Leistungen und Dynamik von Wandheizungen im Vergleich

Bernd Glück

Die Integration von Kapillarrohrmatten in Wänden verschiedener Bauarten liefert interessante Ergebnisse bezüglich der Wärmestromdichten und des dynamischen Verhaltens beim Auf- und Abheizen im Vergleich zu konventionellen Rohrregistersystemen.
In der Literatur wurde in letzter Zeit verstärkt darauf hingewiesen, daß die unterschiedlichen Wandsysteme hinsichtlich dieser Eigenschaften versuchstechnisch zu untersuchen sind.
Dies wäre wirtschaftlich aber nicht vertretbar und lieferte in nächster Zeit auch keine Aussagen über den Vergleich der konkurrierenden Systeme, denn eine Vielzahl von Konstruktionen wäre herzustellen und anschließend unter gleichen Prüfstandsbedingungen zu messen.
Deshalb erfolgten vergleichende Rechnungen mit Hilfe von Simulationsprogrammen.

1. Untersuchte Bauarten und charakteristische Parameter

Bild 1 zeigt die Grundvariante (Bauart I), die in dieser Form direkt einsetzbar ist. Aus ihr werden dann die weiteren Bauarten durch Kombination mit zusätzlichen Schichten entwickelt. Insgesamt entstehen so drei unterschiedliche Bauarten.

Die Lage der Rohrebene kann in der Rohrschicht variieren. Sie ist durch die Parameter Δ_i und Δ_a fixiert, die in der Summe die Dicke δ ergibt. Die weiteren geometrischen Größen sind die Rohrdurchmesser d_a/d_i und der Rohrabstand l. Als wärmetechnische Parameter werden vorgegeben:

λ	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit der Rohrschicht
ρ	kg/m³	Dichte der Rohrschicht
c	J/(kg K)	spezifische Wärmekapazität der Rohrschicht
λ_R	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials
κ_a	W/(m²K)	Teilwärmedurchgangskoeffizient der Wand von der äußeren Rohrschichtoberfläche bis zum angrenzenden Raum oder bis zur Atmosphäre einschließlich des äußeren Wärmeübergangskoeffizienten
α_i	W/(m²K)	Wärmeübergangskoeffizient von der inneren Rohrschichtoberfläche an den Raum.

Bei den weiteren Untersuchungen wird eine Außenwand betrachtet und deshalb der Wert $\kappa_a = 0{,}4$ W/(m²K) = const für alle Varianten gesetzt, d. h. die Wand ist gut gedämmt.

Der innere Wärmeübergangskoeffizient enthält den Strahlungs- und Konvektionsanteil. Nach [1] kann in guter Näherung

$$\alpha_i = 5{,}1 + 1{,}6\ \vartheta_i^{0,3} \quad \text{in W/(m}^2\text{K)} \qquad (1)$$

gesetzt werden, wobei ϑ_i die Differenz zwischen der mittleren, inneren Wandoberflächentemperatur t_{mi} und der Raumtemperatur t_R (Empfindungstemperatur, operative Raumtemperatur) darstellt. Der Zusammenhang in Gl. (1)

Dr.-Ing. habil. Bernd Glück, F + E TGA, Goethestraße 18, 08547 Jößnitz (Plauen).

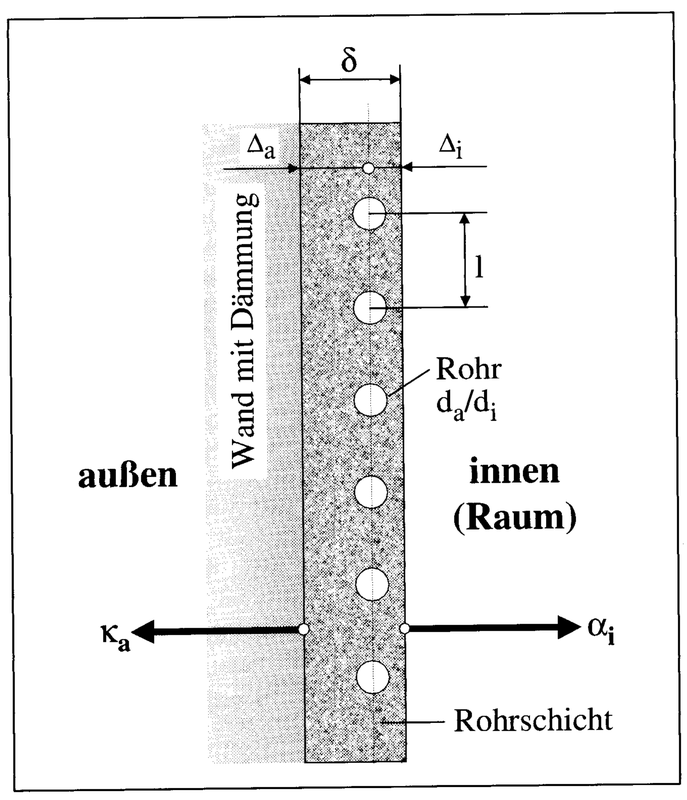

Bild 1. Rohrschicht der Dicke δ mit einem Rohrregister bestehend aus Rohren der Abmessung d_a/d_i, die im Abstand l angeordnet sind, vor einer Wandkonstruktion (*Bauart I*).

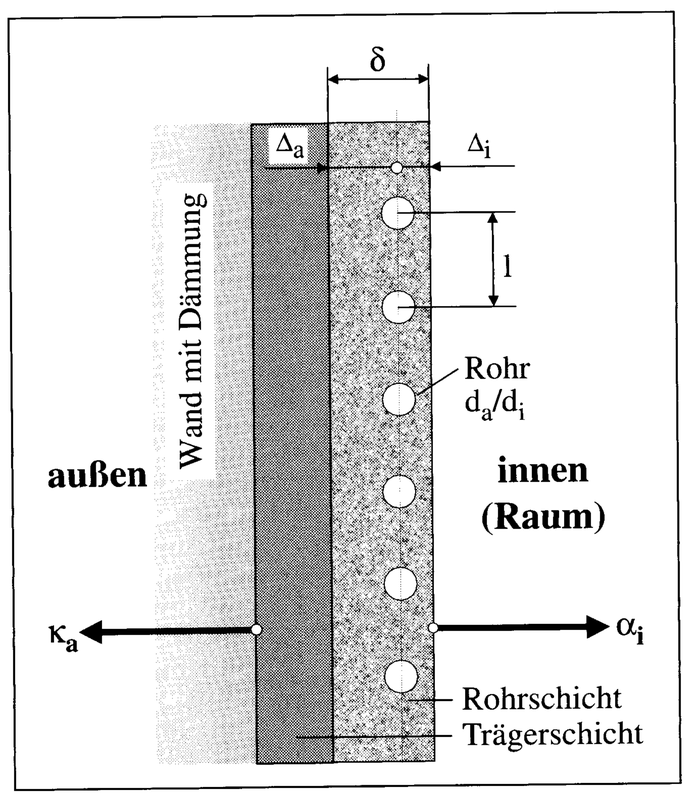

Bild 2. Rohrschicht beispielsweise Putz auf einer Trägerschicht vor einer Wandkonstruktion (*Bauart II*).

