

Kühlleistung von Massivspeicherdecken

Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Betons und der Bewehrung

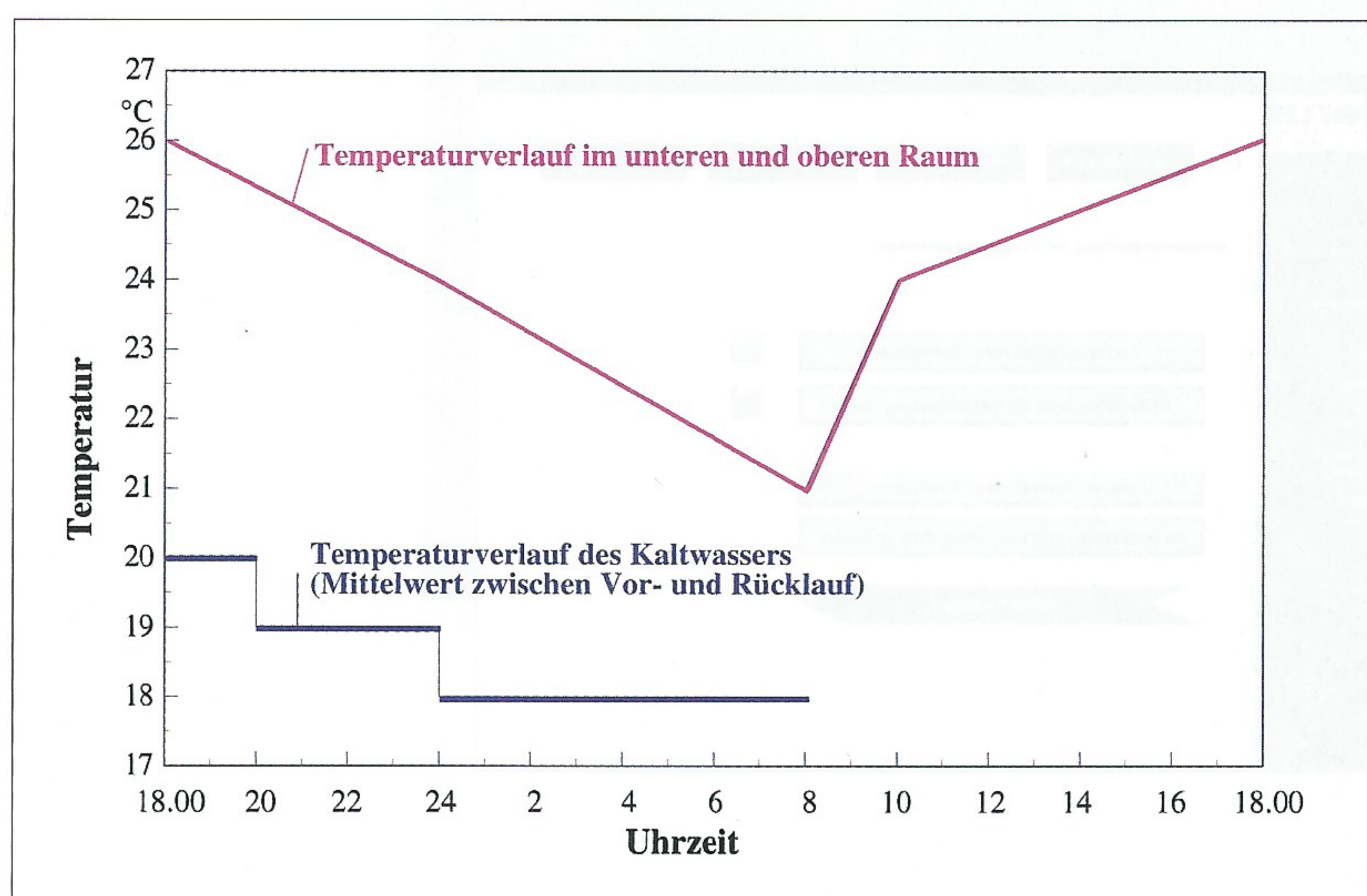
Bernd Glück, Jößnitz

Für die thermische Bauteilaktivierung mittels Massivdecken gibt es keine Normleistungsbestimmung. Bei der Diskussion um die Leistungsfähigkeit, die sehr stark von der Geometrie der integrierten Rohrregister abhängt, spielen sehr häufig auch die Wärmeleitfähigkeit des Betons und die Wirkung der Bewehrung in den Decken eine Rolle. Auch wenn man diese Diskussionen oftmals nur unter den Gesichtspunkten von Wettbewerbsvorteilen führt, sollen anschließend die genannten Einflüsse quantitativ bewertet werden.

Autor



Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück, Jahrgang 1942, war an der TU Dresden, in der Anlagenplanung, im Industrieminstitut TGA und im Zentralbereich Ingenieurtechnik bei ROM in leitender Funktion auf dem Gebiet der Heizungs- und Lüftungstechnik tätig. Jetzt betreibt er ein Forschungs- und Entwicklungsbüro für Technische Gebäudeausrüstung. Gleichzeitig ist er als Honorarprofessor an der Westsächsischen Hochschule Zwickau (FH) tätig. Er ist bisher mit über 170 Buch- und Zeitschriftenveröffentlichungen hervorgetreten.



Für die inzwischen weit verbreitete thermische Bauteilaktivierung, die vorwiegend als Massivdecke mit integriertem Rohrregister realisiert wird, gibt es nach wie vor keine „Normleistungsprüfung“.

Ausgangssituation

Will man beispielsweise den realen Kühlleistungsverlauf über den Tag bestimmen, dann ist dies von außerordentlich vielen Einflussparametern abhängig. Die exakte Bestimmung ist sehr aufwändig, sie gilt nur für den betrachteten Raum bzw. Zone und ist nicht ohne weiteres übertragbar auf andere Räume.

