Gesundheits Ingenieur

Haustechnik · Bauphysik · Umwelttechnik

Herausgegeben von K. W. USEMANN 123. Jahrgang 2002 · Heft 1 · Seite 1 – 56

unter Mitwirkung von F. Baum, H. Erhorn, H.-J. Moriske und H. Viessmann

in Verbindung mit dem Umweltbundesamt, Fachbereich Umwelt und Gesundheit, Wasser-, Boden- und Lufthygiene, Ökologie, Berlin-Dahlem; Bayerischen Landesamt für Umweltschutz, Augsburg und der Gesundheitstechnischen Gesellschaft, Berlin.

Vorschlag und Beispiel für eine erweiterte Normleistungsbestimmung für geschlossene Kühl- und Heizflächen mit integrierten Rohrregistern

Bernd Glück

Die rasante Entwicklung der thermisch aktiven Flächen zur Raumkühlung – beispielsweise der Decken und Wände – führte zu einer Vielzahl von Lösungen. Hinzu kommen noch Kombinationsvarianten, die eine nächtliche Speicherung von Umweltenergie nutzen sowie eine regelbare Nachkühlung am Tage ermöglichen [1]. Außerdem ist es sinnvoll, Kühlflächen auch zur Raumheizung einzusetzen. Bei der Planung dieser variantenreichen Systeme, die zudem mit sehr unterschiedlichen Oberflächendesigns versehen werden, kann die Frage nach den Normleistungen kaum noch beantwortet werden. Zur Leistungsmessung von Raumkühlflächen ist die Prüfnorm DIN 4715-1 anzuwenden. Vielfach liegt eine experimentelle Leistungsbestimmung für eine Grundvariante vor, die dann von den Herstellern und/oder Planern auf andere Konstruktionsvarianten extrapoliert wird. Für geschlossene Raumbegrenzungen mit integrierten Rohrregistern sollte jedoch auf physikalisch begründete Verfahren zurückgegriffen werden.

1. Grundsätze zur Leistungsbestimmung für Raumkühlflächen und Fußbodenheizungen

Die Leistungsprüfung von Raumkühlflächen hat nach der DIN 4715-1 durch Messung in einer genormten Prüfkabine zu erfolgen.

Im Gegensatz dazu wird die Leistung von Fußbodenheizflächen durch eine genormte Berechnung nach EN 1264-2 (früher DIN 4725-2) bestimmt. Nur bei Sonderkonstruktionen sind zusätzliche Korrekturfaktoren experimentell zu ermitteln.

Bei der Erarbeitung der DIN 4715-1 wurde eine umfangreiche Diskussion geführt, ob auch die Leistungen von Kühlflächen gemäß einer genormten Berechnungsvorschrift ermittelt werden könnten und evtl. auch sollten. Wegen der universellen Anwendbarkeit der Norm bezüglich der Art der Kühlflächen wurde dagegen entschieden.

Grundsätzlich sind nachfolgende, differenziert zu betrachtende Sachverhalte zu beachten.

Geschlossene Wärmeübertragerflächen

Es werden hierunter Elemente mit integrierten wasserführenden Rohrregistern verstanden, die zum Raum eine luftdichte Fläche bilden, d. h., die Wärmeübertragerelemente sind *nicht hinterlüftet.* Damit lassen sich die Wärmetransportvorgänge eindeutig erfassen.

– Die Strahlungs- und Konvektionsverhältnisse ergeben sich im Normalfall durch bekannte, periphere Bedingungen, die thermodynamischen Raumverhältnisse. Für *Kühldecken* ist beispielsweise in Analogie zur Fuß-

Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück, F+E TGA, Jößnitz (Plauen), Goethestraße 18 und Westsächsische Hochschule Zwickau.

bodenheizung wegen der gleichen Wärmestromrichtung von unten nach oben der Gesamtwärmeübergangskoeffizient übernehmbar. Er folgt aus der sogenannten Basiskennlinie der EN 1264-2

$$\dot{q} = 8{,}92\,|t_{Oberfläche} - t_{Raum}|^{1,1}\ W/m^2 \qquad (1)$$

zu

$$\alpha = 8{,}92\,|t_{Oberfläche} - t_{Raum}|^{0,1}\ W/(m^2K). \qquad (2)$$

Man könnte für die rechnerische Normleistungsermittlung auch vereinfachend fest definierte Gesamtwärmeübergangskoeffizienten annehmen. So werden in [2] nachfolgende Vorschläge als Standardvorgaben unterbreitet:

Kühldecken und Heizböden $\alpha = 11\ W/(m^2K)$,

Kühlwände und Heizwände $\alpha = 8\ W/(m^2K)$,

Heizdecken und Kühlböden $\alpha = 6\ W/(m^2K)$.

Diesen Werten kann grundsätzlich gefolgt werden, lediglich im letztgenannten Fall sind mit dem Raummodell [3] im Mittel etwas höhere Koeffizienten ca. 6,7 $W/(m^2K)$ bestimmt worden. Vorzugsweise sind analytische, von der Unter- oder Übertemperatur abhängige Ansätze analog Gl. (2) zu bevorzugen.

Grundsätzlich wäre es völlig unproblematisch, eine Konvention über die Größe der Wärmeübergangskoeffizienten für die unterschiedlichen Flächenanordnungen und Wärmestromrichtungen zu finden.

– Die Wärmeleitung innerhalb des Elementes kann mit wärmetechnischen Simulationsmodellen mathematisch sehr gut nachgebildet werden. Entsprechende Algorithmen finden sich in [4; 5]. Sie sollen später beispielhaft genutzt werden. Selbstverständlich ist auch die Finite-Elemente-Methode (FEM) geeignet.

  Für den experimentellen Nachweis der Wärmeleitungsvorgänge im Element wäre die sogenannte Plattenmethode vorteilhaft einsetzbar.

Damit kann man die „Ermittlung der Normleistung" aus einem definierten Wärmeübergangskoeffizienten der thermisch aktiven Flächen zum Raum und der Nachbildung der Wärmeleitung im Paneel „zusammensetzen".

