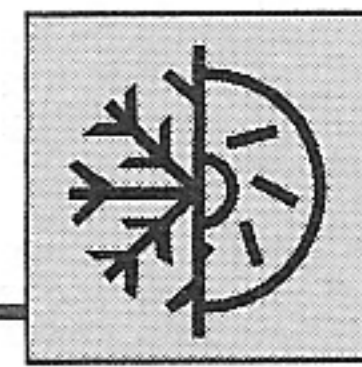




Umfassende Umweltenergienutzung durch Fußbodenheizung mit Kapillarrohrmatte

Leistungsermittlung mit verifiziertem Simulationsmodell

Durch die Integration von Kapillarrohrmatten in neuartige Fußbodenaufbauten geringer Konstruktionshöhe sind sehr hohe Leistungen bei extrem niedrigen Vorlauftemperaturen erreichbar. Damit kann in großem Maße Umweltenergie direkt oder nach Transformation auf ein höheres Temperaturniveau mittels Wärmepumpen bei hohen Leistungszahlen eingesetzt werden. Die Wärmestromdichten dieser Fußbodenheizsysteme sind wegen ihrer Geometrie nicht nach DIN 4725 Teil 2 bewertbar. Universell anwendbare Simulationsprogramme zur Ermittlung der Leistungen und Temperaturen sowie Leistungsdiagramme werden vorgestellt.

■ Dr.-Ing. habil. Bernd Glück,
F+ETGA, 08547 Jöbnitz

Konventionelle Fußbodenheizsysteme

Die üblichen Fußbodenheizsysteme werden als Naßsysteme, Rohre sind im Estrich eingebettet, oder als Trockensysteme, Rohre sind in Verlegeplatten mit Sicken eingelegt, ausgeführt. Die Mindestkonstruktionshöhen betragen beispielsweise bei Naßsystemen 62-70 mm, in Sonderfällen auch 42 mm, und bei Trockensystemen 50 mm. Die Rohrdurchmesser streuen, häufig eingesetzte Größen sind 17x2 mm, 14x2 mm und 12x2 mm. Die Verlegeabstände (Rohrabstände) betragen in der Regel 150 mm, 225 mm und 300 mm.

Fußbodenheizsysteme mit Kapillarrohrmatten

Kennzeichnend für diese Systeme ist die sehr geringe Konstruktionshöhe, wodurch sich der Einbau vorzugsweise auch für die Sanierung eignet. Die Kapillarrohre werden beispielsweise direkt im Fliesenkleber eingespachtelt und die Bodenfliesen darauf in bekannter Weise verlegt. Dieses System wird im weiteren, in Analogie zu den bisherigen Konstruktionen, als Naßsystem bezeichnet werden. Erfolgt die Verlegung der Kapillarrohre in einer speziell entworfenen Profolfolie mit oder ohne Spachtelmasse, so wird diese Konstruktion als Trockensystem bezeichnet werden. Diese Einteilung nimmt auf die verwendeten Berechnungsalgorithmen Bezug. Konstruktive Einzelheiten beziehen sich auf die Angaben des Systementwicklers und Herstellers der Kapillarrohrmatten, die Fa. Clina, Berlin. Danach betragen: Dicke der rohrführenden Schicht 5-9 mm,

Rohrabmessungen 3,4x0,55 mm, Verlegeabstand (Rohrabstand) 10-30 mm.

Der Einsatz von Kapillarrohrmatten hat sich bei Kühldecken, Heizwänden usw. seit Jahren im In- und Ausland bestens bewährt. Referenzen reichen vom Japancenter in Frankfurt über die Nestlé Zentrale in Paris bis zum Reichstag in Berlin. Auch Fußbodenheizungen der neuen Konstruktion werden bereits erfolgreich betrieben.

Die Einsatzmöglichkeiten werden nicht nur in der reinen Fußbodenheizung mit allen üblichen Belägen gesehen, sondern allumfassend als Flächenheizung, beispielsweise als Wandheizung, Beheizung von Badewannenträgern usw., avisiert.

Die Hauptzielstellungen sind sehr geringe Konstruktionshöhen und hohe Wärmestromdichten bei niedrigen Vorlauftemperaturen. Man möchte über lange Zeiträume des Jahres mit Umweltenergie, z.B. aus einfachen Solarkollektoren, arbeiten und die restliche Zeit Wärmepumpen mit hohen Leistungszahlen einsetzen. Damit sind natürlich auch beste Voraussetzungen für den Einsatz in Anlagen mit Abwärme- oder Brennwertnutzung gegeben.

Wärmetechnische Prüfung nach DIN 4725

Die Heizfläche Fußbodenheizung wird aus Einzelkomponenten – dem Rohregister, dem Estrich, dem Belag usw. – zusammengesetzt. Normalerweise geschieht dies auf der Baustelle, so daß größere Exemplarstreuungen als bei einer automatisierten Heizflächenfertigung auftreten. Die weitere Besonderheit besteht in der großen Variationsvielfalt der Parameter, wie z.B. Rohrdurchmesser, Rohrabstand, Estrichdicke, Belagart usw. Andererseits sind die Be-



rechneralgorithmen aber soweit entwickelt, daß damit zuverlässige Leistungsberechnungen möglich sind. Diese gründen sich auf die FEM-Methode und auch auf analytische Verfahren.

Deshalb erfolgt die wärmetechnische Prüfung der Warmwasser-Fußbodenheizung nach DIN 4725 Teil 2 (Mai 1992) grundsätzlich rechnerisch nach Zeichnungsunterlagen und Modell, entsprechend einem Potenzansatz, dem die Gültigkeit des Superpositionsprinzips zugrunde liegt.