In [1] wurde deshalb bereits sehr frühzeitig nach Einführen der neuen Technik ein „Standard bezüglich der Randbedingungen“ vorgeschlagen, der die Leistungsfähigkeit der Speicherbauteile vergleichbar macht. Determiniert wurden die Temperaturverläufe der angrenzenden Räume und des Kühlwassers sowie die Durchflusszeiten des Wassers. Die Verläufe sind im **Bild 1** dargestellt. Die Raumtemperaturen entsprechen dabei typischen und akzeptablen Temperaturverläufen für Büros, und die Kühlwas-

Bild 1

Annahme des Raumtemperatur- und des mittleren Wassertemperaturverlaufes als Grundlage für vergleichende Kühlleistungsberechnungen von Massivspeicherbauteilen

sertemperaturen sind den Außentemperaturen angepasst gewählt.

Es gibt genügend Berechnungsverfahren (z.B. in [1] dargestellt), die eine Simulation des thermodynamischen Verhaltens der Decke unter den gegebenen Randbedingungen ermöglichen.

Subjektiv beeinflusst ist aber die Wahl der Stoffwerte:

- Die Wärmeleitfähigkeit des Betons ist von mehreren Einflüssen abhängig. Global betrachtet steigt die Wärmeleitfähigkeit mit der Dichte des Betons, wobei im Detail hauptsächlich die Art der Zuschlagstoffe verantwortlich zeichnet.
- Der Stahlbeton ist nicht homogen, da die Bewehrungsstäbe nach statischen Gesichtspunkten im Zugbereich angeordnet werden, d.h., im Regelfall von

seitlich aufliegenden Decken ist dies der untere Bereich.

Häufig gestellte Fragen zur Leistungssteigerung von Massivdeckenspeichern nehmen deshalb auch auf die Wärmeleitfähigkeit des Betons und auf die Beeinflussung durch die Bewehrung Bezug. Teilweise entsteht auch der Verdacht, dass man in diesen Parametern einen Manipulationsspielraum sieht, den man „unkontrolliert“ nutzen kann.

Es werden deshalb nachfolgend – anhand genau definierter Modelle – die Einflüsse objektiv dargestellt.

Modellierung des Massivdeckenspeichers

In allen weiteren Modellierungen wird von einer Betondecke ohne Hohlräume und Latentspeichereffekte mit integriertem Rohrregister ausgegangen. Das Rohrregister kann dabei aus einem

- Einfachmäander mit konventionellen Rohrdurchmessern
- Kreuzmäander mit konventionellen Rohrdurchmessern
- Kapillarrohrmattensystem bestehen.

Für die konventionellen Rohre werden in den Berechnungen die Abmessung 20 x 2,5 mm, für die Wärmeleitfähigkeit des Rohres 0,42 W/(m K) und für den wasserseitigen Wärmeübergangskoeffizienten 2 400 W/(m²K) angenommen. Die Rohrabstände betragen 150 mm bzw. 300 mm.

Für Kunststoff-Kapillarrohrmatten bildet ein dickwandiges System („Betonmatte“ der Fa. Clina, Berlin) die Grundlage der Betrachtung. Es gelten hierfür: Abmessung der Rohre 4,3 x 0,8 mm, Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials 0,21 W/(m K), wasserseitiger Wärmeübergangskoeffizient 1 000 W/(m²K), Rohrabstände 30 mm.

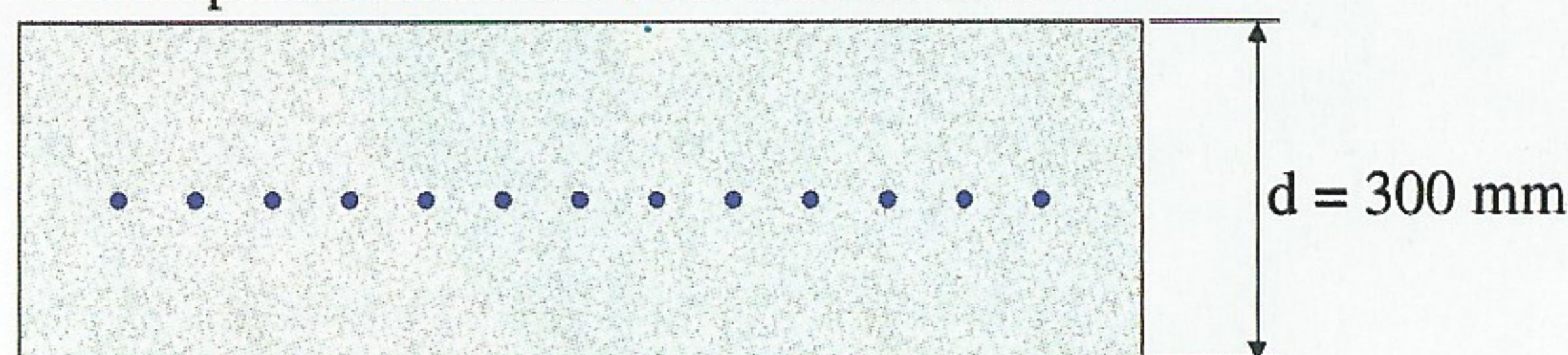
Damit sind die Annahmen für die konventionellen Rohrsysteme – z.B. bezüglich des Rohrdurchmessers – etwas positiver in Ansatz gebracht, als bei zahlreichen Konstruktionen üblich.

Der erste Modellierungsansatz geht von einer homogenen Betondecke aus, wobei die Wärmeleitfähigkeit des Betons variiert wird.

