmen (mit gleicher Farbkodierung) an der Bauteilaktivierung und der Oberfläche sowie die solaren und internen Wärmelasten (unten) [Quelle: Martin Schmelas]

Diagrammverfahren und Wärmewiderstandsverfahren

Ein vereinfachtes Diagrammverfahren, das dynamische Lasten und deren Deckung durch TABS berücksichtigt, ist in Blatt 3 der DIN EN 15377 angegeben. In diesem Normblatt findet sich auch eine Beschreibung, wie das Wärmewiderstandsverfahren für die stationäre Auslegung (siehe Kapitel 4.1.2) in eine eindimensionale dynamische Simulation des Bauteilverhaltens integriert werden kann. Dieses Verfahren, die mehrdimensionale Wärmeübertragung um die Rohre im Bauteil in ein

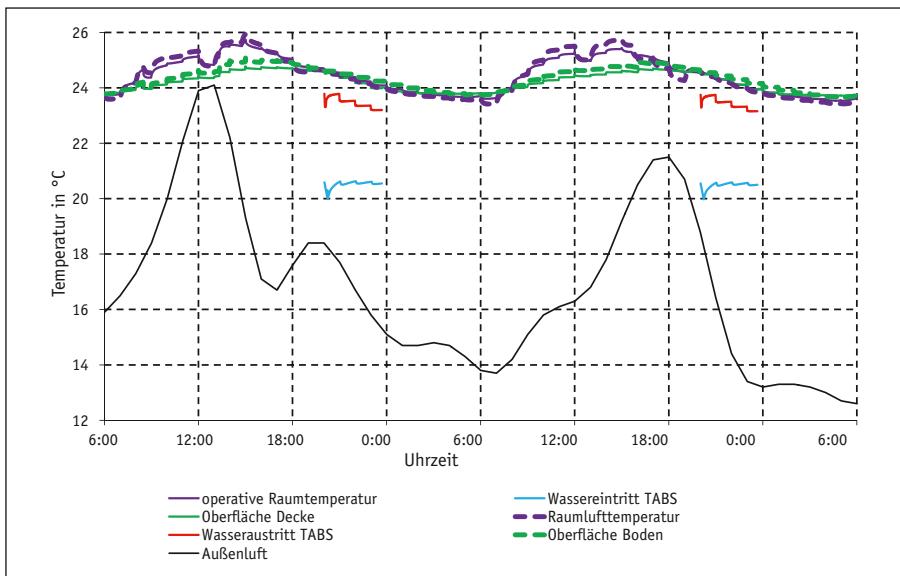


Bild 37: Thermisch-energetische Gebäudesimulation mit TABS [44]: Nachtbetrieb einer Betonkernkühlung in einem tagsüber genutzten Büroraum mit einer energiesteuerten Beladung, siehe auch *Kapitel 6.2.4*

eindimensionales dynamisches Bauteilmodell, wie es in der thermisch-energetischen Gebäudesimulation für Massivbauteile (Decken, Böden oder Wände) üblich ist, zu übertragen, wurde in den 1990er-Jahren entwickelt und in marktgängige Gebäudesimulationsprogramme implementiert, siehe z. B. [55], [61] oder [63]. Es hat sich inzwischen bewährt und als Standard der dynamischen Simulation von TABS etabliert. *Bild 37* enthält Beispielergebnisse einer dynamischen Gebäudesimulation mit diesem TABS-Standardmodell.

Stationäre Leistungsbemessung und dynamisches Verhalten

Das dynamische Verhalten von TABS mit ihrer großen thermischen Trägheit bedingt, dass die stationäre Leistungsbemessung von TABS (Auslegungsgrenzfälle) um eine dynamische Auslegung zu ergänzen ist. Hierbei sind die raumseitigen Randbedingungen und Belastungen, das thermisch-energetische Verhalten des TABS und die vorgesehene Regel- bzw. Betriebsführungsstrategie in ihrer dynamischen Wechselwirkung miteinander verknüpft zu betrachten. Dies kann zum einen durch individuelle und detaillierte dynamische Gebäudesimulationen geschehen, zum anderen stehen inzwischen Ansätze für eine standardisierte und damit vereinfachte Anwendung derartiger Simulationen zur Verfügung. Ein Beispiel hierfür ist das Unknown-but-bounded-Verfahren (UBB-Verfahren), welches in *Kapitel 6.2.2* dargestellt wird.

Die aus der großen thermischen Trägheit resultierende begrenzte Regelfähigkeit von TABS (siehe auch *Kapitel 6.1*) führt in der Praxis zu verhältnismäßig eng begrenzten Vorlauftemperaturen $\vartheta_{VL,TABS}$. Für die Betonkerntemperierung gilt im Regelfall:

$$18 - 20^\circ\text{C} \leq \vartheta_{VL,TABS} \leq 26 - 28^\circ\text{C} \quad (13)$$

Durch diese nahe an der gewünschten Raumtemperatur liegenden Vorlauftemperaturen wird sichergestellt, dass keine Überheizung bzw. Unterkühlung des Raumes oder der Bauteilloberflächen eintritt. Dies erst ermöglicht die Ausnutzung des Selbstregeleffektes und erlaubt den Umgang mit der begrenzten Regelbarkeit der Betonkerntemperierung. Eine wichtige Konsequenz aus den eng eingegrenzten Vorlauftemperaturen gemäß *Gleichung 13* sind geringe Temperaturspreizungen zwischen Vorlauf- und Rücklauf von minimal 2 K bis maximal 4 K (im äußersten Grenzfall 5 K). Dies ist erforderlich, damit die Leistungsabgabe über die Bauteilloberfläche nicht zu inhomogen ausfällt und um die erforderlichen logarithmischen Temperaturdifferenzen $\Delta\vartheta_{H/K}$ für die benötigten Leistungen zu erhalten. Zahlenbeispiele (mit *Gleichung 10*) hierzu:

Heizfall: Raumtemperatur $\vartheta_i = 21^\circ\text{C}$, $\vartheta_{VL,TABS} = 27^\circ\text{C}$,
Spreizung: 3 K $\rightarrow \vartheta_{RL} = 24^\circ\text{C} \rightarrow \Delta\vartheta_H = 5,3$ K,

Kühlfall: Raumtemperatur $\vartheta_i = 26^\circ\text{C}$, $\vartheta_{VL,TABS} = 19^\circ\text{C}$,
Spreizung: 4 K $\rightarrow \vartheta_{RL} = 23^\circ\text{C} \rightarrow \Delta\vartheta_K = 4,7$ K.

Bei oberflächennahen TABS, deren Funktionsweise eher der konventioneller Fußbodenheizungen bzw. abgehängter Deckensysteme entspricht, ist der Bereich der Vorlauftemperaturen etwas größer:

$$16 - 20^\circ\text{C} \leq \vartheta_{VL,Kühl-/Heizdecke} \leq 27 - 32^\circ\text{C} \quad (14)$$

4.2 Konstruktive und räumliche Randbedingungen

Aufgrund der begrenzten Vorlauftemperaturen und der daraus resultierenden Grenzen der flächenspezifischen Leistung von TABS ist es i. d. R. erforderlich, eine möglichst große thermisch aktivierte Fläche im Raum unterzubringen. Insbesondere in Büro- und anderen Gebäuden aus dem GHD-Sektor (Gewerbe, Handel, Dienstleistungen), die aus Gründen der Flexibilität im Wesentlichen mit Leichtbautrennwänden ausgebaut sind, werden meist ausschließlich Decken und Böden thermisch aktiviert. Hierbei ist zu beachten, dass praktisch nie die gesamte Decken- und Bodenfläche, d. h. die gesamte Netto-Grundfläche (NGF) der betreffenden Räume, für eine thermische Aktivierung zur Verfügung steht. Die zur Verfügung stehende Fläche wird eingeschränkt durch:

- Abstand von Stützen: Im häufig vorkommenden Stahlbeton-Skelettbau werden Betondecken teilweise von Stützen getragen, die mit einer verstärkten Bewehrung (z. B. mit Dübelleisten) mit der Decke verbunden werden müssen, um ein Durchstanzen zu vermeiden. Deshalb kann in einem bestimmten Radius um Stützeneingriffspunkte kein TABS verlegt werden. Es können 0,5 m oder mehr freizuhalten sein, der jeweilige Mindestabstand von Stützen ist bei der Tragwerksplanung zu erfragen.
- Andere Installationen im Bauteil: Leerohre und Kanäle für andere gebäudetechnische Gewerke, wie z. B. Elektroinstallationen und Lüftungsleitungen, werden häufig ebenfalls in Betondecken installiert und können den für TABS zur Verfügung stehenden Platz reduzieren. Im Falle von ungedämmten Lüftungsleitungen können diese auch Teil der thermischen Bauteilaktivierung sein (Kombination aus wasser- und luftbetriebenem System).
- Vollständig verdeckte Teile von Bauteiloberflächen: Mit geschlossener Abhängung versehene Deckenbereiche (aus raumakustischen Gründen häufig mit Dämmung versehen) bzw. größere, durch Schränke o. Ä. komplett abgeschottete Bodenbereiche stehen für eine thermische Aktivierung nicht zur Verfügung. Geschlossene Deckenabhängungen können in raumakustischen Maßnahmen (Bedämpfung des Raumes) oder im Platzbedarf und der Wegeführung technischer Installationen begründet sein, Letztere z. B. in Form von Abkofferungen auf der Flurseite von Räumen mit TABS.

Als Faustregel für den Planungsstart sollte davon ausgegangen werden, dass bestenfalls 70–80 % der Nettogrundfläche eines Raumes für die thermische Aktivierung zur Verfügung stehen. Um die für TABS zur Verfügung stehende Deckenfläche zu maximieren, ist von Beginn der Planung an eine enge Abstimmung mit der sonstigen gebäudetechnischen Installationsplanung sowie mit dem raumakustischen Konzept erforderlich.

Raumakustischen Anforderungen, insbesondere der Reduzierung der Nachhallzeit zur Bedämpfung des Raumes, wird sehr häufig mit geschlossenen Deckenabhängungen entsprochen. Dies steht zunächst den Anforderungen thermoaktiver Decken nach einer möglichst freien Betondecke ohne jede Behinderung der radiativen und konvektiven Wärmeübertragung entgegen. Die Aufgabe, beide Anforderungen hinreichend zu erfüllen, ist jedoch in den meisten Fällen durch sorgfältig aufeinander abgestimmte Konzeption des TABS und der raumakustischen Maßnahmen lösbar.

Die durch raumakustische Maßnahmen belegte Deckenfläche bzw. deren Einfluss auf die Funktion von TABS lässt sich auf mehreren Wegen reduzieren, siehe auch [31]:

- Bei waagrechten Teilabhängungen, wie z. B. flurseitigen Abkofferungen für Installationen, können neben der Deckenuntersicht auch die senkrechten Seitenflächen schallabsorbierend ausgestaltet werden, sodass die für raumakustische Maßnahmen zur Verfügung stehende Fläche (deutlich) größer ist als die verdeckte Deckenfläche.

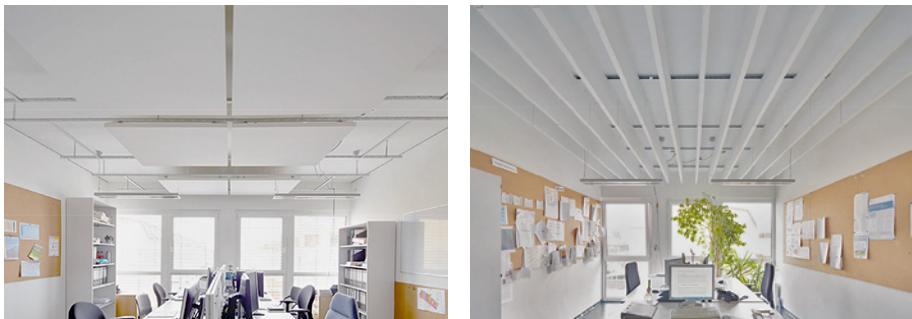


Bild 38: Thermoaktive Betondecke mit zwei Maßnahmen zur Verbesserung der Raumakustik [Quelle: Ecophon]

- Stürze, Brüstungen sowie Raumtrennwände lassen sich akustisch dämpfend ausgestalten.
- Auch Bodenbeläge, Möbel und anderes Inventar wie mobile Raumteiler usw. lassen sich in das raumakustische Konzept einbeziehen.
- Ein tragfähiger Kompromiss (je nach Leistungsanforderungen an das TABS) können abgehängte Deckensegel sein, deren Zwischenraum zur Decke hin frei hinterlüftet ist, oder aber senkrecht abgehängte und ebenfalls frei hinterlüftbare Akustik-Baffeln. Je nach Geometrie und Hinterlüftungssituation beeinträchtigen diese Elemente die Wärmeübertragung zwischen Raum und Betondecke mehr oder weniger stark. Forschungsergebnisse zum Einfluss der in *Bild 38* dargestellten Akustik-Baffeln ergeben, je nach Abstand der Baffeln voneinander (10 oder 20 cm) und den Strömungsverhältnissen im Raum (ohne/mit Lüftung), eine Reduktion der Gesamt-Wärmeübertragung von etwa 10 – 30 %, siehe [35] und [113].

Abhängig von der zur Verfügung stehenden Fläche und evtl. Behinderungen thermisch aktivierter Teilflächen durch Deckensegel o. Ä. ist sicherzustellen, dass das TABS die geforderten stationären Auslegungs- und dynamischen Spitzenleistungen trotzdem erreicht. Je nach Anwendungs- und Lastfall lassen sich durch Hindernisse verursachte Leistungseinbußen teilweise oder ganz durch eine angepasste Betriebsführung kompensieren. Soweit möglich kann dies z. B. durch Anpassung der Vorlauftemperaturen oder Verlängerung der täglichen Laufzeiten des TABS erreicht werden. Bei verringriger Leistung ermöglichen verlängerte Laufzeiten u. U. im Laufe eines Betriebstages genauso viel Energie umzusetzen wie bei größerer Leistung und kürzerer Laufzeit. Hier können sich Vorteile des erforderlichen Speichermanagements von TABS zeigen [35].

4.3 Leistungsanforderungen an thermoaktive Bauteilsysteme

Wie bei der Planung jedes Heiz- oder Kühlsystems dürfen die Leistungsanforderungen an ein thermoaktives Bauteilsystem dessen thermisches Leistungsvermögen nicht überschreiten. Dies ist im Falle von TABS besonders wichtig, weil dort i. d. R., außer durch längere tägliche Laufzeiten, nur geringe Leistungsreserven über die ursprüngliche Auslegung hinaus mobilisierbar sind. Bei konventionellen, aus Heizkesseln und Heizkörpern bestehenden Heizsystemen, sind nachträgliche Leistungserhöhungen meist eher möglich als bei TABS, z. B. durch Anhebung der Vorlauftemperatur, Veränderungen von Massenströmen und Installation zusätzlicher Heizkörper. Eine nachträgliche Zusatz-Installation ist bei TABS nur durch Ergänzung mit anderen Systemen, wie beispielsweise abgehängten Systemen, möglich. Für die optionale Nachrüstung, z. B. bei Lasterhöhungen infolge von Nutzungsänderungen, werden in die Decke integrierte hydraulische Anschlüsse an das TABS-Rohrsystem angeboten, z. B. »thermische Steckdose« [96].

Welche Leistungsanforderungen an ein TABS gestellt werden, hängt von der Nutzung der klimatisierten Räume und den Nutzeranforderungen, der bauphysikalischen Qualität der Gebäudehülle und vor allem vom Einsatzbereich des TABS und der evtl. Kombination mit anderen Heiz-Kühl-Systemen ab.

Die Nutzung des Gebäudes, d. h. das Nutzerprofil und die Ausstattung der Büroräume (interne Wärmelasten), sowie die Anforderungen an den Raumkomfort müssen von Beginn der Planung an klar definiert sein. Bei Wohn-, Büro- und vergleichbaren Nutzungen sind die in der Heizperiode einzuhaltenden Mindesttemperaturen mit i. d. R. 20 °C eindeutig definiert und dürfen während der Nutzungszeit nicht unterschritten werden. Für den Sommerfall sind hingegen Festlegungen hinsichtlich der einzuhaltenden oberen Temperaturgrenzen sowie ggf. des anzuwendenden Komfortmodells und tolerierbarer Überschreitungshäufigkeiten projektspezifisch zu treffen (siehe *Kapitel 3* und *9.2*). In Kombination mit dem Gebäudeentwurf und der Nutzung hängt die Machbarkeit bzw. Sinnfälligkeit eines TABS-Konzeptes von den thermischen Komfortansprüchen ab. Nach der Realisierung ist es wichtig, dass 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. Auch müssen überzogene Erwartungen an eine Kühlung mit TABS vermieden werden. Der Einsatz von TABS ist in folgenden Anwendungsfällen und Systemkombinationen üblich:

1. TABS als reine Bauteilkühlung und einziges Kühlsystem im Raum:

- möglich mit Fensterlüftung oder mechanischer Lüftung
- Heizung erfolgt konventionell, z. B. mit Heizkörpern.

2. Betonkerntemperierung als Grundlastsystem für die Heizung und Kühlung im Raum:

- TABS deckt Grundlast für Heizung und/oder Kühlung ab
- bei Fensterlüftung Kombination mit adäquatem Heizsystem (z. B. Heizkörper, Fußboden- oder Wandheizung) erforderlich
- bei mechanischer Lüftung auch Kombination mit oberflächennahem TABS, Randstreifenelementen oder abgehängten Heizdeckenelementen möglich.

3. TABS als einzige Heiz- und Kühlfläche im Raum:

- mechanische Lüftung mit erforderlicher Lufterwärmung auf eine zentrale, u. U. konstante Zulufttemperatur mit
 - a) raumweise konstantem oder
 - b) variablem Volumenstrom oder
 - c) raum- oder zonenweise RLT-Register für Heizung/Kühlung auf individuell variable Lufttemperatur
- TABS in zonierter Drei- oder Vier-Leiterschaltung.

Angesichts dieser Vielfalt an Systemvarianten, die mit noch unterschiedlichen möglichen Nutzungen zu kombinieren sind, können keine pauschal gültigen Werte für die raumseitigen Leistungsanforderungen an TABS genannt werden.

Eindeutig sind die Leistungsanforderungen an das TABS dann, wenn es das einzige Kühlsystem im Raum ist (Fall 1). In diesem Fall sind die anfallenden Kühllasten durch das TABS, je nach Nutzeranforderungen, vollständig abzuführen oder zumindest die Einhaltung vorgegebener Überschreitungsgrenzen der Komforttemperaturen sicherzustellen. Eine Betonkerntemperierung mit einer stationären Kühlleistung von maximal ca. $40 \text{ W/m}^2_{\text{TABS}}$ (siehe *Bild 30*) kann bei stationärer Auslegung und einer maximalen Belegung von 70–80 % der Netto-Raumgrundfläche Kühllasten um $30 \text{ W/m}^2_{\text{NGF}}$ abführen. Dies erscheint zunächst nur für sehr wenige Fälle ausreichend. Eine genauere, dynamische Betrachtung unter Berücksichtigung aller Randbedingungen, wie z. B. auch die Lüftung des Raumes, zeigt jedoch, dass eine Bauteilaktivierung in Mittellage Gebäude mit üblicher Büronutzung sowie Schulgebäude i. d. R. sehr wohl alleine auf einem für gekühlte Räume üblichen Komfortniveau halten kann.

Analog verhält es sich für den Heizfall, wenn die Heiz- und Kühlleistung (Fall 3) alleine über das TABS bereitgestellt wird.

Dient ein TABS als Grundlast-Heizung in Verbindung mit Fensterlüftung (Fall 2), wird häufig versucht, das TABS auf die möglichst vollständige Abdeckung der Transmissionswärmeverluste plus ggf. der Verluste durch Luftinfiltration (Fugenlüftung durch Undichtigkeiten bei geschlossenen Fenstern und Türen) auszulegen. Gelingt dies, bleibt dem konventionellen Heizsystem zunächst nur die Abdeckung des Wärmebedarfs der Fensterlüftung. Um eine größere Flexibilität in der Betriebsführung zu erhalten, empfiehlt es sich jedoch, im Betrieb die Transmissionswärmeverluste nicht vollständig decken zu lassen und das Zusatzheizsystem im Raum etwas größer

als erforderlich auszulegen, sodass in der Summe eine etwas zu große Raumheizleistung zur Verfügung steht. Da selbst baugleiche Räume durch unterschiedliche Sonneneinstrahlung und innere Lasten i. d. R. voneinander abweichende Heizlasten aufweisen und verschiedene Nutzer unterschiedliche Wünsche hinsichtlich der Mindest-Raumtemperatur im Heizfall haben, kann so auf variable Randbedingungen und Nutzerwünsche reagiert werden.

Unabhängig von der Systemkombination und der Betriebsweise des TABS lassen sich Empfehlungen für die mindestens erforderliche Qualität der Gebäudehülle für Gebäude mit TABS geben. Der Heizfall soll an folgendem Zahlenbeispiel erläutert werden:

- Betonkerntemperierung mit max. $35 \text{ W/m}^2_{\text{TABS}}$ Heizleistung
- Belegungsgrad: 70 % der Netto-Raumgrundfläche
- Raumbreite: ca. 5 m
- Geschosshöhe: ca. 3,5 m
- Auslegungstemperatur innen: 21°C ; außen: $-14^\circ\text{C} \rightarrow 35 \text{ K}$ Auslegungstemperaturdifferenz innen-äußen.

In einem Raum mit einer Fassade stehen somit $0,7 \cdot 5 / 3,5 = 1 \text{ m}^2$ Fläche TABS pro m^2 Fassadenfläche und damit eine TABS-Heizleistung von max. 35 W/m^2 Fassadenfläche zur Verfügung. Soll das TABS alleine die Transmissionswärmeverluste decken, ergibt sich daraus ein maximaler flächenspezifischer Wärmetransferkoeffizient für die Transmission von $H'_{T,\max} = 35 \text{ W/m}^2 / 35 \text{ K} = 1,0 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Bei einem Raum mit doppelter Fassadenfläche (z. B. Eckraum) steht die halbe Heizleistung pro m^2 Fassadenfläche zur Verfügung, d. h. es würde gelten: $H'_{T,\max} = 0,5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Aus Gründen der Energieeffizienz und der Regelbarkeit sollten diese Werte jedoch unterschritten werden, wenn kein Zusatzheizsystem vorhanden ist.

Tabelle 4 enthält aus unterschiedlichen Fensterflächenanteilen und Fensterqualitäten resultierende flächenspezifische Wärmetransferkoeffizienten. Damit die Transmissionswärmeverluste (plus ggf. Infiltrationsverluste) eines derartigen Raumes sicher und effizient von einer Betonkerntemperierung gedeckt werden können, sollte ein besserer baulicher Wärmeschutz ausgeführt werden, als er von der Energieeinsparverordnung (EnEV) für Nichtwohngebäude (Neubauten) derzeit als Mindestwert gefordert wird. Besonders zu achten ist auf Räume mit sehr hohem Fensterflächenanteil bzw. großer Fassadenfläche (z. B. Eckräume). Dort sind ggf. Zusatzmaßnahmen erforderlich.

Tabelle 4: Wärmedurchgangskoeffizienten U und flächenspezifische Wärmetransferkoeffizienten H'_T verschiedener Fassadenaufbauten nach EnEV (bis 13.12.2015 geltende Werte) [24]

Fensterflächen-anteil	U-Wert Wand [W/(m ² K)]	U-Wert Fenster [W/(m ² K)]	H'_T [W/(m ² K)]
50 %	0,2	1,4	0,80
50 %	0,2	1,0	0,60
50 %	0,2	0,8	0,5
80 %	0,15	1,4	1,15
80 %	0,15	1,0	0,83
80 %	0,15	0,8	0,67
Höchstwerte nach EnEV (Nichtwohngebäude, Neubauten bis 31.12.2015):			
50 %	0,28	1,9	0,93

Vergleichbares gilt für den sommerlichen Wärmeschutz. TABS sind grundsätzlich leistungsfähige Kühlsysteme, aber auch im Kühlfall lassen sich die Leistungsgrenzen kaum erhöhen und die Regelbarkeit und damit Reaktionsfähigkeit auf variable Lasten ist begrenzt. Deshalb sind stets effiziente, außen liegende Sonnenschutzvorrichtungen erforderlich, wenn die Raumkühlung ausschließlich mit TABS bewerkstelligt werden soll. Auch hier ist auf Räume mit sehr hohem Fensterflächenanteil bzw. großer Fassadenfläche (z. B. Eckräume) zu achten (siehe Vorauslegung in *Kapitel 2.8*).

Bereits vor einer genauen Auslegung im Hinblick auf Zonierung und Regelung/Betriebsführung sollte die Variabilität der zu einem Zeitpunkt vom TABS abzudeckenden Lasten berücksichtigt werden. Werden beispielsweise mehrere identisch aufgebaute und gleich ausgerichtete Räume von einer TABS-Regelzone versorgt, ist trotzdem von unterschiedlichen Lasten in den einzelnen Räumen auszugehen, alleine schon aufgrund fluktuierender An- und Abwesenheitszeiten. Bei Räumen mit unterschiedlichen Fassaden- oder Fensteranteilen bzw. Ausrichtungen kommen Unterschiede in den Transmissionswärmeverlusten und solaren Gewinnen hinzu. Eine detaillierte Betrachtung hierzu muss spätestens im Zusammenhang mit der Planung der Regelung/Betriebsführung erfolgen (siehe *Kapitel 6.3*).

Schließlich ist zu beachten, dass TABS zwar in vielen Fällen als Deckensysteme überwiegend nach unten wirken, aber dennoch grundsätzlich nach beiden Seiten (oben und unten) wirkende Systeme sind. Wird die volle, beidseitige Leistung eines TABS in allen thermisch konditionierten Geschossen eines Gebäudes benötigt, dann bedeutet dies, dass in allen Geschossen Boden und Decke mit TABS auszu-

statten sind. Bei N Geschossen werden dann $N+1$ TABS-Verlegeebenen benötigt (» $N+1$ -Problem«), was nicht vergessen werden darf. Für die obersten und untersten Verlegeebenen, also z. B. Flachdach und Boden zum Erdreich oder unbeheizten Untergeschoss, gelten zudem andere thermische Randbedingungen als für die Zwischendecken.

4.4 Hydraulische Planung

Mit Wasser betriebene TABS sind gekennzeichnet durch sehr nahe an der Raumtemperatur liegende Betriebstemperaturen, was zu großen thermisch aktivierte Flächen und geringen Temperaturspreizungen zwischen Vor- und Rücklauf führt. Dies bedeutet, dass TABS mit verhältnismäßig großen Massenströmen betrieben werden müssen. Bei der Betonkerntemperierung beispielsweise führt eine flächenspezifische Leistung von $30-40 \text{ W/m}^2_{\text{TABS}}$ mit Spreizungen zwischen 2 und 4 K zu erforderlichen flächenspezifischen Massenströmen von ca. $5-12 \text{ kg/(m}^2\text{h)}$. Weiterhin hängt die flächenspezifische Leistung bei gegebenen Temperaturen vom Rohrabstand ab, d. h. es werden deutlich höhere Leistungen erreicht, wenn mehr Rohrmeter pro Quadratmeter verlegt werden. Weiterhin erfolgt zumindest bei der Betonkerntemperierung i. d. R. keine raumweise Regelung von Vorlauftemperatur bzw. Durchfluss, sondern es werden größere Bereiche zusammengefasst.

Spannungsfeld: Installationsaufwand und Betriebsführung

Damit stellt die hydraulische Planung bei Gebäuden mit TABS eine besondere Herausforderung im Spannungsfeld aus Investitions- und Installationsaufwand, optimalen Betriebstemperaturen, Energieeffizienz sowie Regelungsgüte und Regelungsaufwand dar:

- Zunächst ist das Grundkonzept der hydraulischen Erschließung mit dem Regelungs- und Betriebsführungs Konzept des TABS und der weiteren Raumkonditionierungsanlagen abzustimmen.
- Die hohen Massenströme bedingen einen im Vergleich zu anderen Systemen (auch zur konventionellen Fußbodenheizung) hohen Hilfsenergieaufwand zum Betrieb der Umwälzpumpen in der Verteilung.
- Dieser kann gesenkt werden durch eine größere Anzahl von hydraulischen Kreisen mit jeweils kürzeren Rohrlängen, was allerdings einen größeren Installationsaufwand durch mehr Kreise, Unterverteiler und Verteilerabgänge zur Folge hat.
- Eine Vergrößerung der Temperaturspreizung mit entsprechend geringerem Massenstrom kann die beiden vorgenannten Probleme entschärfen, allerdings mit der Folge ungünstigerer Vorlauftemperaturen, was den Selbstregelleffekt schmälern und die Betriebsführung erschweren kann, siehe Kapitel 6.3.

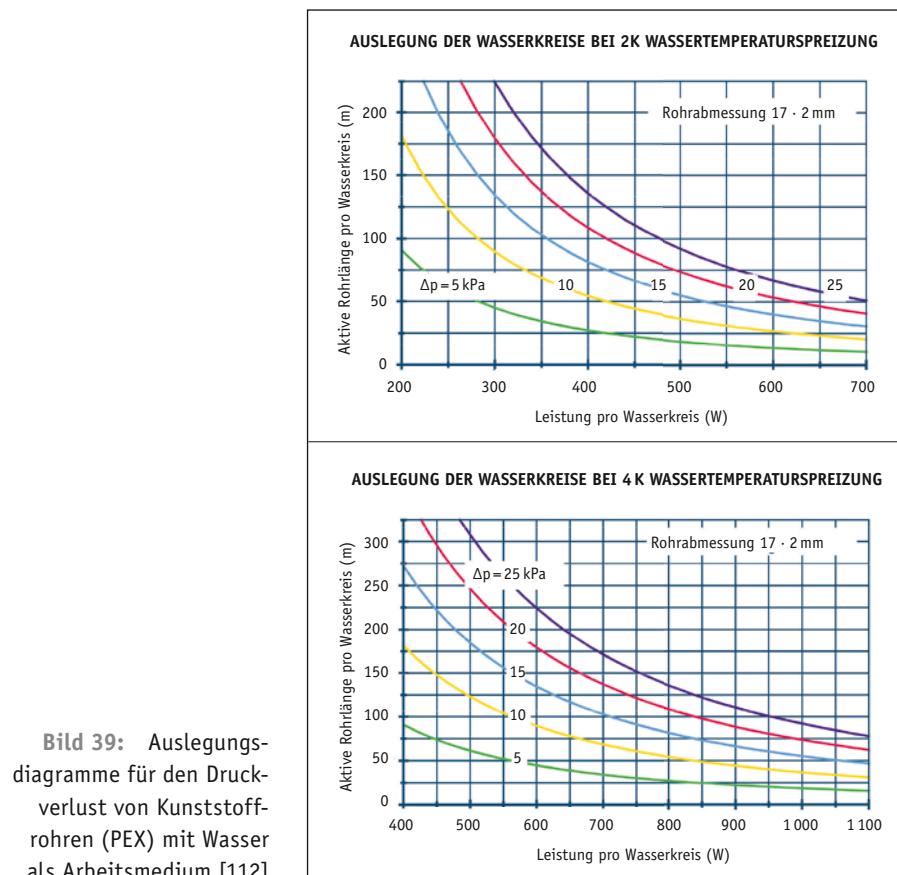
Hydraulische Planung und Hilfsenergieeinsatz

Die Auswirkung der hydraulischen Planung auf den erforderlichen Hilfsenergieeinsatz für die Umwälzpumpen lässt sich an einem Zahlenbeispiel anhand der Auslegungsdiagramme in *Bild 39* verdeutlichen: In einem Raum mit 35 m^2 thermisch aktivierbarer Bauteilfläche sollen 1000 W Heizlast durch eine Bauteilaktivierung gedeckt werden: Die erforderliche flächenspezifische TABS-Leistung beträgt also $28,6 \text{ W/m}^2_{\text{TABS}}$. Bei 5 K logarithmischer Temperaturdifferenz reichen $0,25 \text{ m}$ Rohrabstand aus, siehe *Bild 33* in *Kapitel 4.1.2*. Damit ist eine TABS-Rohrlänge von $35 \text{ m}^2/0,25 \text{ m} = 140 \text{ m}$ erforderlich.

- Grundvariante:
2 K Wassertemperaturspreizung, 2 Kreise je 500 W Leistung, 70 m Rohrlänge
→ Druckverlust in den TABS-Kreisen: ca. 19 kPa (271 Pa/m Rohr)
- Alternative 1:
2 K Wassertemperaturspreizung, 3 Kreise je 333 W Leistung, 47 m Rohrlänge
→ Druckverlust in den TABS-Kreisen: ca. 7 kPa (100 Pa/m Rohr)
- Alternative 2:
4 K Wassertemperaturspreizung, 2 Kreise je 500 W Leistung, 70 m Rohrlänge
→ Druckverlust in den TABS-Kreisen: ca. 6 kPa (86 Pa/m Rohr).

Bei der Grundvariante liegt der Druckverlust deutlich über dem Druckverlust der beiden anderen Varianten. Die Druckverluste unterscheiden sich in diesen drei Planungsvarianten insgesamt um den Faktor 3 und die benötigten Volumen- bzw. Massenströme aufgrund der unterschiedlichen gewählten Spreizungen um den Faktor 2. Beides zusammen ergibt ein Verhältnis zwischen der maximal und der minimal benötigten Pumpenleistung (Grundvariante zu Alternative 2) von etwas über 6. Die hydraulisch effizienteste Alternative 2 erfordert allerdings eine Anhebung der Vorlauftemperatur um 1 K , um die größere Spreizung zu kompensieren und die mittlere Wassertemperatur beizubehalten. Bei einer Wärmebereitstellung über eine Wärmepumpe ist dies mit einem um ca. 2 % höheren elektrischen Energieaufwand für die Wärmepumpe verbunden.

Für Planung, Ausführung und Betrieb bedeutet dies, dass bei Niedrigenergie- bzw. Niedrigexergie-Gebäuden mit TABS sowohl auf den Hilfsenergieaufwand für die Umwälzpumpen als auch auf die Optimierung des Gesamtsystems Wärme-/Kälteerzeugung, Verteilung und Übergabe besonderes Augenmerk zu richten ist (siehe *Kapitel 5* und *6.3*). Neben einer sorgfältigen und ganzheitlichen Planung und Auslegung erfordert dies den Einsatz möglichst effizienter Umwälzpumpen sowie druckverlustarmer Komponenten im hydraulischen System. Darüber hinaus lohnt es sich, bei der Einregulierung und Abnahme sowie im Betrieb auf die genaue Einhaltung und Optimierung der Betriebsparameter zu achten. Querauswertungen und Messkampagnen bei ausgeführten Gebäuden und Anlagen belegen, dass Energieaufwand und Energieeffizienz in der Praxis eine sehr große Bandbreite aufweisen (siehe *Kapitel 6.3* und *8*) und selbst durch Betriebsoptimierung ohne Umbauten an den Anlagen mitunter deutliche Verbesserungen der Energieeffizienz möglich sind [30].



Zonierung im Gebäude

Weitere wichtige Aspekte der hydraulischen Planung sind die Zonierung im Gebäude sowie die Art der Anbindung und Versorgung der hydraulischen Zonen mit Wärme und Kälte. Die Zonierung, d. h. die Frage, welche Bereiche des Gebäudes jeweils mit derselben Vorlauftemperatur versorgt und/oder gleichzeitig durchströmt werden, ist eng mit den Leistungsanforderungen an das TABS und seine Einbindung in das Gesamtsystem der Raumkonditionierung sowie mit dem Regelungs- und Betriebsführungsconcept (siehe Kapitel 6) verknüpft. Dementsprechend gibt es für TABS im Allgemeinen und auch für die Betonkerntempierung im Speziellen keine einheitliche Vorzugslösung. Vielmehr finden sich (je nach Art des TABS, Anforderung und Einsatzbereich) die unterschiedlichsten Lösungen für die Zonierung, z. B.:

- Betonkernkühlung mit einer hydraulischen Regelzone für das gesamte Gebäude, d. h. alle thermisch aktivierten Decken werden gleichzeitig durchströmt und stets mit derselben Vorlauftemperatur versorgt.

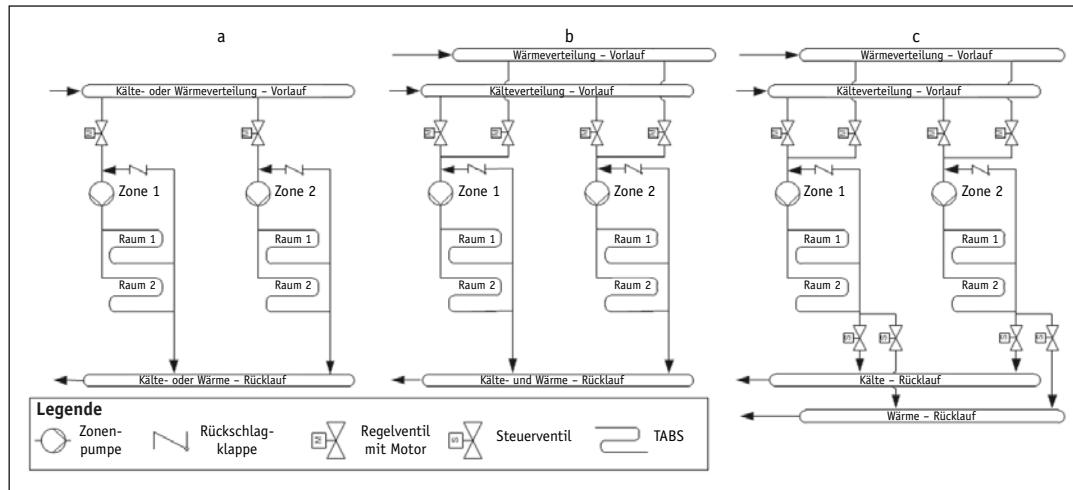


Bild 40: Hydraulikvarianten zur Einbindung von TABS:

a) zwei Verteilleitungen, b) drei Verteilleitungen oder c) vier Verteilleitungen [85]

- Unterteilung des Gebäudes in wenige, z. B. 2 bis 4 Zonen mit separaten Pumpen(gruppen), bevorzugt nach Himmelsrichtung bzw. Schachtanbindung der Gebäudeteile, ggf. unterschiedliche Betriebszeiten der verschiedenen Zonen; Varianten: für alle Zonen einheitliche oder je Zone individuelle Vorlauftemperaturen.
- Eine oder wenige Versorgungszonen (Pumpengruppen, Vorlauftemperaturen), aber kleinteilige Zonierung hinsichtlich Betriebszeit durch lokal angeordnete Zonenventile bis hin zu einzelnen TABS-Kreisen oder Räumen/Raumgruppen (z.B., aber nicht ausschließlich) oberflächennahe TABS zur individuellen Zusatzheizung/-kühlung).

Gleichzeitiger Betrieb mit unterschiedlichen Vorlauftemperaturen

Über diese hydraulische Zonierung hinaus stellt sich bei mehr als einer Zone in der Anlage die Frage, ob für die verschiedenen TABS-Zonen gleichzeitig Wärme und Kälte bzw. verschiedene Grundtemperaturen bereitgestellt werden sollen. Die hierfür zur Verfügung stehenden Anbindemöglichkeiten lassen sich im Wesentlichen in drei Kategorien einteilen (siehe Bild 40):

- Anbindung mit zwei Verteilleitungen
- Anbindung mit drei Verteilleitungen
- Anbindung mit vier Verteilleitungen.

Bei zwei Verteilleitungen kann entweder nur gekühlt oder nur geheizt werden (Change-over-Betrieb für das TABS des gesamten Gebäudes). Bei drei Verteilleitungen können gleichzeitig warmes und kaltes Wasser bzw. verschiedene Vorlauftemperaturen zur Verfügung gestellt werden, welches im Rücklauf auf eine mittlere



Bild 41: Beispiel für einen fertig montierten TABS-Verteiler [Quelle: Hochschule Offenburg]

Temperatur gemischt wird. Vier Verteilleitungen haben einen separaten Rücklauf für die einzelnen TABS-Kreise. Zusätzliche Steuerventile im Rücklauf der Zonen ordnen den Zonenrücklauf dem Kälte- bzw. Wärmerücklauf zu.

Installationstechnik und hydraulischer Abgleich

Komponentenhersteller und Systemanbieter bieten hervorragende Produktinformationen rund um die Installationstechnik sowie zur Dimensionierung der einzelnen Komponenten. Die (Kunststoff-)Rohre sind sauerstoffdicht, um eine Rostbildung an einzelnen Bauteilen und damit einhergehend eine Verschlammung der Anlage weitgehend zu verhindern (siehe auch *Kapitel 2.4*).

In der Praxis wird die Betonkerntemperierung (in Mittellage) oft in der Dimension $20 \cdot 2,3$ bzw. die oberflächennahe Bauteilaktivierung in $14 \cdot 2,0$ ausgeführt. Häufig wird die Betonkerntemperierung mit größeren Abständen (z. B. 15 cm Rohrabstand) und die oberflächennahe Bauteilaktivierung mit kleineren Abständen (z. B. 7,5 cm Rohrabstand als Hochleistungssystem) ausgeführt. Typische Durchflüsse liegen zwischen $10 \text{ kg}/(\text{h m}^2)$ für Grundlastsysteme und $40 \text{ kg}/(\text{h m}^2)$ für Hochleistungssysteme. Entsprechend der Leistungsanforderungen (ausgedrückt als flächenspezifische Heiz- bzw. Kühlleistung) und der Verlegung im konkreten Projekt ergeben sich damit sehr unterschiedliche Volumenströme in einzelnen Abschnitten innerhalb einer bestimmten Zone. Zunächst gilt, dass die Rohrlängen in Abschnitten mit kleinem Durchmesser und mit hohen Volumenströmen nicht zu groß ausfallen dürfen, siehe *Bild 39*. Dabei soll eine maximale Rohrlänge von 100 m nicht überschritten werden.

In der Praxis kommt daher dem hydraulischen Abgleich eine besondere Rolle zu. Viele handelsübliche Verteiler sind entsprechend ausgerüstet. *Bild 41* zeigt einen typischen Verteiler für sieben TABS-Kreise. Links ist die Deckendurchführung

(vgl. *Bild 8* vor dem Betonieren) zu sehen. Rechts unten ist der zentrale Durchflussbegrenzer für diesen Verteiler im Vorlauf (rot gekennzeichnet) und rechts oben die Anzeige des Einstellwertes zu erkennen. Im Rücklauf sind die Feinstregulierventile (hier mit blauer Bauschutzkappe) für den hydraulischen Abgleich zu sehen. Diese Ventile können z. B. mit thermostatischen Antrieben ergänzt werden, um einzelne Kreise frei- oder abschalten zu können.

Eine sorgfältige hydraulische Planung mit durchgeföhrtem hydraulischem Abgleich während der Inbetriebnahme ist Grundvoraussetzung für eine funktionierende Betriebsführung.

5 Wärme- und Kälteversorgung für thermoaktive Bauteilsysteme

Wegen ihrer thermischen Trägheit erfordert die Bauteilaktivierung zunächst einen höheren Energieeinsatz, um einen bestimmten Raumkomfort während der gesamten Anwesenheitszeit zu gewährleisten. Die geringen Temperaturdifferenzen zwischen Wärmeträger und Raum können jedoch genutzt werden, um im Gesamtkonzept eine hohe Energieeffizienz zu erzielen. Voraussetzung dafür ist wiederum eine entsprechend dimensionierte Wärme- und Kälteversorgung mit einem abgestimmten Betriebsführungskonzept.

5.1 Voraussetzungen für eine hohe Energieeffizienz von thermoaktiven Bauteilsystemen

Aufgrund ihrer großen thermischen Trägheit und eingeschränkten Regelbarkeit führt der Einsatz von TABS zunächst zu einer höheren Wärme- bzw. Kälteabgabe an den Raum als bei sehr flinken und exakt regelbaren Heiz- bzw. Kühleinrichtungen. Gegenüber einer idealen Heizung bzw. Kühlung kann dies bei der Betonkerntemperierung (BKT) systembedingt zu einem bis zu 1,5-fach höheren Verbrauch führen, also einer Aufwandszahl der Nutzenübergabe im Bereich von 1,5. Dementsprechend ist beispielsweise nach DIN V 18599-5:2011-12 für TABS (gemeint ist hier die Betonkerntemperierung) ein Nutzungsgrad der Nutzenübergabe (Kehrwert der Aufwandszahl der Nutzenübergabe) von 0,70 – 0,73 bei entsprechenden Berechnungen, beispielsweise für den Nachweis nach Energieeinsparverordnung (EnEV [24]), anzusetzen. Eine oberflächennahe Bauteilaktivierung weist hingegen einen deutlich geringeren Mehrverbrauch aus und hat dementsprechend einen deutlich höheren Nutzungsgrad – je nach Gebäude- und Nutzungskonzept – von über 0,85.

Eine gegenüber konventionellen Heiz-/Kühl-Systemen erhöhte Energieeffizienz lässt sich mit TABS erst im Verbund mit einer sehr effizienten Wärme- und Kälteversorgung erreichen, welche spezifische Vorteile von TABS nutzt. Die wesentlichen vorteilhaften Eigenschaften von TABS in Bezug auf eine energieeffiziente Wärme- und Kälteversorgung sind:

1. Die Betriebstemperaturen von TABS liegen sowohl im Heiz- als auch im Kühlbetrieb näher an der Raumtemperatur als bei allen anderen etablierten Heiz-/Kühl-Systemen für Räume.
2. TABS, vor allem in Form der Betonkerntemperierung (BKT), ermöglichen in vielen Anwendungsfällen zeitliche Lastverschiebungen von mehreren Stunden, insbesondere einen Nacht(speicher)betrieb.

3. Das Speicherverhalten von TABS erlaubt darüber hinaus eine freiere Wahl von Betriebsparametern, wie z. B. der Vorlauftemperatur oder Beladeleistung, als konventionelle Heiz-/Kühl-Systeme.

Eine oder mehrere dieser Eigenschaften können bei nahezu allen Wärme- und Kälteerzeugungsanlagen zur Effizienzsteigerung genutzt werden. Bei den Betriebstemperaturen (1) ist dies mit Blick auf temperaturabhängige Wirkungs- und Nutzungsgrade von Heizkesseln, Kältemaschinen sowie Wärme- oder Kälteverluste von Speichern oder Leitungsnetzen sofort einsichtig. Eine Lastverschiebung in Richtung Nachtbtrieb (2) kann bei der Kälteerzeugung mit Kältemaschinen und Rückkühlung an die Außenluft Effizienzgewinne bringen. Die freiere Wahl von Betriebsparametern wie der Beladeleistung (3) erlaubt z. B. den Betrieb von Wärme- und Kälteerzeugern in einem besseren Leistungsbereich oder die Wahl von günstigen Beladezeiträumen.

In der Summe ergibt sich beim Einsatz von TABS eine höhere Energieeffizienz als bei konventioneller Raumkonditionierung allerdings erst dann, wenn die Effizienzvorteile bei der Wärme- und Kälteerzeugung und -verteilung größer sind als der Effizienznachteil aufgrund der höheren Aufwandszahl der Nutzenübergabe des TABS selbst: So profitiert z. B. ein Brennwert-Heizkessel von der niedrigen Betriebstemperatur eines TABS. Allerdings ist der Effizienzvorteil gegenüber der Kombination mit konventionellen, auf die Brennwertnutzung abgestimmten Heizsystemen sehr begrenzt.

Ein signifikanter energetischer Vorteil beim Einsatz von TABS ergibt sich nur in Verbindung mit Wärme- und Kälteversorgungssystemen, deren Effizienz sehr stark von den o. g. Eigenschaften profitiert bzw. die ausschließlich bei den für TABS geeigneten Betriebstemperaturen einsetzbar sind. Beispiele hierfür sind

- Wärmepumpen und Kältemaschinen, vor allem Kompressionsmaschinen
- eine thermisch angetriebene Hochtemperatur-Kühlung, die wiederum mit Niedertemperatur-Wärme (z. B. industrielle Abwärme oder Solarwärme) angetrieben werden kann
- die freie Rückkühlung über Rückkühlwerke an die Außenluft
- die Nutzung von Niedertemperatur-Abwärme oder Kühlwasser (z. B. aus Industrieprozessen), dessen Temperaturniveau ausschließlich für den Heizbetrieb von TABS geeignet ist oder
- die direkte geothermische Kühlung (Erdreich, Grundwasser).

In der Praxis haben sich bei Nichtwohngebäuden vor allem Systemkombinationen mit erdgekoppelten Wärmepumpen und direkter geothermischer Kühlung als vorteilhaft herausgestellt und etabliert. Deshalb wird im Folgenden die Heizung und Kühlung mit Hilfe oberflächennaher Geothermie erläutert.

5.2 Oberflächennahe Geothermie und Wärmepumpen

Bild 42 enthält ein allgemeines Prinzipschema einer Wärme- und Kälteversorgung auf Basis von oberflächennaher Geothermie und Wärmepumpen unter Einbeziehung von TABS. Das Prinzipschema enthält alle grundlegenden **Betriebsarten** derartiger Anlagen:

1. Wärmepumpen-Heizbetrieb
2. Ergänzung des Wärmepumpen-Heizbetriebs um eine Wärmeabgabe bei höherer Temperatur (Heißgasentwärmung)
3. direkte geothermische Kühlung
4. aktive Kühlung mit Kältemaschine (ggf. mit Wärmepumpen im Kältemaschinenbetrieb)
5. bivalenter Betrieb im Heiz- oder Kühlfall mit zusätzlicher Wärmequelle (bzw. Wärmesenke) oder zusätzlichem Erzeuger
6. Kombi-Heiz-/Kühlbetrieb bei gleichzeitigem Vorliegen einer Heiz- und Kühl-anforderung.