Potenzansatz für Naßverlegesysteme:

$$\dot{q} = B a_B a_T^{m_T} a_{\bar{U}}^{m_{\bar{U}}} a_D^{m_D} \Delta t. \quad (1)$$

Es gelten auszugsweise:

■ $B = 6,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ für eine Rohrwanddicke von 2 mm und einen Wärmeleitkoeffizienten von $0,35 \text{ W}/(\text{mK})$; eine Umrechnung auf andere Parameter ist möglich,

■ a_B Belagfaktor,

■ a_T Teilungsfaktor,

■ $a_{\bar{U}}$ 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)

■ $m_{\bar{U}}$ Exponent für Estrichüberdeckung (Angabe für kleinste Überdeckung 15 mm),

■ m_D Exponent für Außendurchmesser (Angabe für Durchmesser größer 12 mm),

■ Δt logarithmische Heizwasserübertemperatur.

Potenzansatz für Trockenverlegesysteme:

$$\dot{q} = B a_B a_T^{m_T} a_{\bar{U}} a_{WL} a_K \Delta t. \quad (2)$$

Es gelten ergänzend zur Legende von Gl. (1) auszugsweise:

■ a_T Teilungsfaktor und $a_{\bar{U}}$ Überdeckungsfaktor weichen von den Naßsystemen ab (Angabe für Überdeckungen $> 20 \text{ mm}$, wenn $\lambda_{\bar{U}} = 1 \text{ W}/(\text{mK})$),

■ a_{WL} Wärmeleitfaktor z.B. für Wärmeleitbleche (Angabe für kleinste Teilung 50 mm),

■ a_K Korrekturfaktor für den Kontakt.

Damit ist belegt, daß die DIN 4725 nicht auf das neue System mit Kapillarrohrmatten anwendbar ist, da viele Bezugsparameter auf konventionelle Konstruktionen orientiert sind. Die ursprüngliche Untersuchung von Kast, Klan, Bohle [1], die eine wesentliche Grundlage der DIN 4725 bildete, umfaßte z.B. nur die Rohr-

teilungen 75 mm bis 300 mm, die Überdeckungen 45 mm bis 65 mm bei Naß- und 25 mm bis 60 mm bei Trockensystemen usw. Im Anwendungsbereich der DIN ist zwar vermerkt, daß Sonderkonstruktionen experimentell untersucht werden sollen und daraus neue Faktoren zu bestimmen sind, um die Einheitlichkeit des Normverfahrens zu erhalten. Die Abweichungen der neuen Kapillarrohrmattensysteme im Verhältnis zu konventionellen Lösungen sind jedoch vielfältig und die Ähnlichkeit ist somit sehr fraglich. Neue Messungen und die Bildung korrigierter Faktoren enthalten natürlich auch zusätzliche Abweichungen.

Als Ausweg ist das Aufstellen je eines exakten Algorithmus für beide Verlegesysteme und die Berechnung eines jeden Spezialfalles am sichersten. Das Rechenverfahren muß natürlich auch die Ergebnisse der konventionellen Verfahren richtig wiedergeben.

Neue wärmetechnische Modellierung

Die fußbodenseitigen und deckenunterseitigen Wärmeübergangskoeffizienten (Konvektion und Strahlung) werden nach austauschbaren Unterprogrammen in Abhängigkeit der Übertemperaturen ϑ_i und ϑ_a in K berechnet.

Für den Fußboden gilt die Basiskennlinie und somit für das Unterprogramm ALPHAI :

$$\alpha_i = 8,92 \cdot \vartheta_i^{0,1} \text{ in W}/(\text{m}^2\text{K}). \quad (3)$$

Für die Deckenunterseite (der Einfluß auf die Leistungsermittlung des vom Fußboden abgegebenen Wärmestromes ist gering) wird ALPHAA empfohlen:

$$\alpha_a = 5,7 + 0,09 \cdot \vartheta_a \text{ in W}/(\text{m}^2\text{K}). \quad (4)$$

Der wasserseitige Wärmeübergang im Rohr wird mit dem Unterprogramm ALPHAF bestimmt:

laminarer Bereich ($Re < 2300$)

$$Nu = (49,028 + 4,173 Re Pr d_1/L_R)^{0,333} \quad (5)$$

turbulenter Bereich ($Re \geq 2300$)

$$Nu = \frac{B(Re-1000)Pr}{1+12,7B^{0,5}(Pr^{0,667}-1)} \left(1 + \left(\frac{d_1}{L_R} \right)^{0,667} \right) \quad (6)$$

mit $B = (5,15 \lg Re - 4,64)^{-2}$, Rohrrinnendurchmesser $d_1 = 2 r_1$, gerade Rohrlänge L_R , woraus folgt

$$\alpha = Nu \lambda / d_1. \quad (7)$$

Die Stoffwerte für Wasser und Luft sind als temperaturabhängige Approximationsgleichungen nach [2] zu formulieren.

Die Wärmeleitwiderstände (z.B. Bodenbelag) in Reihe zu den Wärmeübergangskoeffizienten werden gemeinsam mit diesen zu Teilwärmedurchgangskoeffizienten zusammengefaßt:

$$\kappa_i = \left[\frac{1}{\alpha_i} + \sum \left(\frac{\delta}{\lambda} \right) \right]^{-1}; \quad \kappa_a = \left[\frac{1}{\alpha_a} + \sum \left(\frac{\delta}{\lambda} \right) \right]^{-1} \quad (8)$$

Die Bezeichnung i deutet auf »innen« (Fußboden), a auf »außen« (Deckenunterseite) hin.

Leider können aus Platzgründen die genauen Ableitungen der Algorithmen nicht wiedergegeben werden. Es wird so weit als möglich auf vorhandene Literatur verwiesen. Weitere Fragen sind bitte an den Autor zu richten.