Die zweite Modellierung berücksichtigt einen Schichtenaufbau der Decke, wobei die Betondecke über den größten, rohrführenden Querschnittsanteil aus homogenem Beton besteht und der untere Deckenabschnitt mit der Hauptbewehrung in den Stoffwerten verändert in Ansatz gebracht wird. Die Dichte, die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität werden aus den Daten

Homogene Betonschicht

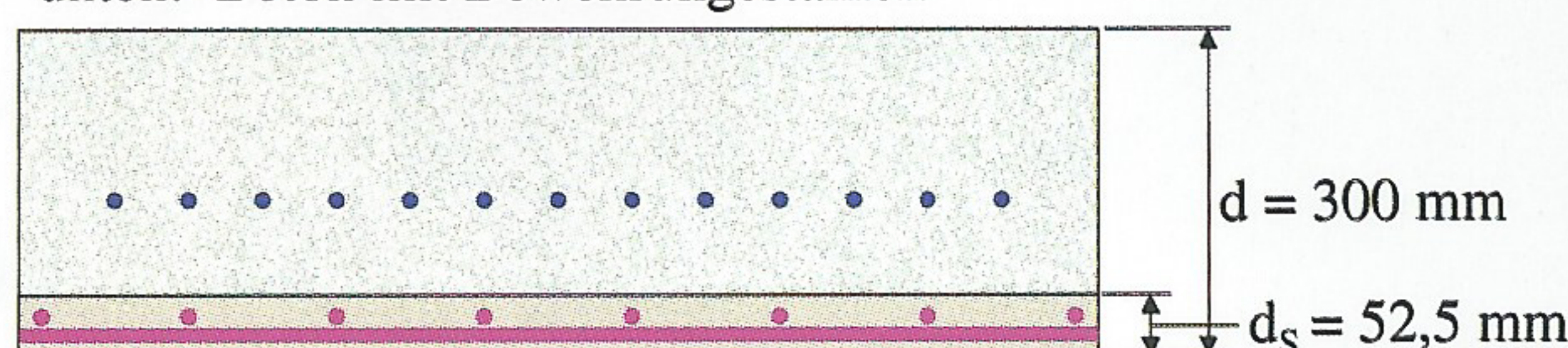
mit Kapillarrohrmatten oder Rohrmäandern



Zweilagige Betonschicht

oben: Beton mit Kapillarrohrmatten oder Rohrmäandern

unten: Beton mit Bewehrungsstäben



für den reinen Beton und der Stahlbewehrung gemittelt und dann wiederum als homogen betrachtet. Diese Modellierung ist insofern realistisch, da die genaue Modellierung des Bewehrungskorbes theoretisch zwar möglich ist, aber kaum eine Verallgemeinerung der Aussage zulässt. Das zweite Modell ist damit durch eine gut wärmeleitende Schicht an der Deckenunterseite gekennzeichnet.

Die Modelle sind im **Bild 2** skizziert und deren Dickenabmessungen angegeben.

Die Angaben der Stoffwerte speziell der Wärmeleitfähigkeit für Beton bzw. Stahlbeton schwanken. Sie sind in besonderem Maße abhängig von der Dichte und dem Feuchtegehalt. Die Werte in

Bild 2

Skizzenhafte Darstellung der beiden Berechnungsmodelle

DIN 4108 Teil 4 gelten für den rechnerischen Nachweis des Wärmeschutzes. Aus Sicht einer „sicheren“ Berechnung wird man maximal mögliche Wärmeleitfähigkeiten ansetzen. Dies ist aber nicht im Sinne einer „sicheren“ Kühlleistungsermittlung für dynamisch arbeitende Speicherdecken. Dort bieten niedrige Wärmeleitfähigkeiten die Voraussetzung für eine sichere Leistungsprognose. Es werden deshalb in **Tabelle 1** einige Literaturwerte gegenübergestellt. Für die Stoffwerte des Normalbetons werden aus Tabelle 1 abgeleitet folgende Werte verwendet:

- Dichte $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$
- Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ (ungünstigster Wert)
- spezifische Wärmekapazität $c = 1050 \text{ J/(kg K)}$.

Zur Ermittlung des möglichen Einflusses der Wärmeleitfähigkeit auf das dy-

Tabelle 1

Stoffwerte für Schwerbeton nach einigen Literaturangaben

Baustoff	Dichte kg/m³	Wärmeleitfähigkeit W/(m K)	spez. Wärmekapazität J/(kg K)	Quelle Bemerkungen
Kies- oder Splittbeton bewehrt oder unbewehrt	2 400	2,1		DIN 4108/4
Kiesbeton	2 200	1,28	879	Gröber, Erk, Grigull: Wärmeübertragung, 3. Auflage
Beton	1 900 ... 2 300	0,80 ... 1,40	880	Rietschel, Esdorn: Raumklimatechnik, Grundlagen, 16. Auflage
Schwerbeton	2 200 ... 2 500	1,28 ... 1,65	1 000	Kraft: TGA-Handbuch 2. Auflage
Schwerbeton (Ortbeton) bewehrt	2 400	1,63	1 050	TGL 28706/4 (ungültig, aber sehr detaillierte Angaben)
unbewehrt	2 200	1,40	1 050	
Betonfertigteile aus Schwerbeton	2 350	1,47	1 050	

namische Deckenverhalten wird für die homogene Betonplatte λ zwischen den Grenzwerten 1,4 W/(m K) und 2,1 W/(m K) variiert.