TABS sind sowohl im Heiz- als auch im Kühlbetrieb hierbei besonders vorteilhafte Verbraucher. Da die energetische Effizienz von Wärmepumpen entscheidend von der Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Verbraucher (Temperaturhub) abhängt, begünstigt die geringere Betriebstemperatur von TABS im Heizfall hohe Leistungs- und Arbeitszahlen der Wärmepumpe, siehe *Bild 43*. Damit sinkt der elektrische Energieaufwand für eine bestimmte abzugebende Wärme (Betriebsart 1).

Eine kombinierte Wärmeabgabe von Wärmepumpen auf zwei Temperaturniveaus ohne Effizienzeinbuße ist durch den Einsatz der so genannten Heißgasentwärmung möglich (Betriebsart 2). Hierbei wird die Tatsache ausgenutzt, dass ca. 10 % der gesamten Wärmeleistung der Wärmepumpe auf einem hohen Temperaturniveau

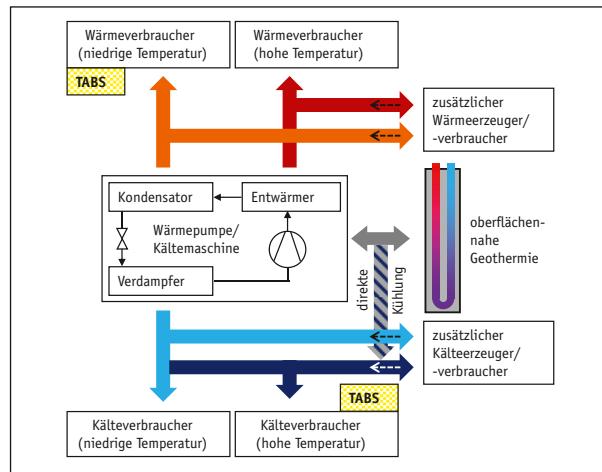


Bild 42: Integrierte Wärme- und Kältenutzung mit oberflächennaher Geothermie und zusätzlicher Wärmequelle/-senke, nach [58]

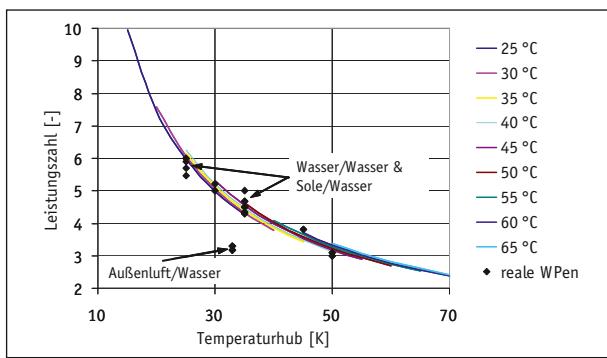


Bild 43: Leistungszahlen elektrisch angetriebener Kompressionswärmepumpen (durchgezogene Linien: Rechenwerte für unterschiedliche Vorlauftemperaturen auf der Heizseite; Symbole: Prüfstandswerte verschiedener Fabrikate) [59]

von bis zu 60 bis 70 °C im so genannten Entwärmer ausgekoppelt werden können. Allerdings müssen dabei stets gleichzeitig die restlichen 90 % Wärmeleistung auf dem niedrigeren Temperaturniveau des Kondensators abgeführt werden. Während einer Beladung von TABS kann so gleichzeitig ein kleiner Anteil der Wärmeleistung einem Verbraucher mit höherer Betriebstemperatur zugeführt werden.

Wirtschaftlich und energetisch am attraktivsten ist die Betriebsart 3, die direkte geothermische Kühlung, bei der das Kaltwasser ohne den Einsatz einer Kältemaschine ausschließlich mithilfe des Temperaturniveaus im Untergrund auf die erforderliche Temperatur gekühlt wird. Hierbei muss lediglich elektrische Hilfsenergie zum Betrieb von Umlözpumpen und Regeleinrichtungen aufgewendet werden. Im Regelfall erfolgt dabei die Wärmeabgabe aus dem Kaltwasserkreislauf an die Sole oder das Wasser in der geothermischen Anlage über einen Wärmeübertrager zur Systemtrennung. Aufgrund der geringen zur Verfügung stehenden Temperaturdifferenz zwischen Kaltwasserkreis und Geothermiesystem werden meist hocheffiziente Platten-Wärmeübertrager eingesetzt. Bei korrekter Planung und Ausführung sind dabei sehr geringe Gradienzen, d. h. Temperaturdifferenzen zwischen den beiden Kreisläufen, von 3 K bis minimal 2 K realisierbar [57]. TABS sind wegen ihrer hohen Kühl-Betriebstemperatur für die direkte geothermische Kühlung ideal geeignet.

Eine aktive Kühlung (Betriebsart 4) muss zwingend dann vorgesehen werden, wenn weitere Kälteverbraucher vorhanden sind, die ein für die direkte geothermische Kühlung zu tiefes Temperaturniveau benötigen. Darüber hinaus kann eine aktive Kühlung für TABS als Ergänzung zur direkten geothermischen Kühlung notwendig werden, wenn Spitzenlasten abzudecken sind, welche die Kapazität der direkten geothermischen Kühlung überschreiten oder wenn der Untergrund durch eine lang andauernde Wärmeaufnahme auf ein zu hohes Temperaturniveau erwärmt wurde.

Eine bivalente Wärme- oder Kälteerzeugung (Betriebsart 5) wird vor allem bei größeren Gebäuden und Anlagen eingesetzt. Zum einen kann damit vermieden werden, dass die GröÙe der verhältnismäßig teuren Geothermie- und ggf. Wärmepumpen-anlage an den selten auftretenden Leistungsspitzen ausgerichtet werden muss.

Ergänzend wird stattdessen ein in der Investition günstigerer Wärme- und Kälteerzeuger eingesetzt, der durch seine geringe Laufzeit nur einen geringen bzw. vernachlässigbaren Einfluss auf die energetische Gesamteffizienz hat [58]. Zum anderen erleichtert eine bivalente Wärme- oder Kälteversorgung die (gleichzeitige) Versorgung von Verbrauchern mit unterschiedlichen Betriebstemperaturniveaus.

Betriebsart 6 kommt immer dann in Frage, wenn Heiz- und Kühlbedarf über einen Großteil der gesamten Betriebszeit gleichzeitig vorliegen. Dann kann der Kühlkreislauf als Wärmequelle für den Wärmepumpenbetrieb dienen, was zu sehr hohen Gesamt-Leistungs- und Arbeitszahlen führt, weil eine Doppelnutzung der kalten Verdampfer- und der warmen Kondensatorseite der Wärmepumpe vorliegt. Anwendungsbeispiele hierfür sind ein hinreichend hoher, ganzjähriger Kältebedarf von Serverräumen/Rechenzentren, Lebensmittelkühlung in Supermärkten, Gastronomie, Großküchen usw. sowie Prozesskälte für Labore und Produktionsstätten. TABS als Wärmeverbraucher in Kombination mit derartigen Kühlanwendungen haben hierbei neben der niedrigen (Abwärme-)Betriebstemperatur den Vorteil der Speicherwirkung, was eine gewisse zeitliche Flexibilität ermöglicht (siehe *Kapitel 6.2*).

Als oberflächennahe geothermische Quellen werden bei größeren Nichtwohngebäuden bevorzugt Grundwasser-Brunnen, Erdsonden (Sondenfelder) sowie Energiepfähle (thermisch aktivierte Gründungspfähle des Gebäudes) eingesetzt. Flache Erdwärmekollektoren erschließen ein im Verhältnis zur benötigten Fläche geringes Erdreichvolumen und kommen deshalb für größere Anlagen seltener in Frage, wobei gleich Sondersysteme wie Erdwärmekörbe, Spiralsonden usw. in jüngerer Zeit häufiger auch bei Großprojekten als alternative Wärme- und mitunter auch Kältequellen herangezogen werden.

Ein häufiger, weil einfacher, wirtschaftlicher und energieeffizienter Systemaufbau zur Versorgung von TABS ist die Beheizung mit einer Wärmepumpenanlage in Verbindung mit einer direkten geothermischen Kühlung, also die Kombination der Betriebsarten 1 und 3. Dabei kann durch den Einsatz von Umweltenergie der Primärenergieverbrauch entscheidend reduziert werden. Der Wärme- und Kältebedarf wird mit einem sehr geringen Aufwand an hochwertiger Energie gedeckt. In Anlehnung an den Begriff der Exergie werden solche Systeme daher auch als LowEx-Systeme bezeichnet.

Die Erfahrungen aus ausgeführten Projekten belegen, dass bei korrekter Planung, Ausführung und Betriebsführung die angestrebte hohe Effizienz auch in der Praxis erreichbar ist (siehe *Kapitel 8*).

5.3 Besonderheiten der System- und Anlagenplanung

Die System- und Anlagenplanung von TABS in Verbindung mit oberflächennaher Geothermie und Wärmepumpen weist gegenüber konventionellen Wärme- und Kälteversorgungen insbesondere folgende Besonderheiten auf [58]:

- Das ausgewählte Wärmepumpen-Aggregat sollte bei den auftretenden Betriebsbedingungen, die von den im Herstellerkatalog aufgeführten Nenn-Bedingungen abweichen können, eine möglichst hohe Leistungszahl aufweisen.
- Die Wärmepumpe muss korrekt eingebunden werden: Unterschiedliche Temperaturniveaus sind entweder nacheinander oder (falls möglich) mittels Heißgasentwärmung zu bedienen. Der Betrieb einer Wärmepumpe auf einem höheren Temperaturniveau für eine entsprechende Verbrauchergruppe und das Heruntermischen der Temperatur für die Versorgung von TABS ist unbedingt zu vermeiden, weil dann der angestrebte Effizienzvorteil zunichte gemacht wird.
- Geringe Temperaturspreizungen und große zu aktivierende Flächen der TABS führen zu hohen Massenströmen und damit zu einem verhältnismäßig hohen Hilfsenergiebedarf zum Antrieb der Umlöpfpumpen. Eine sorgfältige hydraulische Planung und der Einsatz hocheffizienter Pumpen mit einer entsprechenden Regelung sind deshalb unabdingbar. Dies gilt gleichermaßen auch für die Hydraulik der Geothermieranlagen (Brunnenpumpen, Umlöpfpumpen von Solekreisläufen) sowie für die hydraulische Einbindung von Wärmepumpen und ggf. Kältemaschinen, siehe *Kapitel 6.3*.
- Geothermieranlagen erfordern eine sorgfältige interdisziplinäre Planung, bei der (hydro)geologische, anlagentechnische und energetische Aspekte und Schnittstellen aufeinander abgestimmt werden müssen. Falsche Annahmen bei der Planung (z. B. ungestörte Erdreichtemperatur, zu geringe Entzugsleistung für Erdsonden, 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.
- Neben der Leistungsfähigkeit der geothermischen Anlage sind auch die geothermische Ergiebigkeit und deren Abhängigkeiten zu berücksichtigen. Beispielsweise weisen lediglich Grundwasserbrunnen-Anlagen bei bestimmungsgemäßem Betrieb keine so genannte thermische Rückwirkung auf. Bei Geothermieranlagen mit Erdsonden, Energiepählern, Energiekörben usw. ist aufgrund der Speicherwirkung des Erdreichs dagegen stets eine thermische Rückwirkung vorhanden, d. h. die jeweils erreichbare Leistung hängt von der Vorgeschichte der thermischen Beanspruchung (Wärmeentzug/Wärmeeintrag) ab. Entzogene bzw. eingetragene Energiemengen und deren Bilanzen, z. B. das Gleichgewicht von Heizen und Kühlen, sind deshalb von entscheidender Bedeutung und werden oft im Rahmen des Genehmigungsverfahrens nachgewiesen.
- Anlagenplanung und Betriebsführungskonzept sind sowohl bei TABS als auch bei Geothermiesystemen mit thermischer Rückwirkung wegen der jeweiligen Speicherwirkung nicht voneinander trennbar. Die übertragene thermische Leistung bei einer bestimmten Betriebstemperatur ist vom Lade- bzw. Entladezustand, d. h. von der Vorgeschichte des Betriebs abhängig.

6 Betriebsführung und Optimierung

Unter Mitarbeit von Dominik Wystrcil

Die Bauteilaktivierung ist ein speicherndes System mit einer signifikanten thermischen Trägheit. Das dynamische Verhalten von TABS als Wärme- bzw. Kälteüberabesystem ist damit von so großen Zeitkonstanten gekennzeichnet, dass die in der Gebäudetechnik üblichen Regler und Strategien zur Raumtemperaturregelung praktisch kaum realisierbar sind, wie im Folgenden nachgewiesen wird. Dementsprechend dominiert bei der Betriebsführung von TABS (und insbesondere der Betonkerntemperierung) meist der Anteil der Steuerung, die ggf. um eine Rückkopplung im Sinne einer Regelung ergänzt wird. Eine punktgenaue Raumtemperaturregelung kann i. d. R. nur mit Hilfe eines Zusatzsystems im Raum gewährleistet werden, welches die Spitzenlasten abdeckt, während die Betonkerntemperierung dann ein Grundlastsystem darstellt.

- Als **Regelgröße** wird grundsätzlich die Raumtemperatur verwendet, wobei viele Betriebsführungsstrategien nicht mit der gemessenen Raumtemperatur arbeiten. Einzelne Regelstrategien verwenden zusätzlich oder alternativ die prognostizierte Wärme- oder Kältemenge als Regelgröße. In diesem Fall muss die zuzuführende Wärme- bzw. Kältemenge berechnet werden und die tatsächlich zugeführte Energiemenge messtechnisch erfasst werden.
- Als **Messgrößen** stehen der Regelung grundsätzlich die Außentemperatur, oft Vorlauf- und Rücklauftemperaturen, gelegentlich Raumtemperaturen und ggf. Volumenströme oder – wenn die prognostizierte Wärme- bzw. Kältemenge als Regelgröße verwendet wird – Wärmemengen zur Verfügung.
- Als **Stellgrößen** werden grundsätzlich die Haupt- und Zonenpumpen, sehr oft Regelventile im Wärme- und Kältevorlauf und mitunter auch Stellventile in den einzelnen Verteilkreisen verwendet.

Die für die Bauteilaktivierung geeigneten Betriebsführungsstrategien lassen sich in konventionelle und prädiktive Strategien unterteilen und werden in diesem Kapitel beschrieben. Da sich bis heute weder ein bestimmtes Anlagendesign noch eine bestimmte Regelstrategie etabliert hat, werden im Rahmen einer Queranalyse realisierte Projekte und aktuelle Entwicklungstendenzen diskutiert.

6.1 Grenzen der Regelbarkeit der Bauteilaktivierung

Es wäre wünschenswert, die Bauteilaktivierung mit einem industriellen PID-Regler (proportional – integral – differential) oder, vergleichbar einem Heizkörper, mit einem einfachen Thermostatventil zu regeln. Bild 44 zeigt eine solche Regelstrecke, bei der die Raumtemperatur ϑ_{Raum} über die Vorlauftemperatur ϑ_{VL} des TABS geregelt wird.

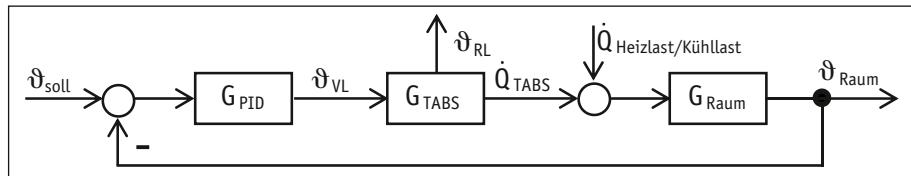


Bild 44: Struktur eines Regelkreises für die Vorlauf temperaturregelung in Abhängigkeit von der aktuellen Raumtemperatur. Vereinfachend ist die Regelstrecke in die Teilstrecken »TABS« und »Raum« (ohne gegenseitige Wechselwirkung) unterteilt. Die Rücklauftemperatur ϑ_{RL} wird nicht im Signalfluss berücksichtigt, ist aber als wichtige Systemgröße gekennzeichnet.

Um diese Regelstrecke für unterschiedliche TABS-Bauarten untersuchen und bewerten zu können, wurden im Raumklimalabor der Hochschule Offenburg eine Bauteilaktivierung in Mittellage sowie eine oberflächennahe Bauteilaktivierung in baugleichen Prüfräumen experimentell untersucht. Unter praxisnahen Randbedingungen konnten zunächst im stationären Betrieb die Produktangaben für die Bauteilaktivierung mit typischen Heizleistungen zwischen 30 und 40 W/m² und Kühlleistungen zwischen 40 und 70 W/m² bei entsprechenden Über- bzw. Untertemperaturen für die oberflächennahe (agile) und die thermisch träge Bauteilaktivierung in Mittellage bestätigt werden. Die modellbasierte Datenauswertung von Sprungantworten liefert die für die Reglereinstellung wichtigen Zeitkonstanten der einzelnen Systeme.

Bild 45 zeigt je eine Systemantwort (hier: Rücklauf- und Raumtemperatur) für einen Sprung der Vorlauftemperatur von 20 auf 30 °C (Führungsgrößensprung im Heizfall) bzw. der internen Lasten (Störgrößensprung im Kühlfall) für die beiden TABS in den Prüfräumen bei Wärmestromdichten von rund 25 W/m² im Heizfall und rund 50 W/m² im Kühlfall. Die Zeitkonstante τ kann für die beiden Subsysteme TABS und Raum über den Zusammenhang

$$\tau_{TABS} [h] = \frac{mc_{TABS} \left[\frac{Wh}{K} \right]}{UA_{TABS} \left[\frac{W}{K} \right]} \quad \text{bzw.} \quad \tau_{Raum} [h] = \frac{mc_{Raum} \left[\frac{Wh}{K} \right]}{UA_{Raum} \left[\frac{W}{K} \right]} \quad (15)$$

analytisch bestimmt und für den Heizfall messtechnisch validiert werden. Die Zeitkonstante der Prüfräume beträgt (bei einem Luftwechsel von 1 h⁻¹ während der Versuche) rund zwanzig Stunden, die der thermisch trägen Bauteilaktivierung in Mittellage elf Stunden und die der thermisch agilen, oberflächennahen Bauteilaktivierung drei Stunden.

Im Kühlfall wurde das Experiment nicht mit einem (Führungsgrößen-)Sprung der Vorlauftemperatur, sondern mit einem (Störgrößen-)Sprung der Wärmelasten bei

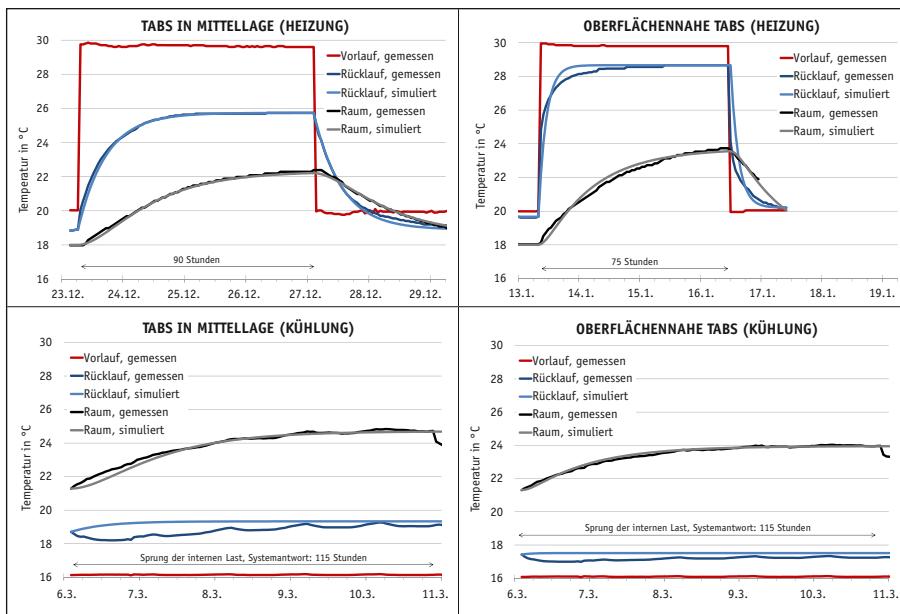


Bild 45: Sprungantworten einer Bauteilaktivierung in den beiden Prüfräumen im Vergleich mit einer modellbasierten Auswertung

gleicher Vorlauftemperatur durchgeführt. Wird der Kühlfall mit den für den Heizfall bestimmten Zeitkonstanten analysiert, so zeigt sich, dass die Rücklauftemperatur erwartungsgemäß weniger gut abgebildet wird. Allerdings wird das thermische Verhalten des Raumes gut abgebildet, was wiederum das Modell der beiden Teilstrecken »TABS« und »Raum« bestätigt.

Aus diesen Messungen ergeben sich Zeitkonstanten von drei bzw. elf Stunden für die Bauteilaktivierung und zwanzig Stunden für die (baugleichen) Prüfräume. Damit können die Parameter Verstärkung, Nachstell- und Vorhaltezeit eines PID-Reglers für die Bauteilaktivierung in einem Standardregelkreis für die Raumtemperatur mit den in der Regelungstechnik üblichen Methoden und Regeln bestimmt werden. Dabei ist zu unterscheiden, ob das Führungs- oder Störverhalten optimiert werden soll. Während das Führungsverhalten in diesem Standardregelkreis analytisch (mit Hilfe der Laplace-Transformation) gelöst werden kann, gelingt die Lösung für das Störverhalten nur numerisch [72].

Bild 46 zeigt für diesen Standardregelkreis die resultierenden Simulationsergebnisse der Raumtemperatur nach einem Sollwertsprung für die Raumtemperatur von 26 auf 23 °C und nach einer sprungförmigen Störgrößenänderung (z. B. durch interne Lasten), die einem Anstieg von 23 auf 26 °C entspricht. Es zeigt sich, dass selbst ein vermeintlich optimal eingestellter PID-Regler in Verbindung mit TABS (und insbesondere mit einer Betonkerntemperierung) ungeeignet ist:

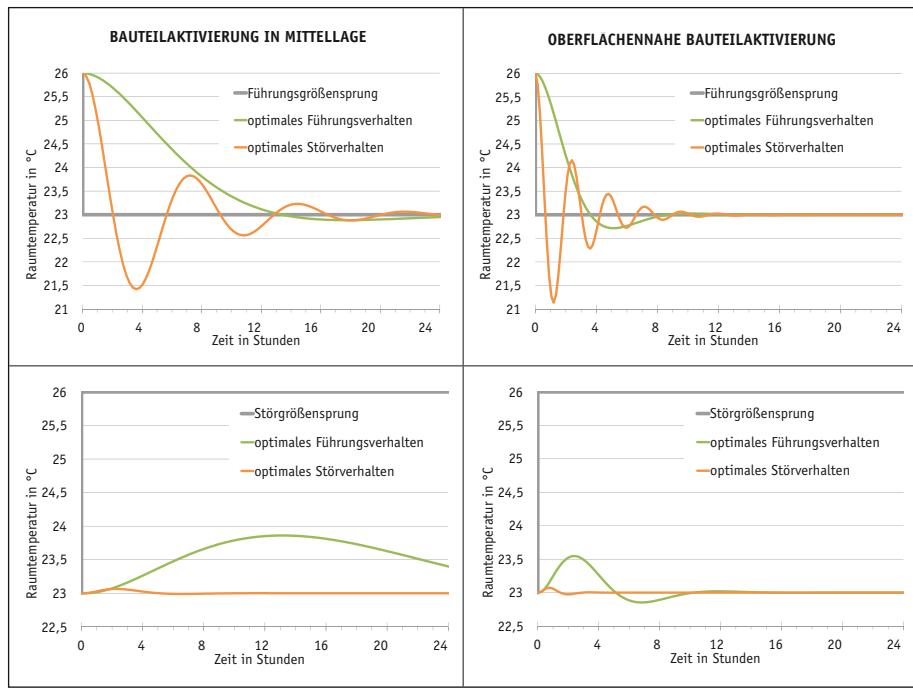


Bild 46: Regelverhalten der beiden Modellräume mit Sprungantworten gemäß Bild 45
Führungs- und Störverhalten jeweils für zwei optimierte Reglereinstellungen

- **Führungsverhalten mit Reglereinstellung für optimales Führungsverhalten:** Wird der PID-Regler so eingestellt, dass sich die Raumtemperatur möglichst schnell mit akzeptablem Schwingen einem Sollwert annähert, wird der Sollwert mit der thermisch trügen Bauteilaktivierung erstmalig nach zwölf Stunden und mit der thermisch agilen Bauteilaktivierung nach knapp vier Stunden erreicht. Beide Werte sind aus Nutzersicht in der Praxis nicht akzeptabel.
- **Führungsverhalten mit Reglereinstellung für optimales Störverhalten:** Werden die Reglerparameter so gewählt, dass eine Störgröße möglichst gut kompensiert wird, kommt es zu einem häufigen Wechsel zwischen Heiz- und Kühlbetrieb, wobei fraglich ist, ob die dabei geforderte Heiz- bzw. Kühlleistung von der Bauteilaktivierung überhaupt bereitgestellt werden könnte.
- **Störverhalten mit Reglereinstellung für optimales Störverhalten:** Sowohl für das träge System in Mittellage als auch das agile, oberflächennahe System wird – bei optimaler Reglereinstellung – die Störgröße schnell und vollständig kompensiert.
- **Störverhalten mit Reglereinstellung für optimales Führungsverhalten:** In diesem Fall kommt es bei der trügen Bauteilaktivierung über einen Zeitraum von bis zu 24 Stunden zu einer deutlichen Erwärmung des Raumes. Selbst beim thermisch agileren System ist dann eine Erwärmung über mehrere Stunden spürbar.

Daraus folgt, dass die große thermische Trägheit es praktisch unmöglich macht, eine Bauteilaktivierung mit einer Standard-Regelung unmittelbar über die Raumtemperatur zu beeinflussen:

- Es ist nicht möglich, eine thermisch träge Bauteilaktivierung in Mittellage über einen industriellen PID-Regler zu regeln, weil sich eine Sollwertänderung erst deutlich nach der typischen Anwesenheitszeit überhaupt bemerkbar macht.
- Grundsätzlich ist ein PID-Regler für die oberflächennahe Bauteilaktivierung einsetzbar, würde aber in einer Standardimplementierung (ohne Zusatzfunktionen) zu einem Wechsel zwischen Heiz- und Kühlbetrieb führen, was betriebstechnisch kaum realisierbar wäre und mit einem deutlich erhöhten Energieverbrauch verbunden ist.

Während konventionelle Regelstrategien für agile, oberflächennahe Systeme mit einer entsprechenden Begrenzung von Heiz- und Kühlleistung und übergeordneter Freigabe gut einsetzbar sind, stellt sich die Frage nach geeigneten Betriebsführungs- und Regelungsstrategien für TABS in Mittellage.

6.2 Betriebsführungsstrategie

Eine Betriebsführungsstrategie für die Betonkerntemperierung kann aufgrund der großen Zeitkonstanten bzw. der thermischen Trägheit des Systems offensichtlich nicht über eine konventionelle Regelung erfolgen. Zielführende Betriebsführungsstrategien basieren meist auf einer Regelung der Vorlauftemperatur. Regelungstechnisch handelt es sich hierbei um eine Steuerung (englisch: open-loop control), weil die Regelgröße (hier: Ist-Raumtemperatur ϑ_{Raum}) nicht mit der Führungsgröße (hier: Soll-Raumtemperatur ϑ_{Soll}) verglichen wird. Der »Regelkreis« ist nicht geschlossen. Fast immer wird die Vorlauftemperaturregelung mit anderen Regelstrategien verknüpft. Die Lösungsmöglichkeiten sind so vielfältig und projektspezifisch, dass im Folgenden nur grundsätzliche Zusammenhänge vorgestellt werden können.

6.2.1 Regelung der Vorlauftemperatur

Seit Mitte der 1990er Jahre wurden Betriebsführungsstrategien von verschiedenen Arbeitsgruppen entwickelt. Exemplarisch hierfür seien die grundlegenden Arbeiten von Simmonds [87], Meierhans [63], Olesen [67] und Sommer [88] genannt. Den zugrundeliegenden Regelalgorithmen ist gemeinsam, dass die Vorlauftemperatur gesteuert wird. Ein typischer Algorithmus unterscheidet dabei zwischen Sommer- und Winterfall. Olesen [68] schlägt beispielsweise eine Kennlinie in folgender Ausgestaltung vor:

- $\vartheta_{Vorlauf} = 18^{\circ}\text{C} + 0,35 \cdot (18^{\circ}\text{C} - \vartheta_{\text{außen}})$ im Sommer
- $\vartheta_{Vorlauf} = 18^{\circ}\text{C} + 0,45 \cdot (18^{\circ}\text{C} - \vartheta_{\text{außen}})$ im Winter

Diese Kennlinien wurden mit Hilfe umfangreicher Simulationsstudien (siehe auch *Kapitel 9.1*) unter Berücksichtigung entsprechender Komfortmodelle (siehe auch *Kapitel 3.1*) ermittelt und sind für Niedrigenergiegebäude mit unterschiedlicher Nutzung in einem weiten Bereich stabil einsetzbar. Häufig werden diese Kennlinien im Laufe der Inbetriebnahme bzw. des ersten Betriebsjahres (manuell) an die konkrete Nutzung und den Standort sukzessive angepasst. In der Regel wird für die Außentemperatur $\vartheta_{\text{außen}}$ nicht der Momentanwert, sondern das gleitende Mittel der Außentemperatur über einen längeren Zeitraum (z. B. in Anlehnung an DIN EN 15251 [17]) gewählt.

Wird die Außentemperatur aus einer Wetterprognose verwendet, entwickelt sich dieses Kennlinienverfahren zu einer prädiktiven Regelung. In dieser Form einer prädiktiven Regelung wird das Rechenmodell zur Prognose des Heiz- bzw. Kühlenergiebedarfs (siehe *Kapitel 6.2.4*) durch ein empirisches Modell auf Basis von Betriebserfahrungen ersetzt.

In der Praxis hat sich neben der außentemperaturabhängigen Steuerung der Vorlauftemperatur auch die Betriebsweise mit konstanter Vorlauftemperatur (im Winterbetrieb) und mit nach unten begrenzter, freier Vorlauftemperatur (passive Kühlung im Sommer) etabliert. Dementsprechend muss das Regelkonzept um die Regelung der Pumpenlaufzeiten erweitert werden.

In der Literatur wird auch die Regelung der Vorlauftemperatur nach der Raumtemperatur, der Taupunkttemperatur, der Oberflächentemperatur und der Bauteiltemperatur (ersatzweise der Rücklauftemperatur) diskutiert [42].

6.2.2 UBB-Verfahren

Das in der Schweiz entwickelte UBB-Verfahren (kurz für: Unknown-but-bounded-Verfahren) ist zwischen einer stationären Auslegung und einer detaillierten, individuellen Simulation angesiedelt [94]. Es erlaubt sowohl die Leistungsauslegung als auch die Ermittlung geeigneter Heiz- und Kühlkurven für den Betrieb von TABS, insbesondere für die Bauteilaktivierung in Mittellage.

Hauptmerkmal des UBB-Verfahrens ist die Berücksichtigung der dynamischen Wirkung von variablen Wärmegewinnen im Gebäude. Dabei ist es nicht erforderlich, dass Höhe und Zeitverlauf der Wärmegewinne genau bekannt sind, sie müssen lediglich durch die Angabe von Minimal- und Maximalverläufen eingegrenzt werden (»unknown, but bounded«). Mit einem einfachen dynamischen Raummodell werden aus diesen beiden Grenzverläufen resultierende Erhöhungen der Raumtemperatur ermittelt. Aus deren Minimal- und Maximalwerten werden dann mithilfe eines vereinfachten stationären Raummodells so genannte äquivalente untere und obere Wärmegewinnschranken berechnet. Mit diesen lassen sich die außentemperaturabhängigen Vorlauftemperaturen des TABS berechnen, die zur Einhaltung

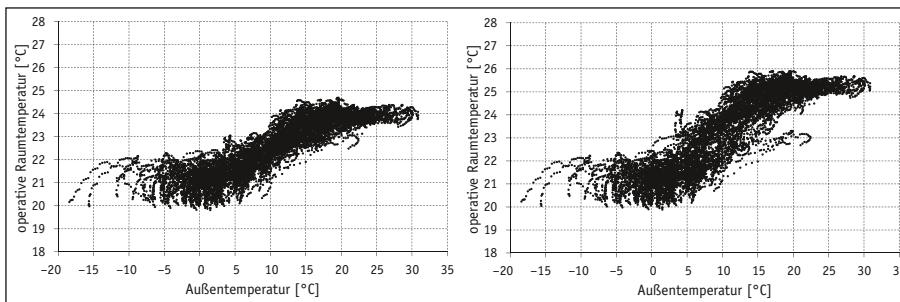


Bild 47: Ergebnisse von Jahressimulationen (mit TRNSYS) für einen Büroraum mit Betonkerntemperierung. Gezeigt wird die aktuelle Raum- über der aktuellen Außentemperatur. Die TABS-Vorlauftemperaturregelung wird einmal mit der Vorlauftemperaturkennlinie nach dem derzeitigen (links) und nach einem verbesserten UBB-Verfahren (rechts) außentemperaturabhängig (mit dem 24 Stunden-Mittelwert) bestimmt [60]. Mit dem verbesserten Verfahren lässt sich das Komfortband besser ausnutzen.

der vorgegebenen minimalen und maximalen Raumtemperatur erforderlich sind. Die Heiz- und Kühlkurven werden für einen über 24 Stunden gleitenden Mittelwert der Außentemperatur bestimmt. Die große thermische Trägheit des TABS wird somit durch eine quasi-stationäre Auslegung über 24 h hinweg berücksichtigt, bei der die dynamischen Belastungen zuvor in die äquivalenten Wärmegewinnschranken umgerechnet werden.

Die Autoren des UBB-Verfahrens [94] haben das Verfahren im Auslegungswerkzeug *TABSDesign* implementiert [91], welches auf vereinfachten Raummodellen basiert. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens zur Performance und Betriebsführung von Niedrigenergiegebäuden mit TABS und Erdwärmemutzung [44] wurden das vorliegende UBB-Verfahren und dessen Werkzeug *TABSDesign* anhand von zwei Beispielgebäuden (Bürogebäude und Schulgebäude) getestet [60]. Hierzu wurden für beide Beispielgebäude mit *TABSDesign* Heiz- und Kühlkurven der Vorlauftemperaturen für einen Dauerbetrieb der Bauteilaktivierung in Mittellage ermittelt und diese anschließend in dynamischen Jahressimulationen mit dem Simulationsprogramm TRNSYS [55] als Testfälle angewendet.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens zur Performance und Betriebsführung von Niedrigenergiegebäuden mit TABS und Erdwärmemutzung [44] wurden das vorliegende UBB-Verfahren (gemäß des Produktes *TABSDControl*) und dessen Werkzeug *TABSDesign* anhand von zwei Beispielgebäuden (Bürogebäude und Schulgebäude) getestet. Hierzu wurden für beide Beispielgebäude mit *TABSDesign* Heiz- und Kühlkurven der Vorlauftemperaturen für einen Dauerbetrieb der Bauteilaktivierung in Mittellage ermittelt und diese anschließend in dynamischen Jahressimulationen mit dem Simulationsprogramm TRNSYS als Testfälle angewendet [56].

In den simulierten Testfällen wird für die Heizperiode die untere Komfortgrenze bis auf wenige Stunden (<1%) und lediglich geringfügige Unterschreitungen sehr gut eingehalten. Im Kühlfall wird das Komfortband ohne Überschreitungen eingehalten, jedoch nach oben hin nicht vollständig ausgenutzt (siehe *Bild 47, links*). Die simulierten maximalen operativen Raumtemperaturen liegen während der Nutzungszeit der Gebäude stets 1 bis 2 K unterhalb der oberen Grenze von 26 °C, d. h. zwischen 24 und 25 °C. Dies bedeutet, dass das UBB-Verfahren in seiner gegenwärtigen Umsetzung und Implementierung in *TABSDesign* tendenziell zu niedrige Kühlkurven liefert. Die Folge ist eine mehr als notwendig starke Kühlung mit einem höheren Kühlenergieaufwand als erforderlich.

Ursache hierfür sind die im vorliegenden UBB-Verfahren verwendeten vereinfachten Raum- und Lastmodelle, welche zu Abweichungen gegenüber detaillierten und genaueren State-of-the-Art-Raummodellen führen. In [60] wird gezeigt, dass das UBB-Verfahren durch die Verwendung detaillierter Raummodelle entsprechend verbessert und erweitert werden kann. In *Bild 47* sind Testsimulationen eines TABS-Betriebs hierzu dargestellt. Damit ist es möglich, die Auslegung gemäß dem so erweiterten UBB-Verfahren durchgängig auf derselben Qualitätsstufe durchzuführen wie bei gängigen State-of-the-Art-Simulationen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass mit dem Unknown-but-bounded-Verfahren (UBB-Verfahren) eine hochwertige und praktikable Methode zur Bestimmung außentemperaturabhängiger Heiz-/Kühlkurven von TABS vorliegt. Die festgestellten Abweichungen von der gewünschten vollständigen Ausnutzung des Komfortbandes sind keine Schwächen des eigentlichen UBB-Verfahrens, sondern hängen von der Qualität der darin verwendeten Raummodelle ab. Dies lässt sich durch die Verwendung detaillierter und genauerer Raummodelle beheben. Unabhängig davon kann das vorliegende UBB-Verfahren als eine Best-Practice-Methode empfohlen werden.

6.2.3 Erweiterung der konventionellen Betriebsführung

Der häufig gewählte Algorithmus zur Regelung der Vorlauftemperatur wird oft ergänzt um andere Regelstrategien. Kalz [42] stellt die Literatur ausführlich vor und bewertet die vorgestellten Regelstrategien umfassend. Die Regelung der Vorlauftemperatur wird oft ergänzt, um

- eine Regelung der mittleren Fluidtemperatur, allerdings mit geringem Einsparpotenzial gegenüber der einfachen Vorlauftemperaturregelung
- eine Regelung des Volumenstroms mit An-/Aus-Regelung und (seltener) mit Drehzahlregelung, um insbesondere die Umweltenergiequelle besser zu nutzen
- eine Dreipunktregelung in Abhängigkeit von der Raumtemperatur oder (oft realisiert) der Außentemperatur.

Der Betrieb kann als Dauerbetrieb oder als intermittierender Betrieb realisiert werden.

Eine wichtige Rolle spielt – unabhängig von der Betriebsführungsstrategie – die Zonierung, um Zonen mit unterschiedlicher Heiz- und Kühllast bedarfsgerecht versorgen zu können.

Hier hat sich bis heute kein Standardverfahren etabliert, wie in *Kapitel 6.3.3* vor gestellt. In den letzten Jahren haben verschiedene Anbieter der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik vorkonfektionierte TABS-Bausteine für die Gebäudeautomation entwickelt, die auf dem Markt verfügbar sind. Häufig entscheiden Planer dann in Abstimmung mit den Kunden und den ausgewählten Systemherstellern über individuelle Betriebsführungsstrategien.

Erfolgreiche, konventionelle Betriebsstrategien

Ausgehend von einer geeigneten Zonierung verbindet eine zielführende Betriebsführungsstrategie eine intermittierende Betriebsweise (z. B. mit getrenntem Tag-/Nacht-Betrieb für thermisch schwere und agile Übergabesysteme) mit einer Dreipunktregelung (z. B. über eine außentemperaturabhängige Umschaltung von Heiz- auf Kühlbetrieb mit einem entsprechend breiten Totband ohne TABS-Betrieb), einer Regelung der Vorlauftemperatur (z. B. über das gleitende Mittel der Außentemperatur) sowie einer Volumenstromregelung (z. B. in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf).

Wird eine Betonkerntemperierung mit einem zweiten, thermisch schnellen Zusatzsystem (z. B. Randstreifenelemente, Kühlsegel oder Klimaanlage) ergänzt, sollte das Zusatzsystem über die Raumtemperatur geregelt werden.

6.2.4 Neue Ansätze der Betriebsführung und prädiktive Regelung

Auf Grundlage erster Monitoringkampagnen und systemtheoretischer Überlegungen konnte bereits 2009 [75] nachgewiesen werden, dass es grundsätzlich möglich ist, Jahresarbeitszahlen für Heizen und Kühlen von $10 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{kWh}_{\text{el}}$ mit verfügbarer Technik, sorgfältiger Planung und umsichtigem Betrieb zu erreichen. Gleichzeitig waren die tatsächlich erreichten Jahresarbeitszahlen in diesen Demonstrationsprojekten ernüchternd niedrig, wobei zwischen den Projekten sehr große Unterschiede beobachtet wurden. Allein durch die Optimierung der Betriebsführung konnten in einzelnen Projekten erhebliche Effizienzsteigerungen erreicht (und messtechnisch nachgewiesen) werden. Diese große Diskrepanz zwischen realem Anlagenbetrieb und ideal möglicher Energieeffizienz stellt die Frage nach verbesserten Ansätzen für die Betriebsführung.

Im Projekt LowEx:MONITOR [44] wurden verschiedene Betriebsführungsstrategien messtechnisch untersucht. Diese Arbeiten bilden die Grundlage für weiterführende Untersuchungen von Wystrcil und Kalz mit Hilfe der gekoppelten Anlagen- und Gebäudesimulation.

Intermittierende Betriebsweise der Umwälzpumpen im Sekundärkreis

In der ersten Simulationsstudie [111] wurde der Einfluss einer intermittierenden Betriebsweise der Umwälzpumpen im Sekundärkreis untersucht. Dafür wurde ein thermo-hydraulisches Gesamtsystemmodell einer Wärmepumpenanlage mit Fußboden temperierung zur Wärmeversorgung erstellt. Ebenfalls wurde das hydraulische Verteilsystem mit Berücksichtigung der hydraulischen Druckverluste des Rohrnetzes und des Energieaufwands der Umwälzpumpen modellhaft abgebildet. Als Referenzregelung wurden außentemperaturgeführte Heiz- und Kühlkurven und ein durchgehender Pumpenbetrieb verwendet. Bei der Regelungsstrategie mit dem intermittierenden Pumpenbetrieb wurde ausgenutzt, dass beim Start des Pumpenbetriebs im Sekundärkreis günstigere Temperaturgradienten zwischen dem Wärmeträgerfluid und der thermischen (Bauteil-)Masse bestehen, wodurch höhere Wärmeübertragungsleistungen erreicht werden können. Im Falle eines Wärmebedarfs wurden die Pumpen periodisch für 15 Minuten betrieben gefolgt von Pausen von ebenfalls 15 Minuten. Folgende zentrale Ergebnisse zeigte der Vergleich der beiden Regelungsvarianten:

- Der Hilfsenergiebedarf für die Umwälzpumpen konnte durch den intermittierenden Betrieb um ca. 76 % gegenüber der Referenzregelung gesenkt werden.
- Es zeigte sich eine Reduzierung des Energieaufwands für die Wärmetransformation in der Wärmepumpe von ca. 3 % durch die Vermeidung einer Überversorgung der Räume, die im Heizbetrieb zu Raumtemperaturen über der definierten Komforttemperatur von 22 °C führt.

Einfluss einzelner Regelungsparameter auf den Energiebedarf für die Wärmeversorgung

In der zweiten Simulationsstudie [109] wurde der Einfluss der relevanten Regelungsparameter der konventionellen Regelungsstrategie für TABS nach dem UBB-Verfahren auf den Energiebedarf für die Wärmeversorgung untersucht. Die relevanten Regelungsparameter waren dabei:

- Steigung der linearen außentemperaturgeführten Heizkurve
- Vorlauftemperatur unter Nennbetriebsbedingungen
- Heizgrenztemperatur und
- Nennvolumenstrom für die TABS.

Im Falle der Referenzregelung wurden die Regelungsparameter mithilfe des von Tödtli [94] zur Verfügung gestellten Planungstools *TABSDesign* [91], in welchem ein stationäres Widerstandsnetzwerk des Gebäudes sowie der TABS hinterlegt ist, ermittelt. In der Simulationsstudie wurde untersucht, welche Energieeinsparungen durch die Verwendung dynamischer Simulationsmodelle zur Bestimmung der relevanten Regelungsparameter erreicht werden können:

- Der Energiebedarf für die Wärmepumpe und die Umwälzpumpen kann um ca. 8 % gesenkt werden.
- Den größten Einfluss auf den Energiebedarf haben der festgelegte Nennvolumenstrom für die Umwälzpumpe im Sekundärkreis und das Vorlauftemperaturniveau unter Nennbetriebsbedingungen sowie der Gradient der Heizkurve.

Einfluss der Zonierung auf die zentralen Wärme- und Kälteerzeugungsanlagen

In der dritten Simulationsstudie [110] wurde der Einfluss der Zonierung bzw. der hydraulischen Anbindung der TABS auf die zentralen Wärme- und Kälteerzeugungsanlagen untersucht. Hierfür wurde ein thermo-hydraulisches Simulationsmodell eines Bürogebäudes, welches mit Betonkerntemperierung versorgt wird, modellhaft abgebildet. Darin wurden unterschiedliche Modellvarianten der hydraulischen Anbindung berücksichtigt.

Durch die unterschiedlichen hydraulischen Zonierungen bzw. Topologien ergeben sich auch unterschiedliche Möglichkeiten für die Regelung des Systems. Hierzu können unterschiedliche hydraulische Aktoren für die Regelung genutzt werden. Diese Varianten werden simulationsgestützt unter dynamischen Bedingungen optimiert. Die Optimierung der Betriebsführungsstrategien führt zu folgenden Ergebnissen:

- Es kann auch ohne Zonierung des hydraulischen Verteilsystems, d. h. ohne die Möglichkeit zur individuellen Einstellung der Vorlauftemperaturen für unterschiedliche thermische Zonen (wie von Tödtli [94] vorgeschlagen) ein hoher thermischer Komfort erreicht werden.
- Als einflussreichster Parameter wurde die individuelle Einstellung der täglichen Betriebsdauer und des Betriebsbeginns der TABS in den jeweiligen unterschiedlichen Zonen durch die Verwendung von zonenweisen motorisch ansteuerbaren Absperrventilen identifiziert.
- Der investive Aufwand für die hydraulische Anbindung der TABS an die zentrale Wärme- und Kälteerzeugungsanlagen kann dadurch deutlich gesenkt werden.

Prädiktive Regelung auf Basis von Regressionsmodellen

Himmler [34] entwickelte eine TABS-Steuerung, bei welcher der Energiebedarf des jeweils nächsten Tages mit Hilfe von prädiktiven Regressionsmodellen ermittelt wird. In der Nacht vor jedem Betriebstag erfolgt dann die Beladung des TABS mit der jeweils ermittelten Leistung über einen festen Zeitraum, wobei die Vorlauftemperatur entsprechend geregelt wird.

Feldmann [27] entwickelte eine prädiktive Steuerung für die Pulsweitenmodulation auf Basis einer multiplen linearen Regression. Damit sind sehr hohe Einsparungen der elektrischen Pumpenenergie und moderate Einsparungen bei der thermischen Energie zu erreichen. Dieser Algorithmus wurde erfolgreich in einem Gebäude eingesetzt [22].

Schmelas [85] stellt eine Weiterentwicklung der multiplen linearen Regression vor: Der Heiz- bzw. Kühlenergiebedarf des kommenden Tages wird mit Hilfe einer sich selbstständig adaptierenden Regressionsebene bestimmt. Im Vergleich mit konventionellen Regelstrategien kann sowohl der thermische Komfort während der Nutzungszeit verbessert als auch der Heiz- bzw. Kühlenergiebedarf deutlich gesenkt werden. Dieser Algorithmus konnte im Labor an der Hochschule Offenburg erfolgreich getestet werden [76].

Prädiktive Regelung auf Basis von MPC-Modellen

Eine Vielzahl von wissenschaftlichen Arbeiten widmet sich der Optimierung des Anlagenbetriebs mit Hilfe einer modell-prädiktiven Regelung (»model-based predictive control – MPC«). Die Ansätze sind vielfältig, allen Ansätzen ist aber die Verwendung von Prognosenedaten insbesondere für das Wetter und die Nutzung gemein. Aus mathematischer Sicht wird dabei eine Zielfunktion mit veränderlichen Randbedingungen aufgestellt, die mit geeigneten Methoden optimiert wird, wobei ein Optimum entweder für den thermischen Komfort, für den Energieeinsatz oder für eine kombinierte Größe gefunden werden soll.

Jacob [40] verwendet ein generisches Optimierungsverfahren in Verbindung mit einer thermischen Gebäudesimulation, um unter unsicheren Randbedingungen optimale Betriebszeiten der Bauteilaktivierung zu bestimmen. Dabei wird eine Kostenfunktion genutzt, um die beiden Optimierungsziele thermischer Komfort und Energieeinsparung (in Anlehnung an Henze [32]) gewichten und damit gleichzeitig optimieren zu können.

Sourbron [89] stellt ein vergleichbares Konzept für die Bauteilaktivierung auf Basis eines expliziten numerischen Optimierungsverfahrens vor und weist die Anwendbarkeit und den Nutzen an einem Beispielgebäude nach. Verhelst [103] wendet in einem weiteren Schritt modell-prädiktive Verfahren auf die Regelung der Energiebereitstellung durch eine erdgekoppelte Wärmepumpe an. Sturzenegger et al. [90] weisen nach, dass modell-prädiktive Verfahren erfolgreich im täglichen Gebäudetrieb eingesetzt werden können.