Naßverlegeverfahren

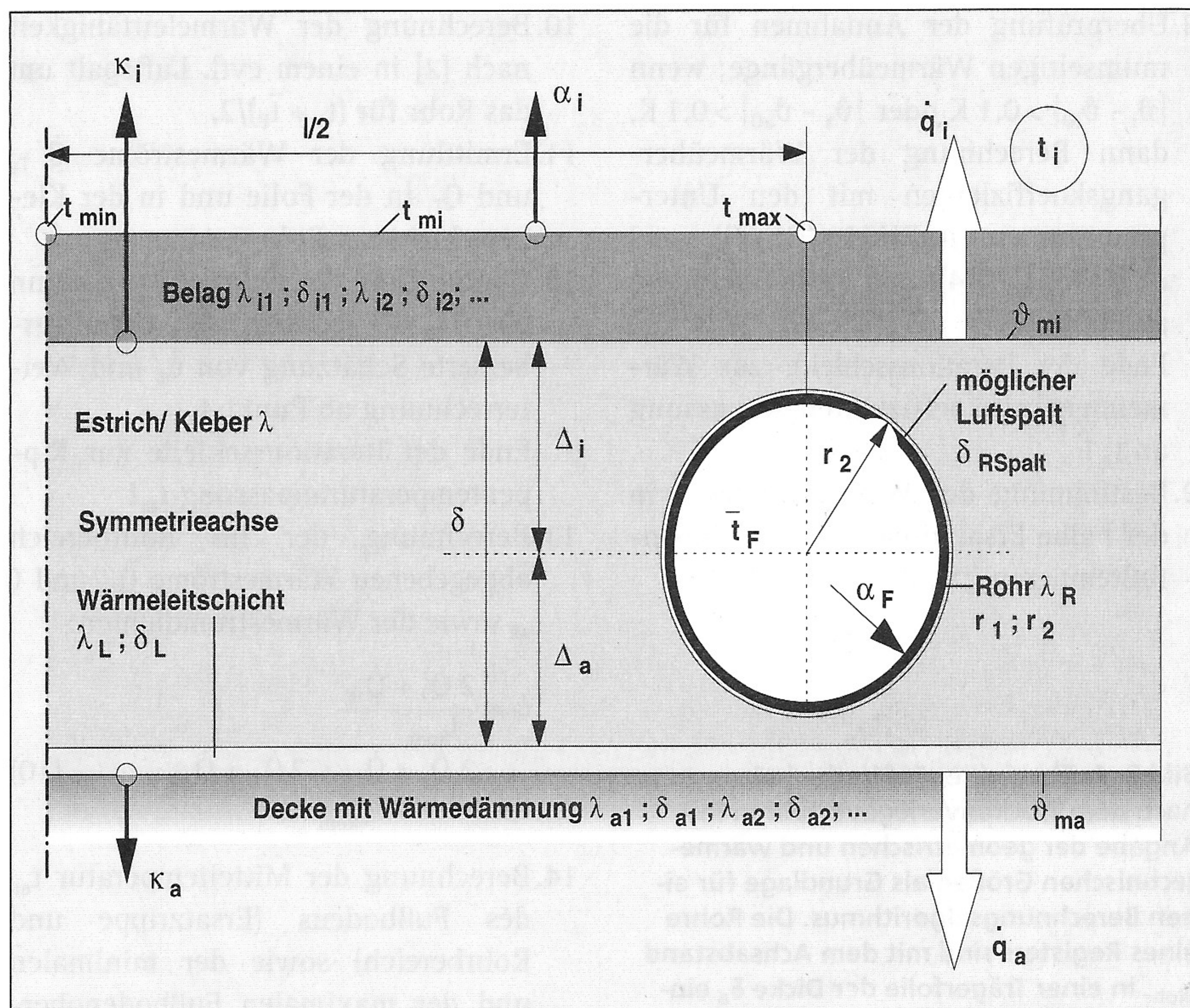
Es wird von einer zweidimensionalen Wärmeleitung in der Estrich- oder Kleberschicht ausgegangen, wobei noch eine weitere sogenannte Wärmeleitschicht – z.B. eine Aluminiumlamelle – unterhalb der Estrichschicht angeordnet sein kann. Eine ausführliche Ableitung für diesen Fall findet sich auf der Grundlage von [3] in [4, S. 377 ff.]. Das Vorgehen erfolgt in den Schritten:

1. Schätzung der Rohraußentemperatur t_2 zum Eingabewert der Heizmedientemperatur (Fluidtemperatur) $\bar{t}_F$; erste Annahmen für $\alpha_i = 10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und $\alpha_a = 6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ sowie der mittleren Übertemperaturen $\vartheta_i = 0$ und $\vartheta_a = 0$ an der inneren und äußeren Oberfläche des Bauteils,
2. Ermittlung der Stoffwerte für das Heizfluid Wasser nach [2] und des wasserseitigen Wärmeübergangskoeffizienten an die Rohrwand nach Unterprogramm ALPHAF (Gln. (5) bis (7)),
3. Berechnung der Teilwärmedurchgangskoeffizienten κ_i und κ_a nach Gl. (8),
4. Berechnung des zweidimensionalen Temperaturfeldes im Estrich bzw. Kleber und – falls vorhanden – in einer zusätzlichen Wärmeleitschicht nach [4],
5. Bestimmung der mittleren Übertemperaturen ϑ_{mi} und ϑ_{ma} an den äußeren Oberflächen der Estrich- und der Wärmeleitschicht bezogen auf die jeweils angrenzende Raumtemperatur t_i bzw. t_a ,