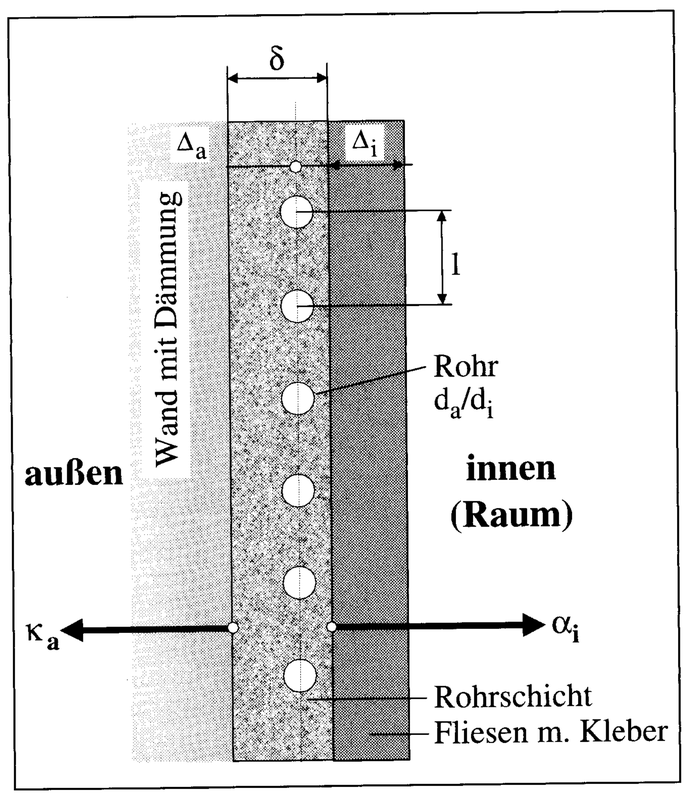

Bild 3. Rohrschicht beispielsweise Gipskarton mit Fliesenverkleidung vor einer Wandkonstruktion (*Bauart III*).

gilt auch für gekühlte Wände, wenn für ϑ_i der Absolutbetrag verwendet wird.

Die Wärmeleitung in der Rohrschicht wird zweidimensional betrachtet. In der anschließenden Wandkonstruktion sei dagegen nur eine eindimensionale Wärmeleitung senkrecht zur Rohrregisterebene angenommen. Dies ist durch die dort vorhandene Wärmedämmung gerechtfertigt.

Die weiteren untersuchten Bauarten II und III sind in den *Bildern 2* und *3* dargestellt. Die Rohrschicht ist hierbei auf der Außen- oder Innenseite mit einer weiteren Schicht L versehen, in der ebenfalls die Wärmeleitung zweidimensional betrachtet wird.

Die geometrischen und wärmetechnischen Parameter dieser Schichten tragen die Bezeichnungen:

δ_L	m	Dicke der zusätzlichen Schicht
λ_L	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit der zusätzlichen Schicht
ρ_L	kg/m³	Dichte der zusätzlichen Schicht
c_L	J/(kg K)	spezifische Wärmekapazität der zusätzlichen Schicht.

2. Untersuchte Varianten

Auf Basis der drei Bauarten sind die in der *Tab. 1* zusammengestellten Varianten konzipiert worden.

Fliesen und Kleber werden der Einfachheit halber als eine homogene Schicht betrachtet. Des weiteren gelten für das Rohrmaterial (Durchmesser und Wärmeleitfähigkeit):

- PP-Kunststoffrohrmatte (Kurzbezeichnung KM) d_a/d_i = 3,4/2,3 mm, λ_R = 0,21 W/(m²K)
- Kupferrohrregister (Kurzbezeichnung Cu) d_a/d_i = 10/8 mm, λ_R = 393 W/(m²K).

Von besonderem Interesse sind die Gegenüberstellungen der Varianten 1 und 5 sowie der Varianten 4 und 6. In beiden Fällen werden Kunststoff-Kapillarrohrmatten mit einem Kupferrohrregister verglichen. Im ersten Fall handelt es sich um die einfachste denkbare Bauweise (Bauart I), die Einbettung in eine Gipskartonplatte ohne Deckschichten, die sich auf einer gut gedämmten Wand befindet. Das Speichervermögen der Konstruktion ist sehr gering. Im zweiten Fall ist ein Fliesenbelag angebracht (Bauart III), d. h., es ist ein typischer Fall für Bäder vorgestellt.

Die Variante 2 stellt ein Spezifikum des Einsatzes von Kunststoff-Kapillarrohrmatten (Bauart II) dar. Variante 3 ist eine Neuentwicklung mit oberflächennaher Einbringung einer Kapillarrohrmatte in Blähglas. Die Wärmeleitfähigkeit dieses Stoffes ist so gering, daß nur kleinste Rohrabstände eine brauchbare Wärmeleistung ermöglichen.

Die Varianten 7 und 8 sind nicht empfehlenswert wegen der hohen Speichermasse der Ziegelwand, wobei Variante 8 (eingeputzte Kupferrohrschlangen) aber durchaus angewandt wird.

3. Simulationsmodell zur Berechnung der stationären Wärmestromdichte (Leistung)

Es ist zunächst naheliegend, eventuell die Leistungsermittlung für Fußbodenheizsysteme nach DIN 4725-2 vorbildhaft heranzuziehen. Wegen der Geometrie der Kapillarrohrmatten und des stark unterschiedlichen Aufbaus ist dies aber nicht möglich. Es wurde deshalb ein universell anwendbares Simulationsprogramm zur Ermittlung der Leistungen und Temperaturen sowie von Leistungsdiagrammen verwendet.

Es wird eine zweidimensionale Wärmeleitung in der Rohrschicht (Bauart I) und in den angrenzenden Schichten (Bauarten II und III) angenommen. Eine ausführliche Ableitung für diesen Fall findet sich auf der Grundlage von [2] in [1, S. 377 ff.]. Es gelten die Berechnungsschritte:

Tabelle 1. Untersuchte Varianten und deren charakteristische Parameter.

Variante	Bauart	Rohr	Aufbau	l	δ	Δ_i	Δ_a	δ_L	λ	ρ	c	λ_L	ρ_L	c_L
				mm	mm	mm	mm	mm	W/mK	kg/m³	J/kg K	W/mK	kg/m³	J/kg K
1	I	KM	Gipskarton	15	15	7,5	7,5		0,4	1000	1000			
1a	I	KM	Gipskarton	15	12,5	6	6,5		0,4	1000	1000			
2	II	KM	Gipsputz auf Gipskarton	15	12	8	4	12,5	0,5	1000	840	0,4	1000	1000
3	I	KM	Blähglas	15	35	5	30		0,09	500	840			
3a	I	KM	Blähglas	10	35	5	30		0,09	500	840			
4	III	KM	Gipskarton mit Fliesen	15	15	7,5	7,5	9	0,4	1000	1000	0,9	1700	920
5	I	Cu	Gipskarton	200	20	10	10		0,4	1000	1000			
5a	I	Cu	Gipskarton	150	20	10	10		0,4	1000	1000			
6	III	Cu	Gipskarton mit Fliesen	150	20	10	10	9	0,4	1000	1000	0,9	1700	920
7	II	KM	Gipsputz auf Ziegel	15	12	8	4	120	0,5	1000	840	0,7	1600	920
8	II	Cu	Gipsputz auf Ziegel	200	20	10	10	120	0,5	1000	840	0,7	1600	920