Bei der zweischichtigen Platte gelte für den oberen Teil:

- Dichte $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$
- Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 1,4 \text{ W/(m K)}$
- spezifische Wärmekapazität $c = 1050 \text{ J/(kg K)}$

Für den unteren Teil der Betondecke werden die Stoffwerte aus den Baustoffen Beton und Stahl gemittelt, wobei für die Schichtdicken die Annahmen nach Bild 2 gelten. Als Bewehrung sind modellgemäß jeweils im Abstand a von 150 mm Zugstäbe mit einem Durchmesser von 18 mm und Querstäbe mit dem Durchmesser 8 mm vorhanden. Damit ergeben sich:

die Raumanteile

$$r_{\text{Stahl}} = \frac{V_{\text{Stahl}}}{V_{\text{Schicht}}} = \frac{\frac{1}{a} \frac{\pi}{4} (d_{\text{Zug}}^2 + d_{\text{Quer}}^2)}{d_{\text{S}}} = \frac{\frac{1}{0,150} \frac{\pi}{4} (0,018^2 + 0,008^2)}{0,0525} = 0,039 \quad (1)$$

$$r_{\text{Beton}} = 0,961$$

die mittlere Dichte

$$\rho = r_{\text{Stahl}} \rho_{\text{Stahl}} + r_{\text{Beton}} \rho_{\text{Beton}} = (0,039 \cdot 7850 + 0,961 \cdot 2400) \text{ kg/m}^3 = 2613 \text{ kg/m}^3$$

die mittlere Wärmeleitfähigkeit

$$\lambda = r_{\text{Stahl}} \lambda_{\text{Stahl}} + r_{\text{Beton}} \lambda_{\text{Beton}} = (0,039 \cdot 50 + 0,961 \cdot 1,4) \text{ W/(m K)} = 3,3 \text{ W/(m K)}$$

die mittlere spezifische Wärmekapazität

$$c = \frac{(r_{\text{Stahl}} \rho_{\text{Stahl}} c_{\text{Stahl}} + r_{\text{Beton}} \rho_{\text{Beton}} c_{\text{Beton}})}{\rho} = \frac{0,039 \cdot 7850 \cdot 460 + 0,961 \cdot 2400 \cdot 1050}{2613} \text{ J/(kg K)} = 981 \text{ J/(kg K)} \quad (2)$$

Variante	Wärmeleitfähigkeit				Leistungszuwachs	
	$\lambda = 1,4 \text{ W/(m K)}$		$\lambda = 2,1 \text{ W/(m K)}$		$\dot{q}_{\lambda=2,1}/\dot{q}_{\lambda=1,4}$	
	Leistung 14 ⁰⁰ Uhr W/m ²	mittlere Leistung W/m ²	Leistung 14 ⁰⁰ Uhr W/m ²	mittlere Leistung W/m ²	%	%
Einfachmäander RA = 150 mm	41,0	39,6	45,9	44,5	12,0 ... 12,4	12,2
Einfachmäander RA = 300 mm	32,2	30,5	36,8	35,0	14,3 ... 14,8	14,6
Kreuzmäander RA = 300 mm	39,8	38,4	44,9	43,5	12,8 ... 13,3	13,1
Kapillarrohrmatte RA = 30 mm	44,6	43,3	49,3	48,0	10,5 ... 10,9	10,7

Tabelle 2

Gesamtkühlleistungen der Decke (oben und unten) um 14.00 Uhr und im Mittel über den Nutzungszeitraum von 8.00 Uhr bis 18.00 Uhr für unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten λ . Bei den Rohrregistern handelt es sich um Rohr 20 x 2,5 mm mit dem jeweiligen Rohrabstand RA in mm. Die Kunststoff-Kapillarrohrmatten (Betonmatten der Fa. Clina) haben die Rohrabmessungen 4,3 x 0,8 mm und einen Rohrabstand von 30 mm

Die Mittelung der Werte erfolgte für die Dichte sowie für die Wärmeleitfähigkeit mit den Raumanteilen r und für die spezifische Wärmekapazität mit den Masseanteilen $r \rho$.

Algorithmus

Es wird auf die in [1] vorgestellten Algorithmen aufgebaut und ein spezielles Programm geschrieben. Um die Richtig-

keit des neuen Programms zu überprüfen, ist ein Beispiel mit den gleichen Stoffwerten für die beiden Schichten berechnet und der Vergleich mit den Ergebnissen nach einem bereits bekannten Programm für homogene Platten mit integriertem Rohrregister gezogen worden. Die bekannten Rechenprogramme gelten für zweidimensionale Betrachtungen mit Einfachmäandern bzw. für dreidimensionale Betrachtungen mit Kreuzmäandern. Wenn letzteres mit nur einem Mäander bestückt ist, kann das Ergebnis ebenfalls zum Vergleich herangezogen werden. Die Testbeispiele ergaben völlige Übereinstimmung der Ergebnisse.