6. Berechnung der Wärmestromdichten $\dot{q}_i$ und $\dot{q}_a$,
7. Ermittlung der mittleren Übertemperaturen ϑ_{i0} und ϑ_{a0} an der inneren und äußeren Oberfläche des Bauteils,
8. Überprüfung der Annahmen für die raumseitigen Wärmeübergänge; wenn $|\vartheta_i - \vartheta_{i0}| > 0,1 \text{ K}$ oder $|\vartheta_a - \vartheta_{a0}| > 0,1 \text{ K}$, dann Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten mit den Unterprogrammen ALPHAI (Gl. (3)) und ALPHAA (Gl. (4)) und Weiterrechnung ab Punkt 3.
- Ende der Iterationsschleife zur thermischen Anpassung des Bauteils an die Vorgabe t_2 !
9. Bestimmung der mittleren Temperaturen t_{mi} und t_{ma} an der inneren und äußeren Oberfläche des Bauteils sowie der minimalen und der maximalen Fußbodenoberflächentemperaturen t_{min} und t_{max} ; Berechnung der Gesamtwärmestromdichte $\dot{q} = \dot{q}_i + \dot{q}_a$,
10. Berechnung der Wärmeleitfähigkeit nach [2] in einem evtl. Luftspalt um das Rohr für t_2 ,
11. Ermittlung der rechnerischen Wassertemperatur $\bar{t}$, die zur Annahme t_2 paßt,
12. Überprüfung der Annahme für die Rohrwandtemperatur t_2 ; wenn $|\bar{t} - t_F| > 0,01 \text{ K}$, dann verbesserte Schätzung von t_2 und Weiterrechnung ab Punkt 3.
- Ende der Iterationsschleife zur Anpassung an die vorgegebene Wassertemperatur!

Trockenverlegeverfahren

Die Folie und der Kleber (Spachtelmasse) werden um das Rohr als Umhüllung der jeweils homogenen Dicken δ_a und δ_i betrachtet. Das Rohr wird vollständig umschlossen, der Umschlingungswinkel der Folie φ_0 ist frei wählbar. Es gelten die Wärmeleitfähigkeiten: λ_a für die äußere (Folie) und λ_i für die innere (Kleber mit Gewebe) Rohrumhüllung. Zwischen den Umhüllungen und dem Rohr kann sich ein Luftspalt der Dicke δ_{RSpalt} befinden. An der Stelle, wo die beiden unterschiedlichen Umhüllungen zusammenstoßen, bildet sich eine gemeinsame Temperatur t_1 aus. Von diesem Punkt aus wird eine Ersatzrippe definiert, deren wärmetechnische Eigenschaften ein Äquivalent beider Rippen, der Folie und der Kleberschicht, darstellen. Es gelten für diese äquivalente Ersatzrippe die Dicke und die Wärmeleitfähigkeit:

$$\bar{\delta} = (\delta_a + \delta_i); \bar{\lambda} = (\lambda_a \delta_a + \lambda_i \delta_i) / (\delta_a + \delta_i). \quad (9)$$


Zwischen der Ersatzrippe und dem Fußbodenbelag kann sich wiederum ein Luftspalt der Dicke δ_{FSpalt} befinden. Da die Folie eine relativ niedrige Wärmeleitfähigkeit besitzt, der Kleber demgegenüber eine größere, ist diese Modellierung einer Ersatzrippe hinreichend genau. Die mitunter großflächige, allseitige Umhüllung der Rohre mit der Klebermasse (Rillenprofil der Folie ist nicht durchgehend) wird als zusätzliche Sicherheit betrachtet und in die Berechnung nicht mit einbezogen. In allen Rippen wird nur eine eindimensionale Wärmeleitung betrachtet, wobei die Algorithmen auf den Grundlagen von [4, S. 258 ff. und 293 ff.] aufbauen. Das Vorgehen erfolgt in den Schritten:

1. Schätzung der mittleren Rippentemperatur t_m zum Eingabewert der Heizmedientemperatur (Fluidtemperatur) $\bar{t}_F$; erste Annahmen für $\alpha_i = 10 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ und $\alpha_a = 6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$,
2. Ermittlung der Stoffwerte für das Heizfluid Wasser nach [2] und des wasserseitigen Wärmeübergangskoeffizienten an die Rohrwand nach Unterprogramm ALPHAF (Gln. (5) bis (7)),
3. Definition der Länge l sowie der Ersatzrippe nach Gl. (9),
4. Annahme der mittleren Übertemperaturen $\vartheta_i = 0$ und $\vartheta_a = 0$ an der inneren und äußeren Oberfläche des Bauteils,

Bild 1: Aufbau einer Fußbodenheizung nach dem Naßverlegeverfahren, mit Angabe der geometrischen und wärmetechnischen Größen, als Grundlage für einen Berechnungsalgorithmus. Die Rohre eines Registers sind mit dem Achsabstand l , eingebettet in einer Estrich- oder Kleberschicht, verlegt. Darunter befindet sich eine zusätzliche Wärmeleitschicht. In beiden Schichten wird eine zweidimensionale Wärmeleitung angenommen. In den übrigen Schichten erfolgt eine eindimensionale Wärmeleitung senkrecht zur Registerebene, deren Teilwärmedurchgangskoeffizienten mit κ bezeichnet werden

5. Berechnung der Wärmeleitfähigkeit nach [2] in einem evtl. Luftspalt δ_{FSpalt} unter dem Belag für t_m sowie der Teilwärmedurchgangskoeffizienten κ_i und κ_a nach Gl. (8),
6. Bestimmung der mittleren Übertemperaturen ϑ_{mi} und ϑ_{ma} in der Ersatzrippe bezogen auf die jeweils angrenzende Raumtemperatur t_i bzw. t_a und der Wärmestromdichten $\dot{q}_i$ und $\dot{q}_a$,
7. Ermittlung der mittleren Übertemperaturen ϑ_{i0} und ϑ_{a0} an der inneren und äußeren Oberfläche des Bauteils,



8. Überprüfung der Annahmen für die raumseitigen Wärmeübergänge; wenn $|\vartheta_i - \vartheta_{i0}| > 0,1 \text{ K}$ oder $|\vartheta_a - \vartheta_{a0}| > 0,1 \text{ K}$, dann Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten mit den Unterprogrammen ALPHAI (Gl. (3)) und ALPHAA (Gl. (4)) und Weiterrechnung ab Punkt 5.