1. Schätzung der Rohraußentemperatur t_2 zum Eingabewert der mittleren Wassertemperatur (Fluidtemperatur) t_W; erste Annahme für $\alpha_i = 10$ W/(m²K) und Setzen der mittleren Übertemperaturen $\vartheta_i = 0$ an der raumseitigen Oberfläche der Wand
2. Ermittlung der Stoffwerte für das Heizwasser nach [3] und des wasserseitigen Wärmeübergangskoeffizienten an die Rohrwand nach einem speziellen Unterprogramm [1], welches die Wassertemperatur und die Geschwindigkeit berücksichtigt. Bei den Kapillarrohren werden $w_W = 0{,}1$ m/s und bei den Kupferrohren $w_W = 0{,}6$ m/s angenommen, wodurch sich im ersten Fall laminare und im zweiten Fall turbulente Strömungsverhältnisse mit bedeutend höheren Wärmeübergangskoeffizienten ergeben.
3. Berechnung des zweidimensionalen Temperaturfeldes in der Rohrschicht und bei den Bauarten II und III in einer zusätzlichen Wärmeleitschicht nach [1].
4. Bestimmung der mittleren Übertemperatur an der raumseitigen Oberfläche bezogen auf die Raumtemperatur ϑ_{iO}; wenn die Abweichung von der Annahme $|\vartheta_i - \vartheta_{iO}| > 0{,}1$ K ist, erfolgt die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten nach Gl. (1) und Rücksprung zu Punkt 3. *Ende der Iterationsschleife zur thermischen Anpassung des Bauteils an die Vorgabe t_2!*
5. Berechnung der Wärmestromdichten nach innen (Raum) sowie nach außen $\dot{q}_i$ und $\dot{q}_a$
6. Ermittlung der rechnerischen Wassertemperatur t_{WO}, die zur Annahme der Rohrwandtemperatur t_2 paßt; wenn die Abweichung $|t_W - t_{WO}| > 0{,}01$ K ist, dann verbesserte Schätzung von t_2 und Weiterrechnung ab Punkt 3. *Ende der Iterationsschleife zur Anpassung an die vorgegebene Wassertemperatur!*
7. Bestimmung der mittleren Wandoberflächentemperatur t_{mi} sowie der zugehörigen Minimal- und Maximalwerte t_{min} (zwischen den Rohren) und t_{max} (über dem Rohr).

Die Verifikation des Programms ist in [1] ausführlich dargestellt worden.

4. Ergebnisse der Leistungsberechnung

In den *Bildern 4* bis *7* werden die Ergebnisse in Diagrammform mitgeteilt, wobei die interessierenden Gegenüberstellungen jeweils zusammengefaßt sind. Für alle Rechnungen gelten:

Raumtemperatur $t_R = 22$ °C, Außentemperatur $t_a = 2$ °C.

Diskussion der Ergebnisse

- Sehr bemerkenswert sind die hohen Leistungen der Kunststoff-Kapillarrohrmatten gegenüber den Kupferrohrregistern. Sie sind bei den gewählten Parametern bei gleicher Übertemperatur mindestens doppelt so groß. In einigen Fällen (*Bild 4*) tritt sogar Faktor 3 auf.
- Die großen Leistungen bei Kapillarrohrmatten werden durch die geringen Rohrabstände bewirkt. Infolge dieser kleinen Rohrabstände l bei den Kapillarrohrmatten haben die Wärmeleitfähigkeiten der Rohrschichtmate-

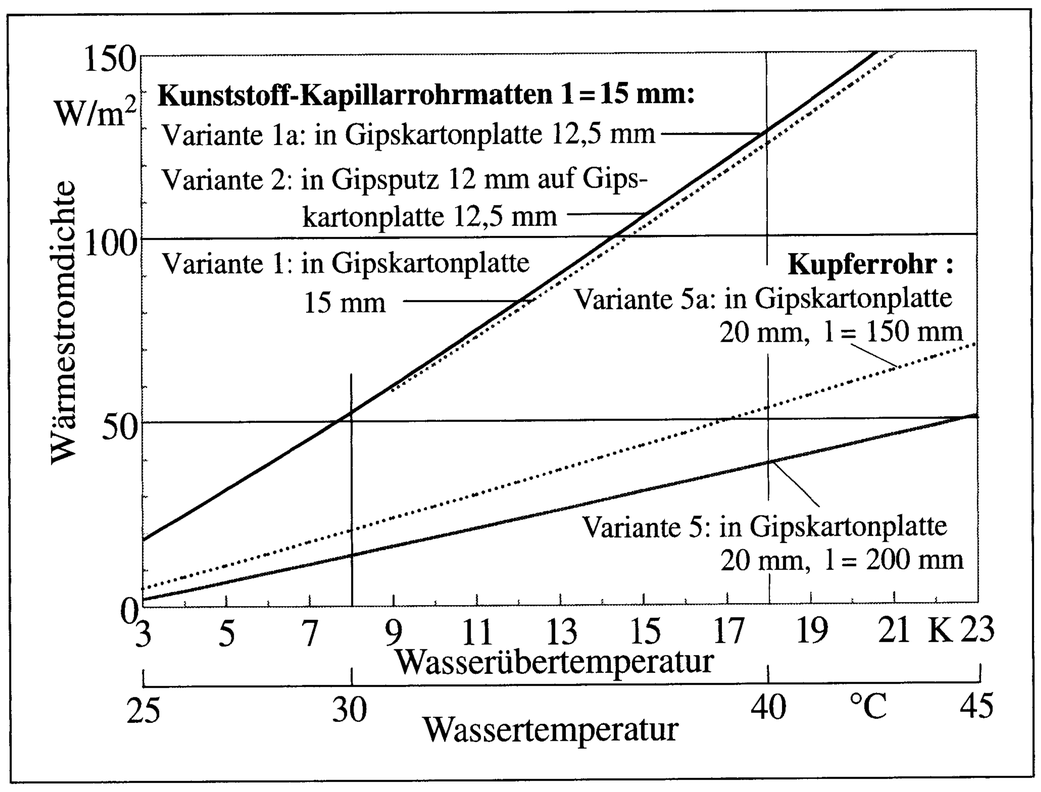

Bild 4. Berechnete Wärmeleistungen für Wandheizungen mit Kapillarrohrmatten und Kupferrohrregistern integriert in eine Gipskartonplatte (Bauart I) sowie für Kapillarrohrmatten in Gipsputz auf einer Gipskartonplatte (Bauart II) ohne zusätzlichen Wandbelag.