In [3] konnte für Kühldecken auch gezeigt werden, dass eine völlige Nachbildung des Prüflings im Normprüfraum nach DIN 4715-1 mit vorgegebenen Abmessungen und Lastsimulatoren denkbar ist. Einen Beweis hierfür lieferten völlig übereinstimmende Leistungswerte einer Rechnung nach einem Simulationsmodell mit den Messergebnissen, die in einem DIN-Prüfraum gewonnen wurden. Der damit verbundene Aufwand erscheint aber nicht gerechtfertigt.

Ein weiteres Verfahren ist in [2; 6; 7] vorgestellt und basiert auf den positiven Erfahrungen mit der DIN 4725-2. Für flächenintegrierte, thermisch aktive Flächen mit einer einheitlichen Konstruktion werden Berechnungen der Wärmestromdichten (Leistungen) mittels FEM durchgeführt, wobei die Wärmeübergangskoeffizienten vorgegeben sind. Diese Berechnungen erfolgen für eine Variation von charakteristischen Parametern, beispielsweise Rohrdurchmesser, Rohrabstand, Einbettungstiefe der Rohrregister, Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials usw. Unter Annahme der Gültigkeit des Superpositionsprinzips werden die Ergebnisse dann in Potenzansätzen

$$\dot{q} = B_{H,K}\ \Pi_i(a_i^{m_i})\Delta\vartheta^n \qquad (3)$$

formuliert.

Der Vorteil besteht in einer relativ einfachen und schnellen Berechenbarkeit der Leistung. Der Nachteil ergibt sich aus der notwendigerweise großen Vorarbeit für jede Konstruktion. Dabei werden bisweilen die Parameter in Bereichen variiert, die für innovative Entwicklungen nicht ausreichend sind. Spätere Ergänzungen der Norm unterbleiben in der Regel. Mitunter wird dies dann sogar von Wettbewerbern als Negativargument für Weiterentwicklungen genutzt, indem man auf die „nicht normgerechte Konstruktion" verweist. Ein typisches Beispiel ist bei der Weiterentwicklung der Fußbodenheizsysteme mit Kunststoff-Kapillarrohrmatten aufgetreten. Es gelten nach EN 1264-2 z. B. für nachfolgende Koeffizienten:

– $a_Ü$ Überdeckungsfaktor (Angabe für kleinste Teilung 50 mm)
– a_D Rohraußendurchmesserfaktor (Angabe für kleinste Teilung 50 mm)
– m_T Exponent für Teilung (Angabe für kleinste Teilung 50 mm)
– $m_Ü$ Exponent für Estrichüberdeckung (Angabe für kleinste Überdeckung 15 mm)
– m_D Exponent für Außendurchmesser (Angabe für Durchmesser ≥ 10 mm).

Damit sind die Leistungen von im Heizestrich verlegten Kapillarrohrmatten mit Rohrdurchmessern von < 5 mm und Teilungen von 10 … 30 mm, wie sie von der *Fa. Clina* hergestellt werden, nicht berechenbar. Als Ausweg wurde ein analytisches Berechnungsverfahren nach *Faxén* benutzt. Das Verfahren wurde an der EN 1264-2 für dort zulässige Parameter verifiziert und dann auf die Neukonstruktion angewandt [4]. Eine weitere, wissenschaftliche Verifizierung erfolgte in [13].

Generell ist ein direkt genutztes, wärmetechnisch begründetes Simulationsprogramm bei gleichem Fehler wie das FEM-Verfahren genauer, da der Zwischenschritt „Potenzansatz" mit einem möglichen Superpositionsfehler entfällt.

Offene Wärmeübertragerflächen

Hinterlüftete Elemente – vor allem offene Kühldecken – haben einen hohen Konvektionsanteil. Bei diesen Konstruktionen und natürlich bei rein konvektiv arbeitenden Elementen nimmt die sich im Raum einstellende Luftströmung einen großen Einfluss auf die Wärmeübertragung. Da der Strahlungseinfluss von untergeordneter Bedeutung ist, entfällt ein „stabilisierendes" Element bei der modellierbaren, rechnerischen Leistungsermittlung. So ist vor allem die Anordnung der Wärmequellen von dominanter Bedeutung auf die Kühlleistung.

Beispielsweise wurde eine Hochleistungskühldecke als geschlossene Variante in einem Prüfraum nach DIN 4715 und in einem bezüglich der Geometrie und der Lasteinbringung davon unterschiedlichen Laborprüfstand gemessen. Es ergaben sich bei der Normtemperaturdifferenz (Raumtemperatur – Wassertemperatur) von $\Delta t = 10\,K$ Werte von 94 … 96 W/m². Übrigens ergab auch die Simulation ein deckungsgleiches Ergebnis. Die gleichen Deckenelemente sind anschließend auf Abstand verlegt (Luftschlitze entsprechen 8 % der Gesamtkühlfläche) und erneut in beiden Räumen untersucht worden. Für die Normtemperaturdifferenz von $\Delta t = 10\,K$ folgten bei rechnerischer Simulation 120 W/m², die Labormessung ergab 110 W/m² und die DIN-Normmessung lieferte 130 W/m². Der Grund für diese Differenzen liegt in der unterschiedlichen Hinterlüftung der Paneele. In den beiden Versuchen waren die Art und die Platzierung der Wärmequellen unterschiedlich. Dies bewirkte also eine Abweichung von beispielsweise 18 %. Die gleiche Problematik gestaltete auch die Berechnung unsicher, da man den Luftstrom, der aufgrund des Auftriebes hinter die Paneele dringt, nur mit großer Unsicherheit annehmen kann.

Da in der Norm DIN 4715-1 eine Leistungsermittlung für *alle* derzeit üblichen Kühlflächen festgelegt werden sollte, entschied man sich generell für eine Leistungsmessung in einem Prüfraum mit genau fixierten Wärmequellen und mit einer Raumhöhe, die etwa der eines realen Büroraumes entspricht. Bei anderen Raumhöhen liegen selbstverständlich auch veränderte Raumluftströmungen vor.

Schlussfolgernd aus dem Dargelegten geht hervor, dass geschlossene thermisch aktive Raumbegrenzungsflächen mit eindeutig darstellbarem Wärmetransport zuverlässig mit einem wärmetechnischen Simulationsmodell leistungsmäßig untersucht werden können.

