

Bernd Glück

Thermische Bauteilaktivierung auch bei Bauwerksanierungen

Die thermische Bauteilaktivierung von Massivdecken – auch Betonkernaktivierung genannt – hat in den letzten Jahren eine große Verbreitung erfahren. Da die wasserdurchflossenen Rohrregister während des Betoniervorgangs eingebracht werden müssen, ist diese Technologie im Sanierungsfall nicht anwendbar. Um die energetischen Vorteile – die beim Einsatz von raumnahen Wassertemperaturen auftreten – auch im Sanierungsbereich nutzbar zu machen, gibt es eine Reihe von Vorschlägen. Eine Variante, die sogar die Speicherung von vorhandenen Massivdecken einbezieht, wird auf ihre Leistungsfähigkeit untersucht.

Thermal activation of building construction: Possibility also in building reconstructions

The thermal activation of concrete ceilings, also concrete called core activation, is getting a large spread in the last years. Since the water tubing registers must be brought in during the concreting process, this technology is not applicable in the case of reconstructions. To be able to use the energetic advantages – which occur with the use of water temperatures near room temperature, also within the construction area, there is a set of suggestions. A version, which includes even the storage in the available concrete ceilings, is examined in consideration of its efficiency.

Keywords: thermal component activation, concrete core activation, building construction, office building, modelling

Aktuelle Problemstellung

Zukünftig wird die Sanierung von Bürogebäuden einen bedeutenden Umfang einnehmen. Zwei wichtige Forderungen sind die Verbesserung der wärmephysiologischen Behaglichkeit und der weitgehende Einsatz von Umweltenergie. Weiterhin ist es zweckmäßig, die installierten Systeme sowohl zum Heizen als auch zum Kühlen einzusetzen.

Diese Zielstellungen sind durch große thermisch aktive Raumumfassungen erreichbar, wenn diese außenwandnah platziert oder direkt in die Außenwand einbezogen werden. Der hohe Strahlungsanteil und die Kompensation des Fenstereinflusses verbessern das wärmephysiologische Empfinden. Durch raumnahe Kühl- und Heizmedientemperaturen kann Umweltenergie über lange Zeiträume des Jahres direkt oder exergetisch günstig mit nur geringer Temperaturveränderung mittels Kältemaschinen oder Wärmepumpen eingesetzt werden (vgl. auch [1]).

Umfangreiche Untersuchungen [3] ergaben, dass es für die wechselseitige Nutzung als Kühl- und Heizsysteme zweckmäßig ist, die Decke und die Brüstungsfläche aktiv zu gestalten. Bei Vollglasfasaden ist anstelle der Brüstung ein Fußbodenstreifen einzubeziehen. Dadurch

wird die Strahlungsasymmetrie reduziert und dem Kaltluftabfall an den transparenten Flächen entgegengewirkt. Eine Heizdecke allein kann dies – besonders bei Eckräumen – nicht leisten.

Bei Sanierungsbauten ist die beschriebene Lösung sehr gut umsetzbar, beispielsweise indem die Decke und die Brüstung mit einer thermisch aktiven Putzschicht – in der Kunststoff-Kapillarrohrmatten integriert sind – versehen werden. Hierzu gibt es herkömmliche Technologien und neu entwickelte Lösungen, wobei z. B. Profolfolien mit werkseitig eingebrachten Kapillarrohrmatten „tapeziert“ werden. Das System wird so ausgelegt, dass es stets mit gleichen Wassertemperaturen und nur mit einem Regelkreis pro Raum arbeitet. Wegen der oberflächennahen Anordnung der Rohrregister arbeiten die Systeme mit sehr geringer Trägheit.

Häufig besteht aber die Forderung, auch das Speichervermögen der Bausubstanz zu nutzen.

- In [4] wird vorgeschlagen, Kapillarrohrmatten auf der Rohdeckenoberseite in einem Betonestrich einzugießen und für die regelbare Lastkompensation an der Deckenunterseite Kapillarrohrmatten einzuputzen.

