

Wärmeströme von Rohrleitungen in Fußboden- und Wandkonstruktionen - Teil 1

Bernd Hanel, Fellbach/Stuttgart

Die wärmetechnischen Grundlagen des Wärme- und Kälteschutzes für betriebs- und haustechnische Anlagen sind in der VDI 2055 [1] ausführlich dargestellt. Diese Grundlagen und Berechnungsvorschriften schließen den Wärme- und Kälteschutz von (z.B.) frei oder in Installationsschächten verlegten Rohrleitungen ein. Es fehlen jedoch Berechnungshinweise für die Wärmeabgabe von Sanitär- und Heizungsrohrleitungen, die in Fußbodenaufbauten oder Wandkonstruktionen von Gebäuden verlegt werden.

Die Verlegung von Sanitär- und Heizungsrohrleitungen in Fußbodenaufbauten oder Wandkonstruktionen ist besonders im Wohnungsbau aber auch im Gewerbe- und Industriebau häufig anzutreffen und sehr vorteilhaft, da sie eine wohnungs- bzw. raumzugeordnete Verteilung erlaubt, die sichtbare Verlegung von Rohrleitungen vermeidet sowie technologisch einfach und Kosten sparend erfolgen kann.

Deshalb wird in die VDI-Richtlinie 2055, die gegenwärtig überarbeitet wird [2], ein Algorithmus zur Berechnung der Wärmeströme von in plattenförmigen

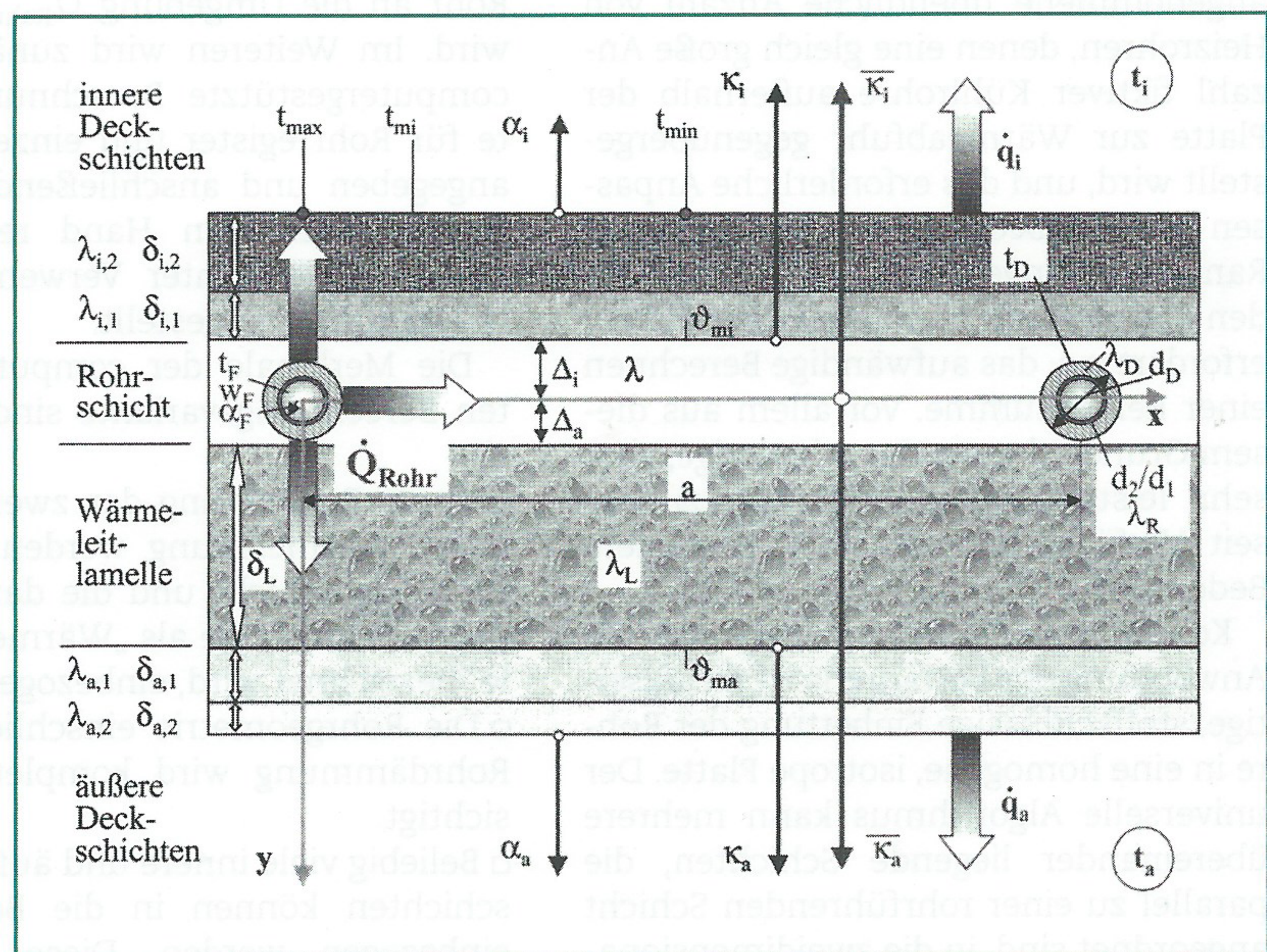


Bild 1

Aufbau einer mehrschichtigen Platte mit zweidimensionaler Wärmeleitung in der Rohrschicht sowie einer darunter liegenden Wärmeleitlamelle und mit je zwei inneren und äußeren Deckschichten mit eindimensionaler Wärmeleitung in vertikaler Richtung