Eine zusätzliche Sicherheit ist gegeben, wenn Messwerte zur Verifikation verfügbar sind und mit dem geprüften Modell lediglich Parametervariationen erfolgen.

2. Prüfvorschlag am Beispiel von Putzkühldecken

Putzkühldecken mit integrierten Kunststoff-Kapillarrohrmatten werden in vielen Varianten eingesetzt. Die Herstellung erfolgt normalerweise auf der Baustelle. Sie haben sich bestens bewährt, wobei als Vorteile neben dem konventionellen Aussehen, der guten Akustik usw. vor allem auch die Flexibilität der geometrischen Anpassbarkeit zu nennen sind.

Die geometrischen Parameter und die wärmetechnischen Eigenschaften, wie

- Putzdicke,
- Lage der Kapillarrohrmatten im Putz,
- Art der Kunststoff-Kapillarrohrmatten,
- Qualität des Putzträgers,
- Deckenaufbau,

beeinflussen die Kühldeckenleistung.

Es ist praktisch jedoch nicht möglich, alle denkbaren Variationen messtechnisch zu untersuchen. Dennoch sollten natürlich möglichst genaue Leistungswerte zur Verfügung stehen.

Zur Lösung dieses Problems wird ein Kombinationsverfahren zur Leistungsbestimmung vorgeschlagen:

- Eine geschlossene Standardputzdecke ist nach DIN 4715-1 in einem genormten Prüfraum wärmetechnisch zu untersuchen. Die entsprechenden Kennlinien sind zu bestimmen.
- Für geschlossene Putzdecken wird ein möglichst genaues Simulationsmodell aufgestellt.
- Das Modell ist an den Messwerten zu verifizieren und gegebenenfalls anzupassen.
- Mit dem Simulationsmodell werden Leistungsberechnungen für veränderte Parameter durchgeführt.

Das Vorgehen ist als näherungsweises Analogon zur Heizflächenprüfung zu sehen, wobei auch nicht jede Heizkörpergröße einer Normprüfung unterzogen wird, sondern für eine Modellfamilie innerhalb einer Modellreihe die Leistung interpoliert werden darf. Dies gilt nach dem Zertifizierungsprogramm grundsätzlich auch für Kühldecken, wenn nur *ein* veränderlicher Parameter innerhalb eines gleichen Kühlflächentyps vorhanden ist.

Beim obigen Vorschlag ist die Leistungsermittlung sogar noch genauer, da das Simulationsmodell auf einer physikalischen Nachbildung beruht und nicht nur eine rein mathematische Interpolation darstellt.

3. Wärmetechnisches Simulationsmodell

Es wird von einer untergehängten Kühldecke ausgegangen, wobei ein Aufbau nach *Bild 1* realisiert ist. Eine Gipskartonplatte der Dicke 12,5 mm dient als Putzträger. Die Kunststoff-Kapillarrohrmatte liegt im Gipsputz. Gemäß Prüfprotokoll und zusätzlicher Rückfrage gilt als Putzdicke ca. 13,5 mm bei einer mittleren Überdeckung von etwa 9 mm.

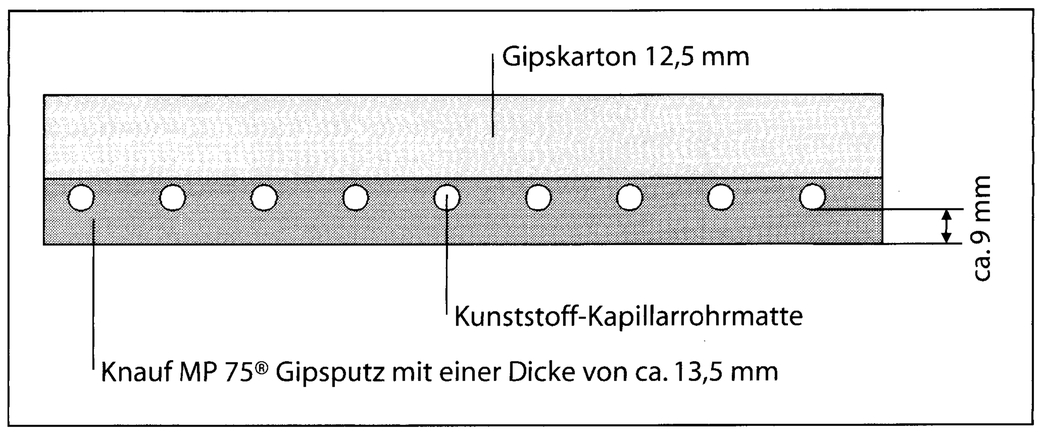

Bild 1. Aufbau der gemessenen und der zu simulierenden Putzkühldecke mit Kunststoff-Kapillarrohrmatte.

Für den Gipsputz mit Kapillarrohrmatten wird ein Modell mit zweidimensionaler Wärmeleitung verwendet. Es basiert auf einer Lösung der *Laplace*schen Differentialgleichung für zweidimensionale Temperaturverteilung nach *Faxén*. Die umfangreiche Ableitung ist in [4] mit Bezug auf die genannte Quelle wiedergegeben. Als Berechnungsmöglichkeit kann eine weitere, oberhalb des

rohrführenden Putzes angeordnete Schicht – beispielsweise der Putzträger Gipskarton – in die zweidimensionale Temperaturverteilung einbezogen werden. Außer dem richtigen Algorithmuseinsatz ist es für eine erfolgreiche Simulation natürlich wichtig, die Randbedingungen realistisch zu formulieren. Hierbei sind zwei Aspekte bedeutungsvoll:

- An der Deckenunterseite wird der Wärmeübergangskoeffizient nach Gl. (2) angesetzt.
- Diffiziler ist die Annahme der Randbedingungen auf der Oberseite der Kühldecke.

Eindeutige Verhältnisse liegen bei einer aufliegenden Dämmschicht vor.

