

RAL Gütesicherung für Systeme der Thermischen Bauteilaktivierung

Bernd Glück, Jößnitz/Plauen*)

Es ist üblich, die Leistung von Raumheiz- und -kühlflächen auf einem Prüfstand (z.B. für Heizkörper, Kühldecken, Strahlplatten) oder nach einer Rechenvorschrift (z. B. für Fußbodenheizungen) gemäß einer Norm zu quantifizieren. Ausnahmslos handelt es sich hierbei um Wärmeströme, die im stationären Zustand auftreten. Bei der Bauteil-/Betonkernaktivierung gehören die wärmetechnisch wirksamen Bauteile in der Regel direkt zur Baukonstruktion und unterliegen instationären Temperaturgängen.

Ein Verfahren, die wärmetechnische Leistungsfähigkeit von zur Baukonstruktion gehörenden Bauteile zu erfassen sowie untereinander vergleichbar zu machen, führte zu einer Prüfvorschrift als Teil der Güte- und Prüfbestimmungen zur Erlangung des Gütezeichens RAL – GZ 964, das von der Gütegemeinschaft Flächenheizungen und Flächenkühlungen e.V. auf Antrag erteilt wird.

Prinzipien der thermischen Bauteilaktivierung

Die thermische Bauteilaktivierung ist zur alleinigen oder ergänzenden Raumkühlung mit bevorzugtem Einsatz von

Autor



Prof. Dr.-Ing. habil Bernd Glück, Jahrgang 1942, betreibt ein Forschungs- und Entwicklungsbüro für Technische Gebäudeausrüstung. Gleichzeitig ist er als Honorarprofessor an der Westsächsischen Hochschule Zwickau (FH) tätig.

Umweltenergie konzipiert worden. Hauptsächlich kommen Massivdecken, in Sonderfällen Massivwände mit integriertem, wasserdurchströmten Rohrregister zum Einsatz (**Bild 1**). Die übliche Betriebsweise ist durch den nächtlichen Wärmeentzug aus dem Bauteil („Beladung des Bauteils mit Kälte“) mittels Kaltwasserbeaufschlagung des Rohrregisters und die anschließende Wärmeaufnahme aus dem Raum am Tage („Entladung des Bauteils“) gekennzeichnet. Die „Beladung“ ist aktiv steuerbar indem die Kaltwassertemperatur, der Wasserstrom und die Ladezeit gewählt werden können. Die „Entladung“ erfolgt in Abhängigkeit der Decken- und Raumtemperaturen ohne direkte Einflussmöglichkeit des Raumnutzers völlig passiv. Wärmetechnisch gesehen handelt es sich somit um einen instationären (dynamischen) Vorgang. Da die Wärmeaufnahme des Massivbauteils („Entladung“) nur dem Selbstregelungsverhalten unterliegt, kann grundsätzlich keine Gewährleistung für die zeitabhängige Größe der Wärmestromdichte vom Raum zum Bauteil – Kühlleistung – übernommen werden. Dennoch ist eine Leistungsquantifizierung des Produktes unerlässlich.

Da sich die thermische Bauteilaktivierung in der beschriebenen Form bereits sehr gut bewährt, ist man bestrebt, weitere Einsatzfälle durch das System abzudecken. Dies sind beispielsweise:

□ Spitzenkühlleistung durch zusätzliche Nachladung (Kaltwasserdurchfluss) am Tage

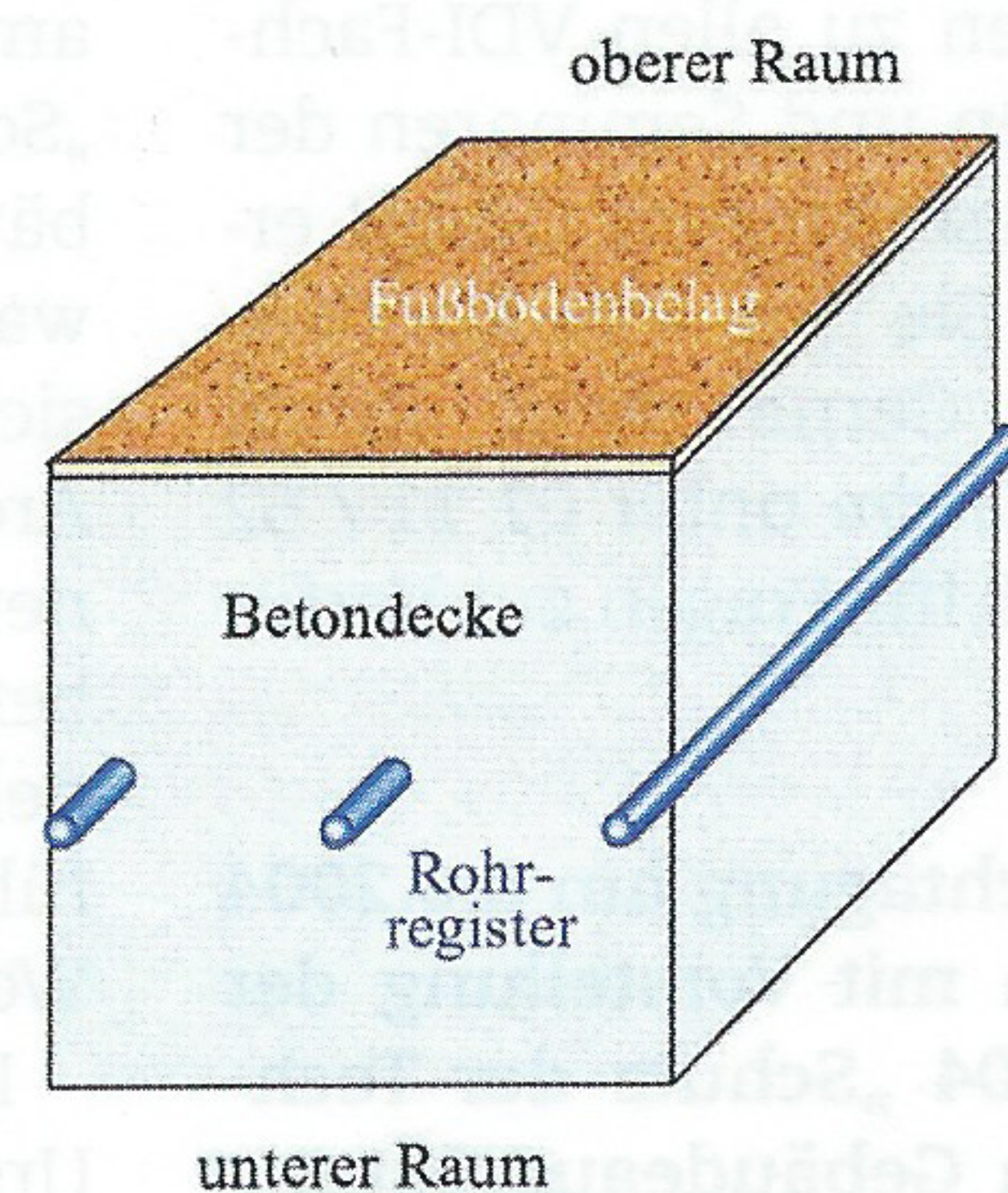


Bild 1

Ausschnitt aus einer Massivdecke mit wasserdurchflossenem Rohrregister zur thermischen Aktivierung.

Zur guten thermischen Ankopplung des oberen Raumes ist der Bodenbelag direkt auf der Betondecke aufgebracht

- Realisierung einer stationär arbeitenden Grundlastkühlung (stetiger Kaltwasserdurchfluss)
- Realisierung einer stationär arbeitenden Grundlastheizung (stetiger Warmwasserdurchfluss).

Wird das Rohrregister beispielsweise im unteren Deckenbereich angeordnet (**Bild 2**), so ist eine reduzierte nächtliche „Kältebeladung“ mit Umweltenergie möglich, die am Vormittag des folgenden Tages die Kühllast des Raumes kompensiert. Die Nachkühlung am Tage kann sinnvoll in ein Regelungskonzept einbezogen werden.

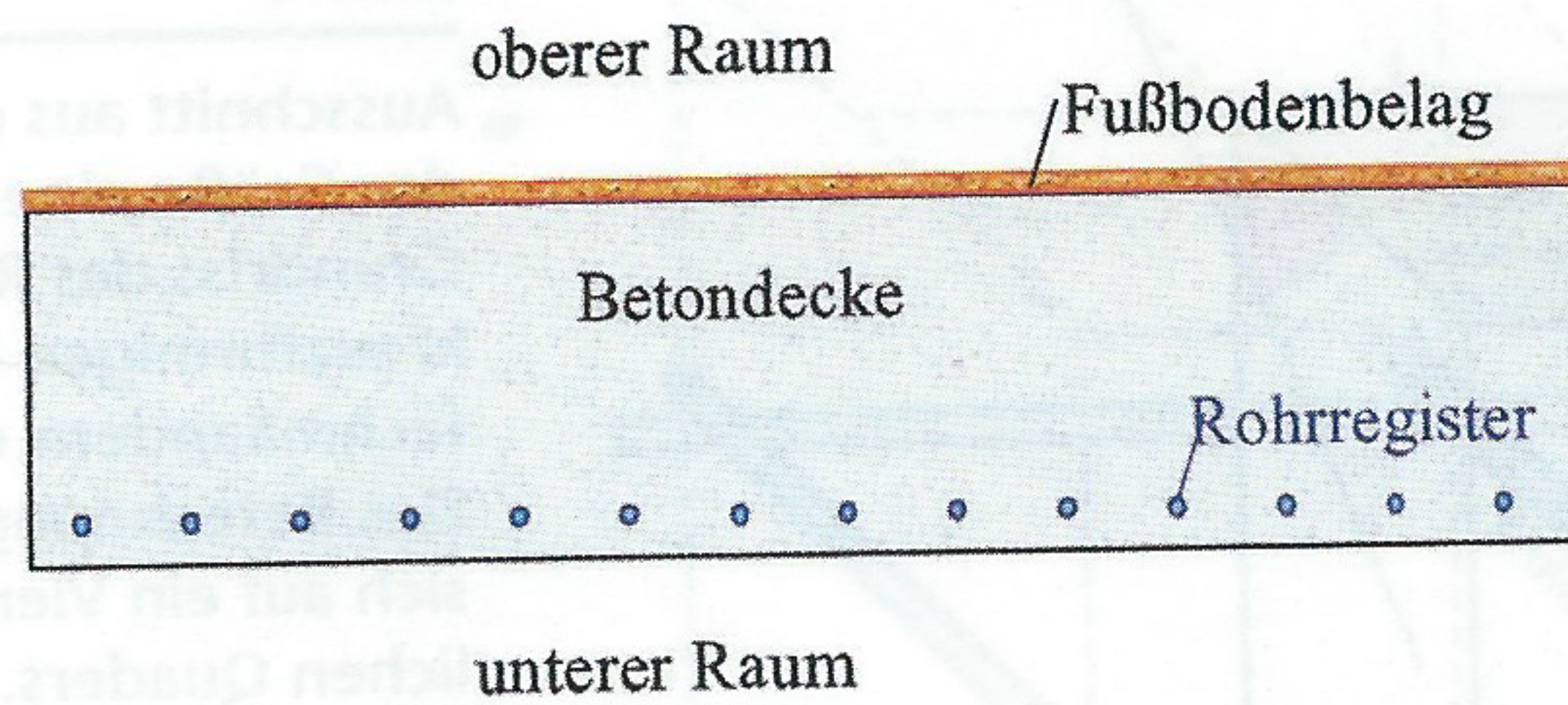
Besonderheiten und Zielstellungen der Prüfvorschrift

