

Gesteuerte Beladung von thermisch aktivierbaren Massivspeicherbauteilen

Bernd Glück, Jößnitz

Die thermische Bauteilaktivierung hat in vielen Planungen und Objektausführungen Eingang gefunden. Der Einsatz dieser Technik bedarf einer gründlichen Abwägung der Vor- und Nachteile, die nicht immer verantwortungsvoll erfolgt. Oft bilden ausnahmslos die relativ niedrigen Investitionskosten die Entscheidungsgrundlage.¹⁾

Autor



Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück, Jahrgang 1942, war an der TU Dresden, in der Anlagenplanung, im Industrieinstitut TGA und im Zentralbereich Ingenieurtechnik bei ROM in leitender Funktion auf dem Gebiet der Heizungs- und Lüftungstechnik tätig. Jetzt betreibt er ein Forschungs- und Entwicklungsbüro für Technische Gebäudeausrüstung. Gleichzeitig ist er als Honorarprofessor an der Westsächsischen Hochschule Zwickau (FH) tätig. Er ist bisher mit über 170 Buch- und Zeitschriftenveröffentlichungen hervorgetreten.

Die energetischen Vorteile werden nur bei gründlicher Planung der Anlage nutzbar, die möglichen Defizite bei der thermischen Behaglichkeit können durch eine sorgfältige Planung vermieden oder gemindert werden. Außer den konstruktiven Merkmalen stellt die Betriebsweise der thermisch aktivierten Bauteile einen entscheidenden Aspekt dar. Da es darüber kaum Veröffentlichungen gibt, sollen nachfolgend einige Überlegungen offen gelegt werden und zur Diskussion anregen, wohlwissend dass manche Gedanken erst zukünftig realisierbar erscheinen, beispielsweise bei Anwenden von neuronalen Netzen. Wegen der Vielfältigkeit der thermischen Bauteilaktivierung erfolgt vorab eine Systemerläuterung.

Thermische Bauteilaktivierung

Der Begriff thermische Bauteilaktivierung umfasst grundsätzlich alle Raumbegrenzungen die sowohl stationär als auch instationär arbeitend, zum Kühlen und Heizen des Raumes herangezogen werden.

Über die Einsatzmöglichkeiten, die Leistungen und das dynamische Verhalten wird u.a. in [1 bis 8] berichtet, wobei auch versucht wurde, eventuelle Entwicklungsrichtungen zu erkennen.

□ Inzwischen wird fast ausschließlich die thermische Bauteilaktivierung als instationär arbeitendes Deckenkühlsystem verstanden bzw. missverstanden. Die diesbezügliche Anwendung erfolgt leider nicht immer mit den richtigen energetischen Zielstellungen und oftmals nur unter ungenügender Beachtung der wärmephysiologischen Forderungen [9; 10]. Letztere sind nach [11] gut simulierbar. Beispielhafte Auswertungen der verschiedenen Kühlsysteme bezüglich der Wärmephysiologie im Raum finden sich in [12].

□ Theoretisch könnte natürlich die thermische Bauteilaktivierung bezüglich der Wasserkreise so gestaltet werden, dass

eine Einzelraumregelung möglich wäre. Ein realisierbarer Sonderfall ist in [4] dargestellt. Im „Normalfall“ wird jedoch die gesamte Deckenfläche ohne Rücksicht auf spätere Raumaufteilungen mitunter sogar über unterschiedliche Nutzer- bzw. Mietbereiche hinweg mit Rohrregistern eines steuerbaren Wasserkreises belegt. Außerdem ist die Wirkung der Kühl- und/oder Heizfunktion geschossübergreifend gewünscht. Schlussfolgernd gilt für die alleinige thermische Bauteilaktivierung der beschriebenen Gestaltung (nur Deckenspeicher):

- Es ist keine individuelle Regelung der Raumtemperaturen möglich!
- Grenzwerte für die Raumtemperaturen können nicht gewährleistet werden!
- Eine Abrechenbarkeit der verbrauchten Energie ist bei kleinen Mietbereichen meistens nicht gegeben!

□ Sehr gut wirkt wegen der relativ kleinen Unter- oder Übertemperaturen der Decke zum Raum der Selbstregelleffekt. Er übernimmt bei kleinen Lastschwankungen somit die „Raumtemperaturregelung“. Die Selbstregelung ist aber auch stets mit einer Energieverschwendung verbunden, da letztendlich die Raumtemperaturen vom Sollwert abweichen. Die thermoaktive Decke stellt einen „direktwirkenden Proportionalregler“ dar, der Wärmefluss zwischen Decke und Raum steigt mit der Temperaturdifferenz an.