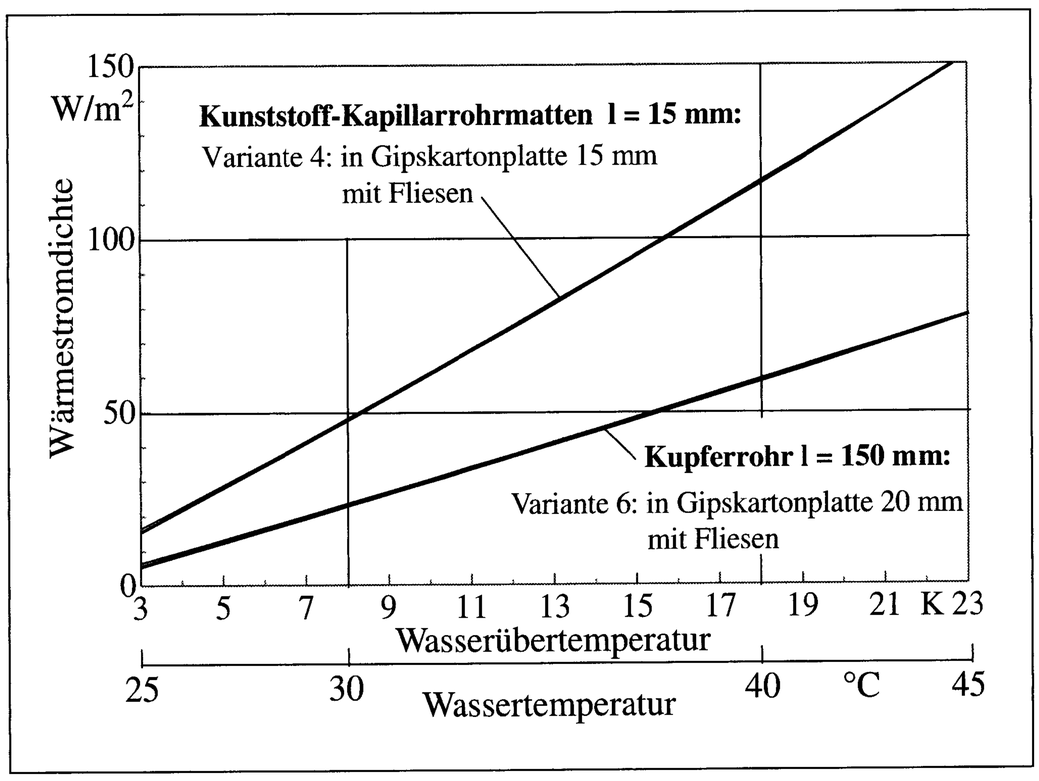

Bild 5. Berechnete Wärmeleistungen für Wandheizungen mit Kapillarrohrmatten und Kupferrohrregister integriert in eine Gipskartonplatte mit Fliesenbelag (Bauart III).

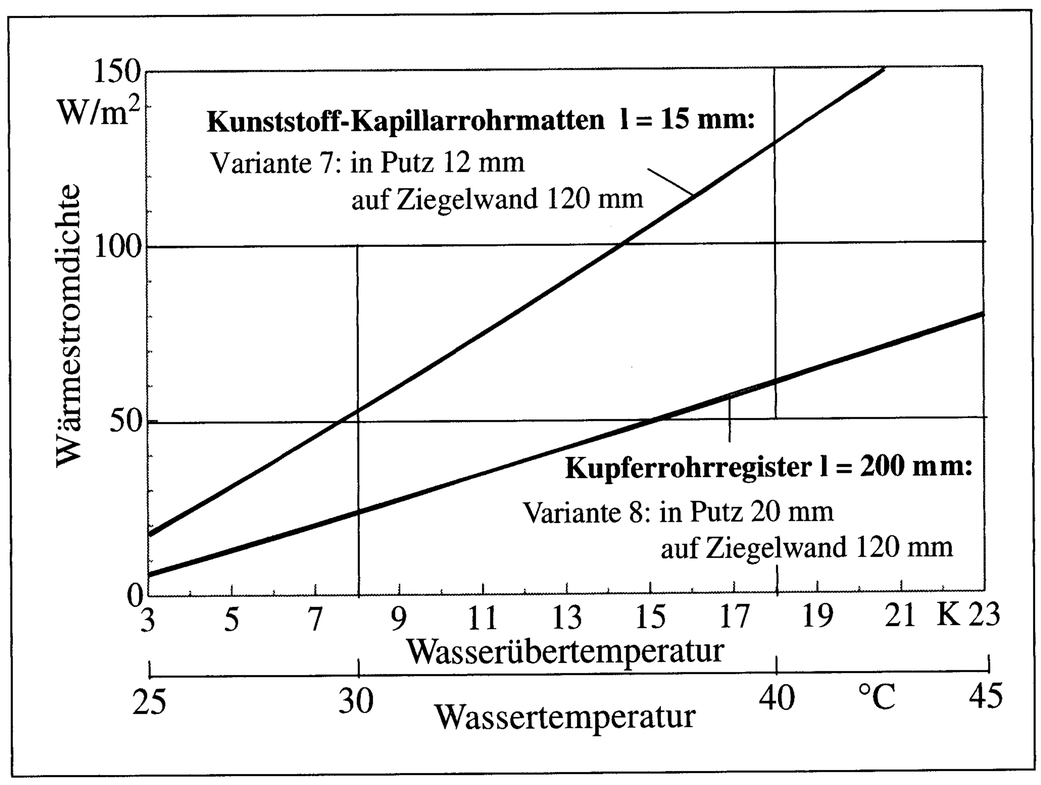

Bild 6. Berechnete Wärmeleistungen für Wandheizungen mit Kapillarrohrmatten und Kupferrohrregister integriert in einen Gipsputz auf einer Halbstein-Ziegelwand (Bauart II).

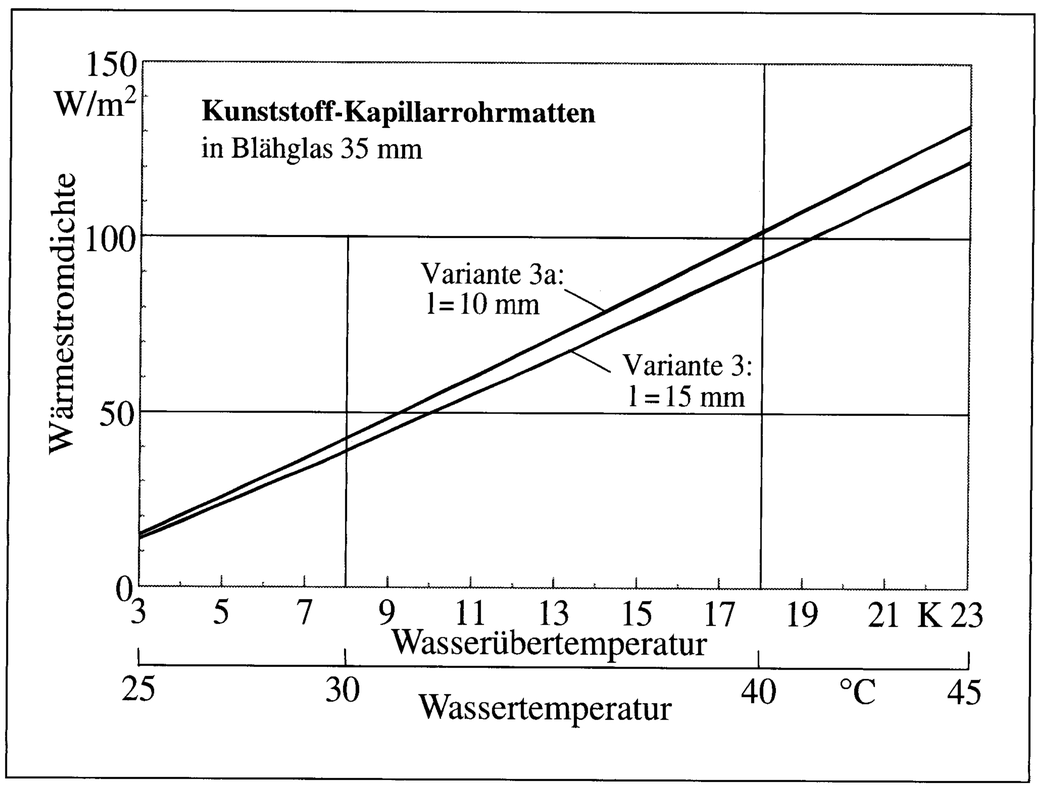

Bild 7. Berechnete Wärmeleistungen für Wandheizungen mit Kapillarrohrmatten oberflächennah integiert in Blähglas (Bauart I) ohne zusätzlichen Wandbelag.

rialien nur noch eine untergeordnete Bedeutung. Wärmeleitrippen bringen keine nennenswerten Verbesserungen. Gleiches gilt für eine weitere Herabsetzung der Rohrabstände, wie das *Bild 7* sogar für ein schlecht wärmeleitendes Material zeigt.