Baukonstruktionen eingebetteten, gedämmten Rohrleitungen aufgenommen. Da sich die Ausführungen zum Algorithmus in der VDI-Richtlinie auf wenige, wesentliche Punkte beschränken müssen, werden im Folgenden Details und Hinweise zum Rechenverfahren gegeben, um das Verfahren nachvollziehbar zu gestalten und ggf. an andere, kompliziertere Aufgabenstellungen anpassen zu können.

Grundüberlegungen zum Algorithmus

Die üblichen Baukonstruktionen mit eingeförmten Rohrleitungen – beispielsweise eines Heizungsrohres in einem Fußbodenaufbau – können in der Regel in sehr guter Näherung mit Algorithmen

der zweidimensionalen Wärmeleitung behandelt werden, weil die Abkühlung des Wärmeträgers längs der Rohrachse bei der Versorgung von Heizkörpern meistens marginal ist. Letztendlich muss die Temperatur des Wärmeträgers ohnehin – z.B. als mittlere Temperatur – vorgegeben werden.

Die stationäre, zweidimensionale Wärmeleitung in einer Platte wird durch die Laplacesche Differentialgleichung

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

beschrieben. Sind in der Platte Rohrleitungen verlegt, ist die Lösung dieser Differentialgleichung wegen der komplizierten Randbedingungen nicht trivial. Faxén [3] erarbeitete für Platten mit inte-

Autor



Dr. Bernd Hanel ist Leiter Forschung und Entwicklung der E. Missel GmbH & Co., Fellbach/Stuttgart.

grierten, parallel verlaufenden Heizrohren von (z.B.) einer Fußbodenheizung ein analytisches Berechnungsverfahren, das auf dem Superpositionsprinzip basiert und in dem Randbedingungen 3. Art durch konvergente Reihenentwicklungen erfüllt werden. Das Verfahren von Faxén [3], das von Glück in [4; 5] beschrieben und detailliert aufbereitet wurde, wird für die eingangs beschriebene Aufgabenstellung angepasst. Die von Faxén angenommene unendliche Anzahl von Heizrohren, denen eine gleich große Anzahl fiktiver Kühlrohre außerhalb der Platte zur Wärmeabfuhr gegenübergestellt wird, und das erforderliche Anpassen der Randbedingung 3. Art (Robinsche Randbedingungen, siehe z.B. in [6]) an den Plattenrändern (Bauteiloberflächen) erfordert u.a. das aufwändige Berechnen einer Reihensumme. Vor allem aus diesem Grund erlangte der schwierige, aber sehr leistungsfähige Algorithmus erst seit Verfügbarkeit der EDV besondere Bedeutung.

Konstruktive Voraussetzung für die Anwendung des Verfahrens ist die allseitige, stoffschlüssige Einbettung der Rohre in eine homogene, isotrope Platte. Der universelle Algorithmus kann mehrere übereinander liegende Schichten, die parallel zu einer rohrführenden Schicht angeordnet sind, in die zweidimensionale Berechnung der Wärmeleitung einbeziehen. Dies ist mitunter notwendig, wenn die rohrführende Schicht dünn und/oder schlecht wärmeleitend und die Parallelschichten gut wärmeleitend sind. Praxisbezogene Verifizierungen des Algorithmus finden sich in [5; 7; 8].

Neben dem Verfahren von Faxén [3; 4] existiert ein Algorithmus zur Lösung der Gl.(1) von Elgeti [9; 10], der die zweidimensionale Wärmeleitung lediglich in der rohrführenden Schicht berücksichtigt. Dieser Algorithmus ist grundsätzlich nur für ein einzelnes Rohr anwendbar und ebenfalls rechenintensiv.

Spezieller Algorithmus für Rohrregister und einzelne Rohre in Platten

Der geometrische Aufbau einer mehrschichtigen Platte mit zweidimensionaler Wärmeleitung in der rohrführenden und einer angrenzenden Schicht ist mit den dazu gehörigen wärmetechnischen Daten im Bild 1 dargestellt. Der Algorithmus von Faxén kann in einfacher Weise auf die hier vorliegende, eingegrenzte Aufgabe angewendet werden, wenn der Rohr-

abstand a zwischen den parallel geführten Rohren annähernd gleich groß ist. Zur Betrachtung eines einzelnen Rohres ist der Rohrabstand a so groß zu wählen, dass praktisch keine gegenseitige Beeinflussung der Temperaturfelder der Rohre mehr erfolgt. Der in [3; 4] angegebene Algorithmus ist dann nur insoweit zu modifizieren, dass anstelle der Wärmestromdichten an den Oberflächen der Platte der Gesamtwärmestrom vom Rohr an die Umgebung Q_{Rohr} ermittelt wird. Im Weiteren wird zunächst eine computergestützte Berechnungsvariante für Rohrregister und einzelne Rohre angegeben und anschließend wird ein vereinfachtes, von Hand rechenbares Kurzverfahren unter Verwendung von Diagrammen vorgestellt.