□ Die Realisierung der vielfach vertretenen Meinung, während der gesamten Betriebszeit die Rohrregister mit einer mittleren Wassertemperatur von $t_w = 22^\circ\text{C}$ zu beaufschlagen, vereinfacht die gesamte Steuerung drastisch. Die 22°C Deckentemperatur – so die Argumentation – würde bei geringen thermischen Raumlasten eventuelle Raumtemperaturen von 20 bis 24°C bewirken, die für den Sommer- und Winterfall gleichermaßen akzeptiert werden könnten. Bei dieser Betriebsweise verschenkt man aber über lange Zeiträume des Jahres Kühl- und Heizpotenzial.

¹⁾ Die Ausarbeitung erfolgte auf Veranlassung der Fa. Polytherm, Ochtrup, die u.a. auf dieser Grundlage eine weitere Entwicklung betreibt.

□ Um die Speicherung in der Decke maximal zu nutzen, gelten als übliche Betriebswerte:

- Wassertemperatur im Sommer bis auf 18 °C sinkend (z. B. Vorlauf 17 °C)
- Wassertemperatur im Winter bis auf 26 °C steigend (z. B. Vorlauf 27 °C)
- Temperaturspreizung des Wasserstromes 2 bis 4 K
- Temperaturen an der Deckenunterseite 21 bis 24 °C
- Kühlleistungen (unterer und oberer Raum) über 8 Stunden etwa 25 bis 40 W/m².

Damit kann die thermische Bauteilaktivierung bei sorgfältiger Anlagengestaltung sehr gute energetische Ergebnisse erzielen. Zur Steuerung der Wassertemperatur in dem genannten, relativ großen Bereich ist jedoch ein Algorithmus zu hinterlegen, der zahlreiche Einflüsse beachtet.

□ Bei Anordnung von individuell regelbaren, trägheitsarmen Zusatzkühl- und Zusatzheizsystemen im Raum können auch die geforderten thermischen Raumzustände nach DIN 1964 Teil 2 in üblicher Weise gewährleistet werden. Damit ist ein vollwertiges System zur Lastkompensation verfügbar. Eine Kompromisslösung ohne Zusatzsysteme stellt beispielsweise das oberflächennahe Einbringen der Rohrregister im Betonelement nach [4] dar, wodurch im Kühlfall die nächtliche „Kältespeicherung“ mit Umweltenergie aus freier Kühlung (Kühlturm) zu einem Großteil realisierbar ist und bei großer Kühllast – zum Beispiel am Nachmittag – auch eine bedarfsgerechte Nachkühlung ermöglicht werden kann.

□ Es ist sofort einleuchtend, dass die genannten Gegebenheiten und Ansprüche ausführliche Überlegungen zur Gestaltung der Steuerung bzw. der Regelung erfordern. Der Komplexitätsgrad steigt hierbei mit dem Anteil der instationären Wärmespeicherung, da deren Wirkung quasi vorausschauend zu beachten ist. Auf die Einzeleinflüsse wird später detailliert eingegangen.

□ Da die wirtschaftliche Betriebsweise der thermischen Bauteilaktivierung in starkem Maße auch von der Temperatur und der Ergiebigkeit der Wärmequelle („Kältequelle“) abhängt, sind einige grundsätzliche Einsatzbedingungen erwähnt.

– Wenn kostengünstige Energie nur zeitlich begrenzt zur Verfügung steht, dann ist es aus umweltrelevanten und aus kostenmäßigen Gesichtspunkten vorteilhaft, diese Energie bis zur Bedarfsanforderung zwischenspeichern. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn die Luft als Wärmesenke (Kühlturbetrieb) genutzt wird und der Temperaturschwung die Leistung prägt. Wenn weiterhin die Masse des Baukörpers ohnehin verfügbar ist – beispielsweise die Geschossdecken massiv in einer Dicke von etwa 300 mm ausgeführt sind –, liegen optimale Bedingungen für den Einsatz der thermischen Bauteilaktivierung vor.

– Kann die Energie ohne mengenmäßige Einschränkung und ohne Mehrkosten während der Nutzungszeit von natürlichen Wärmesenken mit Temperaturen ≤ 15 °C bereitgestellt werden, dann ist die thermische Bauteilaktivierung zur Raumkühlung nicht wirtschaftlich einsetzbar. Dies trifft auf viele geothermischen Nutzungen zu. Ausnahmen bilden z.B. die Grundwassernutzung oder die Erdwärmennutzung mit hoher Temperatur und/oder geringer Ergiebigkeit. Im letzten Fall wirkt eine Entnahmezeitverlängerung effizienzsteigernd.