6.3 Vergleichende Analyse hydraulischer Anlagen mit Flächentemperiersystemen

Eine detaillierte Analyse der hydraulischen Anlagen in Wärme- und Kälteversorgungskonzepten, die Flächentemperiersysteme (also thermoaktive Bauteilsysteme gemäß Definition in *Kapitel 2.3*, konventionelle Fußboden temperierung oder abgehängte Heiz- und Kühldecken) für die Wärmeübergabe verwenden, ist Grundlage für die Analyse der Betriebsführung in 17 Nichtwohngebäuden, die im

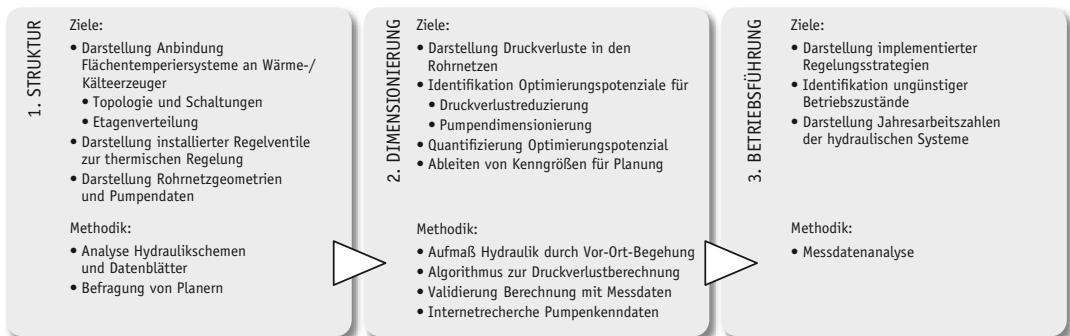


Bild 48: Gliederung der Untersuchung in die drei Teile Struktur, Dimensionierung und Betriebsführung mit Auflistung der jeweiligen Ziele und Methodiken.

Rahmen des EnOB-Programms [23], [25] und des LowEx:MONITOR-Projektes [44] untersucht wurden.

In diesen Gebäuden liegen die Vorlauftemperaturen im Heizbetrieb meist unter 30 °C und im Kühlbetrieb grundsätzlich über 17 °C. Einige Gebäude nutzen eine passive Kühlung über Umweltwärmesenken, wie z. B. oberflächennahe Geothermie, Grundwasser oder Umgebungsluft. Dort, wo Wärmepumpen und Kältemaschinen eingesetzt werden, erreichen diese aufgrund der relativ geringen Temperaturdifferenz zwischen Umweltwärmequelle- bzw. senke und Raum eine hohe Anlageneffizienz.

Dennoch liegen die messtechnisch ermittelten Jahresarbeitszahlen für die Gesamtsysteme aus Wärme- und Kälteerzeugung, -speicherung und -verteilung mit Werten zwischen 1,5 und 8,0 kWh_{therm}/kWh_{end} im Kühlbetrieb und zwischen 1,0 und 2,5 kWh_{therm}/kWh_{end} im Heizbetrieb meist weit unter den aus thermodynamischer Sicht möglichen Arbeitszahlen [107]. Dabei haben Umwälzpumpen in den hydraulischen Primär- und Sekundärkreisen einen signifikanten Anteil am Gesamtendenergiebedarf. In einem Quervergleich von elf Niedrigenergiegebäuden wurde der Anteil der Pumpen am Endenergiebedarf für Heizung, Lüftung und Kühlung mittels Langzeitmessungen über mehrere Betriebsjahre auf 25–45 % ermittelt. Damit kommt der Auslegung und dem Betrieb der hydraulischen Wärme- und Kälteverteilsysteme eine große Bedeutung zu.

Die Gebäude bzw. deren Wärme- und Kälteverteil- und -übergabesysteme werden in drei Schritten analysiert, *Bild 48*:

1. Struktur: Topologie und Struktur der hydraulischen Verteilsysteme bezüglich der Anbindung der Flächentemperiersysteme an die Wärme- und Kälteerzeuger, der installierten Regelventile zur thermischen Regelung sowie der charakteristischen Rohrnetz- und Pumpendaten.

2. **Dimensionierung:** Stationäre Druckverlustberechnungen in den Nennbetriebspunkten der Anlagen sowie Vergleich der Pumpendimensionierungen. Mithilfe dieser Ergebnisse werden Optimierungsmöglichkeiten untersucht und deren Einfluss auf den Endenergiebedarf für das Wärme- und Kälteverteilsystem quantifiziert.
3. **Betriebsführung:** Bewertung des dynamischen Betriebsverhaltens über einen längeren Zeitraum, mindestens ein Betriebsjahr. Es werden die implementierten Strategien zur Regelung der Raumtemperaturen dargestellt sowie auftretende ungünstige Betriebszustände identifiziert.

Abschließend wird die Energieeffizienz der hydraulischen Systeme mittels Jahresarbeitszahlen quantifiziert.

Gebäude- und Anlagenbeschreibung

Die Gebäude werden überwiegend als Bürogebäude genutzt: 12 Bürogebäude, 3 Bürogebäude mit angrenzender Druckerei bzw. Lager, 1 Laborgebäude und 1 Schule. Die Netto-Grundflächen der Gebäude liegen zwischen ca. 1000 und 27 000 m².

Für die Wärme- und Kälteversorgung der untersuchten Gebäude kommen vorrangig Flächentemperiersysteme zum Einsatz, die in den Geschossdecken und Fußböden der Räume integriert sind:

- Thermoaktive Bauteilsysteme (TABS), 14 Anlagen: wasserführende Rohrregister in den Geschossdecken mit Überdeckungen zwischen Rohrbene und Deckenoberfläche von ca. 4 – 20 cm
- Randstreifenelemente (RSE), 3 Anlagen: Als Randstreifenelemente werden in dieser Untersuchung Heiz- und Kühldecken bezeichnet, welche im fassadennahen Deckenbereich installiert sind.
- Fußbodentemperierung (FBT), 11 Anlagen: Die Fußbodentemperierungen sind in den untersuchten Gebäuden in bestimmten Gebäudebereichen meist zusätzlich zu TABS installiert.
- Abgehängte Heiz- und Kühldeckenpaneelle (DPE), 8 Anlagen: in eine Unterkonstruktion integrierte Rohrregister, befestigt an den Geschossdecken.

Die untersuchten Gebäude nutzen Umweltwärmequellen und -senken wie z. B. oberflächennahes Erdreich, Grundwasser oder Abwärme für die Heizung und Kühlung der Gebäude. Erdwärmesonden, Energiepfähle und Grundwasser-/Wasser-Wärmeüberträger werden für eine passive Kühlung der Gebäude verwendet. Aktive Wärme- und Kälteerzeugung erfolgt mithilfe von Wärmepumpen bzw. Kältemaschinen. In 13 der 17 untersuchten Gebäude kommen zusätzlich zu den Wärmepumpen weitere Wärmeerzeuger wie Blockheizkraftwerke, Kessel oder Fernwärmeübergabestationen zum Einsatz. Des Weiteren erfolgt in 13 der 17 untersuchten Gebäude eine Konditionierung der Zuluft. *Tabelle 5* zeigt eine Gebäudebeschreibung mit der Auflistung der verwendeten Technologien zur Wärme- und Kälteversorgung.

Tabelle 5: Zusammenfassung der Gebäudebeschreibung mit den jeweils verwendeten Technologien zur Wärme- und Kälteversorgung. Verwendete Technologie sind in der Tabelle markiert und soweit Informationen vorliegen mit zusätzlichen Kenngrößen gekennzeichnet.

Bezeichnung	Baujahr	Nutzungsart	Nettogrundfläche [m ²]	Wärmequelle	Wärmesenke	Wärmeerzeuger	Wärmepumpe	Übergabesystem	Lüftung	Zuluftkühlung	
										DPE [m ²]	
A	2007	Büro	1 800	23 ES	23 ES		64/87	1 800	-	200	
B	2008	Büro	2 000	10 ES	EDV 10 ES		68	2 250	250		
C	2008	Büro	3 313	12 ES	DB 12 ES		75/60	1 091			
D	2000	2008	4 131	19 ES	DB 19 ES	NK	122/110		4 131		
E	1978	2005	950	PW	12 ES		32,6	240		463	
F	2002	Büro	6 911	EDV	40 ES			5 000		65	
G	2003	Büro	13 822	5 ES	5 ES				100		
H	2004	Schule	10 650				240	5 056		70	
I	2005	Büro	4 730	99 EP	99 EP		167/46	1 913	620		
J	2001	Büro	1 347					790	775	73	
K	2009	Büro	48 ES	48 ES			322,5/270				
L		Büro	1 609	DB			75,8/61,6				
M	2007	Büro	4 878	134 EP	DB	134 EP		180/160		75	
N	2006	Büro/ Lager	870	EK		EK			22,5		
O	74/11	2011	6 352		AW						
P	2007	Büro	7 190	12 ES	12 ES		400				
Q	2009	Büro	27 181	DB	30 ES				84,5	4 884	
Betonkerntemperierung (BKT), Randstreichenelemente (RSE), Fußboden temperierung (FBT), abgehängte Heiz-/Kühldeckenpaneelle (DPE), Erdwärmesonden (ES), Energiepähle (EP), Erdkollektor (EK), Dualer Betrieb Wärmepumpe (Wärmeauskopplung bei Kälteerzeugung) (DB), Abwärmemutzung aus Serverraum (EDV), Prozessabwärme (PW), Nahkälte-Verbundnetz (NK)											

Für die Gebäude stehen Unterlagen aus den Planungsphasen und der Inbetriebnahme der Gebäude zur Verfügung. Es werden Hydraulikschemen, Revisionspläne und – soweit vorhanden – Berechnungen zur Auslegung der Hydraulik und der Wärmeübergabesysteme verwendet. Mittels Vor-Ort-Begehungen wurden detaillierte Aufmaße der hydraulischen Verteilsysteme zur Dokumentation von Pumpen- und Ventiltypen sowie geometrischer Rohrnetzgrößen durchgeführt. Zusätzlich stehen für die meisten Gebäude detaillierte Langzeitmessungen über mehrere Betriebsjahre mit Messdaten in hoher zeitlicher Auflösung für Förderhöhen, elektrische Leistungsaufnahmen der Umwälzpumpen, geförderte Volumenströme, Vor- und Rücklauftemperaturen sowie Raumtemperaturen zur Verfügung [49], [50], [107]. In 14 dieser 17 Gebäude ist die Datenlage so gut, dass eine vollständige, vergleichende Analyse möglich ist.

6.3.1 Struktur Clustering und Klassifizierung der hydraulischen Systeme

Die hydraulischen Systeme können in Bezug auf deren hydraulische Topologie, die Schaltungen mit deren Regelkonzept, die Anbindungstopologie der Flächentemperiersysteme an das Verteilsystem, das Rohrnetz und die Umwälzpumpen klassifiziert werden.

Hydraulische Topologie

Die hydraulischen Verteilsysteme der Gebäude werden nach der Art der Anbindung der einzelnen thermischen Zonen des Gebäudes an die Wärme- und Kälteerzeuger bzw. den Hauptverteiler der Anlagen klassifiziert. Als thermische Zone wird hier ein mit Flächentemperiersystem versorger Gebäudeteil bezeichnet, für welchen die jeweilige Vorlauftemperatur individuell eingestellt werden kann. *Bild 49* zeigt schematisch die Topologievarianten zur Versorgung von zwei thermischen Zonen. Die Art der Topologie entscheidet über die Flexibilität der Wärme- und Kälteversorgung:

- Die Anzahl der Verteilerleitungen legt fest, ob eine gleichzeitige Wärme- und Kälteversorgung unterschiedlicher Zonen möglich ist. Bei zwei Verteilerleitungen muss in der Betriebsführung zwischen Zeiten der Wärme- und Kälteversorgung (oft als Change-Over-Betrieb bezeichnet) unterschieden werden, bei drei und vier Verteilerleitungen ist eine gleichzeitige Wärme- und Kälteversorgung unterschiedlicher thermischer Zonen möglich.
- Die Umsetzung mit gemeinsamen oder separaten Rücklaufleitungen legt fest, ob dezentrale Zonen-Mischventile aus den jeweils eigenen thermischen Zonen Rücklaufwasser beimischen können oder die gemischte Rücklauftemperatur aus allen thermischen Zonen verwenden. Separate Rücklaufleitungen ermöglichen mehr Flexibilität bei der zonenweisen Einstellung vordefinierter Vorlauftemperaturen.

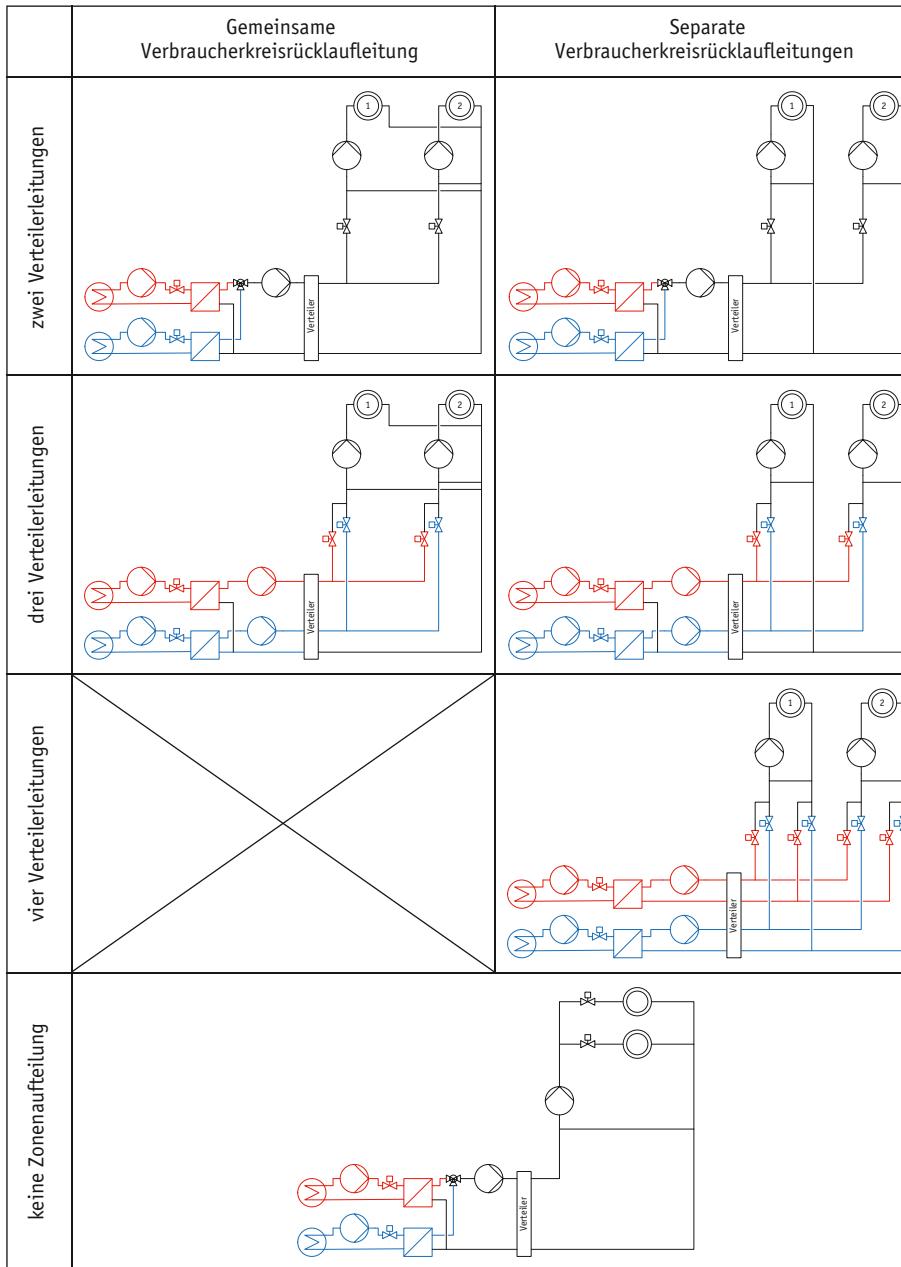


Bild 49: Schematische Darstellung der hydraulischen Topologievarianten zur Anbindung der Flächentemperiersysteme an die Wärme- und Kälteerzeuger, nach [94]. Hydraulikschemata beispielhaft mit zwei parallel versorgten thermischen Zonen 1 und 2. Verteiler bezeichnet den zentralen Verteiler bzw. Sammler des jeweiligen Flächentemperiersystems. In Rot bzw. Blau schematisch dargestellt sind die Wärme- bzw. Kälteerzeuger.

Beispielsweise wäre bei der Topologie mit zwei Verteilerleitungen und gemeinsamer Rücklaufleitung die minimal mögliche Vorlauftemperatur der Zonen auf die niedrigste auftretende Rücklauftemperatur der Zonen begrenzt. Die Topologie mit vier Verteilerleitungen und separater Rücklaufleitung bietet die höchste Flexibilität, ist allerdings auch mit den höchsten Investitionen für die Umsetzung verbunden.

Nur in drei der untersuchten Anlagen ist eine zonenweise Einstellung der Vorlauftemperatur möglich:

- Die Gebäude H und I besitzen zwei Verteilerleitungen und jeweils separate Zonenrücklaufleitungen. Dadurch können die unterschiedlichen thermischen Zonen der Gebäude nicht gleichzeitig geheizt und gekühlt werden, eine individuelle Regelung der Vorlauftemperaturen der unterschiedlichen thermischen Zonen ist jedoch uneingeschränkt möglich.
- Das Gebäude D ist mit der aufwendigsten Topologie mit vier Verteilerleitungen und separaten Zonenrücklaufleitungen ausgestattet und bietet damit die höchste Flexibilität sowohl zur gleichzeitigen Heizung und Kühlung unterschiedlicher thermischer Zonen als auch zur individuellen Vorlauftemperaturregelung.
- In allen anderen Anlagen werden alle Flächentemperiersysteme in den Gebäuden zu gleichen Zeiten jeweils mit der gleichen Vorlauftemperatur versorgt. Eine Aufteilung der Gebäude in thermische Zonen mit der Möglichkeit zur individuellen Vorlauftemperatureinstellung erfolgte nicht.

Darüber hinaus ist zu erkennen, dass für die unterschiedlichen Arten von Flächentemperiersystemen die jeweils gleichen hydraulischen Topologien in den Gebäuden verwendet werden. Trotz der unterschiedlichen Anforderungen an die Regelung (siehe *Kapitel 6.1*) werden also sowohl träge Übergabesysteme (hier: BKT) als auch schnell reagierende Übergabesysteme (hier: RSE, FBT und DPE) mit dem gleichen Anlagenkonzept bedient, ohne die spezifischen Vorteile der einzelnen Übergabarten zu nutzen.

Hydraulische Schaltungen und Regelung

Die Klassifizierung der hydraulischen Schaltungen erfolgt danach, ob eine Hauptpumpe (im Erzeugerkreis) verwendet wird und wie die Druckverhältnisse am Verteiler sind, d. h. ob der Verteiler/Sammler differenzdruckbehaftet oder drucklos ist. Hier stellt der Verteiler die Grenze zwischen Erzeugerkreis und Verbraucherkreis dar. Damit erfolgt die Zuordnung der Verbraucherkreise in den einzelnen Gebäuden entsprechend den hydraulischen Verschaltungstypen.

Bild 50 zeigt, dass bei den meisten untersuchten Gebäuden die Einbindung der Flächentemperiersysteme in Beimischschaltung mit Hauptpumpe und differenzdrucklosem Verteiler erfolgt. Im Gebäude G wird ebenfalls eine Beimischschaltung verwendet, allerdings ohne Hauptpumpe, da es sich hier um einen vergleichsweise kleinen Verbraucherkreis mit einer Fußbodentemperierung (lediglich im Foyer des

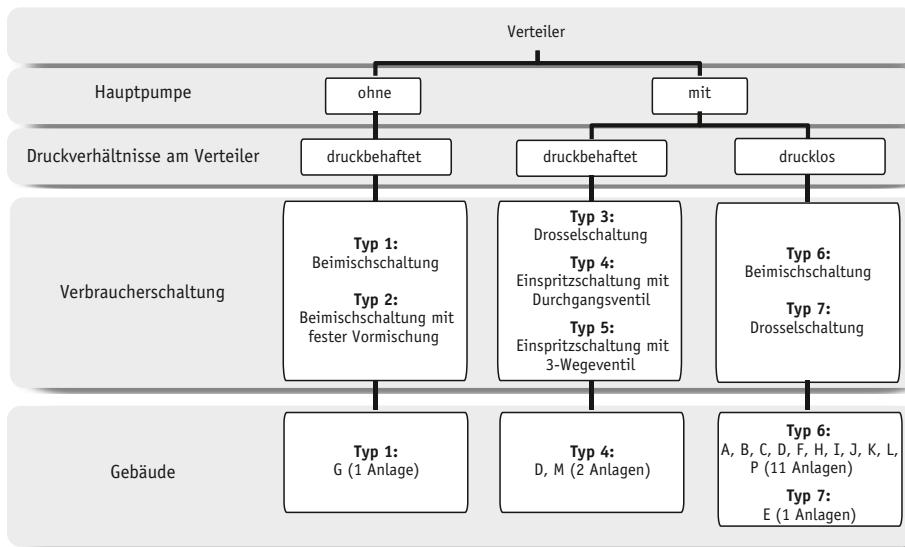


Bild 50: Klassifizierung der hydraulischen Anlagen entsprechend der verwendeten hydraulischen Schaltungen für die Flächentemperiersysteme

Gebäudes) handelt. Im Gebäude D wird eine Einspritzschaltung mit Durchgangsventil verwendet, wenn die Kälteversorgung über das lokale Kälteverbundnetz erfolgt. Bei der Kälteversorgung über die Kältemaschine bzw. das Erdreich sind die Flächentemperiersysteme ebenfalls als Beimischschaltung eingebunden. Das Gebäude E verfügt über abgehängte Heiz- und Kühldecken, die eine Drosselschaltung mit Thermostatventilen zur Regelung des Volumenstroms verwenden.

Die Art der hydraulischen Schaltung hat Einfluss darauf, welche Regelgrößen zentral und dezentral zur Verfügung stehen, d. h. wo sich im hydraulischen System die Pumpen, Beimischventile und Drosselventile befinden. In *Tabelle 6* ist zusammengefasst, welche Möglichkeiten in den einzelnen Gebäuden zur Volumenstrom- und Vorlauftemperaturregelung zur Verfügung stehen.

Volumenstromregelung: Es ist zu erkennen, dass vor allem die schnell reagierenden Flächentemperiersysteme wie abgehängte Heiz- und Kühldecken sowie Randstreifenelemente über eine raumweise Regelungsmöglichkeit des Volumenstroms verfügen. Die Einbindung der trügen TABS erfolgt meist ohne dezentrale Regelungsmöglichkeit für den Volumenstrom in den einzelnen thermischen Zonen bzw. einzelnen Räumen. In sechs der elf detailliert untersuchten Gebäude mit TABS kann der Volumenstrom nur zentral für das gesamte Gebäude über die Pumpendrehzahl geregelt werden.

Vorlauftemperaturregelung: Die Regelung der Vorlauftemperatur ist in den meisten Gebäuden sowohl für die Systeme mit Betonkerntemperierung als auch

Tabelle 6: Zur Verfügung stehende Regelgrößen zur zentralen und dezentralen Volumenstrom- und Vorlauftemperaturregelung in den Gebäuden; Betonkerntemperierung grün und Randstreifenelemente/Deckenpanelee/Fußboden temperierung blau markiert

Regelgröße	Volumenstrom			Vorlauftemperatur			
	Gebäude	Zentral	Zone	Raum	Zentral	Zone	Raum
A	BKT			DPE	BKT	DPE	
B	BKT			RSE	BKT	RSE	
C				BKT	BKT		
D			DPE	DPE			DPE
E				DPE	DPE		
F	BKT			DPE	BKT	DPE	
G				FBT	FBT		
H			BKT				BKT
I			BKT	RSE			BKT RSE
J				BKT FBT	BKT	FBT	
K	BKT				BKT		
L	BKT			RSE	BKT	RSE	
M				FBT	FBT		
N	BKT			RSE, DPE	BKT	RSE, DPE	
O				BKT	BKT		

Thermoaktive Bauteilsysteme (BKT), Randstreifenelemente (RSE), Fußboden temperierung (FBT), abgehängte Heiz-/Kühldeckenpanelee (DPE)

für Randstreifenelemente und abgehängte Kühldecken nur zentral für das gesamte Gebäude möglich. Lediglich in 2 TABS-Systemen (H und I) und 2 DPE- bzw. RSE-Systemen (D, I) erfolgt eine zonenweise Regelung der Vorlauftemperatur. Eine raumweise Regelungsmöglichkeit besteht in keinem der untersuchten Gebäude.

Topologie der Anbindung

Hydraulische Systeme können auch anhand der Topologie der Etagenverteilung, d. h. der Anbindung der einzelnen Segmente bzw. Rohrregister der Flächentemperiersysteme an den Etagenverteilern, klassifiziert werden. Hierbei treten vier unterschiedliche Varianten der Etagenverteilung auf:

- **Typ 1:** Die einzelnen Segmente der Flächentemperiersysteme werden von der Anbindungsleitung der jeweiligen Etage über T-Stücke angebunden.
- **Typ 2:** Zusätzlich zum Etagenverteilern werden dezentrale Verteilerbalken verwendet, von welchen wiederum die einzelnen Segmente versorgt werden.

- **Typ 3:** Die einzelnen Segmente werden ähnlich zu Typ 1 versorgt, jedoch mit einer zusätzlichen Hierarchiestufe für die Versorgung der einzelnen Segmente mit weiteren T-Stücken. Außerdem sind hier die einzelnen Segmente in Tichelmannschaltung zur Realisierung des hydraulischen Abgleichs ausgeführt.
- **Typ 4:** Die einzelnen Segmente werden direkt vom Etagenverteiler versorgt.

Die Wahl der geeigneten Topologie ist für jedes Gebäude individuell. Zum einen hängt es von der Größe der Etage bzw. der Anzahl der parallel zu verlegenden Segmente ab. Aufgrund der Begrenzung der maximal möglichen Abgänge vom Etagenverteiler ist Typ 4 nur für wenige parallele Segmente innerhalb einer Etage geeignet. Zum anderen erfordert die Verwendung von dezentralen Verteilerbalken wie in Typ 2 höhere Investitionen. Gleichzeitig bietet Typ 2 aber den Vorteil, Regelventile beispielsweise zur Volumenstromdrosselung oder zur Absperrung vor den Verteilerbalken zu installieren.

Rohrnetzdimensionierung

Tabelle 7 zeigt geometrische Kenngrößen der Gesamtrohrnetze in den Sekundärkreisen und der einzelnen Flächentemperiersysteme (nur für TABS, inkl. Randstreifenelemente). Die verwendeten Rohrlängen für ein Segment unterscheiden sich zwischen den Gebäuden sehr stark. Die Längen liegen zwischen 72 und 218 m in den hydraulisch ungünstigsten Teilsträngen der Gebäude. Die Untersuchungen zeigen, dass in den Gebäuden teilweise Segmente der TABS, welche laut Hersteller parallel verlegt werden sollen, in Reihe geschaltet sind. Für die Rohrinnendurchmesser werden in den TABS-Kreisen meist 16 mm gewählt. Für Randstreifenelemente werden Rohre mit kleineren Innendurchmessern zwischen 9,4 und 12 mm eingesetzt. Die Verlegung der Rohre in den Segmenten erfolgt meist in Mäanderform. Der Verlegeabstand beträgt für TABS-Kreise meist 150 mm. In Randstreifenelementen werden engere Verlegeabstände von 75 mm bzw. 100 mm gewählt.

TABS-Kreise werden typischerweise im Nennbetriebspunkt für Spreizungen von ca. 2 bis 3 K zwischen Vor- und Rücklauf ausgelegt. Die verlegte Rohrlänge hat damit einen Einfluss auf den Nennvolumenstrom, mit steigenden Nennvolumenströmen bei steigender Rohrlänge. Um die Druckgefälle gering zu halten, müssten größere Rohrdurchmesser gewählt werden. In den untersuchten Gebäuden kann jedoch kein Zusammenhang zwischen der Wahl der Rohrinnendurchmesser und der Nennvolumenströme erkannt werden. Dies erhöht die Druckverluste in den Verbraucherkreisen deutlich.

Die Anzahl der Verteilkreise für die jeweiligen Übergabesysteme spiegelt die Anzahl der vorhandenen Pumpen und damit unabhängigen hydraulischen Verteilsysteme im Gebäude wider. Nur in drei der untersuchten Gebäude wird die hydraulische Verteilung in thermische Zonen geteilt, in denen eine individuelle Einstellung der Vorlauftemperatur möglich ist.

Tabelle 7: Zusammenfassung der geometrischen Kenngrößen der Rohrnetze sowie der Flächentemperiersysteme (nur BKT und Randstreifenelemente). Die Unterscheidung zwischen Heiz- und Kühlfall ist mit (*) und nicht vorhandene Informationen sind mit (#) gekennzeichnet.

Bezeichnung	geometrische Größen Verteilnetz						geometrische Größen BKT und RSE			Verlegeart	
	Anzahl Ver- teilkreise nach VDI 2073			Länge Anbindung ¹ ungünstigster Teil- strang [m]			d _i [mm] ²	a [mm] ³			
	TABS	RSE/DPE	FBT	BKT	RSE/DPE	FBT					
A	1	1	1	77	70	#	113	13	150	Mäander	
B	1	1	-	56	105	-	191	16	150	#	
C	1	-	-	123/56*	-	-	71/91*	13/9,4	150/75	Mäander	
D	-	3	-	-	290	-	-	-	-	-	
E	1	1	-	#	134	-	-	-	-	-	
F	1	1	-	264	-	-	80	15,4	150–200	Spirale	
G	-	-	1	-	-	126	-	-	-	-	
H	4	-	2	111	-	#	209	16	150	Mäander	
I	2	2	-	211	211	-	72	16/12	150/100	Mäander	
J	1	-	1	31	-	21	218	15,4	150	Mäander	
L	1	1	-	#	#	-	#	#	#	Mäander	

¹ Anbindung vom Hauptverteiler bis zum Übergabesystem,
² Rohrinnendurchmesser der BKT-Rohre (d_i),
³ Verlegeabstand der BKT-Rohre (a)

Dimensionierung der Umwälzpumpen

In Tabelle 8 sind die Kenndaten der verwendeten Umwälzpumpen in den hydraulischen Kreisen der Gebäude jeweils für die unterschiedlichen Flächentemperiersysteme aufgelistet. Fast alle Pumpen sind in der Drehzahl regelbar, entweder nach Konstant- bzw. Proportionaldruck oder zumindest in manuell einstellbaren Stufen. Ebenfalls sind die Bereiche der elektrischen Leistungsaufnahme (minimale Leistungsaufnahme und im Nennbetriebspunkt) sowie die Pumpenwirkungsgrade im Nennbetriebspunkt angegeben.

Die maximale elektrische Leistungsaufnahme bezogen auf die wärmeübertragende Fläche der Flächentemperiersysteme liegt zwischen 0,09 und 3,7 W/m²

Tabelle 8: Kenndaten der installierten Umwälzpumpen in den jeweiligen Verbraucherkreisen. Aufgrund fehlender Information nicht ermittelbare Werte sind mit (#) gekennzeichnet.

Ge-bäude	Verteil-kreis	wärme-über-tragende Fläche [m ²]	Möglichkeiten der Pumpenregelung	Leis-tung min. (el.) [W]	Leistung im Nenn-betriebspunkt (el.) [W]	Wirkungsgrad im Nenn-betriebspunkt Heiz-/Kühlfall [%]	Nennleistung (el.) / wärme-übertragende Fläche [W/m ²]
A	TABS	1800	p-const., p-prop.	25	430	52/52	0,24
	DPE	200	p-const., p-prop.	25	430	30/45	2,15
B	TABS	2000	p-const., p-prop.	10	180	54/54	0,09
	RSE	500	p-const., p-prop.	10	180	55/55	0,36
C	TABS Heiz	1091	p-const., p-prop.	25	470	58/-	0,43
	TABS Kühl	1091	p-const., p-prop.	40	1550	-/46	1,42
D	DPE Mittelbau	540	p-const., p-prop.	#	700	-/51	1,30
	DPE West	1070	p-const., p-prop.	#	1500	66/66	1,40
	DPE Ost	660	p-const., p-prop.	#	1100	46/46	1,67
E	TABS	240	p-const., p-prop.	12	310	#	1,29
	DPE	260	p-const., p-prop.	25	470	-/57	1,81
F	TABS	5 000	nach Volumenstrom	1 700	3 000	65/65	0,60
	DPE	#	p-const.	12	310	#	#
G	FBT	100	ungeregelt	-	370	-/28	3,70
H	TABS Verwaltung	1056	3-stufig	1 240	1 685	58/58	1,60
	TABS Ost	1638	3-stufig	1 240	1 685	43/43	1,03
	TABS Süd	797	3-stufig	1 240	1 685	37/37	2,11
	TABS West	1575	3-stufig	1 240	1 685	49/49	1,07
I	TABS Nord	978	p-const., p-prop.	35	900	56/56	0,92
	TABS Süd	935	p-const., p-prop.	35	900	57/58	0,96
J	TABS	790	p-const., p-prop.	25	430	-/40	0,54
	FBT	775	p-const., p-prop.	25	430	39/-	0,55
L	TABS	#	p-const., p-prop.	25	430	#	#
	RSE	#	p-const., p-prop.	9	130	#	#
M	FBT	#	p-const., p-prop.	25	430	#	#

(Mittelwert: $1,2 \text{ W/m}^2$) und zeigt damit eine sehr unterschiedliche Dimensionierung der Pumpen in den untersuchten hydraulischen Kreisen.

Bei den TABS-Systemen mit dem größten Stichprobenumfang von 14 untersuchten Verteilsystemen kann die sehr unterschiedliche Pumpendimensionierung analysiert werden: Besonders in den vier Systemen des Gebäudes H ist zu erkennen, dass Pumpen des gleichen Typs für die unterschiedlich großen wärmeübertragenden Flächen verwendet werden (ca. 800 m^2 im Südkreis und ca. 1600 m^2 im Ostkreis des Gebäudes), wodurch sich Diskrepanzen bei der spezifischen Leistungsaufnahme um den Faktor 2 ergeben ($2,11 \text{ W/m}^2$ im Süd- und $1,03 \text{ W/m}^2$ im Ostkreis).

Zwischenfazit: Struktur der hydraulischen Systeme

Die Analyse der Strukturen hydraulischer Verteilsysteme in Gebäudeheiz- und -kühl-anlagen, die Flächentemperiersysteme für die Wärmeübergabe an den Raum verwenden, kann wie folgt zusammengefasst werden:

- **Hydraulische Topologie:** In 10 von 13 Gebäuden wird eine hydraulische Topologie verwendet, bei welcher keine individuelle Einstellmöglichkeiten der jeweiligen Vorlauftemperaturen für unterschiedliche Gebäudezonen bestehen.
- **Hydraulische Schaltungen:** Die untersuchten Gebäude verwenden fast ausschließlich Beimischschaltungen mit Hauptpumpe und differenzdrucklosem Verteiler zur Anbindung der Flächentemperiersysteme an die Wärme- und Kälteerzeuger.
- **Stellgrößen für die Komfortregelung:** Bei vergleichsweise schnell reagierenden Flächentemperiersystemen wie Randstreifenelementen, Fußboden temperierung und abgehängten Heiz-/Kühldeckenpaneelen stehen zonen- bzw. raumweise Drosselventile zur Verfügung. Träge Flächentemperiersysteme wie thermoaktive Bauteilsysteme werden sowohl vollständig ohne als auch mit zonen- bzw. raumweisen Drosselventilen ausgeführt.
- **Topologie der Etagenverteilung:** Es wurden vier unterschiedliche Varianten der Etagentopologie zur Anbindung der Flächentemperiersysteme an die jeweiligen Etagenverteilern dargestellt. Jede der vier Topologien wurde dabei in mindestens einem der Gebäude verwendet. Die Wahl der geeigneten Topologie hängt von den individuellen Randbedingungen in den Gebäuden ab.
- **Rohrnetzdimensionierung:** Die TABS-Rohrlängen im hydraulisch ungünstigsten Kreis weisen starke Schwankungen zwischen 71 und 218 m auf.
- **Dimensionierung der Umwälzpumpen:** Die Umwälzpumpen sind mit elektrischen Leistungsaufnahmen zwischen $0,09$ und $3,7 \text{ W}_{\text{el}}/\text{m}^2$ Übertragungsfläche sehr unterschiedlich dimensioniert.

Der Gebäudequervergleich zeigt, dass starke Variationen bei der Umsetzung der hydraulischen Systeme mit Flächentemperiersystemen bestehen. Besonders für Systeme mit thermoaktiven Bauteilsystemen ist keine allgemeingültige Umsetzung erkennbar. Die Strukturen der hydraulischen Verteilsysteme haben einen starken

Einfluss auf den Energiebedarf für die Fluidumwälzung sowie auf die Komfortregelung.

6.3.2 Dimensionierung der hydraulischen Anlagen

Auf Basis der netztopologischen Analyse in 17 Nichtwohngebäuden wird die Dimensionierung der hydraulischen Anlagen evaluiert:

- Zunächst werden die Druckgefälle in den Flächentemperiersystemen und der Anbindung an die Wärme- und Kälteerzeugung berechnet und dargestellt.
- Anschließend werden die Dimensionen der installierten Umwälzpumpen den Ergebnissen der Druckverlustberechnungen gegenübergestellt.
- Aus den Ergebnissen werden mögliche Optimierungsmaßnahmen bezüglich der Rohrnetz- und Pumpendimensionierung abgeleitet und diskutiert. Der Einfluss der Optimierungsmaßnahmen auf den Energiebedarf der Umwälzpumpen in deren Nennbetriebspunkten wird quantitativ bewertet.

Stationäre Druckverlustberechnung

Die Druckverluste werden getrennt für die einzelnen Netzabschnitte bzw. Komponenten berechnet, um Optimierungspotenziale in den jeweiligen Abschnitten abschätzen zu können:

- **Flächentemperiersysteme:** Druckverluste in den Rohrleitungen der verwendeten Wärme- und Kälteübergabesysteme wie thermoaktive Bauteilsysteme (TABS), Fußbodentemperierung (FBT), Randstreifenelemente (RSE) und abgehängte Heiz- und Kühldeckenpaneele (DPE)
- **Anbindungsleitungen:** Druckverluste in den Rohrleitungen zur Anbindung der Flächentemperiersysteme an die zentralen Wärme- und Kälteverteiler in den Heiz- bzw. Kältezentralen der untersuchten Gebäude. Dazu gehören nach VDI-Richtlinie 2073 [98] Verteilleitungen (vom zentralen Verteiler bis Steigleitungen), Strangleitungen (z. B. Steigleitungen), Geschossleitungen (z. B. Etagenverteilleitungen) und Etagenanbindungsleitungen (von Etagenverteilleitung zum Wärmeübergabesystem).
- **Formstücke und Einbauten:** Druckverluste durch Krümmer, Kniestücke, Rohrverzweigungen und -vereinigungen, Rohreinläufe, Verteiler und Sammler sowie Abgleich- und Regelventile.

In Vor-Ort-Begehungen wurden die hydraulischen Anlagen detailliert aufgenommen und teilweise vermessen. Die Druckverluste werden für jeden einzelnen Strang über

$$\Delta p[\text{Pa}] = \left(\lambda \cdot \frac{l[\text{m}]}{d[\text{m}]} + \sum \zeta_i \right) \cdot \rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \frac{v[\text{m/s}]^2}{2} \quad (16)$$

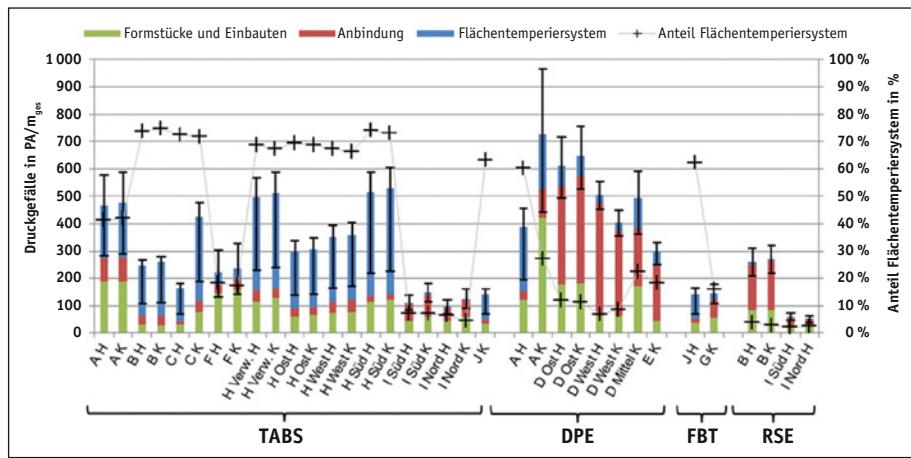


Bild 51: Berechnete Gesamtdruckgefälle der hydraulischen Kreise bezogen auf die Länge des jeweils ungünstigsten Teilstrangs [$\text{Pa}/\text{m}_{\text{ges}}$]. Unsicherheiten der Berechnungen sind mit den entsprechenden Fehlerbalken gekennzeichnet. Zusätzlich Angabe der prozentualen Anteile der Flächentemperiersysteme am Gesamtdruckgefälle.

bestimmt. Die Dichte ρ für das Wärmeträgermedium Wasser wird hierbei als konstant angenommen. Die Rohrlängen l und Rohrinnendurchmesser d werden aus dem Vor-Ort-Aufmaß verwendet. Die Fließgeschwindigkeit v ergibt sich aus dem Volumenstrom und dem Rohrinnendurchmesser d . Die Rohreibungszahl λ und die Widerstandsbeiwerte ζ für die jeweiligen Einbauten werden über empirische Gleichungen und Tabellenwerten ermittelt. In den Berechnungen für die jeweiligen Anlagen werden die Nennvolumenströme aus Planungsunterlagen bzw. gemessene Werte im Nennbetriebspunkt der Anlagen verwendet.

Die Unsicherheiten bei der Bestimmung der druckverlustrelevanten Parameter (insbesondere Strömungsform, Nennweiten, Rohrlängen und Stoffwerte) wird mittels Fehlerfortpflanzung quantifiziert. Die verhältnismäßig hohen relativen Fehler ergeben sich hauptsächlich aus den Annahmen für den Übergangsbereich zwischen laminarer und turbulenter Strömung. Es gilt für Flächentemperiersysteme eine Abweichung von $-76,3\% / +7,1\%$, für Anbindungsleitungen von $\pm 7,1\%$ und für Formstücke und Einbauten von $\pm 57,1\%$.

Gesamtdruckgefälle: In Bild 51 sind die Gesamtdruckgefälle der jeweils hydraulisch ungünstigsten Teilstränge der Anlagen dargestellt. Die Druckverluste wurden für insgesamt 35 hydraulische Kreise berechnet. Für den Anlagenquervergleich werden die berechneten Druckverluste dabei mit der Länge des jeweils hydraulisch ungünstigsten Teilstrangs in der Einheit [Pa/m] normiert. Das Gesamtdruckgefälle wird aufgeteilt für Flächentemperiersysteme, Anbindungsleitungen sowie Formstücke und Einbauten. Für die Abgleichventile wird angenommen, dass diese in den hydraulisch ungünstigsten Teilsträngen vollständig geöffnet sind.

Der Vergleich aller untersuchten Anlagen zeigt, dass deutliche Unterschiede in der Auslegung der Anlagen bestehen. Die Gesamtdruckgefälle liegen zwischen 52 und 726 Pa/m. Die Unterschiede treten dabei gleichermaßen zwischen unterschiedlichen Arten von Flächentemperiersystemen und unterschiedlichen Netztopologien auf:

- Beispielsweise dominieren in den hydraulischen Kreisen des Gebäudes D die Anbindungsleitungen mit 64% am Gesamtdruckgefälle, wobei die Anteile der Flächentemperiersysteme zusammen mit Formstücken und Einbauten nur bei 36% liegen.
- Im Gegensatz dazu verursachen die Anbindungsleitungen in den Kreisen des Gebäudes A mit 9 bzw. 15% nur einen geringen Anteil am Gesamtdruckgefälle im Vergleich zu den Flächentemperiersystemen und Formstücke/Einbauten mit 91 bzw. 85%.
- In Anlagenkonzepten mit TABS liegt der Anteil der TABS am Gesamtdruckgefälle bei durchschnittlich 50%.

Flächentemperiersysteme: Die VDI-Richtlinie 2073 [98] empfiehlt Druckgefälle für Kunststoffrohre für Anbindungs- und Geschossleitungen zwischen 149 und 166 Pa/m. Spezielle Werte für Flächentemperiersysteme werden nicht vorgegeben.

In einzelnen Anlagen liegen die berechneten Druckverluste mit 14 Pa/m_{WÜbergabe} deutlich unter dem empfohlenen Druckgefälle. In den meisten Gebäuden wird der empfohlene Wert aber um das Zwei- bis Vierfache überschritten. In einer Anlage wird ein Extremwert von 900 Pa/m_{WÜbergabe} im Kühlbetrieb erreicht.

Die Druckgefälle in den Flächentemperiersystemen werden hauptsächlich durch die verlegte Rohrlänge, den Nennvolumenstrom pro Segment und den Innendurchmesser der Rohre bestimmt. In den hydraulisch ungünstigsten Kreisen sind die TABS-Rohrlängen mit ca. 200 m fast dreimal so lang wie in den günstigsten Kreisen. Gleichzeitig erfordern die längeren Leitungen höhere Nennvolumenströme, um über die gesamte TABS-Rohrlänge einen Temperaturunterschied zwischen Fluid und Raum und damit eine ausreichende Wärmeübertragung zu gewährleisten. Die Nennvolumenströme pro TABS-Segment liegen im ungünstigsten Fall zwischen 380 und 460 l/h und im günstigsten Fall zwischen 80 und 150 l/h. Hohe Druckgefälle werden auch durch die Verwendung von vergleichsweise kleinen Rohrinnendurchmessern im ungünstigsten Fall von 13 bzw. 9,4 mm gegenüber 15,4 bzw. 16 mm für die TABS in den anderen Gebäuden verursacht. Bei vergleichbaren Rohrlängen und Nennvolumenströmen ist das Druckgefälle der TABS im Gebäude C mit 350 Pa/m_{WÜbergabe} deutlich größer als im Gebäude I mit 26 Pa/m_{WÜbergabe}.

Ein besonders niedriges Druckgefälle weist Gebäude I aus. Hier sind die TABS in Tichelmannschaltung verlegt. Für die Anbindung der einzelnen TABS-Segmente werden keine Verteilerbalken, sondern jeweils Abgänge über T-Stücke von der Etagenverteilleitung verwendet. Dadurch sind die einzelnen TABS-Segmente hydraulisch

abgeglichen. Durch die kurzen Rohrlängen können bei einer Auslegung auf Temperaturdifferenzen von 2–3 K zwischen Vor- und Rücklauf wiederum mit ca. 91 bis 117 l/h pro TABS-Segment vergleichsweise geringe Nennvolumenströme eingestellt werden.

Anbindung: Die VDI-Richtlinie 2073 empfiehlt ein Druckgefälle von 82 bis 220 Pa/m_{Anbindung}. Die Druckgefälle in den Anbindungsleitungen der untersuchten hydraulischen Kreise liegen im empfohlenen Bereich der VDI 2073 oder darunter. Lediglich die hydraulischen Kreise in den Gebäuden D und E mit Werten zwischen 281 und 440 Pa/m_{Anbindung} überschreiten die empfohlenen Druckgefälle. In einzelnen Abschnitten dieser Anbindungsleitungen wurden Rohrdurchmesser gewählt, welche für die verwendeten Nennvolumenströme zu gering sind.

Formstücke und Einbauten: Die VDI-Richtlinie 2073 empfiehlt kein Druckgefälle für Formstücke zur Rohrführung und Einbauten wie Abgleichventile, Drosselventile oder 3-Wege-Ventile. Hier werden die Werte auf die Länge der Anbindungsleitungen normiert.

Mit Werten zwischen 25 und 641 Pa/m_{Anbindung} schwankt das Druckgefälle von Anlage zu Anlage sehr stark. In den untersuchten Anlagen sind sehr unterschiedliche Auslegungen z. B. bezüglich der Dimensionierung von Stellarmaturen, wie Abgleichventile und Regelventile, oder der Verwendung von Formstücken zur Rohrführung zu erkennen. Beispielsweise verursacht das Abgleichventil im ungünstigsten Kreis des Gebäudes A im Kühlbetrieb bereits im voll geöffneten Zustand einen Druckverlust von 18 kPa bzw. 95 Pa/m_{Anbindung}. Im Gegensatz dazu ist in den hydraulischen Kreisen des Gebäudes I der hydraulische Abgleich mit einer Tichelmannschaltung sehr günstig ausgeführt, wodurch auf den Einsatz von Drosselventilen zur Realisierung des hydraulischen Abgleichs verzichtet werden kann.