Die thermische Bauteilaktivierung befindet sich immer noch in einer intensiven Entwicklungsphase. Es ergeben sich neue Lösungen, die hauptsächlich die nachfolgenden Ziele verfolgen:

- schnellere und kostengünstigere Verlegung
- höhere und besser dem Bedarf angepasste Kühlleistung im Tagesgang

*) Im Auftrag der Gütegemeinschaft Flächenheizungen und Flächenkühlungen e.V., Hagen.

Bild 2



Massivdecke mit einem im unteren Deckenbereich angeordneten Rohrregister zur reduzierten thermischen Aktivierung bevorzugt mit Umweltenergie und zur regelbaren Leistungsabgabe durch Wasserbeaufschlagung z.B. aus einem Kaltwassersatz oder Heizkessel

- erweiterte Nutzungsmöglichkeiten der Systeme zum Kühlen und Heizen
- Nachladung am Tage zur regelbaren Spitzenlastdeckung.

Somit wird der thermisch instationäre Betrieb des Deckensystems mit dem ursprünglich ausgeprägten Nacht-Tag-Zyklus zunehmend durch gesteuerte Nachladungen am Tage oder sogar durch eine geregelte Leistungsentbindung überlagert. Im Ausnahmefall ist auch ein stationärer Betrieb sowohl für das Kühlen als auch für das Heizen denkbar.

Für eine derartige Konstruktions- und Betriebsvielfalt existiert im Bereich der Heizungs- und Klimatechnik kein vergleichbares Normprüfverfahren. Selbst bei Ausschluss der gegebenen Vielfalt sind dynamische Leistungsuntersuchungen in den genannten Bereichen bisher nicht Gegenstand einer Normung.

Die bisher üblichen Prüfverfahren von Flächenkühl- bzw. Flächenheizsystemen basieren auf Messungen oder Rechnungen. Zwei herausragende Beispiele werden nachfolgend genannt:

- Die Leistungsprüfung von Kühldecken erfolgt nach DIN 4715-1 bzw. zukünftig nach DIN EN 14240 in einem genormten Messraum unter exakt vorgegebenen Randbedingungen.
- Die Bestimmung der Wärmeleistung von Fußbodenheizungen wird nach DIN EN 1264-2 rechnerisch vorgenommen.

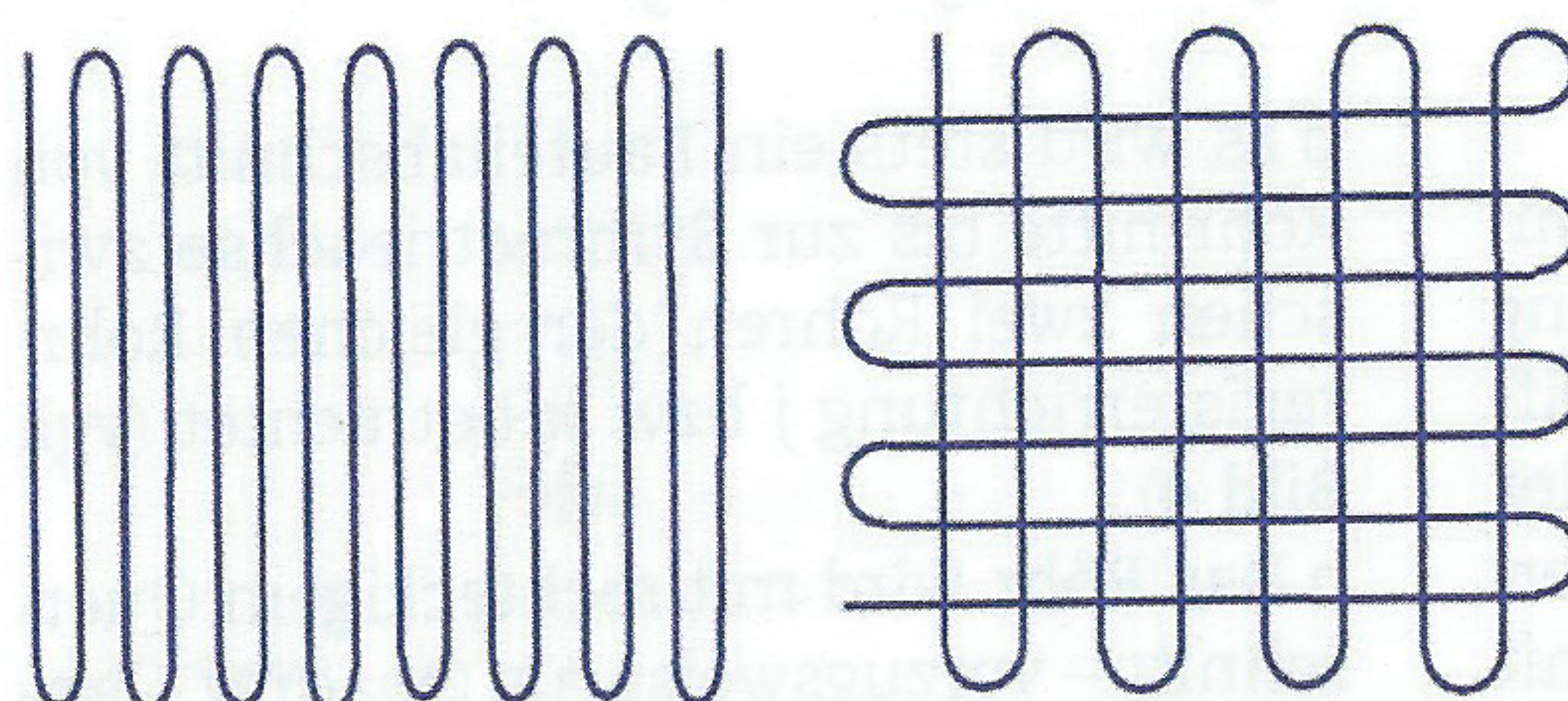
Für die Leistungsuntersuchungen von Bauteilen mit thermischer Bauteilaktivierung scheidet die analoge Übernahme der vorgestellten Verfahren leider aus. Als Begründungen seien vermerkt:

- Eine messtechnische Überprüfung ist wegen des hohen Kosten- und Zeitaufwandes nicht durchführbar. Die Fertigung der Betonbauteile mit der entsprechenden Trocknungszeit – in der Regel 28 Tage –, der Einbau in einem speziellen Prüfstand mit zwei Geschossen und die Versuchsdurchführung über eine Versuchsdauer von wenigstens 72 h sind nur im Ausnahmefall realisierbar.
- Ein Verfahren analog der Fußbodenheizungsnorm DIN EN 1264 ist auch nicht verwirklicht, denn die in der Norm genannten Kennwerte basieren auf einer Vielzahl von FEM-Berechnungen, um daraus unter der Annahme der Superposition Formeln mit Potenzansätzen zu gewinnen.

Dieser Aufwand von voraus berechneten Varianten war außerordentlich groß. Die Parameterkombinationen aus Geometriedaten und Stoffwerten sind bei der thermischen Bauteilaktivierung aber noch bedeutend umfangreicher als bei den Fußbodenheizungen. Zudem werden dynamische Leistungsangaben verlangt, die die Vielfalt noch potenzieren. Letztlich sind solche Ansätze stets mit Geltungsbereichen zu verknüpfen, die in den praktischen Ausführungen – beispielsweise bei stark außermittiger Lage der Rohrregister – dann rasch zur Nichtanwendbarkeit führen.

Aus den genannten Gründen ist eine eigene Prüfvorschrift der Gütegemeinschaft Flächenheizungen und Flächenkühlungen e.V. erarbeitet worden. Die Zielstellungen der Prüfvorschrift von Bauteilen mit thermischer Bauteilaktivierung lauten:

- Es muss eine grundsätzliche Leistungsquantifizierung des Produktes für die stationäre und instationäre Betriebsweise erfolgen.
- Das Prüfergebnis hat einen Produktvergleich mit anderen Wettbewerbserzeugnissen zu ermöglichen.
- Aus den verschiedenen Ergebnissen der Prüfung sollte die Eignung des Systems für spezielle Einsatzfälle ableitbar sein.
- Die Prüfergebnisse sollen dem Systemanbieter und Planer eine direkte Hilfe für die Anlagenbemessung geben.
- Werden für ein Bauteil verschiedene Rohrbestückungen geprüft (im Sinne der Normprüfung z. B. von Heizflächen spricht man von einer Modellfamilie), dann sind aus den Prüfergebnissen auch Optimierungstrends zu ermitteln.