Befindet sich dagegen über der Kühldecke ein Hohlraum, so wird von dort auch ein Wärmestrom an die Kühldecke übertragen. Nach DIN 4715-1, Erläuterungen zu Abschnitt 4.10 wäre die messtechnische Erfassung unverhältnismäßig hoch. Zur näherungsweisen Ermittlung könnte – so die Normempfehlung – die im Hohlraum gemessene Lufttemperatur herangezogen werden. Der dann anzunehmende Wärmeübergangskoeffizient ist aber sehr unsicher zu bestimmen.

Deshalb wird der Wärmestrom infolge Wärmeleitung beginnend bei der Raumbegrenzung mittels wasser-

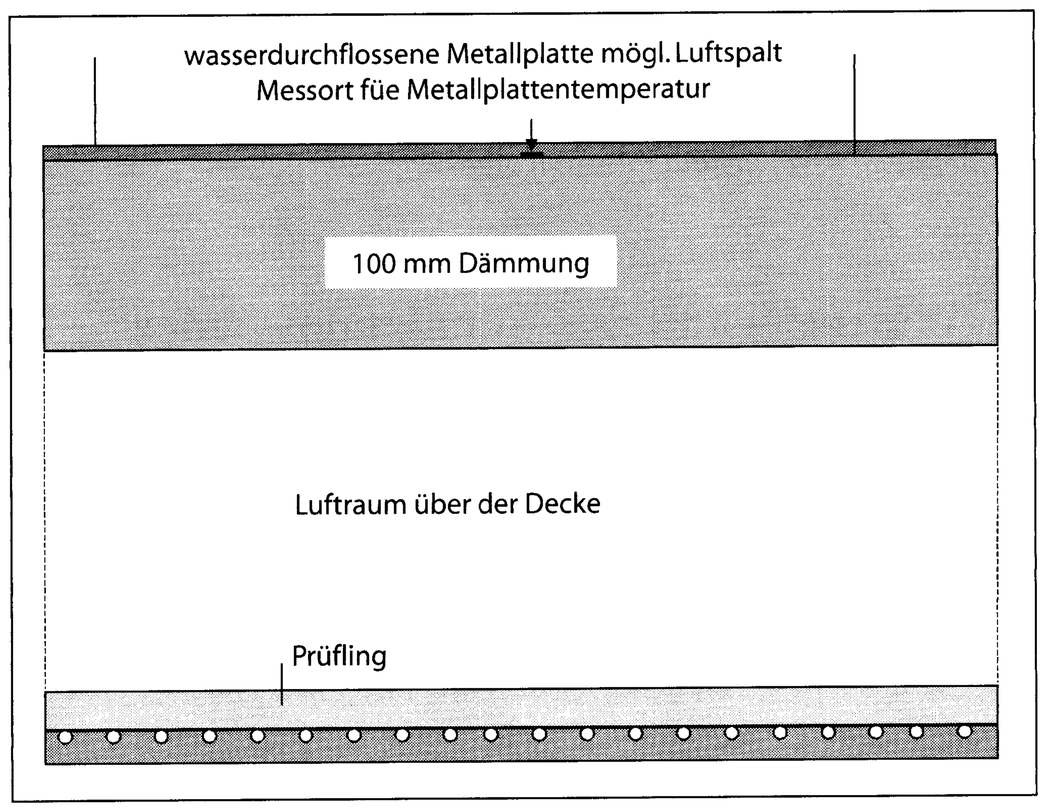

Bild 2. Kühldeckenprüfling und Prüfraumdecke mit wasserdurchflossenen Metallplatten zur Sicherung definierter Prüfbedingungen.

durchströmter Metallplatten bis zur Kühldeckenoberseite betrachtet (*Bild 2*).

Die Wärmeleitwiderstände setzen sich zusammen aus:

- Wärmeleitwiderstand von der Metallplatte bis zur Dämmung,

  Im vorliegenden Fall wird eine fugenlose Anbringung angenommen und der Wärmeübergangskoeffizient im Algorithmus gleich $\alpha_a = 10^6\,W/(m^2K)$ gesetzt.

  (Bei vorhandenem Spalt sei näherungsweise ein Wärmeübergangskoeffizient von $6\,W/(m^2K)$ empfohlen, was einem Wärmeleitwiderstand von $R_\lambda = 0{,}167\,m^2K/W$ – etwa gleichbedeutend mit dem Widerstand eines Luftspaltes von ca. 10 mm – entspricht.)
- Dämmschicht auf der Prüfraumwand (Dicke 100 mm, Wärmeleitfähigkeit höchstens 0,04 W/(m K),
- Luftschicht mit dem Wärmeleitwiderstand für den Fall Wärmestrom von oben nach unten. Gemäß DIN 4701-2 gilt für Luftschichtdicken >50 mm ein Wert von $R_\lambda = 0{,}21\,m^2K/W$. Da bei einer Deckenabhängung von 300 mm das Flächenverhältnis der Umhüllung zur aktiven Deckenfläche etwa 1,3 beträgt, wird der schwer erfassbare Widerstand der Luftschicht um diesen Faktor reduziert und somit $R_\lambda = 0{,}16\,m^2K/W$ gesetzt.

4. Ergebnis einer Normprüfung für eine Putzkühldecke mit Kapillarrohrmatten

Geprüft wurde eine geschlossene Putzkühldecke nach *Bild 1* gemäß den Prüfbedingungen DIN 4715-1 mit der speziellen Anordnung nach *Bild 2* mit folgenden Merkmalen:

- Gesamtfläche 3,5 m x 3,5 m = 12,25 m^2
- Gipskartonplatte mit einer Dicke von 12,5 mm, Wärmeleitfähigkeit λ_{GP} = 0,32 W/(m K)
- Maschinenputz MP 75, Dicke ca. 13,5 mm, Überdeckung ca. 9 mm, λ_P = 0,35 W/(m K) nach Angabe der *Fa. Knauf*
- Kunststoff-Kapillarrohrmatten in S-Form, Röhrchendurchmesser 3,4 mm x 0,55 mm, Röhrchenabstand 15 mm, Material PP, λ = 0,21 W/(m K)
- Luftraum über der Kühldecke 300 mm
- Normkennlinie $\dot{q} = 6{,}205\ \Delta t^{1,112} W/m^2$
- Normkühlleistung $\dot{q}$ = 80,3 W/m^2
- Spreizung bei Normkühlleistung ca. 2 K.

