

Vorstudie zum Thema

"Bauteilheizung und Bauteilkühlung mit einem Maximum an Umweltenergie unter besonderer Berücksichtigung des Einsatzes von Kapillarrohmatten"

Untersuchung erfolgte im Auftrag der
RUD. OTTO MEYER-UMWELT-STIFTUNG
im ersten Halbjahr 1999
durch

Dr.-Ing. habil. Bernd Glück, Tel.+Fax 03741 / 52 12 14, E-Mail B.GLUECK@t-online.de

Die kompletten Ergebnisse der Vorstudie sind mit Förderung der Stiftung veröffentlicht im Buch:
Thermische Bauteilaktivierung. Heidelberg: C. F. Müller Verlag 1999 (ISBN 3-7880-7674-7)

Zusammenfassung des Inhalts

1 Begriffsbestimmung und Arbeitsweise

Die thermische Bauteilaktivierung umfasst generell stationär und instationär arbeitende Heiz- und Kühlsysteme, die direkt in den Baukörper (Wände, Decken, Boden, Säulen usw.) integriert sind.

Die neuzeitliche thermische Bauteilaktivierung setzt wasserdurchflossene Rohrsysteme in Speicherbauteilen – vorzugsweise in Massivdecken - ein. Die Be- und die Entladung erfolgen zeitversetzt, womit ein instationärer Betrieb gegeben ist. Der Begriff "Aktivierung" bezieht sich auf das gezielte Speichern von Wärme im Bauteil, die Entladung erfolgt rein passiv ohne Eingriffsmöglichkeit durch den Nutzer. Es soll vorzugsweise Umweltenergie zum Einsatz kommen.

2 Wärmephysiologische Betrachtung

- *Globale Behaglichkeit*

Selbstverständlich können mit richtig bemessenen, thermisch aktivierten Bauteilen behagliche Entwärmungsbedingungen für den Menschen geschaffen werden, wie dies vom Einsatz von Flächenheiz- und Flächenkühlsystemen her bekannt ist. Im Gegensatz zum Heizfall ist bei einer Klimatisierungsaufgabe der Variationsbereich zwischen Lufttemperatur t_L und Strahlungstemperatur der Umgebung t_U kleiner. Dieser Variationsbereich kennzeichnet die Austauschbarkeit zwischen Konvektions- und Strahlungswärmestrom des Menschen an die Umgebung.

Für Bürotätigkeit 1,2 met, leichte Kleidung (0,6 clo) und $\phi = 50 \%$ gilt Bild 1. Bei einer Empfindungstemperatur von 25 °C (strichpunktierte Gerade im Bild) sind zwei Extremsituationen

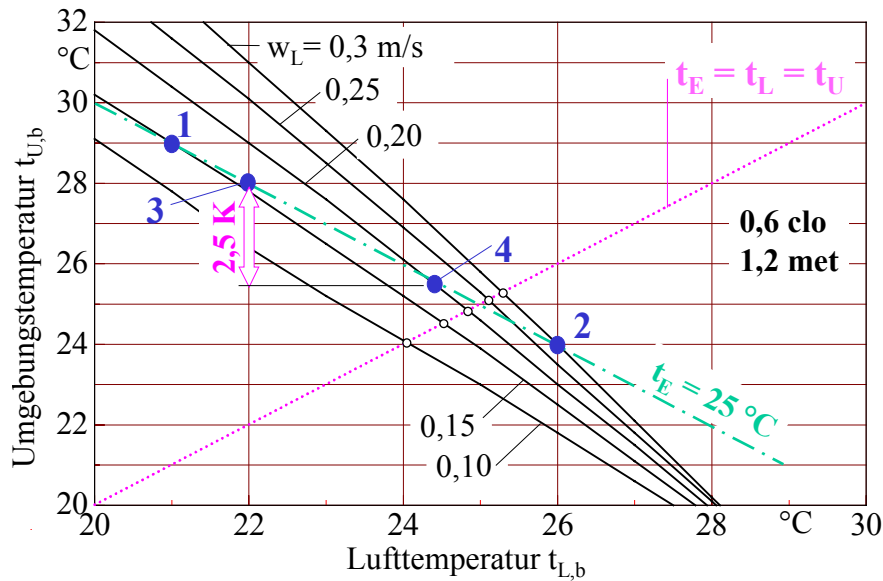


Bild 1 Behaglichkeitsdiagramm für die Aktivitätsstufe 1,2 met (Bürotätigkeit), die Bekleidung 0,6 clo (mittlere Sommerbekleidung) und die relative Feuchte 50 % mit Darstellung des technischen Realisierungsbereiches

möglich:

Punkt 1 $t_U = 29 \text{ °C}$, $t_L = 21 \text{ °C}$, $w_L = 0,15 \text{ m/s}$ \Rightarrow Grenzwert, $w_L < 0,15 \text{ m/s}$ kaum realisierbar

Punkt 2 $t_U = 24 \text{ °C}$, $t_L = 26 \text{ °C}$, $w_L = 0,3 \text{ m/s}$ \Rightarrow oberster Grenzwert wegen Zuggefahr.

Damit wäre ein Variationsbereich zwischen t_U und t_L von etwa 5 K möglich. Weitere Einschränkungen ergeben:

Punkt 3 $t_U = 28 \text{ °C}$, $t_L = 22 \text{ °C}$, $w_L = 0,16 \text{ m/s}$ \Rightarrow $t_{L,\min, 0,1 \text{ m}} = 21 \text{ °C}$ nach DIN 1946 T. 2
 \Rightarrow $t_{L,\min} \equiv t_{L,\min, 1,1 \text{ m}} = 22 \text{ °C}$ bei $g_{Lt} = 1 \text{ K/m}$

Punkt 4 $t_U = 25,5 \text{ °C}$, $t_L = 24,5 \text{ °C}$, $w_L = 0,20 \text{ m/s}$ \Rightarrow kleinster Grenzwert wegen Zuggefahr.

Der Variationsbereich bezüglich t_U und t_L reduziert sich somit auf den Kleinstwert von 2,5 K.

Wenn die Strahlungstemperatur der Umgebung 28 °C übersteigt, muss gekühlt werden! Dies stellt ein Plädoyer für die thermische Bauteilaktivierung - realisierbar in vielfältiger Form - dar.

Mit der thermischen Bauteilaktivierung kann natürlich nur die trockene Raumlast kompensiert werden. Ein hygienisch notwendiger Außenluftvolumenstrom ist sicherzustellen.

Die möglichen Nachteile der konventionellen Klimaanlage (hohe Luftvolumenströme, hohe Luftgeschwindigkeiten im Raum) sind bei thermischer Bauteilaktivierung jedoch vermeidbar, da die Strahlungswärmeabgabe des Menschen an die Raumumfassungen erhöht wird.

Für die behagliche Empfindungstemperatur (operative Raumtemperatur) bei 5 % Unzufriedenen gelten nach ISO 7730 (Entwurf 1994) die rot gedruckten Werte in der nachfolgenden Tabelle, bei abweichenden Temperaturen ist der Prozentsatz der Unzufriedenen vermerkt:

Aktivität met (W/m ²)	Freizeitbekleidung 0,5 clo	leichter Büroanzug 0,75 clo	Büroanzug 1 clo
1 (58) ruhiges Sitzen	26,8 °C	25,3 °C	24,0 °C 22 °C ⇒ 11 % 20 °C ⇒ 32 %
1,2 (70) Bürotätigkeit	25,5 °C	23,9 °C 26 °C ⇒ 12 %	22,3 °C 26 °C ⇒ 21 % 20 °C ⇒ 11 % 18 °C ⇒ 25 %

- *Partikuläre Behaglichkeitsbedingungen*

Räume mit thermischer Bauteilaktivierung bieten sehr gute Voraussetzungen für geringe Luftgeschwindigkeiten. Das Zugrisiko bedarf deshalb in der Regel keiner gesonderten Betrachtung.