Die Merkmale der computergestützten Berechnungsvariante sind (vgl. Bild 1):

- In die Berechnung der zweidimensionalen Wärmeleitung werden die rohrführende Schicht und die darunter liegende Schicht, die als „Wärmeleitlamelle“ bezeichnet wird, einbezogen.
- Die Rohrgeometrie einschließlich der Rohrdämmung wird komplett berücksichtigt.
- Beliebig viele innere und äußere Deckschichten können in die Berechnung einbezogen werden. Diese Schichten werden nur in vertikaler Richtung wärmeleitend betrachtet. Im vorliegenden Modell finden je zwei Deckschichten Berücksichtigung.
- Die Wärmeübergangskoeffizienten an den Bauteiloberflächen α_i und α_a sind vorzugeben. (Mit Hilfsalgorithmen, siehe z.B. [5], könnten Erweiterungen vorgenommen werden.)
- Der fluidseitige Wärmeübergangskoeffizient α_f wird in Abhängigkeit der Fluidtemperatur t_f , des Rohrrinnendurchmessers d_1 und der Fluidgeschwindigkeit w_f nach [6] berechnet.
- Die raumseitigen Temperaturen an den Bauteiloberflächen werden für die vorgegebene Fluidtemperatur ermittelt.
- Der Gesamtwärmestrom Q_{Rohr} entspricht der Rohrwärmeabgabe pro 1 m Länge in W/m.

Der Berechnungsablauf wird durch folgende Gleichungen charakterisiert (Bezeichnungen und Symbole siehe Bild 1):

Es sind die Teilwärmedurchgangskoeffizienten für die inneren und äußeren Deckschichten einschließlich der raumseitigen Wärmeübergangskoeffizienten α_i und α_a zu bilden:

$$\kappa_i = \left[\frac{1}{\alpha_i} + \left(\frac{\delta_{i,1}}{\lambda_{i,1}} + \frac{\delta_{i,2}}{\lambda_{i,2}} + \dots \right) \right]^{-1} \quad (2)$$

$$\kappa_a = \left[\frac{1}{\alpha_a} + \left(\frac{\delta_{a,1}}{\lambda_{a,1}} + \frac{\delta_{a,2}}{\lambda_{a,2}} + \dots \right) \right]^{-1} \quad (3).$$

Für Bauteile mit Wärmestrom von unten nach oben (Fußbodenheizungen und Kühldecken) hat sich die sogenannte „Basiskennlinie“ nach DIN EN 1264 [11] mit der Über- oder Untertemperatur der raumseitigen Bauteiloberfläche ϑ in K zur Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten bewährt:

$$\alpha = 8,92 |\vartheta|^{0,1} \text{ in W/(m}^2 \text{ K)} \quad (4).$$

(Für einzelne Rohre kann zur Vereinfachung $\alpha = 9 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ verwendet werden.) Ist der Wärmestrom nach unten gerichtet, so wird nach speziellen Berechnungen mit dem sogenannten „Raummodell“ [12] empfohlen:

$$\alpha = 6,7 \text{ W/(m}^2 \text{ K)} \quad (5).$$

Für den horizontalen Wärmestrom an Wänden gelte wiederum mit der Bauteilüber- oder -untertemperatur ϑ in K:

$$\alpha = 5,1 + 1,6 |\vartheta|^{0,3} \text{ in W/(m}^2 \text{ K)} \quad (6).$$

Mit den Randbedingungen an der äußeren Bauteiloberfläche bei $y = \Delta_a$ (siehe auch Bild 1)

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=\Delta_a} = \kappa_a t \quad (7)$$

$$\text{bzw. mit } h_a^* = \frac{\kappa_a}{\lambda} \quad (7a)$$

$$\frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=\Delta_a} = -h_a^* t \quad (7b)$$

und an der inneren Bauteiloberfläche bei $y = \Delta_i$

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=-\Delta_i} = \kappa_i t \quad (8)$$

$$\text{bzw. mit } h_i^* = \frac{\kappa_i}{\lambda} \quad (8a)$$

$$\frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=-\Delta_i} = h_i^* t. \quad (8b)$$

erhält man nach aufwändiger Ableitung, siehe dazu [3] bis [5], das Temperaturfeld in der Rohrschicht

$$\vartheta = -A \left\{ \frac{\pi}{a} [G_a y + G_i + |y|] - \sum_{s=1}^{\infty} \frac{1}{s} \left[e^{-\frac{2\pi s}{a}|y|} + g_a(s) e^{-\frac{2\pi s}{a}y} + g_i(s) e^{\frac{2\pi s}{a}y} \right] \cos\left(\frac{2\pi s}{a}x\right) \right\} \quad (9).$$