Ende der Iterationsschleife zur Wärmeübergangskoeffizienten-Anpassung an t_m !

9. Bestimmung des Wärmestromes $\dot{Q}$ in der halbe Ersatzrippe und der Rippenfußtemperatur t_1 ,

10. Berechnung der Wärmeleitfähigkeit nach [2] in einem evtl. Luftspalt um das Rohr für $(t_1 + \bar{t}_F)/2$,

11. Ermittlung der Wärmeströme $\dot{Q}_{Ta}$ und $\dot{Q}_{Ti}$ in der Folie und in der Kleberschicht am Rohr,

12. Überprüfung der Wärmebilanz, wenn $|\dot{Q} - \dot{Q}_{Ta} - \dot{Q}_{Ti}| > 0,001 \dot{Q}$, dann verbesserte Schätzung von t_m und Weiterrechnung ab Punkt 4.

Ende der Iterationsschleife zur Rippen-temperaturanpassung t_m !

13. Berechnung der im Rohrbereich abgegebenen Wärmeströme $\dot{Q}_{iR}$ und $\dot{Q}_{aR}$ sowie der Wärmestromdichten:

$$\dot{q} = \frac{2 \dot{Q}_i + \dot{Q}_{iR}}{l_{\text{Rohr}}}$$

$$\dot{q} = \frac{2 \dot{Q}_i + \dot{Q}_{iR} + 2 \dot{Q}_a + \dot{Q}_{aR}}{l_{\text{Rohr}}} \quad (10)$$

14. Berechnung der Mitteltemperatur t_{mi} des Fußbodens (Ersatzrippe und Rohrbereich) sowie der minimalen und der maximalen Fußbodenoberflächentemperatur t_{min} und t_{max} .

Bild 2: Aufbau einer Fußbodenheizung nach dem Trockenverlegeverfahren mit Angabe der geometrischen und wärmetechnischen Größen als Grundlage für einen Berechnungsalgorithmus. Die Rohre eines Registers sind mit dem Achsabstand l_{Rohr} in einer Trägerfolie der Dicke δ_a eingelegt und mit einer Kleberschicht der Dicke δ_i verspachtelt. Folie und Kleberschicht werden zwischen den Rohren auf der Länge l als homogene Ersatzrippe definiert, die die Wärme eindimensional zwischen den Rohren leitet. Der in die Rippe eintretende Wärmestrom $\dot{Q}$ setzt sich aus den Wärmeströmen der Rohrumhüllungen (Folie und Kleber) zusammen. In den übrigen Schichten erfolgt eine eindimensionale Wärmeleitung senkrecht zur Registerebene, deren Teilwärmedurchgangskoeffizienten mit κ bezeichnet werden.

Beispiele

Verifikation Naßverlegesystem

Es gelten für das Beispiel mit den Bezeichnungen des Bildes 1:

Rohr: $d_2 = 0,017 \text{ m}$; $d_1 = 0,013 \text{ m}$; $\lambda_R = 0,35 \text{ W/(mK)}$; $l = 0,2 \text{ m}$; $\delta_{\text{RSpalt}} = 0$; $L_R = 4 \text{ m}$,

Wasser: $\bar{t}_F = 40^\circ \text{C}$; $w = 0,8 \text{ m/s}$,

Räume: $t_i = 20^\circ \text{C}$; $t_a = 18^\circ \text{C}$,

Belag: $\delta_{i1} = 0,01 \text{ m}$; $\lambda_{i1} = 0,1 \text{ W/(mK)}$,
 $\Rightarrow$ Wärmeleitwiderstand:
 $0,1 \text{ m}^2 \text{K/W}$,

Decke: $\delta_{a1} = 0,04 \text{ m}$; $\lambda_{a1} = 0,04 \text{ W/(mK)}$;
 $\delta_{a2} = 0,2 \text{ m}$; $\lambda_{a2} = 2,1 \text{ W/(mK)}$,

Estrich: $\Delta_i = 0,054 \text{ m}$; $\Delta_a = 0,014 \text{ m}$; $\delta = 0,068 \text{ m}$; $\lambda = 1,2 \text{ W/(mK)}$.

■ Rechnung nach DIN 4725 Teil 2:

$B = 6,7 \text{ W/(m}^2 \text{K)}$,

Belagfaktor nach Tab. A1 $a_B = 0,598$,

Teilungsfaktor nach Tab. A2 $a_T = 1,156$,

Überdeckungsfaktor nach Tab. A3 $a_U = 1,0315$,

Rohraußendurchmesserfaktor nach

Tab. A4 $a_D = 1,035$,

$m_T = -1,667$; $m_U = 0$; $m_D = -0,75$.

Für die Übertemperatur von 20 K ergibt Gl. (1): $\dot{q} = 6,7 \cdot 0,598 \cdot 1,156^{-1,667} \cdot 1,0315^0 \cdot 1,035^{-0,75} \cdot 20 = 61,3 \text{ W/m}^2$.

■ Rechnung nach Simulationmodell

$t_{mi} = 25,7^\circ \text{C}$; $t_{max} = 26,2^\circ \text{C}$; $t_{min} = 25,3^\circ \text{C}$;

$\dot{q}_i = 60,5 \text{ W/m}^2$; $\dot{q} = 73,4 \text{ W/m}^2$.