– Wird die Kälte und/oder die Wärme konventionell erzeugt ist die thermische Bauteilaktivierung grundsätzlich kein geeigneter Einsatzfall. Durch Speicherverluste tritt ein höherer Primärenergiebedarf als bei zeitgleicher Bedarfsdeckung auf. Negativbeispiele sind: Kaltwasserbereitstellung auch bei Einsatz von Deckenspeichern undifferenziert mit 6 °C, keine Nutzung der freien Kühlung während der Übergangszeit, nächtliche Käl-

teerzeugung nur um günstigere Elektroenergietarife beim Antrieb von Kältemaschinen oder Wärmepumpen zu nutzen und/oder die Investitionskosten durch Einsatz kleinerer Maschinen zu senken.

Einfluss der Lüftungsart

□ Eine Lüftungsanlage zur Sicherung des hygienisch bedingten Außenluftbedarfs sollte parallel zu offenbaren Fenstern vorhanden sein. Zur Einhaltung einer Obergrenze der Raumluftfeuchte ist diese praktisch unabdingbar notwendig. Wird auf die Lüftungsanlage verzichtet, dann ist die Deckentemperatur so hoch einzustellen, dass keine Kondensation auftreten kann. Damit wird jedoch das mögliche wärmetechnische Leistungspotenzial der Decke reduziert.

Würde man durch eine Lüftungsanlage Raumluftfeuchten unterhalb der Schwülegrenze $x = 11,5 \text{ g}_W/\text{kg}_{tL}$ gewährleisten, dann läge die maximale Taupunkttemperatur bei 16°C . Die übliche Betriebsweise der thermischen Bauteilaktivierung wäre problemlos möglich.

□ Verzichtet man auf eine Lüftungsanlage und trifft die Annahmen

– einfacher Luftwechsel pro Stunde

– Raumvolumen pro Person 25 m^3

– Wasserdampfabgabe des Menschen 70 g/h bei 26°C

so folgt daraus eine Raumluftfeuchte, die um $\Delta x = 2,4 \text{ g}_W/\text{kg}_{tL}$ über der aktuellen Außenluftfeuchte liegt. Hierbei sind keine Besucher und keine weiteren Feuchtequellen (z.B. Pflanzen) berücksichtigt worden. Als kleiner Zuschlag werde eine Erhöhung auf $x = 3 \text{ g}_W/\text{kg}_{tL}$ vorgenommen.

Die zur Deckentemperatur zugehörige Sättigungsfeuchte x_S beträgt:

Deckentemperatur	22°C	23°C	24°C
Sättigungsfeuchte	$17 \text{ g}_W/\text{kg}_{tL}$	$18 \text{ g}_W/\text{kg}_{tL}$	$19 \text{ g}_W/\text{kg}_{tL}$

Ausgehend von der Deckentemperatur ergeben sich somit die kritischen Außenluftzustände bei einer absoluten Feuchte von $x_{AL} = x_S - \Delta x$:

Deckentemperatur	22°C	23°C	24°C
kritische Außenluftfeuchte	$14 \text{ g}_W/\text{kg}_{tL}$	$15 \text{ g}_W/\text{kg}_{tL}$	$16 \text{ g}_W/\text{kg}_{tL}$

Die DIN 4710 gibt beispielsweise für Mannheim folgende Häufigkeiten an:

Außenluftfeuchte x_{AL}	$\geq 14 \text{ g}_W/\text{kg}_{tL}$	$\geq 15 \text{ g}_W/\text{kg}_{tL}$	$\geq 16 \text{ g}_W/\text{kg}_{tL}$
jährliche mittlere Stundenzahl	22,1 h	5,7 h	1,3 h

Würde man eine Deckentemperatur (Oberfläche) von 22°C realisieren, bestünde an 22 h/a Kondensationsgefahr. Die sogenannte Hygrostabilität des Raumes sollte als Risikominderung in Betracht der angenommenen geringen Feuchtelast nicht zusätzlich angesetzt werden.

Besonders ungünstig wirkt sich die ungleiche Raumnutzung aus. Räume mit geringer Wärmelast und/oder hoher Feuchtelast sind besonders gefährdet.

Ein Absperren des Wasserkreises bei Kondensationsgefahr (Taupunktfühler, Fensterkontakte usw.) ist im Gegensatz zu üblichen Kühldecken oder Kühlsegeln infolge der großen Speichermasse und der daraus resultierenden Trägheit wirkungslos.

□ In Sonderfällen ist in Bauten mit thermischer Bauteilaktivierung die RLT-Anlage außer zur hygienischen Luftversorgung auch zur Regelung der individuellen Raumtemperatur einsetzbar.