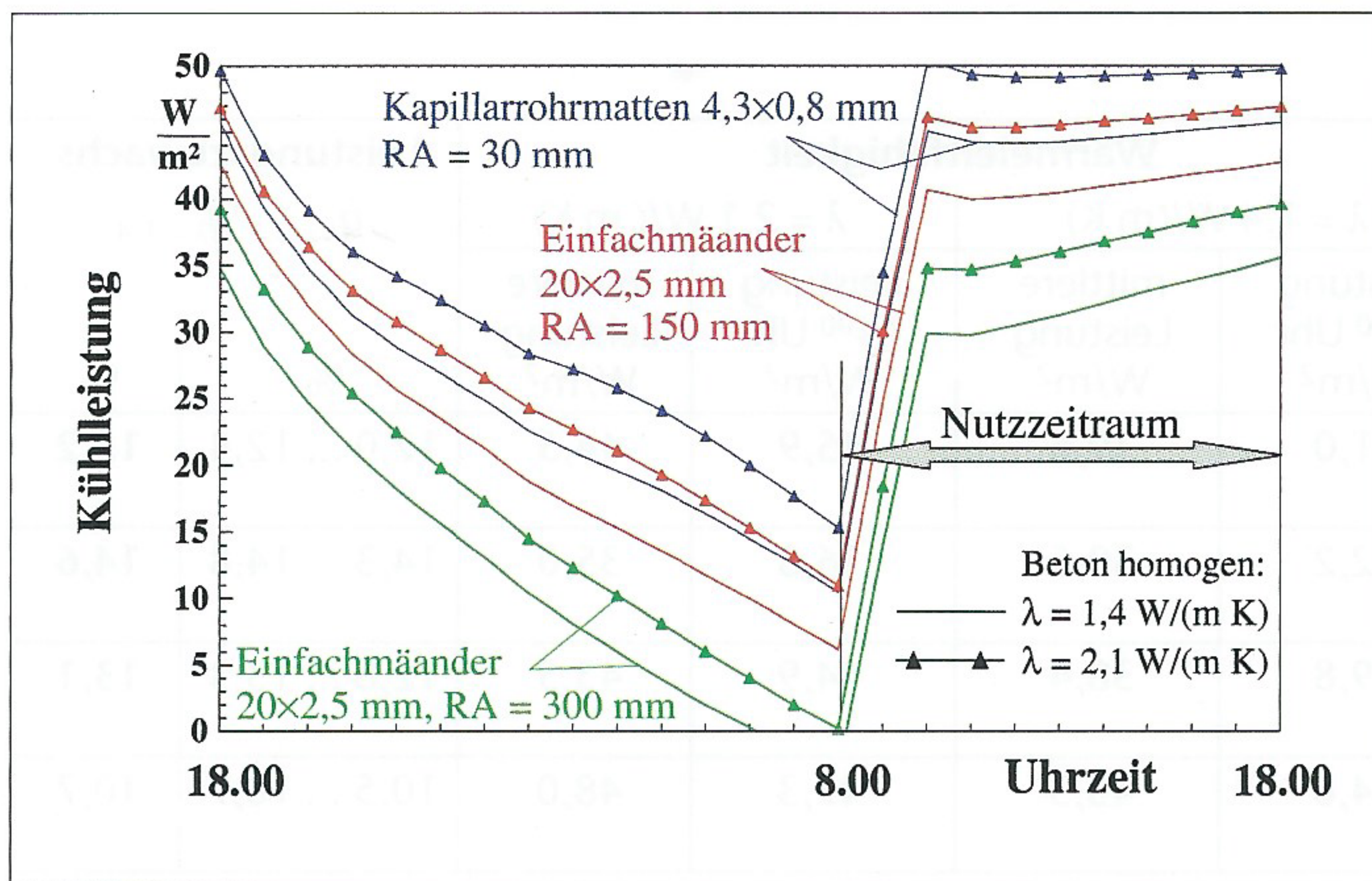


Bild 3

Kühlleistungsverläufe im Tagesgang unter den Randbedingungen des Bildes 1 für Massivdecken mit drei unterschiedlichen Rohrregistern und zwei verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten des Betons ($1,4 \text{ W/(m K)}$ bzw. $2,1 \text{ W/(m K)}$). Die Decke wird als homogene Konstruktion gemäß Bild 2 (oben) betrachtet