Generell sollen die Ergebnisse der Leistungsprüfung folgende Aussagen enthalten:

- Stationäre Kühlleistung
- Stationäre Heizleistung
- Dynamische (instationäre) Kühlleistung für einen „Referenztagesgang“ im eingeschwungenen Zustand.

Auswahl eines geeigneten Verfahrens

Die grundsätzliche Schwierigkeit der wärmetechnischen Berechnung des ebenen Bauteils mit einem integrierten Rohrregister ist durch deren Geometrie und die Randbedingungen gegeben. An der Rohraußenfläche herrscht näherungsweise eine konstante Temperatur und an den ebenen Rändern des Bauteils erfolgt ein Wärmeübergang durch Strahlung und Konvektion an die angrenzenden Räume. Im wärmetechnischen Sinne handelt es sich am Rohr um eine Randbedingung erster Art und

■ Ausschreibung

■ Vergabe

■ Abrechnung

Kostenlose Tel. 0 80 31 - 4 06 88 - 0

Testversion: Fax 0 80 31 - 4 06 88 - 11

www.orca-software.com · email: info@orca-software.com



an den Bauteilrändern um eine Randbedingung dritter Art. Die Wärmeleitung im Baukörper muss mindestens zweidimensional betrachtet werden, da der Rohrdurchmesser klein gegenüber der Bauteildicke ist. Dies ist aber nur zulässig, wenn die Registerrohre parallel verlaufen. Es gibt zwischenzeitlich jedoch auch Registerformen, die als sogenannte Kreuzmäander ausgebildet sind, wodurch zusätzliche Stahlgittermatten zur Formstabilisierung entfallen. Beide Varianten sind im Bild 3 dargestellt. Bei

Bild 3

Gegenüberstellung einer mäanderförmigen Rohrverlegung und einer kreuzweisen Verlegung mit doppeltem Rohrabstand

In diesen Fällen sind die Rohrlängen pro 1 m² gleich groß

kreuzweiser Verlegung ist die Wärmeleitung dreidimensional zu betrachten.

Unter den Voraussetzungen, dass die Rohrabstände im Register stets gleich groß sind und dass alle Rohre die gleiche Wassertemperatur aufweisen, vereinfachen Symmetriebedingungen die Berechnung wesentlich, da das Untersuchungsgebiet auf jeweils einen halben Rohrabstand minimiert werden kann. Die Annahme gleicher Wassertemperatur in den Rohren ist praxisnah durch Bilden der mittleren Wassertemperatur $t_{\text{Wasser}} = 0,5 (t_{\text{Vorlauf}} + t_{\text{Rücklauf}})$ realisierbar, da bei der thermischen Bauteilaktivierung ohnehin mit kleinen Spreizungen – in der Regel $\leq 4 \text{ K}$ – gearbeitet wird.

Einsetzbare Algorithmen

- Für die stationäre und instationäre dreidimensionale Untersuchung der Platte mit einem Rohrregister einfacher oder kreuzweiser Mäanderform eignen sich grundsätzlich die Finite-Elemente-Methode bzw. die Finite-Differenzen-Methode. Diese bekannten Verfahren werden auch von CEN/TC 228WG5 zur detaillierten Simulation vorgeschlagen.
- Näherungsverfahren, die mit Ersatzschaltungen von eindimensional wirkenden Wärmeleitwiderständen und Speicherschichten arbeiten – werden als sehr anwenderunfreundlich eingestuft.

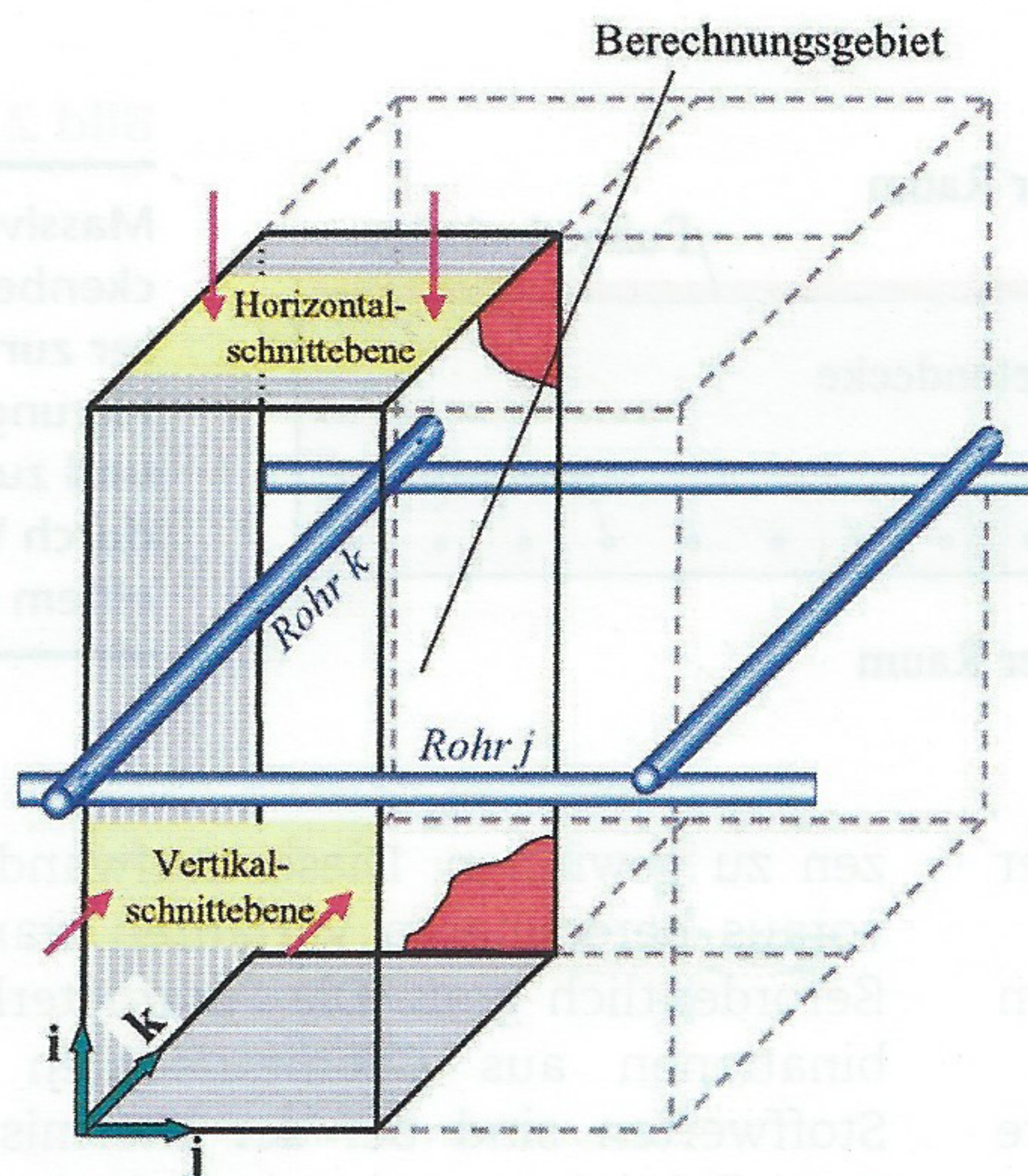


Bild 4

Ausschnitt aus der Massivdecke in der Größe eines Quaders mit dem Grundriss des Rohrquadrates eines kreuzförmigen Mäanders (Bei Einfachmäandern entfällt das Rohr j.) Das Berechnungsgebiet bezieht sich auf ein Viertel des ursprünglichen Quaders. Die Begrenzungsflächen sind angedeutet. Die eingezeichneten Schnittebenen gelten für Bild 5

Algorithmus möglich sind. Das numerische Verfahren ist programmtechnisch so einfach dargestellt, dass eventuell kommende, derzeit noch nicht erkennbare bautechnische Varianten leicht anpassbar sind. Deshalb finden ausgefeilte mathematische Methoden zur Reduzierung von Speicherplatz und zur Erhöhung der Rechengeschwindigkeit keine Beachtung. Eine selbsttätige Prüfung, die eine konvergente Lösungsentwicklung gewährleistet, ist jedoch vorgeschaltet. Alle Ableitungen der Berechnungsgleichungen sind offen gelegt.

□ Die stationären Verhältnisse werden ermittelt, indem man jeweils von definierten Startbedingungen ausgeht und für eine Untersuchungszeit von 72 h zeitlich konstante Randbedingungen ansetzt, so dass die Ergebnisse am Ende der Betrachtung quasistationären Zuständen entsprechen.

□ Die instationären Verhältnisse, d.h. die dynamischen Leistungen im Tagesgang, sind unter den Bedingungen der Änderungen

in der Rohrwand sowie der Wärmeübergangskoeffizient vom Wasser an das Rohr berechnen sich jedoch für das reale Rohr unter Beachten der Wassertemperatur und der Wassergeschwindigkeit. □ Die Bauteiloberflächen liegen jeweils auf einer Symmetrielinie zwischen zwei i-Gitterlinien (Bild 5). Dadurch wird die Genauigkeit bei Randbedingungen 3. Art (Wärmeübergangsbedingung) erhöht. Die Bauteildicke ist mindestens in 20 Gitterebenen zu gliedern.

□ Alle raumseitigen Wärmeübergangskoeffizienten werden für jeden Zeitschritt erneut berechnet. Beim Wärmestrom von unten nach oben gilt die sogenannte Basiskennlinie nach DIN EN 1264-2 mit der Temperaturdifferenz ϑ in K zwischen Bauteiloberfläche und Raum $\alpha = 8,92 |\vartheta|^{0,1}$ in $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$. Beim Wärmestrom von oben nach unten wird der Wärmeübergangskoeffizient konstant angesetzt: $\alpha = 6,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Für den horizontalen Wärmestrom – z. B. bei thermisch aktiven Wänden – gilt $\alpha = 5,1 + 1,6 |\vartheta|^{0,3}$ in $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$. In allen Fällen wird als unterer Grenzwert $\alpha = 6,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ verwendet.