Zeile	Raumtemperaturen am Vortage		Prognose der Außentemperatur	Reaktion
	Minimalwert $^\circ\text{C}$	Maximalwert $^\circ\text{C}$		
1	> 24	> 25	stagnierend	Kühlung aktivieren
			steigend	Kühlung aktivieren, zweite Stufe
			fallend	keine Kühlung und Heizung
2	> 22	< 26	stagnierend	Kühlung beibehalten
			steigend	Kühlung steigern
			fallend	Kühlung reduzieren
3	< 22	< 26	stagnierend	Kühlung reduzieren
			steigend	Kühlung beibehalten
			fallend	Kühlung stark reduzieren
4	> 22	> 26	stagnierend	Kühlung steigern
			steigend	Kühlung stark steigern
			fallend	Kühlung beibehalten
5	$< 22^1$	$> 26^1$	stagnierend	Nachtkühlung reduzieren Tagkühlung steigern
			steigend	Nachtkühlung beibehalten Tagkühlung stark steigern
			fallend	Nachtkühlung stark reduzieren Tagkühlung beibehalten
6	< 22	< 23	stagnierend	Heizung aktivieren
			steigend	keine Heizung und Kühlung
			fallend	Heizung aktivieren, zweite Stufe
7	< 22	< 24	stagnierend	Heizung steigern
			steigend	Heizung beibehalten
			fallend	Heizung stark steigern

¹Bauteil ist in der Speicherkapazität zu klein, **Tagkühlung ist zu aktivieren!**

Grundsätzliche Zielstellungen für die Steuerung von Massivdecken-speichern

Die bisherigen Entwicklungsziele der Heiz- und Kühlsysteme waren in der Regel auf einen trägheitsarmen Betrieb ausgerichtet, der alle auftretenden Lasten möglichst zeitgleich kompensieren konnte. Der Wärmespeicherung („Kältespeicherung“) in Massivdecken liegt eine völlig veränderte Philosophie zugrunde. Es soll möglichst viel Umweltenergie prognosegesteuert unter Berücksichtigung des möglichen Lastverlaufs und des Witterungsverlaufs im Bauteil eingespeichert werden.

Tabelle 1

Reaktion zur Beladung des Bauteils aufgrund der Raumtemperaturen und der Witterungsprognose

Nur die Beladung der Betonspeicherdecke mit „Kälte“ – physikalisch richtiger der Wärmeentzug aus der Decke – kann aktiv beeinflusst werden, die Entladung der „gespeicherten Kälte“ – Wärmezufuhr aus dem Raum – erfolgt rein passiv ohne Einflussmöglichkeit der Raumnutzer, was dessen Akzeptanzwillen voraussetzt.

Die Beladung der Decke wird durch eine Steuerung vorgenommen wobei die Parameter

- Wasservorlauftemperatur
- Wasservolumenstrom
- Ladezeit

beeinflussbar sind. Die Wahl dieser Parameter sollte unter den Zielstellungen

- geringer Energieeinsatz für die Kältebereitstellung
- geringer Energieeinsatz für die Wassenumwälzung
- keine Energieverschwendung durch gleichzeitiges Heizen und Kühlen
- maximale Verbesserung der wärmephysiologischen Raumbedingungen getroffen werden.

Letztere Forderung ist differenziert zu sehen, da die verlegten Rohrregister – wie bereits ausgeführt – in der Regel nicht getrennt steuerbar sind, auf Raumgrenzen keine Rücksicht nehmen und somit eine individuelle raumweise Regelung nicht ermöglichen.

Mögliche Inputs für die Steuerung der Deckenbeladung

Die Zusammenhänge sind viel zu komplex, als dass für die Steuerung der Beladung ein einfacher, allgemein gültiger Algorithmus angegeben werden könnte. Die Realisierung wäre dagegen ein sehr gutes Beispiel für die Nutzung der Fuzzy-Logik. Ziel ist es, aus dem Ergebnis des Vortages zu lernen.

Folgende Möglichkeiten können beispielsweise realisiert werden:

□ Heizen und gleichzeitiges Kühlen bei einem installierten Zusatzsystem ist durch ein möglichst großes „Energienullband“, in dem weder geheizt noch gekühlt wird, auszuschließen. Diese Forderung klingt zwar trivial, wird aber bei Einsatz von Zusatzkühl- bzw. Zusatzheizsystemen oftmals auch unbewusst verletzt.

□ Wenn im Verlaufe des Vortages nachfolgende minimale bzw. maximale Referenztemperaturen (Empfindungstemperatur im Raum) auftraten, sollte die thermische Bauteilaktivierung in Betrieb genommen werden:

=> $t_{E,min} < 22\text{ °C}$ und $t_{E,max} < 23\text{ °C}$, dann Heizen

=> $t_{E,min} > 24\text{ °C}$ und $t_{E,max} > 25\text{ °C}$, dann Kühlen.