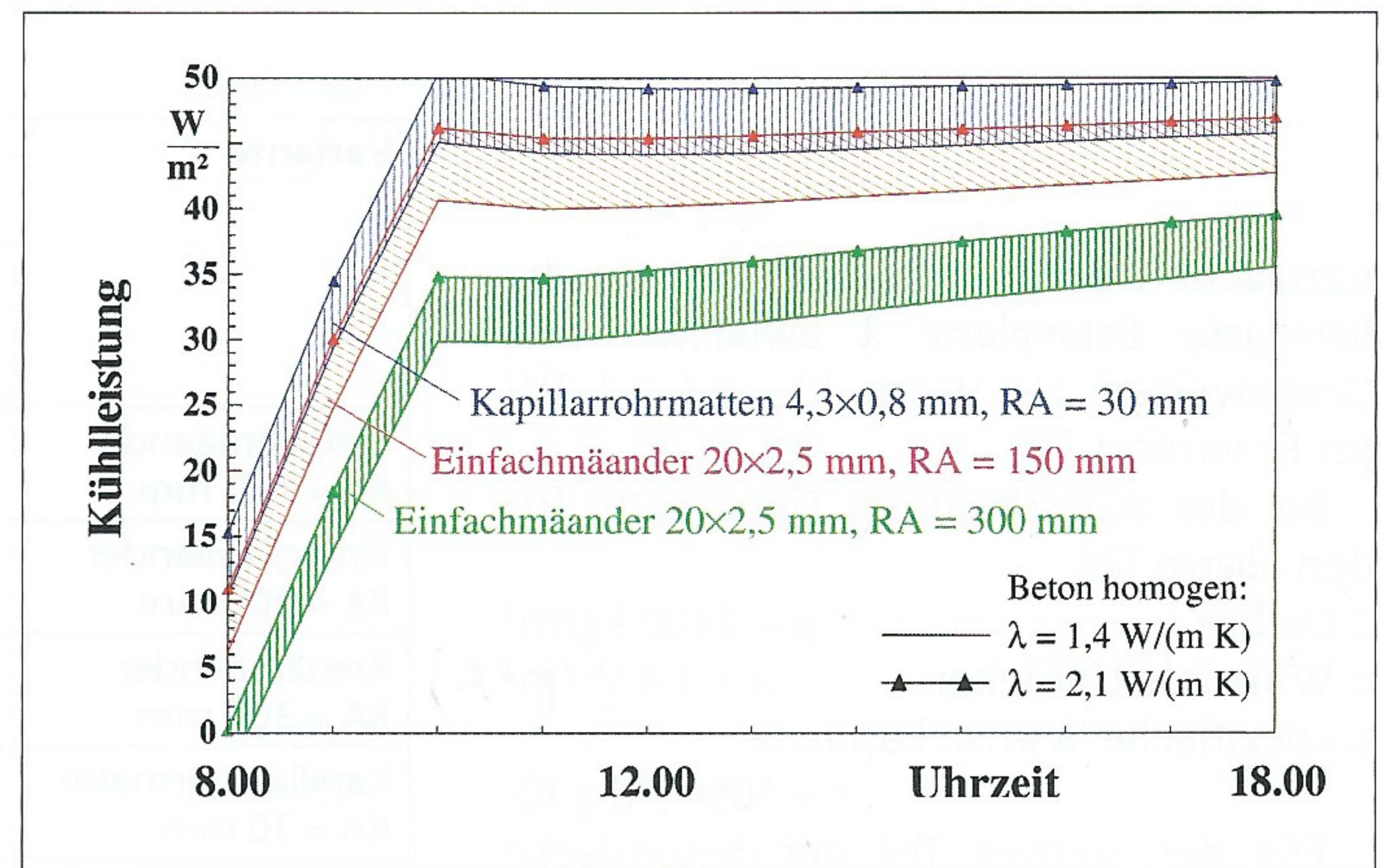


Bild 4

Kühlleistungsverläufe im täglichen Nutzzeitraum von 8.00 bis 18.00 Uhr unter den gleichen Bedingungen wie im Bild 3

Einfluss der Wärmeleitfähigkeit von homogenen Platten auf den Kühlleistungsverlauf

Um eine möglichst repräsentative Aussage zu ermöglichen, werden unterschiedliche Varianten untersucht. Sie sind in **Tabelle 2** zusammengestellt.

Als charakteristische Leistungsmerkmale werden die Gesamtleistungen der Decke (unten und oben) pro 1 m^2 um 14.00 Uhr und die mittlere Kühlleistung über den Nutzungszeitraum von 8.00 bis 18.00 Uhr verglichen. Der Leistungszuwachs in Tabelle 2 nimmt auf beide Vergleichswerte Bezug, zusätzlich wird der aus beiden Daten gemittelte Wert angegeben.

Die Decke besteht aus 300 mm Beton plus einem Belag auf der Oberseite ($\delta = 10 \text{ mm}$, $\lambda = 0,07 \text{ W/(m K)}$). Die Rohrregister liegen jeweils mittig in der Decke bzw. bei Kreuzmäandern annähernd symmetrisch zur Deckenmitte.

Die grafische Darstellung des täglichen Leistungsverlaufs im eingeschwungenen Zustand ist im **Bild 3** gezeigt. Die **Bilder 4** und **5** stellen den Verlauf während des Nutzzeitraumes vergrößert dar.

Fazit:

- Die Ergebnisgegenüberstellungen in Tabelle 2 und in den Bildern 3 bis 5 zeigen deutlich, dass mit steigender Wärmeleitfähigkeit die Kühlleistungen der Massivkühldecken mit nächtlicher Einspeicherung zunehmen.
- Obwohl die Wärmeleitfähigkeit im betrachteten Bereich um 50 % anstieg, wuchs die Kühlleistung nur um 11 % bis 15 % an.
- Die größten Zunahmen sind erwartungsgemäß bei den Konstruktionen mit den kleinsten Leistungen vorhanden. Dies sind Rohrregister mit großen Rohrabständen. Der Schwankungsbereich von 11 % bis 15 % ist aber relativ klein. Die hauptsächliche Verbesserung wird also durch die vergrößerte Wärmeleitung in vertikaler Richtung bewirkt.

Einfluss der Bewehrung im unteren Plattenbereich auf den Kühlleistungsverlauf

Für drei sehr unterschiedliche Rohrabstände wird die Untersuchung vorgenommen. Die Abmessung und die zugehörigen Ergebnisse sind in **Tabelle 3** wiedergegeben.

Als charakteristische Leistungsmerkmale werden wiederum die Gesamtleistungen der Decke (unten und oben) pro 1 m^2 um 14.00 Uhr und die mittlere Kühlleistung über den Nutzungszeitraum von 8.00 bis 18.00 Uhr betrachtet. Der Leistungszuwachs in Tabelle 3 gibt beide Vergleichswerte sowie den gemittelten Wert an.

Die Decke besteht aus der Oberschicht von ca. 247 mm Beton ($\lambda = 1,4 \text{ W/(m K)}$) und der Unterschicht von ca. 53 mm Beton mit integrierter Bewehrung ($\lambda = 3,3 \text{ W/(m K)}$). Auf der Oberschicht ist wiederum ein Belag ($\delta = 10 \text{ mm}$, $\lambda = 0,07 \text{ W/(m K)}$) vorhanden. Die Rohrregister liegen jeweils mittig in der Decke. Damit ist eine Vergleichbarkeit zu den homogenen Decken mit der Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 1,4 \text{ W/(m K)}$ gegeben.

Das **Bild 6** zeigt die Leistungsverläufe einer Tagesschwingung auf, und **Bild 7** gibt eine Vergrößerung im Nutzungszeitraum wieder.

Variante	Wärmeleitfähigkeit				Leistungszuwachs	
	homogene Platte $\lambda = 1,4 \text{ W/(m K)}$		zweischichtige Platte $\lambda = 1,4/3,3 \text{ W/(m K)}$		$\dot{q}_{\text{zwei Pl}} / \dot{q}_{\text{hom Pl}}$	
	Leistung 14 ⁰⁰ Uhr W/m^2	mittlere Leistung W/m^2	Leistung 14 ⁰⁰ Uhr W/m^2	mittlere Leistung W/m^2	%	%
Einfachmäander RA = 150 mm	41,0	39,6	43,2	41,7	5,4 ... 5,3	5,4
Einfachmäander RA = 300 mm	32,2	30,5	33,8	32,0	5,0 ... 4,9	5,0
Kapillarrohrmatte RA = 30 mm	44,6	43,3	47,1	45,7	5,6 ... 5,5	5,6