In der Wärmeleitlamelle selbst wird das Temperaturfeld durch die Gleichung

$$\vartheta_L = -A \left\{ \frac{\pi}{a} [G_{La} y + G_{Li} + y] - \sum_{s=1}^{\infty} \frac{1}{s} \left[g_{La}(s) e^{-\frac{2\pi s}{a}y} + g_{Li}(s) e^{\frac{2\pi s}{a}y} \right] \cos\left(\frac{2\pi s}{a}x\right) \right\} \quad (10)$$

beschrieben. Die Gln. (9) und (10) gelten für gleiche Umgebungstemperaturen ($t_i = t_a$). Die Temperaturen, die sich aus den Gln. (9), (10) ergeben, sind stets auf t_i bezogen, d. h., es gelten

$$\vartheta = t - t_i \text{ und} \quad (11)$$

$$\vartheta_L = t_L - t_i \quad (12)$$

Der in Gl. (9) bei der Summenbildung vorhandene erste Term $\exp(-2\pi s |y|/a)$ rührt von der Existenz der Rohre her („Wärmequelle“) und entfällt deshalb in der Gl. (10).

Die Konstanten in den Gln. (9) und (10) A , G_a , G_i , G_{La} , G_{Li} , $g_a(s)$, $g_i(s)$, $g_{La}(s)$ und $g_{Li}(s)$ sind aus den Randbedingungen zu bestimmen.

Mit den auf die Rohrachse bezogenen Teilwärmedurchgangskoeffizienten, die die Schichten mit zweidimensionaler Wärmeleitung (Wärmeleitlamelle und rohrführende Schicht) einschließen,

$$\bar{\kappa}_i = \left[\frac{1}{\kappa_i} + \frac{\Delta_i}{\lambda} \right]^{-1} \quad (13)$$

$$\bar{\kappa}_a = \left[\frac{1}{\kappa_a} + \frac{\Delta_a}{\lambda} + \frac{\delta_L}{\lambda_L} \right]^{-1} \quad (14).$$

gelten für die Rohrschicht

$$G_i = \frac{-2\lambda}{\bar{\kappa}_a + \bar{\kappa}_i} \quad (15);$$

$$G_a = \frac{\bar{\kappa}_a - \bar{\kappa}_i}{\bar{\kappa}_a + \bar{\kappa}_i} \quad (16).$$

und

$$\Sigma = \sum_{s=1}^{\infty} \frac{g_a(s) + g_i(s)}{s} \quad (17).$$

Die Reihensumme Σ , die später auch in den Gln. (24) und (34) benötigt wird, erfordert je nach Parameterkonstellation das Einbeziehen von s Gliedern der Reihe ($s_{\max} \approx 20$ bis 200). Die Summanden g_i und g_a folgen aus dem Faxén'schen Algorithmus für eine speziell nach Bild 1 gestaltete Konstruktion gemäß einer in [7] gegebenen Ableitung zu:

$$g_i(s) = \frac{\left(\lambda + \frac{\lambda_L}{N_1} - \frac{\lambda_L}{N_2} \right) \left(e^{-\frac{4\pi s}{a}\Delta_a} - R \right)}{\lambda(1+R) + \left(\frac{\lambda_L}{N_2} - \frac{\lambda_L}{N_1} \right) (1-R)} \quad (18)$$

$$g_a(s) = -\frac{h_i - 2\pi s}{h_i + 2\pi s} e^{-\frac{4\pi s}{a}\Delta_i} [1 + g_i(s)] \quad (19)$$

mit $h_a = h_a^* a$ und $h_i = h_i^* a$ [unter Verwendung der Gln. (7a), (8a)] sowie den Abkürzungen

$$N_1 = 1 - \frac{h_a + 2\pi s}{h_a - 2\pi s} e^{-\frac{4\pi s}{a}\delta_L};$$

$$N_2 = 1 - \frac{h_a - 2\pi s}{h_a + 2\pi s} e^{-\frac{4\pi s}{a}\delta_L} \quad (20)$$

$$R = \frac{h_i - 2\pi s}{h_i + 2\pi s} e^{-\frac{4\pi s}{a}(\Delta_a + \Delta_i)} \quad (21).$$

Wäre im Gegensatz zu Bild 1 die Wärmeleitlamelle (z.B. eine Betondecke) nicht vorhanden (siehe Bild 7 in Teil 2), dann vereinfacht sich die Berechnung der beiden Summanden zu:

$$g_i(s) = \frac{\frac{h_i + 2\pi s}{h_i - 2\pi s} e^{-\frac{4\pi s}{a}\Delta_a} - e^{-\frac{4\pi s}{a}(\Delta_i + \Delta_a)}}{e^{-\frac{4\pi s}{a}(\Delta_i + \Delta_a)} - \frac{h_a + 2\pi s}{h_a - 2\pi s} \frac{h_i + 2\pi s}{h_i - 2\pi s}} \quad (22)$$

$$g_a(s) = \frac{\frac{h_a + 2\pi s}{h_a - 2\pi s} e^{-\frac{4\pi s}{a}\Delta_i} - e^{-\frac{4\pi s}{a}(\Delta_i + \Delta_a)}}{e^{-\frac{4\pi s}{a}(\Delta_i + \Delta_a)} - \frac{h_a + 2\pi s}{h_a - 2\pi s} \frac{h_i + 2\pi s}{h_i - 2\pi s}} \quad (23).$$

(Bemerkung: Die Gln. (22) und (23) ergeben sich auch aus den Gln. (18) bis (21), wenn $\delta_L = 0$ und $\lambda_L = \lambda$ gesetzt werden.)