Eine größere Temperaturdifferenz zwischen der Umschaltung „Heizen“ oder „Kühlen“ ist anzustreben, ihre Realisierbarkeit bezüglich der wärmephysiologischen Anforderungen sollte unbedingt überprüft werden.

Die Erfassung der Referenztemperaturen ist sehr problematisch. Piloträume können in der Regel nicht definiert werden, so dass es sinnvoll sein wird, mit einem Auswertealgorithmus aus einer Vielzahl von Temperaturen unterschiedlicher Räume oder Raumgruppen zu arbeiten. Es stehen dann sowohl Mittelwerte als auch Extremwerte für den Input der Steuerung zur Verfügung.

□ Die Steuerung der Beladung ist nach der gesammelten Erfahrung am Vortage und nach der Prognose „Witterungsverlauf“ evtl. noch nach Prognose „innere Last“ für den Folgetag vorzunehmen.

□ Für die Auswertung der Erfahrung und die Wertung der Prognose „Witterungsverlauf“ gibt die **Tabelle 1** ein Beispiel. Die vor-

Zeile	Innere Last	Kühlfall	Heizfall
1	stagnierende Last	Kühlung beibehalten	Heizung beibehalten
2	steigende Last	Kühlung zusätzlich verstärken	Heizung zusätzlich reduzieren
3	fallende Last	Kühlung zusätzlich reduzieren	Heizung zusätzlich verstärken

Tabelle 2

Zusätzliche Reaktion zur Beladung des Bauteils aufgrund der Prognose für die innere Last - Reaktion ist dem Ergebnis aus Tabelle 1 zu überlagern

gestellten Maßnahmen orientieren sich stets an der Erzielung eines möglichst hohen Behaglichkeitsstandards. Für die Temperaturgrenzwerte sind deshalb die Grenzwerte der DIN 1946 Teil 2 verwendet worden. Sinngemäß gelten die Überlegungen natürlich auch für davon abweichend definierte Grenzwerte. Zum besseren Verständnis mögen einige nachfolgende Erläuterungen dienen.

1. Tabellenzeile

Übersteigt ein repräsentativer Minimalwert der Raumtemperatur (Empfindungstemperatur) beispielsweise 24 °C und der Maximalwert 25 °C, dann ist es nach den Forderungen gemäß DIN 1946 Teil 2 (im engeren Sinne) während eines Zeitabschnittes zu warm. Wenn die Witterungsprognose, die hier im Weiteren auf eine Prognose der Außentemperatur beschränkt bleibt, keine Veränderung erkennen lässt, wird die Kühlung zur Verbesserung der Behaglichkeit in Betrieb genommen. Die relativ niedrige Grenztemperatur von 25 °C ist auch damit begründet, dass die Inbetriebnahme der Decke zunächst (nach einer Nacht) ohnehin noch nicht die volle Kühlleistung am Folgetag bereitstellen kann. Bei konventionell üblichen Rohrregistern dauert die Einschwingphase der Decke (Dicke 300 mm) etwa drei Tage [1]. Somit ist man auf eine eventuell folgende Hitzeperiode vorbereitet. – Würde eine ansteigende Außentemperatur prognostiziert, dann müsste – wenn die technische Möglichkeit besteht – mit einer zweiten Kühlstufe (beispielsweise mit einer niedrigeren Kaltwassertemperatur oder einer Zusatzkühlung) der Betrieb begonnen werden. – Rechnet man mit einer sinkenden Außentemperatur, dann überlässt man das System „Raum“ der natürlichen Temperaturschwingung, indem keine Aktivierung der Anlage erfolgt.

– 2. Tabellenzeile

Die Anlage arbeitet im Kühlbetrieb und die Raumtemperaturen liegen zwischen 22 °C und 26 °C. Die thermische Behaglichkeit ist in idealer Weise gegeben, die Anlage wird wie am Vortage betrieben, wenn ein gleich bleibender Außentemperaturverlauf erwartet wird. – Bei steigender Außentemperatur würde man die Kühlung steigern, bei fallender Außentemperatur reduzieren.

– 3. Tabellenzeile

Bei sinkendem Raumtemperaturniveau kann bei gleich bleibender Außentemperatur die nächtliche Kühlung der Decke natürlich reduziert werden. – Bei prognostizierter Außentemperaturzunahme ist die derzeitige Kühlung zu belassen. – Sollte die Außentemperatur fallen, muss die Kühlung stark vermindert werden.