– Die Verringerung der Rohrabstände l bei Kupferrohrregistern bringt zwar eine Leistungserhöhung, wobei jedoch durchmesserabhängige, herstellungsbedingte Grenzen bestehen. Die Variation von l ergab – siehe auch *Bild 4* – bei einer Übertemperatur von 20 K:

  $l = 200$ mm; $\dot{q}_i = 43{,}4$ W/m² $\Rightarrow$ 100 %

  $l = 150$ mm; $\dot{q}_i = 60{,}2$ W/m² $\Rightarrow$ 139 %

  $l = 100$ mm; $\dot{q}_i = 88{,}3$ W/m² $\Rightarrow$ 203 %

  Im Vergleich liefert die Kapillarrohrmattenvariante $\dot{q}_i = 140{,}8$ W/m² $\Rightarrow$ 324 %.

– Das Belegen der Rohrschicht mit Fliesen bewirkt keine großen Veränderungen der Leistungen, wie die *Bilder 4* und *5* zeigen. Interessant sind jedoch die gegenläufigen Veränderungen bei Kapillarrohrmatten (Variante 1 zu 4) und Kupferrohrregistern (Variante 5a zu 6) bei einer Übertemperatur von 20 K:

  Kapillarrohrmatte l = 15 mm;

  $q_i = 140{,}8$ W/m² $\Rightarrow$ 130,6 W/m² $\Rightarrow$ –7 %

  Kupferrohrregister l = 150 mm;

  $q_i = 60{,}2$ W/m² $\Rightarrow$ 66,7 W/m² $\Rightarrow$ 11 %

  Dieses Verhalten ist logisch zu erklären. Bei Kapillarrohrmatten liegt bereits in der Gipskartonplatte wegen des kleinen Rohrabstandes ein sehr homogenes Temperaturfeld vor, die Fliesenschicht wirkt deshalb für den Wärmefluß in den Raum eher dämmend. Bei dem Kupferrohrregister ist die Leitung zwischen den Rohren in der Gipskartonplatte ungenügend, so daß die zusätzliche Fliesenschicht die Wärmeleitung zwischen den Rohren verbessert und die mittlere Temperatur anhebt.

– Interessant ist auch das Betrachten der Temperaturverteilung auf der raumseitigen Oberfläche (mittlere Temperatur t_{mi}; Minimaltemperatur t_{min}; Maximaltemperatur t_{max}) bei den verschiedenen Varianten beispielsweise bei einer Raumtemperatur von 22 °C und der Wassertemperatur von 42 °C (Übertemperatur 20 K):

  Kapillarrohrmatte l = 15 mm in Gipskarton (Variante 1)

  $t_{mi} = 38{,}0$ °C; $t_{min} = 38{,}0$ °C; $t_{max} = 38{,}1$ °C

  Kupferrohrregister l = 200 mm in Gipskarton (Variante 5)

  $t_{mi} = 27{,}6$ °C; $t_{min} = 23{,}0$ °C; $t_{max} = 38{,}7$ °C

  Kupferrohrregister l = 150 mm in Gipskarton (Variante 5a)

  $t_{mi} = 29{,}5$ °C; $t_{min} = 25{,}0$ °C; $t_{max} = 38{,}6$ °C

  Kupferrohrregister l = 100 mm in Gipskarton (Variante 5b)

  $t_{mi} = 32{,}6$ °C; $t_{min} = 29{,}1$ °C; $t_{max} = 38{,}6$ °C

  Kapillarrohrmatte l = 15 mm in Blähglas (Variante 3)

  $t_{mi} = 34{,}3$ °C; $t_{min} = 33{,}7$ °C; $t_{max} = 35{,}0$ °C

  Man sieht bei den Kapillarrohrmatten die Temperaturhomogenität sehr deutlich. Bei Variante 1 beträgt der Unterschied auf der Wandoberfläche nur 0,1 K, bei dem extrem schlechten Wärmeleiter Blähglas auch nur 1,3 K. Demgegenüber ergeben sich bei Kupferrohrregistern (Varianten 5, 5a, 5b) je nach Abstand 15,7 K, 13,6 K oder 9,5 K.

– Generell ist festzustellen, daß bei den üblichen Einsatzvarianten (*Bilder 4* bis *6*) die Leistung von Kapillarrohrmatten bereits bei einer Wasserübertemperatur von 8 K etwa 50 W/m² beträgt.

– Die in den *Bildern 4* bis *7* gezeigten Leistungsdiagramme gelten auch für Wandkühlung, wenn die Wasserübertemperatur als Wasseruntertemperatur betrachtet wird.

– Der Heizflächenexponent n folgt aus der Näherungsbeziehung für die Wärmeleistung von Heizflächen

$$\dot{q} = K\,\vartheta_W^n, \qquad (2)$$

  wobei ϑ_W die mittlere logarithmische Differenz zwischen Heizmediums- und Raumtemperatur bedeutet und für $\dot{q}$ in diesem Fall $\dot{q}_i$ eingesetzt wird. Für Kapillarrohrmatten gilt $n \approx 1{,}10$, für Kupferrohrregister $n \approx 1{,}15 \ldots 1{,}20$.

5. Simulationsmodell zur Berechnung des instationären Verhaltens

Es wurde ein Rechenprogramm zur numerischen Untersuchung der zweidimensionalen, instationären Wärmeleitung mit Rohrregistern entwickelt. Grundlage bildet natürlich die Fouriersche Differentialgleichung

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2}\right) \qquad (3)$$

mit der Temperaturleitfähigkeit

$$a = \frac{\lambda}{\rho\, c}. \qquad (4)$$

Dem Algorithmus liegt eine fest definierte Gittergestaltung mit speziellen Approximationen für die Rohre und Bauteilbegrenzungen zugrunde, die teilweise in [5] beschrieben ist. Das Verfahren arbeitet rein explizit im Zeitschritt, weshalb aus Stabilitätsgründen eine Beschränkung für den Zeitschritt $\Delta\tau$ in Abhängigkeit der Temperaturleitfähigkeit a und der geometrischen Diskretisierungen Δx, Δy besteht.