Validierung der Druckverlustberechnung mit Messdaten: Die Validierung der Druckverlustberechnungen wird für 7 hydraulische Kreise in 3 untersuchten Gebäuden aufgezeigt. Hierbei werden die berechneten Druckverluste mit den dokumentierten eingestellten Förderhöhen der installierten Umwälzpumpen verglichen. Die absoluten Abweichungen zwischen berechnetem und gemessenem Betriebspunkt liegen dabei zwischen 2,7 und 38% und im Mittel bei 14%. Die berechneten und gemessenen Betriebspunkte stimmen unter Berücksichtigung der oben dargestellten Fehlertoleranzen der Druckverlustberechnungen gut überein. Das ist ein Hinweis darauf, dass trotz der oben dokumentierten großen Unsicherheiten bei der Druckverlustberechnung, das Druckgefälle in ausreichend guter Näherung bestimmt werden kann.

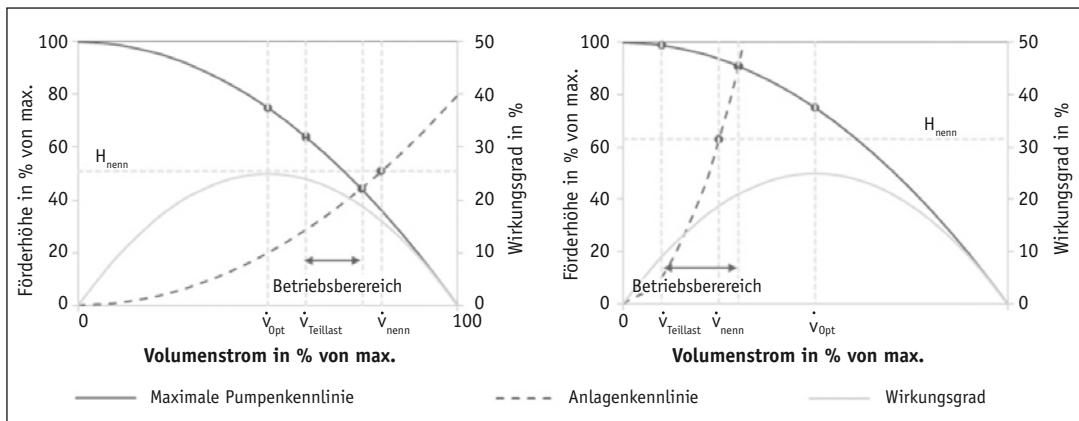


Bild 52: Schematische Darstellung der Betriebspunkte bei einer Unterdimensionierung der Pumpe (links) und einer Überdimensionierung der Pumpe (rechts) und die daraus resultierenden Auswirkungen auf den Wirkungsgrad im Betrieb

Analyse der Pumpendimensionierung

In Anlehnung an die Kennzahl SFP (specific fan power) aus DIN EN 13779 [13] für die Bewertung von Lüftungsanlagen wird hier die Leistungsaufnahme der Pumpen im Auslegungsfall N zu

$$SFP_{hydr} = \frac{P_{el,N}}{\dot{V}_N} \left[\frac{W}{m^3/h} \right] \quad (17)$$

definiert, denn Umwälzpumpen werden für einen Nennbetriebspunkt (Nennförderhöhe und Nennvolumenstrom) ausgelegt. In diesem Betriebspunkt werden in der Regel die höchsten Pumpenwirkungsgrade erreicht. Bei korrekter Pumpenauslegung wird dann gerade der Nennbetriebspunkt bei maximalem Wirkungsgrad erreicht, in Bild 52 mit \dot{V}_{opt} bezeichnet:

- Bild 52 links zeigt schematisch eine Unterdimensionierung der Umwälzpumpe. Der Nennbetriebspunkt der Anlage liegt außerhalb des Pumpenkennfeldes, wodurch im Betrieb der Nennvolumenstrom nicht erreicht werden kann.
- Bild 52 rechts zeigt demgegenüber eine Überdimensionierung der Umwälzpumpe. Hier werden entweder zu hohe Volumenströme gefördert oder durch eine zusätzliche Drosselung (mit entsprechend noch höherem Druckverlust) wird der gewünschte Nennvolumenstrom eingestellt. In beiden Fällen liegt der Betriebsbereich der Pumpe im ungünstigen Wirkungsgradbereich. Bei drehzahlgeregelten Pumpen besteht die Möglichkeit, bereits für den Nennbetriebspunkt die Pumpendrehzahl zu reduzieren.

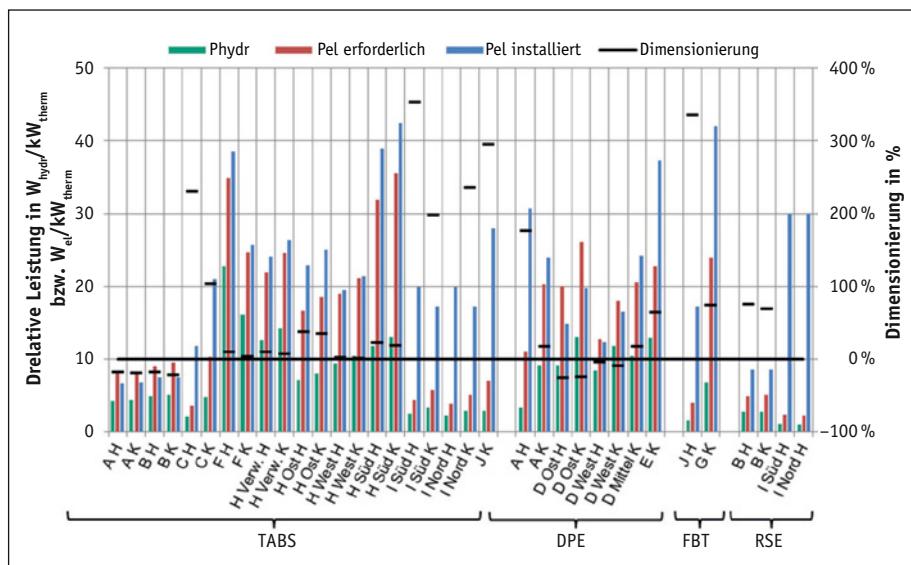


Bild 53 Hydraulische, erforderliche elektrische und installierte elektrische Leistung bezogen auf die thermische Leistung des jeweiligen Wärmeübergabesystems [$W_{\text{hydr}}/\text{kW}_{\text{therm}}$] bzw. [$W_{\text{el}}/\text{kW}_{\text{therm}}$] sowie die prozentuale Über- bzw. Unterdimensionierung der installierten Pumpen

Pumpendimensionierung im Gebäudequervergleich: Im Quervergleich der Umwälzpumpen werden die folgenden Pumpenkenngrößen betrachtet:

- **Hydraulische Leistung:** das Produkt aus den berechneten Druckverlusten und den Nennvolumenströmen für die jeweiligen hydraulischen Kreise
- **Erforderliche elektrische Leistung:** Die Werte ergeben sich aus der hydraulischen Leistung dividiert durch die Wirkungsgrade im Nennbetriebspunkt der Pumpen.
- **Installierte elektrische Leistung:** Die Werte werden aus den Datenblättern der verwendeten Umwälzpumpen für den Nennbetriebspunkt ermittelt.

Für einen sinnvollen Quervergleich der Anlagen werden die jeweiligen Kenngrößen mithilfe der thermischen Nennleistung der jeweiligen Wärmeübergabesysteme normiert.

Bild 53 zeigt die Kenngrößen für die untersuchten Gebäude. Auf der sekundären y-Achse werden die prozentualen Unter- bzw. Überdimensionierungen der Pumpen angegeben. Die Werte ergeben sich aus der Differenz der installierten und erforderlichen elektrischen Leistung bezogen auf den Absolutwert der erforderlichen elektrischen Leistung.

Die Leistungsaufnahmen der Pumpen unterscheiden sich mit erforderlichen elektrischen Leistungsaufnahmen zwischen 2,2 und 35,6 W_{el}/kW_{therm} und installierten elektrischen Leistungsaufnahmen zwischen 6,7 und 42,5 W_{el}/kW_{therm} stark:

- In 21 der insgesamt 35 untersuchten hydraulischen Kreise sind die Umwälzpumpen zwischen 10 und 350 % überdimensioniert. Im Durchschnitt liegt die Überdimensionierung bei 247 %.
- Bei 6 der untersuchten Pumpen sind vergleichsweise geringe Unterdimensionierungen von durchschnittlich -21 % zu verzeichnen.
- Lediglich in 8 der 35 untersuchten hydraulischen Kreise erfolgt eine korrekte Pumpendimensionierung mit Abweichungen unter $\pm 10\%$.

Die VDI 2073 empfiehlt bei der Pumpendimensionierung im Zweifelsfall eine kleinere Pumpenleistung als die durch die Hydraulikberechnung ermittelte zu installieren.

In Gebäuden, in denen über das gleiche Wärmeübergabesystem sowohl geheizt als auch gekühlt wird, werden ebenfalls oftmals dieselben Pumpentypen eingesetzt. Dies ist einerseits zulässig, da die hydraulischen Widerstände in den Verbraucherkreisen abgesehen von den Anbindungsleitungen zwischen den Verteilerbalken in den Heiz- bzw. Kältezentralen zu den jeweiligen Umschaltventilen für den Heiz- bzw. Kühlbetrieb identisch sind. Andererseits werden die Übergabesysteme oft im Heiz- bzw. Kühlbetrieb mit unterschiedlichen Nennvolumenströmen betrieben, so dass auch unterschiedliche Druckverluste entstehen, welche die Pumpenauswahl beeinflussen.

Eine Möglichkeit zur frühzeitigen Erkennung von überdimensionierten Pumpen bereits in der Planungsphase könnte durch einen Ziel- bzw. Grenzwert gelingen: Bei der Planung von hydraulischen Anlagen sollte ein Zielwert zwischen 10 und 20 $W_{el,N}/kW_{therm,N}$ angestrebt werden.

Optimierungsmaßnahmen

Im Folgenden werden die Optimierungsmaßnahmen beschrieben, welche den größten Einfluss zur Reduzierung des Energiebedarfs für die Wärme- und Kälteverteilungssysteme haben:

- Die Auswertungen zeigen, dass die Flächentemperiersysteme zum einen mit sehr langen Rohrlängen verlegt werden (bis über 200 m) und zum anderen mit hohen Nennvolumenströmen zwischen ca. 100 und 450 m^3/h pro Segment betrieben werden. Die Rohrlängen gehen dabei linear und der Volumenstrom quadratisch in die Druckverlustberechnungen ein. Die Anzahl der parallel verlegten Segmente der Flächentemperiersysteme ergeben sich je nach Etagenverteilungstopologie durch die Abgänge an den verwendeten Verteilerbalken bzw. durch die Anzahl der verwendeten T-Stücke von den Etagenverteilleitungen. Werden zusätzliche Parallelschaltungen durch Verteilerbalken mit mehreren Abgängen bzw. durch

zusätzliche T-Stücke realisiert, könnten die verlegten Rohrlängen und die Nennvolumenströme pro Segment reduziert werden.

Beispiel: Im Gebäude B reduziert sich der SFP_{hydr} durch diese Maßnahme (zusammen mit der Verwendung der nächstgrößeren Nennweite für die Anbindungsleitungen) von 31 auf 9,8 $W/(m^3/h)$ im Heizbetrieb und von 32,9 auf 10,2 $W/(m^3/h)$ im Kühlbetrieb.

- TABS-Rohre werden fast ausschließlich mit Innendurchmessern von 16 mm ausgeführt. Eine Anpassung des gewählten Durchmessers an den Nennvolumenstrom oder die verlegte Rohrlänge in den Flächentemperiersystemen ist bei keinem der Gebäude erkennbar. Der Innendurchmesser geht reziprok in die Druckverlustberechnungen zur Rohrströmung ein.

Beispiel: Im Gebäude C reduziert sich der Druckverlust bei einer Vergrößerung des Innendurchmessers von 9,4 auf 16 mm im hydraulisch ungünstigsten Teilstrang um 33 %. Der SFP_{hydr} sinkt dadurch im Heizbetrieb von 12,4 auf 8,3 $W/(m^3/h)$ und im Kühlbetrieb von 40,7 auf 27,2 $W/(m^3/h)$. Dabei ist zu prüfen, ob die Strömungsart von turbulent zu laminar wechselt und inwieweit sich dadurch der Wärmedurchgang vom Wärmeträger bis zum Raum ändert.

- Die VDI 2073 empfiehlt für Anlagen mit unveränderlichem Betriebspunkt (überwiegender Betrieb im Auslegungspunkt) eine Dimensionierung der Pumpe auf den Bereich des optimalen Wirkungsgrades der Pumpenkennlinie. Für Anlagen mit veränderlichem Betriebspunkt sollen nach VDI 2073 Pumpen gewählt werden, bei denen der Betriebspunkt auf der Pumpenkennlinie rechts vom Wirkungsgrad-Optimum liegt, sodass diese im Teillastbetrieb im optimalen Wirkungsgradbereich betrieben werden.

Beispiel: Wird in Gebäude J eine entsprechend angepasste Pumpe ausgewählt, erhöht sich der Wirkungsgrad im Betriebspunkt auf der Pumpenkennlinie von 39 auf 50 %.

In *Tabelle 9* werden die berücksichtigten Optimierungsmaßnahmen für die erneuten Druckverlustberechnungen für die jeweiligen hydraulischen Kreise bzw. Pumpendimensionierungen zusammengefasst.

Die spezifische Leistungsaufnahme SFP_{hydr} kann durch die dargestellten Maßnahmen auf Werte meist unter 20 $W/(m^3/h)$ reduziert werden und bewegt sich im optimierten Zustand zwischen 6,9 und 34,9 $W/(m^3/h)$. Im Durchschnitt liegen die Effizienzsteigerungen bei ca. 60 % und erreichen bis zu 82 %.

Zwischenfazit: Dimensionierung hydraulischer Anlagen

Gesamtdruckgefälle zwischen 52 und 726 Pa/m dokumentieren sowohl gute als auch nachlässige Planungspraxis. Die Flächentemperiersysteme verursachen durchschnittlich 50 % des Druckgefälles. Erhebliches Optimierungspotenzial besteht auch bei der Pumpendimensionierung mit deutlichen Überdimensionierungen von durchschnittlich 247 %. Mit den Optimierungsmaßnahmen

Tabelle 9: Berücksichtigte Optimierungsmaßnahmen in der optimierten Druckverlustberechnung zur Reduzierung des Energiebedarfs zur Fluidumwälzung in den untersuchten Gebäuden

Optimierungsmaßnahmen	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
zusätzliche Parallelschaltung von Segmenten ¹										
Vergrößerung Innendurchmesser von TABS-Rohren										
nächstgrößere Nennweite von Anbindungsleitungen										
höhere k_{vs} -Werte von Abgleichventilen										
höhere k_{vs} -Werte von Regelventilen ²										
Neudimensionierung Pumpen										
¹ Die Rohrlängen und Volumenströme einzelner Segmente der Flächentemperiersysteme werden halbiert.										
² Beachtung einer minimalen Ventilautorität von 0,5 gemäß VDI 2073										

- zusätzliche Parallelschaltung von einzelnen Segmenten der Flächentemperiersysteme
- Wahl von an den zu fördernden Nennvolumenstrom angepassten Innendurchmessern und
- optimierte Pumpendimensionierung

kann der (elektrische) Energiebedarf zur Fluidumwälzung in den stationären Nennbetriebspunkten um durchschnittlich 60 % reduziert werden.

6.3.3 Betriebsführung hydraulischer Anlagen mit Flächentemperiersystemen

Aufbauend auf den Analysen zur Netztopologie (*Kapitel 6.3.1*) und den stationären Berechnungen zu Rohrnetzauslegung und Pumpendimensionierung (*Kapitel 6.3.2*) werden die dynamischen Betriebszustände während der Heiz- und Kühlperiode auf Basis von hochauflösten Messdaten analysiert. Aufgrund ihrer thermischen Trägheit reagieren TABS (und insbesondere die Betonkerntemperierung) nur langsam auf abrupte Störungen z. B. durch solare oder interne Lasten, siehe *Kapitel 6.1*. Für die Regelung der Raumtemperaturen wird meist ausschließlich der Selbstregel-Effekt von Flächentemperiersystemen mit geringen Über- bzw. Untertemperaturen zur Raumtemperatur ausgenutzt. Bei Abweichungen vom Raumtemperatur-Sollwert

reduziert sich automatisch die Wärmeübertragungsleistung durch den sinkenden Temperaturunterschied zwischen Wärmeträgerfluid und Raum. Ziel der Untersuchung ist die Identifikation geeigneter Betriebsführungsstrategien für TABS.

Bewertung der Energieeffizienz der Wärme- und Kälteverteilung

Für die Analyse der Energieeffizienz der Wärme- und Kälteverteilungssysteme werden Jahresarbeitszahlen berechnet. Die Jahresarbeitszahlen JAZ_{hydr} berücksichtigen neben den hydraulischen Aspekten (also in erster Linie Rohrnetzauslegung und Pumpendimensionierung) auch dynamische Effekte in Teillastzuständen (entsprechend der implementierten Regelung und Betriebsführung) sowie thermische Effekte (in erster Linie das Temperaturniveau des Wärmeträgerfluids). Die Berechnung der Jahresarbeitszahlen erfolgt mithilfe der aufbereiteten Messdaten (insbesondere Ergänzung fehlender Messwerte, Berücksichtigung von Messausfällen und Fehlerkorrektur) von installierten Wärmemengenzählern in den Kreisen und Elektrozählern für die Umwälzpumpen:

$$JAZ_{hydr} = \frac{Q_{TABS}}{W_{el, Wärmepumpe}} = \frac{\int_0^{8.760} \dot{Q}_{TABS} dt}{\int_0^{8.760} P_{el, Pumpe} dt} \quad (18)$$

Im Gegensatz zur Gesamtbilanzierung in *Kapitel 8.3* mit der Jahresarbeitszahl JAZ werden hier mit JAZ_{hydr} nur die Energiebezüge der Umwälzpumpen in den Verbraucherkreisen und nicht die Energiebezüge von Wärmepumpen, Kältemaschinen, Kesseln, Speicherladepumpen usw. berücksichtigt. Damit kann der Einfluss der thermo-hydraulischen Auslegung und der Betriebsführung auf die Anlageneffizienz getrennt bewertet werden.

Aus 15 Gebäuden stehen ausreichend gute Messdaten und Anlageninformationen zur Verfügung, um ganzjährige Betriebsperioden bewerten zu können. Die Betriebsführungsstrategien werden bezüglich der verwendeten Stellgrößen (Vorlauftemperatur, Volumenstrom und Betriebszeiten der Pumpen) sowie der Rückkopplung der Raum- bzw. Zonentemperaturen in den jeweiligen Regelkreisen analysiert.

Thermoaktive Bauteilsysteme

Tabelle 10 zeigt eine zusammenfassende Übersicht der implementierten Betriebsführungsstrategien in neun TABS-Systemen. Hier werden zum einen die aus der Messdatenanalyse ermittelten Regressionsgeraden für die Heiz- und Kühlkurven und zum anderen die Volumenströme und Betriebszeiten im Jahresverlauf als Carpet-Plot dargestellt.

Vorlauftemperatur: Im Heizbetrieb werden in den untersuchten Anlagen vorwiegend geringe Temperaturniveaus zwischen 22 und 30 °C für die Vorlauftemperaturen verwendet. Lediglich in zwei Anlagen (A und J) werden bei geringen Außen-

peraturen Vorlauftemperaturen über 30 °C eingestellt. Bei den meisten Anlagen kommen lineare Heizkurven in Abhängigkeit von der Außentemperatur zum Einsatz. Dabei werden die gleitenden Mittelwerte der Außentemperatur der vergangenen 24 h verwendet. Nur in einer Anlage sind die Vorlauftemperaturen unabhängig von der Außentemperatur konstant. Des Weiteren ist zu erkennen, dass in der Anlage H gleiche Heizkurven für alle Verteilkreise unabhängig von der Orientierung bzw. den erwarteten internen Lasten verwendet werden.

Im Kühlbetrieb werden die TABS in den meisten untersuchten Anlagen mit konstanten Vorlauftemperaturen zwischen 18 und 22 °C betrieben. Der zulässige Bereich für die Vorlauftemperaturen im Kühlbetrieb wird durch die mögliche Unterschreitung des Taupunktes und der folgenden Gefahr von Tauwasserbildung auf minimale Temperaturen von ca. 17 – 18 °C begrenzt. Die Umschaltung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb erfolgt in den Anlagen unterschiedlich mit Heizgrenztemperaturen zwischen 10 und 15 °C, die den Betrieb der Umwälzpumpen bei Unterschreiten bzw. Überschreiten der definierten Außentemperaturen freigeben.

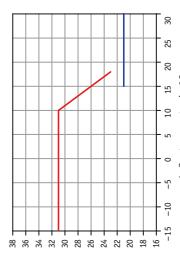
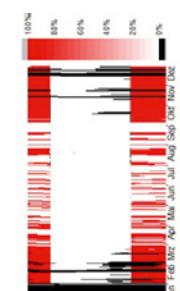
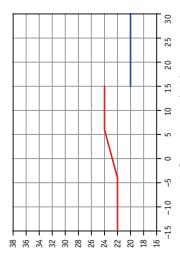
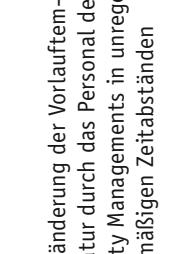
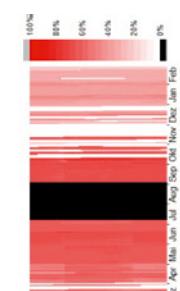
Volumenstrom: Fast alle TABS-Verbraucherkreise werden sowohl in Nenn- als auch in Teillast mit konstanten Volumenströmen über die gesamten Betriebsperioden betrieben. Lediglich in einer Anlage (Gebäude Q) sind variable Volumenströme während der Betriebszeiten der TABS zu erkennen.

Betriebszeit: Im Heizbetrieb unterscheiden sich die Betriebsweisen deutlich. Der Betrieb der Anlagen erfolgt teilweise durchgehend (24 Stunden täglich) und teilweise mittels Zeitplänen im Nachtbetrieb. Im Kühlbetrieb werden vorwiegend Zeitpläne für den Pumpenbetrieb der TABS-Kreise eingesetzt. Es ist kein Zusammenhang zwischen den Betriebszeiten des intermittierenden Betriebs und den Heiz- und Kühllasten der Gebäude zu erkennen. Beispielsweise werden im Gebäude H alle Gebäudesegmente während der gleichen Zeit betrieben, obwohl sich die Heiz- und Kühllasten aufgrund der unterschiedlichen Orientierung (und damit der solaren Lasten) unterscheiden dürften.

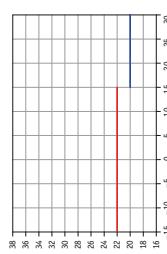
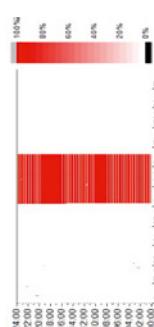
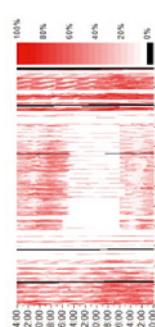
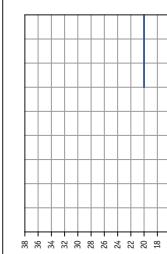
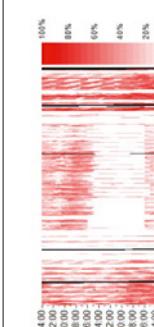
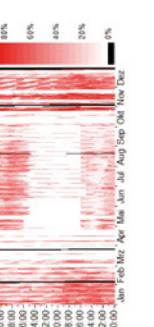
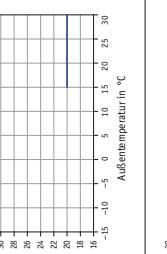
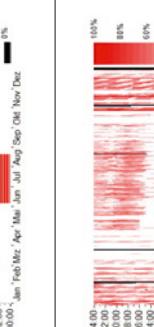
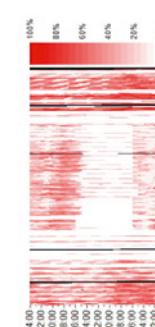
Raumtemperatur-Feedback: In vier Anlagen sind in den TABS-Kreisen Drosselventile bzw. Absperrventile für die Regelung des Volumenstroms installiert. Diese sollen zusätzlich zum Selbstregeleffekt der TABS eine benutzerdefinierte Einstellung des thermischen Komforts mittels Rückkopplung der Raumtemperatur in den Räumen ermöglichen. Der Einfluss der Drosselventile auf den Volumenstrom ist in den Auswertungen der Messdaten jedoch nur im Gebäude Q zu erkennen.

So zeigt der Carpet-Plot (*Tabelle 10*) zu Gebäude Q deutliche Fluktuationen des Volumenstroms im Jahresverlauf. Besonders im Monat Januar ist zu erkennen, dass die TABS überwiegend in der Zeit zwischen 0:00 und 9:00 Uhr mit hohen Volumenströmen betrieben werden, da in diesem Zeitraum ebenfalls niedrige Außentemperaturen und daraus resultierend hohe Heizlasten im Gebäude auftreten. In den Sommermonaten ist der ähnliche Effekt zwischen 16 und 20 Uhr zu beobachten.

Tabelle 10: Zusammenfassung der implementierten Betriebsstrategien für die thermoaktiven Bauteilsysteme in den untersuchten Anlagen. Rote Schattierungen markieren den Heizbetrieb, blaue Schattierungen den Kühlbetrieb. Grau schattierte Zellen konnten aufgrund mangelnder Messdaten nicht ausgewertet werden.

Gebäude	Betriebsjahr	Vorlauftemperatur [°C]		Volumenstrom [m³/h] und Betriebszeit			
		konstant	Heiz-/Kühlkurve	konstant	variabel	Zeitplan	durchgängig
THERMOAKTIVE BAUTEILSYSTEME							
A	2011			8			
							
B	2012			4			
							
C	2012			7/7			
							
						Veränderung der Vorlauftemperatur durch das Personal des Facility Managements in unregelmäßigen Zeitabständen	

Fortsetzung von Tabelle 10

Gebäude	Betriebsjahr	Vorlauftemperatur [°C]	Volumenstrom [m³/h] und Betriebszeit		Raumtemperatur-Feedback
			↓	t _{Betrieb}	
K	2011	Heiz-/Kühlkurven			
P	2011				
Q	2012				

Aufgrund des täglich intermittierenden Betriebs der TABS treten im Sommer hier die höchsten durch das TABS gelieferten Kühlleistungen auf.

Beispiel: Der Einsatz von Drosselventilen mit Rückkopplung der Raumtemperatur in Regelkreisen mit thermoaktiven Bauteilsystemen erscheint aufgrund deren hoher thermischen Trägheit kontraproduktiv. Anhand des folgenden Szenarios im Heizbetrieb wird ein möglicher Fehlbetrieb diskutiert, der durch die Drosselventile verursacht wird: Die Überschreitung der benutzerdefinierten Raumtemperatur führt zur Reduzierung des Volumenstroms durch das Drosselventil. Aufgrund der hohen thermischen Masse der Betonkerntemperierung besteht dennoch weiterhin ein Wärmestrom vom Bauteil zum Raum. Durch die fortschreitende Überhitzung des Raumes entschließt sich der Nutzer zur Öffnung der Fenster, wodurch die Raumtemperatur sinkt, das Drosselventil jedoch wieder öffnet und die Betonkerntemperierung weiter belädt. Nach dem Schließen der Fenster setzt das Aufheizen des Raumes durch die Betonkerntemperierung wieder ein.

Randstreifenelemente, Deckenpaneelle, Fußbodentemperierungen

Tabelle 11 zeigt eine zusammenfassende Übersicht der implementierten Betriebsführungsstrategien in sechs thermisch agilen Flächentemperiersystemen.

Vorlauftemperatur: Im Heizbetrieb werden im Vergleich zur Betonkerntemperierung höhere Vorlauftemperaturen zwischen 26 und 36 °C verwendet. Das Temperaturniveau im Kühlbetrieb ist aufgrund der Beschränkung durch die Taupunkttemperatur auf Minimalwerte von ca. 18 °C beschränkt. Sowohl im Heiz- als auch im Kühlbetrieb kommen teilweise außentemperaturabhängige Heizkurven und teilweise konstante Vorlauftemperaturen unabhängig von der Außentemperatur zum Einsatz.

Volumenstrom und Raumtemperatur-Feedback: In allen untersuchten Gebäuden sind in den RSE-, DPE- bzw. FBT-Kreisen Drosselventile für den Volumenstrom installiert, wodurch sich während des Betriebs variable Volumenströme in Teillast ergeben.

Betriebszeit: In den meisten Anlagen erfolgt ein durchgehender Pumpenbetrieb. In zwei Anlagen (Gebäude A und I) sind die abgehängten Deckenpaneelle bzw. Randstreifenelemente zusätzlich zu thermoaktiven Bauteilsystemen installiert. In diesen beiden Anlagen wird die Betonkerntemperierung im Nachtbetrieb zur Grundlastdeckung und die agilen Systeme abwechselnd im Tagbetrieb zur Spitzenlastdeckung betrieben.

Energieeffizienz der Wärme- und Kälteverteilung

Bild 54 zeigt die Jahresarbeitszahlen JAZ_{hydr} für die jeweiligen Verbraucherkreise der untersuchten Anlagen jeweils getrennt für den Heiz- und Kühlbetrieb sowie für das gesamte Betriebsjahr (also Heizen plus Kühlen).

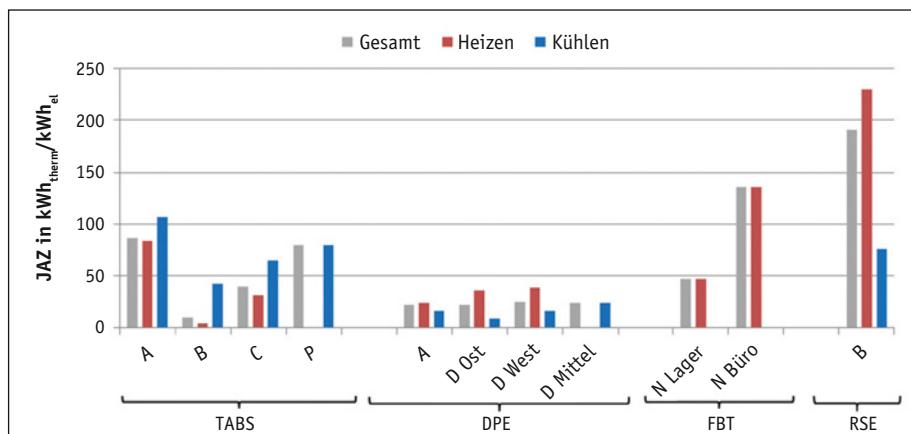


Bild 54: Jahresarbeitszahlen der untersuchten hydraulischen Anlagen getrennt für die jeweiligen Flächentemperiersysteme und aufgeteilt in Heiz- und Kühlbetrieb

Der Quervergleich zeigt große Unterschiede zwischen den Anlagen:

- Die Jahresarbeitszahlen JAZ_{hydr} für die TABS-Kreise liegen zwischen 31 und 107 kWh_{therm}/kWh_{el} mit einem (negativen) Ausreißer für das Gebäude B im Heizbetrieb mit einem minimalen Wert von 4,2 kWh_{therm}/kWh_{el}.
- Die Jahresarbeitszahlen JAZ_{hydr} für die DPE-, FBT- und RSE-Kreisen zeigen einen hohen Einfluss der Regelung und Betriebsführung der Flächentemperiersysteme auf die Energieeffizienz des Verteilsystems.

Hybride Wärmeübergabe: In den Anlagen A und B erfolgt eine hybride Wärmeübergabe mittels thermoaktiven Bauteilsystemen für die Grundlastdeckung und schnell reagierenden Wärmeübergabesystemen, wie abgehängte Deckenpaneelle und Randstreifenelemente, für die Spitzenlastdeckung.

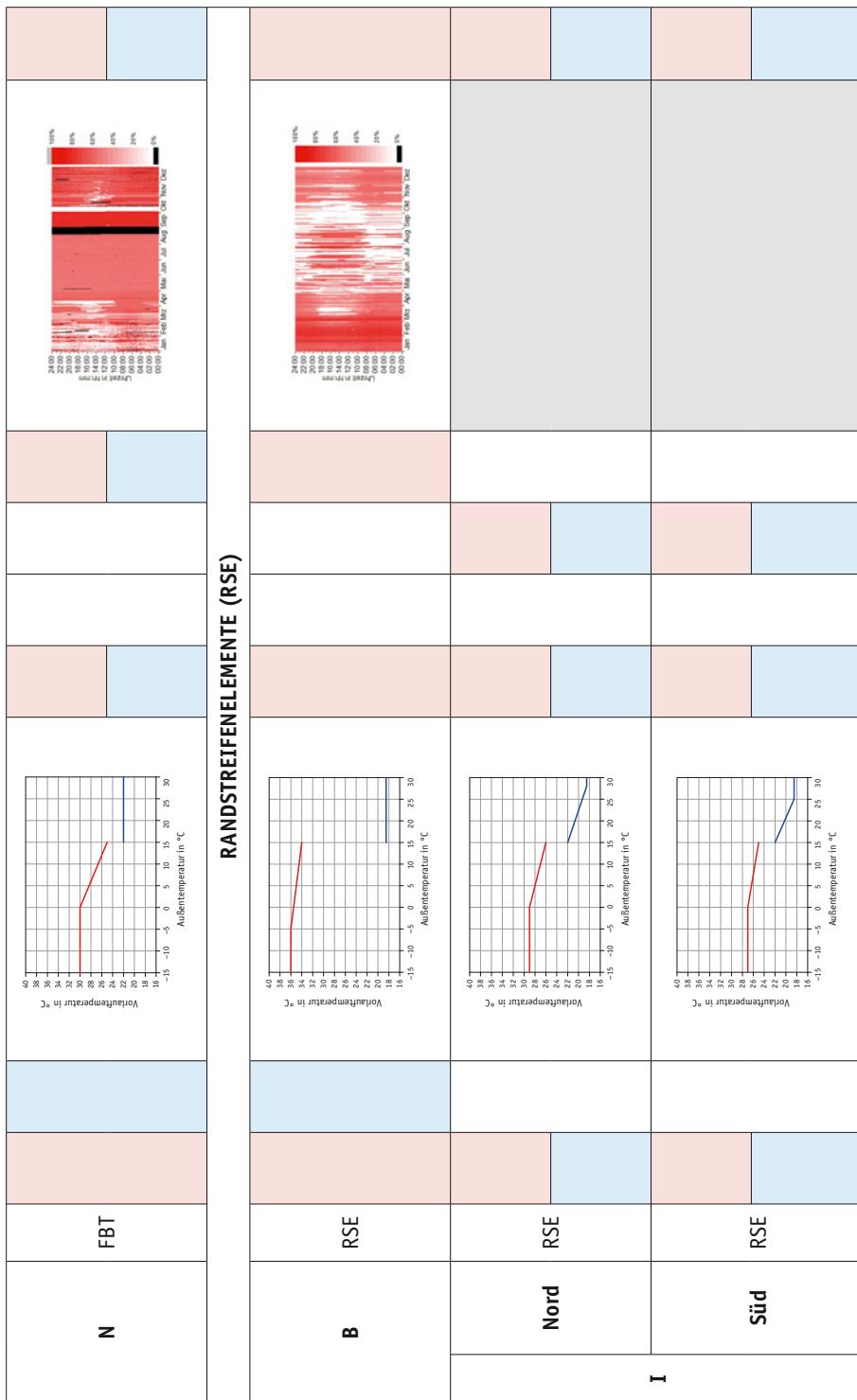
In Bild 54 ist zu erkennen, dass die Jahresarbeitszahl JAZ_{hydr} im Heizbetrieb der TABS im Gebäude B besonders schlecht ist. Dies wird durch die falsch eingestellte Heizkurve (siehe Tabelle 10) verursacht. So erfolgt bei geringen Außentemperaturen eine Fluidumwälzung mit Nennvolumenstrom ohne Übertragung signifikanter Wärmemengen. Demgegenüber ist die Jahresarbeitszahl JAZ_{hydr} für die RSE im Heizbetrieb im Gebäude B mit 230 kWh_{therm}/kWh_{el} überdurchschnittlich hoch, da die RSE in der Heizperiode (infolge dieses Betriebsfehlers im Nachtbetrieb) hauptsächlich mit Volllast betrieben und verhältnismäßig hohe Wärmemengen übertragen werden. Die Jahresarbeitszahlen JAZ_{hydr} sind im Kühlbetrieb für die RSE mit 76 kWh_{therm}/kWh_{el} deutlich niedriger, aber für die BKT mit 42 kWh_{therm}/kWh_{el} deutlich höher als im Heizbetrieb, weil hier ein ausgeglichener Tag-/Nacht-Betrieb zwischen BKT und RSE gelingt.

Tabelle 11: Zusammenfassung der implementierten Betriebsf黨rungsstrategien f黨r die Randstreifenelemente, Deckenpanele und Fußboden-temperierungen in den untersuchten Anlagen. Rote Schattierungen beziehen sich auf den Heizbetrieb, blaue Schattierungen auf den K黨lbetrieb. Grau schattierte Zellen konnten aufgrund mangelnder Messdaten nicht untersucht werden.

Vorlauftemperatur [°C]		Raumtemperatur-Feedback		Volumenstrom [m³/h] und Betriebszeit		Deckenpaneele (DPE)	
Gebäude	Typ Übergabesystem	Volumenstrom im Jahresverlauf als Carpet-Plots		Zeitplan		Deckenpaneele (DPE)	
		konstant	variabel	durchgängig	Zeitplan	konstant	Zeitplan
		Heiz-/Kühlkurven	Heizkurve	Zeitplan	Zeitplan	konstant	Zeitplan
A	DPE						
D	Mitte						

Fortsetzung von Tabelle 11

Typ Übergabesystem	Gebäude	DPE	West	DPE	Ost	Vorlauftemperatur [°C]	Heiz-/Kühlkurven	Volumenstrom im Jahresverlauf als Carpet-Plots	Raumtemperatur-Feedback	Volumenstrom [m^3/h] und Betriebszeit	
										\dot{V}	t_{Betrieb}
J	FBT									FUSSBODENTEMPERIERUNG (FBT)	
D											



In der Anlage A ist der Anteil der Betonkerntemperierung an der jährlichen Wärmeübergabe sowohl im Heizbetrieb mit 70 % als auch im Kühlbetrieb mit 66 % sehr ähnlich und entspricht in etwa der Planung. Dementsprechend zeigt auch der Vergleich der Jahresarbeitszahlen JAZ_{hydr} zwischen dem Heiz- und Kühlbetrieb der jeweiligen Wärmeübergabesysteme im Gebäude A keine großen Unterschiede. Hier liegen die Jahresarbeitszahlen JAZ_{hydr} für die BKT-Kreise erwartungsgemäß (vgl. Rohrnetzauslegung in *Kapitel 6.3.2*) höher als für die DPE-Kreise.

Volumenströme und Betriebszeit: Für die TABS-Systeme ist in fast keinem der untersuchten Gebäude eine Volumenstromdrosselung in Teillast zu erkennen. Zudem werden die Betriebszeiten der Umwälzpumpen meist unabhängig vom Wärme- bzw. Kältebedarf nach festen Zeitplänen gesteuert.

Der Vergleich der Jahresarbeitszahl JAZ_{hydr} für den TABS-Kreis in Anlage C zeigt im Kühlbetrieb (ausschließlich mit Betonkerntemperierung) mit $65 \text{ kWh}_{therm}/\text{kWh}_{el}$ einen deutlich höheren Wert als im Heizbetrieb (mit hybrider Wärmeübergabe mit BKT und Radiatoren) mit $31 \text{ kWh}_{therm}/\text{kWh}_{el}$.

Gleichzeitig sind die Jahresarbeitszahlen JAZ_{hydr} im Vergleich zu den TABS-Kreisen in der Anlage A deutlich schlechter. Ursachen hierfür sind zum einen die längere Betriebsdauer der Pumpen in Gebäude C (täglich 24 Stunden) im Vergleich zum Nachtbetrieb der TABS-Pumpen im Gebäude A zwischen 20:00 und 06:00 Uhr (siehe *Tabelle 10*). Zum anderen ergeben sich in der Anlage C geringe Temperaturspreizungen von meist unter 2 K im Heizbetrieb und fast ausschließlich unter 1 K im Kühlbetrieb dadurch, dass der Betrieb während der gesamten Betriebszeit mit den jeweiligen Nennvolumenströmen erfolgt. In der Anlage A liegen die Temperaturspreizungen zu mehr als 75 % der Betriebszeit im Heizbetrieb und Kühlbetrieb deutlich über 2 K, siehe hierzu auch in *Kapitel 8.3.4*.

Vorlauftemperatur: Die Unterschiede zwischen den Jahresarbeitszahlen JAZ_{hydr} für die TABS-Kreise im Heizbetrieb der Anlage A und C werden auch durch die unterschiedlichen Vorlauftemperaturniveaus verursacht. *Tabelle 10* zeigt, dass das Temperaturniveau in der Anlage A mit 31°C im Nennbetriebspunkt deutlich höher ist als in der Anlage C mit ca. 27°C (nicht in *Tabelle 10* gezeigt, weil oft geändert). Bei Raumtemperaturen von ca. 22°C sind die Temperaturunterschiede zwischen Wärmeträgerfluid und Raum im Heizbetrieb deutlich höher als im Kühlbetrieb, wodurch sich ebenfalls höhere Temperaturspreizungen zwischen Vor- und Rücklauf ergeben.

Grundsätzlich soll eine möglichst hohe JAZ_{hydr} erreicht werden. Allerdings hat die Vorlauftemperatur – je nach gewählter Anlagentechnik für die Wärme- bzw. Kältebereitstellung – auch einen Einfluss auf die Effizienz im Primärkreislauf bzw. in der Energiebereitstellung und damit auf die Jahresarbeitszahl des Gesamtsystems JAZ . Dieser Zusammenhang wird ausführlich in *Kapitel 8* diskutiert.

Zwischenfazit: Betriebsführung hydraulischer Anlagen

Die Analyse des dynamischen Systemverhaltens der hydraulischen Verteilsysteme zeigt bei der Regelung von thermoaktiven Bauteilsystemen große Unterschiede bei der Verwendung der Stellgrößen Vorlauftemperatur, Volumenstrom und Betriebszeit.

Eine häufige Schwachstelle in den TABS-Systemen ist der durchgehende 24 Stunden-Betrieb der Umwälzpumpen in den meisten Anlagen bzw. der Nachtbetrieb nach festem Zeitplan mit Nenn-Volumenstrom. Die Anlagen sollten abhängig vom Wärme- bzw. Kältebedarf mit angepassten Volumenströmen betrieben werden.

Jahresarbeitszahlen JAZ_{hydr} zwischen 4,2 und 230 $\text{kWh}_{therm}/\text{kWh}_{el}$ zeigen das enorme Potenzial bei der thermo-hydraulischen Auslegung und dem Anlagenbetrieb auf. Die Jahresarbeitszahl JAZ_{hydr} der meisten Gebäude liegt zwischen 25 und 100 $\text{kWh}_{therm}/\text{kWh}_{el}$.

Besonders Anlagen mit Betonkerntemperierung und zusätzlichen, thermisch agilen Übergabesystemen für die Wärme- und Kälteversorgung weisen teilweise sehr schlechte Jahresarbeitszahlen auf. Gründe hierfür sind in erster Linie lange Betriebszeiten von Umwälzpumpen ohne signifikant übertragene Wärmemengen.

Eine sorgfältige Planung und eine konsequente Umsetzung der vorgestellten Optimierungsmaßnahmen bezüglich der Regelungs- und Betriebsführungsstrategien reduzieren den Energiebedarf für die Verteilsysteme signifikant. Energiekonzepte mit thermoaktiven Bauteilsystemen können dann besonders energieeffizient betrieben werden, wenn sie – in Ergänzung zu den Vorschlägen zur Betriebsführungsstrategien in *Kapitel 6.2.3* – folgende Aspekte berücksichtigen:

- Berücksichtigung von Teillastzuständen des Wärme- und Kältebedarfs, insbesondere für den Betrieb der Umwälzpumpen
- Berücksichtigung des Energiebedarfs für die Wärme- und Kälteerzeugung, evtl. auch unter Berücksichtigung des Lastmanagements (vgl. *Kapitel 2.6*)
- Berücksichtigung von Prädiktionen für Wetter und interne Lasten (vgl. *Kapitel 6.2.4*)
- Abstimmung bzw. angepasste Leistungsdimensionierung von hybriden Wärme-übergabesystemen.

7 Ausgeführte Projekte

Dieses Kapitel stellt einige Beispiele aus der Sicht des Bauherrn, des Planers, des Architekten und des Systemherstellers vor. Diese Projekte zeigen die Vielfalt der Systemlösungen und stellen unterschiedliche Aspekte in den Fokus.

Während die Beschreibung der Projekte ganz unterschiedlichen Perspektiven folgt, werden die Systemlösungen zur besseren Orientierung einheitlich dargestellt. Das Schema gemäß *Bild 55* beginnt dabei unten mit der Wärmequelle bzw. -senke, zeigt im mittleren Teil die Wärmetransformation und -verteilung und skizziert oben die Übergabesysteme für die Hauptnutzungszenen mit Bauteilaktivierung.