5. Vergleichsrechnung mit dem Simulationsmodell

Mit den real vorhandenen Angaben des Abschnittes 4 wird eine Testrechnung vorgenommen. Variiert werde allerdings in geringem Umfang die Putzdicke und die Überdeckung nach *Bild 3*.

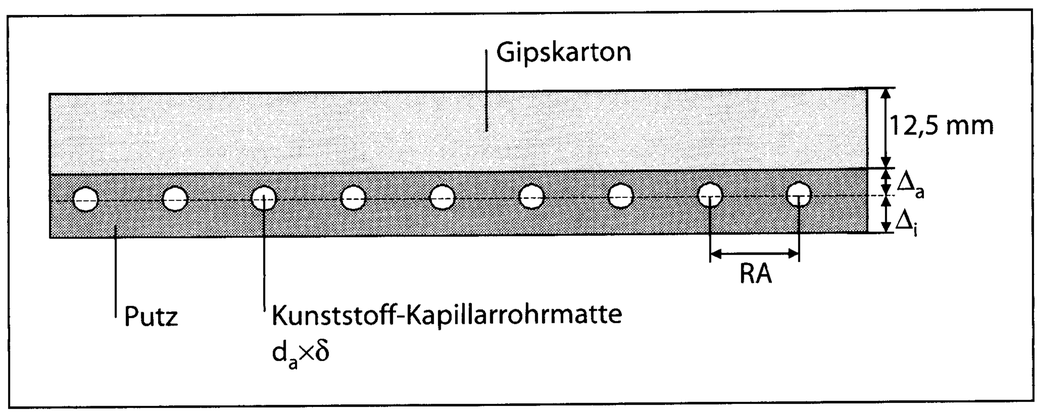

Bild 3. Geometrie der Putzkühldecke mit Kennzeichnung der einflussreichen Variationsparameter.

Im Fall A gelten die Annahmen des *Bildes 1*:

Δ_a = 2,8 mm, Δ_i = 10,7 mm $\Rightarrow$ Gesamtputzdicke 13,5 mm.

Im Fall B werden die genannten Zirkamaße geringfügig verändert:

Tabelle 1.

Fall A: Putzdicke 13,5 mm			*Fall B: Putzdicke 13,0 mm*		
mittlere Decken-temperatur °C	Kühlleistung raumseitig W/m²	Kühlleistung gesamt W/m²	mittlere Decken-temperatur °C	Kühlleistung raumseitig W/m²	Kühlleistung gesamt W/m²
19,0	75,7	*79,1*	18,9	76,9	*80,4*

Tabelle 2.

Mattengeometrie	Fall A: Putzdicke 13,5 mm		Fall B: Putzdicke 13,0 mm	
	Kühlleistung raumseitig W/m²	Kühlleistung gesamt W/m²	Kühlleistung raumseitig W/m²	Kühlleistung gesamt W/m²
Matte 3,4 x 0,55 mm, RA = 15 mm	75,7	79,1	76,9	80,4
Matte 4,3 x 0,8 mm, RA = 20 mm	75,8	79,1	77,6	80,9

Tabelle 3.

Mattengeometrie	Normkühlleistung W/m²
Matte 3,4 x 0,55 mm, RA = 15 mm	80,3
Matte 4,3 x 0,8 mm, RA = 20 mm	80,3 … 80,8

$\Delta_a = 3{,}0$ mm, $\Delta_i = 10{,}0$ mm $\Rightarrow$ Gesamtputzdicke 13,0 mm.

Die Metallplattentemperatur darf nach DIN 4715-1 maximal ±1 K von der Bezugstemperatur (Raumtemperatur) abweichen. Idealerweise wird diese gleich der Raumtemperatur gesetzt.

Die Wassergeschwindigkeit berechnet sich ausgehend vom Experiment zu:

w = 0,22 m/s.

Die Ergebnisse für Wassertemperatur 16 °C und Raumtemperatur 26 °C sind in *Tabelle 1* dargestellt.

Damit liegt die simulierte Leistung um 1,5 % unter bzw. 0,1 % über dem experimentell ermittelten Wert von 80,3 W/m².

Grundsätzlich ist dies ein sehr gutes Ergebnis, wenn man die diffizilen Wärmeübergangsbedingungen betrachtet. Damit ist eine Verifikation erreicht.

Man könnte nun einen entsprechenden *Korrekturfaktor* von 1,015 im Fall A (angegebene Putzdicke) oder von 0,999 im Fall B (kleinere Putzdicke) definieren, um die Leistung exakt anzupassen. Begründungen für diesen Ansatz gäbe es beispielsweise wegen möglicher Abweichungen von Gl. (2), nicht gleichmäßiger Rohrbelegung, veränderter Wärmeleitung in den Halterungen der Matte oder infolge von geringen Veränderungen in der Wärmeleitfähigkeit des Putzes. Theoretisch könnten aber auch noch numerische Abweichungen bei der Reihenentwicklung auftreten. Den Haupteinflussfaktor stellt jedoch die Putzdicke bzw. die Mattenlage dar.

6. Kühlleistung für einen anderen Mattentyp

Der von der *Fa. Clina* optimierte Mattentyp weist die nachfolgenden Daten auf: Röhrchendurchmesser 4,3 x 0,8 mm, Röhrchenabstand 20 mm, Material PP, $\lambda = 0{,}21$ W/(m K).

Es werden wiederum die analogen Putzdicken wie im Abschnitt 5 berechnet. Der veränderte Mindestabstand von $\Delta_a = 4{,}5 \ldots 5{,}0$ mm wird durch das neuerdings verwendete Halterungsband bewirkt.

Der Vergleich der Simulationsergebnisse für beide Mattentypen ist in der *Tabelle 2* gezeigt.

Damit unterscheiden sich die simulierten Normkühlleistungen der beiden Mattentypen in Abhängigkeit des Berechnungsfalls um 0 … +0,5 W/m².