Die zulässigen Werte der Strahlungstemperatur-Asymmetrie sind in DIN 1946 Teil 2 fixiert. Die Darstellung und die Grenzwerte werden vom Verfasser nicht geteilt. Nach den Ausführungen in [2] ergeben sich die zulässigen Grenzkurven gemäß Bild 2. Dabei werden die Versuchswerte FANGERS aus den Jahren 1972 bis 1985 zugrunde gelegt, jedoch der Kopf als wichtigster Sensor für die Strahlungsasymmetrie angenommen und durch ein Würfelement nachgebildet. Damit betragen die zulässigen Strahlungstemperatur-Asymmetrien für Heizdecken und Kühlwände 8 K, für Heizwände 11 K und für Kühldecken 14 K. Diese Grenzwerte sind durch die thermische Bauteilaktivierung aufgrund der geringen Temperaturunterschiede zum Raum ohne Einschränkung einhaltbar.

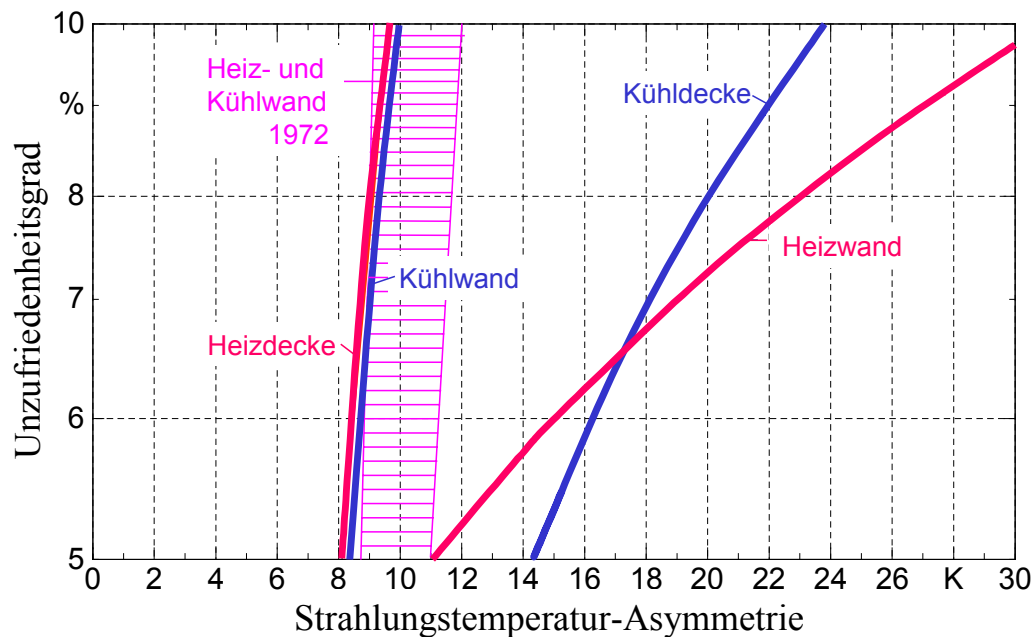


Bild 2 Zulässige Strahlungstemperatur-Asymmetrie nach [2] bezogen auf ein Würfelement auf der Grundlage der Versuche von FANGER

3 Energetische Betrachtung

Mit dem System der thermischen Bauteilaktivierung verbinden sich drei markante Vorteile.

- *Senkung der Transportkosten*

Der Einsatz von Systemen mit dem Wärmeträger Wasser zum Transport der kalorischen Energie ist wirtschaftlicher als die Verwendung des Wärmeträgers Luft, da die spezifische Wärmekapazität und die Dichte des Wassers bedeutend größer sind als die der Luft.

Es werden beispielsweise energetische Vorteile im Verhältnis 1:40 erreicht.

- *Exergetische Verbesserungen bei der Energiebereitstellung*

Der Einsatz großer Heiz- und Kühlflächen ermöglicht es, die erforderlichen Wärmeströme bei kleinen Temperaturdifferenzen zwischen Heiz- bzw. Kühlmedium und Raum zu übertragen. Der Exergiestrom (elektrische Leistung) zur Bereitstellung eines Wärmestromes aus der Umwelt z. B. durch Transformation mittels elektrisch betriebener Wärmepumpe oder Kältemaschine beträgt bei idealer Prozessführung:

$$\dot{E}_{12} = \int_1^2 \frac{T - T_U}{T} d\dot{Q} = \underbrace{\frac{T_{m,12} - T_U}{T_{m,12}}}_{\text{Carnot-Faktor}} \dot{Q}_{12}.$$

Ohne Beachten exergetischer Übertragungsverluste, der Maschinenwirkungsgrade usw. ergeben sich beispielsweise bei raumnahen Temperaturen des Heiz- bzw. des Kühlmediums gegenüber konventionellen Heiz- und Kühlsystemen nachfolgende Einsparungen:

- ▶ Heizfall bei 0 °C Umgebungstemperatur; Reduzierung der mittleren Heizmedientemperatur von 40 °C auf 25 °C \Rightarrow Exergieersparnis (= Ersparnis an Elektroenergie) 34 %
- ▶ Kühlfall bei 22 °C Umgebungstemperatur (z. B. Wassertemperatur bei Verdunstungskühlung mittels Kühlturm); Anhebung der mittleren Kühlmedientemperatur:
 - von 9 °C auf 16 °C (Kühldecken) \Rightarrow Exergieersparnis 55 %
 - von 9 °C auf 18 °C (nächtliche Bauteilkühlung) \Rightarrow Exergieersparnis 70 %.

- *Nutzung des Temperaturtagesganges*

Im Sommer kann vorteilhaft die zeitliche Verschiebung der Energielieferung für das Gebäude in die Nachtstunden verlegt werden, da dann kein oder nur ein geringer Transformationsaufwand (Exergiestrom) zur Energiebereitstellung erforderlich ist.

Alle energetischen Anforderungen (geringer Transportenergieaufwand, Heiz- und Kühlmedientemperaturen nahe der Raumtemperatur, Nutzung des Temperaturtagesganges) werden durch die thermische Bauteilaktivierung erfüllt.

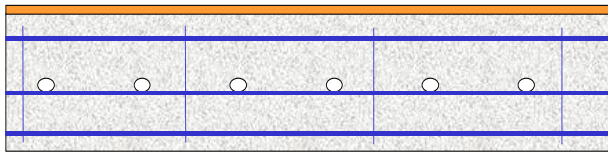
4 Entwicklung der instationär arbeitenden, thermischen Bauteilaktivierung

Zur Zeit ist der Einsatz von wasserdurchflossenen Rohrsystemen, die nachts von Kaltwasser z. B. $t_{KW} = 18 \text{ °C}$ durchströmt werden, in Massivdecken am weitesten verbreitet. Damit können die im Abschnitt 3 genannten drei Vorteile gleichzeitig genutzt werden. Die Oberflächentemperaturen schwanken je nach Betriebszustand zwischen 21 °C und 24 °C . Wegen der geringen Temperaturunterschiede zum Raum ist eine gute Selbstregulierung zu erwarten. Selbst das "Umschalten" von Heizen auf Kühlen ergibt sich automatisch:

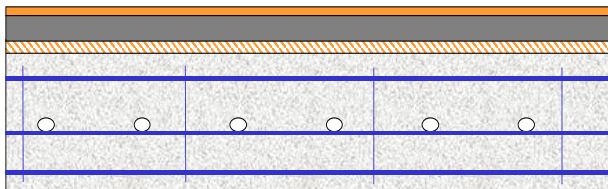
$t_{\text{Decke}} < t_{\text{Raum}} \Rightarrow$ Kühlfall

$t_{\text{Decke}} > t_{\text{Raum}} \Rightarrow$ Heizfall.