Die Konstante A , die man mit Hilfe einer einfachen Randbedingung 1. Art (Dirichletsche Randbedingung: konstante Temperatur am Rohrumfang) bestimmt, stellt für die Berechnung des Wärmestroms und der Oberflächentemperatur ein bedeutendes Zwischenergebnis dar:

$$A = \frac{t_D - \frac{t_i \bar{\kappa}_i + t_a \bar{\kappa}_a}{\bar{\kappa}_i + \bar{\kappa}_a}}{\ln\left(\frac{a}{\pi d_D}\right) - \frac{\pi}{a} G_i + \Sigma} \quad (24).$$

In Gl. (24) ist t_D die äußere Oberflächentemperatur eines in die Platte eingebetteten Zylinders, d.h., t_D ist die Temperatur an der Oberfläche der Rohrdämmung oder – bei ungedämmten Rohren – die Temperatur der Rohrwand. Gl. (24) gilt im übrigen für ungleiche Temperaturen der angrenzenden Räume.

Die mittleren Übertemperaturen bezogen auf die jeweiligen Umgebungstemperaturen – gebildet im Abschnitt des Rohrabstandes – betragen somit an der oberen Begrenzung der Rohrschicht

$$\vartheta_{mi} = \frac{A\pi\lambda}{a\kappa_i} (1 - G_a) + (t_a - t_i) \frac{\frac{1}{\kappa_i}}{\frac{1}{\bar{\kappa}_a} + \frac{1}{\bar{\kappa}_i}} \quad (25)$$

und an der unteren Begrenzung der Wärmeleitlamelle bzw. bei $\delta_L = 0$ der Rohrschicht

$$\vartheta_{ma} = \frac{A\pi\lambda}{a\kappa_a} (1 + G_a) - (t_a - t_i) \frac{\frac{1}{\kappa_a}}{\frac{1}{\bar{\kappa}_a} + \frac{1}{\bar{\kappa}_i}} \quad (26).$$

Die raumseitigen Oberflächentemperaturen ergeben sich direkt aus den vorgenannten Gleichungen. Es gelten für die mittlere Temperatur an der Oberseite der inneren Deckschicht (z. B. auf dem Fußboden)

$$t_{mi} = \vartheta_{mi} \frac{\kappa_i}{\alpha_i} + t_i \quad (27)$$

und für die mittlere Temperatur an der Unterseite der äußeren Deckschicht (z.B. Trenndecke)

$$t_{ma} = \vartheta_{ma} \frac{\kappa_a}{\alpha_a} + t_a \quad (28).$$

Zur Berechnung der Extremtemperaturen verwendet man die Hilfsgröße

$$H_G(s) = \frac{1}{s} \left[e^{-\frac{2\pi s}{a} \Delta_i} + g_a(s) e^{\frac{2\pi s}{a} \Delta_i} + g_i(s) e^{-\frac{2\pi s}{a} \Delta_i} \right] \quad (29)$$

und man erhält gemäß Bild 1 für die maximale Oberflächentemperatur direkt über dem Rohrscheitel

$$t_{\max} = \left(\vartheta_{mi} + A \sum_{s=1}^{\infty} H_G(s) \right) \frac{\kappa_i}{\alpha_i} + t_i \quad (30)$$

und für die minimale Oberflächentemperatur zwischen zwei Rohren

$$t_{\min} = \left(\vartheta_{mi} + A \sum_{s=1}^{\infty} H_G(s) \cos(\pi s) \right) \frac{\kappa_i}{\alpha_i} + t_i \quad (31)$$

Die Wärmestromdichten von der Platte mit dem integrierten Rohrregister betragen nach innen

$$\dot{q}_i = \kappa_i \vartheta_{mi} \quad (32)$$

und nach außen

$$\dot{q}_a = \kappa_a \vartheta_{ma} \quad (33)$$

Daraus ergibt sich mit den Gln. (2), (3) und (27), (28) der Wärmestrom des einzelnen Rohres pro Meter Rohrlänge, wenn – wie bereits definiert wurde – der Abstand der Rohre im Register a beträgt, zu:

$$\dot{Q}_{\text{Rohr}} = (\dot{q}_i + \dot{q}_a) a = 2\pi \lambda \frac{t_F - \frac{t_i \bar{\kappa}_i + t_a \bar{\kappa}_a}{\bar{\kappa}_i + \bar{\kappa}_a}}{\underbrace{\frac{2\lambda}{d_1 \alpha_F}}_{\text{Wärmeübergangswiderstand vom Fluid an die Rohrwand}} + \underbrace{\frac{\lambda}{\lambda_R} \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}_{\text{Wärmeleitwiderstand in der Rohrwand}} + \underbrace{\frac{\lambda}{\lambda_D} \ln\left(\frac{d_D}{d_2}\right)}_{\text{Wärmeleitwiderstand in der Dämmschicht}} + \underbrace{\ln\left(\frac{a}{\pi d_D}\right) - \frac{\pi}{a} G_i + \Sigma}_{\text{Wärmeleitwiderstand in der Platte gemäß Faxenschem Algorithmus}}} \quad (34)$$

Im Nenner der Gl. (34) sind zum besseren Verständnis die dimensionslosen Wärmeübergangs- und Wärmeleitwiderstände nach ihren Ursprüngen angegeben.