Rechnet man die Simulationsergebnisse mit den bei der Verifikation ermittelten Korrekturfaktoren 1,015 bzw. 0,999 um, so ergeben sich die in *Tabelle 3* dargestellten Normkühlleistungen.

Dies bedeutet, dass die beiden Kühlleistungen gleich sind. *Bild 4* zeigt die Gegenüberstellung der Leistungskurven bei Variation der Temperaturdifferenzen. Die Leistungswerte nach der Normprüfung gemäß DIN 4715-1 sind mit den Simulationswerten in sehr guter Übereinstimmung. Eine exakte Kongruenz liegt bei der Normtemperaturdifferenz von 10 K vor. Bei höheren Temperaturdifferenzen ist die reale Leistung etwas größer, bei kleineren Temperaturdifferenzen etwas niedriger als die Simulationskurve. Der absolute Fehler übersteigt aber 1 W/m² nicht.

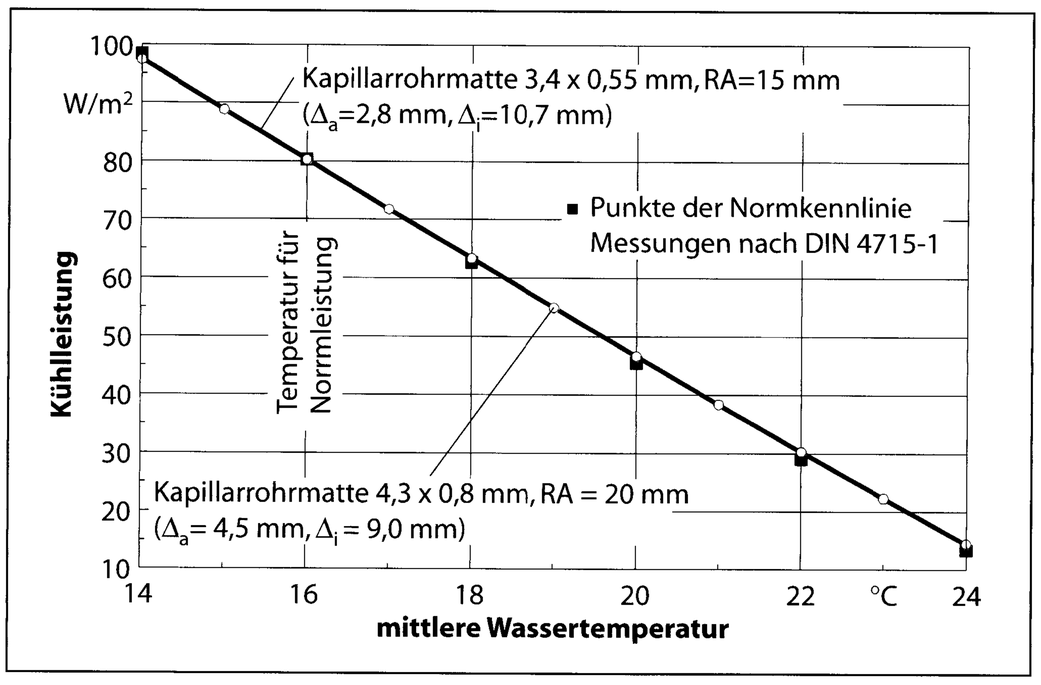

Bild 4. Kühlleistungen einer Putzdecke mit Kunststoff-Kapillarrohrmatten der *Fa. Clina* bei einer Raumtemperatur von 26 °C in Abhängigkeit der mittleren Wassertemperatur für zwei unterschiedliche Mattentypen sowie der Vergleich mit Messwerten einer Normprüfung.

7. Kühlleistungen für unterschiedliche Kapillarrohrmatten, Einbringungstiefen sowie Putzdicken

Für Entwicklungsarbeiten aber auch für einzuhaltende Toleranzgrenzen bei der Ausführung ist es interessant zu wissen, wie sich die Kühlleistungen von Putzdecken in Abhängigkeit der Parameter Kapillarrohrdurchmesser, Kapillarrohrabstand, Einbettungstiefe, Putzdicke usw. ändern. Für die nicht variierten Parameter gelten die im Abschnitt 4 aufgeführten Daten. Die weiteren Parameter-

Tabelle 4.

Rohrabmessung	Rohrabstand mm	Putzdicke mm	Δ_i mm	Δ_a mm	Normkühlleistung W/m²
3,4 x 0,55 mm	15	13,5	10,7	2,8	80,3*
	20	13,5	10,7	2,8	76,7
4,3 x 0,8 mm	20	13,5	9,0	4,5	80,3
	20	13,5	8,0	5,5	82,1
	20	13,5	7,0	6,5	84,0
	20	13,5	6,0	7,5	85,9
	20	14,5	7,0	7,5	84,0
	15	13,5	9,0	4,5	84,1

* identisch mit dem Messwert nach DIN 4715

studien zeigten deutliche Einflüsse durch unterschiedliche Einbettungstiefe Δ_i und Rohrabstände RA (Geometriegrößen nach *Bild 3*). Die Putzdicke selbst ist nicht von dominanter Bedeutung. *Tabelle 4* zeigt die Simulationsergebnisse unter Berücksichtigung des Korrekturfaktors 1,015.

Damit existiert bei allen untersuchten – teilweise theoretischen – Varianten zur bisher bekannten Normkühlleistung lediglich eine Leistungsschwankung von +7,0% bis –4,5%. Es ist verantwortbar, die Ergebnisse der verifizierten Simulation als „Normleistungen" zu verwenden.

8. Heizleistung

Für die in den Abschnitten 5 und 6 betrachteten Kunststoff-Kapillarrohrmatten sind die Leistungen für den Heizbetrieb simuliert worden. Für den raumseitigen Wärmeübergangskoeffizienten wurde $\alpha = 6{,}7\,W/(m^2K)$ angesetzt. Der im Abschnitt 3 beschriebenen Luftschicht über der Putzdecke ist wegen der veränderten Wärmestromrichtung $R_\lambda = 0{,}12\,m^2K/W$ zugewiesen worden. Es gelte der Korrekturfaktor 1. Die Berechnungsergebnisse finden sich im *Bild 5*.