Fall A



Fall B



Fall C

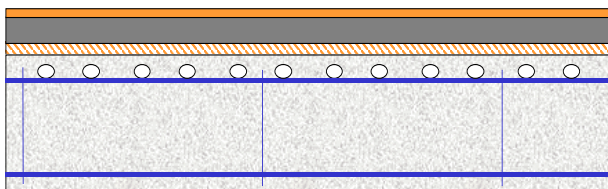


Bild 3 Prinzipielle, konstruktive Möglichkeiten der thermischen Bauteilaktivierung von Decken

Die konstruktiven Möglichkeiten und angestrebten Zielstellungen sind im Bild 3 gezeigt. Im Kern sind Rohrsysteme auf einer zusätzlichen Trägermatte gegen Aufschwimmen während des Betonierens fixiert. Die Trägermatte hat in der Regel keine statische Funktion. Im Fall A sind der obere und der untere Raum wärmetechnisch gut an das Bauteil angekoppelt. Der Wärmefluss von oben an die Decke wird aber auch bei gleichen Raumtemperaturen geringer als von unten sein, da der Wärmeübergangskoeffizient kleiner ist und außerdem bildet der Belag einen Wärmeleitwiderstand. Der Fall B ist bauphysikalisch richtiger ausgebildet, da ein schwimmender Estrich auf einer Trittschalldämmung angeordnet ist. Die Intensität der thermischen Kopplung an den oberen Raum sinkt hierbei jedoch. Fall C zeigt die Entwicklungsbestrebungen. Aus bautechnischen Gründen möchte man die Rohrsysteme möglichst außerhalb der Bewehrung anordnen, aus thermodynamischen Gründen (hohe Speicherkapazität) wird eine enge Rohrteilung angestrebt.

strebt.

Zunächst wurden Rohrsysteme mit im Fußbodenheizungsbau üblichen Durchmessern 26×2,5 mm, 20×2 mm und 17×2 mm - eingesetzt. In der "Neuen Messe Zürich" und in anderen Bauwerken sind Rohrabstände von 300 mm realisiert worden. Zwischenzeitlich werden auch Abstände von 150 mm eingesetzt.

In Versuchen wurden Kühlleistungen von 35 ... 40 W/m² bei täglich 10-stündigem Betrieb unter sommerlichen Bedingungen nachgewiesen.

Als neue Technologie sollten unbedingt die Kunststoff-Kapillarrohrmatten aus PP der Firma Clina, Berlin, die sich im Kühldeckenbau sehr gut bewährt haben, Beachtung finden. Die ursprünglichen Abmessungen betragen 3,4×0,55 mm bei Röhrenabständen von 10 ... 30 mm. Für den Einsatz in Betonbauteilen ist eine Spezialbetonmatte mit den Abmessungen 4,3×0,9 mm mit höherer Zugfestigkeit und etwas größerem freien Querschnitt entwickelt worden. Der Vorzugsabstand der Röhren beträgt 30 mm. Die Kapillarrohrmatten tragen deutliche Merkmale einer Basistechnologie: bessere Nutzung der Energiequellen, Massenproduktion, Kostenreduktion gegenüber konventionellen Technologien, Einsatz recycelbarer Materialien, Langzeitstabilität, inkrustationsfreier Werkstoff, Einfachheit im Aufbau, multivalente Einsatzmöglichkeiten.

Die kleinen Rohrabstände bewirken bei eingegossenen Matten eine nahezu homogene Temperaturverteilung, woraus sich große thermodynamische Vorteile ergeben.

Der Einsatz der Kunststoff-Kapillarrohrmatten zur Temperierung in Raumumfassungsflächen entspricht der Zielstellung der BIONIK – die natürlichen, vor allem die biologischen Vorgänge in den Technikbereich zu übertragen –, denn der Funktion des Blutgefäßsystems zur Wärmeregulation kann sehr gut entsprochen werden.

5 Speicherfähigkeit als Funktion des Rohrsystems

Die Temperaturverteilung und damit die Größe der Speicherwärme ("Speicherwärme") in der Decke ist eine Funktion des eingesetzten Rohrsystems. Diese Abhängigkeit wurde für stationäre Verhältnisse bzw. nach unendlich langer Ladezeit für eine Betondecke der Dicke 300 mm mit symmetrischer Rohrlage und für einen Wärmeleitwiderstand des Bodenbelages von 0,143 m²K/W untersucht. Als thermische Randbedingungen galten: Raumtemperatur 24 °C; mittlere Wassertemperatur 18 °C. Bild 4 zeigt eine gute Korrelation zwischen der Rohroberfläche im Bauteil und der Speicherwärme für die beiden untersuchten Rohrvarianten. Die Ursprungsvariante mit Rohr 20 mm × 2 mm, Abstand 300 mm lieferte $Q_S = -645 \text{ kWh/m}^2$. Das mögliche Entwicklungspotenzial zeigte der Einsatz einer Kapillarrohrmatte, Röhren 3,4 mm × 0,55 mm, Abstand 15 mm mit $Q_S = -981 \text{ kWh/m}^2$. Dies ist ein Zuwachs von 50 %.

Im betrachteten Fall weist die mit Kapillarrohren bestückte Decke auch bezüglich der Kühlleistung einen Vorteil von 56 % auf. Die hohe Kühlleistung kann nachts auch das Interieur z. B. eines Büroraumes intensiv kühlen und somit den Speichervorgang unterstützen.

Die Entwicklung der realen Systeme (Bild 4) zeigt eine Annäherung, allerdings ist ein deutlicher Qualitätssprung bleibend vorhanden. Bei Einsatz von Kapillarrohrmatten tritt auch eine deutliche Materialeinsparung auf.

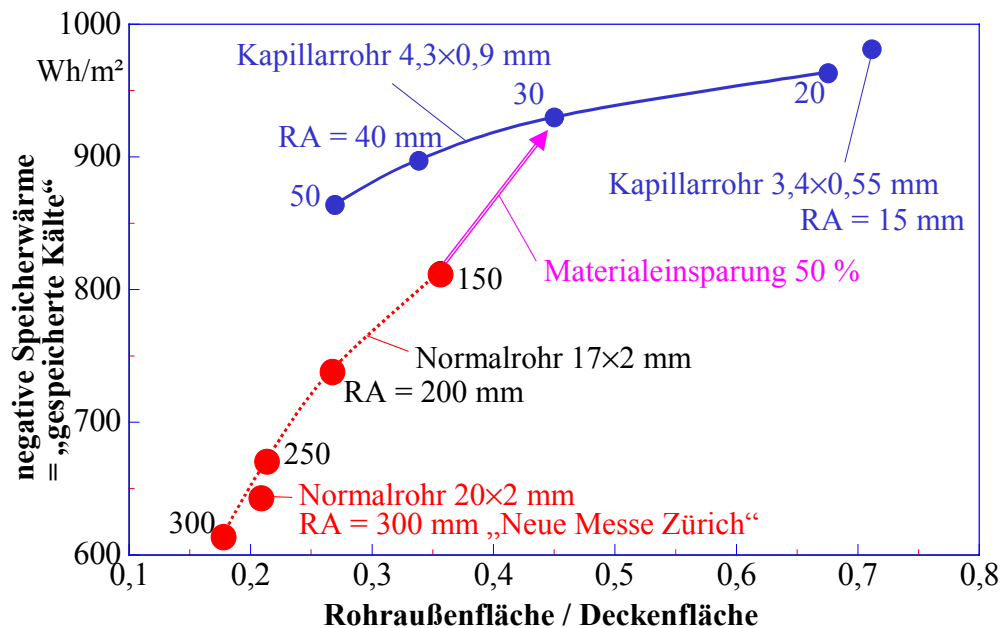
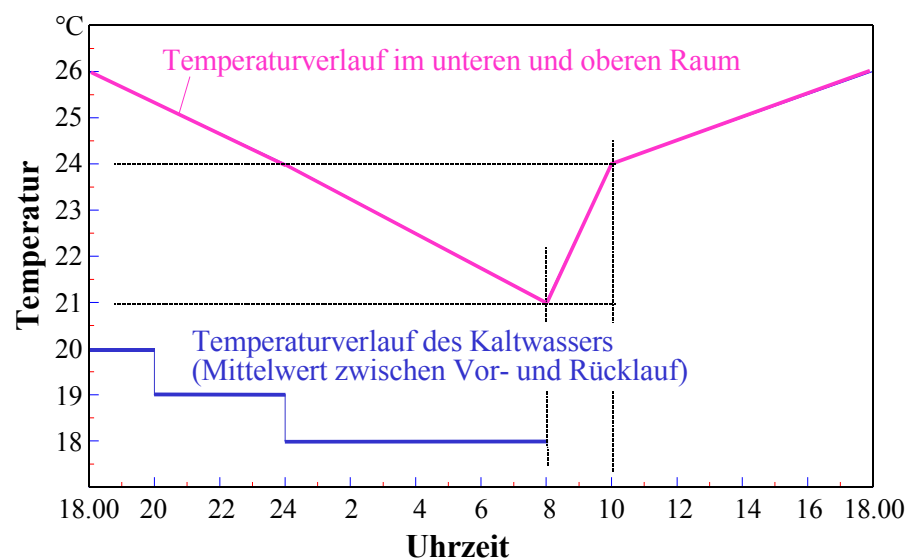