Verifikation

Trockenverlegesystem

Es gelten für das Beispiel mit den Bezeichnungen des Bildes 2:

Rohr: $d_2 = 0,014 \text{ m}$; $d_1 = 0,010 \text{ m}$; $\lambda_R = 0,35 \text{ W/(mK)}$; $l = 0,225 \text{ m}$; $\delta_{\text{RSpalt}} = 0$; $\varphi_0 = 90^\circ$; $L_R = 4 \text{ m}$,

Wasser: $\bar{t}_F = 40^\circ \text{C}$; $w = 0,6 \text{ m/s}$,

Räume: $t_i = 20^\circ \text{C}$; $t_a = 18^\circ \text{C}$,

Belag: $\delta_{i2} = 0,008 \text{ m}$; $\lambda_{i2} = 0,08 \text{ W/(mK)}$
 $\Rightarrow$ Wärmeleitwiderstand:

$0,1 \text{ m}^2 \text{K/W}$,

Estrich: $\delta_{i1} = 0,025 \text{ m}$; $\lambda_{i1} = 0,28 \text{ W/(mK)}$ (Trockenplatte),

Decke: $\delta_{a1} = 0,04 \text{ m}$; $\lambda_{a1} = 0,04 \text{ W/(mK)}$;
 $\delta_{a2} = 0,2 \text{ m}$; $\lambda_{a2} = 2,1 \text{ W/(mK)}$,

Alu-Folie:

$\delta_a = 0,00045 \text{ m}$; $\lambda_a = 200 \text{ W/(mK)}$,

PE-Folie: $\delta_i = 0,0005 \text{ m}$; $\lambda_i = 0,3 \text{ W/(mK)}$;
 $\delta_{\text{FSpalt}} = 0$.

■ Rechnung nach DIN 4725 Teil 2:

Im Sinne der DIN gilt für den Trockenestrich $s_U = \delta_{i1}$ und $\lambda_U = \lambda_{i1}$; PE-Folie bleibt unbeachtet.

$B = 6,5 \text{ W/(m}^2 \text{K)}$,

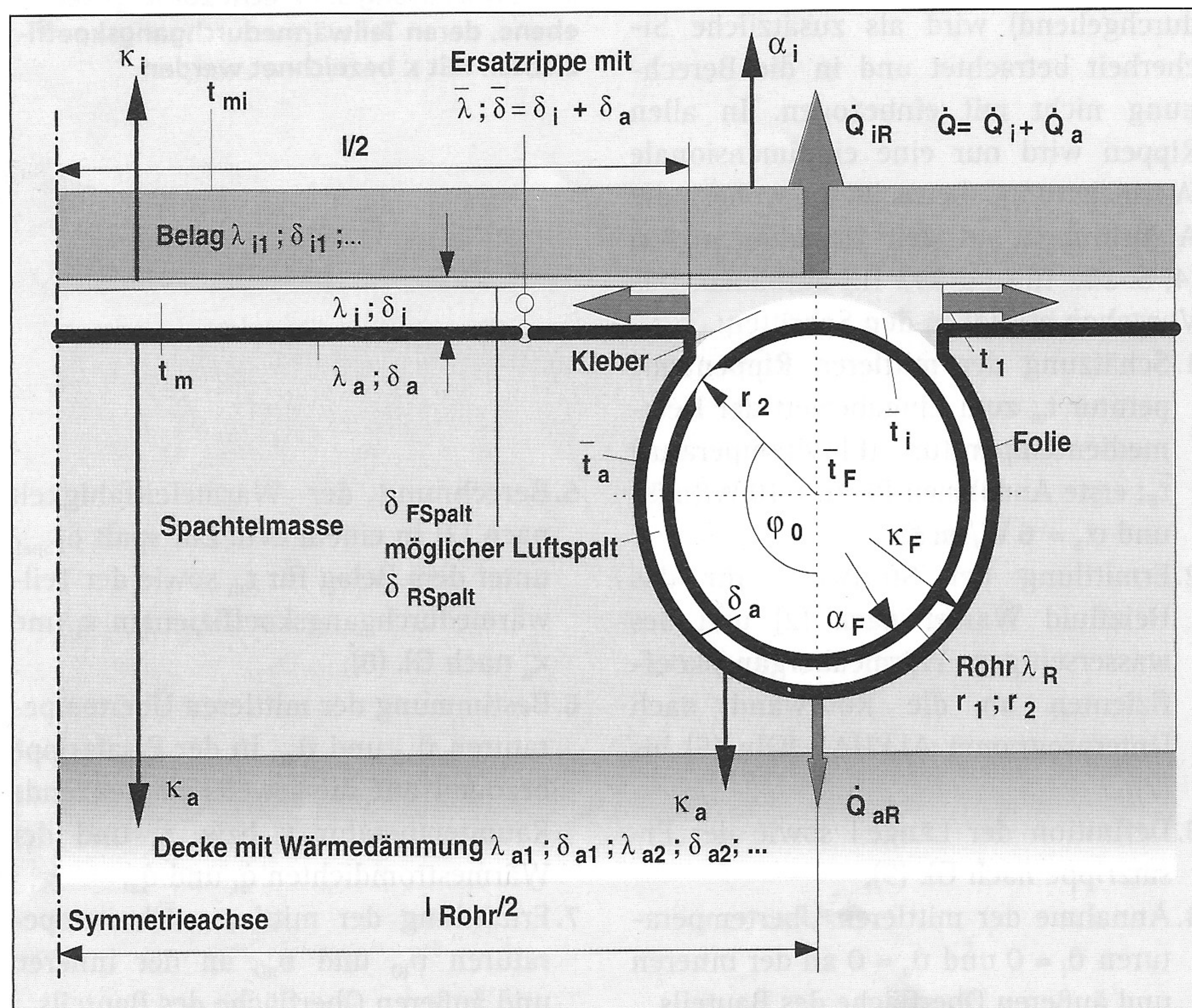
Teilungsfaktor nach Tab. A7 für $s_U/\lambda_U = 0,09 \text{ m}^2 \text{K/W}$: $a_T = 1,079$,