Als Besonderheiten wurden bei der Programmgestaltung berücksichtigt:

- Es wird stets ein Wandabschnitt von Rohrmitte bis zur Symmetrieachse zwischen zwei Rohren betrachtet.
- Die Gitterteilungen sind sehr fein gewählt worden: Δx und Δy im Bereich von 0,5…1 mm.
- Das Rohr wird als Rechteck, vorzugsweise als Quadrat approximiert. Es besteht bei den Kapillarrohren aus 18 und bei den Kupferrohren aus 32 Gitterpunkten.
- Die Zeitschrittweite schwankt im Bereich $\Delta\tau$ = 0,2…0,6 s.
- Die Wärmeübergangsbedingungen an den Oberflächen und an den Schichtgrenzen sind nach den Vorschlägen in [1] approximiert.
- Die Rohroberflächentemperatur wird den realen Verhältnissen angepaßt, indem der Wärmestrom vom Rohr an das Bauteil im vorhergehenden Zeitschritt berechnet und für das reale Rohr (d_i/d_a, λ_R) aus der gegebenen Wassertemperatur bestimmt wird. Eine Dämpfung bei Temperatursprüngen ist eingebaut.
- Die Untersuchung wird für eine konstante Raumtemperatur t_R = 22 °C und Außentemperatur t_a = 2 °C vorgenommen. Die Wassertemperatur t_W ist als Zeitfunktion darstellbar.
- Für den raumseitigen Wärmeübergangskoeffizienten α_i gilt in Abhängigkeit der Wandübertemperatur ϑ_i unverändert Gl. (1). Der Teilwärmedurchgangskoeffizient κ_a bleibt konstant.
- Werden die Rohre zeitweise nicht durchflossen (passiv), dann wird das Bauteil als homogen betrachtet.
- Die im Bauteil gespeicherte Wärme q_S wird für die Temperatur eines jeden Gitterpunktes bezogen auf die Raumtemperatur t_R berechnet.

6. Ergebnisse der Temperaturdynamik

Als erstes wird der *Aufheizfall* betrachtet. Das jeweils untersuchte Bauteil hat zu Beginn $\tau = 0$ die homogene Temperatur 22 °C (Raumtemperatur). Die mittlere Wassertemperatur springt zur Zeit $\tau = 0$ auf den einheitlichen Wert t_W (übliche Idealvorstellung). Um einen praxisnahen Vergleich zu erhalten, wird angenommen, daß die Wärmeleistungen für alle untersuchten Wandheizungen im stationären, d.h. im aufgeheizten Zustand $\dot{q}_i$ = 50 W/m² betragen sollen. Die zu der jeweiligen Variante gehörige,

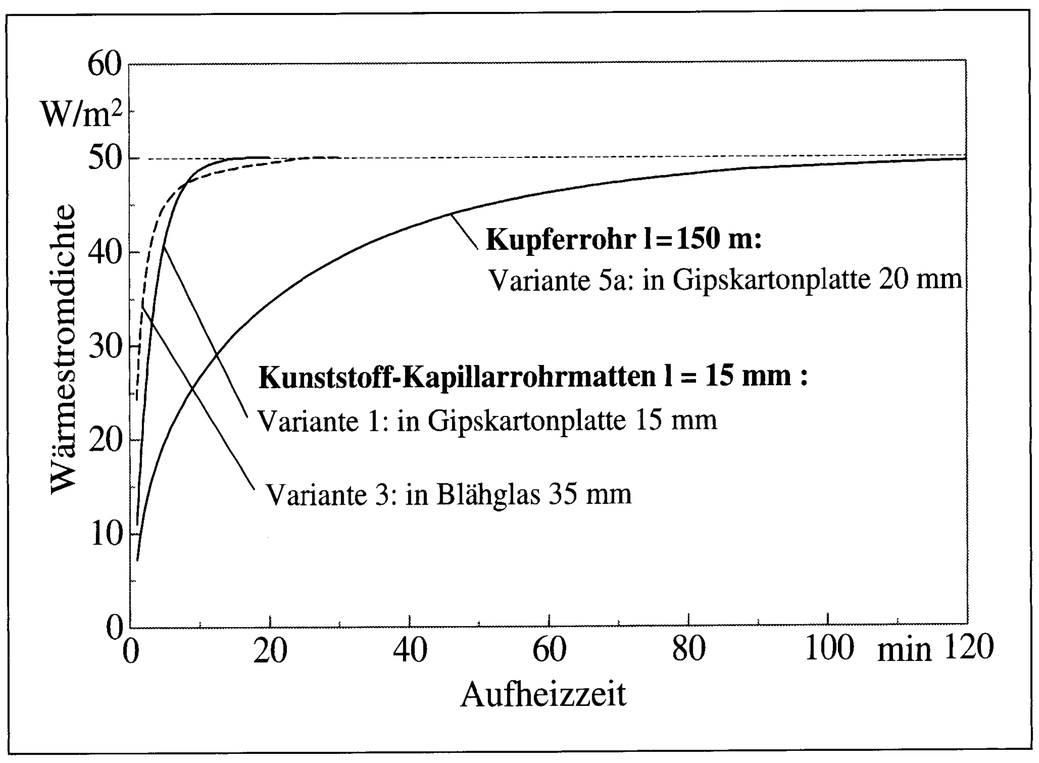

Bild 8. Wärmeleistung während des Aufheizvorganges für eine Gipskartonplatte mit Kapillarrohrmatte bzw. Kupferrohrregister sowie für eine Platte aus Blähglas mit Kapillarrohrmatte.

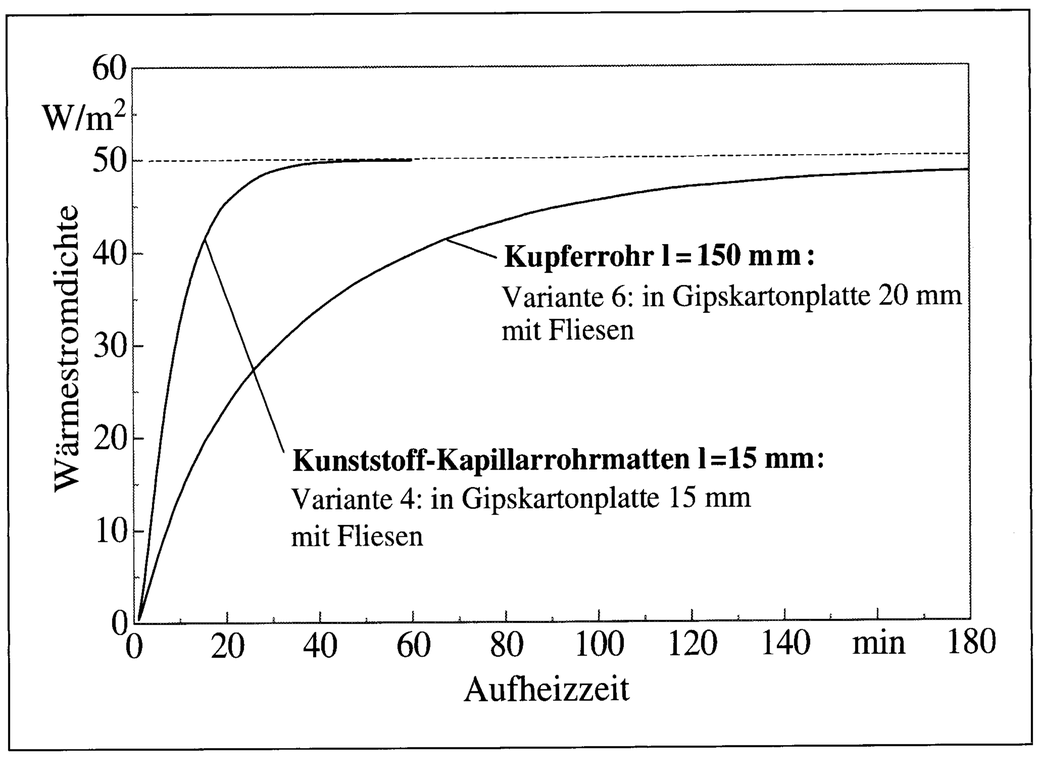

Bild 9. Wärmeleistung während des Aufheizvorganges für eine geflieste Gipskartonplatte mit Kapillarrohrmatte bzw. Kupferrohrregister

mittlere Wassertemperatur t_W kann prinzipiell aus den *Bildern 4* bis *7* entnommen werden. Um eine hohe Genauigkeit zu erreichen, sind aber separate Berechnungen für den stationären Fall erfolgt, wodurch t_W auf eine Dezimale genau vorgebbar ist.