□ Auf der Bauteilaußenseite kann ein Belag mit mehreren Schichten berücksichtigt werden. Bei einer Decke wäre dies der Fußbodenaufbau. Er nimmt am Wärmetransport zwischen den Rohren nicht teil, sondern stellt nur einen zusätzlichen Wärmeleitwiderstand zum Raum dar.

□ Der Zeitschritt ist von den Gitterteilungen ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$) abhängig. Er muss jedoch $\leq 60 \text{ s}$ sein.

□ Wenn das Rohr keinen Wasserdurchfluss aufweist, wird es näherungsweise mit dem „Speichermaterial gefüllt“. Der damit verbundene Fehler ist in der Regel $< 0,2 \%$.

Zusammenstellung der Prüfverfahren und Ergebnisse

Für jeden Prüfling erfolgen drei Leistungsbestimmungen unter definierten thermischen Randbedingungen (im Weiteren „Betriebsfälle“ genannt):

■ Ausschreibung ■ Vergabe ■ Abrechnung

Kostenlose Tel. 0 80 31 - 4 06 88 - 0
Testversion: Fax 0 80 31 - 4 06 88 - 11

www.orca-software.com · email: info@orca-software.com



Vor allem aber ist die Genauigkeit des Näherungsverfahrens nicht allgemein quantifizierbar.

□ Für die stationäre, zweidimensionale Untersuchung von Platten mit integriertem Rohrregister gibt es ein sehr gutes, analytisches Näherungsverfahren hoher Genauigkeit von Faxén [1]. Damit sind die Einfachmäander – nicht aber die Kreuzmäander – berechenbar.

Gewählte Simulationsmethode und Philosophie der Anwendung

Die Prüfvorschrift basiert auf der Finite-Differenzen-Methode. Die Ableitung erfolgt direkt von der Fourierschen Differentialgleichung in dreidimensionaler Form, so dass alle geforderten Untersuchungen für das Prüfverfahren mit dem gleichen, instationär arbeitenden

der Raumtemperaturen und des Rhythmus der Wasserbeaufschlagung zu ermitteln, indem man drei gleiche Tagesgänge hintereinander simuliert. Die letzten 24 h gelten als verbindliche Leistungsaussage.

□ Die Kühl- und Heizleistungen können für alle Rohrmäanderformen bestimmt werden.

Besonderheiten bei der Algorithmusgestaltung

□ Es wird stets ein Bauteilabschnitt von Rohrmitte bis zur Symmetrieachse zwischen zwei Rohren der gleichen Rohrregisterrichtung j bzw. k betrachtet (vgl. Bild 4).

□ Das Rohr wird mit rechteckigem Querschnitt – vorzugsweise als Quadrat – approximiert (Bild 5). Der Wärmetransport

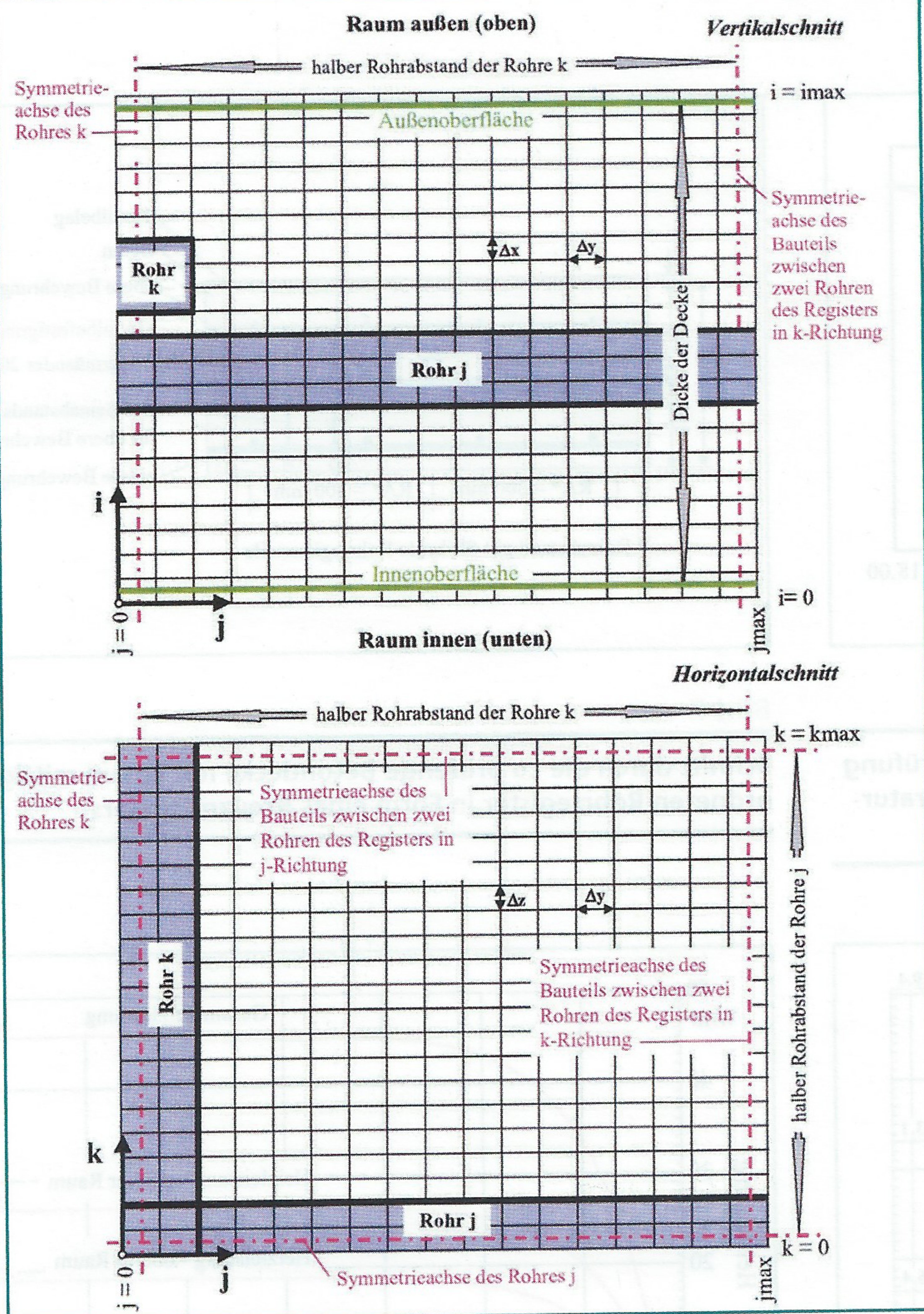


Bild 5

Gitter in zwei Schnittebenen gemäß Bild 4 für die dynamische, dreidimensionale Berechnung des Temperaturfeldes im Bauteil nach dem Differenzenverfahren mit Darstellung der verwendeten Approximationen für die Rohre und Bauteilbegrenzungen

Betriebsfall 1: Stationäre Kühlleistung mit Raumtemperatur 26 °C, Wassertemperatur 18 °C

Betriebsfall 2: Stationäre Heizleistung mit Raumtemperatur 20 °C, Wassertemperatur 28 °C

Betriebsfall 3: Dynamische (instationäre) Kühlleistung für einen Referenztagessgang nach Bild 6 im eingeschwungenen Zustand.

Der Simulationsbeginn erfolgt generell um 18⁰⁰ Uhr. Dies ist für den dynamischen Betriebsfall von Bedeutung.

Zur umfassenden Beurteilung des Prüflings werden die Simulationsergebnisse detailliert dargestellt. Je nach Bauteil „Decke“ oder „Wand“ unterscheidet sich der Text im Ausdruck.

Stündliche Werte für den Betriebszeitraum von 72 Stunden:

- Raumtemperatur
- Wassertemperatur
- mittlere untere Betontemperatur oder innere Wandtemperatur
- mittlere Fußbodentemperatur oder Temperatur eines äußeren Wandbelages
- Wärmestromdichte in den unteren Raum oder inneren Raum
- Wärmestromdichte in beide Räume
- Speicherwärme im Bauteil bezogen auf die aktuelle Raumtemperatur.

Endergebnisse nach 72 Betriebsstunden:

- Raumtemperatur
- mittlere untere Betontemperatur oder innere Wandtemperatur
- mittlere obere Betontemperatur oder äußere Wandtemperatur
- mittlere Fußbodentemperatur oder Temperatur eines äußeren Wandbelages
- Extremtemperaturen an der Deckenunterseite oder an der Wandinnenseite
- Wärmestromdichte in den unteren Raum oder inneren Raum
- Wärmestromdichte in den oberen Raum oder äußeren Raum
- Speicherwärme im Bauteil bezogen auf die aktuelle Raumtemperatur.

Mittlere Kühlleistungen für den dynamischen Lastgang (Betriebsfall 3) im eingeschwungenen Zustand (dritter Tag) für den Zeitraum von 8.00 bis 18.00 Uhr:

- Wärmestromdichte in den unteren Raum oder inneren Raum
- Wärmestromdichte in den oberen Raum oder äußeren Raum
- Wärmestromdichte in beide Räume.

Alle Ergebnisse werden als Drucklisten und als Grafik (Leistungen als Zeitfunktion) ausgegeben.