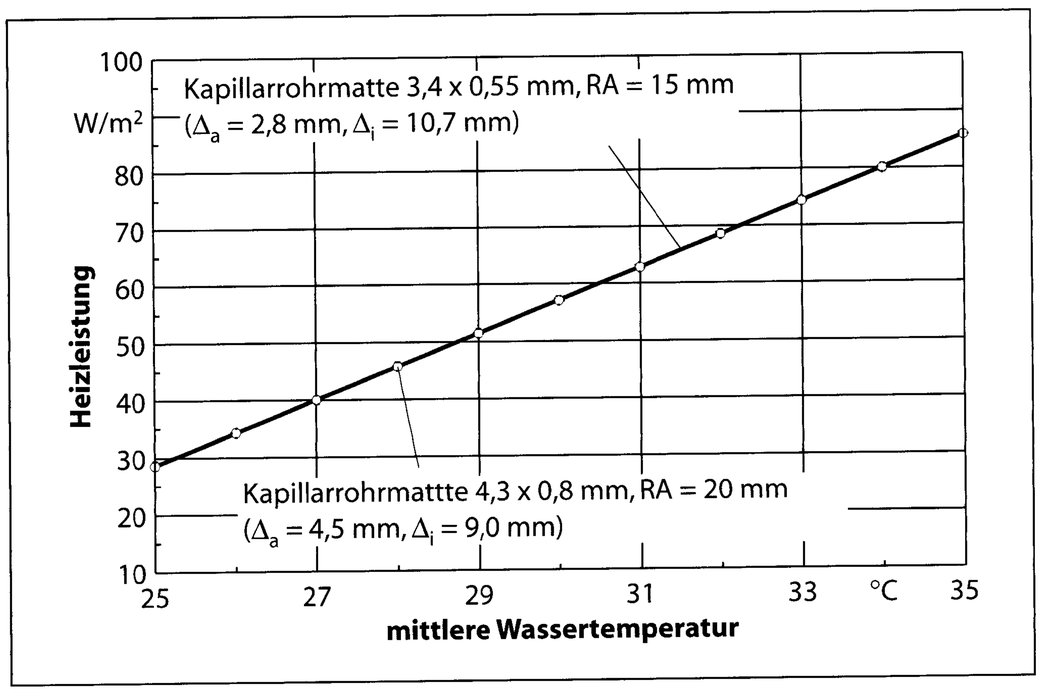

Bild 5. Heizleistungen einer Putzdecke mit Kunststoff-Kapillarrohrmatten der *Fa. Clina* bei einer Raumtemperatur von 20 °C in Abhängigkeit der mittleren Wassertemperatur für zwei unterschiedliche Mattentypen (Ergebnisse der Simulation ohne Korrekturfaktor).

9. Fazit

Die nachfolgenden Aussagen werden auf Wärmeübertragerflächen bezogen, die gleichzeitig geschlossene Raumbegrenzungsflächen darstellen und durch integrierte Rohrregister thermisch aktiviert sind.

– Von der Vielzahl der auf dem Markt befindlichen Kühlflächensysteme wird vermutlich nur ein Teil nach DIN 4715-1 messtechnisch überprüft. Für viele Flächen, die zum Teil Varianten der Grundkonstruktionen darstellen, werden extrapolierte Leistungswerte in Ansatz gebracht. Es ist sehr fraglich, ob dies ordnungsgemäß erfolgt.

  Nach dem Zertifizierungsprogramm für Kühlflächen vom *DIN CERTCO, Gesellschaft für Konformitätsbewertung mbH* ist bei Kühlflächen eine Typreihenprüfung möglich, wenn bei einem gleichartigen Typ nur eine geometrische Abmessung variiert. Nach Messung des Typs mit der größten und der kleinsten Abmessung kann die Kühlleistung in *geeigneter Weise* interpoliert werden. Im Sonderfall ist auch eine Extrapolation zulässig.

– Die rechnerische Ermittlung der Normleistungen für Fußbodenheizungen nach EN 1264-2 hat sich bewährt. Vorab ist der zu leistende Simulationsaufwand mittels FEM sehr groß, die daraus abgeleiteten Potenzansätze sind jedoch leicht zu handhaben. Beim heutigen Stand der Rechentechnik ist der zweiteilige Weg nicht mehr begründet.

  Leider benachteiligen die zugrunde gelegten Parameterbereiche mitunter innovative Neuentwicklungen oder schließen diese sogar aus.

– Flächenkühlsysteme werden zunehmend auch zur Raumheizung verwendet. Dies ist bezüglich des Bauaufwandes und der Minimierung der Investitionskosten sinnvoll. Durch große Wärmeübertragerflächen sind raumtemperaturnahe Wassertemperaturen möglich, was große exergetische Vorteile in sich birgt [8] und zudem wärmephysiologisch sehr vorteilhaft ist [9; 10]. Für umfassungsintegrierte Heizflächen gibt es – außer der Leistungsbestimmung für Fußbodenheizungen – noch keine genormte Leistungsmessung. Für Heizdecken wird deshalb häufig die Leistungsmessung nach DIN V 4706 vorgenommen. Da diese Norm aber für die Strahlplattenprüfung erstellt wurde, sollte deren Anwendung für Raumheizdecken nicht erfolgen.

– Die detaillierte zweidimensionale Wärmeleitung in mehrschichtigen rohrführenden Platten lässt sich auf der Grundlage des *Faxén*schen Algorithmus sehr genau abbilden [13], und die Wärmestromdichten sind einfach zu berechnen. Das einfache Rechenprogramm ist in [4; 5] veröffentlicht und wurde von zahlreichen Lesern umgesetzt, u. a. auch als Excel-Tabelle gestaltet.

  Ergebnisvergleiche der Leistungen und der Temperaturverteilungen für Fußbodenheizungen, die mit der FEM berechnet wurden [11, 12], zeigten nach [5] eine sehr gute Übereinstimmung. Die analytische Berechnung ist günstiger, da keine aufwändige Gittergenerierung notwendig ist, die Wärmeübergangskoeffizienten in einfa-

cher Weise temperaturabhängig berücksichtigt werden können usw.