Tabelle 3

Gesamtkühlleistungen der Decke (oben und unten) um 14.00 Uhr und im Mittel über den Nutzungszeitraum von 8.00 Uhr bis 18.00 Uhr für unterschiedliche Plattenkonstruktionen (homogene Platte und Zweischichtplatte). Bei den Rohrregistern handelt es sich um Rohr $20 \times 2,5 \text{ mm}$ mit dem jeweiligen Rohrabstand RA in mm. Die Kunststoff-Kapillarrohrmatten (Betonmatten der Fa. Clina) haben die Rohrabmessungen $4,3 \times 0,8 \text{ mm}$ und einen Rohrabstand von 30 mm

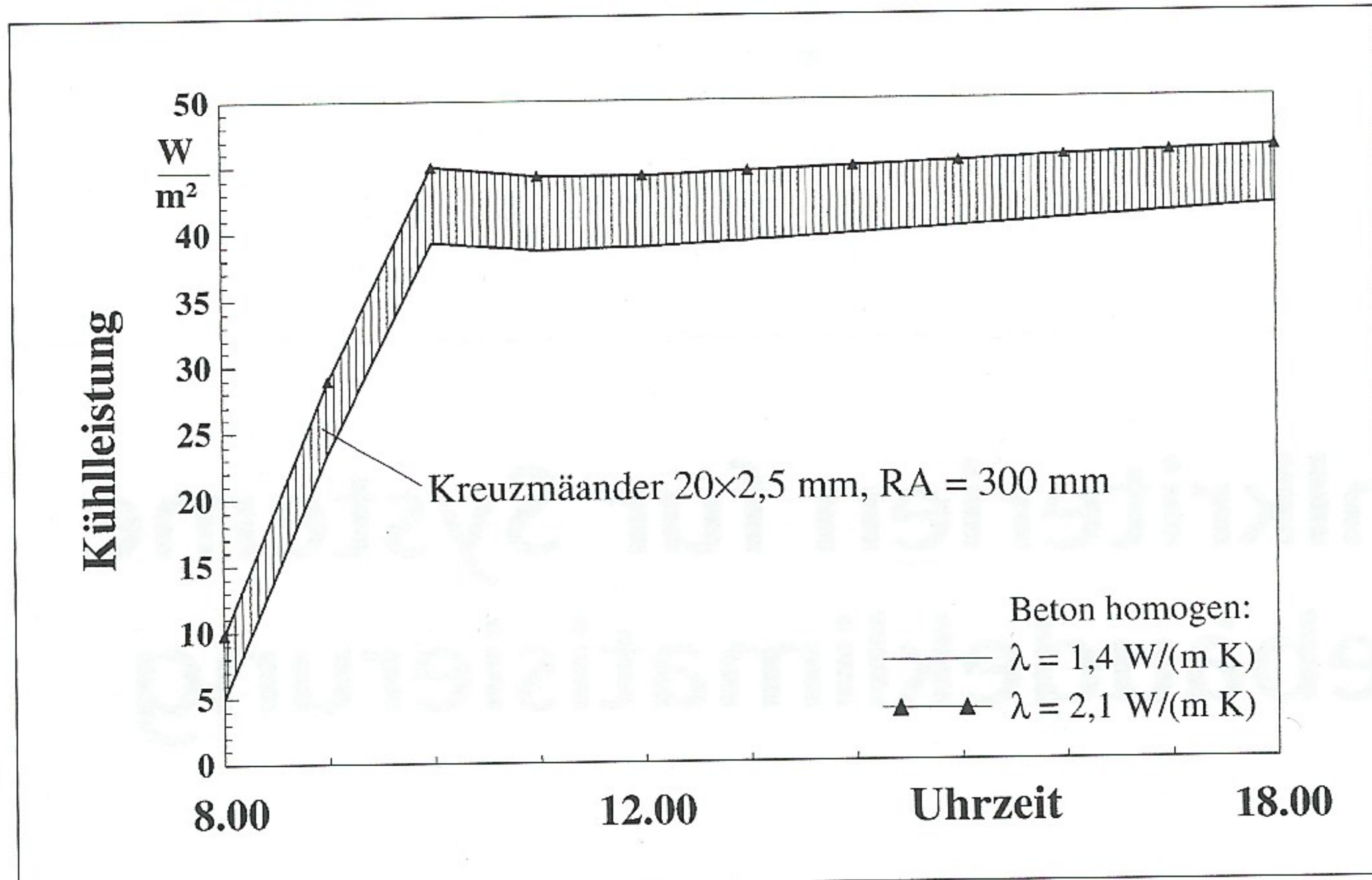


Bild 5

Kühlleistungsverläufe im täglichen Nutzzeitraum von 8.00 bis 18.00 Uhr unter den gleichen Bedingungen wie im Bild 3 jedoch für einen Kreuzmäander