Überdeckungsfaktor nach Tab. A8 für $s_U/\lambda_U = 0,09 \text{ m}^2 \text{K/W}$: $a_U = 0,756$,

Wärmeleitfaktor nach Tab. A10 für $K_{WL} = 0,744$ und $T = 0,225 \text{ m}$: $a_{WL} = 0,943$,

Hilfsgröße $b_U = 0,43$ nach Tab. A9,

Hilfsgröße $K_{WL} = (s_{WL} \lambda_{WL} + b_U s_U \lambda_U) / 0,125 = (0,00045 \cdot 200 + 0,43 \cdot 0,025 \cdot 0,28) / 0,125 = 0,744$,



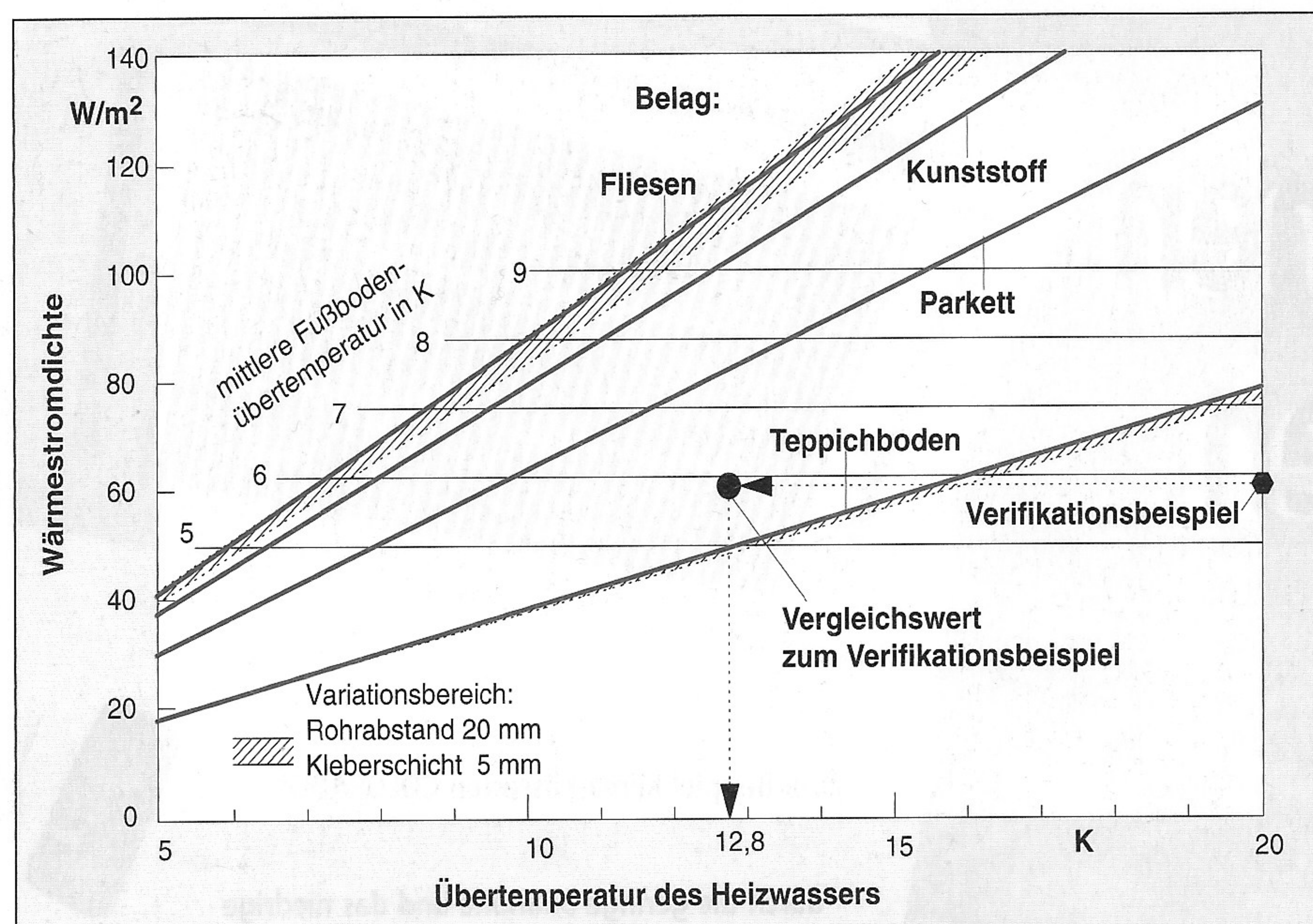


Bild 3: Wärmestromdichte (Heizleistung) und mittlere Fußbodenübertemperatur in Abhängigkeit der Heizwasserübertemperatur einer Fußbodenheizung berechnet nach dem Algorithmus für Naßverlegeverfahren für Kapillarrohrmatten mit einem Rohrabstand von 15 mm in einer 9 mm dicken Kleberschicht. Das Verifikationsbeispiel entspricht einem konventionellen Naßsystem, der zugehörige Vergleichswert gilt für Kapillarrohrmatten mit 20 mm Rohrabstand, die in einer 5 mm dicken Kleberschicht integriert sind

Vergleich der Ergebnisse

Beim Vergleich der Ergebnisse ist zu beachten, daß bei der DIN-Berechnung der Wärmestrom in den Raum mit $\dot{q}$ bezeichnet wird. Er ist zu vergleichen mit dem Wert $\dot{q}_i$ der Simulationsrechnung. Die Abweichung beträgt vom DIN-Wert im ersten Fall 1,3%, im zweiten Fall 0%. Da die Rechnung nach DIN mit den Potenzansätzen nicht alle Einflüsse, die das Rechenprogramm genau berücksichtigt, erfassen kann, besteht eine sehr gute Übereinstimmung.