Die dargestellten Zusammenhänge wurden in einem programmierten Algorithmus verknüpft. Der Algorithmus eignet sich grundsätzlich sowohl zur Berechnung der Wärmeströme (Wärmeaufnahme/Wärmeabgabe) von Heizungsrohren, Trinkwasser- oder Kältemittelleitungen in Bauteilen als auch von im Erdreich verlegten Rohrleitungen. Im Weiteren wird die Betrachtung auf Fußboden- und Wandkonstruktionen von Gebäuden begrenzt. Vor weiteren Schritten zur einfachen Handhabung des Algorithmus werden Ergeb-

nisse von Beispielrechnungen mit anderen bekannten Berechnungsverfahren verglichen.

Verifikationsbeispiel 1

Die wärmetechnische Prüfung von Warmwasser-Fußbodenheizungen erfolgt nach DIN EN 1264 T2 [11] mit dem Potenzansatz

$$\dot{q} = B a_B a_T^{m_T} a_U^{m_U} a_D^{m_D} \Delta t \quad (35)$$

Die im **Bild 2** gezeigte Konstruktion ergibt nach der normgerechten Berechnung für die Übertemperatur von 20 K die Wärmestromdichte

$$\dot{q} = 6,7 \cdot 0,598 \cdot 1,156^{-1,667} \cdot 1,0315^0 \cdot 1,035^{-0,75} \cdot 20 \text{ W/m}^2 = 61,3 \text{ W/m}^2$$

Der vorgestellte, programmierte Algorithmus liefert:

□ die Oberflächentemperaturen auf der Innenseite

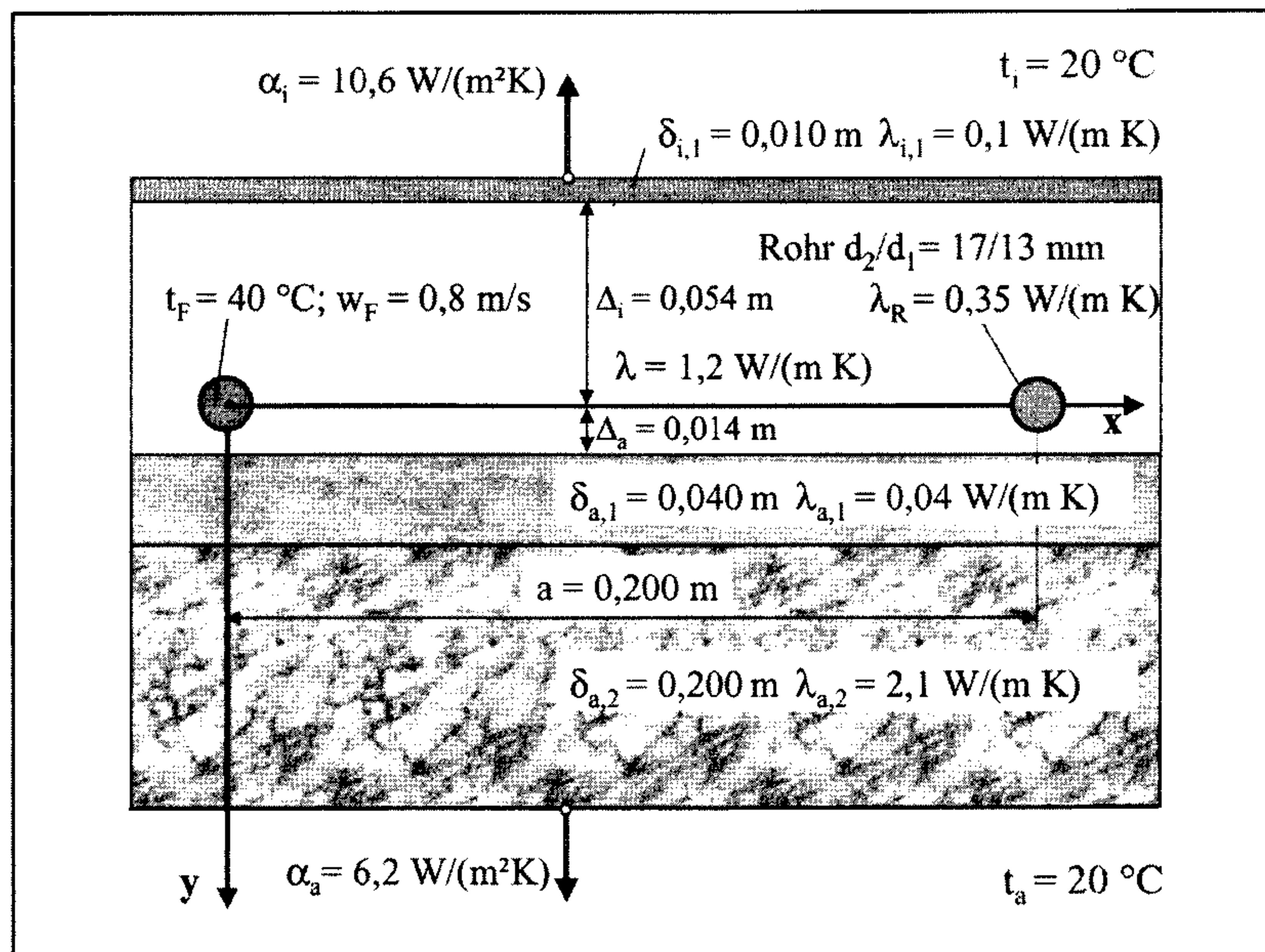


Bild 2

Geometrische und wärmetechnische Daten des Verifikationsbeispiels 1

$$t_{\max} = 26,20 \text{ °C}, t_{\min} = 25,34 \text{ °C}, t_{mi} = 25,73 \text{ °C};$$

□ die Wärmestromdichten von der Konstruktion in die Räume bzw. Wärmestrom vom Rohr

$$\dot{q}_i = 60,78 \text{ W/m}^2, \dot{q}_a = 11,47 \text{ W/m}^2, \dot{q}_{\text{ges}} = 72,25 \text{ W/m}^2, \dot{Q}_{\text{Rohr}} = 14,45 \text{ W/m}.$$

Mit $a = 0,2 \text{ m}$ nach Bild 2 ist auch die Gleichheit zwischen $\dot{Q}_{\text{Rohr}} = a \dot{q}_{\text{ges}}$ gegeben.

Beim Vergleich der Ergebnisse ist zu beachten, dass bei der DIN-Berechnung die Wärmestromdichte in den Raum mit $\dot{q}$ bezeichnet wird. Diese Wärmestromdichte ist mit dem Wert $\dot{q}_i$ der Simulationsrechnung zu vergleichen. Die Abweichung vom DIN-Wert beträgt lediglich 0,8 %.

Verifikationsbeispiel 2

In [13] ist eine Fußbodenheizung mit der Methode der Finiten Elemente detailliert untersucht worden. Die Konstruktion mit den erforderlichen Daten ist **Bild 3** zu entnehmen. Zweidimensional wärmeleitend sind die Rohrschicht

Literatur

- [1] VDI 2055: Wärme- und Kälteschutz für betriebs- und haustechnische Anlagen. Juli 1994.
- [2] E VDI 2055: Wärme- und Kälteschutz für betriebs- und haustechnische Anlagen. Entwurf April 2003.
- [3] Faxén: Beräkning av värmeavgivning från rör, ingjutna i betongplattor. Teknisk Tidskrift Mekanik 1937, Heft 3.
- [4] Glück, B.: Strahlungsheizung – Theorie und Praxis. Berlin: Verlag für Bauwesen und Karlsruhe: C. F. Müller-Verlag 1981.
- [5] Glück, B.: Thermische Bauteilaktivierung – Nutzung von Umweltenergie und Kapillarrohren. Heidelberg: C. F. Müller Verlag 1999.
- [6] Hanel, B.: Einführung in die konvektive Wärme- und Stoffübertragung. Berlin: Verlag Technik GmbH 1990.
- [7] Glück, B.: Wärmeübertragung, Wärmeabgabe von Raumheizflächen und Rohren, 2. Auflage. Berlin: Verlag für Bauwesen 1990.
- [8] Fraaß, M.: Ein Beitrag zur Theorie des thermisch aktivierbaren Bauteils. Dissertation Techn. Univers. Berlin, Fakultät III, 2001.
- [9] Elgeti, K.: Der Wärmeverlust eines in der Wand verlegten Rohres. HLH Bd. 22 (1971) Nr. 3, S. 109–113.
- [10] VDI-Wärmeatlas. Abschnitt Eb. 9. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag 2002.
- [11] DIN EN 1264: Fußboden-Heizung – Systeme und Komponenten. November 1997.
- [12] Glück, B.: Wärmetechnisches Raummodell – Gekoppelte Berechnungen und wärmephysiologische Untersuchungen. Heidelberg: C. F. Müller Verlag 1997.
- [13] Drum, G.: Optimierung der Wärmeleistung von Warmwasser-Fußbodenheizungen durch Aluminiumbleche. HLH Bd. 34 (1983) Nr. 5, S. 228–232.
- [14] DIN 1053-1: Mauerwerk – Berechnung und Ausführung. November 1996.