– 4. Tabellenzeile

Wie Zeile 3, nur umgekehrte Wirkrichtung, da das Raumtemperaturniveau steigt.

– 5. Tabellenzeile

Die Raumtemperatur unterschreitet zeitweise die Untergrenze von 22 °C und zeitweise aber auch die Obergrenze von 26 °C. Dies kann ein durchaus üblicher Fall sein. Er besagt, dass das Speichervermögen der Massivdecke zu klein ist und die summierte Kühllast über den Tag nicht kompensierbar ist. Bei erwartetem gleich bleibenden Außentemperaturverlauf wie am Vortage muss die Nachtkühlung reduziert werden, um am Morgen zu Arbeitsbeginn eine behagliche Raumtemperatur von 22 °C (bei Akzeptanz auch ein niedrigeren Grenzwert) zu erhalten. Nur eine zusätzliche Nachtkühlung am Tage kann den ansteigenden Raumtemperaturverlauf verhindern. Ist keine Nachtkühlung während des Tages möglich, können im Tagesgang Raumtemperaturabweichungen von der „Norm“ auftreten und die in den Raum eingetragenen Lasten sind möglicherweise sogar in einer 24-Stunden-Periode nicht kompensierbar (anhaltende Hitzeperiode), so dass beispielsweise die Raumtemperaturen über drei Tage fortwährend ansteigen. – Bei veränderten Außentemperaturprognosen sind die Tabellenaussagen analog zu interpretieren.

– 6. Tabellenzeile

Liegt die minimale Raumtemperatur unter 22 °C und die maximale unter

23 °C, muss die Anlage für den Heizbetrieb aktiviert werden, falls eine gleich bleibende Außentemperatur erwartet wird. Ansonsten gelten die außentemperaturabhängigen Abwandlungen.

– 7. Tabellenzeile

Im reinen Heizfall wird versucht die Mindestraumtemperatur von 22 °C einzuhalten. Ein Anstieg nach oben werde zugelassen.

□ Für die Prognose „innere Last“ ist analog wie bei der „Witterungsprognose“ vorzugehen. Zunächst wird die Erfassung nur subjektiv möglich sein. Zukünftig könnten Lernalgorithmen möglicherweise hilfreich sein, denn es gibt auch hier meistens einen Rhythmus, der den Wochentagen zugeordnet werden kann. Die inneren Kühllasten und deren Auswirkungen auf den Raumtemperaturverlauf können sich beispielsweise an Montagen anders als an Freitagen darstellen.

Für die schlussfolgernde Wertung der Prognose „Innere Last“ gibt die **Tabelle 2** ein Beispiel. Das jeweilige Ergebnis aus der Tabelle ist als Additiv zur Aussage des Witterungsverlaufes zu werten. Die nachfolgenden Erläuterungen verdeutlicht dies.

– 1. Tabellenzeile

Ist keine Änderung der inneren Last zu erwarten, folgt die Beladungssteuerung nur der Aussage des Witterungsverlaufes.

– 2. Tabellenzeile

Steigt nach der Prognose für den Folgetag die innere Last an, dann ist im Kühlfall die nächtliche Kühlung der Decke zu verstärken, im Heizfall müsste die nächtliche Beheizung der Decke verringert werden.

– 3. Tabellenzeile

Wie 2. Tabellenzeile, jedoch umgekehrte Wirkrichtung.

□ Eine Besonderheit ist bei Systemen mit Fensterlüftung zu beachten. Die automatische oder halbautomatische Steuerung der Deckenbeladung sollte aus Energiespargründen begrenzt werden. Im Kühlbetrieb ist die „Kältespeicherung“ vor allem aus Gründen der Kondensationsgefahr eventuell zu limitieren. Es kann deshalb auch eine Handvorwahl in Grobstufen sinnvoll sein:

– normaler Kühlfall

– extremer Kühlfall

– normaler Heizfall

– extremer Heizfall.

Beim extremen Kühlfall ist auch die Verlagerung des Risikos auf den unmittelbaren Nutzer angezeigt, der am Abend vor der nächtlichen Beladung die Wahl zu treffen hat. Denn bei Außenluftzuständen mit hohen Feuchten (Schwüle, Gewitterneigung) muss die „Kältespeicherung“ in der Decke reduziert werden. Diese Prognose ist naturgemäß mit einer großen Unsicherheit behaftet.

Bei Vorhandensein einer Lüftungsanlage entfällt diese zusätzliche Begrenzung.

Mögliche Stellgrößen für die Steuerung der Deckenbeladung

Es gibt zahlreiche technische Wege, wie die Beladung des Bauteils gesteuert werden kann. Hierbei sind notwendigerweise auch spezielle Randbedingungen zu beachten. Beide werden im Weiteren aufgelistet.