Damit können die beiden Algorithmen zur Berechnung von Naß- und Trockenverlegesystemen auch zur detaillierten Berechnung der Fußbodenaufbauten mit Kapillarrohrmatte eingesetzt werden.

Kapillarrohrmatte in der Kleberschicht

Es wurden zahlreiche Einsatzvariationen berechnet. Der Grundaufbau (vgl. Bild 1) besteht aus: $\delta = 9$ mm ($\Delta_1 = 0,006$ m; $\Delta_a = 0,003$ m); $\lambda = 1$ W/(mK); $d_2/d_1 = 3,4$ mm/2,3 mm; $\lambda_R = 0,21$ W/(mK); $w = 0,1$ m/s; $l = 15$ mm; $\delta_{RSpalt} = 0$ (kein Luftspalt); $\delta_L = 0$ (kein Wärmeleitblech); $\delta_{a1} = 40$ mm, $\lambda_{a1} = 0,04$ W/(mK), $\delta_{a2} = 200$ mm, $\lambda_{a2} = 2,1$ W/(mK) (Dämmschicht und Decke); $t_i = 20$ °C; $t_a = 18$ °C. Variationen dieser Parameter werden speziell angegeben. Als Beläge wurden vorgesehen: Fliesen ($R_\lambda = 0,01$ m²K/W); Kunststoffbelag ($R_\lambda = 0,022$ m²K/W); Parkett ($R_\lambda = 0,05$ m²K/W); Teppichboden ($R_\lambda = 0,15$ m²K/W). Die berechneten Wärmeleistungen in Abhän-

gigkeit der Übertemperaturen (Heizwassertemperatur – Raumtemperatur) und die mittleren Übertemperaturen sind im Bild 3 aufgezeichnet.

Der bei den Kapillarrohrmatten übliche kleine Rohrabstand führt zu einem völlig veränderten wärmetechnischen Verhalten, als bei konventionellen Fußbodenheizungen üblich. So haben z.B. die Kleberparameter (Dicke und Wärmeleitfähigkeit) nicht mehr die große Bedeutung für die Leistung, wie dies die Estricheigenschaften darstellten. Eine Sensitivitätsbetrachtung liefert für eine Wassertemperatur $\bar{t}_F = 30$ °C folgende Ergebnisse:

- Die Vergrößerung des Rohrabstandes von 15 mm auf 20 mm bewirkt nur geringe Leistungseinbußen. Diese sind logischerweise kleiner bei größeren Kleberdicken und Wärmeleitwiderständen des Belages. Erst bei sehr kleiner Wärmeleitfähigkeit des Klebers wächst der Einfluß.

Kleberdicke	9 mm	5 mm
Fliesen	-3,7 %	-4,5 %
Kunststoff	-3,3 %	-4,0 %
Parkett	-2,7 %	-3,3 %
Teppich	-1,6 %	-2,1 %

Kleberdicke 5 mm; $\lambda = 0,3$ W/(mK); Kunststoffbelag	
1 = 10 mm	+6,6 %
1 = 15 mm	Bezugswert
1 = 20 mm	-7,7 %

- Die Wärmeleistung ändert sich bei Variation der Wärmeleitfähigkeit des Klebers im üblichen Bereich $\lambda \approx 1,0 \pm 0,2$ W/(mK) nur geringfügig. Für Kunststoffbelag gelten:

Kleberdicke	9 mm	5 mm
$\lambda = 1,2$ W/(mK)	+1,0 %	+0,8 %
$\lambda = 1,0$ W/(mK)	Bezugswert	Bezugswert
$\lambda = 0,8$ W/(mK)	-1,4 %	-1,0 %
$\lambda = 0,3$ W/(mK)	-12,2 %	-8,5 %

- Die Verringerung der Kleberdicke von 9 mm auf 5 mm führt zu einer Erhöhung der Wärmeleistung um 1–2 %, d.h., trotz $\lambda = 1$ W/(mK) wirkt die Kleberschicht »dämmend«.
- Die Reduzierung der Wassergeschwindigkeit von $w = 0,1$ m/s auf 0,05 m/s in den Rohren ergab keine Veränderung der Wärmeleistung. Bei Kapillarrohrmatten liegen stets laminare Strömungsverhältnisse vor.

Korrekturfaktor für den Kontakt nach Tab. A 11 für $T = 0,225$ m: $a_K = 0,9$, $m_T = -2$,

Fußbodenbelagfaktor mit $\bar{f}(T) = 1,209$ nach der Beziehung:

$$a_B = (1 + B a_U a_T^m a_{WL} a_K R_{\lambda,B} \bar{f}(T))^{-1} = (1 + 6,5 \cdot 0,756 \cdot 1,079^{-2} \cdot 0,943 \cdot 0,9 \cdot 0,1 \cdot 1,209)^{-1} = 0,698,$$

Für mittlere Übertemperatur des Heizwassers von 20 K ergibt Gl. (2):

$$\dot{q} = 6,5 \cdot 0,698 \cdot 1,079^{-2} \cdot 0,756 \cdot 0,943 \cdot 0,9 \cdot 20 = 50,0 \text{ W/m}^2.$$

- Rechnung nach Simulationsmodell:

Für die innere Umhüllung des Rohres ist an Stelle des Klebers die PE-Abdeckfolie in Ansatz gebracht. Luftspalte bleiben unberücksichtigt.

$$t_{mi} = 24,8 \text{ °C}; t_{max} = 26,5 \text{ °C}; t_{min} = 24,3 \text{ °C}, \dot{q}_i = 50,1 \text{ W/m}^2; \dot{q} = 63,4 \text{ W/m}^2.$$