Zur Realisierung der Raumkühlung ist

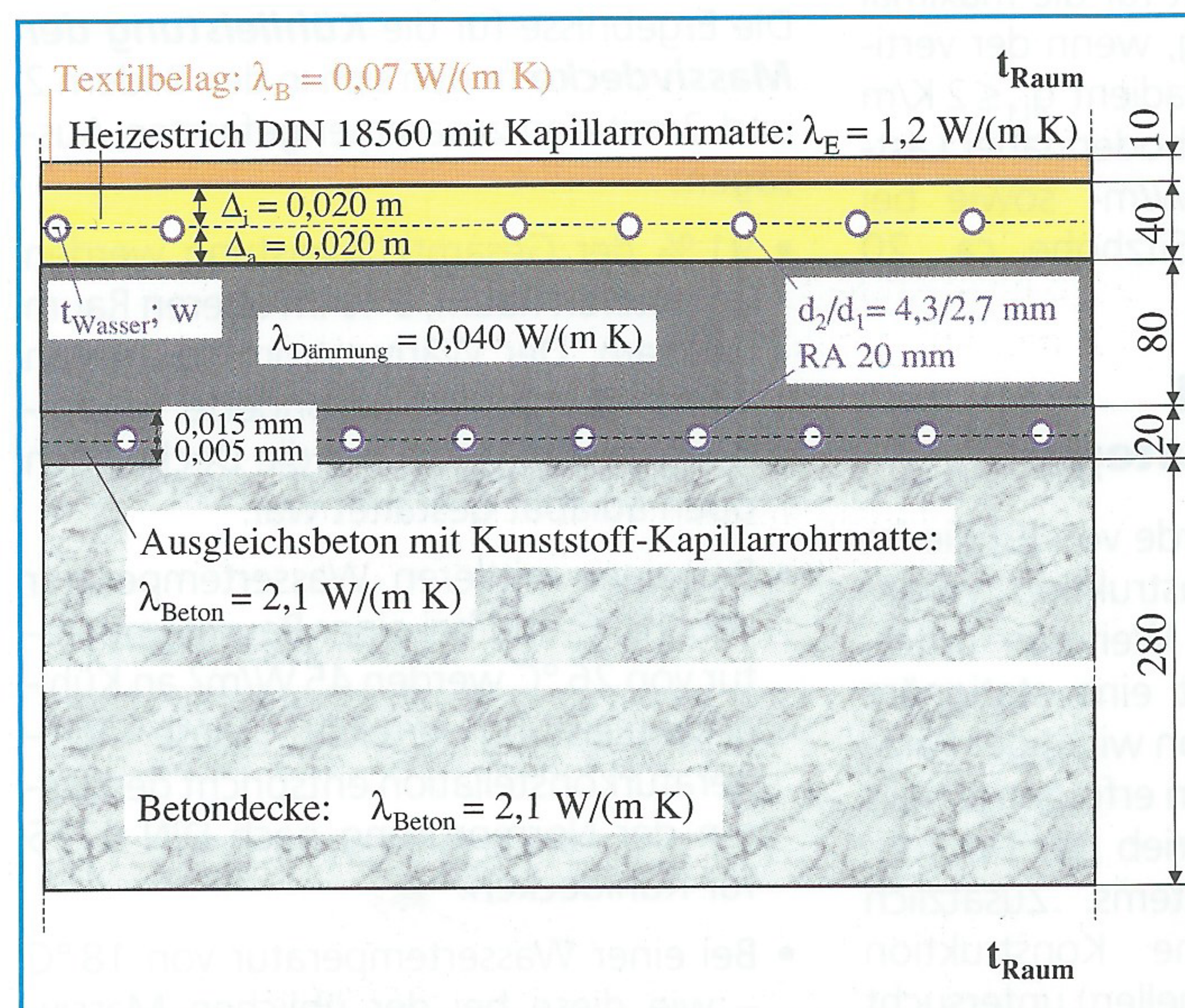


Bild 1
Aufbau und Geometrie der zu simulierenden Decke mit zwei Rohrebenen. Den Berechnungen werden Kunststoff-Kapillarrohrmatten vom Typ SB20 (4,3x0,8 mm) – eine Spezialentwicklung der Fa. Clina, Berlin (so genannte „Betonmatte“) – zugrunde gelegt