Zusätzliche Auswertungen:

Die stationären Kühl- und Heizleistungen werden für eine konstante Raumtemperatur und eine zu Beginn der Simulation sprunghaft veränderte, dann aber ebenfalls konstante Was-

		Unterseite der Decke	Oberseite der Decke	Gesamtleistung
Betriebsfall 1 (Grafik ⇒ Bild 8)				
Stationärer Kühlfall		–33,1 W/m ²	–16,4 W/m ²	–49,4 W/m ²
Raumtemperatur:	26 °C			
mittlere Wassertemperatur:	18 °C			
Betriebsfall 2 (Grafik ⇒ Bild 9)				
Stationärer Heizfall		26,8 W/m ²	19,0 W/m ²	45,8 W/m ²
Raumtemperatur:	20 °C			
mittlere Wassertemperatur:	28 °C			
Betriebsfall 3 (mittlere Leistungen im Hauptnutzbereich von 8 ⁰⁰ Uhr bis 18 ⁰⁰ Uhr) (Grafik ⇒ Bilder 10 und 11)				
Dynamischer Kühlfall		–25,7 W/m ²	–12,2 W/m ²	–37,9 W/m ²
Raumtemperatur:	Bild 6			
mittlere Wassertemperatur:				

Tabelle 1

Zusammenstellung der Hauptergebnisse der untersuchten Normbetriebsfälle

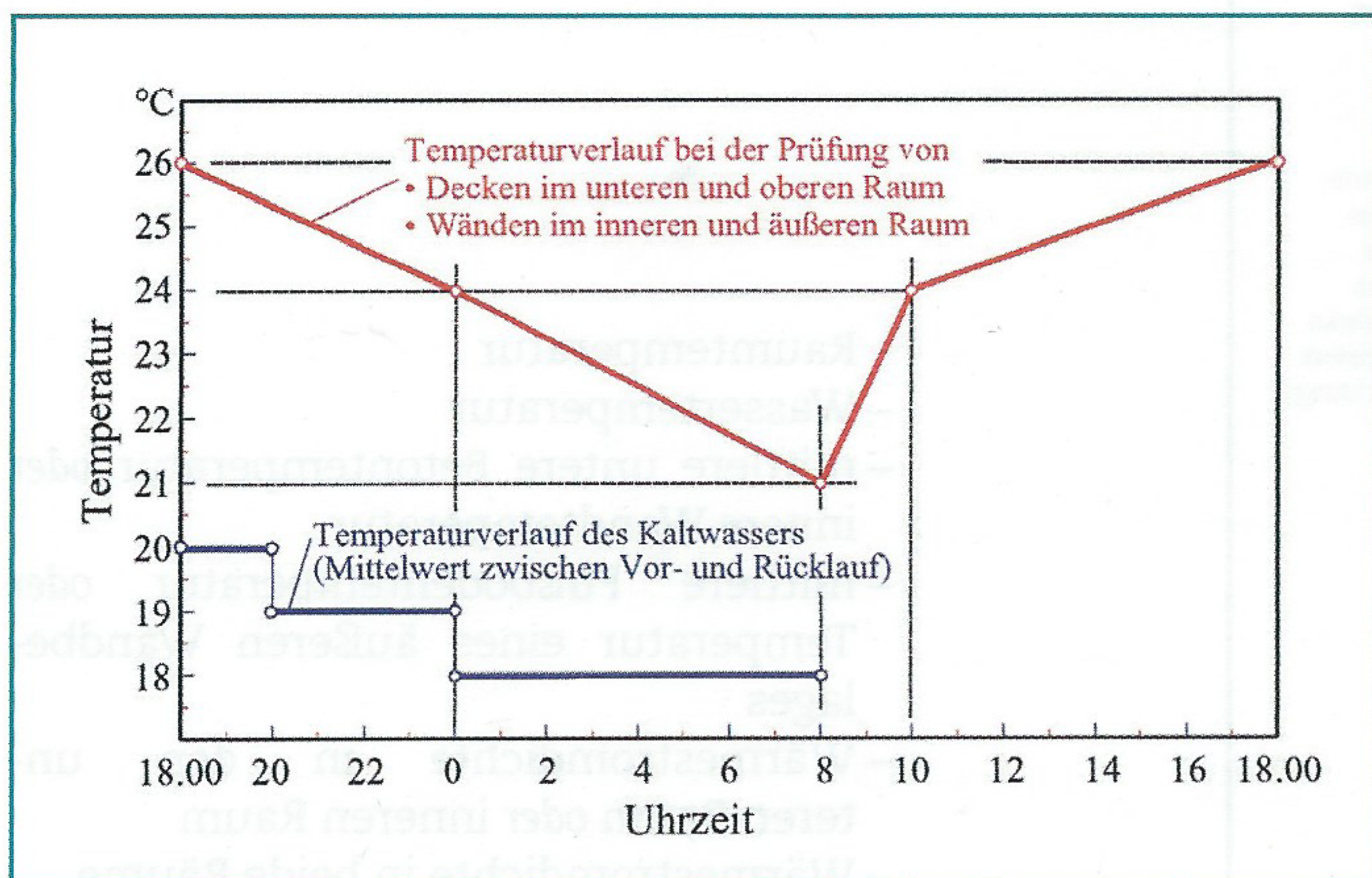


Bild 6

Referenztemperaturverläufe für die dynamische Leistungsprüfung
Zwischen den eingetragenen Punkten gelten lineare Temperaturverläufe

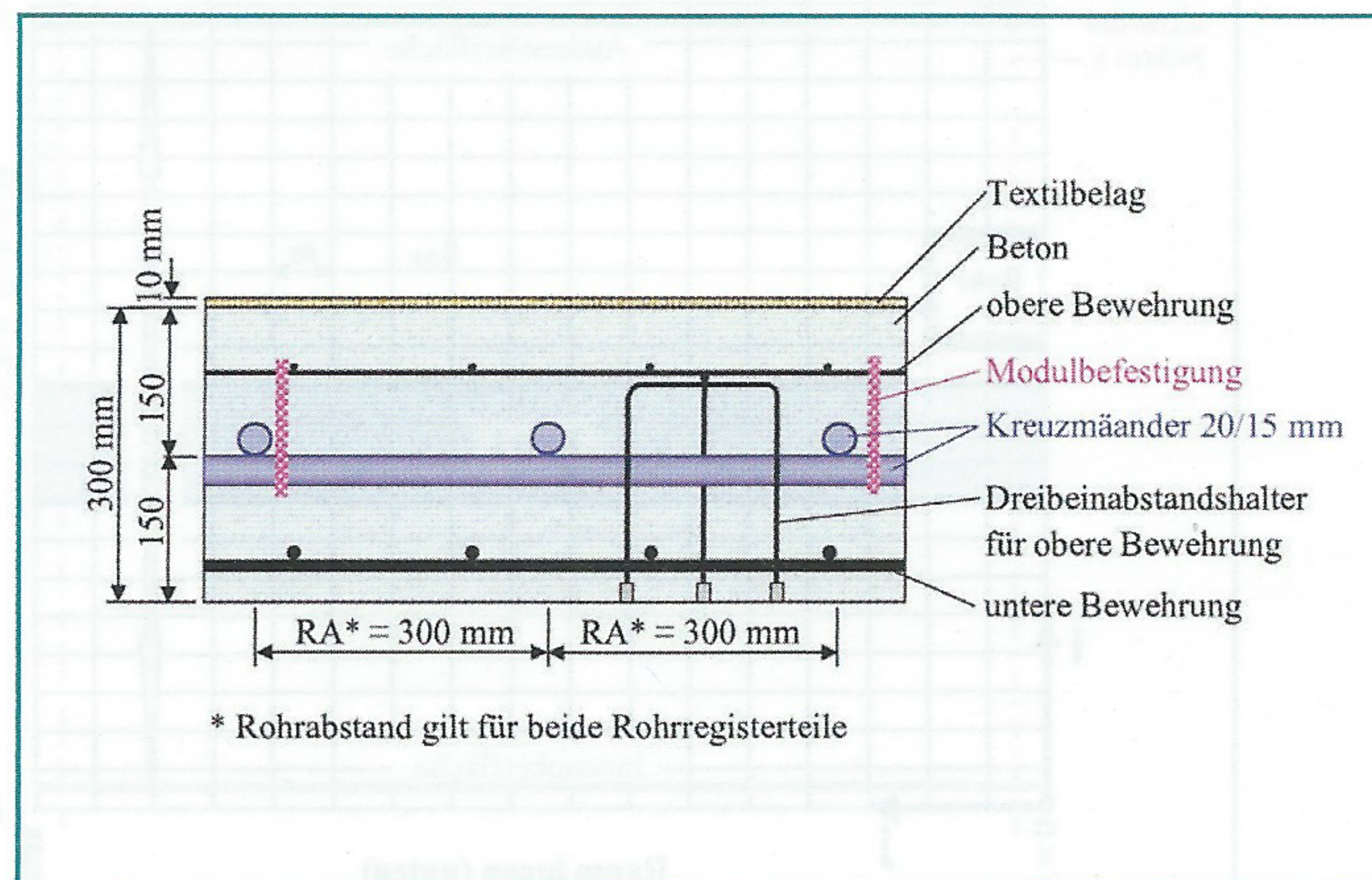


Bild 7

Schnitt durch die zu prüfende Betondecke mit einem mittig angeordneten Rohrregister in Form eines Kreuzmäanders