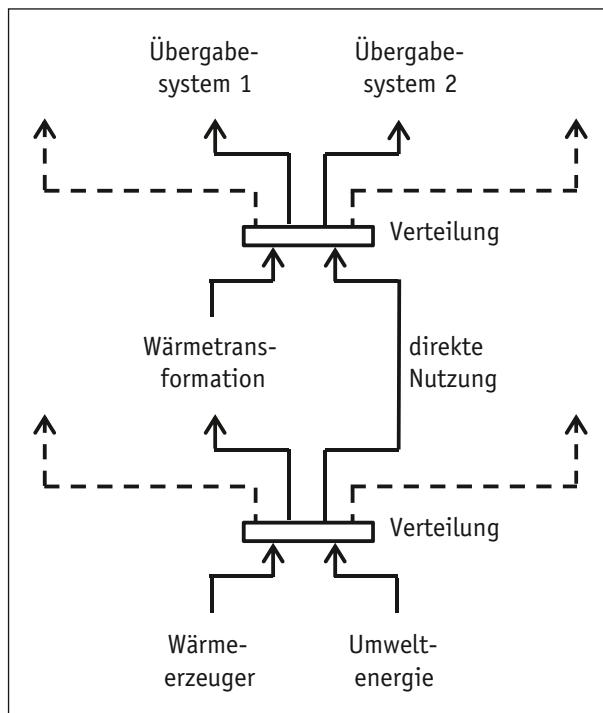
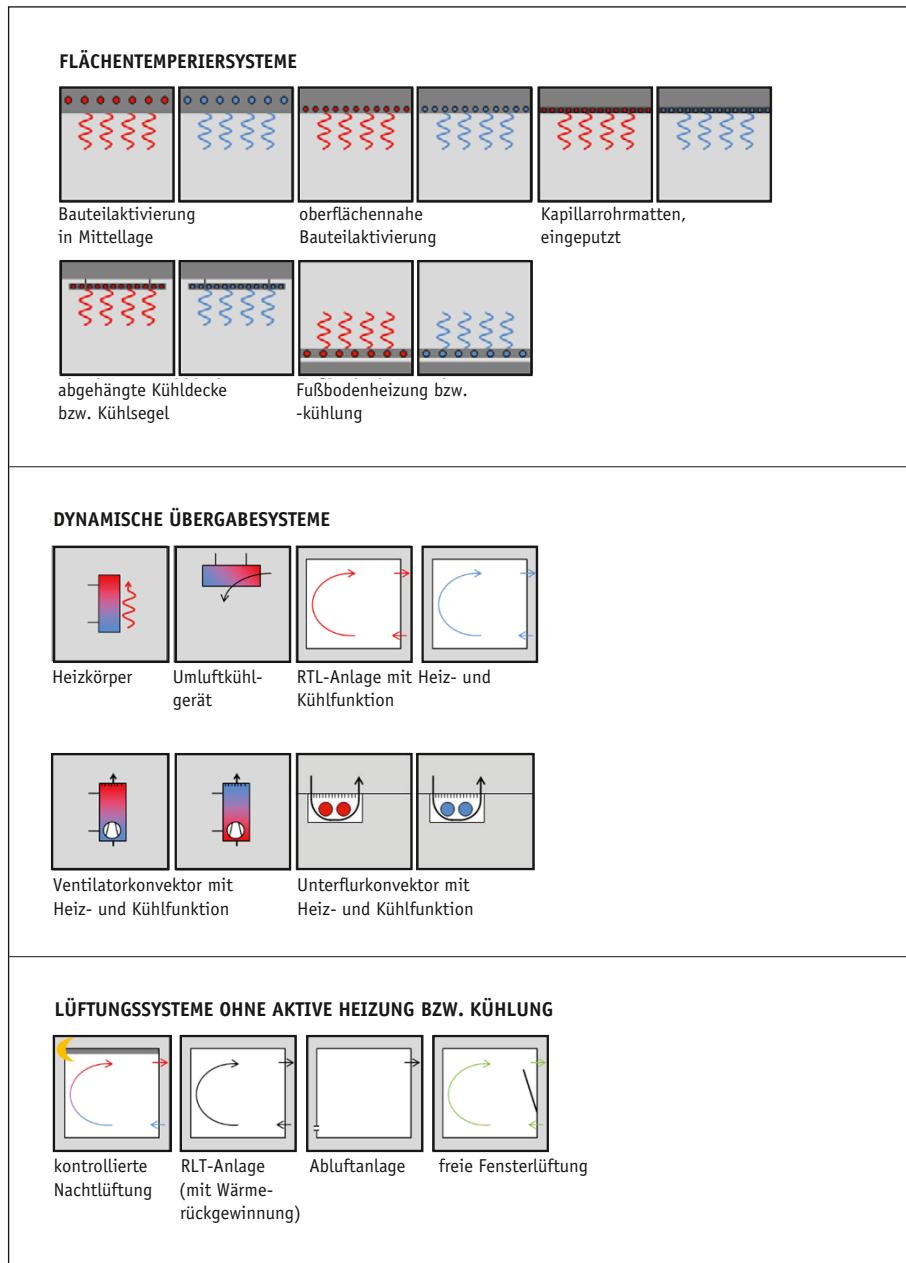
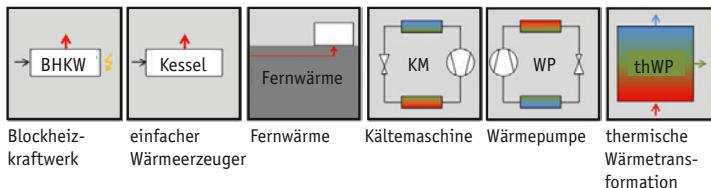


Bild 55: Energieflussbild für die einheitliche Darstellung der Energieversorgung für die Bauteilaktivierung

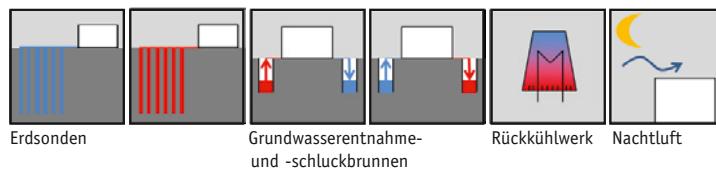
Die Darstellung der (vereinfachten) Energiekonzepte basiert auf folgenden Symbolen:



WÄRME- UND KÄLTEBEREITSTELLUNG



UMWELTENERGIE



AURON

Bauherr:	Employrion Immobilien GmbH & Co. KG
Architektur:	KSP Architekten, München
TGA-Planung:	Ingenieurbüro Hammrich, München
Standort:	München
Baujahr:	2010
Größe:	39 000 m ²



Bild 56: AURON [Quelle: Uponor GmbH]

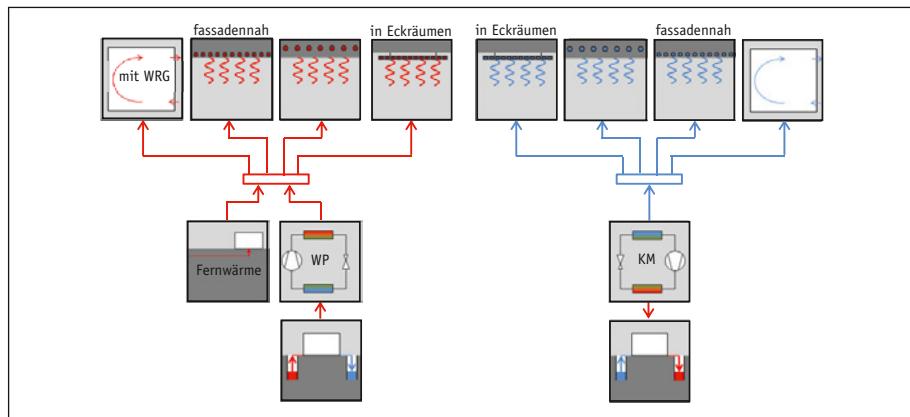


Bild 57: Bauteilaktivierung in den Hauptnutzungsbereichen: Heizfall (links) und Kühlfall (rechts)

Der erste Bauabschnitt des Bürogebäudes AURON wurde als Green Building nach den Vorgaben der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) mit Gold zertifiziert. Die oberflächennahe Betonoberflächenaktivierung ContecON heizt und kühl dabei die rund 39 000 m² Nutzfläche besonders energieeffizient und nutzt regenerative Energien. Dadurch wird das System den Anforderungen an Nachhaltigkeit und hohe Leistungen zum Heizen und Kühlen gerecht. Zudem bietet das System gestalterische Vorteile: Heizkörper in den Räumen sind nicht nötig. Dadurch konnte die Raumarchitektur ohne Einschränkungen und nach der Feng-Shui-Lehre konzipiert werden.

Eine Wärmepumpe zur thermischen Grundwassernutzung sowie Fernwärme versorgen die Bauteilaktivierung mit Wärme. Zum Heizen werden ein Vorlauf von 32 °C und ein Rücklauf von 28 °C gewählt. Dabei erreicht die thermoaktive Decke eine Heizleistung von 60 W/m² und im so genannten bohrsicheren Bereich eine von 53 W/m². Zum Kühlen werden mit der Nutzung des Brunnenwassers Kältemaschinen verwendet. Dabei wird eine Kühlleistung von 70 W/m² und im bohrsicheren Bereich eine von 63 W/m² erreicht.

Die oberflächennahe Bauteilaktivierung verfügt im Vergleich zu einer konventionellen Betonkernaktivierung über ein schnelleres Reaktionsvermögen. Dadurch kann jede der zwischen 200 m² und 400 m² großen Einheiten individuell geregelt werden.

Die benötigte Rasterbreite der Elemente wurde im Werk vorgefertigt. Das stellt die gewünschte Heiz- und Kühlleistung sicher und sorgt für einen zügigen Baufortschritt, denn die präzise Höhenlage der Heiz- und Kühlrohre ist bereits während der Montage gewährleistet. Die Register wurden zudem achsweise mit Abstand verlegt. Dadurch können in den Zwischenräumen optional Trennwände aufgestellt werden.

Im fassadennahen Bereich wurde die Bauteilaktivierung in einem Abstand von etwa 20 mm ab der Unterkante der Decke in einem Rohrabstand von 85 mm verlegt. Das ermöglicht die kurzfristige Zu- und Abfuhr von Heiz- und Kühllasten und damit die schnelle und effiziente Temperaturregelung. Dort werden rund 50 Prozent der geplanten Heiz- und Kühlleistungen nach 30 Minuten erreicht. Auf der Flurseite wurde das System mit einem Bohrsicherheitsabstand von 60 mm ab der Deckenunterkante installiert. Der Verlegeabstand beträgt 100 mm. In diesen bohrsicheren Bereichen werden nach etwa 60 Minuten 50 Prozent der Heiz- und Kühlleistungen erreicht.

In Räumen mit speziellen Anforderungen oder höheren Heiz- bzw. Kühllasten, wie Eckräumen, ergänzen Kühlelemente die Bauteilaktivierung.

Bau und Inbetriebnahme verliefen reibungslos. Positive Rückmeldungen der Nutzer bestätigen die Funktionsfähigkeit in diesem Gebäudekonzept.

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR CHEMIE

Bauherr:	Max-Planck-Gesellschaft
Architektur:	Fritsch und Tschaidse Architekten GmbH, München
TGA-Planung:	Ingenieurbüro Meier, Kirchzarten
Standort:	Mainz
Baujahr:	2012
Größe:	8 670 m ²



Bild 58: MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR CHEMIE [Quelle: Asja Schubert]

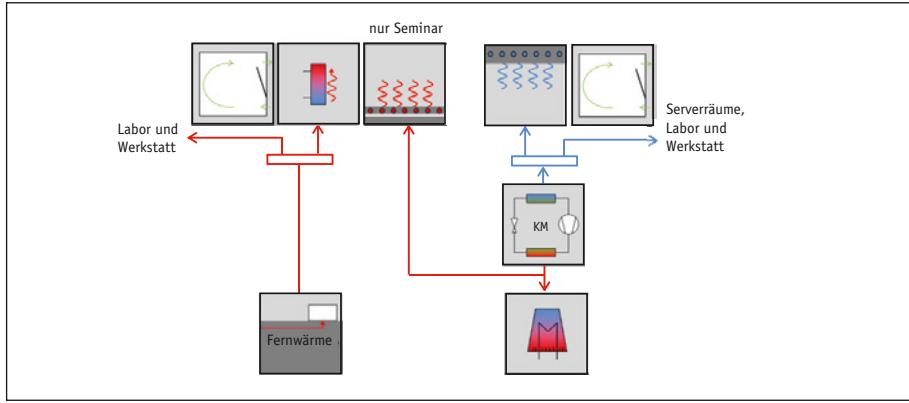


Bild 59: Bauteilaktivierung in den Büros (ohne Serverräume, Labore und Werkstatt): Heizfall (links) und Kühlfall (rechts)

Für das MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR CHEMIE wurde ein Neubau errichtet, der auf die vielschichtigen Bedingungen seiner Abteilungen und wissenschaftlichen Gruppen zugeschnitten ist. Das zweibündig organisierte Labor- und Bürogebäude umschließt U-förmig den weitläufigen Innenhof. Helle Flure erschließen die Labore und die gegenüberliegenden Büros. Die einzelnen Forschungsabteilungen sind geschossweise angeordnet, wobei die Untergliederung der Laborbereiche in je zwei 360 m² große Laborblöcke pro Ebene eine flexible Organisation und eine wirtschaftliche Ver- und Entsorgung ermöglicht.

Die Wärmeversorgung erfolgt durch zwei Rohrbündel-Wärmetauscher in der Technikzentrale, die mit Fernwärme versorgt werden. Verschiedene Heizungsinstallationen

kommen zur Anwendung: Röhrenradiatoren in den Laboren, Plattenheizkörper in den Büros, Deckenstrahlplatten in der Werkstatthalle und Fußbodenheizung in den ergeschossigen Seminarräumen sowie in der offenen Eingangshalle. Um den Kaltluft einfall in der Eingangshalle zu reduzieren, sind dort zusätzlich Fassadenheizelemente angebracht.

Zur Kälteerzeugung werden zwei vibrationsarme Radialturboverdichter mit einer Kälteleistung von je 600 kW eingesetzt. Das Kühlwasser wird in einem geschlossenen System durch zwei Hybridkühltürme mit einer Leistung von je 850 kW gekühlt. Parallel zu den Kältemaschinen ist ein Wärmetauscher eingebunden. Bis ca. 3 °C Außentemperatur können zwei Hybridkühlwerke 600 kW Kälteleistung erzeugen. Zusätzlich können aus den Wärmetauscher-Verbundsystemen der Lüftungszentralgeräte zwei mal 140 kW ausgekoppelt und in das Kältenetz eingespeist werden. Zwischen den Kühltürmen und den Verflüssigern der Kältemaschinen ist eine hydraulische Weiche eingebaut. Zusätzlich wird warmes Kühlwasser für die Fußbodenheizung über Wärmetauscher ausgekoppelt.

Das Institutsgebäude wird teilweise mechanisch be- und entlüftet, wobei die Büros allein über die Fenster individuell bedarfsgerecht belüftet werden.

Die Bauteilaktivierung in den Büros wird ausschließlich zur Kühlung verwendet. In einer aufwändigen Vorplanung wurden unterschiedliche Konzepte zur sommerlichen Kühlung und deren Wechselwirkung mit dem Heizfall untersucht. Auf Grundlage einer umfangreichen Bewertungsmatrix entschied sich der Bauherr schließlich für ein Konzept ohne maschinelle Lüftung in den Büros. Dabei ist der Energieaufwand für die Bauteilkühlung in diesem Gebäude geringer als der Energieaufwand für eine maschinelle Nachtlüftung. Darüber hinaus ist der thermische Komfort in diesem Gebäude (Lage im sommerwarmen Rheingraben) mit der Bauteilkühlung besser.

Dieses Gebäude ist das erste Gebäude des Bundes, das nach der so genannten Klimarichtlinie von 2008 geplant und errichtet wurde: Erstmals wurde hier eine Betonkerntemperierung statt einer kontrollierten Nachtlüftung im sommerlichen Wärmeschutzkonzept eines Neubaus zugelassen. Ausschlaggebend waren dabei neben dem verbesserten Komfort die geringeren Lebenszykluskosten der einfachen Bauteilkühlung gegenüber einem aufwändigen Nachtlüftungskonzept.

Die Bauteilaktivierung (hier nur Kühlung) wird in Abhängigkeit von dem gleitenden Mittel der Außentemperatur betrieben. Das bedeutet, dass bei einer Außentemperatur von ca. 22 °C am Vortag die Bauteilaktivierung in den Nachtstunden betrieben wird. Positive Rückmeldungen der Nutzer bestätigen, dass sich dieses Konzept auch in Verbindung mit manuell öffnbaren Fenstern bewährt hat: Die Nutzer bemerkten die positive Wirkung der Bauteilaktivierung erst, als diese an einigen Tagen ausfiel.

PHARMACEUTICALS

Bauherr:	Komtur – Pharmaceuticals, Freiburg
Architektur:	rolf + hotz, Freiburg
TGA-Planung:	Planungsbüro Geiser, Kappel-Grafenhausen
	Konzept: Stahl + Weiß, Freiburg
Standort:	Freiburg
Baujahr:	2010
Größe:	1060 m ²



Bild 60: PHARMACEUTICALS [Quelle: hotz + architekten]

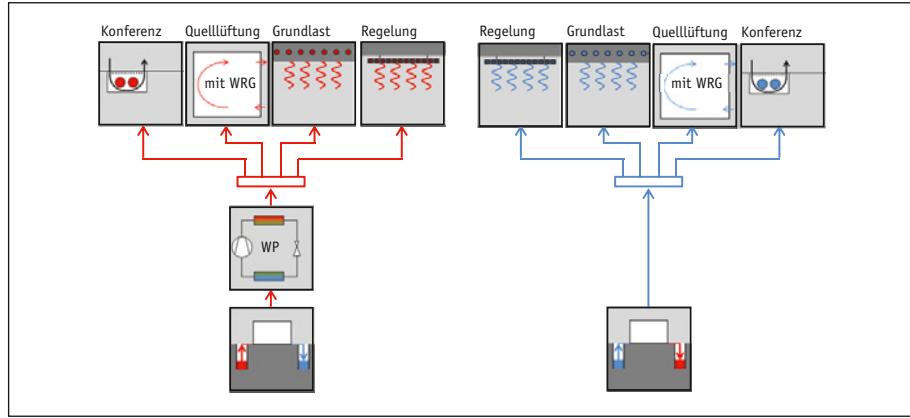


Bild 61: Bauteilaktivierung: Heizfall (links) und Kühlfall (rechts)

Architektonische Qualität, thermischer und raumakustischer Komfort und Umweltbewusstsein stellen für den Bauherrn wichtige Zielvorgaben dar. Unter diesen Prämissen wurden unterschiedliche Gebäudekonzepte gestalterisch und technisch diskutiert. Die gestalterische Entscheidung fiel auf eine gläserne und offene Architektur mit 48 m² Glasdach und großzügigen Freitritten (Luftraum über drei Geschosse). Damit waren die hohen Anforderungen an das haustechnische Konzept zementiert. Nur mit dynamischen Gebäudesimulationen konnte dem Bauherrn nachgewiesen werden, dass auch seine Komfortansprüche einzuhalten sind, allerdings nur mit einer recht aufwändigen Heiz- und Kühltechnik. So ergab sich in enger Zusammenarbeit mit den Architekten und dem Haustechnikbüro das auf den ersten Blick ungewöhnliche System der Kombination von Betonaktivierung und Decken-

strahlelementen zur Grundtemperierung und individuellen Temperaturregelung am Arbeitsplatz. Ein unverzichtbarer Vorteil der Deckenstrahlelemente sind ihre raumakustischen Absorptionseigenschaften. Unterflurkonvektoren an ausgewählten Positionen beugen dem Kaltluftabfall an Verglasungsflächen vor.

Die Bauteilaktivierung hat eine Heiz- und Kühlfunktion, wobei die Vorlauftemperatur gleitend in Abhängigkeit von der Außentemperatur geregelt wird. Deckenstrahlelemente werden zur Zonenregelung im Heiz- und Kühlfall eingesetzt und sind zur Verbesserung der Raumakustik schalltechnisch aktiviert. Der Konferenzraum wurde mit Unterflurkonvektor und thermisch aktiver Decke für die Kühllast bei maximaler Belegung ausgelegt.

Nach ausgiebigen Untersuchungen von Grundwasserqualität und -verfügbarkeit fiel die Entscheidung für die Grundwassernutzung mit Wärmepumpe. Das Grundwasser (mittlere Entnahme 3,2 m³/h) wird als natürliche Wärme- und Kältequelle genutzt, über Saugbrunnen gefördert und über eine Rigole versickert. Das 12 °C kalte Grundwasser wird über einen Wärmetauscher direkt zur Kühlung verwendet. Die Kälteverteilung ist mit einer Rücklaufbeimischung auf eine Vorlauftemperatur von 18 °C begrenzt. Die Rücklauftemperatur liegt bei maximal 24 °C. Es gibt keine zusätzliche Kompressionskältemaschine. Im Winter dient das Grundwasser als Wärmequelle für eine Wärmepumpe mit einer Vorlauftemperatur von 35 °C und einer Rücklauftemperatur von 30 °C. Die Stromversorgung der Wärmepumpe (Jahresarbeitszahl größer 5) kann über eine entsprechend geplante, aber letztlich nicht realisierte 10 kWp-Photovoltaikanlage kompensiert werden.

Ein Hohlraumboden dient der Elektroinstallation und Zuluftführung. Ein effizienter Sonnenschutz reduziert die Kühllasten. Die Lüftungsanlage ist mit einer Wärmerückgewinnung mit über 75 % Wärmerückgewinnungsgrad ausgestattet. Maximale Strömungsgeschwindigkeiten von 3 m/s in den Kanälen reduzieren den Stromverbrauch der Ventilatoren. Die Zuluft wird als Quellluft zugeführt und kann durch natürliche Lüftung über Fenster ergänzt werden.

Die Beleuchtung wurde mit tageslichtabhängiger Regelung der Beleuchtungsstärke für die Allgemeinbeleuchtung und Stehlampen als Arbeitsplatzleuchten ausgeführt und reduziert den Strombedarf. Ein Gründachaufbau zur Regenwasser-Rückhaltung und Versickerung des Dachwassers auf dem Grundstück runden das Konzept ab.

Im Gebäude konnte nachweislich ein sehr hoher thermischer Komfort mit geringem Energieaufwand erreicht werden. Die Umweltbelastung kann in CO₂-Äquivalenten ausgedrückt werden: Statt der 30 t CO₂ gemäß ENEV 2009 werden jährlich nur 6 t emittiert.

Die Zufriedenheit des Bauherrn mit dem Gebäude sowohl aus architektonischer als auch gebäudetechnischer Sicht ist dadurch dokumentiert, dass die anstehende Erweiterung identisch realisiert werden soll.

FRAUNHOFER ISE

Bauherr:	Fraunhofer ISE
Architektur:	ohne Architekt, weil Sanierung
TGA-Planung:	solares bauen GmbH, Freiburg
Standort:	Freiburg
Baujahr:	2008
Größe:	200 m ²



Bild 62: FRAUNHOFER ISE, Sanierung Gebäude I [Quelle: Fraunhofer ISE]

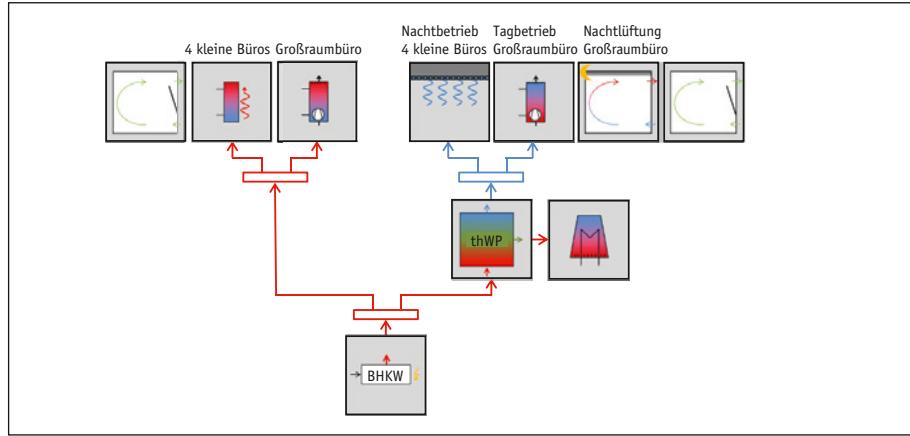


Bild 63: Bauteilaktivierung im Energiekonzept: Heizfall (links) und Kühlfall (rechts)

Das Gebäude I am FRAUNHOFER ISE ist ein Altbau aus den 1970er Jahren und wurde nach der Übernahme vom Vorbesitzer in einen Bürokomplex mit Technikumsfläche umgebaut. Das gesamte Gebäude bekam eine neue Wärmedämmung und eine Wärmeschutzverglasung. Eine maschinelle Lüftung wurde nicht geplant. Insbesondere in den Sommermonaten führten die hohen internen Lasten zu deutlich unkomfortablen Temperaturen in den Büros. Daher wurden 100 m² PCM-Kühldecken mit Latent-Wärmespeicher in den vier Gruppenbüros im Erdgeschoss sowie Heiz-/Kühlkonvektoren im Großraumbüro im Obergeschoss installiert.

Das Großraumbüro und vier Gruppenbüros werden mit einer Anlage zur Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung beheizt und gekühlt. Ein Blockheizkraftwerk (BHKW) liefert eine elek-

trische Leistung von 8 kW_{el}. Die dabei entstehende Abwärme (20 kW_{th}) wird im Winter direkt zum Heizen der Räume genutzt und im Sommer als Antriebsenergie für zwei in Reihe geschaltete Adsorptionskältemaschinen verwendet, die die Wärme in ca. 8 kW_{th} Kälte umwandeln. Als Übergabesysteme stehen Ventilatorkonvektoren und PCM-Kühldecken (PCM für Phasenwechselmaterialien, englisch: Phase Change Materials) bereit.

Die Leistung der Adsorptionskältemaschinen reicht nur für den Vollastbetrieb der Konvektoren oder der Kühldecken, nicht jedoch für beide Systeme parallel. Im Tagbetrieb wird das Großraumbüro aktiv nach Bedarf gekühlt. Die Kühldecken werden mittels aktiver Durchströmung nachts mit Kaltwasser regeneriert. Diese zeitlich getrennte Kälteabnahme führt zu einer deutlich verbesserten Auslastung des BHKWs und planerisch zu einer »Verdopplung« der Kälteleistung. Zusätzlich wird das Großraumbüro über eine freie Nachtlüftung gekühlt.

Probebohrungen zeigten, dass die Decken sehr unterschiedlich aufgebaut sind und sich nicht für eine direkte Befestigung der Kühldecken eignen. Daraufhin wurde beschlossen, zunächst eine tragfähige Unterkonstruktion in die Räume einzubauen, auf die dann die Kühldecken montiert werden. [Damit ist das System streng genommen keine »Bauteileaktivierung«, wird hier aber stellvertretend als Beispiel für die Sanierung mit Kapillarrohrmatten und in Verbindung mit PCM vorgestellt.] Die Kapillarrohrmatten wurden auf einer Gipskartonplatte als Trägermaterial mit PCM-Gipsputz befestigt. Als zusätzliche Verstärkung wurde eine Metallarmierung, die in der Unterkonstruktion fixiert ist, eingesetzt. Die Armierung liegt dabei im oberen Drittel der 3 cm dicken PCM-Putzschicht. Raumseitig wurde schließlich noch ein Glätputz für eine ebene Oberfläche und ein Brandschutzanstrich appliziert. Der Hohlraum der abgehängten Decke konnte für die Verrohrung, Elektrik und Messtechnik genutzt werden.

Die Flächenaktivierung wurde mit Kapillarrohrmatten aus Polypropylen nach dem Tichelmann-Prinzip aufgebaut. Da Polypropylen diffusionsoffen ist, ist eine Systemtrennung des Verbraucherkreises vom Erzeugerkreis erforderlich. Die Vorlauftemperatur wird zentral für das gesamte System vorgegeben und geregelt, indem der Volumenstrom über die Primärseite des Wärmetauschers dem Bedarf angepasst wird. Jeder Raum bzw. jede Kühlfläche wird dabei als separate Zone berücksichtigt, die unabhängig voneinander betrieben werden kann. Der hydraulische Abgleich der Zonen wird über entsprechende Regelarmaturen vorgenommen.

Nachdem die Kapillarrohrmatten vorbereitet und die Gipskartonplatten montiert waren, wurden die Matten an der Decke ausgelegt fixiert und die Dichtigkeitsprüfung durchgeführt. Bei diesen Arbeiten kam es mehrfach zu Verletzungen der Kapillaren, die je nach Baufortschritt ersetzt wurden bzw. in einem Fall nur noch verödet werden konnten.

Messergebnisse zeigen, dass mit diesem Kühlkonzept, selbst bei hohen Außentemperaturen bis zu 30 °C, komfortable Raumtemperaturen von unter 25 °C erreicht werden.

VIATRAFFIC

Bauherr:	viatraffic controlling
Architektur:	Banz + Riecks Architekten BDA, Bochum
TGA-Planung:	solares bauen GmbH, Freiburg
Standort:	Leverkusen
Baujahr:	2014
Größe:	1450 m ²



Bild 64: VIATRAFFIC [Quelle: Olaf Rohl/Banz + Riecks Architekten]

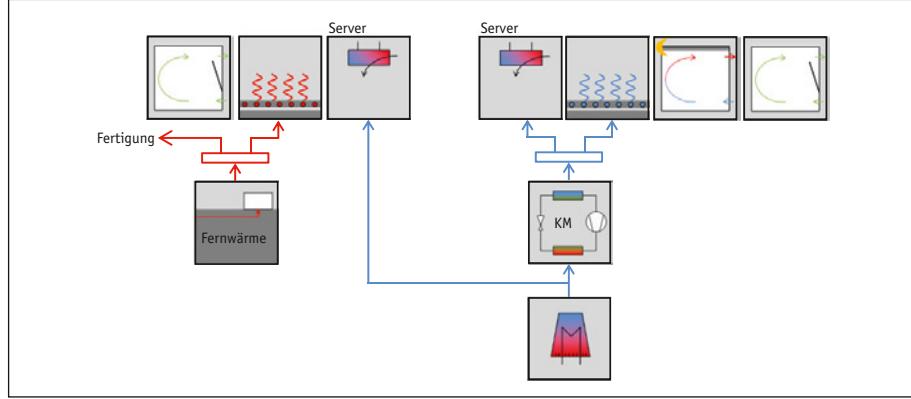


Bild 65: Bauteilaktivierung in der Verwaltung: Heizfall (links) und Kühlfall (rechts)

Die energieoptimierte Fertigungshalle mit Verwaltung, eine reine Holzbaukonstruktion mit einer Bruttogeschoßfläche von rund 1450 m² und einer Kubatur von rund 8400 m³, wurde deutlich unterhalb des nach EnEV 2009 zugelassenen Primärenergiekennwertes realisiert. Der kompakte Baukörper führt die administrativen, entwicklungstechnischen sowie fertigungsbezogenen Tätigkeiten der Mitarbeiter zusammen und unterstützt die kreative Kultur des Unternehmens am Standort der neuen Bahnstadt Opladen.

Mit vorgefertigten Holzbauelementen kann ein hoher Wärmeschutz einfach, solide und kostengünstig erzielt werden. Holzkonstruktionen mit komplexem bauphysikalischen Anforderungsprofil beinhalten in einer Ebene tragende, dämmende und dichtende Funktionen und weisen gegenüber Massivkonstruktionen deutlich schlankere Bauteilquerschnitte auf.

Nicht die winterliche Wärmelast ist die Herausforderung an zukunftsfähige Holzbauten sondern die Gewährleistung angenehmer Rauminnentemperaturen im Sommer, hierbei gewinnt die Betrachtung der thermischen Trägheit von Holzkonstruktionen an Bedeutung. Die thermische Speicherfähigkeit des Werkstoffes Holz führt immer mehr zur Verwendung von inneren Wandelementen, Brettstapeldänen und Dachkonstruktionen mit Bauteilstärken von 18 cm bis 24 cm. Dynamische Gebäudesimulationen prognostizieren im Vorfeld die thermische Trägheit der Gesamtkonstruktion und dienen als Hintergrund für die Auslegung der aktiven Gebäudetechnikkomponenten.

Der geringe Primärenergiebedarf wird durch den hohen Wämeschutz (Gebäudehülle in Passivhausstandard) in Kombination mit dem Heizsystem mit geringem Primärenergieeinsatz für die zur Verfügung stehende Fernwärme erreicht. Ein Teil des Energiebedarfs wird durch eine Photovoltaikanlage gedeckt, sodass der Gesamt-Primärenergiebedarf bei lediglich 49,9 kWh/m² im Jahr liegt.

Bei der Reduktion des Energieverbrauchs spielen passive Maßnahmen eine zentrale Rolle. Im zeitgemäßen Holzbau liegt hier die Herausforderung in der Entwicklung der thermischen Trägheit für funktionierende Nachtlüftungskonzepte und den Einsatz bauteilintegrierter Flächentemperiersysteme.

Nachhaltigkeitsaspekte, aber auch die realen Betriebskosten, werden für gewerbliche Produktionsgebäude immer mehr zum bestimmenden Faktor. Dabei beschreiben ökonomische, ökologische und gestalterische Nachhaltigkeit die Grundvoraussetzung für zukunftsfähige Gebäude.

Das schlanke Gebäudekonzept setzt sich auch in der Anlagentechnik fort. Im Verwaltungsbereich wird auf eine maschinelle Lüftung verzichtet, was zudem die Investitionskosten reduziert. Im Winter wird das Gebäude über eine in die Fenster integrierte Fugenlüftung gelüftet, während in der Übergangszeit und im Sommer die Fenster komplett geöffnet werden können. Die freie Nachtlüftung wird über einbruchsichere Lamellengitter realisiert und erreicht einen vierfachen Luftwechsel.

Als Flächentemperiersystem kommt hier ausschließlich eine Fußbodenheizung zum Einsatz. Die Fußbodenkühlung ist auf Zeiten mit hohen Raumtemperaturen begrenzt, wird manuell in Betrieb genommen und nur nachts betrieben. Als Kältequelle steht die Kältemaschine zur Verfügung, die auch die Umluftkühlgeräte der Serverräume versorgt. Im Nachtbetrieb ist einerseits der Kältebedarf der Serverräume geringer und andererseits die Leistungszahl der Kältemaschine wegen der niedrigeren Umgebungstemperatur höher.

Das Energie- und Gebäudekonzept hat sich bewährt. Die Rückmeldungen der Nutzer nach dem ersten Winter und dem ersten Sommer im Gebäude sind durchweg positiv. Die Nutzer verhalten sich intuitiv richtig und können das Raumklima selbst bestimmen.

INFOSYS

Bauherr:	INFOSYS
Architektur:	Architect Hafeez Contractor
TGA-Planung:	REHAU für Bauteilaktivierung
Standort:	Hyderabad (Indien)
Baujahr:	2012
Größe:	3 120 m ²



Bild 66: IT-Campus in Hyderabad (Indien) [Quelle: Infosys Limited]

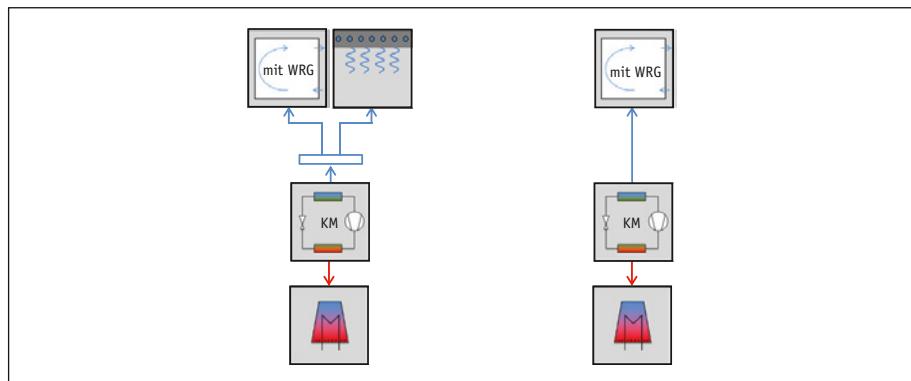


Bild 67: Klimakonzept für die Büroräume, ohne Heizung: mit Bauteilaktivierung (links) und ohne Bauteilaktivierung (rechts)

Dies dürfte einer der größten Feldversuche zur Ermittlung der Energieeffizienz und der Behaglichkeit von Klimatisierungslösungen in den Tropen/Subtropen sein: Während in einem Gebäudeteil eine Bauteilaktivierung in Kombination mit einer kleinen unterstützenden Klimaanlage für eine Klimatisierung sorgt, wird der andere, baugleiche Gebäudeteil des symmetrisch angelegten Gebäudes unter Verwendung einer konventionellen Vollklimaanlage gekühlt. Ziel dieses in Indien einzigartigen Modellprojekts ist es, in einem laufenden Versuch den Energieverbrauch und den thermischen Komfort der konkurrierenden Systeme direkt miteinander zu vergleichen.

Im INFOSYS-Neubau in Hyderabad (Indien) spielen vor dem Hintergrund des heißen Klimas ausgeklügelte Gebäudetechnikkonzepte zur Kühlung eine bedeutende Rolle.

Denn zum einen sollen die verbrauchsgebundenen Kosten für elektrische Energie zu Kühlzwecken niedrig gehalten werden. Zum anderen soll eine weitestgehende Unabhängigkeit vom instabilen Stromnetz Indiens erzielt werden, das für seine häufigen Stromausfälle bekannt ist.

Insgesamt wurden 70 000 Meter Bauteilaktivierung aus dem Werkstoff PE-Xa in die massiven Betondecken integriert. Hierfür wurden vorgefertigte Module vor Ort hergestellt. So konnten die ambitionierten Bauzeiten eingehalten werden. Verbunden wurden die Rohrleitungen mit der dauerhaft dichten und einfach zu verlegenden Schiebehülse als Verbindungstechnik. Schließlich wurden die einzelnen Kühlkreise an Verteiler mit Durchflussmengenmessern angeschlossen.

Um die in Indien noch relativ unbekannte Bauteilaktivierung erfolgreich einzusetzen, unterstützte der Systemspezialist die Ausführung umfassend vor Ort. Neben der Verlegeplanung stand vor allem die Betreuung und Anleitung der baulichen Umsetzung im Fokus.

Die Leistung der beiden konkurrierenden Systeme wurde messtechnisch evaluiert: Durch den Einsatz der Bauteilaktivierung konnte der jährliche Energieverbrauch um 35 Prozent im Vergleich zur Vollklimaanlage mit Entfeuchtung in beiden Gebäudeteilen reduziert werden. Die Mitarbeiter in dem Gebäudeteil mit Bauteilaktivierung bewerteten die Raumlufttemperaturen kühler als die Mitarbeiter im vollklimatisierten Gebäudeteil, obwohl die Raumtemperatur dort tatsächlich im Mittel 2 °C höher liegt. Dieser typische Effekt lässt sich auf den Strahlungsaustausch zwischen dem menschlichen Körper und den großflächig kühlen Oberflächen der Gebäudestruktur zurückführen. Zudem sind die ungewollten Nebeneffekte einer Vollklimaanlage (hier: Zugluft und niederfrequente Geräuschbelastung) im Gebäudeteil mit Bauteilaktivierung nachweislich deutlich reduziert.

Stolz auf diese Pionierleistung geht der Bauherr INFOSYS offensiv mit dem Gebäudetechnikkonzept auf Basis der Bauteilaktivierung um und hat bereits entschieden, bei weiteren Bauabschnitten in Hyderabad und Pune erneut auf diese effiziente Technik zu setzen.

SOLITÄR im Quartier Unterlinden

Bauherr:	Unmüssig Bauträgergesellschaft Baden mbH, Freiburg
Architektur:	wwa – wöhr heugen-hauser architekten, München
TGA-Planung:	Planungs-Gruppe Technik, Freiburg
Standort:	Freiburg
Baujahr:	2012
Größe:	3 120 m ²



Bild 68: SOLITÄR im Quartier Unterlinden [Quelle: Unmüssig Bauträgergesellschaft Baden mbH]

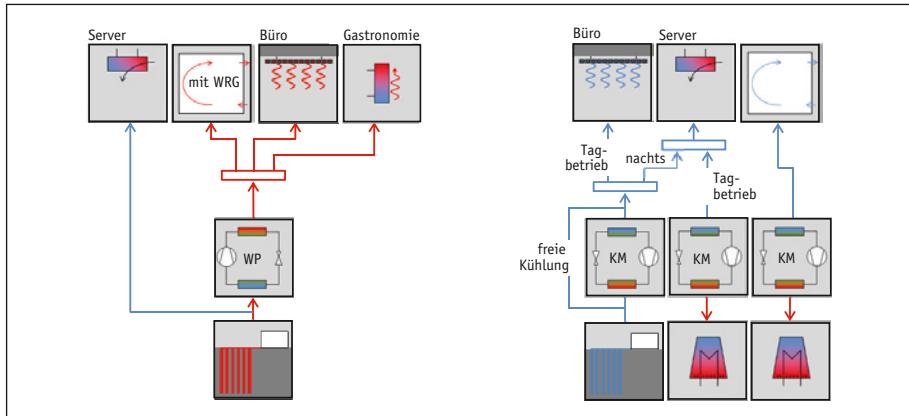


Bild 69: Heizung und Kühlung, ohne Gastronomiebereich: Heizfall (links) und Kühlfall (rechts)

Die Architektur zeichnet sich durch eine raumhohe Verglasung aus, wobei alle Bürräume Fensterflügel zum Öffnen haben. Das SOLITÄR wird mechanisch be- und entlüftet. Der Luftwechsel für die Bürräume liegt zwischen 2,0 und 2,5 1/h, wobei die Zuluft im Winter auf 22 °C erwärmt und im Sommer auf 20 °C (bei Bedarf auf 16 °C für eine unkontrollierte Teil-Entfeuchtung) gekühlt wird. Die RLT-Anlage mit Rotationswärmetauscher verfügt über zwei Kühler, der eine wird über die reversible Geothermie-Wärmepumpe eingespeist, der zweite direkt über die Kältemaschine.

Der spezifische Jahres-Heizwärmebedarf für die Bürräume wurde in der Planung zu 43 kWh_{th}/(m²a) und der spezifische Jahres-Kältebedarf zu 53 kWh_{th}/(m²a) bestimmt.

Die Wärme- und Kälteübergabe im Bürobereich SOLITÄR erfolgt ausschließlich über abgehängte Heiz-/Kühldecken (mit einer aktiven Fläche von 1720 m²), die mit niedrigen Vorlauftemperaturen betrieben werden können. Die Heiz-/Kühldecken sind individuell regelbar. [Damit ist das System streng genommen keine »Bauteilaktivierung«, wird hier aber stellvertretend als Beispiel für ein abgehängtes System vorgestellt, das die Speicherfähigkeit der Betondecke nutzt.]

Das Gebäude wird mit oberflächennaher Geothermie über 40 Erdsonden (durchschnittlich 110 m tief) mit Heiz- und Kühlenergie versorgt. Im Gebäude wurde eine reversible Wärmepumpe mit einer Heizleistung von 188 kW_{th} und einer Kälteleistung von 158 kW_{th} aufgestellt. Bei einer Vorlauftemperatur von 35 °C im Heizbetrieb wird ein COP (Coefficient of Performance) von 4,8 und im Kühlbetrieb von 5,2 bei einer Vorlauftemperatur von 17 °C erreicht. Wärme- und Kälteversorgung werden über ein Energiecontracting realisiert:

- **Heizfall:** Das Bürogebäude SOLITÄR wird zu ca. 67 %, die Flächentemperierung zu 100 % mit Geothermie versorgt. Die restlichen 33 % entfallen auf einen Brennwertkessel zur Versorgung der Verbraucher im Gastronomiebereich. Der von der Wärmepumpe bereitgestellte Jahres-Wärmebedarf verteilt sich auf drei Verbrauchergruppen mit Heiz-/Kühldecke und eine Verbrauchergruppe für die RLT-Anlage und die statischen Heizflächen.
- **Kühlfall:** Der Anteil der Geothermie-Wärmepumpe für die Kühlung beträgt rund 30 %, wobei wiederum ein Teil dieser Kühlenergie direkt aus den Erdsonden bereitgestellt wird. Der Gesamtkühlenergiebedarf gliedert sich gemäß Planung wie folgt: 30 % für die Bauteilaktivierung, 28 % zur Versorgung der Verbraucher im Gastronomiebereich, 31 % für die Kühlung der Serverräume und 11 % zur Versorgung der RLT-Anlage im Bürobereich.

Im Vergleich zu einem Gebäude mit herkömmlicher Heizung und Kühlung wird der CO₂-Ausstoß dadurch um ca. 100 t/Jahr reduziert und beträgt 15 kg/m² Büro-nutzungsfläche. Aus dem Betrieb und der Planung stehen Verbrauchsdaten zur Verfügung:

- Die Wärmebereitstellung aus der Wärmepumpe lag 2012 bei 273 MWh_{th} und 2013 bei 290 MWh_{th} entsprechend ca. 90 kWh/(m²a).
- Die Kältebereitstellung aus der reversiblen Geothermie-Wärmepumpe (einschließlich Direktbetrieb) lag 2012 bei 150 MWh_{th} und 2013 bei 110 MWh_{th} entsprechend ca. 40 kWh/(m²a).
- Die Serverräume werden im Winter über die Erdsonden und im Sommer über die Kältemaschine (COP=3) gekühlt. Die Kältebereitstellung lag 2012 bei 14 MWh_{th} und 2013 bei 17 MWh_{th}.
- Zusätzlich wird eine Kältemaschine für die RLT-Anlage der Büroräume (COP=3,3) betrieben, deren Bedarf in der Planung zu 44 MWh_{th}/a bestimmt wurde.
- Der Hilfsstrombedarf für alle Umwälzpumpen wurde zu rund 17 MWh_{el}/a bestimmt, entsprechend ca. 5 kWh/(m²a).

KREISSPARKASSE GÖPPINGEN

Bauherr:	Kreissparkasse Göppingen
Architektur:	Auer + Weber + Assoziierte, Stuttgart und München
TGA-Planung:	Drees & Sommer Advanced Building Technologies GmbH, Stuttgart
Standort:	Göppingen
Baujahr:	2011
Größe:	6 352 m ²



Bild 70: KREISSPARKASSE GÖPPINGEN [Quelle: Nikolay Kazakov]

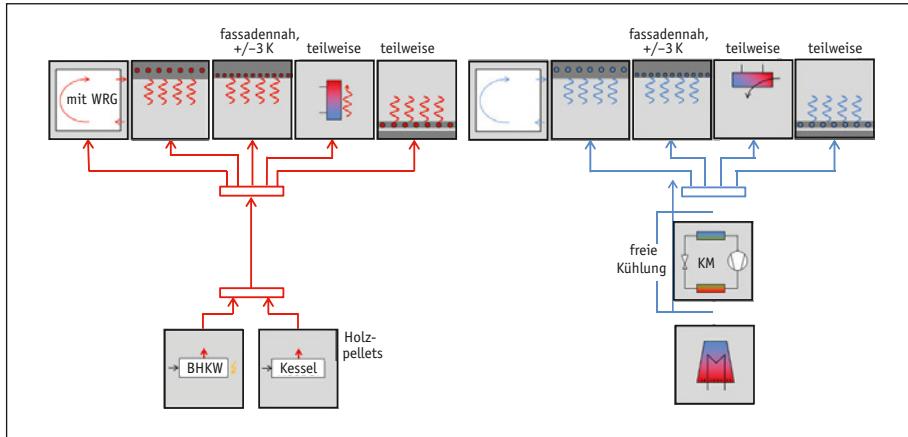


Bild 71: Büoräume im Neubau (ohne Abwärmenutzung aus Abwasser): Heizfall (links) und Kühlfall (rechts)

Der Neubau der KREISSPARKASSE GÖPPINGEN (zertifiziert nach den Kriterien der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen DGNB) ist Teil eines architektonisch-funktionalen Gesamtkonzepts. Eine neue, vertikal gegliederte Fassade fasst den Bestand aus dem Jahr 1974 und den Erweiterungsbau zu einem städtischen Carré zusammen. Die Bürobereiche wurden konsequent als Open-Space-Zonen umgesetzt, um eine offene und kommunikative Unternehmenskultur zu unterstützen.

Der Neubau wurde mit einer modernen Doppel-Fassadenkonstruktion aus hochgedämmten Alu-Profilen mit Dreifachverglasung ausgerüstet. Dies bietet einen hervorragenden Wärmeschutz und hohe Innenoberflächentemperaturen, die wiederum

einen guten Raumkomfort garantieren. Der sommerliche Wärmeschutz wird mittels eines außen liegenden Lamellenraffstores erreicht, wobei Lichtlenkfunktionen im oberen Fensterbereich auch für eine hohe Tageslichtausbeute sorgen sollen. Die Lamellenraffstores liegen im witterungsgeschützten Zwischenraum der Doppel-fassade, die jeweils geschossweise hinterlüftet ist. Zur natürlichen Belüftung der Büroräume kann das 3-Scheibenfenster um ca. 30° nach innen aufgedreht werden.

Die Büroräume werden über thermoaktive Bauteile temperiert. Neben der zentral geregelten Betonkerntemperierung gibt es zusätzliche, individuell regelbare Heiz- und Kühlflächen. Diese Randstreifenelemente haben zudem auch eine raumakustische Wirkung. Sie sind im fassadennahen Deckenbereich angeordnet und über ein Bedientableau im Raum sowie über den Browser am Arbeitsplatzrechner regelbar. Für eine suffiziente Grundlüftung steht zusätzlich eine raumlufttechnische Anlage bereit, die mit Wärmerückgewinnung einen energieeffizienten Betrieb ermöglicht.

Während der Heiz- und Kühlperiode wird der hygienische Luftwechsel über die mechanische Lüftungsanlage sichergestellt. Die Lüftungsanlage läuft täglich von 7 bis 19 Uhr. Ein versuchsweises Abschalten der Lüftungsanlage in den Übergangs-jahreszeiten wurde von den Nutzern nicht akzeptiert. Die Lüftungsanlage wird daher ganzjährig betrieben, wobei die Fenster insbesondere in der Übergangszeit zusätzlich genutzt werden können.

Die Steuerung und Regelung der thermoaktiven Bauteile erfolgt zonenweise. Aufgrund der vorhandenen Trägheit der thermisch aktivierten Bauteile werden ein Speichermanagement und eine auf Wetterprognosen und dem Gebäudenutzungs-plan basierende Betriebsstrategie eingesetzt, um die Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes gezielt und bedarfsgerecht zu nutzen. Der Ladezustand der Bauteile wird dabei über die gemessene Rücklauftemperatur bestimmt.

Die individuelle Regelung der Raumtemperatur erfolgt über ein Bussystem, das aktiv zur bedarfsgerechten Regelung der Raumtemperatur, der Beleuchtung und dem Sonnenschutzsystem eingesetzt wird. Die benötigte Energie für den Heiz- und Kühlbetrieb wird so weit als möglich regenerativ gedeckt. Die Heizwärme wird mit einem Pelletkessel bereitgestellt. Die Kälteversorgung wird über freie Kühlung mit-tels Rückkühler (nachts), adiabater Kühlung der Abluft sowie über hoch effiziente Kältemaschinen mit regelbarem, hohem Temperaturniveau von 10/16 °C bis 14/20 °C sichergestellt.

Neue Methoden der Betriebsführung und Qualitätssicherung sollen gewährleisten, dass geringe Energieverbrauchswerte und thermischer Raumkomfort im Betrieb auch tatsächlich erreicht werden. Dazu werden wichtige Datenpunkte, wie z. B. Temperaturen oder Schaltzustände, überwacht, um bei nicht optimalem Betrieb zeitnah Korrekturen vornehmen zu können.

8 Praxiserfahrungen

Dieses Kapitel stellt Praxiserfahrungen und Betriebsauswertungen von 19 Nichtwohngebäuden mit TABS und den jeweiligen Wärme- und Kälteversorgungssystemen vor. Die dargestellten quantitativen Auswertungen basieren auf mehrjährigen Monitoringkampagnen aus einer Reihe von nationalen und europäischen Projekten ThermCo [92], EnOB [23], EnSan [25] sowie LowEx [44]. Dabei wird jeweils nach Erfolgsfaktoren und Anforderungen an Planung, Ausführung und Betrieb differenziert.

8.1 Feldmessungen und Messdatenauswertung

Eine messtechnische Untersuchung bietet die Möglichkeit, objektive Daten bereitzustellen sowie den thermischen Raumkomfort unter Betriebs- und Nutzungsbedingungen und damit die Wirksamkeit des Kühl- und Lüftungskonzeptes zu bewerten (siehe auch *Kapitel 2.8.3*). Über Gebäudeleitsysteme sind heute in der Regel Daten zur operativen Raumtemperatur, relativen Raumluftfeuchte, Außentemperatur am Gebäude und zu anlagentechnischen Parametern (Temperaturen, Betriebszeiten etc.) verfügbar. Ergänzend können Feldmessungen mit mobiler Messtechnik über mehrere Wochen hinweg im Sommer durchgeführt werden, mit denen neben den Raumkomfortparametern auch das Nutzerverhalten (Öffnen/Schließen von Fenstern und Sonnenschutz) und die bauphysikalischen Eigenschaften des Raumes (Oberflächentemperaturen, thermische Wirksamkeit der Lüftung, Luftgeschwindigkeiten an Lüftungsein- und -auslässen etc.) erfasst werden, siehe *Bild 72*.