Bild 4 Zusammenhang zwischen Rohraußenfläche, die in der Decke integriert ist, und der gespeicherten Kälte in Abhängigkeit des Rohrsystems

6 Dynamisches Verhalten als Funktion des Rohrsystems

Die nachts gekühlte Decke, die am Tage über eine Nutzungszeit von zehn Stunden für eine deutliche Wärmeabfuhr sorgen soll, wurde auch dynamisch unter Vorgabe des Raumtemperaturver-



laufs (Geschossbau mit gleichen Temperaturen im oberen und unteren Raum) und des Kaltwassertemperaturverlaufs untersucht.

Bild 5 Vorgabe der Temperaturverläufe für die dynamische Untersuchung

Die Dynamik ist über drei Tage berechnet worden. Es zeigt sich nach Bild 6, dass bei herkömmlichen Rohrsystemen nach zwei Tagen, bei Kapillarrohrmatten nach einem Tag der Einschwingvorgang beendet ist. Der Vergleich der Extremvarianten ergibt einen Kühlleistungsunterschied von 50 % zugunsten der Kunststoff-Kapillarrohrmatten. Bild 7 vergleicht die Kühlleistungen der derzeitigen Realvarianten.

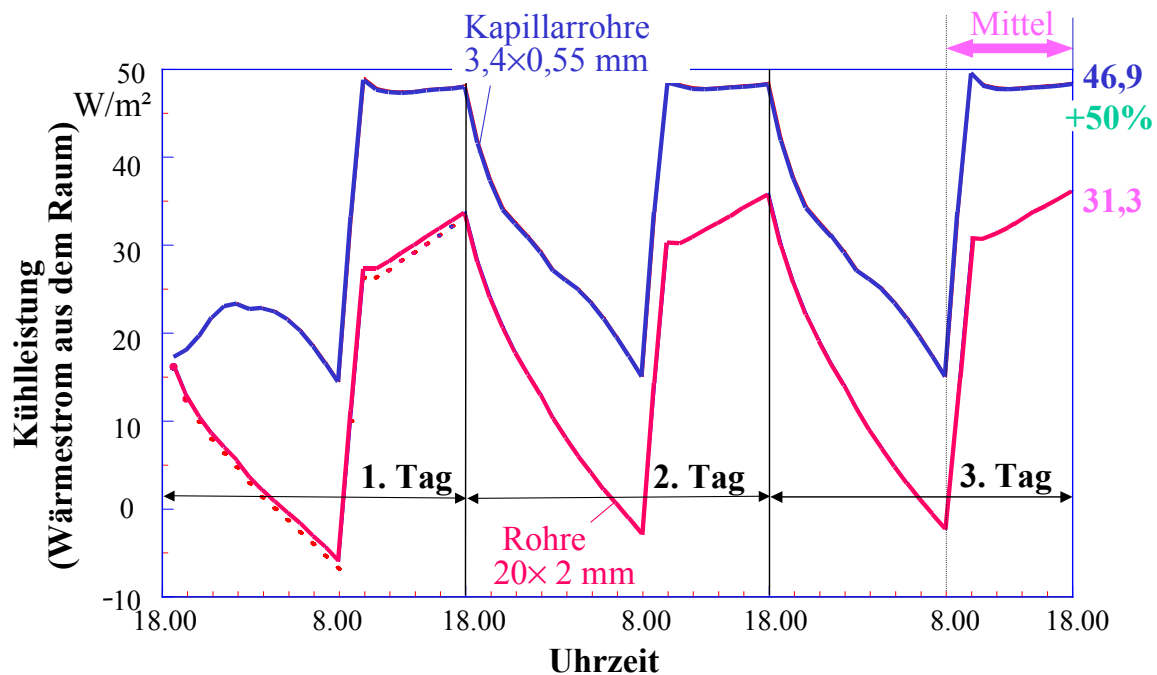


Bild 6 Kühlleistungen der Decke während der ersten drei Tage nach der Inbetriebnahme für zwei unterschiedliche Rohrsysteme (homogene Deckentemperatur zu Beginn: 24 °C) Die über den Nutzungszeitraum gemittelten Kühlleistungen unterscheiden sich bis zu 50 %. Die eingetragene punktierte Kurve ist mit einem feineren Gitternetz berechnet worden.

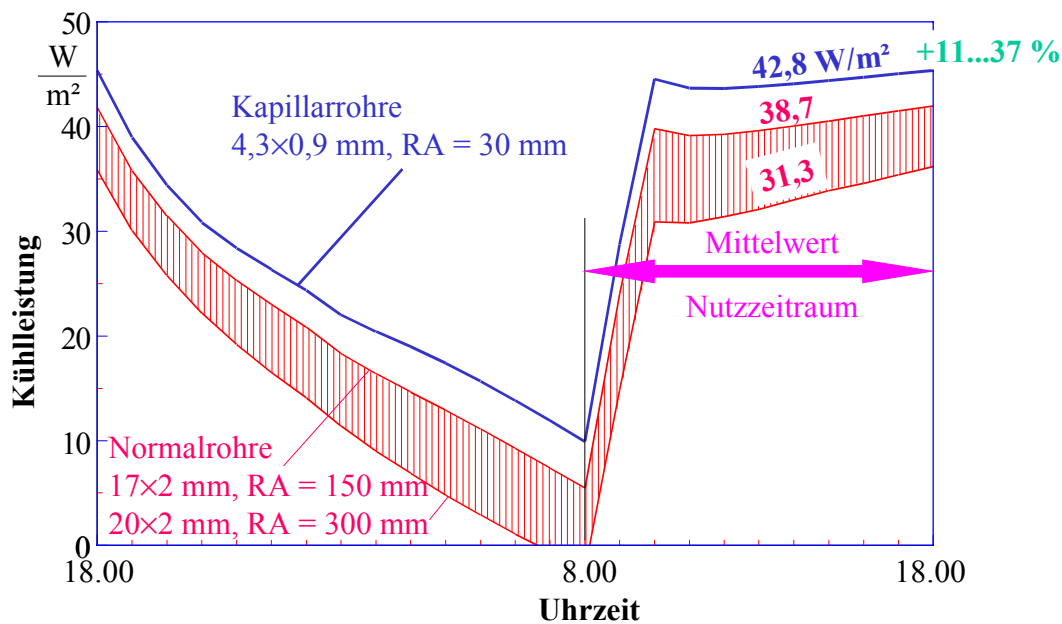


Bild 7 Kühlleistungen der Decke im eingeschwungenen Zustand für die derzeitigen realen Systeme bei Vorgabe der Temperaturverläufe nach Bild 5

7 Grundprinzipien zur Anwendung der thermischen Bauteilaktivierung

- Die objektive Systemcharakterisierung beginnt mit der richtigen Bezeichnung. Sie sollte lauten: Thermische Bauteilaktivierung zur passiven, umweltschonenden Unterstützung der Raumklimatisierung! Die Bezeichnung Bauteilklimatisierung ist falsch.
- Notwendige Bestandteile zur umfassenden Funktionstüchtigkeit sind eine Lüftungsanlage zur Sicherung des hygienisch bedingten Außenluftbedarfs und zur Regelung der Feuchte. Die Gewerkeverantwortung ist sicherzustellen.
- Offene und ehrliche Information des Kunden über die Leistungsfähigkeit des Systems.
- Es handelt sich um ein Passivsystem mit großer Trägheit:

Die Entladung des Speichers erfolgt rein passiv ohne Einflussnahme des Raumnutzers, was den Akzeptanzwillen des Nutzers voraussetzt. Eine Leistungsbeeinflussung ist nur durch die Steuerung der Aufladung gegeben. Es sind Prognosen zum Lastverlauf und zum Witterungsverlauf (äußere Last, Kühlmöglichkeit) zu stellen.