Der zeitliche Verlauf der Wärmeleistung $\dot{q}_i$ und die asymptotische Annäherung an den Endwert 50 W/m² ist in den *Bildern 8* und *9* für berechnete, ausgewählte Varianten dargestellt. Für die Wassertemperaturen galten die Werte der *Tab. 2*. Des weiteren sind in *Tab. 2* für jede Variante die Aufheizzeit $\tau_{A98\,\%}$, die bis zum Erreichen von 98 % des Leistungsendwertes, d.h. bis 49 W/m² erforderlich ist, und die Speicherwärme q_S im Bauteil am Ende der Aufheizzeit bezogen auf die Raumtemperatur vermerkt.

Diskussion der Ergebnisse des Aufheizvorganges:

- Die sehr gute Annäherung des Leistungsverlaufs an den stationären Endwert, der mit einem völlig anderen, verifizierten Rechenprogramm (Abschnitt 3) ermittelt wurde, kann als Bestätigung des neu aufgestellten Algorithmus mit den dort integrierten Näherungen gewertet werden. Die mittleren Oberflächentemperaturen und deren Extremwerte stimmen ebenfalls mit dem

Tabelle 2. Zusammenstellung der mit der dynamischen Berechnung untersuchten Varianten mit Angabe der Wassertemperaturen t_{W50} für die stationäre Leistung von 50 W/m², der Aufheizzeit $\tau_{A98\%}$ bis 98 % des Leistungsendwertes, der Speicherwärme q_S im Bauteil am Ende der Aufheizzeit bezogen auf die Raumtemperatur und der Speicherwärme q_{S60} nach einer Abkühlzeit von 60 min bei gestopptem Wasserdurchfluß.

Variante	Bauart	Rohr	Aufbau	l	δ	t_{W50}	$\tau_{A98\%}$	q_S	q_{S60}	$q_{S60}/q_S \times 100$
				mm	mm	°C	min	Wh/m²	Wh/m²	%
1	I	KM	Gipskarton	15	15	29,8	10	29	1	3
3	I	KM	Blähglas	15	35	32,1	16	23	3	13
4	III	KM	Gipskarton mit Fliesen	15	15	30,3	31	57	17	30
5a	I	Cu	Gipskarton	150	20	39,0	98	39	6	15
6	III	Cu	Gipskarton mit Fliesen	150	20	37,4	>180	67	25	37

stationären Zustand überein, z. B. gilt bei allen Varianten t_{mi} = 28,3 °C.

- Die Aufheizzeit ist bei Einsatz von Kunststoff-Kapillarrohrmatten bedeutend kürzer als bei Kupferrohrregistern. Dies gilt für alle untersuchten, miteinander vergleichbaren Bauarten. Die Aufheizzeiten reduzieren sich auf 1/10…1/6.
- Bemerkenswert ist auch die rasche Aufheizung der Platte aus Blähglas, die nach etwa 30 min beendet ist. Sie erfolgt anfangs sogar schneller als bei Einbettung der Kapillarrohrmatten in Gipskartonplatten, da die Röhrchen näher an der Oberfläche liegen. Erst bei steigender Leistung macht sich die schlechtere Wärmeleitfähigkeit des Blähglases bemerkbar.
- Die in der Rohrschicht und in dem evtl. vorhandenen Fliesenbelag gespeicherte Wärme bei Vollastbetrieb (50 W/m²) ist bei den Kapillarrohrvarianten ebenfalls niedriger (74…85 %) als bei den konventionellen Konstruktionen.

Im weiteren wird der *Abkühlfall* betrachtet. Das jeweils untersuchte Bauteil hat zu Beginn $\tau = 0$ die Temperaturverteilung, die dem Vollastbetrieb entspricht, d. h., sie ist variantenabhängig. Der Wasserdurchfluß wird gestoppt und das Bauteil vereinfacht aus dem homogenen Rohrschichtwerkstoff bestehend (ohne Rohre) betrachtet. Im *Bild 10* sind die Verläufe der Wärmeleistungen für alle untersuchten Wandheizungen während der ersten 60 min Abkühlzeit dargestellt.

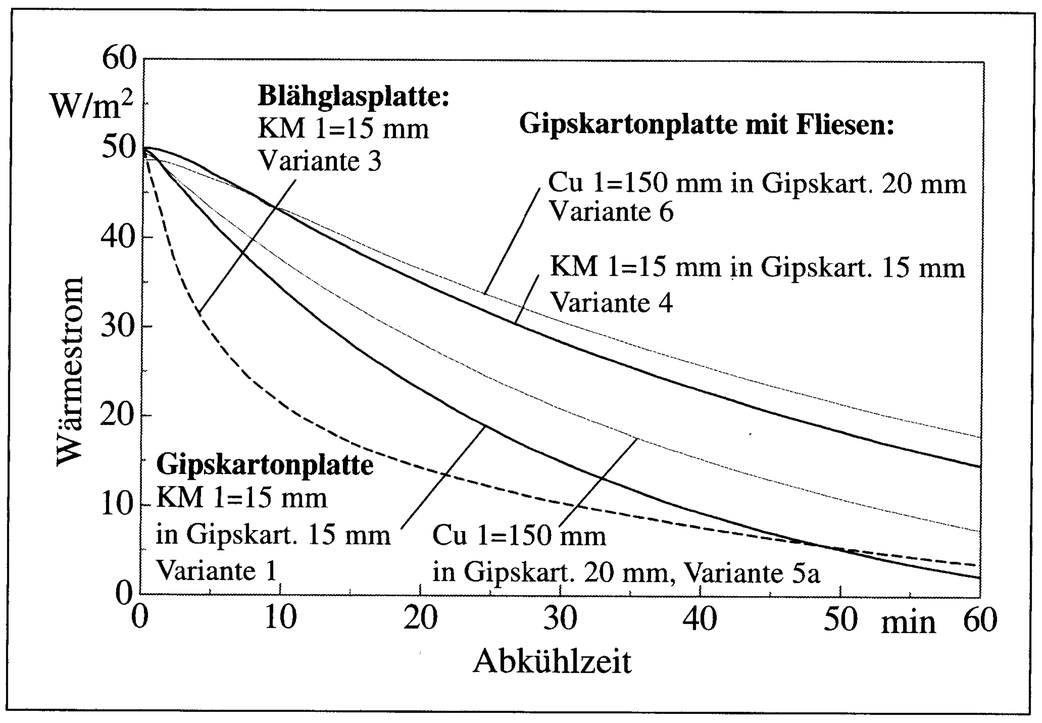

Bild 10. Wärmeleistungen während des Abkühlvorganges im Anschluß an eine Vollastleistung von 50 W/m² (bei Variante 6 nur 48,6 W/m²) in den ersten 60 min für alle in *Tabelle 2* vermerkten Varianten.