Im Rahmen der Monitoringprojekte wurden neben dem thermischen Raumkomfort die Wärme- und Kälteversorgungsanlagen mit fest installierter Messtechnik über mehrere Betriebsjahre detailliert vermessen, siehe *Bild 73*. Dabei wurden Vor- und Rücklauftemperaturen der Wärmequellen und -senken sowie der Wärme- und Kälteerzeuger (insbesondere Wärmepumpen), Volumenströme, Wärme- und Kältemengen sowie der elektrische Energiebezug für die Kompressoren und die Hilfsaggregate mit hochwertigen Messgeräten erfasst und zeitlich hoch aufgelöst aufgezeichnet. Alle Messdaten wurden getrennt für die einzelnen Betriebsjahre auf Plausibilität geprüft und für die Betriebsmodi »Heizen« und »Kühlen« getrennt ausgewertet.

8.2 Gebäudesteckbriefe

Die untersuchten Gebäude mit einer beheizten Nettogrundfläche zwischen 900 und 17 400 m² weisen unterschiedliche architektonische und planerische Ansätze auf; allen gemein ist jedoch die deutliche Reduzierung des Primärenergiebezugs für die technische Gebäudeausrüstung und die Beleuchtung unter einen Grenz-



Bild 72: Beispiele für mobile Messtechnik zur Erfassung des Raumklimas und des thermischen Kühlennergiebezugs; von links nach rechts: 1) Temperatur am Arbeitsplatz, Luftfeuchte und Beleuchtungsstärke, 2) operative Raumtemperatur, 3) Zulufttemperatur, 4) Vor- und Rücklauftemperatur und Volumenstrom des Kühlkreises [Quellen: Fraunhofer ISE und fbt Karlsruhe]

wert von $100 \text{ kWh}_{\text{prim}} / (\text{m}^2_{\text{NGFa}})$ – und damit sind sie bis um einen Faktor 3 geringer als im heute typischen Nichtwohnungsbau. Ermöglicht wird dieser Zielwert durch eine hochwertige und dichte Gebäudehülle, konsequent begrenzte solare Lasten (Sonnenschutzsysteme), effektive hygienische Lüftung mit Wärmerückgewinnung, ausreichend thermische Gebäudespeicherkapazität und reduzierte interne Lasten (effiziente Bürogeräte, Tageslichtnutzung). TABS in Kombination mit natürlichen Umweltenergiequellen bzw. -senken (oberflächennahe Geothermie und Außenluft) im Heiz- als auch im Kühlfall sind ein zentraler Bestandteil des Energieversorgungskonzeptes.

In den meisten Versorgungskonzepten wird eine erdgekoppelte, elektrische Kompressionswärmepumpe eingesetzt, die in sechs Anlagen monovalent betrieben wird. In zehn untersuchten Gebäuden werden neben der Wärmepumpe weitere Wärmeerzeuger wie zum Beispiel Fernwärme, Gas- oder Pelletkessel eingesetzt. In den meisten Anlagen sind Pufferspeicher mit einer Größe von 500 bis 3000 Liter, bzw. spezifisch ausgedrückt: 4 bis 25 Liter pro Kilowatt Heizleistung der Wärmepumpe, eingebunden. In den Nichtwohngebäuden wird die Wärmepumpe meistens nicht zur Trinkwarmwassererzeugung eingesetzt, da der in der Regel sehr geringe Warmwasserbedarf mit dezentralen Durchlauferhitzern wirtschaftlicher gedeckt werden kann.

In 13 der untersuchten Gebäude wird das Erdreich mittels 42 bis maximal 150 m tiefen Erdsonden als Umweltwärmesquelle und -senke erschlossen. Die spezifische Länge der Erdsonden beträgt 15 bis 19 Meter pro Kilowatt Heizleistung der Wärmepumpe. In drei Gebäuden werden grundwassergekoppelte Wärmepumpen eingesetzt. Der geförderte Volumenstrom liegt zwischen 11 und $70 \text{ m}^3/\text{h}$. Im Sommer werden die jeweiligen Umweltwärmesenken vorrangig direkt zur Kühlung herangezogen.



Bild 73: Beispiele für fest installierte Messtechnik; von links nach rechts: 1) Raumtemperatursensor, 2) Lufttemperatur in der Lüftungsanlage, 3) Wärmemengenzähler (inkl. Temperatur), 4) Pumpen- und Ventilzustand in der zentralen Wärme- und Kälteverteilung [Quellen: Fraunhofer ISE und Hochschule Offenburg]

Darüber hinaus stellen in sechs Gebäuden reversible Wärmepumpen mit einer thermischen Leistung von 50 bis 200 kW_{therm} bei Bedarf zusätzlich Kälte bereit.

Die untersuchten Gebäude verfügen über eine Heizung und Kühlung mittels thermoaktiver Bauteilsysteme (TABS). In einigen wenigen werden zusätzlich oder in Sondernutzungsbereichen abgehängte Kühlpaneele eingesetzt. Bei ca. einem Drittel der untersuchten Gebäude werden im Heizfall zusätzlich zu den TABS auch Heizkörper für die Wärmeübergabe genutzt.

Die Messdatenanalyse wurde für jede einzelne Anlage durchgeführt und die Ergebnisse sind anonymisiert im Quervergleich aller Anlagen für folgende Bereiche ausgewertet: Energie- und Effizienzperformance, Temperaturniveaus und dynamisches Temperaturverhalten, Speichernutzung, Wärme- und Kälteverteilung sowie -übergabe im Raum und thermischer Raumkomfort.

Die Bilanzierung folgt den in *Bild 12* in *Kapitel 2.7* definierten Energiebilanzgrenzen der Wärme- und Kälteversorgung. Die vier Bilanzgrenzen umfassen dabei die jeweiligen Subsysteme und Komponenten, wobei jeweils der gesamte Energieeinsatz inklusive Pumpen sowie Mess- und Regelungstechnik berücksichtigt wird.

Tabelle 12 stellt die 19 untersuchten Demonstrationsgebäude und deren Anlagen-technik für die Wärme- und Kälteversorgung vor.

Tabelle 12: Gebäude- und Anlagencharakteristik

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
Gebäude																			
NGF [m ²]	10650	4 600	1 600	2 100	6 911	12 822	1 111	4 100	4 900	900	17 400	4 527	2 500	2 264	1 700	1 347	3 200	4 440	1 600
Nutzung	Schule	Ge- werbe	Büro	Büro	Büro	Büro	Büro	Büro	Büro	Büro	Büro	Büro	Büro	Büro	Büro	Mu- seum	Schu- le	Sport- halle	
Umweltwärmequelle/-senke																			
Typ	GW	GW	GW	GW	28 ES	40 ES	5 ES	40 ES	19 ES	593 Prä- hle	1 EK	48 ES	12 ES	10 ES	11 ES	8 ES	Bo- den- platte	73 Pfäh- le	10 ES
Tiefe [m]	–	–	–	42	99	80	44	130	10	–	107– 149	120	100	150	80	–	10	100	110
spez. Tiefe, Betriebsmodus Heizen [m/kW _{therm,WP}]	–	–	–	20	–	–	53	20	26	–	21	19	15	26	16	–	13	13	12
Leistung, Betriebs- modus Heizen [kW _{therm}]	200	80	50	56	70	–	22	90	62	5	–	55	45	50	30	keine Quelle	–	20	10
Leistung, Betriebsmodus direkte Kühlung [kWh _{therm}]	250	80	115	54	140	–	12	115	76	–	100	20	15	–	30	7,0	–	–	5
Volumenstrom [m ³ /h]	70	11	25	19	54	2,5	–	25 ^H / 32 ^{DK}	34	2	72	13	13	14	8	9,6	9	7	6
Leistung Primär- pumpe [kW _e]	11	2,2	2,4	2,2	5,5	–	0,8	3,0	1,6	0,2	6,2	2,5	1,1	1,6	0,3	0,3	0,9	0,3	0,3

Wärmeversorgungskonzept											
Wärmeerzeuger	WP-e	WP-e	WP-e	WP-e	FW	WP-e	WP-e	WP-e	WP-e	WP-e	WP-th
Leistung, Betriebsmodus Heizen [kW _{therm}]	2.135	54	75	57	-	33	122	2.112	2.7' 1.14	291	75
Heizen	m	b	m	m	-	b	b	m	b	m	-
zusätzlicher Erzeuger	-	Pellet	-	-	Abwärme	-	Gas, (+Solar nur WW)	Nahwärme	-	Solar	Fernwärme
Speicher, Betriebsmodus Heizen [l/kW _{therm}]	11,1	0	11,3	15,8	-	-	121,2 [#]	23,1	7	28,6 [#]	3,4 [#]
Übergabe- system	BKT, FBH	KD, FBH	BKT, RSE, HK	BKT	FBH	FBH, HD, HK	FBH, HD, HK	BKT, FBH	BKT, RSE, HK	BKT, RSE, HK	BKT, FBH
direkte Kühlung	Umweltwärmesenke wird vorrangig zur direkten Kühlung der Gebäude genutzt.										
Leistung, Betriebsmodus aktive Kühlung [kW _{therm}]	-	-	61	-	-	-	114	180	-	67	-
Kälteversorgungskonzept											
Speicher, Betriebsmodus aktive Kühlung [l/kW _{therm}]	-	-	15,2	-	-	-	-	26,3	17,0	-	14,9
Übergabe- system	BKT, FBK	KD, FBH	BKT, RSE	BKT, KD	FBK	KD	KD	FBK, KD	BKT, RSE, FBK	BKT, RSE, FBK	BKT, FBK

Fortsetzung von Tabelle 12

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
Effizienz im Heizfall (JAZ) [kWh_{therm}/kWh_{el} bzw. [kWh_{therm}/kWh_{end}]]**																			
Wärmequelle, BG I	11,0	9,1	20,3	12,0	—	—	—	43,4	27,0	16,0	12,4	14,2	36,8	41,6	26,8	—	—	37,0	1,5
WP-System, BG II	3,1	3,6	4,3	3,8	—	—	—	5,1	2,6	4,1	—	6,1	3,6	4,3	5,0	—	0,8	1,4	1,0
WP, BG WP**	3,8	4,9	4,9	5,1	—	—	—	5,7	2,9	4,4	3,2	6,7	3,9	4,6	5,3	—	0,8	1,4	1,2
Effizienz im Kühlfall (JAZ) [kWh_{therm}/kWh_{end}]]**																			
Wärmesenke, BG I	11,1	17,4	13,6	6,5	16,2	12,0	3,5	7,0	18,8	—	—	15,7	15,0	k. A.	6,4	41,6	—	9,9	15,3
WP-System, BG II	—	—	2,2	—	—	—	—	4,8	2,4	—	—	5,0	—	4,5	—	—	—	—	—
WP, BG WP**	—	—	3,0	—	—	—	—	6,0	3,1	—	—	5,7	—	5,0	—	—	—	—	—

Die Gebäude E und F nutzen die Wärme aus dem Erdreich direkt zur Vorwärmung der Zuluft. Im Gebäude G wird der Speicher gemeinsam mit anderen Wärmeerzeugern genutzt.

Anmerkungen: Kombispeicher (*), mehrere Erzeuger speisen in einen Speicher ein (#), Angaben für ein Betriebsjahr (**), Trinkwarmwasser (WW), Heizen (H), direkte Kühlung mittels Umweltwärmesonde (DK), aktive Kühlung mittels reversibler Wärmepumpe (AK), Kompressionskältemaschine (KKM), Betonkerntemperierung (BKT), Fußbodenheizung/-kühlung (FBK), Randstreichenelemente (RSE), Heizkörper (HK), Konvektor (K), Kühl-/Heizdecke (KD, HD), elektrische Kompressionswärmepumpe (WP-e) und thermische Wärmepumpe (WP-th), Bilanzgrenzen (BG) I und II sowie für Wärmepumpe (BG WP)

8.3 Erfolgsfaktoren und Anforderungen

8.3.1 Nutzung von Umweltenergie zum Heizen und Kühlen

Prinzipiell kann die Energiebereitstellung für TABS auf alle Arten erfolgen, mit denen Heiz- und Kühlenergie üblicherweise in Gebäuden bereitgestellt werden. 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 Hezwassertemperaturen auf maximal 27 bis 32 °C begrenzt [49].

Erfolgsfaktoren

- Die Bauteilaktivierung als Niedertemperatursystem im Heizfall bzw. als Hochtemperatursystem im Kühlfall ermöglicht den effizienten Einsatz von Umweltwärmeketten 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.
- Vorlauftemperaturen aus den Erdsonden liegen im Sommer zwischen 14 und 20 °C und im Winter zwischen 6 und 14 °C. Es wird offensichtlich, dass fast alle untersuchten Anlagen im Betriebsmodus »direkte Kühlung« mit sehr geringen Temperaturdifferenzen von 0,5 bis maximal 2,5 Kelvin zwischen Vor- und Rücklauf betrieben werden, vgl. *Bild 75*. Eine Regelung des Volumenstroms im Kühlfall nach der Temperaturdifferenz wird in keinem der untersuchten Projekte umgesetzt. Die gemessenen Entzugsleistungen betragen im Sommer 10 bis 40 W_{therm}/m_{ES} bezogen auf die Erdsondenlänge. Auch Grundwasser mit seiner ganzjährigen Temperatur von 8 bis 12 °C bietet als Wärmesenke gute Bedingungen.
- Je nach Gebäude- und Nutzungskonzept ermöglicht die direkte Kühlung mittels Erdsonden oder Grundwasserbrunnen die Bereitstellung von Klimakälte mit hoher Energieeffizienz, eine sorgfältige Planung sowohl der Hydraulik als auch der thermischen Auslegung vorausgesetzt. Für das Primärsystem im Betriebsmodus »direkte Kühlung« (ohne den Einsatz einer reversiblen Wärmepumpe) wurden messtechnisch Jahresarbeitszahlen (JAZ) zwischen 10 und 18,8 kWh_{therm}/kWh_{el} (Bilanzgrenze I nach *Bild 12*) nachgewiesen. Bei einer Anlage wird sogar eine Effizienz von 37,5 kWh_{therm}/kWh_{el} erreicht (siehe *Bild 74*). Nur bei drei Anlagen liegt die JAZ unter einem Wert von 10 kWh_{therm}/kWh_{el}. Dabei ergeben sich aufgrund des höheren Hilfsenergieeinsatzes im offenen hydraulischen System für die Grundwassersysteme etwas geringere Jahresarbeitszahlen als für Erdreichsysteme.

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. Der elektrische Hilfsstrombezug für die Primärpumpe liegt im Betriebsmodus »direkte Kühlung« zwischen Werten von 0,15 und 5,8 $\text{kWh}_{\text{el}}/\text{m}^2_{\text{NGFa}}$. Die Messdatenanalyse macht deutlich, dass die korrekte Auslegung des Rohrnetzes und die Dimensionierung der Pumpe sowie die Betriebsführung einen entscheidenden Einfluss auf die Energieeffizienz der Umweltwärmesenke haben. In den untersuchten Projekten variiert die installierte elektrische Pumpenleistung von 20 bis hin zu 230 W_{el} pro Kilowatt Kühlleistung der Wärmesenke. Detailanalysen der Geothermieanlagen zeigen große Unterschiede in der Dimensionierung und Auslegung. Das Druckgefälle der hydraulisch ungünstigen Teilstrecke im Primärkreis – Auslegungskriterium für die Primärpumpe – liegt zwischen 173 bis 543 Pa/m. Dabei verursachen bei keinem der untersuchten Projekte die als U-Rohre ausgeführten Erdsonden nennenswerte Druckverluste. Einen entscheidenden Einfluss auf das resultierende Druckgefälle haben insbesondere die Hauptverteilleitung (vom Verteiler/Sammler bis zum Technikkeller mit in der Regel großer Rohrabmessung), die Einbauten, Durchflussbegrenzer und der Wärmetauscher. Auch die Länge der hydraulisch ungünstigen Teilstrecke im Primärkreis variiert stark von 240 bis 540 m. Unter Berücksichtigung von entsprechenden Optimierungsmaßnahmen bei den einzelnen Anlagen in Bezug auf die thermohydraulische Auslegung ließe sich die installierte elektrische Leistung der Primärpumpen um das 1,3 bis sogar 4,2-fache reduzieren. Im Rahmen der Planung sollten daher klare Vorgaben für die zu erreichende Energieeffizienz der Systeme vereinbart werden, siehe Bild 74.
- Ein optimal dimensioniertes Rohrnetz mit geringen Druckverlusten (kleiner als 300 Pa/m), korrekt dimensionierten Primärpumpen (kleiner als 40 $\text{W}_{\text{el}}/\text{kW}_{\text{therm}}$), einer Volumenstromregelung der Primärpumpe je nach Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf (zwischen 3 und 5 Kelvin) und einer optimalen Betriebsführung (Strombezug kleiner als $2 \text{ kWh}_{\text{el}}/(\text{m}^2_{\text{TABS}})$) lassen bei den untersuchten Anlagen eine Effizienzsteigerung von 34 bis 50% erwarten. Damit wird gezeigt, dass im Betriebsmodus »direkte Kühlung« Jahresarbeitszahlen von mehr als $20 \text{ kWh}_{\text{therm}}/\text{kWh}_{\text{end}}$ erreicht werden können. Der Betrieb von hocheffizienten Geothermieanlagen erfordert eine gute und sorgfältige Planung, sowohl der Hydraulik als auch der thermischen Auslegung des Erdsondenfeldes bzw. der Grundwasser-Brunnenanlage. Falsche Annahmen in der Planung (z. B. ungestörte Erdreichtemperatur, zu geringe Entzugsleistung für Erdsonden, 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.

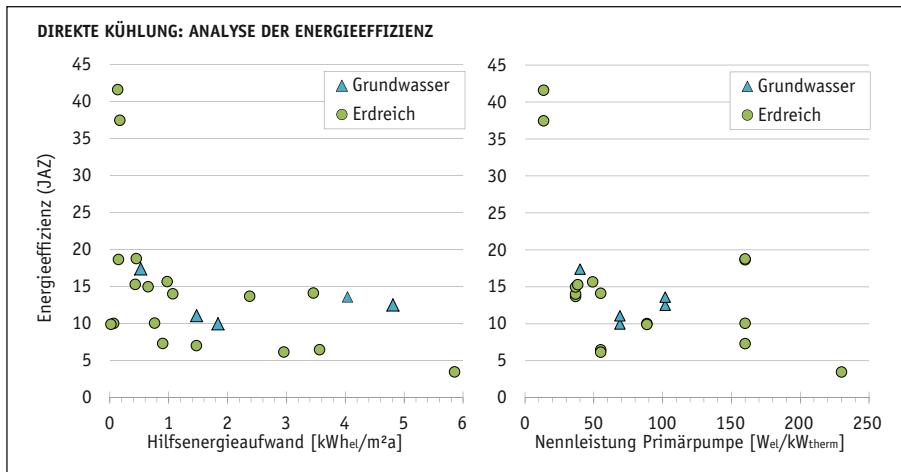


Bild 74: Analyse des Kühlbetriebs im Betriebsmodus »direkte Kühlung«. Links: Energieeffizienz, ausgedrückt als Jahresarbeitszahl, aufgetragen über elektrischen Hilfsenergieaufwand der Primärpumpe [$\text{kWh}_{\text{el}}/\text{m}^2\text{a}$]; rechts: Energieeffizienz, ausgedrückt als Jahresarbeitszahl, aufgetragen über der installierten elektrischen Nennleistung der Primärpumpe [$\text{W}_{\text{el}}/\text{kW}_{\text{therm}}$] pro Kilowatt Kälteleistung der Umweltwärmesenke

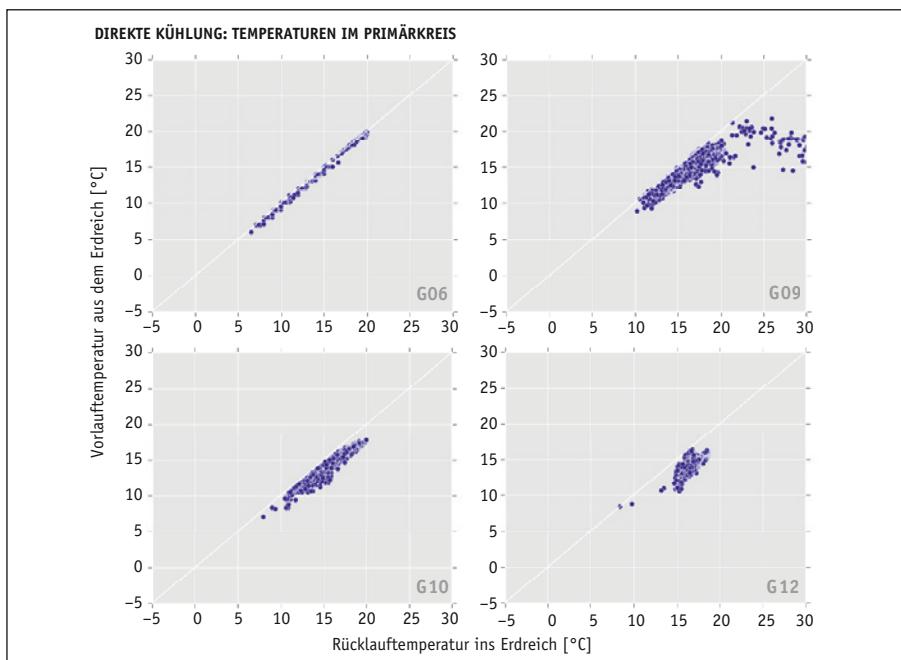


Bild 75: Analyse der Temperaturen im Primärkreis im Betriebsmodus »direkte Kühlung«: Vorlauftemperatur aus dem Erdreich [°C] aufgetragen über der Rücklauftemperatur ins Erdreich [°C]; Darstellung für vier erdgekoppelte Anlagen

- Bei der Nutzung des Erdreichs als Wärmequelle und -senke sollte über das Betriebsjahr hinweg eine nahezu ausgeglichene Energiebilanz zwischen entzogener (Heizfall) und eingespeicherter Wärme (Kühlfall) erreicht werden, um die Leistungsfähigkeit des Geothermiesystems langfristig aufrechterhalten zu können.

8.3.2 Einsatz von Wärmepumpen und Kältemaschinen

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) 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. Erfordern das Gebäude und seine Nutzung eine erhöhte Kühlleistung, so kann Klimakälte durch eine erdgekoppelte, reversible Wärmepumpe energieeffizient bereitgestellt werden.

Erfolgsfaktoren

- 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 [53]. Sowohl die Primärpumpe als auch die Vorlauftemperatur für das TABS-System haben einen entscheidenden Einfluss auf die Leistungs- (COP) und Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpe, vgl. auch *Bild 77*.
- Die Nutzung von erdreichgekoppelten Kältemaschinen stellt ein effizientes und nachhaltiges Konzept zur Gebäudekühlung dar. Auch hier bedingen die relativ hohen Vorlauftemperaturen zur Kühlung von 16 bis 20 °C eine gute Energieeffizienz. Messtechnisch wurden in zwei Projekten Jahresarbeitszahlen von 4,8 bis 5,8 kWh_{therm}/kWh_{el} nachgewiesen [53], vgl. *Tabelle 13*.
- Die Effizienzunterschiede der einzelnen Anlagen ergeben sich hauptsächlich aus den unterschiedlichen Temperaturdifferenzen zwischen Primär- und Sekundärseite (vgl. *Bild 76*), welche primärseitig durch das Temperaturniveau der Wärmequelle und sekundärseitig durch die Art der Übergabesysteme und der hydraulischen Verschaltung vorgegeben werden. Vorrangig wird bei allen Projekten versucht, eine WärmeverSORGUNG auf möglichst niedrigem Temperaturniveau umzusetzen. Im Mittel liegen die sekundärseitigen Temperaturen im Heizkreis zwischen 30 und 43 °C, bei drei Anlagen sogar nur zwischen 28 und 35 °C.

Anforderungen

- Wärmepumpen und Kältemaschinen sind sorgfältig für den jeweiligen Einsatzzweck auszuwählen und zu dimensionieren. Unnötige Sicherheitszuschläge zur Leistung führen zu einer häufigeren Taktung, was sich negativ auf Effizienz und

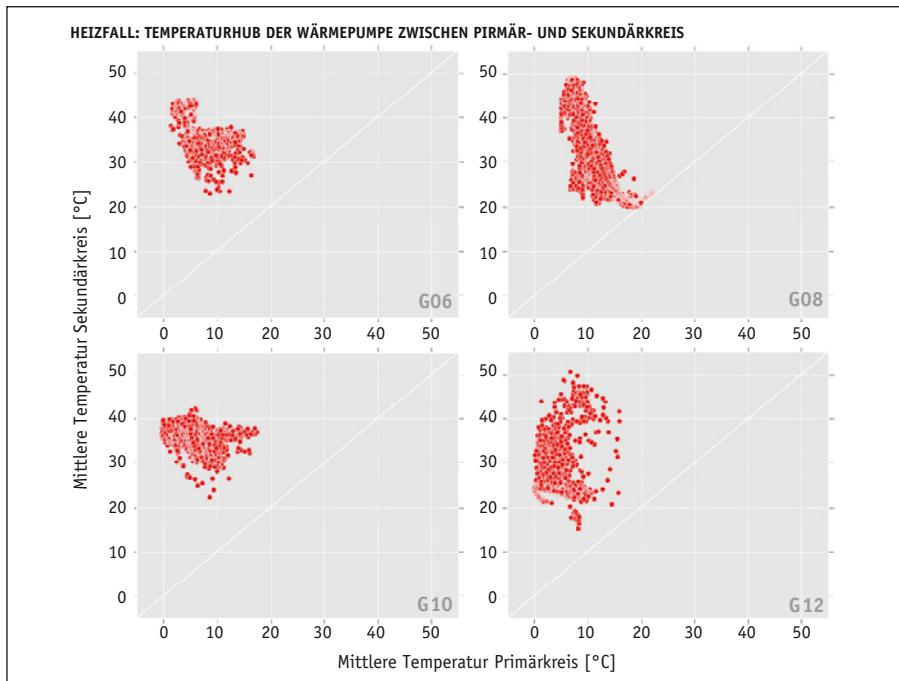


Bild 76: Analyse des Temperaturhubs zwischen Primär- und Sekundärkreis im Heizfall: mittlere Temperatur im Sekundärkreis [°C] aufgetragen über der mittleren Temperatur im Primärkreis [°C]; Darstellung für vier erdgekoppelte Anlagen

Lebensdauer der 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 beträchtliche Unterschiede. Auch sind die elektrischen Standby-Verluste (Regelung, Ölsumpfheizung) erheblich.

- Der Anteil des Strombedarfs der Primärpumpe am Wärmepumpensystem liegt zwischen 6 und 28 %, hat also je nach System einen deutlichen Einfluss auf die Gesamteffizienz. Bei zwei untersuchten Geothermieanlagen wird im Heizfall eine Volumenstromregelung nach der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf umgesetzt. Damit heben sich diese zwei Anlagen mit Temperaturspreizung von im Primärkreis 2 bis 4 Kelvin bzw. 4 bis 6 Kelvin deutlich von den anderen Anlagen ab. Volumenstromregelung wirkt sich unter anderem auf den elektrischen Hilfsenergiebezug der Primärkreispumpe aus, der in diesen zwei Fällen rund 6 % des Gesamtstrombezugs des Wärmepumpensystems beträgt; die geringsten Werte im Quervergleich aller Anlagen.
- Der Einsatz und optimierte Betrieb von Niedertemperatur-Übergabesystemen führt zu einer hohen Energieeffizienz der Wärmepumpen. Analysen machen aber auch deutlich, dass nicht nur die eingestellte Heizkreistemperatur, sondern auch

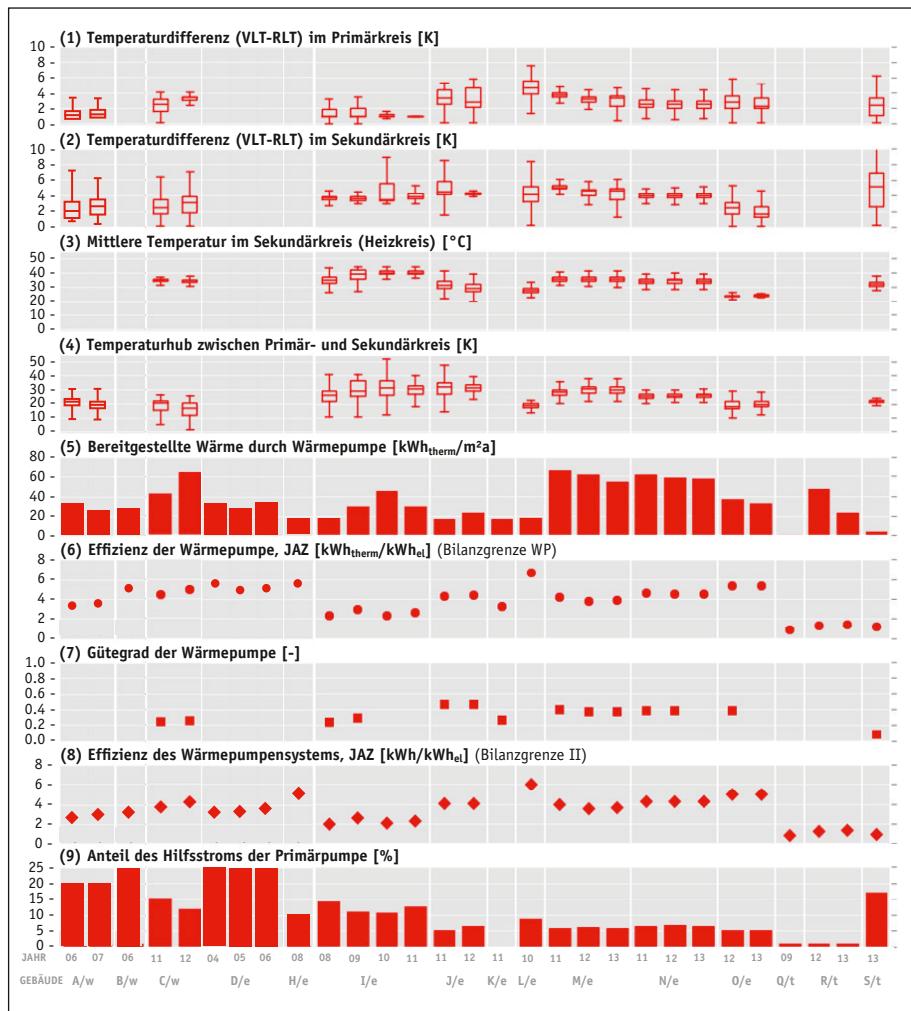


Bild 77: Analyse des Wärmepumpensystems im Heizfall:

- (1) Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur im Primärkreis [K],
- (2) Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur im Sekundärkreis [K],
- (3) mittlere Temperatur im Sekundärkreis (Heizkreis) [°C],
- (4) Temperaturhub zwischen Primär- und Sekundärkreis [K],
- (5) bereitgestellte Wärme [kWh_{therm}/m²a],
- (6) Jahresarbeitszahl (JAZ) der Wärmepumpe (nur Kompressor) [kWh_{therm}/kWh_{el}],
- (7) Gütegrad der Wärmepumpe [-],
- (8) Jahresarbeitszahl (JAZ) des Wärmepumpensystems (Kompressor und Primärpumpe) [kWh_{therm}/kWh_{el}],
- (9) Anteil des Hilfsstroms der Primärpumpe am Gesamtstrombezug des Wärmepumpensystems [%]. Abkürzungen: grundwassergekoppelte, elektrische Wärmepumpen (w), erdreichgekoppelte, elektrische Wärmepumpen (e) und erdreichgekoppelte, thermische Wärmepumpen (t)

die hydraulische Verschaltung von Wärmepumpe, Warmwasserspeicher und Übergabesystem einen Einfluss auf die Energieeffizienz haben. In einem untersuchten Gebäude wird sowohl die Betonkerntemperierung mit einer Temperaturanforderung von 27 bis 30 °C als auch das Lüftungsregister mit einer Anforderung von 40 bis 45 °C vom Warmwasserspeicher versorgt. Damit erfolgt die Wärmebereitstellung immer auf dem von der Lüftung geforderten Temperaturniveau. Folglich erreicht die Wärmepumpe nur eine JAZ von 4,0 $\text{kWh}_{\text{therm}}/\text{kWh}_{\text{el}}$. Dagegen werden bei anderen Konzepten die unterschiedlichen Übergabesysteme mit ihren jeweiligen Temperaturniveaus hydraulisch getrennt, d. h. die Betonkerntemperierung ist durch Umschaltventile direkt an die Wärmepumpe, das Lüftungsregister aber an den Speicher angeschlossen. Messtechnisch konnte für dieses System eine JAZ von 5,2 $\text{kWh}_{\text{therm}}/\text{kWh}_{\text{el}}$ nachgewiesen werden.

8.3.3 Wärme- und Kälteverteilung im Gebäude

Wärme- bzw. Kältebereitstellung bei geringen Temperaturdifferenzen bedeutet auf technischer Ebene einen reduzierten Primärenergieeinsatz. Jedoch haben die geringen Temperaturdifferenzen den Nachteil, 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- bzw. Kälteerzeugung und der Wärme- bzw. Kälteübergabe bei der Optimierung des Gesamtsystems eine zentrale Bedeutung zu. Der spezifische Volumenstrom bei der Bauteilaktivierung variiert zwischen 5 und 16 $\text{kg}/\text{m}^2\text{h}$. Oberflächennahe Systeme werden in der Regel mit höheren Volumenströmen zwischen 20 und 35 $\text{kg}/\text{m}^2\text{h}$ betrieben.

Erfolgsfaktoren

- Die Bauteilaktivierung 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 von Betriebskosten und Stromverbrauch. Durch die Entkopplung von latenten und sensiblen Kühllasten lassen sich auch bei erforderlicher Entfeuchtung der Zuluft Energieaufwand und Kosten deutlich senken.
- Der Einsatz von oberflächennahen TABS-Systemen, wie zum Beispiel Randstreifenelementen, erfolgte in den untersuchten Projekten mit einer raumweisen Regelung des Volumenstroms. Damit kann eine individuelle, raumweise Steuerung der Raumtemperatur umgesetzt werden.

Anforderungen

- In den meisten untersuchten Gebäuden werden alle TABS-Kreise zu gleichen Zeiten jeweils mit der gleichen Vorlauftemperatur versorgt. Damit ist eine Aufteilung der Gebäude in thermische Zonen mit der Möglichkeit zur individuellen Vorlauftemperatureinstellung nicht möglich.
- Der elektrische Hilfsenergiebezug für die Hydraulik im Primär- und Sekundärkreis (Pumpen, keine Ventilatoren für die Lüftung) beträgt für die jeweiligen Gebäude 3 bis 10 $\text{kWh}_{\text{end}}/(\text{m}^2_{\text{NGF}}\text{a})$ 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 $\text{W}_{\text{el}}/\text{kW}_{\text{therm}}$. Für die Kälteverteilung im Gebäude und die Kälteübergabe im Raum ist damit eine zusätzliche Hilfsenergie von 0,7 bis 3,0 $\text{kWh}_{\text{el}}/(\text{m}^2_{\text{TABS}}\text{a})$ erforderlich. Die Wärmeverteilung im Gebäude und die Wärmeübergabe im Raum erfordert einen Hilfsenergieeinsatz für die Hydraulik von 1,5 bis 6,5 $\text{kWh}_{\text{el}}/(\text{m}^2_{\text{TABS}}\text{a})$.
- Der Vergleich aller untersuchten Anlagen zeigt, dass deutliche Unterschiede in der Auslegung der Anlagen bestehen. Das Gesamtdruckgefälle für das Verteil- und Übergabesystem liegt zwischen 100 und sogar 500 Pa/m [41], [42], [45] und [62].
- Die Untersuchung der Anlagen bezüglich der Hauptursache des Druckverlustes zeigt, dass die Rohrwendelsysteme der TABS-Systeme die größten Druckverluste erzeugen. Die TABS-Kreise verursachen im Mittel 50 Prozent des Gesamtdruckverlustes und stellen neben den Anbindeleitungen, Formstücken und Einbauten somit den größten Anteil dar. Dabei werden die Druckgefälle in den TABS hauptsächlich durch die verlegte Rohrlänge, den Nennvolumenstrom pro Segment und den Innendurchmesser der Rohre bestimmt. Hohe Druckgefälle in den untersuchten Verteil- und Übergabesystemen sind vor allem auf sehr lange Rohrleitungen pro Betonkerntemperierung (BKT)-Segment zurückzuführen. In den hydraulisch ungünstigsten Kreisen liegen die BKT-Rohrlängen bei ca. 200 m und sind damit fast dreimal so lang wie beispielsweise in Gebäuden mit niedrigem Druckgefälle. Die langen Rohrleitungen erfordern wiederum hohe Nennvolumenströme, um die Temperaturdifferenzen von 2 bis 3 K nicht zu überschreiten bzw. über die gesamte BKT-Rohrlänge einen Temperaturgradienten zwischen Fluid und Raum und damit eine ausreichende Wärmeübertragung zu erhalten. Die gemessenen Nennvolumenströme pro BKT-Segment liegen in diesen Gebäuden zwischen 380 und 460 l/h, wohingegen in Gebäuden mit deutlich kürzeren BKT-Rohrkreisen die Volumenströme 80 bis 150 l/h betragen [41], [42], [45] und [62].
- Die hydraulischen Systeme sollen daher für einen geringen Druckverlust und eine geringe hydraulische Leistung auslegt werden, um den Hilfsenergieeinsatz für die Pumpen zu reduzieren. Erfahrungen aus Bauprojekten zeigen aber immer wieder, dass gerade bei der Dimensionierung und beim Betrieb des hydraulischen Systems gravierende Fehler gemacht wurden und werden. Eine unzureichende Funktionalität der Wärmeübergabesysteme und ein zu hoher Hilfsenergieaufwand

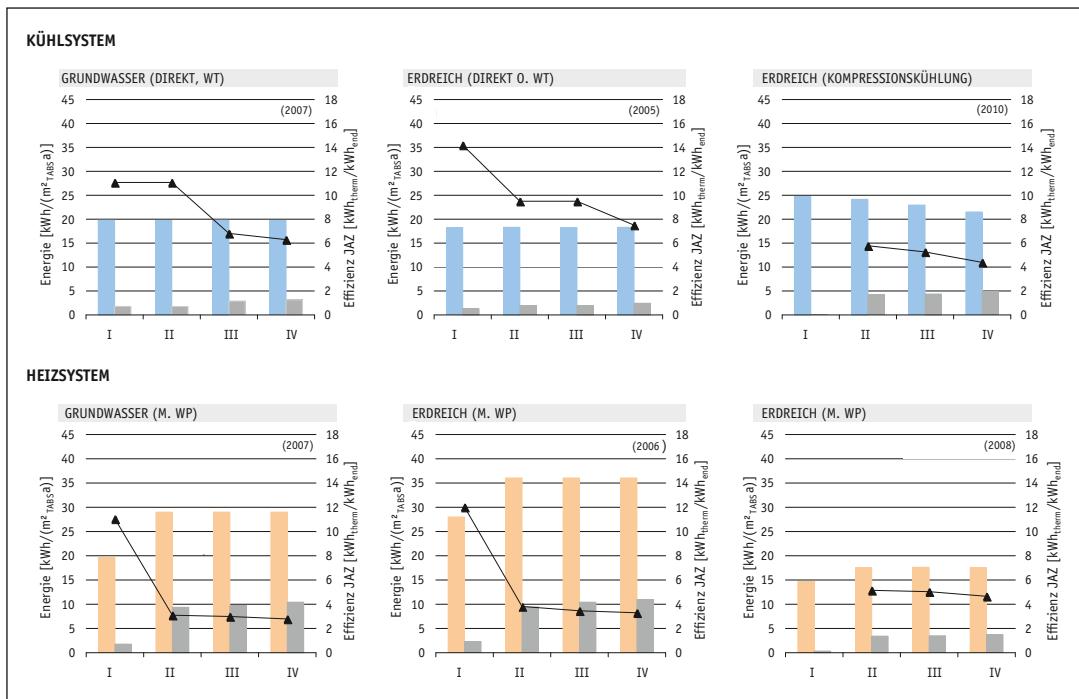


Bild 78: Bewertung des Gesamtsystems im Heiz- und Kühlfall am Beispiel von drei Gebäuden: Bereitstellung von Wärme/Kälte (orange/blau, [kWh_{therm}/(m²a)]) und Hilfsstrombezug für Pumpen und Verdichter bei der Wärmepumpe (graublaue Balken, [kWh_{el}/(m²a)]) und Energieeffizienz (JAZ, [kWh_{therm}/kWh_{el}]) der einzelnen Bilanzgrenzen I bis IV.

Abkürzungen: Wärmetauscher (WT), Wärmepumpe (WP)

liegen meist an einer falschen Planung, einer unzureichenden Ausführung und immer wieder an einem fehlenden hydraulischen Abgleich. Eine eingeschränkte Nutzbarkeit der TABS-Systeme und ein erhöhter Energiebedarf bzw. eine deutlich verringerte Energieeffizienz sind die Folge.

- Die Effizienz des gesamten Heiz- bzw. Kühlsystems (siehe Bild 78) 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 die des gesamten Heizsystems bei 1 bis 2,5 kWh_{therm}/kWh_{el}. Vergleicht man den erforderlichen mit dem installierten elektrischen Leistungsbezug der Umwälzpumpen, zeigt sich in der Mehrzahl der untersuchten Anlagen eine deutliche Überdimensionierung.
- Die Auswertungen zeigen, dass die TABS-Systeme zum einen mit sehr langen Rohrlängen verlegt (bis über 200 m) und zum anderen mit hohen Nennvolumenströmen zwischen ca. 100 und 450 m³/h pro Segment betrieben werden. Die Rohrlängen gehen dabei linear, der Volumenstrom mit der dritten Potenz in die Druckverlustberechnungen ein. Die Anzahl der parallel verlegten Segmente

der Flächentemperiersysteme ergeben sich je nach Etagenverteilungstopologie durch die Abgänge an den verwendeten Verteilerbalken bzw. durch die Anzahl der verwendeten T-Stücke von den Etagenverteilleitungen. Mit dem Einsatz von Parallelschaltungen durch Verteilerbalken mit mehreren Abgängen bzw. durch zusätzliche T-Stücke können die verlegten Rohrlängen und die Nennvolumenströme pro Segment deutlich reduziert werden [41], [42], [45] und [62].

- Die Auswertungen zeigen eine meist ungünstige Pumpendimensionierung, welche einen Betrieb der Pumpen in nicht optimalen Wirkungsgradbereichen der Pumpenkennlinien zur Folge hat. Die VDI 2073 [98] empfiehlt für Anlagen mit unveränderlichem Betriebspunkt, d. h. Anlagen, welche hauptsächlich im Auslegungspunkt betrieben werden, eine Dimensionierung der Pumpe auf den Bereich des optimalen Wirkungsgrades der Pumpenkennlinie. Die untersuchten Anlagen ohne zonenweise bzw. raumweise Regelventile zur Volumenstromdrosselung erfüllen die Bedingung eines unveränderlichen Betriebspunkts. Für Anlagen mit veränderlichem Betriebspunkt sollen nach VDI 2073 Pumpen gewählt werden, bei denen der Betriebspunkt auf der Pumpenkennlinie rechts vom Wirkungsgrad-Optimum liegt, sodass im Teillastbetrieb im optimalen Wirkungsgradbereich betrieben wird. Damit lässt sich der Wirkungsgrad im Betriebspunkt auf der Pumpenkennlinie deutlich erhöhen [42].

8.3.4 Wärme- und Kälteübergabe im Raum

Die große wärmeübertragende Fläche der thermisch aktivierten Decke ermöglicht es, bei bereits geringen Über- bzw. Untertemperaturen nennenswerte Leistungen an den Raum abzugeben. Daher können TABS-Systeme selbst die vergleichsweise geringe Temperaturdifferenz zwischen natürlichen Wärmesenken (Sommer) bzw. Wärmequellen (Winter) und der Raumtemperatur effektiv nutzen [50].

Erfolgsfaktoren

- 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 % relativer 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 Systeme können unter entsprechenden Betriebsbedingungen Kühlleistungen von bis zu 70 W/m² erreichen.
- 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 system-

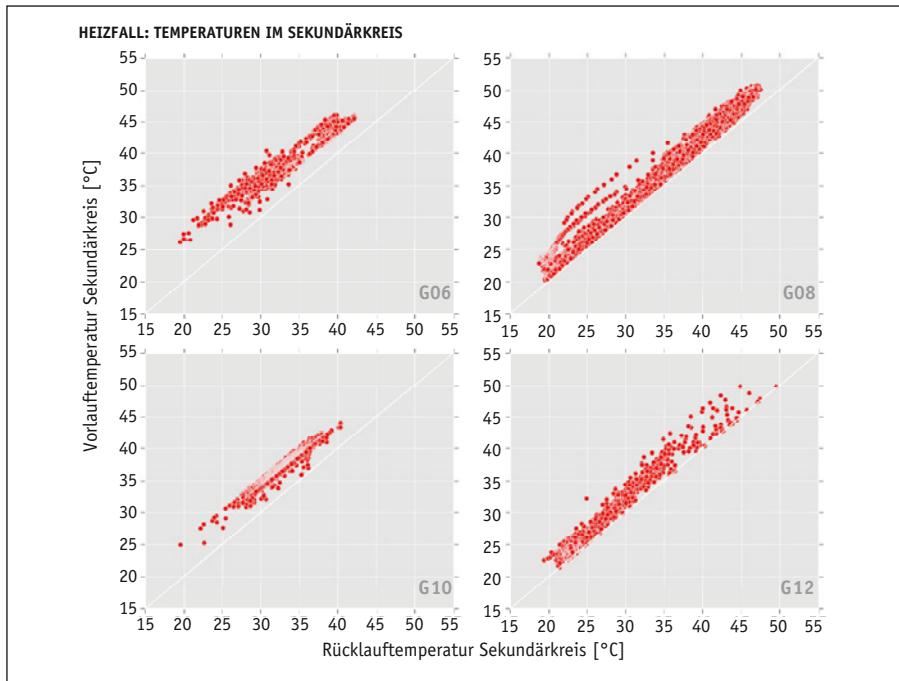


Bild 79: Analyse der Temperaturen im Sekundärkreis im Heizfall: Vorlauftemperatur [°C], aufgetragen über der Rücklauftemperatur [°C]. Darstellung für vier Gebäude

bedingt ein 1,5- bis 2-fach erhöhter Mehrverbrauch an Nutzenergie gegenüber gut regelbaren Systemen, die mit geringen Abweichungen von der Raumsolltemperatur auskommen. Durch den Einsatz von Umweltenergie zum Heizen und Kühlen wird aber der Primärenergieverbrauch der TABS-Systeme entscheidend reduziert, siehe auch *Kapitel 5.1*. Des Weiteren ist der Hilfsenergieeinsatz für die Wärme- und Kälteverteilung (Hydraulik, Aufwand an Transportenergie) bei wassergeführten Systemen geringer als bei luftgeführten.

Anforderungen

- 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.
- Monitoringergebnisse aus den Projekten zeigen, dass die TABS-Systeme oft mit Nennlastvolumenstrom und kleinen Temperaturspreizungen zwischen Vor- und Rücklauf betrieben werden, siehe *Bild 79*. 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 bzw. eine Volumenstromregelung je nach

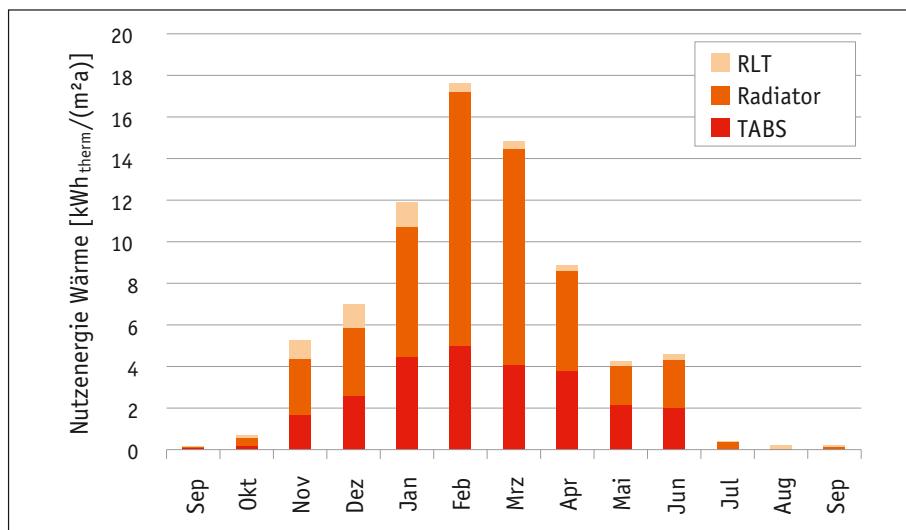


Bild 80: Kombination von Bauteilaktivierung (Versorgung mit erdgekoppelter Wärmequelle, Temperaturniveau 28/30 °C) und Radiatoren (FernwärmeverSORGUNG, Temperaturniveau 75/55 °C). Dargestellt ist die bereitgestellte Wärme [$\text{kWh}_{\text{therm}}/(\text{m}^2\text{a})$], getrennt nach Übergabesystemen. Radiatoren als schnell reagierendes System auf hohem Temperaturniveau decken den Großteil der Heizlast und des Heizwärmeverbrauchs ab und schränken den Einsatz der Bauteilaktivierung deutlich ein.

Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf (zwischen 3 und 5 Kelvin) zielführend.

- Aufgrund der begrenzten Leistungsfähigkeit der Bauteilaktivierung 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.
- Die Kombination der Bauteilaktivierung mit einem regelbaren und schnell reagierenden Zusatzsystem ist dann sinnvoll, wenn in den Nutzungsbereichen erhöhte Komfort- oder sich verändernde Nutzungsbedingungen gefordert sind. Das zusätzliche Heiz-/Kühlsystem (z. B. Randstreifenelemente, Niedertemperaturradiator) sollte aber auf dem gleichen Temperaturniveau wie die Bauteilaktivierung betrieben werden (siehe Monitoringergebnisse in *Bild 80*). 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 zugunsten des Hochtemperatursystems und damit zur Einschränkung des TABS-Betriebs.

8.3.5 Energieeffizienz im Gesamtkonzept

Das Gesamtsystem Umweltenergie – Wärmepumpe/Direktkühlung – Bauteilaktivierung kann eine sehr hohe Energieeffizienz erreichen, wenn die einzelnen Teilsysteme sowohl jeweils für sich als auch im Zusammenspiel in der erforderlichen Qualität geplant, ausgeführt und betrieben werden [48].

In Tabelle 13 sind die Ergebnisse von Querschnittsauswertungen der wesentlichen Kennwerte und Einflussgrößen für die Energieeffizienz von 19 Gebäuden mit TABS und oberflächennaher Geothermie zusammengestellt (siehe Bild 12 in Kapitel 2.7).

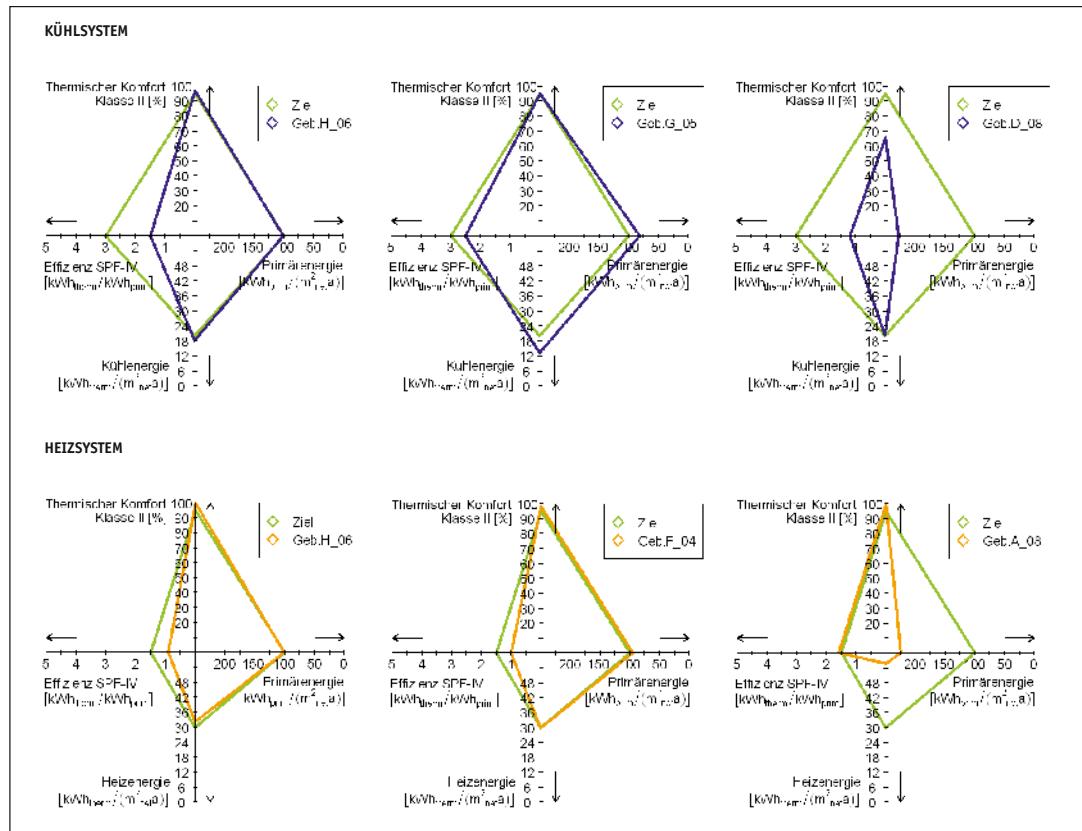


Bild 81: Gebäudefiguren für den Kühlfall (oben) und den Heizfall (unten): thermischer Komfort nach PMV-Komfortmodell EN 15251:2007-08 Klasse II, spezifischer Heiz- und Kühlenergiebezug [$\text{kWh}_{\text{therm}} / (\text{m}^2_{\text{NGFA}})$], Energieeffizienz des Gesamtsystems in Bezug auf Primärenergie (JAZ-IV, Bilanzgrenze IV) [$\text{kWh}_{\text{therm}} / \text{kWh}_{\text{prim}}$] und Primärenergiebezug des gesamten Gebäudes für Heizen, Kühlen, Lüften und Beleuchten. Anmerkung: Primärenergiefaktor Strom 3,0 $\text{MWh}_{\text{end}} / \text{MWh}_{\text{prim}}$. Thermischer Komfort: Prozentualer Anteil der Anwesenheit in der die Komfortanforderungen der Klasse II erfüllt sind. Die Pfeile kennzeichnen die Richtung des Optimums.

Tabelle 13: Zusammenfassung der Energie- und Effizienzkennzahlen für Gebäude- und Energiekonzepte mit TABS und Umweltwärmequellen und -senken; Messergebnisse aus Demonstrationsgebäuden

Bilanzgrenze I: Nutzung von Umweltwärmequellen und -senken zum Heizen bzw. Kühlen	
Effizienz Wärmequelle	JAZ-I: 5 – 12 kWh _{therm} /kWh _{el}
Effizienz Wärmesenke (direkte Kühlung)	JAZ-I: 10 – 18,8 kWh _{therm} /kWh _{el}
spezifische installierte elektrische Leistung der Primärpumpe	20 – 230 W _{el} /kW _{therm}
jährlicher Strombezug der Primärpumpe	0,5 – 4,0 kWh _{el} /(m ² _{NGFa})
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: 2,3 – 6,1 kWh _{therm} /kWh _{el}
Effizienz grundwassergekoppelte Wärmepumpe (einschl. Hilfsenergie)	JAZ-II: 3,0 kWh _{therm} /kWh _{el}
Effizienz erdreichgekoppelte Kältemaschine (einschl. Hilfsenergie)	JAZ-II: 2,1 – 5,8 kWh _{therm} /kWh _{el}
Anteil des Strombezugs der Primärpumpe am Wärmepumpensystem	6 – 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 W _{el} /kW _{therm}
Hilfsenergiebezug für Verteil- und Umwälzpumpen im Heizfall	1,5 – 6,5 kWh _{el} /(m ² _{NGFa})
Hilfsenergiebezug für Verteil- und Umwälzpumpen im Kühlfall	0,7 – 3,0 kWh _{el} /(m ² _{NGFa})
Bilanzgrenze IV: Wärme- und Kälteübergabe im Raum mittels thermoaktiver Bauteilsysteme (TABS)	
Effizienz des Gesamtsystems (Heizfall)	JAZ-IV: 1 – 2,5 kWh _{therm} /kWh _{el}
Effizienz des Gesamtsystems (Kühlfall)	JAZ-IV: 1,5 – 8,0 kWh _{therm} /kWh _{el}
Vorlauftemperatur TABS (Heizfall)	28 – 43 °C
Vorlauftemperatur TABS (Kühlfall)	16 – 22 °C

Erfolgsfaktoren

Aus diesen Auswertungen sowie Betriebserfahrungen in weiteren Projekten resultieren folgende Erfolgsfaktoren in Bezug auf die Energieeffizienz des kompletten Gebäudeenergiesystems:

- TABS weisen systembedingt (in Folge ihrer begrenzten Regelbarkeit) zunächst einen Mehrverbrauch an Nutzenergie gegenüber sehr gut regelbaren Systemen auf. Erst durch eine hocheffiziente Wärme- und Kälteerzeugung kann mit TABS Energie eingespart werden.
- Thermisch aktivierte Betondecken können als Speicher zur Überbrückung einer zeitlichen Differenz zwischen Energieangebot und -bedarf genutzt werden, z. B. durch eine Beladung in der Nacht bei tagsüber genutzten Gebäuden. Die Trennung von Luftkonditionierung (Erwärmung bzw. Kühlung der Zuluft) am Tag vom Betrieb der Bauteilaktivierung in der Nacht ermöglicht somit eine Leistungsreduktion der Wärme- und Kälteerzeuger und spart Investitionskosten [66].
- Die Entkopplung der Raumheizung/-kühlung von der Lüftung ermöglicht es, Lüftungsanlagen auf den lufthygienisch erforderlichen Luftvolumenstrom zu reduzieren, was um bis zu 70% kleinere Luftkanalnetze und reduzierte Energie- und Betriebskosten zur Folge hat. Durch die Entkopplung von latenten und sensiblen Kühllasten lassen sich auch bei erforderlicher Entfeuchtung der Zuluft Energieaufwand und Kosten deutlich senken.

Anforderungen

Eine optimale Energieeffizienz zu erreichen erfordert klare Vorgaben sowie eine sorgfältige Planung, die in Ausführung und Betrieb konsequent umgesetzt werden. Die Auswertungen und Erfahrungen zeigen jedoch auch, dass trotz der bereits erreichten Effizienz die vorhandenen Potenziale i. d. R. noch nicht voll ausgeschöpft sind. Daraus resultieren folgende Anforderungen an Planung, Bau und Betrieb:

- Die für TABS charakteristischen Betriebstemperaturen nahe der Raumtemperatur gehen zwangsläufig mit geringen Temperaturspreizungen zwischen Vor- und Rücklauf einher, wodurch ein verhältnismäßig hoher Volumenstrom gefördert werden muss, um eine bestimmte Wärme-/Kältemenge zu transportieren. Auch dies resultiert in großen Effizienzunterschieden von bis zu einem Faktor fünf (Bilanzgrenze III).
- Alle hydraulischen Systeme, also Primär- sowie Verteil- und Übergaberohrnetze, müssen sorgfältig mit klarer Ausrichtung auf die Energieeffizienz hin geplant und ausgeführt werden. Durch auf geringe Druckverluste dimensionierte Rohrnetze, korrekt dimensionierte Primärpumpen (z. B. kleiner als $40 \text{ W}_{\text{el}}/\text{kW}_{\text{therm}}$) und eine optimale Betriebsführung ließe sich bei den untersuchten Anlagen eine um ca. 34 bis 50% höhere Effizienz erreichen. Im Betriebsmodus »direkte Kühlung« würde dies zu Jahresarbeitszahlen von mehr als 20 führen.

- Die thermische Auslegung von Erdsondenfeldern bzw. Grundwasser-Brunnenanlagen muss ebenso sorgfältig erfolgen. Falsche Annahmen (z. B. die vorliegende ungestörte Erdreichtemperatur, verfügbare Grundwasser-Fördermengen) und Fehler bei der Dimensionierung können zu unzureichenden thermischen Leistungen bzw. Ergiebigkeiten führen, zumindest aber die Energieeffizienz beeinträchtigen. Im Extremfall kann sogar die Nachrüstung eines zusätzlichen Wärme- oder Kälteerzeugers unumgänglich werden.
- Wärmepumpen und Kältemaschinen sind sorgfältig für den jeweiligen Einsatzzweck auszuwählen und zu dimensionieren. Unnötige Sicherheitszuschläge bei der Leistung führen zu einer häufigeren Taktung, was sich negativ auf Effizienz und Lebensdauer der 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 Standby-Verluste (Regelung, Ölumpfheizung) erheblich.
- Durch Maßnahmen in der Betriebsführung und Regelung lässt sich der Hilfsenergieaufwand (Pumpenstrombezug) häufig deutlich reduzieren. Dies betrifft: Reduzierung des Teillastverhaltens, Leistungsabstimmung der einzelnen Verbraucher und Vermeidung zu geringer Temperaturspreizungen. Auf eine möglichst weitgehende Reduzierung der Betriebszeiten ist zu achten, ggf. sind ein intermittierender Pumpenbetrieb bzw. eine Volumenstromregelung je nach Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf (zwischen 3 und 5 Kelvin) zielführend.
- Ein betriebsbegleitendes Monitoring, die Überwachung und Analyse der Performance tragen entscheidend zur Reduzierung des Energiebezugs und zur Steigerung des thermischen Komforts bei.

8.3.6 Thermischer Raumkomfort im Sommer und Winter

Der thermische Raumkomfort wird in diesen TABS-Gebäuden entsprechend der in *Kapitel 3.2* vorgestellten Methodik bewertet.

Erfolgsfaktoren

- Detaillierte Auswertungen zu den Gebäuden zeigen, dass durch Kühlung mit thermoaktiven Bauteilsystemen (insbesondere durch Betonkernaktivierung) die geforderten Raumtemperaturen unter Berücksichtigung des Nutzerverhaltens (fast) immer eingehalten werden können, siehe *Bild 82*.
- Betrachtet man die mittlere operative Raumtemperatur im Sommer, so zeigt sich, dass die Anforderungen für die Komfortkategorie II für 90 % zufriedene Nutzer nur sehr selten und nur während einzelner Stunden überschritten werden. In der Komfortanalyse der einzelnen Gebäude zeigt sich kein ausgeprägter Unterschied bei den jeweils eingesetzten Umweltenergiesenken – eine ausreichende Dimensionierung und eine vernünftige Betriebsführung vorausgesetzt. Das Erdreich

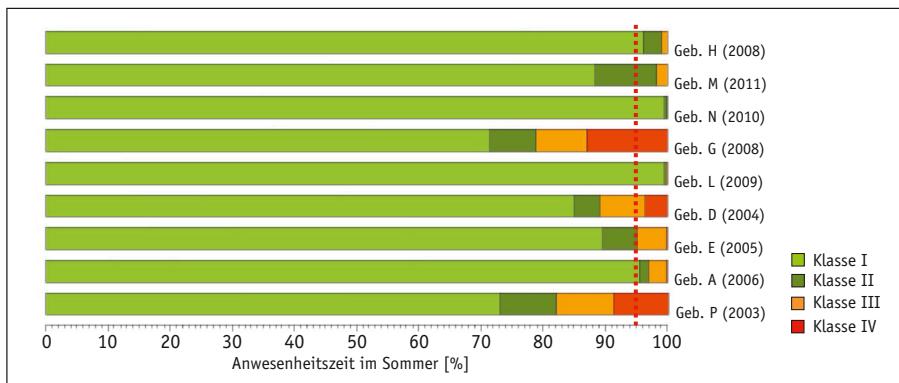


Bild 82: Bewertung des thermischen Raumkomforts während der Anwesenheit des Nutzers nach der Europäischen Komfortnorm DIN EN 15251, PMV-Komfortmodell: Anwesenheitszeit im Sommer [%], während der das Gebäude die Anforderungen der Komfortklassen I bis II erfüllt (Überschreitung der oberen Komfortgrenzen). Die meisten Gebäude gewährleisten zu 95 % der Nutzungszeit einen Raumkomfort nach den Anforderungen der Kategorie II.

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 Bauteilaktivierung in diesen Gebäuden in Kombination mit einer maschinellen Lüftung den thermischen Komfort ohne zusätzliche statische Heizflächen gewährleisten. Die nach DIN EN 15251:2012-12 festgelegten Raumtemperatursollwerte von minimal 19 bis 21 °C werden nur selten unterschritten.

- Die nahe 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

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

- Aufgrund der Systemträgeheiten und der Regelung der TABS nach thermischen Zonen ist der Nutzereinfluss auf die Raumtemperaturregelung stark eingeschränkt. Die Nutzer sollen entsprechend 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 sicherzustellen.
- Überzeugende Gebäudekonzepte zeichnen sich dadurch aus, dass dem Nutzer Einfluss auf Raumklima und Luftqualität ermöglicht wird, denn die Nutzerzufriedenheit erhöht sich nachweislich durch die Möglichkeiten zur effektiven Einflussnahme auf die Raumbedingungen. Hierzu gehört in TABS-Gebäuden der Einsatz von einstellbaren Raumthermostaten in Verbindung mit einem schnell reagierendem Zusatzsystem.

8.4 Fehlerquellen in Planung und Ausführung

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

- Der Bemessung eines Erdsondenfeldes für eine direkte geothermische Kühlung wurde ein Literaturwert für die ungestörte Erdreichtemperatur von 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.
- Bei einem anderen Projekt wurde trotz korrekter Entwurfsplanung das gesamte TABS-Versorgungsnetz in der Ausführungsplanung unter der Annahme einer zu hohen Temperaturspreizung dimensioniert und ausgeführt (Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf mit 4 statt mit 2 Kelvin angenommen). Bei gegebener Heiz- bzw. Kühlleistung wurde der Volumenstrom entsprechend mit nur 50% der tatsächlich erforderlichen Fördermenge angenommen. Das so ausgeführte Rohrnetz wies im Betrieb so hohe Strömungswiderstände auf, dass der ursprünglich geplante Volumenstrom nicht gefördert werden konnte. Ein Austausch der zentralen Verteilleitung und der Hauptverteilung wurde notwendig.
- 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. Im vorliegenden Fall konnte dieses Problem durch Veränderung der Regelungs-Sollwerte beseitigt werden, ohne dass der thermische Komfort im Gebäude darunter 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 führen Probleme mit dem Aufbau der Wassersäule beim Einschalten der Grundwasserpumpe sogar dazu, dass diese von den Betreibern ständig in Betrieb gehalten werden muss und damit ein Vielfaches der eigentlich 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 diese Fehler nicht augenscheinlich. Die Folge ist dann i. d. R. ein überhöhter Energieverbrauch, der die ökologischen und ökonomischen Vorteile des Gesamtsystems zunichten kann.

Darüber hinaus können direkt beim Bau von TABS auf der Baustelle 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 Leerhöhe in den Decken vorbereitet sein. In Projekten, bei denen dies missachtet wurde, war die »Trefferquote« beim Bohren mitunter unerfreulich hoch. Ist eine TABS-Leitung innerhalb des Bauteils beschädigt, muss es an der betreffenden Stelle geöffnet und ein neues Rohr- oder Passstück eingefügt werden. Dies ist technisch möglich und durchaus erprobt, aber sehr aufwändig (und kostenintensiv).
- Wenn die Rohre einer Bauteilaktivierung nahe der (meist unteren) Bewehrung einbetoniert werden sollen, ist darauf zu achten, dass scharfkantige Enden von Bindedrähten der Bewehrung die wasserführenden Rohre nicht beschädigen. In diesen Fällen können vorgefertigte Elemente aus Beton-Fertigteilen mit integrierten Rohrschlangen eine Alternative sein.
- TABS-Rohre sind vor und während des Betonierens sowie während des Aushärtens des Betons mit Wasser unter Druck gefüllt. In einem Rohbau überwinterte das mit dem Wasser gefüllte System. Die dadurch aufgetretenen Frostschäden waren so erheblich und irreparabel, dass die Bauteilaktivierung außer Betrieb genommen und durch abgehängte Kühlsegel ersetzt werden musste.

8.5 Lessons learned

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 sowie bei Nutzung von erneuerbarer Umweltenergie

(v.a. oberflächennaher Geothermie) ein hohes Maß an thermischer Behaglichkeit in Verbindung mit einer hohen Energieeffizienz 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 Möglichkeiten hin zu 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 an und Verbrauch von Energie für die Gebäudetechnik bei Niedrigenergiegebäuden muss dem Hilfsenergieverbrauch für die Hydraulik von wassergeführten Systemen (v.a. für Pumpen) eine größere Bedeutung beigemessen werden. Für das Gesamtsystem im Betriebsmodus »direkte Kühlung« ohne Kältemaschine (Bereitstellung, Verteilung und Übergabe von Kälte – Bilanzgrenzen I bis IV) sollte eine Energieeffizienz in der Größenordnung 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.

9 Energieeffiziente Kühlung in unterschiedlichen (europäischen) Klimazonen

Dieses Kapitel diskutiert, inwieweit Kühlkonzepte mit Bauteilaktivierung auf andere Klima übertragen werden können [79]:

- Eine Simulationsstudie vergleicht Kühlkonzepte für ein Beispielgebäude in verschiedenen Klimazonen. Während im kühleren Sommerklima die Kühlung oft über eine luftgeführte, passive Kühlung effizient realisiert werden kann, spielen im wärmeren Sommerklima die dynamischeren Lasten eine große Rolle bei der Wahl des Kühlkonzeptes (siehe *Kapitel 9.1*).
- Eine vergleichende Analyse von Kühlkonzepten in acht Nichtwohngäuden in verschiedenen europäischen Klimazonen zeigt Stärken und Schwächen der gewählten Konzepte am jeweiligen Standort und in der konkreten Situation (siehe *Kapitel 9.2*).

9.1 Ergebnisse einer Simulationsstudie

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) Kühlenergiebedarf und den damit einhergehenden elektrischen Endenergiebezug zur Verfügung. Gemeinsam mit der Bewertung des thermischen Raumkomforts können schließlich Vorschläge für geeignete Kühlkonzepte unterbreitet werden.

Gebäudemodell

Als Gebäudemodell wird ein dreistöckiges Bürogebäude mit zwei Büroreihen mit einer Raubreite von 3,9 m, einer Raumlänge von 5,2 m und einer Raumhöhe von 3,0 m (lichte Raummaße) verwendet, die über einen Flur mit einer lichten Raumbreite von 2,6 m erschlossen werden. Dieser Gebäudetyp wird häufig als Referenzgebäude gewählt [105]. 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} (siehe Ansicht des Gebäudes in *Bild 83*).

Das Simulationsmodell erfüllt als europäisches Vergleichsgebäude die Anforderungen der EPBD 2002 (Richtlinie 2002/91/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2002 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden) [26]. Die bauphysikalischen Parameter wurden in Anlehnung an EnEV 2009 [24] und DIN 4108-2 festgelegt:



Bild 83: Gebäudesimulationsmodell: Typisches Bürogebäude für nord-, mittel- und südeuropäische Länder [Quelle: ArGe Architekten Harter + Kanzler – Broghammer – Jana – Wohlleber]

- 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 $g_{\perp} = 0,58$
- variable Verschattung mit externen Jalousien mit $F_{c,\text{geschlossen}} = 0,06$, 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 (VDI-Kühllastregeln), mit einer Nutzung von 08:00 bis 18:00 (UTC) während der Werkstage. Die internen Wärmegewinne werden mit 156 Wh/m^2 pro Tag angenommen und entsprechend einem gemessenen Lastprofil abgebildet.

Kühl- und Lüftungskonzepte

Bild 84 zeigt fünf Kühlkonzepte, die alle eine Fensterlüftung zulassen. Das Nutzerverhalten wird dabei in Anlehnung an ein Modell von Herkel [33] abgebildet. Bei vier Konzepten wird ein Abluftventilator eingesetzt, der tagsüber einen hygienischen Luftwechsel von $40 \text{ m}^3/\text{h}$ pro Person gewährleistet.

- Die passive Kühlung umfasst alle Maßnahmen, um Wärmelasten zu reduzieren und die niedrigeren ausfallenden 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; er überschreitet oft 2 h^{-1} in den nördlichen Sommerklimazonen und erreicht selten Werte über $1,8 \text{ h}^{-1}$ in den südlichen.
- 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. der mittleren Raumtemperatur liegt.

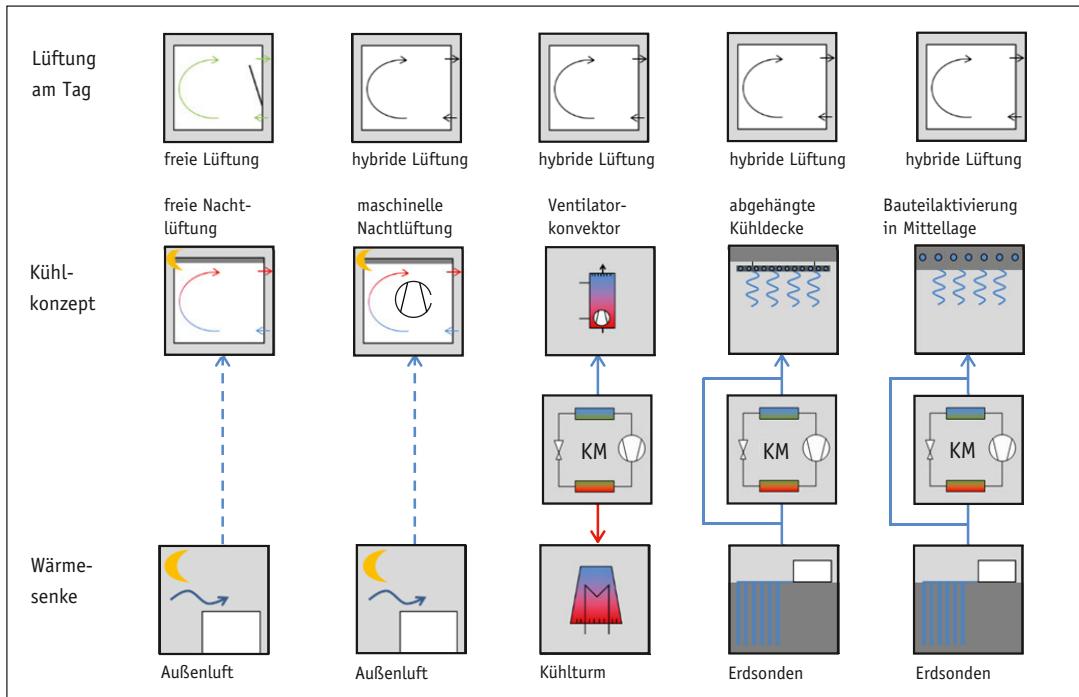


Bild 84: Fünf Kühlkonzepte: passive Kühlung, mechanische Nachtluftung, aktive Kühlung mit Kompressionskältemaschine und wasserbasierte Niedrigenergiekühlung (abgehängte Kühldecke und Bauteilaktivierung), einmal mit oberflächennaher Geothermie und einmal mit Kompressionskältemaschine, falls erforderlich

- Ein Ventilatorkonvektor 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 Nasskühlturn als Wärmequelle genutzt wird. Die maximale Kühlleistung wird auf 90 W/m² 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 kWh_{therm}/kWh_{el} in Palermo.
- 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/m² bei einer Temperaturdifferenz von 8 K. Die Kühldecke nimmt 70 % der Bürofläche ein. Die tatsächliche maximale Kühlleistung liegt beispielsweise am Standort Mailand bei 77 W/m²_{NGF}, wobei die Vorlauftemperatur nach einem Vorschlag von Olesen [63] gemäß $\vartheta_{VL} = 18^\circ\text{C} + 0,35 \cdot (18^\circ\text{C} - \vartheta_{\text{außen}} [\text{°C}])$ geregelt und standortabhängig auf minimal 16 °C begrenzt wird. Ein Erdsondenfeld dient als Wärmequelle, wobei die

Jahresmitteltemperatur des Erdreichs für jede Klimazone separat bestimmt wird. Sie steigt von 6,3 °C im Norden auf 19,6 °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 kWh_{therm}/kWh_{el} erreicht werden, weil nur die Hilfsenergie für die Umwälzpumpe aufgebracht werden muss. Demgegenüber sinkt die Jahresarbeitszahl in Rom auf nur 3,4 kWh_{therm}/kWh_{el}, weil dort oft aktiv gekühlt werden muss.

- Die Bauteilaktivierung wird in dieser Studie nur während der Nachtstunden betrieben. Durch die hohe thermische Trägheit ist die spezifische Kühlleistung jedoch ganztägig bei rund 40 W/m²_{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 (14 kWh_{therm}/kWh_{el}) erreicht wie für die Kühlung über abgehängte Kühldecken. In Rom liegt die Jahresarbeitszahl mit 3,8 kWh_{therm}/kWh_{el} wegen der höheren Vorlauftemperaturen für die Bauteilaktivierung gegenüber der abgehängten Kühldecke etwas höher.

Wetterdaten

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

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

Als Klimadatenbank wird METEONORM [64] verwendet, wobei die oben genannten Sommerklimazonen in guter Näherung den USDA Hardiness Zones (Kategorisierung von Klimazonen) 5 für Nordeuropa bis 10 für Südeuropa entsprechen.

9.1.1 Gebäude- und Anlagensimulation

Die Simulation wird entsprechend des so genannten »Klimaerlasses« [8] und unter Berücksichtigung der *BBR-Richtlinie zur dynamisch-thermischen Simulationsrechnung für den Sommerlastfall* [6] durchgeführt. Als Simulationsprogramm wird IDA-ICE [38]

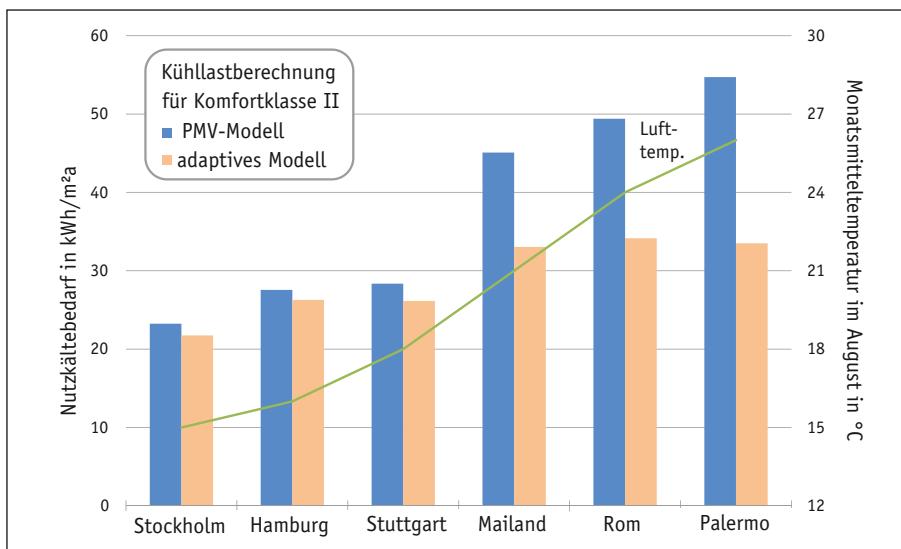


Bild 85: Kühlenergiebedarf im europäischen Vergleich: Berechneter thermischer Kühlenergiebedarf [$\text{kWh}_{\text{therm}}/\text{m}^2\text{a}$] für ein typisches Niedrigenergiegebäude mit Büronutzung für sechs europäische Standorte zur Gewährleistung des thermischen Raumkomforts nach Klasse II des PMV (blauer Balken) bzw. des adaptiven Komfortmodells (orangener Balken) der DIN EN 15251:2007-08. Zusätzlich dargestellt ist die mittlere Monatstemperatur im August [°C]. Der Kühlenergiebedarf steigt von Nord nach Süd, wobei der Nutzkältebedarf jeweils höher ist, wenn der thermische Komfort gemäß PMV-Modell anstatt des adaptiven Komfortmodells nach EN 15251 eingehalten werden soll.

verwendet. 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 für das adaptive Komfortmodell der EN 15251 bestimmt. Der jährliche Endenergiebedarf für Lüftung und Kühlung wird gemäß EN 15241 und EN 15243 berechnet, wobei der Endenergiebedarf für maschinelle Lüftung während der Nutzungszeit mit 2,9 kWh/m²a unabhängig vom Standort angenommen wird.

Erwartungsgemäß steigt die spezifische Kühllast [W/m²] von Nord nach Süd in erster Linie infolge der höheren Außentemperaturen und zu einem geringeren Anteil aufgrund der steigenden solaren Wärmelasten an. Bild 85 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 Komfort-

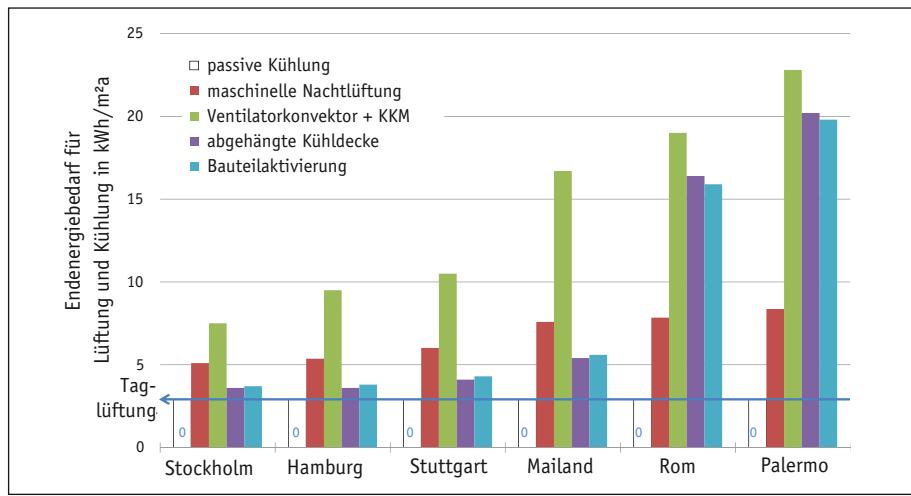


Bild 86: Endenergiebedarf für Lüftung und Kühlung nach DIN EN 15241 und DIN EN 15243

modellen jedoch stark ausgeprägt; so steigt der Nutzkaltebedarf in Rom von 34,1 für das adaptive Komfortmodell auf 49,4 kWh/m²a für das PMV-Modell.

Bild 86 zeigt deutlich, dass der Endenergiebedarf für die luftgeführte Kühlung mit Ventilatorkonvektoren (bei Kältebereitstellung über eine Kompressionskältemaschine und mit einem Kühlurm 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. Der Endenergiebedarf für die maschinelle Nachtlüftung steigt nur geringfügig, für die wasserbasierten Systeme allerdings markant an. Denn die Erdtemperatur in Südeuropa ist zu hoch, um direkt über die Erdsonde als Wärmesenke genutzt werden zu können. Hier kann die Erdsonde lediglich zur Rückkühlung der Kompressionskältemaschine eingesetzt werden.

Bild 87 zeigt die Grenzen der einzelnen Kühlkonzepte beim 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 ausreichenden thermischen Komfort gewährleisten.
- Eine aktive, luftgeführte Kühlung kann in allen Klimazonen durchgängig eine ausreichend hohe Kühlleistung bereitstellen, um auch hohe Komfortansprüche zu erfüllen.

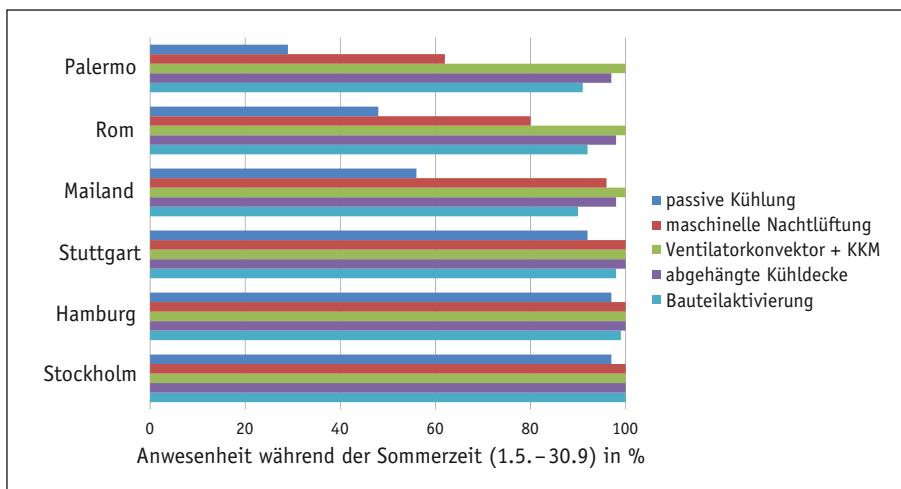


Bild 87: Thermischer Komfort für verschiedene Kühlkonzepte in unterschiedlichen Sommerklimazonen für das adaptive Komfortmodell nach EN 1525

- Wassergeführte Flächentemperiersysteme sind grundsätzlich in allen Klimazonen gut geeignet, wobei die thermisch träge Bauteilaktivierung bei hohen und fluktuierenden Wärmelasten unter südeuropäischen Bedingungen an ihre Leistungsgrenze stößt. Hier sind abgehängte Kühlsysteme von Vorteil.

9.1.2 Analyse der Simulationsergebnisse

Die Einzelergebnisse der Simulation zeigen kein einheitliches Bild. Erst eine Kombination der beiden Aspekte »Endenergiebedarf für Lüften und Kühlen« und »thermischer Komfort« liefert eine Auswertung unter planerischen Gesichtspunkten. Da einige Kombinationen zu vergleichbaren Ergebnissen führen, wird der Aspekt »Investitionskosten« in diesen Fällen als dritter Parameter im Rahmen einer multi-kriteriellen Analyse hinzugezogen.

Bild 88 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 tief stehender Sonne effizient durch die verhältnismäßig kühle Außenluft abgeführt werden. Eine maschinell unterstützte Nachtlüftung verbessert die Regelbarkeit und die Wärmeabfuhr während hochsommerlicher Perioden.

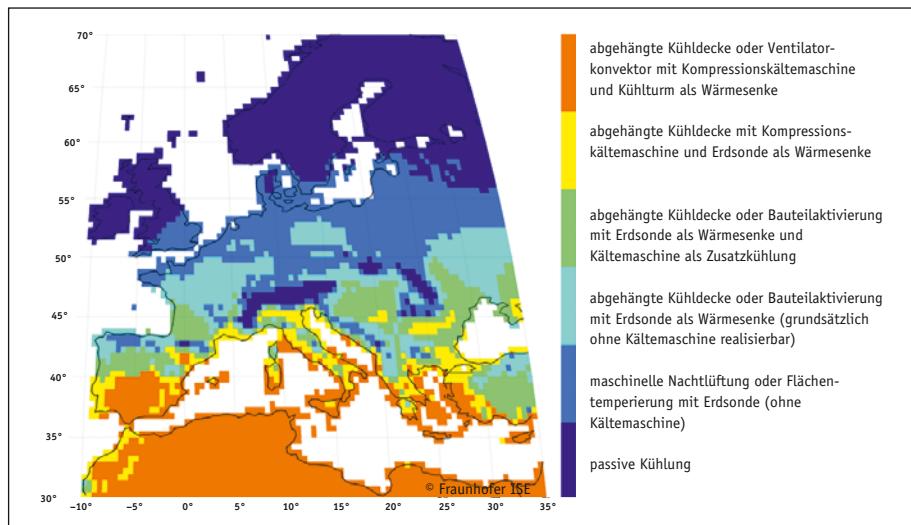


Bild 88: Geeignete Kühlkonzepte (bewertet nach Energieeffizienz und thermischem Komfort) für verschiedene Sommer-Klimazonen

- kann im mitteleuropäischen Sommerklima die oberflächennahe Geothermie die erforderliche Kühlleistung zur Verfügung stellen. Falls eine zusätzliche aktive Kälteerzeugung (z. B. eine 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 Unterschied zwischen der Umgebungs- und der Komforttemperatur gering ist, wird oft eine aktive Kühlung erforderlich, um die Komfortanforderungen zu erfüllen.

9.2 Evaluation auf Basis von Messdaten

Messdaten aus acht europäischen Nichtwohngebäuden (in Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Italien, Rumänien, Tschechien) werden zur Analyse unterschiedlicher Lüftungs- und Kühlenergiekonzepte mit niedrigem Energieeinsatz herangezogen [92]. Die Kühlkonzepte werden nach

- dem thermischen Kühlenergiebezug
- dem thermischen Raumkomfort (getrennt für Raumtemperatur und -feuchte) 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. Diese Parameter werden mit entsprechenden Gebäudesignaturen in einen Zusammenhang gebracht und die Zielstellung wird überprüft. Detaillierte Komfortuntersuchungen geben Hinweise auf die Wirksamkeit der eingesetzten Kühltechnologien in den jeweiligen Klimazonen. Daraus lassen sich Handlungsempfehlungen ableiten.

9.2.1 Gebäude und Konzepte

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 Nutzung von natürlichen Umweltwärmesensen deutlich zu senken, dabei aber auch die Anforderungen an den thermischen Raumkomfort zu gewährleisten. Mit Ausnahme des dänischen Gebäudes können die Nutzer in den Gebäuden Fenster öffnen und schließen, den Sonnenschutz manuell bedienen und ihre Kleidung den Umgebungstemperaturen anpassen. Die meisten Gebäude haben eine maschinelle Lüftungsanlage. In den Gebäuden mit einer Zu- und Abluftanlage wird die Zuluft in der Regel etwas gekühlt. Alle verzichten auf eine klassische Klimatisierung mit Luftentfeuchtung. Informationen zum Heiz- und Kühlkonzept der untersuchten Gebäude sind in *Tabelle 14* zusammengefasst und schematisch in *Bild 89* dargestellt. Die nachfolgend diskutierten Ergebnisse zum thermischen Raumkomfort basieren auf einjährigen Monitoringkampagnen mit hoher Messwertauflösung (Raumtemperatur, Raumfeuchte und Außenklima am Gebäudestandort). Messkampagnen und Auswertung werden detailliert in [51] beschrieben.

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

Tabelle 14: Informationen zur Bauphysik sowie zum Heiz- und Kühlkonzept der untersuchten Gebäude. Zusätzlich beschrieben ist das Gebäudesimulationsmodell für ein typisches Niedrigenergiegebäude (SIM), siehe Kapitel 9.1. Die grau hinterlegten Felder kennzeichnen die eingesetzten Technologien.

Gebäude	Bauphysik	Übergabesystem	Kälteerzeugung/ Wärmesenke	Lüftung	
				WRG [%] ²	Nachtlüftung ³
CZE	0,2	1,2	k.A.	i	1
DEN	0,2	0,3	30–60	i	3
FIN	0,22	1,1	k.A.	i+a	12
FRA	0,43	2,2	0,1	40	i
GER	0,3	1,4	0,27	20–87	a
GRE	0,25	2,7	0,7	20–81	i+a
ITA	0,34	1,4	0,6	20	a
ROU	0,82	2,5	0,32	30–40	a
SIM ⁸	22	0,24	1,8	0,4	35
				a	3
				3	Simulation und Bewertung unterschiedlicher Wärmesenken, Kälteübergabe- und Lüftungssysteme

¹ zu öffnende Fenster in Räumen; ² Wärmerrückgewinnung (WRG) [%]; ³ freie (f) bzw. maschinelle (m) Nachtlüftung; ⁴ Anzahl der vermessenen Referenzräume zur Untersuchung des thermischen Raumkomforts; ⁵ außen liegende Verschattung (a), innen liegende Verschattung (i); ⁶ gekühlte (k) bzw. erwärmte (h) Zuluft; ⁷ ein Großraum- und zwei Zweipersonenbüros; ⁸ simuliert wird ein Gebäudeausschnitt; k.A.: keine Angabe

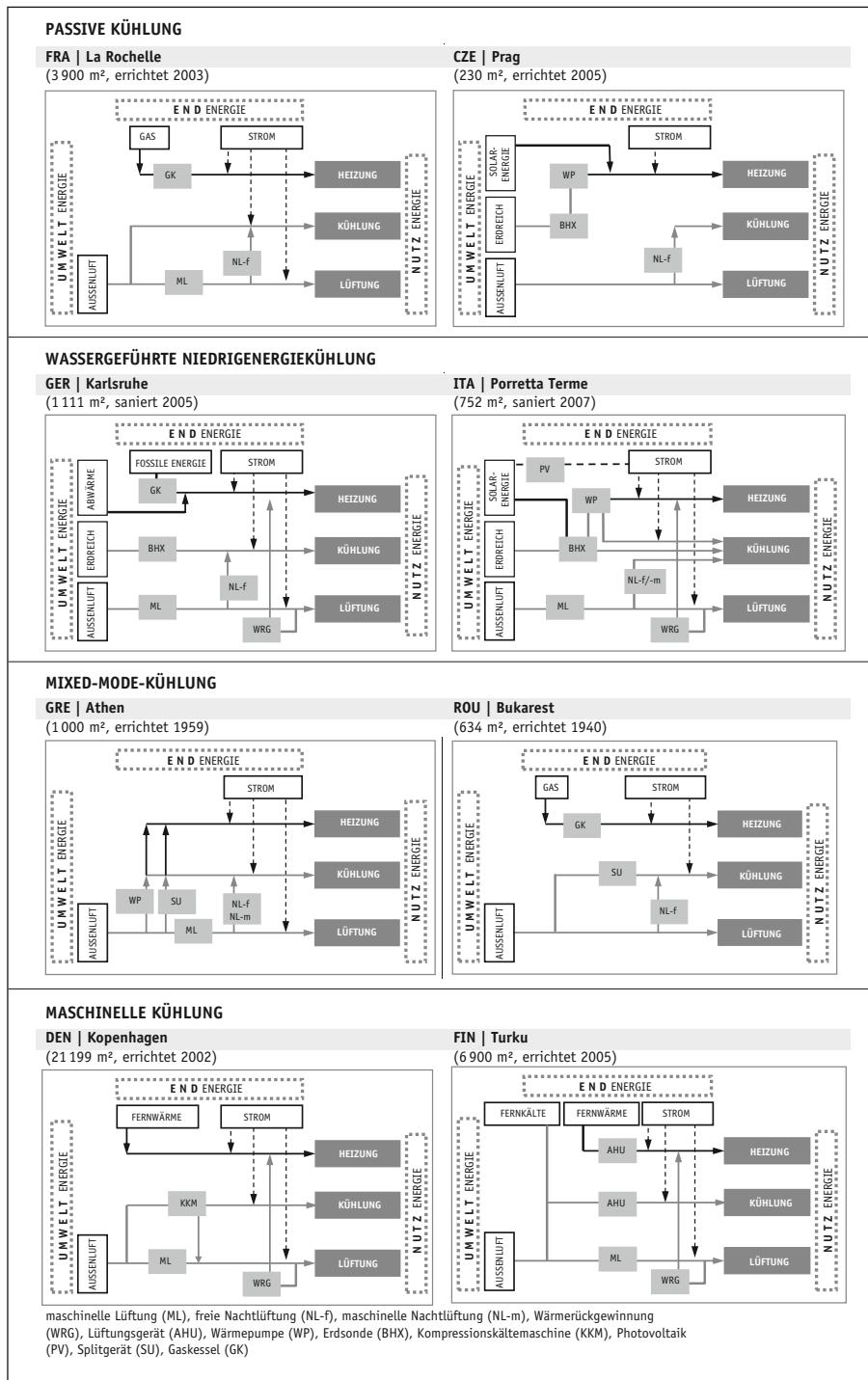


Bild 89: Heiz-, Kühl- und Lüftungskonzept für die Demonstrationsgebäude

9.2.2 Komfortanalyse

In *Bild 92* (im folgenden *Kapitel 9.2.3*) sind die Ergebnisse der Analyse des sommerlichen thermischen Komforts (gemäß den Vereinbarungen in *Kapitel 3.2*) zusammengefasst. In den meisten dieser Gebäude werden die Komfortanforderungen der Kategorie II nach DIN EN 15251 während 95 % der Nutzungszeit nicht überschritten. Kategorie II bedeutet demnach ein »normales Maß an Erwartungen, empfohlen für neue und renovierte Gebäude«.

Die zentralen Ergebnisse der Komfortanalyse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Passive Kühlung: Die Gebäude in Tschechien (CZE) und Frankreich (FRA) erreichen während 98 bzw. 95 % der Anwesenheitszeit die Komfortklasse II. Die definierten Raumtemperatursollwerte für die Komfortklassen 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. Eine Raumtemperatur von 20 bis 21 °C wird jedoch kaum unterschritten. Im Vergleich zu den anderen Gebäuden schwanken die Raumtemperaturen stärker während der Anwesenheitszeit, im Mittel bis zu max. 3 Kelvin (siehe *Bild 91*).

Wassergeführte Niedrigenergiекühlung: Im deutschen und im italienischen Gebäude erfolgt die Bereitstellung von Kälte über den Direktbetrieb des Erdsondenfeldes und unterstützend durch ein Nachlüftungskonzept. Der Raumkomfort entspricht während 95 % der Anwesenheitszeit den geforderten Raumtemperaturen entsprechend 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 der erforderliche thermische Nutzenergieaufwand reduziert.

Mixed-Mode-Kühlung: Die Gebäude in Griechenland (GRE) und Rumänien (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 sowie den jeweiligen Betriebsmodi (Nachtlüftung bzw. aktive Kühlung) zu analysieren. Auch in Zeiten mit hohen Außentemperaturen (gleitendes Tagesmittel zwischen 26 und 32 °C) liegen die gemessenen Raumtemperaturen innerhalb der geforderten Komfortgrenzen, siehe *Bild 90*. Über die gesamte Sommerperiode hinweg werden die Komfortanforderungen der Klasse II während 95 % (ROU) bzw. 98 % (GRE) der Anwesenheitszeit erreicht.