Es können Abweichungen im Tagesgang auftreten, die nicht mehr kompensierbar sind. Zusatzsysteme zur trägheitsarmen Heizung werden vielfach angewandt. Zusatzsysteme zur trägheitsarmen Kühlung sind zu diskutieren!

- Merkmale des Energieeinsatzes sind:

Wichtigstes Argument ist die Nutzung von Umweltenergie direkt oder mit geringer Transformationsenergie und die weitest gehende Vermeidung von elektrisch erzeugter Kälte.

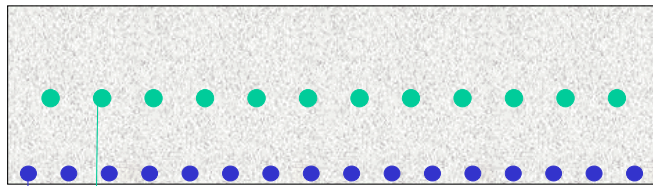
Energiemehrverbrauch ist teilweise durch den Selbstreguliereffekt bedingt, kann aber vor allem durch beliebige Fensteröffnung, durch falsche Ladestrategie und falsche Prognosen hervorgerufen werden. **Nur was nichts kostet und die Umwelt nicht belastet, darf verschwendet werden. Deshalb sind effiziente Speichersysteme einzusetzen, die möglichst viel Umweltenergie einlagern!**

- Die Funktionstüchtigkeit ist nicht nur für die Extremfälle - Sommer und Winter - zu betrachten, sondern vor allem auch für die Übergangsbedingungen. Eine genaue Lastsimulation ist erforderlich. Die Berechnung der Kühllast nach VDI 2078 oder eine pauschale Berücksichtigung der Speicherwärme bzw. der Kühlleistung ist nicht richtig.

8 Vollwertiges System zur Lastkompensation

Dies ist beispielsweise durch eine Kombination eines trägen Passivsystems im Betonkern (nächtliche Beladung mit Umweltenergie) und eines trägheitsarmen Aktivsystems in Nähe der Deckenoberfläche (bedarfsabhängiger Durchfluss von Kaltwasser aus einem Kaltwassersatz) möglich (Bild 8). Die Beaufschlagung des ersten Registers erfolgt prognosegesteuert, die des zweiten Registers ist in die Regelung der Klimaanlage einbezogen und arbeitet analog einer Kühldecke.

Die Leistung und die Dynamik hängen von der Art der Kapillarrohrmatte und der Einbettungstiefe ab. Ohne Beachten der Wassertransportzeiten sind kurzfristig (ca. 10 ... 15 min) Kühlleistungen von 50 W/m² zu erwarten.



1. System: *Passivsystem als Hochleistungssystem*

- Rohrregister zur nächtlichen Bauteilkühlung
- Wasser aus freier Kühlung (Kühlturm)
- Beladung prognosegesteuert

2. System: *Aktivsystem zur Spitzenlastkompensation*

- oberflächennahes Rohrsystem (Kapillarrohrmatten)
- Kaltwasser aus einer Kälteanlage
- Regelung ist integraler Bestandteil der Klimaregelung

Bild 8 Lösungsvorschlag zur vollwertigen Lastkompensation durch Einsatz eines passiv und eines aktiv arbeitenden Systems

Selbstverständlich könnte das Zusatzkühlsystem auch in einer weiteren Raumbegrenzungsfläche (Wand, Fußboden) integriert sein oder ein separates Konvektionssystem darstellen.

Damit ist die derzeit übliche thermische Bauteilaktivierung (Decke) zu einem vollwertigen System zur Lastkompensation erweiterbar, welches eine Gewährleistung der Raumkonditionen nach DIN 1946 Teil 2 ermöglicht.

9 Kreislaufverbund-Kombinationen

Die bisher betrachtete thermische Bauteilaktivierung - beispielsweise der Decke - stellte eine Kombination von Speicher und Wärmeübertragerfläche an den Raum dar. Sie zeigte eine gute Funktion im Kühlfall, nachts laden, tags darauf entladen. Im Heizfall ist die Funktion ungenügend, denn die Ladung muss am Tage erfolgen und der Bedarfszeitraum erstreckt sich sowohl über den Tag als auch über den nächsten Morgen. Verschiedene konstruktive Modelle wurden geprüft, sie ergaben zur morgendlichen Anheizspitze aber nur Leistungen um 20 W/m².

Geeignet erscheinen der Einsatz von reinen Bauteilspeichern, die im hydraulischen Verbund mit trägheitsarmen Heiz- bzw. Kühlflächen arbeiten. Als Speicher sind im Geschossbau beiderseits gedämmte Deckenplatten (z. B. Dämmung oben mit Trittschalldämmung und unten mit Akustikplatten kombiniert) oder oben gedämmte Fundamentplatten mit Erdreichankopplung denkbar, die mit ein oder mehreren Rohrmattenlagen bestückt sind. Den Variantenreichtum zeigt Bild 9.

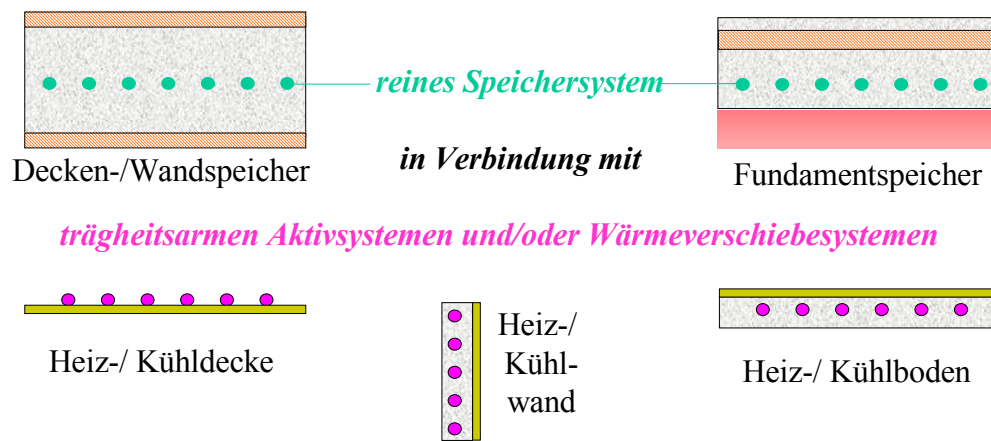


Bild 9 Kreislaufverbund-Kombinationen durch wärmetechnische Zusammenschaltung von reinen Bauteilspeichern und raumseitigen Wärmeübertragerflächen im hydraulischen Verbund

Zum Betrieb der Kreislaufverbund-Kombinationen sind reine Bauteilspeicher und Hochleistungswärmeübertragerflächen im Raum zu entwickeln.

10 Reine Bauteilspeicher

Dies könnten im Geschossbau beiderseits gedämmte Deckenplatten sein, die mit Be- und Entladesystemen oder aber mit einem umschaltbaren System ausgerüstet sind. Andererseits bieten sich Fundament-Erdreichspeicher an.

Die Rohrregister in den Speichern sollten Kapillarrohrmatten sein, um eine möglichst homogene Temperatur im Speicher - und damit eine große Speicherwärme - zu erzielen.

Beispielhafte Untersuchungen ergaben, dass einer Betondecke (Dicke 300 mm) im Heizfall von 7⁰⁰ bis 20⁰⁰ Uhr etwa 35 W/m² entnommen werden könnten, wenn die Ladung von 10⁰⁰ bis 16⁰⁰ Uhr mit Heizwasser $t_{HW} = 32 \text{ °C}$ aus einer Solaranlage erfolgte.