Weitere Ergebnisse finden sich in *Tab. 2*. Die Speicherwärme im Bauteil bezogen auf die konstant angenommene Raumtemperatur sinkt mit zunehmender Abkühlzeit. Als markanter Wert ist die Speicherwärme q_{S60} nach einer Abkühlzeit von 60 min eingetragen, und weiterhin wurde das Verhältnis zum Ausgangswert q_S vermerkt.

Diskussion der Ergebnisse des Abkühlvorganges

- Die Abkühlverläufe unterscheiden sich hinsichtlich des Rohreinsatzes nicht so stark wie die Aufheizkurven.
- Bei den nackten Gipskartonplatten verläuft die Abkühlung bei Variante 1 (Kapillarrohrmatten) rascher als bei Variante 5a (Kupferrohrregister). Dies liegt in der unterschiedlichen Wärmespeicherkapazität der Platten und der Materialtemperatur begründet. Nach einer Stunde hat die Gipskartonplatte mit Kapillarrohrmatte praktisch wieder Raumtemperatur angenommen. Im anderen Fall sind noch 15 % Speicherwärme enthalten.
- Bei den Gipskartonplatten mit Fliesenbelag dominiert die Speicherwärme in der Fliesenschicht (große Speicherkapazität), so daß die Unterschiede zwischen Variante 4 und 6 relativ gering sind (Restwärme nach einer Stunde 30 % bzw. 37 %).
- Überraschend gut kühlt die Variante 3 (Blähglas mit Kapillarrohrmatte) infolge der geringen Wärmespeicherkapazität aus.

7. Fazit

Der Einsatz von Kapillarrohrmatten hat sich bei Kühldecken in zahlreichen Konstruktionsvarianten seit Jahren im In- und Ausland bestens bewährt. Referenzen des Systementwicklers und Herstellers von Kunststoff-Kapillarrohrmatten – *der Fa. Clina, Berlin* – reichen beispielsweise vom *Japancenter* in Frankfurt über die *Nestlé-Zentrale* in Paris bis zum *Reichstag* in Berlin. Auch für Fußbodenheizungen mit Kapillarrohrmatten liegen innovative Patentanmeldungen dieser Firma vor. Die Kapillarrohre werden beispielsweise direkt im Fliesenkleber oder in einer speziell entworfenen Profilfolie eingespachtelt und darauf die Bodenfliesen in bekannter Weise verlegt. Leistungsberechnungen wurden in [4] veröffentlicht. Für Wandheizungen bietet sich der Einsatz von Kunststoff-Kapillarrohrmatten ebenfalls an. Die vorgestellten Untersuchungen ergaben zusammengefaßt:

- Wandheizungen mit Kunststoff-Kapillarrohrmatten stellen eine beachtenswerte Alternative zu konventionellen Systemen dar. Sie besitzen ein sehr hohes Leistungsvermögen bereits bei niedrigen Wassertemperaturen.

- Kennzeichnend für diese Systeme ist die große Flexibilität und die sehr geringe Bautiefe, wodurch der Einbau in vielfältiger Weise möglich wird. Sie eignen sich vorzugsweise auch für die Gebäudesanierung (Wandheizung, Brüstungsheizung, Beheizung von Badewannenträgern usw.).
- Das Wandheizungssystem kann hervorragend mit Fußbodenheizungen kombiniert werden.
- Beispielrechnungen für die Heizlasten gut wärmegedämmter Räume sowie die Annahmen, jeweils die Brüstung und eine Innenwand oder den Fußboden mit einem flächigen Heizungssystem zu belegen, führten zu erforderlichen Wärmestromdichten von < 30...40 W/m². Um diese Leistung zu erreichen, genügen Wasserübertemperaturen von < 7 K bei winterlicher Maximallast.
- Damit sind die Voraussetzungen gegeben, daß man über lange Zeiträume des Jahres direkt mit Umweltenergie, z. B. aus einfachen Solarkollektoren, arbeiten kann. Während der restliche Heizperiode könnten Wärmepumpen mit hohen Leistungszahlen eingesetzt werden. Damit sind natürlich auch beste Voraussetzungen für den Einsatz in Anlagen mit Abwärme- oder Brennwertnutzung gegeben.
- Durch die Brüstungsheizung (evtl. auch Fensterbankbeheizung) können die Nachteile der Fußbodenheizung (Kaltluftabfall und Strahlungstemperatur-Asymmetrie durch die Fenster) vermieden werden. Die wärmephysiologische Behaglichkeit ist nahezu ideal gestaltbar.
- Die Temperaturwelligkeit an der Wandoberfläche ist bei Einsatz von Kapillarrohrmatten vernachlässigbar klein, wodurch Materialspannungen (Rißgefahr) vermieden werden. Weiterhin entstehen durch die homogene Temperatur auch über längere Betriebszeiten keine Farbunterschiede auf der Wand, die optisch stets sehr störend wirken.
- Die Wandheizungen können im Sommer natürlich auch eine Kühlfunktion übernehmen, wobei auch wiederum natürliche Ressourcen – z. B. Kollektoren im Erdreich oder im Kellerboden – nutzbar sind.
- Die Dynamik der Wandheizungen mit Kunststoff-Kapillarrohrmatten ist bei allen überprüften Aufbauten denen mit konventionellen Rohrregistern deutlich überlegen. Dies betrifft vor allem die Aufheizzeiten, die bis auf 1/10 verkürzt werden können.
- Bei Einsatz von Kapillarrohrmatten in Flächenheizungen lohnt es sich, auch Baustoffe mit in die Betrachtung einzubeziehen, die bisher für Heizflächen ausschieden. Dies wurde am Beispiel von Blähglas deutlich.

Die verwendeten Simulationsprogramme zur stationären und zur instationären Berechnung von zweidimensionalen Temperaturfeldern und den resultierenden Wärmeflüssen ermöglichen eine sehr gute Bewertung von Konstruktionsvarianten. Parameterstudien sind schneller und kostengünstiger durchzuführen, als dies bei der Erstellung von Mustern und anschließender experimenteller Untersuchung möglich ist.

Literatur

[1] *Glück, B.:* Wärmeübertragung, Wärmeabgabe von Raumheizflächen und Rohren, 2. Auflage. Berlin: Verlag für Bauwesen 1990.

[2] *Faxén:* Beräkning av värmeavgivning fran rör, ingjutna i betonplattor, Teknisk Tidskrift Mekanik (1937) Heft 3.

[3] *Glück, B.:* Zustands- und Stoffwerte (Wasser, Dampf, Luft), 2. Auflage. Berlin: Verlag für Bauwesen 1991.

[4] *Glück, B.:* Umfassende Umweltenergienutzung durch Fußbodenheizung mit Kapillarrohrmatten, Leistungsermittlung mit verifiziertem Simulationsmodell, TAB Technik am Bau (1999) Heft 3.

[5] *Glück, B.:* Thermische Bauteilaktivierung, Heizung-Lüftung-Haustechnik (1999) Heft 5.