□ Eine globale Leistungsanpassung erfolgt durch die Festlegung bzw. durch die gezielte Veränderung der Ladezeit.

– *Ladezeitverlängerung oder -verkürzung*

Letztere wird man anwenden, wenn beispielsweise durch die Kühlung morgens die Raumtemperatur zu niedrig ist und nachmittags eine ausreichende Kühlung vorliegt. Ein typisches Kriterium wäre hierfür (Tabelle 1, Zeile 3): $t_{E,min} < 22\text{ °C}$ und $t_{E,max} < 26\text{ °C}$. Sinnvoll ist eine Verkürzung der Ladezeit derart, dass man abends später beginnt.

– *Ladezeitverschiebung (Nachladung)*

Ist die Speicherkapazität des Bauteils zu klein, um die Tageslast kompensieren zu können, dann kann die Raumtemperatur morgens zu niedrig sein und abends zu hoch, z.B. (Tabelle 1, Zeile 5): $t_{E,min} < 22\text{ °C}$ und $t_{E,max} > 26\text{ °C}$. Sinnvoll ist nunmehr ein späterer Ladebeginn und eine Nachladung am Tage.

□ Die Leistungsanpassung kann auch durch die Intensität der Beladung erfolgen. Die technischen Möglichkeiten hierzu sind grundsätzlich durch die Temperaturanpassung (Vorlauftemperatur des Kaltwasserstromes), das Drosseln des Kaltwasserstromes und das zeitliche Takten der Wasserdurchströmung gegeben. Vorauszusetzen ist jedoch eine optimale Registergestaltung. Aus [5] können entsprechende Rückschlüsse gezogen werden.

– *Temperaturanpassung*

Dies ist die technisch beste Lösung, da eine gleichmäßige Temperierung erreicht wird. Sie bedarf jedoch einer Beimischschaltung und ist somit relativ aufwendig.

– *Drosseln des Kaltwasserstromes*

Diese Variante sollte nicht realisiert werden, da infolge der sich einstellenden großen Temperaturspreizung eine sehr ungleiche Bauteiltemperierung erfolgt, was bei raumübergreifenden Systemen besonders nachteilig ist.

Übrigens gehört es auch zum Grundwissen über konventionelle Wasserheizungen, dass Einrohrsysteme nicht mit einer Drosselregelung betrieben werden dürfen. Die thermische Bauteilaktivierung mit Rohrschlangen verkörpert ein solches System.

– *Takten des Wasserdurchflusses*

Die Variante ist technisch einfach in der Realisierung und wirkt auf die Betriebskosten senkend. Die gleichmäßige und maximale Beladung des Bauteils ist jedoch nicht gegeben.

Diese Variante stellt ein „Mittelding“ zwischen beiden, vorher erörterten Möglichkeiten dar. Einerseits wird stets der volle Durchfluss realisiert, andererseits tritt durch das zwischenzeitliche Erwärmen (bei Stillstand) um das Rohr eine vergrößerte Temperaturspreizung auf. Die beiden Einflüsse sind eine Funktion der gewählten Taktzeit.

Geräteeinsatz	t_{KW}	t_L bzw. $t_{L,feucht}$	Berlin				München			
			tags		nachts		tags		nachts	
	°C	°C	h/a	%	h/a	%	h/a	%	h/a	%
Trockenkühler	18	< 13	2556	58	3083	70	2617	60	3438	78
Nasskühler	18	< 13	3502	80	3786	86	3391	77	3857	88

□ Es ist auch wichtig, das Temperaturangebot und die Ergiebigkeit der Wärmequelle („Kältequelle“) in die Betriebsweise einzubeziehen. Die Zeiträume mit der jeweils günstigsten Medienbereitstellung bezogen auf die gewünschte Temperatur sind bevorzugt zu nutzen.

– Bei der atmosphärischen Luft als Wärmesenke bestehen beispielsweise beträchtliche Potenzialunterschiede, wie die **Tabelle 3** zeigt. Hierbei wurde jeweils eine Grädigkeit von 5 K im Trocken- bzw. Nasskühler angenommen.

– Bei Nutzung von Grundwasser oder Erdkollektoren besteht in der Regel eine Verknüpfung zwischen der Temperatur und dem Entnahmestrom, so dass spezielle Optimierungen erforderlich sind.

□ Als Indiz für den Ladezustand kann nach genauer Kenntnis der wärmetechnischen Zusammenhänge die Rücklauftemperatur und/oder die Temperaturspreizung verwendet werden.