Ein Fundament-Erdreichspeicher unter einer Tiefgarage (Bild 10) wurde ebenfalls detailliert untersucht.

Die Untersuchungen der instationären Vorgänge zeigten, dass bei moderatem Wärmeentzug der Speicher über Zeiträume von vier Wochen gut nutzbar ist (z. B. Bild 11). Es ergaben sich:

Systembelastung werktags 8 ⁰⁰ bis 18 ⁰⁰	mittlere Wassertemperatur in °C		Entspeichergrad in % Betonplatte und des Erdreichs bis Sohle
	minimal	maximal	
40 W/m ²	11	23	15
20 W/m ²	10	17	9

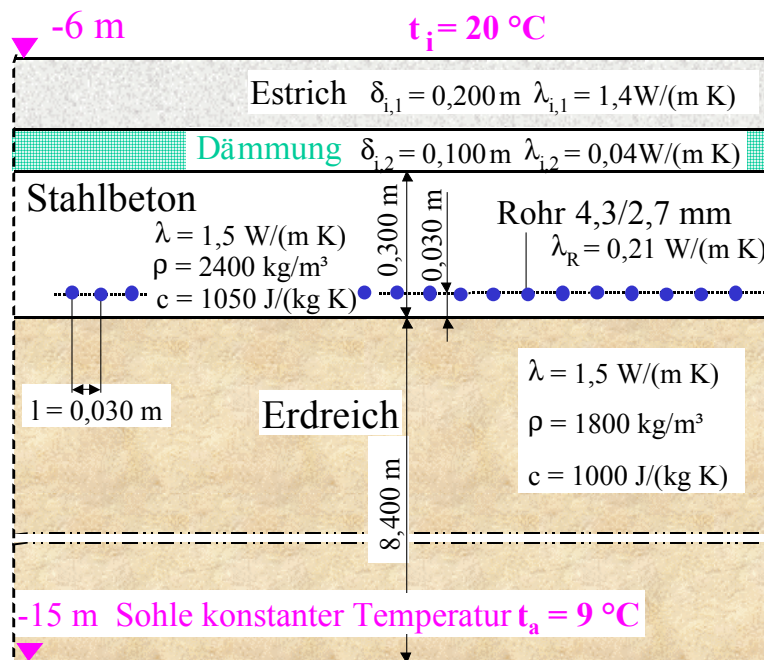


Bild 10 Fundament-Erdreich-Speicher unter einer Tiefgarage. Der Speicher ist durch eine Dämmung thermisch von der Garage entkoppelt. In der Stahlbetondecke darunter ist eine Kapillarrohrr Matte für Betoneinsatz integriert.

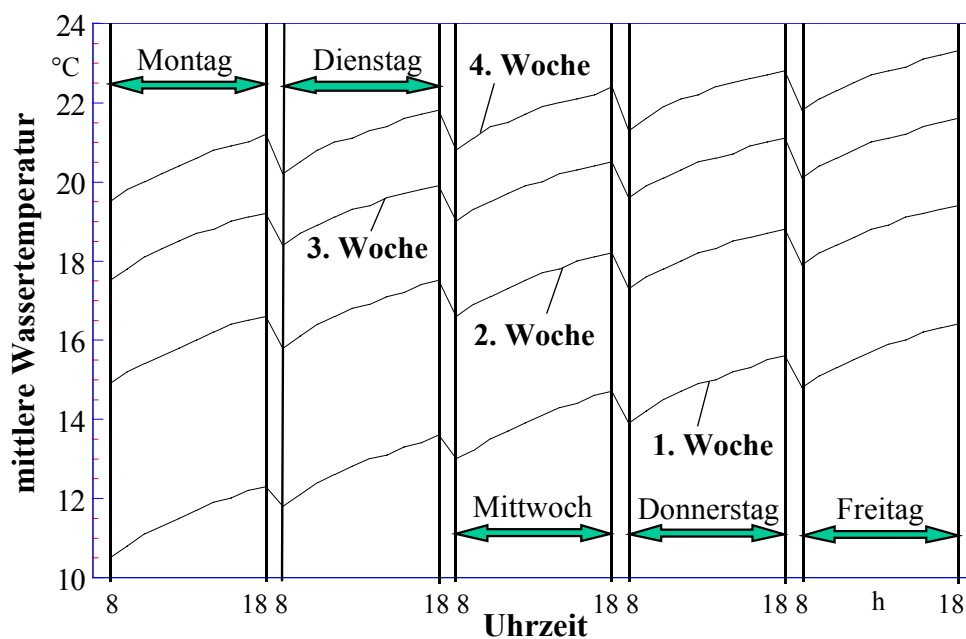


Bild 11 Mittlere Wassertemperatur als Zeitfunktion bei einer Leistung von 40 W/m^2

Bei einer höheren Entnahmelistung (100 W/m^2) oder bei beabsichtigter hoher Entnahme mit niedrigerer konstanter Wassertemperatur (17 °C) ist der Speicher überfordert, da die "Erholungsphasen" zu kurz sind. Andererseits zeigen aber die geringen Entspeichergrade bei vierwöchigem Betrieb, dass durch Einsatz mehrlagiger Register oder bei Realisierung von kurzen Lade-/ Entladezyklen beachtliche Entnahmel Leistungen erreicht werden können. Die Eindringtiefe der Temperaturänderung innerhalb der Untersuchungszeit von 25 Tagen ist mit ca. 5 m relativ klein.

Wichtiger Hinweis:

Die Regenerationsmöglichkeit der Speicher muss genau untersucht werden. Eine aktive Ladung ist in den meisten Fällen unerlässlich!

11 Leistungsfähige Flächenheiz- und Kühlsysteme

Zur Realisierung der Kreislaufverbund-Kombinationen sind trägheitsarme Hochleistungswärmeübertrager im Raum erforderlich. Mögliche Varianten zeigt Bild 12. Mit speziell entwickelten Rechenprogrammen wurden Fußbodenheiz- sowie Wandheiz- und Wandkühlsysteme mit Kapillarrohrmatten im Vergleich zu konventionellen Systemen bezüglich ihrer Leistung und Dynamik untersucht.

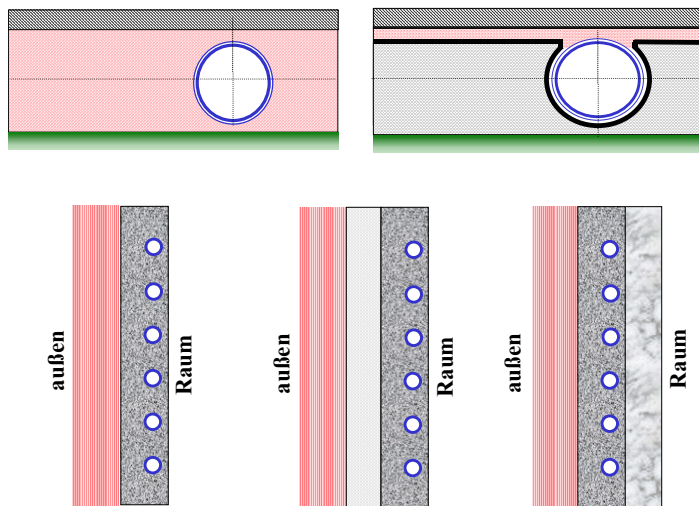


Bild 12 Fußbodenheizungen und Wandheiz- bzw. Wandkühlsysteme mit Kapillarrohrmatten
Die Matten werden bei Fußbodensystemen (Bild oben) direkt im Fliesenkleber eingebettet oder in einer Profilfolie eingespachtelt. Bei Wandsystemen liegen diese beispielsweise im Gipsputz, wobei die Rohrschicht die Raumbegrenzung bildet (links, Mitte) oder von einem Fliesenbelag (rechts) abgedeckt wird.

Bild 13 zeigt ein Beispiel für die Leistungsfähigkeit von Fußbodenheizungen mit Kapillarrohrmatten im Fliesenkleber. Gegenüber einem Verifikationsbeispiel mit herkömmlichem Aufbau (Nassverlegesystem) ist eine Senkung der mittleren Heizwasserübertemperatur von 20 K auf 13 K möglich. Gleichzeitig wird die Temperaturwelligkeit an der Oberfläche reduziert. Die Aufheizzeiten verkürzen sich deutlich (Bild 14).