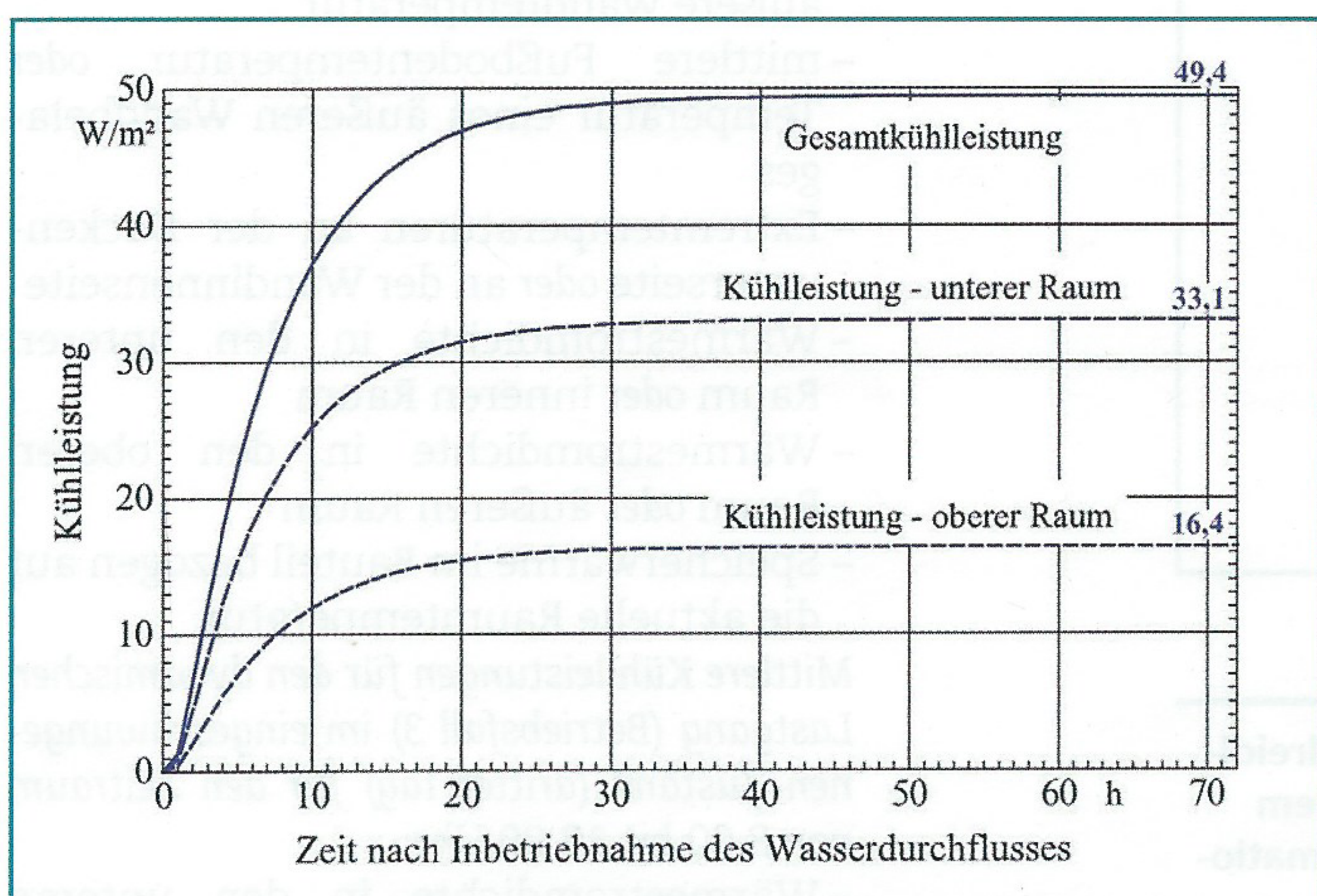


Bild 8

Zeitabhängiger Leistungsverlauf (Sprungantwort) nach dem Einschalten des Kaltwasserstromes zu Beginn der Simulation des stationären Kühlfalls (Betriebsfall 1)

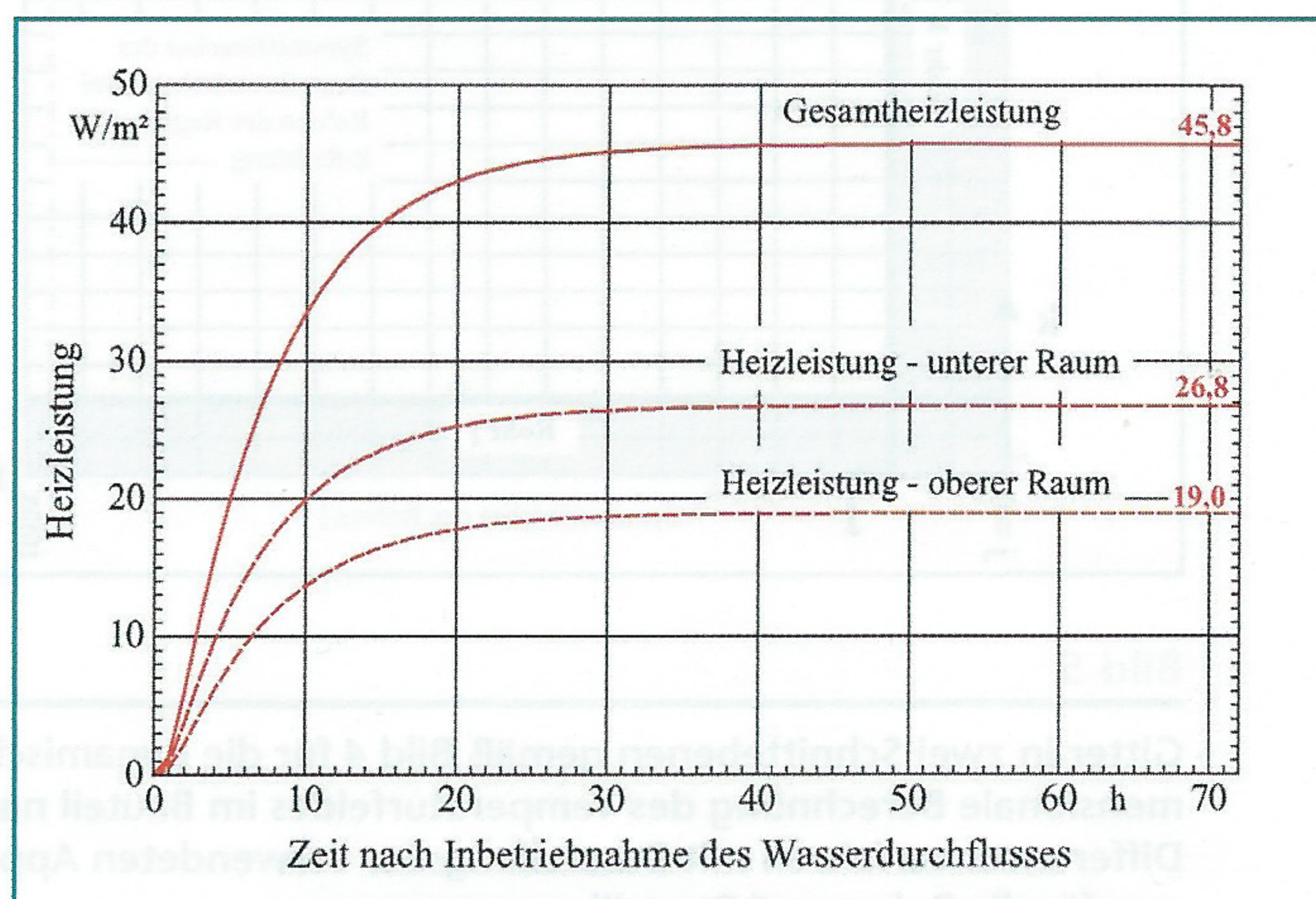


Bild 9

Zeitabhängiger Leistungsverlauf (Sprungantwort) nach dem Einschalten des Warmwasserstromes zu Beginn der Simulation des stationären Heizfalls (Betriebsfall 2)

sertemperatur bestimmt. Die Erfassung des zeitabhängigen Leistungsverlaufs (Sprungantwort) gestattet es, Aussagen zum thermischen Trägheitsverhalten des Bauteils zu treffen. Das für die Auslegung der Steuerung bzw. Regelung wichtige Übertragungsverhalten kann beispielsweise als

- Proportionalglied mit Verzögerung erster Ordnung (PT₁-Glieder) in Kombination mit einem
- Totzeit-Glied (T_t-Glieder)

in praxisnaher Weise dargestellt werden. Die Gleichung der Übergangsfunktionen lautet dann mit den aus der Sprungantwort ermittelten Zeitkonstanten T_t und T₁ für die Laufzeit $\tau > T_t$:

$$\dot{q}(\tau) = \dot{q}_{\max} \left(1 - e^{-\frac{\tau - T_t}{T_1}} \right) \quad (*)$$

Beispiel einer Prüfung mit Darstellung der Hauptergebnisse

Aus einem speziellen Systemrohr werden Rohrregister in Form eines Kreuzmäanders vorgefertigt. Die Rohrregister werden mittig in Ortbetondecken eingegossen (Bild 7). Vom Systemhersteller werden im Prüfungsantrag folgende Kenndaten genannt:

Rohr: Wärmeleitfähigkeit 0,42 W/(m K);
Wassergeschwindigkeit 0,35 m/s;
gerade Rohrlänge 3,3 m

Beton: Dichte 2 400 kg/m³; Wärmeleitfähigkeit 1,63 W/(m K); spezifische Wärmekapazität 1 050 J/(kg K)

Bodenbelag: Wärmeleitfähigkeit 0,07 W/(m K).

Die Zusammenfassung der Wärmeleistungen der thermisch aktiven Decke

ist aus Tabelle 1 zu entnehmen. Die Leistungsverläufe über die Simulationszeit von 72 h sind aus den Bildern 8 bis 11 ersichtlich. Die weiteren Simulationsergebnisse werden nur auszugsweise wiedergegeben.