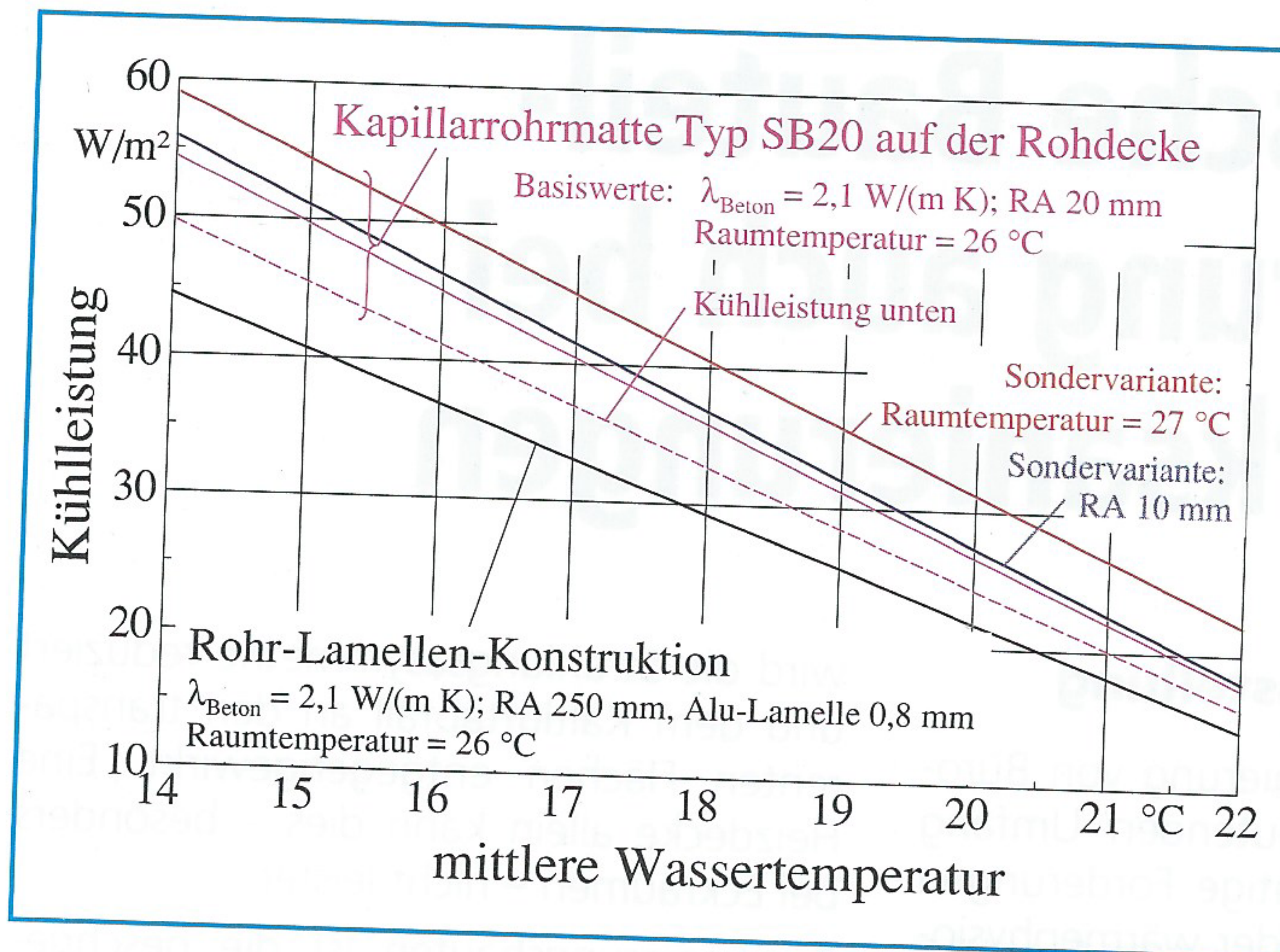


Bild 2 Kühlleistungen der Massivspeicherdecke im stationären Zustand nach unten und oben bei nicht aktiviertem Fußbodensystem bei verschiedenen Parametervariationen und Gegenüberstellung der Rohr-Lamellen-Konstruktion