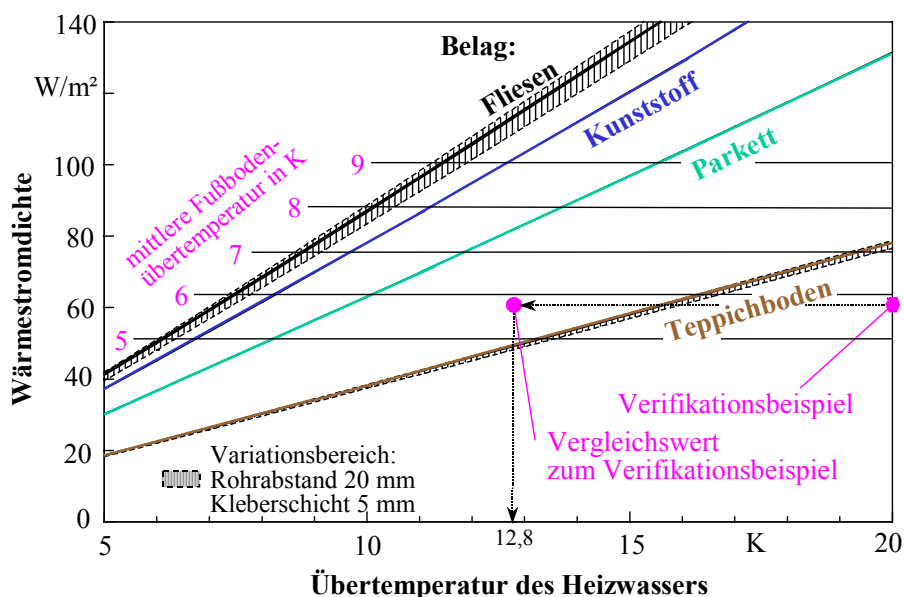


Bild 13 Beispiel eines Leistungskennfeldes für eine Fußbodenheizung mit Kapillarrohrmatten (3,4 mm × 0,55 mm, Abstand 15 mm) in der Kleberschicht (Dicke $\delta = 9$ mm, $\lambda = 1$ W/(m K)) und Angabe eines Verifikationsbeispiels

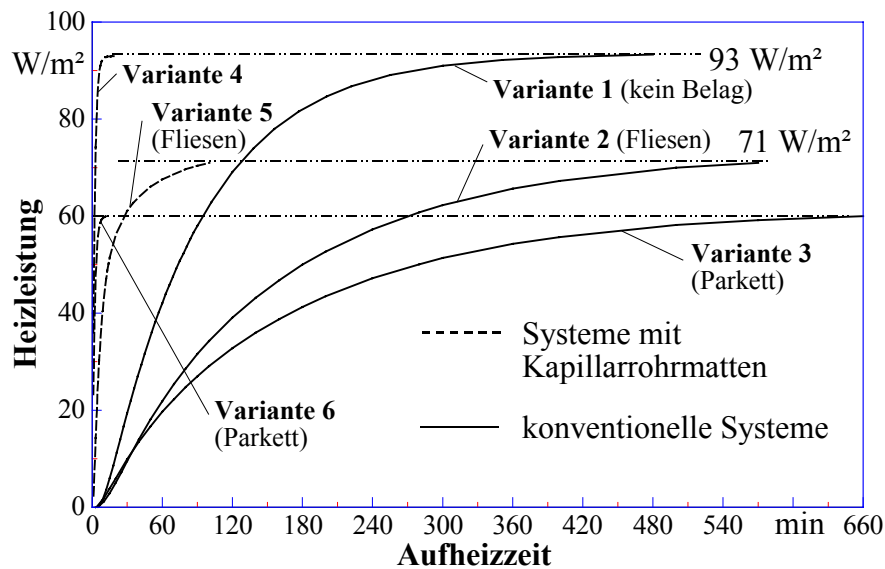


Bild 14 Zeitlicher Verlauf des Aufheizvorganges für verschiedene Fußbodenheizungen. Es wurden Wassertemperaturen und Raumtemperaturen zugrunde gelegt, wie sie im stationären Betriebsfall bei der angegebenen Leistung gelten.

Bei den Wandheiz- und Wandkühlflächen hat die Wärmestromrichtung keinen Einfluss auf den Wärmeübergangskoeffizienten. Damit gelten die ermittelten Wärmestromdichten als Heizleistung bei der Wandübertemperatur Δt und als Kühlleistung bei der zahlenmäßig gleichen Wanduntertemperatur $|\Delta t|$. Die Ergebnisse im Bild 15 zeigen die deutliche Überlegenheit von Kunststoff-Kapillarrohrmatten im Gipsputz oder in Gipsplatten gegenüber mit Kupferrohr bestückten Varianten. Bereits bei Temperaturdifferenzen von 8 K sind Wärmestromdichten von über 50 W/m^2 erreichbar. Bei den herkömmlichen Systemen ist nur ein Drittel dieser Leistung möglich.

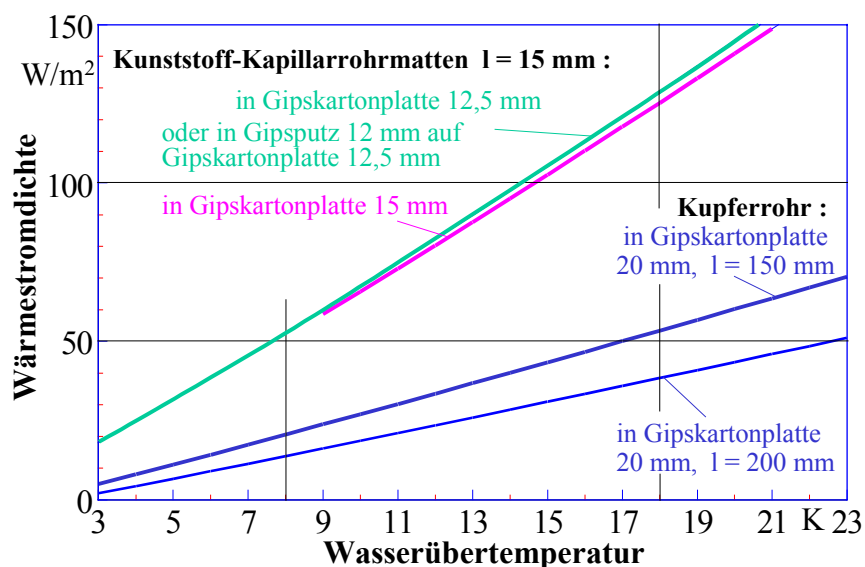


Bild 15 Heizleistung einer Wand mit unterschiedlichen Rohrsystemen in Abhängigkeit der Wasserübertemperatur (Die Kühlleistung ist zahlenmäßig gleich der Heizleistung bei entsprechender Wasseruntertemperatur.)

Interessant sind auch die Temperaturwelligkeiten auf der raumseitigen Oberfläche. Sie betragen bei 50 W/m^2 und einer Raumtemperatur von 22 $^{\circ}\text{C}$:

System	Oberflächentemperatur in °C		Welligkeit K
	maximal	minimal	
Kapillarrohrmatten (l = 15 mm) in 15 mm Gipsplatte	28,4	28,3	0,1
Kupferrohrregister (l = 150 mm) in 20 mm Gipsplatte	36,2	24,5	11,7

Bei Anordnung eines Fliesenbelages auf der Wand zeigen sich rohrabhängig ganz unterschiedliche Veränderungen im Leistungsverhalten. Die Wärmeleitung zwischen den Kapillarrohren ist so gut, dass jeder weitere Belag als zusätzlicher Wärmeleitwiderstand zum Raum in Erscheinung tritt. Somit sinkt die Wärmestromdichte um 7 %. Bei der Wand mit Kupferrohrregistern verbessert sich bei einem zusätzlichen Fliesenbelag die Wärmeleitung zwischen den Rohren, sodass eine Leistungssteigerung um 11 % auftritt. Dennoch erreichen die Wärmestromdichten höchstens 50 % der Varianten mit Kunststoff-Kapillarrohrmatten.