Betriebsfall 1: Stationäre Kühlleistung nach 72 Betriebsstunden

Raumtemperatur	26,0 °C
Wassertemperatur	18,0 °C
mittlere untere Betontemperatur	22,7 °C
mittlere obere Betontemperatur	21,2 °C
mittlere Fussbodentemperatur	23,6 °C
Extremtemperaturen an der Deckenunterseite	22,6 °C/ 22,8 °C
Wärmestromdichte in den unteren Raum	-33,1 W/m²
Wärmestromdichte in den oberen Raum	-16,4 W/m²

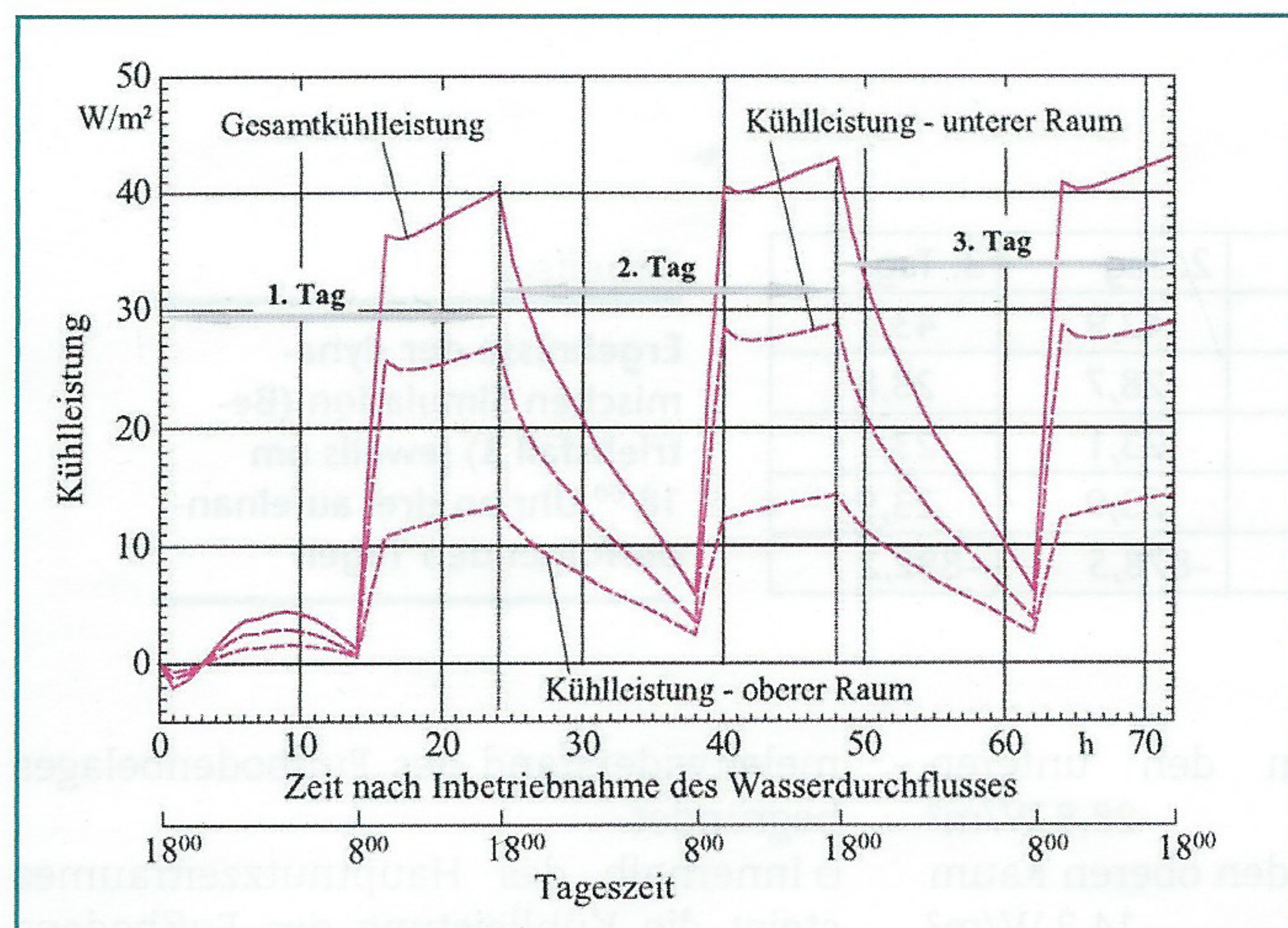


Bild 10

Kühlleistungsverläufe nach dem Start des Wasserdurchflusses gemäß Bild 6 bei einer homogenen Deckentemperatur zu Beginn von 26 °C

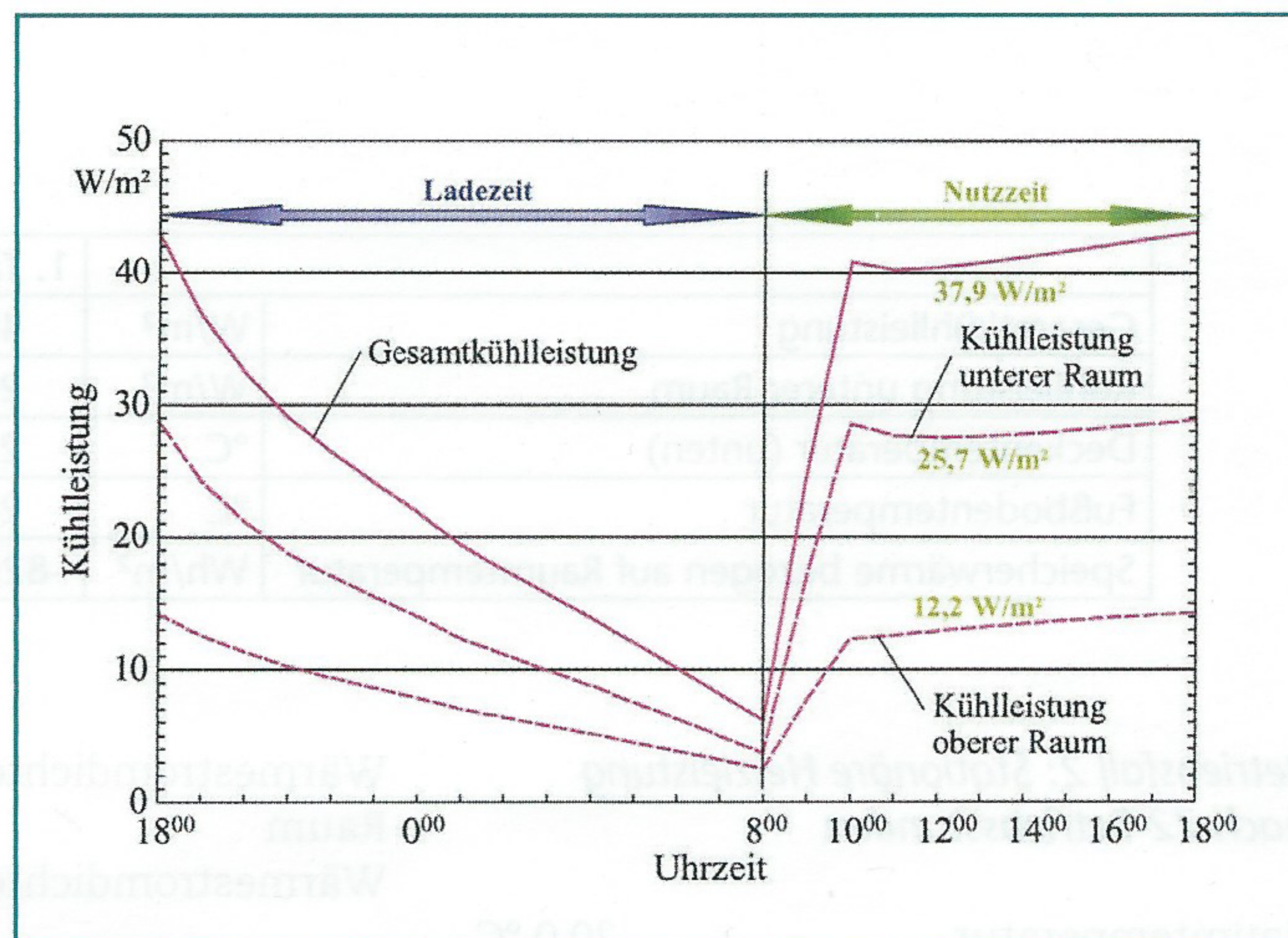


Bild 11

Referenztagessgang der Kühlleistungen der Decke (dritter Tag) unter den thermischen Randbedingungen des Bildes 6 mit eingetragenen Mittelwerten während der Nutzzeit

Speicherwärme im Bauteil bezogen auf t_{Raum} -1084,2 Wh/m²
 Rohrwärmestrom j -7,7 W/m
 Rohrtemperatur j 18,9 °C
 Rohrwärmestrom k -7,2 W/m
 Rohrtemperatur k 18,9 °C

Die Zeitkonstanten T_t und T_1 berechnen sich aus dem Leistungsverlauf (Sprungantwort) gemäß Bild 8. Zur Erklärung ist die Ableitung der Zeitkonstanten in einem speziellen Ausschnitt des Leistungsverlaufs (**Bild 12**) dargestellt. Es gelten: $T_t = 1,5$ h und $T_1 = 5,75$ h. Die Übergangsfunktionen nach Gl. (*) für die Kühlleistung zum unteren Raum lautet dann mit der Laufzeit τ in h $> T_t$:

$$\dot{q}(\tau) = 33,1 \left(1 - e^{-\frac{\tau - 1,5}{5,75}} \right) \text{ W/m}^2 \quad (**).$$

Die Übergangsfunktion nach Gl. (**) ist der Originalfunktion im Bild 12 gegenübergestellt.