Bild 90: Gebäude Griechenland (GRE): stündlich gemessene Raumtemperatur (ORT), Raumtemperaturwerte während der Anwesenheitszeit der Nutzer (ORT-Tag), Außentemperatur (AT) und Sollwerte für Komfortklasse II gemäß adaptivem Komfortmodell nach DIN EN 15251:2007-08

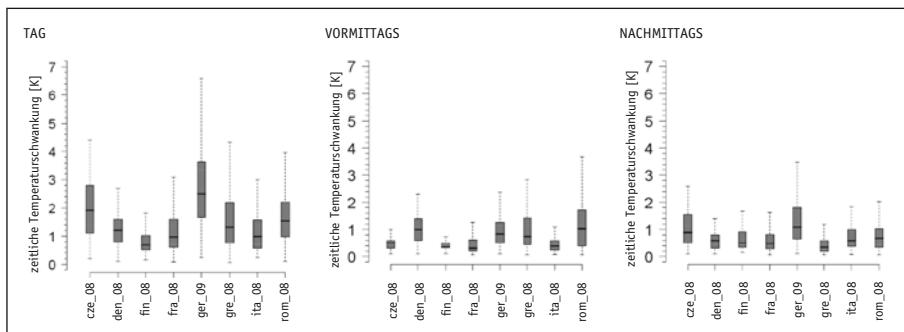
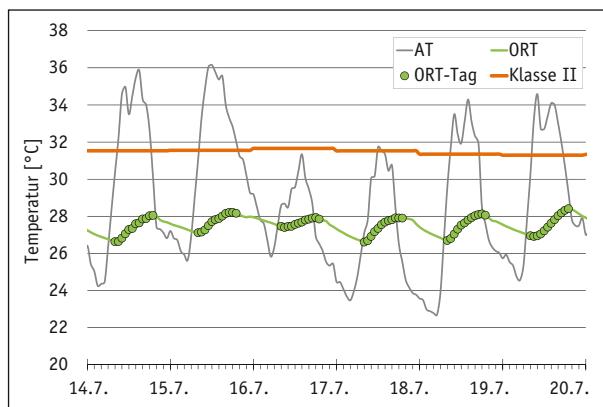


Bild 91: Gemessene Temperaturschwankungen im Sommer während der Anwesenheitszeit [K]; ganztägig, vormittags, nachmittags

Maschinelle Kühlung: Der thermische Raumkomfort in den nordeuropäischen Gebäuden erfüllt zu 94 % bzw. 98 % der Anwesenheitszeit 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).

9.2.3 Bewertung der Kühlkonzepte

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. Mit entsprechenden Gebäudesignaturen können diese Qualitätskriterien für Gebäude- und Energiekonzepte – Energiebezug, Energieeffizienz und thermischer Raum-

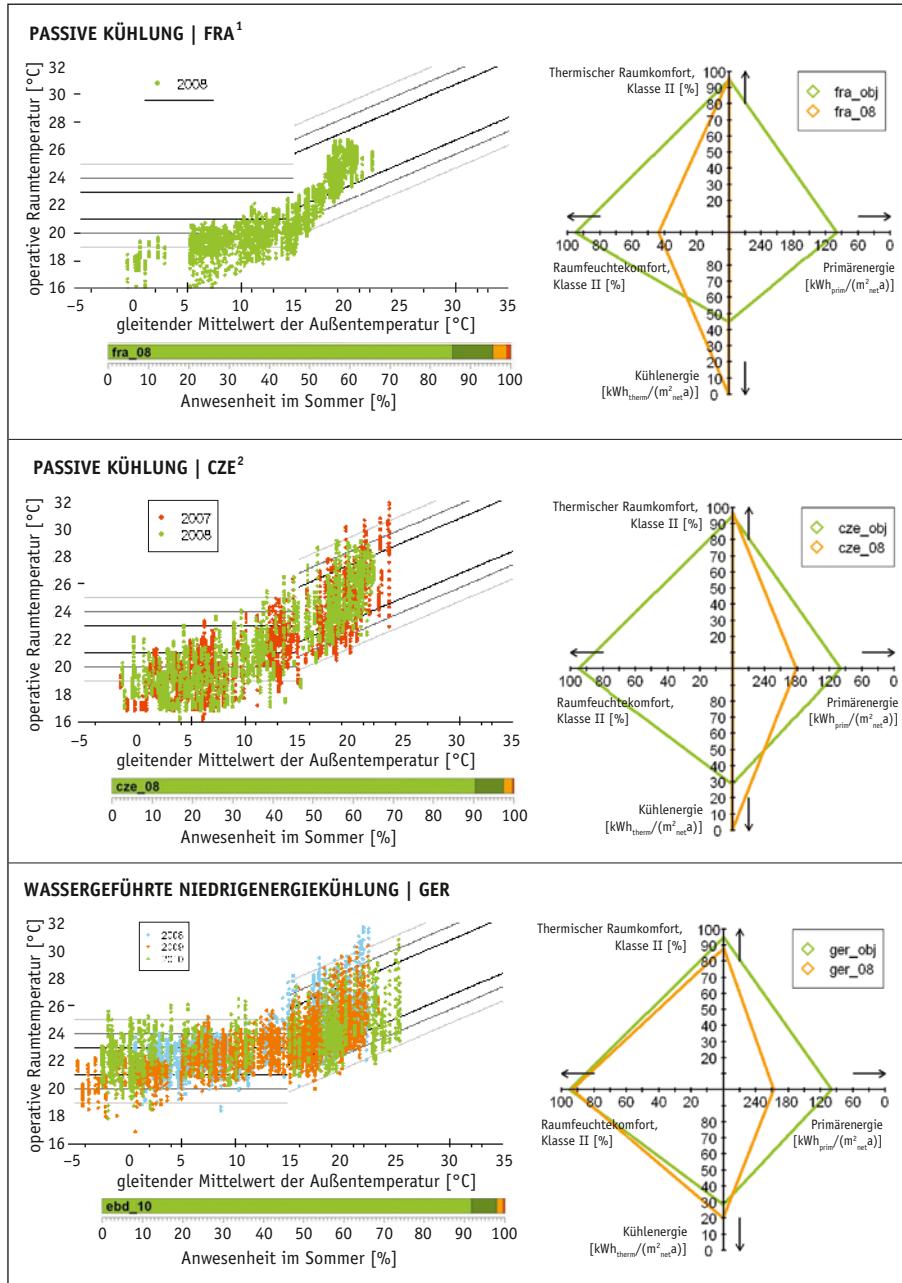
komfort – in einen Zusammenhang gebracht und die Zielstellung aus der Planung überprüft werden (siehe *Bild 92*):

- Das grüne Viereck definiert die Zielwerte für die jeweiligen Parameter.
- Die orangenen Vierecke zeigen die jeweilig gemessenen Energiekennzahlen und den Raumkomfort.

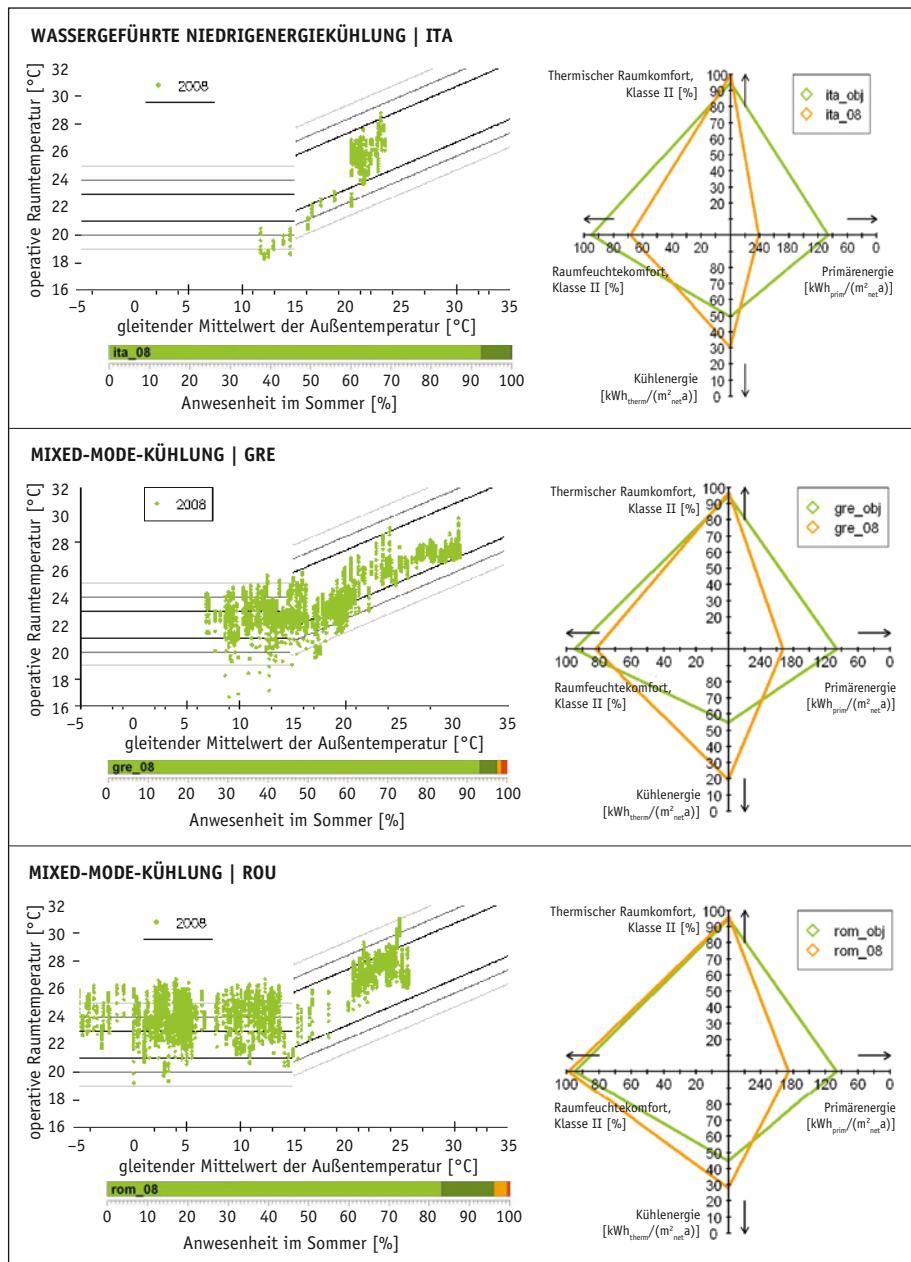
Für ein möglichst optimal ausgelegtes und betriebenes Kühlkonzept werden folgende Zielwerte definiert:

- **Thermischer Raumkomfort:** Das Gebäude erreicht einen thermischen Raumkomfort der Komfortklassen I (ITA, FIN und DEN), II (GER, FRA, CZE, ROU) bzw. III (GRE) nach dem adaptiven bzw. PMV-Komfortmodell der DIN EN 15251 (siehe *Kapitel 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. Dabei 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. Der berechnete Kühlenergiebedarf für Gebäudestandorte in Nord-, Mittel- und Südeuropa wird als Zielwert für die untersuchten Gebäude herangezogen. *Bild 85* (in *Kapitel 9.1*) zeigt, dass der berechnete Kühlenergiebedarf von Nord- nach Südeuropa aufgrund höherer Außentemperaturen und – zu einem geringen Maße – höherer Solareinstrahlung von rund 22 bis auf 55 kWh_{therm}/(m²a) zunimmt. Die Aufrechterhaltung des thermischen Raumkomforts für Klasse II nach dem PMV-Modell erfordert dabei einen um rund 10% (Nordeuropa) und bis zu 75% (Südeuropa) erhöhten Bedarf im Vergleich zum adaptiven Komfortmodell. Die in *Bild 92* dargestellten Ergebnisse zum Kühlenergiebezug der untersuchten Gebäude basieren auf Langzeitmessungen über ein Betriebsjahr bzw. auf Simulationsrechnungen beim griechischen Gebäude.
- **Raumfeuchte:** Die Bewertung der Raumfeuchte erfolgt ebenfalls nach der definierten Komfortklasse der DIN EN 15251. Dabei ist zu berücksichtigen, dass diese Grenzwerte für die Auslegung von Klimaanlagen mit Entfeuchtungseinrichtung definiert wurden. Für alle Gebäude wird als Zielwert die Komfortklasse II definiert, mit einer relativen 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_{NGF}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}.



Fortsetzung auf nächster Seite



Fortsetzung auf nächster Seite

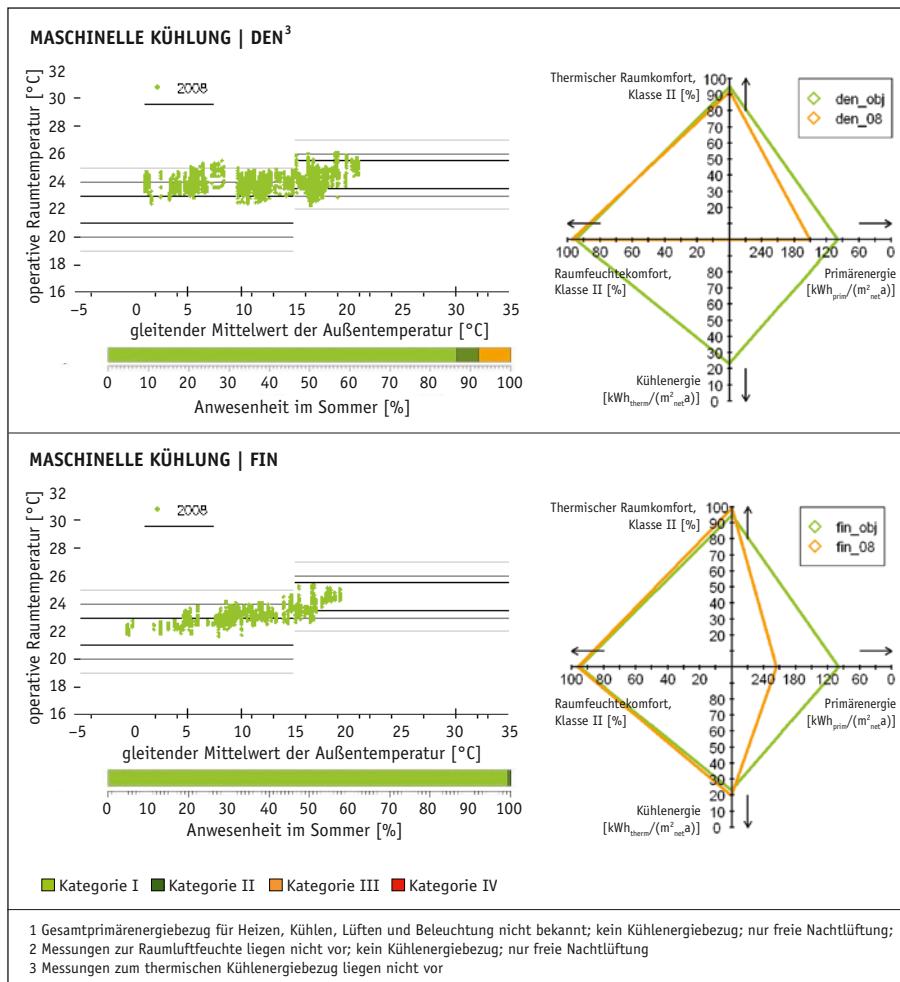


Bild 92: Komfortgrafik (links, jeweils oben): stündlich gemessene, operative Raumtemperatur [°C], aufgetragen über dem gleitenden Mittel der Außentemperatur [°C] während der Anwesenheitszeit der Nutzer.

Thermischer Komfort-Fußabdruck (links, jeweils unten): prozentuale Anwesenheitszeit [%], während derer das Gebäude die Anforderungen der Komfortklassen I bis IV erfüllt. Bewertung des Kühlenergiekonzeptes (rechts) unter Berücksichtigung des thermischen und des Raumfeuchtekomforts (prozentuale Anwesenheitszeit innerhalb der Komfortklasse II), thermischer Kühlenergiebezug [$\text{kWh}_{\text{therm}}/\text{m}^2\text{a}$] und Primärenergiebezug [$\text{kWh}_{\text{prim}}/\text{m}^2\text{a}$]; grün: Zielwerte; orange: Messungen. Anmerkung: Primärenergiefaktor Strom 2,2 $\text{kWh}_{\text{prim}}/\text{kWh}_{\text{end}}$

9.2.4 Zentrale Ergebnisse des Quervergleichs

Komfortanforderungen der Klasse II nach DIN EN 15251:2007-08 werden zu 90 bis 95 % der Anwesenheitszeit in der Sommerperiode in allen Bürogebäuden 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 während weniger Stunden überschritten.

Bei passiver Kühlung (hier freie Nachtlüftung) und Niedrigenergiекühlung unter Einsatz von Umweltwärmesonden steigen die gemessenen Raumtemperaturen mit der Außentemperatur, liegen aber zwischen den geforderten Grenzen von 24 bis 29 °C. Ihre Tagesamplituden bewegen sich im Mittel zwischen 0,8 und 2,5 Kelvin. 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 bei 24 °C. Die Tagesamplituden der Raumtemperaturen liegen zwischen 0,5 und 1,5 Kelvin.

In den untersuchten Nichtwohngebäuden wurde während der Kühlperiode (insbesondere zu Beginn der Sommerperiode) eine teilweise deutliche Unterschreitung der unteren Komfortgrenzen festgestellt. Dies trifft bei Anwendung sowohl 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.

Die Einhaltung der Komfortanforderungen nach dem PMV-Modell geht erwartungsgemäß mit einem deutlich höheren Kühlenergiebedarf als beim adaptiven Modell einher. Je höher die Umgebungstemperaturen ausfallen, desto größer ist dieser Unterschied.

Die Auswertung der Raumluftfeuchte zeigt, dass ihr Komfortempfinden 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 Komfortklasse II erreicht. In den feuchten Klimaten ist 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 Kühllasten durch das Flächenkühlsystem

erfolgen, um die Möglichkeit einer sehr effizienten Energiebereitstellung zu nutzen. Die Klimaanlage sollte daher 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 in 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.

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, so 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.

9.3 Fazit

Die Simulationsstudie zeigt, dass mit Kühlkonzepten, die ein hohes Maß an Umweltenergie nutzen, ein ebenso hohes Maß an thermischer Behaglichkeit in Verbindung mit einer hohen Energieeffizienz erreicht werden kann. Diese Auswertung kann und soll aber nicht die planerische Leistung bei der Gestaltung von Gebäude- und Energiekonzepten ersetzen. Es geht hier vielmehr darum, eine standortabhängige Einordnung der am Markt befindlichen Kühlsysteme als Hilfestellung für die Evaluierung in der Planungsphase zur Verfügung zu stellen.

Die Analyse der Langzeitmessungen in den hier vorgestellten acht europäischen Gebäuden unterstützt die Aussagen aus der Simulationsstudie. Betriebserfahrungen und die systematische wissenschaftliche Auswertung zeigen, dass es in Planung, Ausführung und Betrieb noch Verbesserungsmöglichkeiten bei der Ausschöpfung des Effizienzpotenzials gibt. Für Umweltenergiesysteme sind die richtige Auslegung des Gesamtsystems, eine saubere Umsetzung auf der Baustelle und eine

korrekte Betriebsführung von großer Wichtigkeit, weil Fehlleistungen aufgrund der eingeschränkten Kühlleistung nur sehr begrenzt kompensiert werden können.

Nordeuropa: In nordeuropäischen Klimazonen ist eine aktive wassergeführte Kühlung mittels Umweltwärmesenken oder sogar Kompressionskälte nur bei sehr hohen Komfortanforderungen oder eingeschränktem Nutzereinfluss (Bekleidungsvorschriften, kein Öffnen der Fenster) unterstützend erforderlich.

Mitteleuropa: Kühlenergiekonzepte mit thermoaktiven Bauteilsystemen und Umweltenergie stellen für das mitteleuropäische Klima eine energieeffiziente Lösung dar, können aber aufgrund von Systemtrügheiten und systembedingten Temperaturen keine stringenten Raumtemperatursollwerte gewährleisten. Sollen bestimmte Raumtemperaturen sichergestellt werden, so ist ein zusätzliches, regelbares und schnell reagierendes Heiz- und Kühlsystem erforderlich.

Südeuropa: Im südeuropäischen Sommerklima muss aufgrund der lang anhaltenden Hitzeperioden eine vergleichsweise hohe Kühlleistung bereitgestellt werden, um die stark schwankenden Kühllasten abführen zu können. Aufgrund der geringen Differenz zwischen Raumtemperatur und Temperatur der Umweltwärmesenke (Außenluft, Erdreich) ist ein aktives Kühlsystem zum Beispiel mit Kompressionskälte – zumindest unterstützend – erforderlich.

Wassergeführte Flächentemperiersysteme sind grundsätzlich für alle Klimazonen Europas gut geeignet, wobei die thermisch träge Bauteilaktivierung bei hohen und schwankenden Wärmelasten unter südeuropäischen Bedingungen an ihre Leistungsgrenze stößt.

Literaturverzeichnis

- [1] 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 (DGTRÉN) of the Commission of the E.U., Paris, Frankreich, 2003
- [2] ASHRAE 55:201 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. American Society of Heating, refrigeration and Air-Conditioning Engineers, 2004
- [3] Bettgenhäuser, K. et al.: Klimaschutz durch Reduzierung des Energiebedarfs für Gebäudekühlung. Umeltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2011, URL: www.uba.de/uba-info-medien/3979.html [Stand: Februar 2015]
- [4] Bockelmann, F.; Fisch, N.; Kipry, H.: Erdwärme für Bürogebäude nutzen. BINE Informationsdienst, BINE Fachbuch. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2011
- [5] Bockelmann, F.; Plessner, S.; Soldaty, H.: Advanced system design and operation of GEOTABS buildings. REHVA Guidebook 20. Federation of European Heating and Airconditioning Associations. Brüssel, 2013
- [6] Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR): Richtlinie zur Durchführung einer dynamisch thermischen Simulationsrechnung für den Sommerlastfall in Gebäuden. Bericht 10.08.17.7-06.12, 2006
- [7] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS); Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (Hrsg.): Folgen des Klimawandels: Gebäude und Baupraxis in Deutschland, BBR-Online-Publikation 10/2008. urn:nbn:de:0093-ON1008R229
- [8] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): Richtlinie B12-8132.1/0, BMVBS. Richtlinie zu baulichen und planerischen Vorgaben für Baumaßnahmen des Bundes zur Gewährleistung der Behaglichkeit im Sommer, 2008
- [9] de Dear, R.; Brager, G.: Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. ASHRAE Transactions: Research RP-884, 1998
- [10] de Dear, R.; Brager, G.: Thermal comfort in naturally ventilated buildings – revisions to ASHRAE Standard 55. Energy and Buildings, 34 (2002), No. 6
- [11] DIN 4108-2:2003-07. Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz (DIN wurde ersetzt durch DIN 4108-2:2013-02)
- [12] DIN EN 1264, Teile 1 bis 5: Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung. 2009 bis 2013
- [13] DIN EN 13779:2007-09. Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlagen und Raumkühlsysteme; Deutsche Fassung EN 13779:2007
- [14] DIN EN 14240:2004-04. Lüftung von Gebäuden – Kühldecken – Prüfung und Bewertung; Deutsche Fassung EN 14240:2004
- [15] DIN EN 15241:2011-06. Lüftung von Gebäuden – Berechnungsverfahren für den Energieverlust aufgrund der Lüftung und Infiltration in Gebäuden; Deutsche Fassung EN 15241:2007 + AC:2011
- [16] DIN EN 15243:2007-10. Lüftung von Gebäuden – Berechnung der Raumtemperaturen, der Last und Energie von Gebäuden mit Klimaanlagen; Deutsche Fassung EN 15243:2007

- [17] DIN EN 15251:2012-12. Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007
- [18] DIN EN 15251/NA:2012-12. Nationaler Anhang. Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007. Nationale Ergänzungen und Hinweise zur Verwendung dieser europäischen Norm für die Umsetzung der Energieeinsparverordnung (VDI 4706, Kriterien für das Raumklima)
- [19] DIN EN 15377, Teile 1 und 3 Heizungsanlagen in Gebäuden – Planung von eingebetteten Flächenheiz- und Kühlssystemen mit Wasser als Arbeitsmedium. 2007 und 2009
- [20] 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 (ISO 7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO 7730:2005
- [21] Dynamic Modeling Laboratory, Dymola, Version 2014 FD01: Catia Systems Engineering. URL: www.3ds.com/products-services/catia/capabilities/modelica-systems-simulation-info/dymola. [Stand: Februar 2015]
- [22] Eicker, U. et al.: Simulationsgestützte Automation für die nachhaltige sommerliche Klimatisierung von Gebäuden. In: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Hrsg.): Themenbereich Gebäudetechnik – Teilaспект B: Anpassung an Klimatrends und Extremwetter. Berlin, 2010
- [23] EnBau. Energieoptimiertes Bauen im Neubau. Forschungsinitiative gefördert durch Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. URL: www.enob.info/de/neubau/ [Stand: Februar 2015]
- [24] EnEV 2009 Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagen-technik bei Gebäuden. Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung vom 29. April 2009. BGBl.
- [25] EnSan. Energieoptimiertes Bauen in der Sanierung. Forschungsinitiative gefördert durch Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. URL: www.enob.info/de/sanierung/ [Stand: Februar 2015]
- [26] 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
- [27] Feldmann, T. et al.: Verbesserung von Energieeffizienz und Komfort im Gebäudebetrieb durch den Einsatz prädiktiver Betriebsverfahren (PräBV). Offenburg: Hochschule Offenburg, 2012
- [28] Glück, B.: Thermische Bauteilaktivierung – Nutzen von Umweltenergie und Kapillarrohren. Heidelberg: Heidelberg: C. F. Müller Verlag, Hüthig GmbH, 1999
- [29] Gossauer, E.: Nutzerzufriedenheit in Bürogebäuden: eine Feldstudie. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2008
- [30] Heinrich, S.; Koenigsdorff, R.: Wissenschaftliche Begleitung und messtechnische Evaluierung des Neubaus der Gebhard-Müller-Schule des Kreisberufsschulzentrums Biberach. Reihe »Wissenschaft und Praxis«, Bauakademie Biberach, Bd. 152 (2008); URL: www.eneff-schule.de [Stand: Februar 2015]
- [31] Hennings, D.: Energy and Climate. URL: www.eclim.de. [Stand: August 2014]

-
- [32] Henze, G. P.; Pfafferott, J.; Herkel, S.; Felsmann, C.: Impact of adaptive comfort criteria and heat waves on optimal building thermal mass control. *Energy and Buildings* 39, 2007
- [33] Herkel, S.; Knapp, U.; Pfafferott, J.: Towards a model of user behaviour regarding the manual control of windows in office buildings. *Building and Environment* 43 (2008)
- [34] Himmler, R.: Methode zur wetterprognosegeführten Regelung von Systemen zur Betonkern-temperierung. Dissertation, TU Braunschweig, 2008
- [35] Hudjetz, S.: Experimental Investigation of Heat Exchange between Thermal Mass and Room Environments. PhD Thesis. Leicester, UK: De Montfort University, 2012
- [36] 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 (2000), Nr. 2
- [37] IBM: Statistical Packages for the Social Sciences, Version 20.0, 2010
- [38] IDA Indoor Climate and Energy 3.0. URL: www.equa.se [Stand: Januar 2013]
- [39] Inard, C.; Pfafferott, J.; Ghiaus, C.: Free-running temperature and potential for free cooling by ventilation: A case study. *Energy and Buildings* 43, 2011
- [40] Jacob, D.: Gebäudebetriebsoptimierung – Verbesserungen von Optimierungsmethoden und Optimierung unter unsicheren Randbedingungen. Dissertation, Universität (TH) Karlsruhe, 2012
- [41] Kalz, D.: Erdwärmesondenanlagen: Analyse von Hydraulik und Hilfsenergie. OTTI Oberflächen-nahe Geothermie. Erdgekoppelte Wärme pumpen und unterirdische thermische Energie-speicher. Neumarkt i.d.O., 19.–20.3.2013
- [42] Kalz, D.: Heating and Cooling Concepts employing Environmental Energy and Thermo-active Building Systems for Low-energy Buildings. Dissertation. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2010
- [43] Kalz, D. et al.: Energieeffiziente Kühlung und Thermischer Raumkomfort: Erfahrungen aus dem Langzeitmonitoring von 42 Bürogebäuden. *Bauphysik* 36 (2014), Nr. 5
- [44] Kalz, D. et al.: LowEx:MONITOR – Exergetisches Monitoring für Gebäude mit Erdwärme-nutzung. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben LowEx:MONITOR. Fraunhofer ISE, 2012. Gefördert durch Bundesministerium für Wirtschaft [F.Kz. 0327466A bis F]. Zusatzinfor-mationen unter URL: <http://lowexmonitor.ise.fraunhofer.de/> [Stand: Februar 2015]
- [45] Kalz, D.; Herkel, S.; Wagner, A.: The impact of auxiliary energy on the energy efficiency of the heating and cooling system. *Energy and Buildings*, 41 (2009) No. 10
- [46] Kalz, D.; Hölzenbein, F.; Pfafferott, J.; Vogt, G.: Nutzerzufriedenheit mit dem thermischen Komfort in Bürogebäuden mit Umweltenergiekonzepten. *Bauphysik* 35 (2013), Nr. 6
- [47] Kalz, D.; Pfafferott, J.: Energieeffiziente Kühlung und thermischer Raumkomfort: Verglei-chende Analyse von acht europäischen Nichtwohngebäuden. *Bauphysik* 34 (2012), Nr. 6
- [48] Kalz, D.; Pfafferott, J.; Herkel, S.: Building signatures: A holistic approach to the evaluation of heating and cooling concepts. *Building and Environment* 45 (2009), No. 3
- [49] Kalz, D.; Pfafferott, J.; Herkel, S.; Wagner, A.: Energy and efficiency analysis of environmen-tal heat sources and sinks: in-use performance. *Renewable Energy* 36 (2010), No. 3
- [50] Kalz, D.; Pfafferott, J.; Koenigsdorff, R.: Betriebserfahrungen mit thermoaktiven Bauteil-systemen. *Bauphysik* 34 (2012), Nr. 2

- [51] Kalz, D.; Pfafferott, J.: Thermal Comfort and Energy-Efficient Cooling of Nonresidential Buildings. London: Springer, 2014
- [52] Kalz, D.; Pfafferott, J.: Thermoaktive Bauteilsysteme. BINE Themeninfo. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2007
- [53] Kalz, D.; Winiger, S.; Sonntag, M.; Herkel, S.: Felduntersuchung von erdgekoppelten Wärme-pumpen für die Wärme- und Kälteversorgung von Nichtwohngebäuden: Analyse der Energie- und Effizienzperformance. KI Kälte Luft Klimatechnik 50 (2014), Nr. 12
- [54] Kirchner, A.; Matthes, F.: (2009) Modell Deutschland Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken. URL: www.prognos.com und www.oeko.de [Stand: Februar 2015]
- [55] Klein, S. A. et al.: TRNSYS 17.1: A Transient System Simulation Program. SEL, University of Wisconsin, Madison, USA, 2012; URL: www.transsolar.com [Stand: Februar 2015]
- [56] Koenigsdorff, R.: Bauteilaktivierung – eine alte Idee und Ihre heutige Verbreitung. DETAiL – Zeitschrift für Architektur 47 (2007), Nr. 6
- [57] Koenigsdorff, R.: Gebäudeklimatisierung mit oberflächennaher Geothermie. bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, Sonderheft Geothermie 2014, Bonn: wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, 2013
- [58] Koenigsdorff, R.: Oberflächennahe Geothermie für Gebäude: Grundlagen und Anwendungen zukunftsfähiger Heizung und Kühlung. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verlag, 2011
- [59] Koenigsdorff, R.: Originäre Ingenieurleistung – Die Nutzung oberflächennaher Geothermie sollte nur mit profunden Kenntnissen geplant werden. Deutsches Ingenieurblatt (2008), Nr. 11
- [60] Koenigsdorff, R.; Bachseitz, M.: Vereinfachte simulationsgestützte Auslegung von thermo-aktiven Bauteilsystemen als Erweiterung des UBB-Verfahrens. Human-centred building(s), 2014
- [61] Koschenz, M.; Lehmann, B.: Thermoaktive Bauteilsysteme (tabs). Dübendorf: EMPA, 2000
- [62] LowEx-QS: Qualitätssicherung bei der Planung und Ausführung von Hydraulikkonzepten in niedrigexergetischen Heiz- und Kühlsystemen. Gefördert durch BMWi [03ET1198A]. lowex-qs.ise.fraunhofer.de [Stand: Februar 2015]
- [63] Meierhans, R.; Olesen, B.: Betonkernaktivierung. Norderstedt: Velta, 1999
- [64] meteonorm 6. METEOTEST, Bern, 2009
- [65] Modelica Version 3.2.1. Modelica Association. URL: www.modelica.org [Stand: Februar 2015]
- [66] Oesterle, E.; Koenigsdorff, R.: Thermische Aktivierung von Bauteilen zum Heizen und Kühlen von Gebäuden. Heizung-Lüftung-Haustechnik (1999), Nr. 1
- [67] Olesen, B. W.: Control of floor heating and cooling systems. Clima World Congress, 2000
- [68] Olesen, B. W.; Dossi, F. C.: Operation and control of activated slab heating and cooling systems. CIB World Building Congress, 2004
- [69] Pfafferott, J.: Enhancing the design and the operation of passive cooling concepts. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2004
- [70] Pfafferott, J.: Nachtlüftung. BINE Themeninfo. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2003
- [71] Pfafferott, J. et al.: 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

-
- [72] Pfafferott, J. et al.: Qualitätszertifikat für Bürogebäude mit passiver Kühlung. Fraunhofer ISE, 2007
- [73] Pfafferott, J. et al.: 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. URL: www.thermco.org [Stand: Februar 2015]
- [74] Pfafferott, J. et al.: Vermessung eines Kühldeckensystems mit Aktivierung der Speichermasse der Betondecke. Abschlussbericht zu AN10-0105, Fraunhofer ISE, September 2010
- [75] Pfafferott, J.; Fischer, M.; Herkel, S. Kalz, D. E.; Schmid, F.: LowEx: MONOTOR – Heizen und Kühlen mit Geothermie. In: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie und Fraunhofer-Institut für Bauphysik (Hrsg.): LowEx-Symposium zum deutschen Projektverbund des BMWi, Tagungsband, Kassel, 2009
- [76] Pfafferott, J.; Frietsch, M.; Lang, T.; Schmelas, M.: Kalorische Messungen an thermisch aktivierten Bauteilsystemen. BAUPHYSIK 38, Messtechnik im Bauwesen, 2015
- [77] Pfafferott, J.; Herkel, S.; Kagerer, F.; Kalz, D.; Sonntag, M.: Kurzzeitmessungen zum thermischen Komfort im Sommer. Bauphysik 35 (2013), Nr. 2
- [78] Pfafferott, J.; Herkel, S.; Wapler, J.: Thermal building behaviour in summer: long-term data evaluation using simplified models. Energy and Buildings 37 (2005)
- [79] Pfafferott J.; Kalz, D.: Energieeffiziente Kühlung und thermischer Raumkomfort (Teil 2): Simulationsbasierte Evaluierung von Kühlkonzepten in verschiedenen europäischen Klimazonen. Bauphysik 35(2013), Nr. 1
- [80] Pfeiffer, A.: Optimization Library for Interactive Multi-Criteria Optimization Tasks. In: 9th International MODELICA Conference, Munich, Germany, Sept. 3–5, 2012, Linköping University Electronic Press (Linköping Electronic Conference Proceedings)
- [81] Salvalai, G.: Implementation and validation of simplified heat pump model in IDA-ICE energy simulation environment. Energy and Buildings 49 (2012)
- [82] 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
- [83] Salvalai, G.; Pfafferott, J.; Jacob, D.: Validation of a low-energy whole building simulation model. In: Fourth National Conference of IBPSA-USA, New York, 2010
- [84] 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. URL: www.commoncense.info [Stand: Februar 2015]
- [85] Schmelas, M.; Böllin, E.: Prädiktives Steuern und Regeln von TABS. In: Uponor GmbH (Hrsg.): Praxishandbuch der technischen Gebäudeausrüstung, Band 2. Berlin: Beuth Verlag, 2013
- [86] Schramek, E.-R. (Hrsg.): Recknagel – Sprenger – Schramek. Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. Oldenbourg: Industrieverlag, 2013
- [87] Simmonds, P.: Control strategies for combined radiant heating and cooling systems. ASHRAE Trans. v. 100, Pt. 1, 1994
- [88] Sommer, K.; Olesen, B. W.; Düchting, B.: Untersuchung verschiedener Regelstrategien für die Betonkernaktivierung mit Hilfe der Computersimulation. Velta-Kongress, 2002

- [89] Sourbron, M.: Dynamic thermal behaviour of buildings with Concrete Core Activation. PhD thesis, KU Leuven, 2012
- [90] Sturzenegger, D.; Smith, R.; Gyalistras, D. et al.: Model predictive control of a swiss office building. 11th REHVA World Congress Clima, Prague, Czech Republic, 2013
- [91] TABSDesign Download – URL: www.faktor.ch/tabs-tool.html [Stand: Februar 2015]
- [92] ThermCo. Thermal Comfort in Buildings with Low-Energy Cooling. Gefördert durch Intelligent Energy Europe [EIE/07/026/SI2.466692]. www.thermco.org [Stand: Februar 2015]
- [93] Thermische Behaglichkeit. Publication 74, ISSO, Rotterdam, 2005
- [94] Tödtli, J.: TABS Control. Steuerung und Regelung von thermoaktiven Bauteilsystemen – Handbuch für Planung, Auslegung und Betrieb. Zürich: Faktor-Verlag (Schriftenreihe Technik), 2009
- [95] Trogisch, A.; Günther, M.: Planungshilfen bauteilintegrierte Heizung und Kühlung. Heidelberg: Müller, 2008
- [96] Uponor GmbH: Uponor Contec TS. URL: www.uponor.de [Stand: Februar 2015]
- [97] van der Linden, A. C. et al.: 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
- [98] VDI 2073, Blatt 1 bis 3, Hydraulik in Anlagen der Technischen Gebäudeausrüstung
- [99] VDI 2078:1996-07. Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume
- [100] VDI 6031:2006-03. Abnahmeprüfung von Raumkühlflächen
- [101] VDI 6034:2011-02. Raumkühlflächen – Planung, Bau und Betrieb
- [102] Velta GmbH: Betonkernaktivierung: Auch nach 100 Jahren sicher. HLH Bd. 51 Nr. 3 (2000)
- [103] Verhelst, C.: Model predictive control of ground coupled heat pump systems for office buildings. PhD thesis, KU Leuven, 2012
- [104] Voss, K. et al. (Hrsg.): Bürogebäude mit Zukunft – Konzepte, Analysen, Erfahrungen. Berlin: Solarpraxis Verlag, 2006
- [105] Voss, K.; Pfafferott, J.: Energieeinsparung contra Behaglichkeit? BBR Forschungen, Bonn (2007), Nr. 121
- [106] Wetter, M.: Generic Optimization Program GenOpt. Version 3.1. URL: <http://gundog.lbl.gov/GO/> [Stand: Februar 2015]
- [107] Winiger, S.; Kalz, D. E.; Sonntag, M.; Vellei, M.: Feldtesterfahrungen: Erdgekoppelte Wärme-pumpensysteme in Nichtwohngebäuden. Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau 64 (2013), Nr. 9
- [108] Wolfram Research Company: Computational Knowledge Engine. URL: www.wolframalpha.com [Stand: August 2014]
- [109] Wystrcil, D.; Kalz, D.: Model-based optimization of control strategies for lowexergy space heating systems using an environmental heat source. In: Proceedings of BS 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association, 2013
- [110] Wystrcil, D.; Kalz, D.: Prädiktive Regelung thermoaktiver Bauteilsysteme unter Berücksich-tigung der hydraulischen Topologie. In: Tagungsband BauSIM 2014 – Human centred building(s). Deutsch-Österreichische IBPSA Konferenz, Nr.5

-
- [111] Wystrcil, D.; Kalz, D.: Thermo-hydraulische Modellierung eines Niedrigexergiesystems zur Gebäudeheizung und -kühlung und exergetische Bewertung von Regelungsstrategien. BAUSIM 2012, 4th German-Austrian IBPSA Conference, Hochschule der Künste, Berlin, 2012
 - [112] Zent-Frenger GmbH: Das in Betondecken integrierte Temperierungs-System BATISO®. Produktprospekt, 2007
 - [113] Zitzmann, T.: Adaptive Modeling of Dynamic Conjugate Heat Transfer and Air Movement using Computational Fluid Dynamics. PhD Thesis, De Montfort University Leicester, UK, 2007

Stichwortverzeichnis

A

Abgleich, hydraulischer 97
Abnahme 29, 94
Adsorptionskältemaschine 161
Anbindung 96
-hydraulische 115
Anforderung, raumakustische 87
Arbeitszahl der Wärmepumpe 101
Aufwandszahl 99
Ausführungsplanung 194
Auslegung 37

B

Basiskennlinie 75
Bauablauf 27
Baustelle 196
Baustellenschaden 29
Bauteilaktivierung, Definition 12
Bauteilsystem, thermoaktives 12
Beimischschaltung 122
Berechnungsverfahren, vereinfachtes 79
Betonkerntemperierung, Definition 12
Betriebsführung 192, 196
Betriebsführungsstrategie 105, 109, 143
Betriebsverhalten, dynamisches 118
Betriebsweise, intermittierende 113
Betriebszeit 148
Bilanzgrenze 34
Bilanzierung 173

D

Datenauswertung, modellbasierte 106
Deckenaufbau 71
Diagrammverfahren 84
Druckgefälle 131, 184
Druckverlustberechnung 118, 129

E

Effizienzzahl 190
Effizienzsteigerung 113
Element, vorgefertigtes 195
Empfinden 65
Energiebilanz 34
Energiebilanzmodell 35
Energieeffizienz 99, 178
Entkopplung 183, 191
Erdsonde 192, 205
Erdsondenfeld 178, 194

F

Fensterlüftung 198
Fernwärme 155
Flächentemperierung, Definition 12

G

Gebäude, isothermes 15
Gebäudesignatur 189, 209
Gebäudesimulation 85
Gebäude- und Anlagenbewertung 41
Gebäude- und Anlagensimulation 40
Geothermie 104, 167
Geothermieranlage 178
Gesamtdruckgefälle 130, 136
Gesamtsystem 189
Grundlastsystem 105
Grundwasser 155, 193
Grundwasser-Brunnen 178, 192, 195

H

Heiz- und Kühlleistung 73
Hilfsenergieaufwand 187
Hilfsenergiebedarf 114
Hilfsenergiebezug, elektrischer 184
Hilfsenergieeinsatz 94
Holzbau 162

I

Installation 28
Installationstechnik 97

J

Jahresarbeitszahl 117, 144, 149

K

Kältemaschine 192
-erdreichgekoppelte 50, 180
Kapillarrohrmatte 161
Kennlinienverfahren 110
Klimatisierung 56
Klimazone 200
-europäische 197
Komfortanalyse 192
Komfortanforderung 45, 214
Komfortmodell 45, 201, 208
Komforttemperatur 66
Kompressionskältemaschine 159
Kompressionswärmepumpe 172

Konvektion 76
Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung 160
Kühldecke 20, 29
–abgehängte 199
Kühlkonzept 46, 198
Kühllast, spezifische 201
Kühlsegel 20, 29
Kühlung
–aktive 214
–direkte 50
–luftgeführte 202
–maschinelle 46, 209
–passive 15, 51, 198, 202, 208, 214

L

Last
–interne 172
–solare 172
Leistungsermittlung, rechnerische 79
Lüftung 191

M

Marktanalyse 17
Massenstrom 93
Maßnahme, raumakustische 87
Mixed-Mode-Kühlung 56
Monitoringprojekt 171

N

Nachtlüftung 14, 46, 208
–maschinelle 198, 202
Nutzerbefragung 57
Nutzereinfluss 46, 194
Nutzer, Erwartung der 47
Nutzerprofil 89
Nutzerverhalten 51

P

Phasenwechselmaterial 161
Planung
–hydraulische 94
–integrale 16
Potenzprodukt-Ansatz 79
Primärpumpe 181
Primär- und Sekundärkreis 184
Prüfstand 78
Prüfung, experimentelle 78
Pufferspeicher 194
Pumpendimensionierung 133

Q

Qualitätskriterium 209
Qualitätssicherung 169
Quelle, geothermische 103
Querschnittsauswertung 189

R

Randstreifenelement 26, 169
Raumakustikkonzept 193
Raumfeuchte 210
Raumkonditionierung 34
Raumluftheuchte 214
Regelbarkeit 86
Regelung 192
–modell-prädiktive 116
–prädiktive 115
Regressionsmodell 115
Rohrnetzdimensionierung 125, 128
Rückkühlwerk, offenes 195

S

Schaltung, hydraulische 122
Sekundärkreis 187
Selbstregeleffekt 82, 86
Simulation 83
Simulationsstudie 197
Sondernutzungsbereich 43
Sonnenschutzsystem 172
Speicher 191
Speicherfähigkeit, thermische 35
Standardregelkreis 107
Steuerung, außentemperaturabhängige 110
Strahlung 76
Strömungsvisualisierung 31
System
–hydraulisches 191
–oberflächennahes 71
Systemabstimmung 44
Systemkombination 37, 42, 100
Systemtrennung 27, 102

T

Taupunkt 186
Teillastverhalten 192
Temperatorempfinden 57
Temperaturspreizung 104
Temperaturverhalten 173
Temperaturverlauf 35, 72
Thermografieaufnahme 31

Topologie 124, 128
Tropen/Subtropen 164

U

Übergabesystem 181, 183
Umschaltventil 183
Umwälzpumpe 126, 184
Unknown-but-bounded-Verfahren 110

V

Ventilatorkonvektor 199
Vergleichsgebäude 197
Verhalten, dynamisches 105
Verteilsystem 120
-hydraulisches 114, 183
Volumenstromregelung 123
Vorlauftemperatur 177
Vorlauftemperaturregelung 123

W

Wärmegewinnschranke 111
Wärme- oder Kälteerzeugung, bivalente 102
Wärmepumpe 180, 192
-Effizienz von 101
Wärmestrahlung 75
Wärmetransferkoeffizient, flächen-
spezifischer 91
Wärmetransportvorgang 73
Wärmeübergang, konvektiver 75
Wärme- und Kälteversorgungssystem 100
Wärme- und Kälteverteilung 173
Wärmewiderstandsverfahren 81, 84
Werkstoff 27

Z

Zeitkonstante 107
Zonierung 95, 113, 115
Zufriedenheit 57, 66
Zusatzheizsystem 91
Zusatz-Installation, nachträgliche 89
Zusatzsystem 105, 113, 188

Oberflächennahe Geothermie für Gebäude

Grundlagen und Anwendungen
zukunftsfähiger Heizung und Kühlung

Roland Koenigsdorff



2011, 323 Seiten, 132 Abbildungen, 40 Tabellen,
Gebunden
ISBN 978-3-8167-8271-1

Unabhängig von Tages- und Jahreszeit oder Klimabedingungen, steht die Erdwärme immer zur Verfügung. Wie sie in Wohngebäuden, Nichtwohngebäuden und in der Industrie genutzt werden kann, beschreibt dieses Buch.

Grundlegendes zur geothermischen Energienutzung, zu Wärme- und Kältemaschinen, Gebäude- und Systemtechnik sowie das Zusammenspiel der verschiedenen Komponenten, werden in diesem Buch ausführlich behandelt und liefern fundierte Einblicke in die Systemzusammenhänge. Projektbeispiele und Betriebserfahrungen verdeutlichen das Erläuterte. Der Autor befasst sich mit Rechen-, Simulations- und Auslegungsverfahren, dem erforderlichen Schutz des Grundwassers und des Untergrundes und liefert wertvolle Informationen zu Genehmigungen und zur praktischen Planung von Geothermieranlagen.

Fraunhofer IRB-Verlag

Der Fachverlag zum Planen und Bauen

Nobelstraße 12 · 70569 Stuttgart · www.baufachinformation.de

Bauteilaktivierung

Einsatz – Praxiserfahrungen – Anforderungen

Erfolgreiche Projekte belegen, dass sich die Bauteilaktivierung als innovatives System zur Flächenheizung und -kühlung mit großem wirtschaftlichen und ökologischen Potenzial etabliert hat und damit eine Alternative zu konventionellen Klimaanlagen darstellt. Sie ermöglicht sowohl einen geringen Energieverbrauch bei der Nutzung erneuerbarer Energien als auch ein hohes Maß an thermischer Behaglichkeit.

Die Autoren rücken neben der Planung thermoaktiver Bauteilsysteme auch das Zusammenspiel in der gesamten Energiewandlung von der Umweltenergiequelle über die Energiebereitstellung bis hin zum dynamischen Verhalten des Übergabesystems in den Fokus. Dabei werden zum einen konstruktive Bedingungen und Leistungsanforderungen an thermoaktive Bauteilsysteme aufgezeigt und zum anderen Strategien zur richtigen Auslegung, Betriebsführung und Regelung des Gesamtsystems vorgestellt.

Das Fachbuch führt die aktuellen Ergebnisse aus langjährigen Forschungsarbeiten zusammen und leitet daraus Regeln und Anforderungen für den energieeffizienten Einsatz der Bauteilaktivierung ab. Ausführlich werden Praxiserfahrungen und systematische Betriebsauswertungen nationaler und internationaler Projekte beschrieben. In detaillierten Langzeitmessungen und Nutzerbefragungen wurden der thermische Komfort sowie die Nutzerzufriedenheit untersucht und bewertet.

Die im Buch dokumentierte wissenschaftliche Begleitung und Weiterentwicklung thermoaktiver Bauteilsysteme stellen einen richtungsweisenden Beitrag dar, um zu einem energieoptimierten Gesamtkonzept aus Architektur, Bauphysik und Gebäudetechnik zu gelangen.

ISBN 978-3-8167-9357-1



9 783816 793571