Die Nachbildung der zweidimensionalen Temperaturverteilung im Putz mit eingebettetem Rohrregister und in der als Putzträger verwendeten Gipskartonplatte gibt die realen Verhältnisse sehr gut wieder. Das erstellte wärmetechnische Modell lieferte Ergebnisse, die außerordentlich nahe an den Werten der Normkennlinie nach DIN 4715-1 lagen (maximale Abweichung 1,5 %). Eine weitere Annäherung ist beispielsweise durch Veränderung der Wärmeübergangskoeffizienten, durch Angaben für einen Luftspalt zwischen Rohr und Putz oder aber durch einen globalen Korrekturfaktor möglich. Die letztgenannte Möglichkeit wurde im vorliegenden Fall genutzt. Der Faktor wich sehr wenig von Eins ab.

- Die Normprüfung aller geschlossenen Kühldecken analogen Aufbaus mit je einer Messung durchzuführen, wird nach der gelungenen Modellierung und Gegenüberstellung mit Messdaten nicht mehr für notwendig erachtet. Es ist ausreichend, wenn ein auf die Kühlfläche bezogenes Modell entwickelt und verifiziert wird.
- Das vorgeschlagene Verfahren sollte in die Normung für flächenintegrierte Kühlsysteme mit Rohrregistern aller Abmessungen aufgenommen werden, da die experimentelle Leistungsbestimmung aller Konstruktionsuntervarianten wirtschaftlich nicht durchführbar ist. Die bisher rein mathematisch vorgenommene Interpolation wird im vorliegenden Fall durch ein wärmetechnisches Modell ersetzt, wodurch eine größere Sicherheit gegeben ist.
- Das vorgeschlagene Verfahren könnte das für Kühlflächen genormte Verfahren sehr gut mit der bei Fußbodenheizflächen angewandten Philosophie zur Berechnung der Normleistung verbinden. Eine Leistungsmessung in der Prüfkabine gäbe Sicherheit, dass die konstruktiven Besonderheiten im Simulationsalgorithmus richtig abgebildet wurden. Der unterschiedliche Einsatz als Deckenkühl- oder Deckenheizfläche oder aber die Nutzung des gleichen Elementes als Wandkühl- bzw. Wandheizpaneel würde lediglich durch die unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten berücksichtigt.
- Der Folgeschritt wäre die Anwendung der Simulation für alle thermisch aktiven Flächen in Raumumfassungen zum Kühlen und Heizen, wobei eine messtechnische Verifikation des Grundelementes nur die Wärmeübertragung im Paneel betrachtet und beispielsweise die Prüfung nach der einfachen Plattenmethode (analog Sonderprüfverfahren in EN 1264-2) erfolgte. Damit könnten Modellierungsfehler – wie beispielsweise technologisch bedingte Luftspalte um die Rohre – sehr gut diagnostiziert werden.

Der Verfasser würde sich freuen, wenn die „ewige" Diskussion um Prüfmethoden wieder zu einer Belebung führte. Der Bedarf umfassender Leistungsangaben für kombiniert nutzbare Wärmeübertragerflächen im Raum besteht. Eine Lösung ist dringend erforderlich, um ausreichende Planungssicherheiten zu haben.

Literatur

[1] *Glück, B.:* Filigrandecken mit integrierter thermischer Bauteilaktivierung. Technik am Bau (TAB) 32 (2001) H. 1, S. 25–32.

[2] *Kast, W.; Klan, H.* und *Rosenberg, J.:* Leistungen von Heiz- und Kühlflächen. Heizung-Lüftung-Haustechnik 45 (1994) H. 6, S. 278–281.

[3] *Glück, B.:* Wärmetechnisches Raummodell – Gekoppelte Berechnungen und wärmephysiologische Untersuchungen. Heidelberg: C. F. Müller Verlag 1997 (ISBN 3-7880-7615-1).

[4] *Glück, B.:* Thermische Bauteilaktivierung - Nutzen von Umweltenergie und Kapillarrohren. Heidelberg: C. F. Müller Verlag 1999 (ISBN 3-7880-7674-7).

[5] *Glück, B.:* Wärmeübertragung, Wärmeabgabe von Raumheizflächen und Rohren, 2. Auflage. Berlin: Verlag für Bauwesen 1990 (ISBN 3-345-00515-8).

[6] *Kast, W.; Klan, H.* und *Rosenberg, J.:* Wärmeleistung von Deckenheizungen mit FEM berechnet. Heizung-Lüftung-Haustechnik 45 (1994) H. 3, S. 99–101.

[7] *Bohle, J.; Kast, W.* und *Klan, H.:* Universelle Leistungsermittlung von Heiz- und Kühlflächen. XXIV. Internationaler Kongreß für Technische Gebäudeausrüstung 1996.

[8] *Glück, B.:* Wärmeübertragung durch raumbegrenzende Heiz- und Kühlflächen mit geringem Exergieverlust – Lehren aus der BIONIK. Gesundheits-Ingenieur, 121 (2000) H. 4, S.189–196.

[9] *Glück, B.:* Luftheizung oder wasserbeaufschlagte Flächenheizung in Gebäuden mit niedrigem Heizwärmebedarf? Gesundheits-Ingenieur, 122 (2001) H. 4, S. 179–188.

[10] *Glück, B.:* Kombination verschiedener Aktivflächensysteme im Raum und ihre Einflüsse auf die Behaglichkeit und die erforderlichen Wassertemperaturen. Erscheint in der Heizung-Lüftung-Haustechnik.

[11] *Drum, G.:* Optimierung der Wärmeleistung von Warmwasserfußbodenheizungen durch Aluminiumleitbleche. Heizung-Lüftung-Haustechnik 34 (1983) H. 5, S. 228–232.

[12] *Kast, W.* und *Klan, H.:* Temperaturverteilung einer Warmwasserfußbodenheizung. Gesundheits-Ingenieur, 102 (1981) H. 5, S. 218–226.

[13] *Fraaß, M.:* Ein Beitrag zur Theorie des thermisch aktivierbaren Bauteils. Dissertation an der TU Berlin, Fakultät III, 2001.