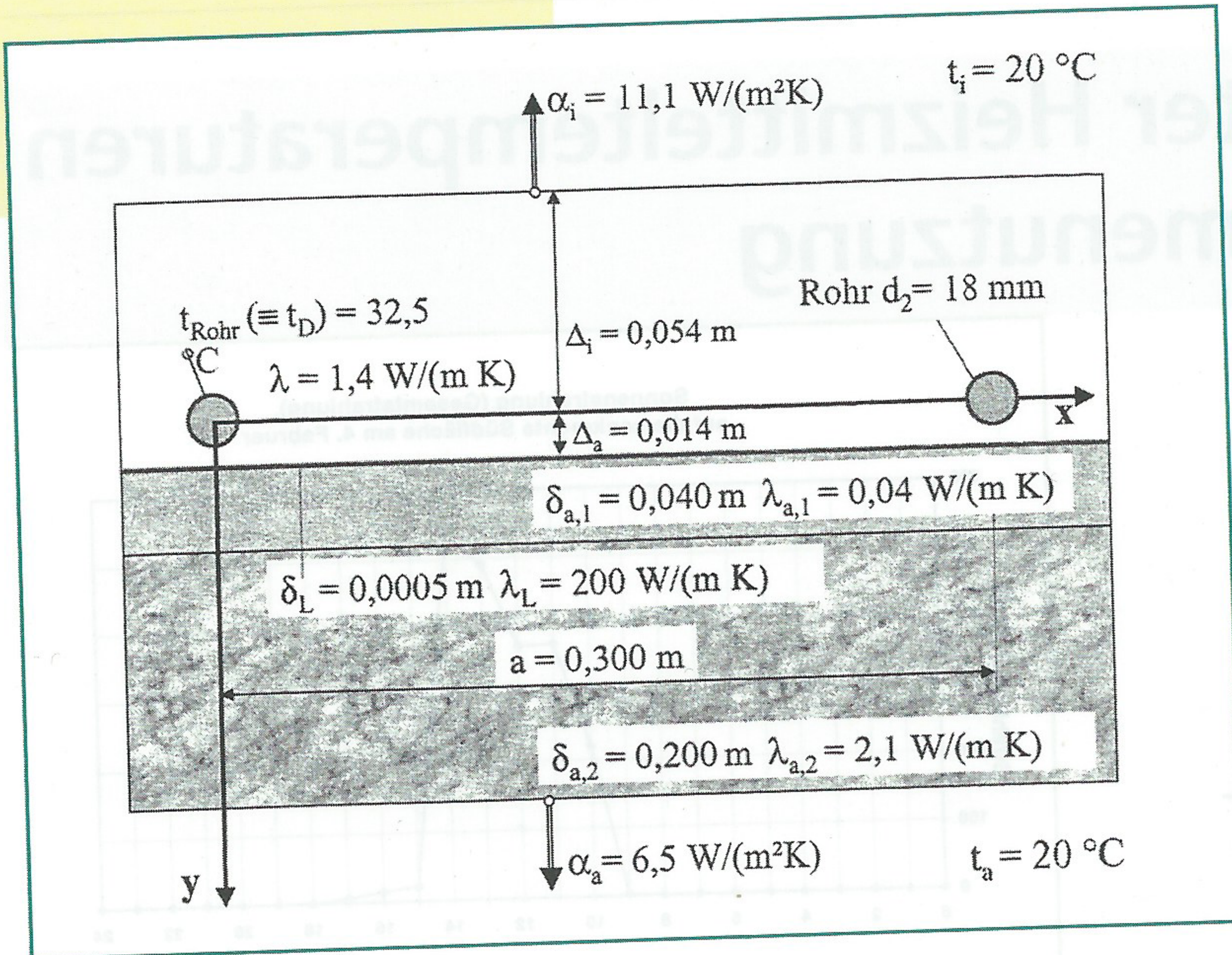


Bild 3

Geometrische und wärmetechnische Daten des Verifikationsbeispiels 2

(Heizestrich) und eine sehr dünne Wärmeleitlamelle aus Aluminium. Die wesentlichen Ergebnisse lauten:

- Wärmestromdichte nach innen $q_i = 68,6 \text{ W/m}^2$

- Temperaturwelligkeit $t_{\max} - t_{\min} = 2,2 \text{ K}$.

Der programmierte Algorithmus liefert für $t_f = 34,9 \text{ °C}$ die Ergebnisse:

- Äußere Rohrwandtemperatur

$t_{\text{Rohr}} = 32,5 \text{ °C}$;

- Oberflächentemperaturen auf der Innenseite

$t_{\max} = 27,48 \text{ °C}$, $t_{\min} = 25,26 \text{ °C}$,
 $t_{\max} - t_{\min} = 2,22 \text{ K}$, $t_{\text{mi}} = 26,17 \text{ °C}$;

- Wärmestromdichten von der Konstruktion in die Räume bzw. Wärmestrom vom Rohr

$q_i = 68,44 \text{ W/m}^2$, $q_a = 6,99 \text{ W/m}^2$,
 $q_{\text{ges}} = 75,44 \text{ W/m}^2$, $Q_{\text{Rohr}} = 22,63 \text{ W/m}$.

Die Wärmestromdichte q_i und die Temperaturwelligkeit $t_{\max} - t_{\min}$ stimmen sehr gut überein.

(Wird fortgesetzt in HLH 7/2003)