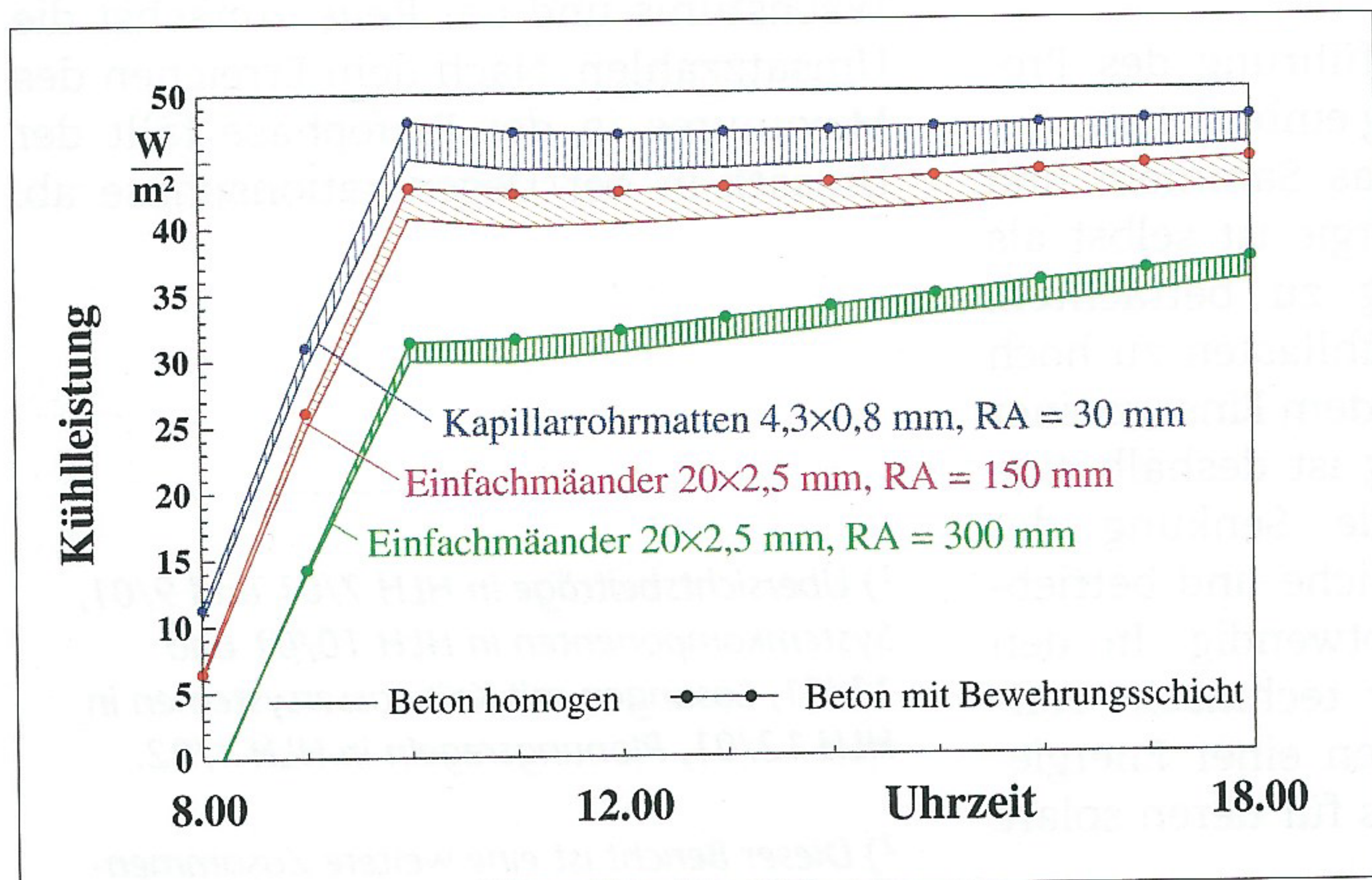


Bild 6

Kühlleistungsverläufe im Tagesgang unter den Randbedingungen des Bildes 1 für Massivdecken mit drei unterschiedlichen Rohrregistern und zwei verschiedenen Konstruktionsmodellierungen der Decke. Die homogene Decke nach Bild 2 (oben) hat eine Wärmeleitfähigkeit des Betons von $1,4 \text{ W/(m K)}$. Für die zweischichtige Decke nach Bild 2 (unten) gelten die Wärmeleitfähigkeiten: Abschnitt mit Rohrregister $1,4 \text{ W/(m K)}$, Abschnitt mit Bewehrungslage $3,3 \text{ W/(m K)}$

Bild 7

Kühlleistungsverläufe im täglichen Nutzzeitraum von 8.00 bis 18.00 Uhr unter den gleichen Bedingungen wie im Bild 6

Es wird empfohlen, die Wärmeleitfähigkeit des Betons möglichst exakt zu ermitteln und die Kühlleistung für eine homogene Betondecke zu simulieren. Den zusätzlichen Leistungsvorteil durch das Vorhandensein der Bewehrungsstäbe sollte man als Sicherheit gegenüber den Schwankungen der zahlreichen Randbedingungen betrachten.

H 256

Fazit:

- Die Leistungsverbesserung bei Vorhandensein der gut wärmeleitenden Unterschicht ist mit 5 % bis 6 % relativ gering und in erster Näherung nicht vom Rohrabstand abhängig. Dies kann damit erklärt werden, dass diese Schicht zu weit vom Rohrregister entfernt liegt.
- Der Leistungsvorteil ist hauptsächlich durch die verbesserte Wärmeleitung zum unteren Raum begründet.

Zusammenfassung

Mit den bekannten und neu erarbeiteten Algorithmen ist es möglich, die Einflüsse

- der Wärmeleitfähigkeit des homogenen Betons
- der Hauptbewehrung (Zugbewehrung) in einer Massivspeicherdecke mit integriertem Rohrregister auf den Kühlleistungsgang zu quantifizieren. Die Bewehrung im unteren Deckenbereich wird durch eine verbesserte Wärmeleitfähigkeit in einer zweiten Betonschicht gut nachgebildet.

Steigt die Wärmeleitfähigkeit der homogenen Betonplatte von $1,4 \text{ W/(m K)}$

auf $2,1 \text{ W/(m K)}$ an, so verbessert sich die Kühlleistung je nach Rohrregisterkonstruktion um 11 % bis 15 %. Die Verbesserung liegt bei den leistungsstärksten Konstruktionen logischer Weise an der unteren Grenze.

Die Wirkung der Bewehrung führt zu etwa 5 % bis 6 % Leistungssteigerung.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass beide Einflüsse in den Fachdiskussionen oftmals überschätzt werden.

Literatur

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