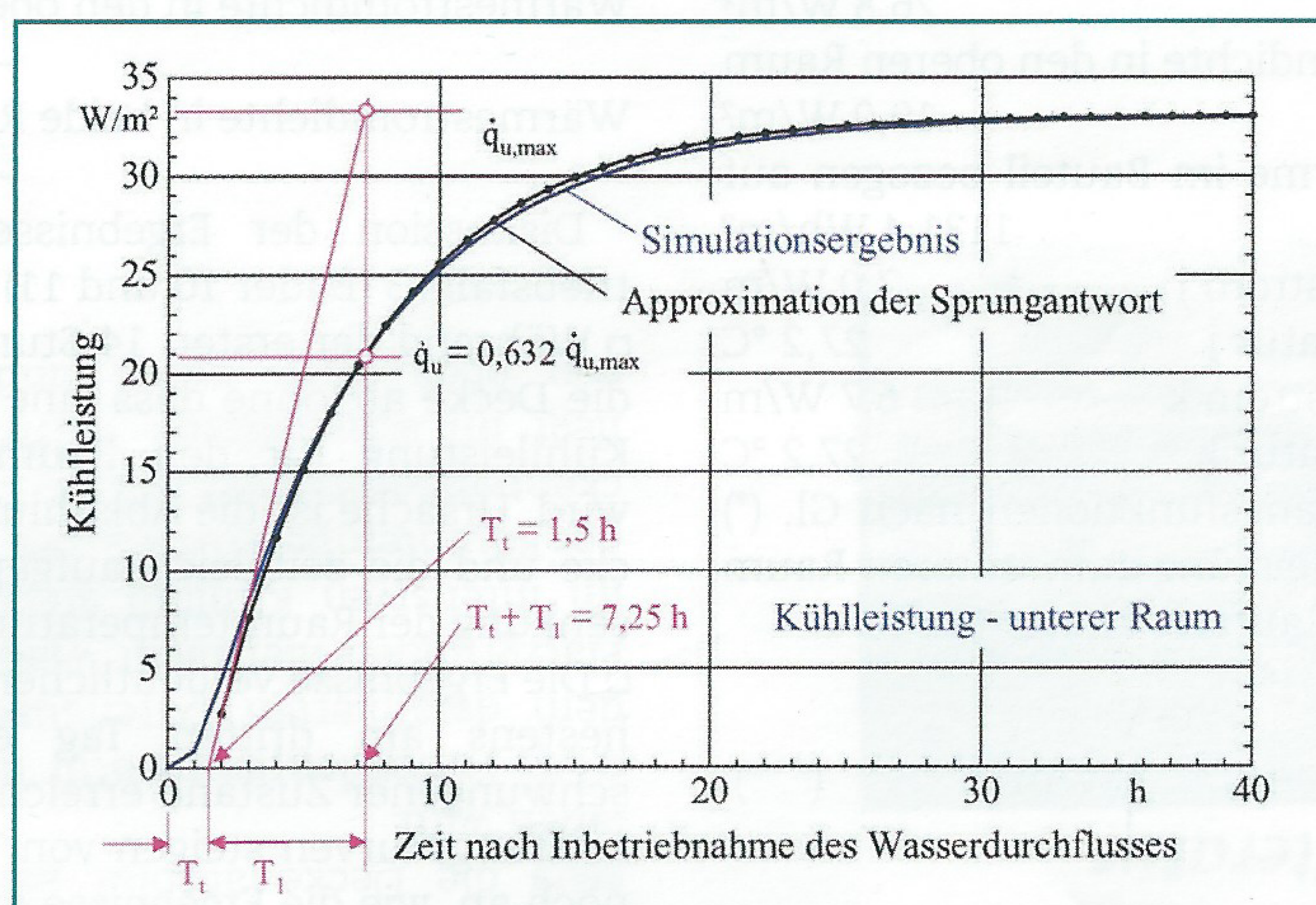


Bild 12

Detaildarstellung aus Bild 8 zur Ableitung der Zeitkonstanten T_t und T_1 . Das Ergebnis der approximierten Übergangsfunktion nach Gl. (**) ist eingetragen

		1. Tag	2. Tag	3. Tag
Gesamtkühlleistung	W/m ²	40,1	42,9	43,1
Kühlleistung unterer Raum	W/m ²	26,9	28,7	28,8
Deckentemperatur (unten)	°C	23,3	23,1	23,1
Fußbodentemperatur	°C	24,0	23,9	23,9
Speicherwärme bezogen auf Raumtemperatur	Wh/m ²	-822,9	-878,5	-882,2

Tabelle 2

Ergebnisse der dynamischen Simulation (Betriebsfall 3) jeweils um 18⁰⁰ Uhr an drei aufeinanderfolgenden Tagen

Betriebsfall 2: Stationäre Heizleistung nach 72 Betriebsstunden

Raumtemperatur	20,0 °C
Wassertemperatur	28,0 °C
mittlere untere Betontemperatur	24,0 °C
mittlere obere Betontemperatur	24,7 °C
mittlere Fußbodentemperatur	22,0 °C
Extremtemperaturen an der Deckenunterseite	24,1 °C/ 23,9 °C
Wärmestromdichte in den unteren Raum	26,8 W/m ²
Wärmestromdichte in den oberen Raum	19,0 W/m ²
Speicherwärme im Bauteil bezogen auf t _{Raum}	1131,4 Wh/m ²
Rohrwärmestrom j	7,0 W/m
Rohrtemperatur j	27,2 °C
Rohrwärmestrom k	6,7 W/m
Rohrtemperatur k	27,2 °C

Als Übergangsfunktionen nach Gl. (*) für die Heizleistung zum unteren Raum gilt mit der Laufzeit τ in $h > T_t$:

$$\dot{q}(\tau) = 26,8 \left(1 - e^{-\frac{\tau-1,5}{6,0}} \right) \text{ W/m}^2 \quad (***)$$

Die Übergangsfunktion stimmt wiederum sehr gut mit der Originalfunktion überein.

Betriebsfall 3: Dynamische (instationäre) Kühlleistung für den Referenztagesgang

Ergebnisse nach 72 Betriebsstunden:

Raumtemperatur	26,0 °C
mittlere untere Betontemperatur	23,1 °C
mittlere obere Betontemperatur	21,8 °C
mittlere Fußbodentemperatur	23,9 °C
Extremtemperaturen an der Deckenunterseite	23,1 °C/ 23,1 °C

Wärmestromdichte in den unteren Raum -28,8 W/m²

Wärmestromdichte in den oberen Raum -14,2 W/m²

Speicherwärme im Bauteil bezogen auf t_{Raum} -882,2 Wh/m²

Mittlere Kühlleistungen im eingeschw. Zustand von 8.00 bis 18.00 Uhr:

Wärmestromdichte in den unteren Raum -25,7 W/m²

Wärmestromdichte in den oberen Raum -12,2 W/m²

Wärmestromdichte in beide Räume -37,9 W/m²

Diskussion der Ergebnisse des Betriebsfalls 3 (Bilder 10 und 11):

□ Während der ersten 14 Stunden kühlt die Decke ab, ohne dass eine merkliche Kühlleistung für den Raum wirksam wird. Ursache ist die Abkühlung der Decke und die zeitgleich aufgeprägte Absenkung der Raumtemperatur.

□ Die Ergebnisse verdeutlichen, dass frühestens am dritten Tag ein eingeschwungener Zustand erreicht wird. Die Leistungskurven steigen von Tag zu Tag noch an, wie die Ergebnisse an drei aufeinanderfolgenden Tagen jeweils um 18⁰⁰ Uhr bei der Raumtemperatur von 26 °C zeigen (Tabelle 2).

□ Als Referenztagesgang gelten die Ergebnisse am dritten Simulationstag (Bild 11).

□ Mit dem Anstieg der Raumtemperatur ab 8⁰⁰ Uhr (vgl. Bild 6) wird die Kühlung der Räume wirkungsvoll. Die Kühlleistung steigt bis 10⁰⁰ Uhr besonders stark an, da die Raumtemperaturänderung in dieser Zeit ihren höchsten Gradienten besitzt. Bis 18⁰⁰ Uhr erfolgt ein weiterer Anstieg der Kühlleistung. Er ist jedoch flacher als vorher, da einerseits zwar die Raumtemperatur wächst aber andererseits die Decke absolut gesehen entladen wird.

□ Die Fußbodentemperatur liegt gemäß dem detaillierten Datenausdruck (aus Platzgründen hier nicht wiedergegeben) im intensiven Kühlfall stets näher an der Raumtemperatur als dies bei der Deckentemperatur der Fall ist. Die Ursache liegt im schlechteren Wärmeübergang von oben nach unten und im Wärmeleitwiderstand des Fußbodenbelages begründet.

meleitwiderstand des Fußbodenbelages begründet.

□ Innerhalb des Hauptnutzzeitraumes steigt die Kühlleistung des Fußbodens stetig noch an während die Kühlleistung der Deckenunterseite in erster Näherung konstant bleibt. Dieses Verhalten liegt am hohen Wärmeleit- und -übergangswiderstand an der Oberseite, wodurch sich die Entladung im oberen Betonbereich langsamer vollzieht.

Ergänzende Sonderleistungen

Mit dem Simulationsprogramm können auf besonderen Wunsch des Auftraggebers noch folgende Dienstleistungen erbracht werden:

□ Ausdrucke des Temperaturfeldes im Prüfling zu beliebigen Zeitpunkten innerhalb des Simulationszeitraumes von 72 Betriebsstunden

□ Berechnung von stationären Kühl- bzw. Heizleistungen für Raum- und/oder Wassertemperaturen, die von den geprüften Werten abweichen.

Damit sind dann beispielsweise unter- bzw. übertemperaturabhängige Leistungskurven darstellbar.

□ Berechnung der dynamischen Kühlleistung für vom Bild 6 abweichende Temperaturregime.

Einzureichende Unterlagen und Prüfbericht

Die Details über die Antragstellung einer Prüfung, die einzureichenden Unterlagen und die Form des Prüfberichtes sind in den „Allgemeinen Güte- und Prüfbestimmungen für Systeme der Thermischen Bauteilaktivierung (Betonkernaktivierung) – RAL – GZ 964“ genannt. Zur Bereitstellung der erforderlichen Daten für die Leistungsprüfung werden zusätzliche Hinweise zu den Stoffdaten des Betons, der Rohrmaterialien und der Systemparameter gegeben.

Ansprechpartner ist: Gütegemeinschaft Flächenheizungen und Flächenkühlungen e.V., Hochstraße 113, D-58095 Hagen; Tel.: (02331) 20 08 50; Fax: (02331) 20 08 17; www.ggf-ral.de; info@flaechenheizung.de.

Literatur

[1] Glück, B.: Strahlungsheizung – Theorie und Praxis. Berlin: Verlag für Bauwesen und Karlsruhe: C. F. Müller-Verlag 1981 (beinhaltet die aufbereitete Lösung von Faxén: Beräkning av värmeavgivning från rör, ingjutna i betongplattor. Teknisk Tidskrift Mekanik 1937, Heft 3).