Im Umkehrschluss gilt, die Ladung kann beendet werden, wenn sich die Rücklauftemperatur der Vorlauftemperatur bis auf eine einstellbare Differenz angeglichen hat.

Fazit

Bei der Steuerung der Beladung von Massivspeicherdecken sind zahlreiche Einflussfaktoren zu beachten: konstruktive Gestaltung des Speichers einschließlich des Rohrregisters, raumübergreifende oder im Ausnahmefall raumweise Verlegung der Rohre, maximale Nutzung der Speicherkapazität durch gleitende Wassertemperaturen von 18 °C bis 26 °C oder im Sonderfall eingeschränkte Nutzung mit konstantem Wasserstrom von 22 °C, Installation von Zusatzsystemen zur präzisen Regelung

der Raumtemperatur, Art und Ergiebigkeit der Wärmesenke bzw. -quelle, Vorhandensein einer RLT-Anlage oder Fensterlüftung.

Je größer der Anteil der Wärmespeicherung ist, umso vorausschauender muss die Steuerung zur Beladung der Decke arbeiten. Die verfügbaren objektiven und subjektiven Inputs wurden aufgelistet und beispielhaft erläutert. Ebenso geschah dies für die möglichen Steuergrößen mit Nennung der Vor- und Nachteile sowie der zu beachtenden Randbedingungen.

Die Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten erlaubte es nicht, allgemein gültige Rezepte vorzustellen, sondern nur Hinweise über Grundsätzliches zu formulieren. Hierbei wird deutlich, dass die thermische Bauteilaktivierung bei konsequenter Nutzung von Umweltenergie eines sehr intelligenten und umfassenden Regelungs- und Steuerungskonzeptes bedarf.

Dies steht durchaus im Einklang mit natürlichen Vorgängen, wo einfach erscheinenden Abläufen verknüpfte, sen-

Tabelle 3

Nutzstunden der freien Kühlung für die thermische Bauteilaktivierung pro Jahr bei atmosphärischer Luft als Wärmesenke in Abhängigkeit der Kühlvariante (Grädigkeit jeweils 5 K) und des Standortes (Auswertung auf Grundlage der DIN 4710)

sibel arbeitende Regelkreise und Steuerungen hinterlegt sind.

Eine triviale Technik – wie sie die thermische Bauteilaktivierung verkörpert – mit einer trivialen Regelungsstrategie zu kombinieren, ergibt keine effiziente Anlage.

H 272

Literatur

- [1] Glück, B.: Thermische Bauteilaktivierung. C. F. Müller Verlag 1999 (ISBN 3-7880-7674-7).
- [2] Glück, B.: Leistungen und Dynamik von Wandheizungen im Vergleich. Gesundheits-Ingenieur (1999) H. 4.
- [3] Glück, B.: Wassertemperaturen und Aufheizzeiten von Fußbodenheizungen mit Estrichverlegung. HLH Bd. 51 (2000) Nr. 6, S. 26-33.
- [4] Glück, B.: Filigrandecken mit integrierter thermischer Bauteilaktivierung. TAB Technik am Bau (2001) H. 1, S. 25-32.
- [5] Glück, B.: Ortsabhängige Kühlleistung von Massivbauteilen mit integrierten Rohrregistern. HLH Bd. 52 (2001) Nr. 5, S. 64-72.
- [6] Glück, B.: Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Betons und der Bewehrung auf die Kühlleistung von Massivdeckenspeichern. HLH Bd. 53 (2002) Nr. 2, S. 42-47.
- [7] Glück, B.: Wärmeübertragung durch raumbegrenzende Heiz- und Kühlflächen mit geringem Exergieverlust – Lehren aus der BIONIK, Gesundheits-Ingenieur (2000) H. 4.
- [8] Glück, B.: Möglichkeiten des Energieeinsatzes mit niedrigem Exergiepotenzial zum Heizen und Kühlen von Räumen, Gesundheits-Ingenieur (2001) H. 1.
- [9] Glück, B.: Wenn Bauteilheizung oder -kühlung, dann aber bitte innovativ!, CCI Clima Commerce International (1999) Nr. 4.
- [10] Glück, B.: Wird die thermische Bauteilaktivierung kaputt aktiviert? CCI Clima Commerce International (2000) Nr. 13.
- [11] Glück, B.: Wärmetechnisches Raummodell. C. F. Müller Verlag 1997 (ISBN 3-7880-7615-1).
- [12] Glück, B.: Wärmephysiologische Bewertung von Kühlsystemen zur Raumklimatisierung – Lastmodellierung, Anlagenvariationen und Schlussfolgerungen. HLH Bd. 51 (2000) Nr. 11, S. 38-49.