Der Einsatz von Blähglas - eigentlich ist dies mit $\lambda = 0,09 \text{ W/(m K)}$ ein Dämmstoff - mit integrierten Kapillarrohrmatten zeigt ein durchaus attraktives Leistungsvermögen. Bei einer Übertemperatur von 8 K wird eine Wärmestromdichte von ca. 40 W/m^2 erreicht. Aufheiz- und Abkühlungsverlauf zeigen eine gute trägheitsarme Leistungsanpassung.

[Fußboden- und Wandelemente mit Kapillarrohrmatten stellen Hochleistungs-Aktivsysteme zum trägheitsarmen Heizen und Kühlen dar, die die übliche thermische Bauteilaktivierung ergänzen können oder im Verbund mit reinen Bauteilspeichern neuartige Lösungen ermöglichen.](#)

12 Fazit

Zur Verfolgung des vorliegenden Zieles sind vordringlich [Algorithmen zur wärmetechnischen Bewertung von Bauteilen](#) (Decken, Fußböden, Wände) mit wasserdurchströmten Rohrsystemen erarbeitet und zusammengestellt worden. Sie wurden für den [instationären Bereich](#), d. h. zur Beurteilung der wärmetechnischen Dynamik (Aufheiz- und Abkühlverhalten, Speichervermögen, zeitliche Leistungsverläufe), neu entwickelt. Für die [stationären Berechnungen](#) konnte auf frühere Veröffentlichungen des Bearbeiters zurückgegriffen werden. Sie sind den vorliegenden Problemen angepasst und in der Darstellung vereinheitlicht worden. Auf der Grundlage der Algorithmen wurden [Rechenprogramme erstellt und verifiziert](#). Die statischen und dynamischen Verfahren zeigten an den Schnittstellen gleiche Ergebnisse. Alle Programme und Proberechnungen sind in [1] nachprüfbar offengelegt. Damit sind zur Bewertung des Heiz- und Kühlverhaltens Werkzeuge für folgende Bauelemente verfügbar:

<ul style="list-style-type: none"> • Decken • Wände • Fundamente und Erdreich 	<p>statische und dynamische wärmetechnische Berechnungsverfahren</p> <p>⇒ zweidimensionale stationäre und instationäre Wärmeleitung</p> <p>⇒ Leistungsberechnung, Speicherverhalten, Optimierung</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Fußboden 	<p>statische und dynamische wärmetechnische Berechnungsverfahren für homogen aufgebaute Systeme (Nassverlegeverfahren)</p> <p>⇒ zweidimensionale stationäre und instationäre Wärmeleitung</p> <p>⇒ Leistungsberechnung, Speicherverhalten, Optimierung</p> <p>statische wärmetechnische Berechnungsverfahren für heterogen aufgebaute Systeme (Trockenverlegeverfahren)</p> <p>⇒ eindimensionale stationäre Wärmeleitung</p> <p>⇒ Leistungsberechnung, Optimierung</p>

Alle Programme - vor allem die auf numerischer Basis arbeitenden - kann man beliebig ergänzen. Sowohl die Programmgrundlagen als auch die Listings geben eine gute Einarbeitung.

Die Bauteilberechnung ist stets wie folgt aufgebaut:

- [Algorithmus](#)
- [Rechenprogramm](#)
 - ⇒ Beschreibung des Ablaufs
 - ⇒ Ein- und Ausgabedaten
 - ⇒ Listing
 - ⇒ Testbeispiel mit Verifikation
- [Parameterstudie zum Bauteil bezüglich des wärmetechnischen Verhaltens.](#)

Die umfangreichen Studien über diese Bauteile (Decken, Fußböden, Wände, Fundamente/Erdreich) liefern sehr interessante, objektive Aufschlüsse über die Gestaltung von Hochleistungselementen im Sinne eines maximalen Einsatzes von Umweltenergie. Die Parametervariationen erstreckten sich beispielsweise von Normalrohrregistern bis zu Kapillarrohrmatten. Leistungsdiagramme sind in allen Fällen angegeben.

[Aus den bisherigen Untersuchungen ergaben sich folgende generelle Feststellungen:](#)

- I. [Der Einsatz von Umweltenergie \(atmosphärische Umwelt, solare Energie, Erdwärme\) ist direkt oder nach einer Transformation mittels Wärmepumpe oder Kältemaschine bei Verwendung von Hochleistungsbauteilen sehr gut möglich.](#)
- II. [Kann die Umweltenergie in konstanter oder nahezu konstanter Qualität zeitunabhängig entnommen werden – beispielsweise aus einem Erdkollektor oder saisonalen Speicher – dann](#)

ist im Gebäude nur der Einsatz von Hochleistungsbauteilen mit direkter Wärmeübergabe relevant (z. B. Einsatz von Fußbodenheizflächen).

III. Umweltenergie aus der Atmosphäre unterliegt einem Zeitrhythmus.

Zur Kühlung empfiehlt sich die nächtliche Entnahme, die Speicherung im Bauteil und die zeitverzögerte Abgabe an den Raum am Tage. Die Beladung sollte prognosegesteuert, aktiv erfolgen. Die passive Entladung ergibt sich bei optimierten Systemen etwa bedarfsgerecht im Verlaufe des Tages (Nutzungszeitraum).

Zur Heizung sollte die Entnahme der Umweltenergie am späten Vormittag beginnen und am frühen Nachmittag enden. Die aktive Speicherung in einem Bauteil und die passive, bedarfsgerechte Wärmeabgabe im Nutzungszeitraum sind nicht möglich. Das Speicherbauteil muss zur effektiven Einlagerung und bedarfsgerechten Wärmelieferung als "echter" Speicher – wärmegeklämmt zu den Räumen – gestaltet werden. Die Entladung hat aktiv und geregelt zu erfolgen, damit beispielsweise auch die morgendliche Anheizspitze realisierbar ist und mittags keine Überheizung auftritt. Die Wärmeabgabe an den Raum hat wiederum über Hochleistungselemente (Decken-, Fußboden- oder Wandheizungen) zu erfolgen.

Ist ein derartiges "intelligentes" System zum vorteilhaften Heizen mit atmosphärischer Umweltenergie installiert, dann kann dieses System selbstverständlich auch für den Kühlfall besonders effektiv genutzt werden.

IV. Die Umweltenergieaufnahme aus dem Erdreich über Rohrsysteme in der Fundamentplatte muss genau geplant werden. Die wärmetechnischen Eigenschaften des Erdreichs sowie die geologischen und hydrologischen Besonderheiten nehmen entscheidenden Einfluss auf die Leistungsfähigkeit.

Die Nutzung des an die Fundamentplatte thermisch angekoppelten Erdreichs als saisonaler Wärmespeicher ist bei genau abgestimmter, relativ kleiner Entnahmeleistung möglich (evtl. Anordnung mehrerer Wärmeübertragerelemente).

Fundament-Erdreich-Speicher eignen sich als Tages- oder Wochenspeicher sehr gut.

V. Kunststoff-Kapillarrohrmatten in Speicherbauteilen erwiesen sich bezüglich des Speichervermögens und der Lade-/Entladedynamik als optimal. Sie stellen gegenüber der konventionellen Technik Hochleistungselemente dar.

Literatur

- [1] Glück. B.: Thermische Bauteilaktivierung. C. F. Müller Verlag 1999 (ISBN 3-7880-7674-7)
- [2] Glück. B.: Wärmetechnisches Raummodell. C. F. Müller Verlag 1997 (ISBN 3-7880-7615-1)

Danksagung

Die vorliegende Ausarbeitung wurde von der
RUD. OTTO MEYER - UMWELT - STIFTUNG
gefördert, wofür sich der Verfasser recht herzlich bedankt.

Der besondere Dank gilt weiter Herrn Dipl.-Ing. BURKHARD HEYDEN, der als Architekt wertvolle
Diskussionsbeiträge bei der Abfassung der Arbeit lieferte.