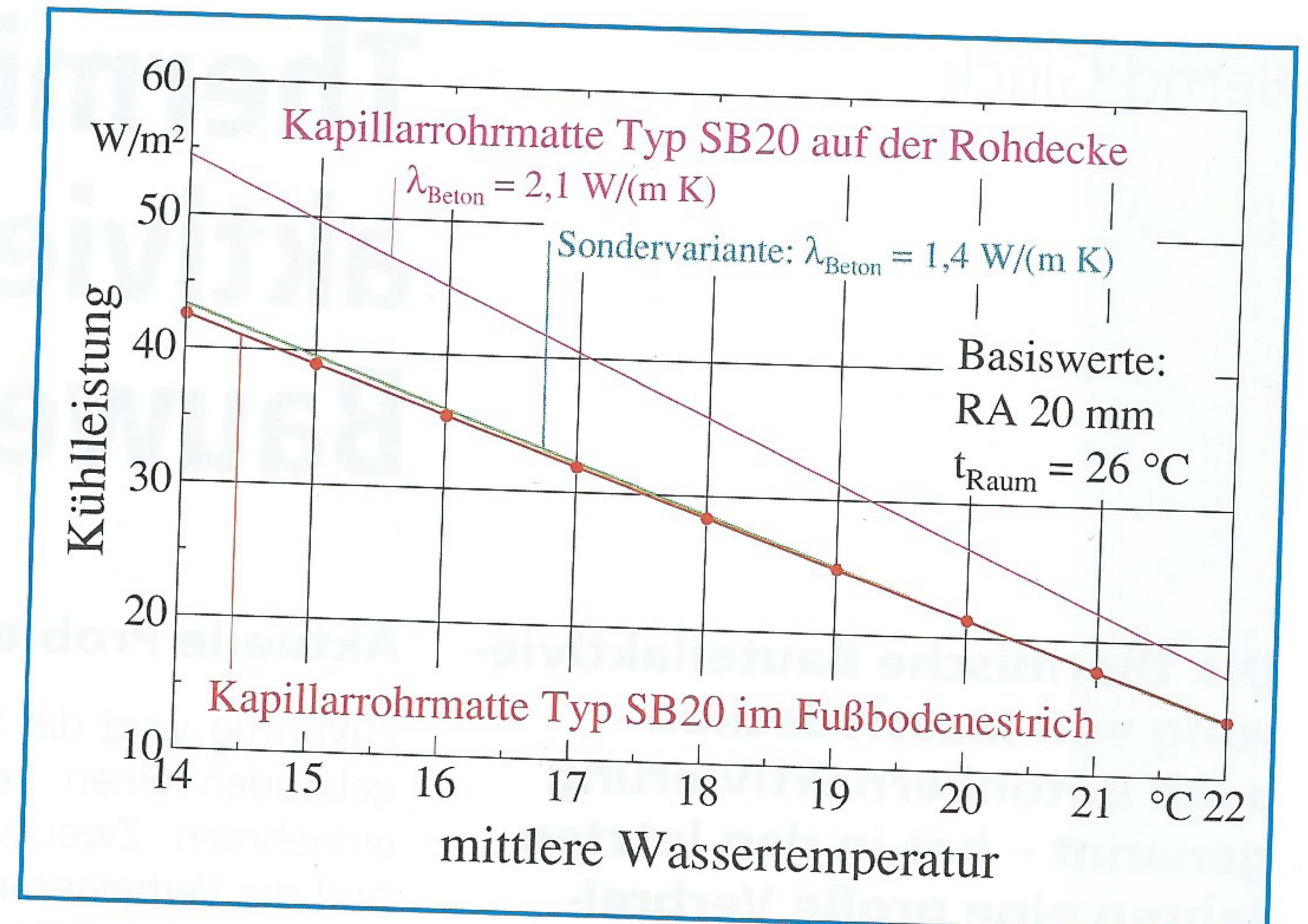


Bild 3 Gesamtkühlleistungen der Massivspeicherdecke (91 % unterer Raum) und des aktiven Fußbodensystems (88 % oberer Raum) bei Einzelbetrieb im stationären Zustand

dies grundsätzlich eine gute Variante. Im Heizfall kann jedoch der Kaltluftabfall an der Fassade nicht verhindert oder gemindert werden.

- Eine Ausschreibung [5] enthält eine interessante Kombination. Die Kühlung der Rohdecke erfolgt durch ein aufliegendes Rohrregister mit übergestülpten, an die Decke angeklebten Wärmeleitlamellen. Darüber befindet sich eine Trittschall- und Wärmedämmung (80 mm). Ein Fließestrich mit Rohrregister bildet ein Fußbodenkühl- und Fußbodenheizsystem.

Vorteilhaft ist das Heizen mit einem leistungsfähigen, regelbaren Bodensystem, wobei die Decke eine Grundheizung übernehmen kann. Nachteilig wirkt die Kühlleistungsbegrenzung des Bodens aus wärmephysiologischen Gründen. Nach [6] gilt für die maximal zulässige Kühlleistung, wenn der vertikale Lufttemperaturgradient $g_{lt} \leq 2 \text{ K/m}$ eingehalten wird, bei bodennaher Lasteinbringung ca. 35 W/m^2 sowie bei Lasteinbringung in Sitzhöhe ca. 20 W/m^2 .

Modellierung und Untersuchungsstrategie

In Ergänzung zu [5] wurde von [9] die im Bild 1 dargestellte Konstruktion vorgeschlagen. Sie wird im Weiteren untersucht. Zunächst erfolgt eine stationäre Betrachtung mit Variation wichtiger Parameter. Die Berechnungen erfolgen jeweils für den getrennten Betrieb des Decken- und des Fußbodensystems. Zusätzlich wird die ursprüngliche Konstruktion (Rohrregister mit Alulamellen) untersucht

und gegenübergestellt. Es schließt sich die instationäre Betrachtung der Speicherdecke für zwei unterschiedliche Raumtemperaturverläufe an. Da die genannte Wärmeleitfähigkeit des Betons mit $2,1 \text{ W/(m K)}$ quasi einen Höchstwert darstellt, wird stets auch noch eine Parallelrechnung mit $1,4 \text{ W/(m K)}$ angeschlossen.

Stationäre Betrachtung

Die zweidimensionale, stationäre Temperaturverteilung in der Betondecke und im Bodenestrich wird nach Faxén [2, S. 25 ff.] analytisch berechnet. Die wärmetech-nische Modellierung der Rohr-Lamellen-Konstruktion setzt eine lineare Wärmeleitung in der Lamelle um das Rohr, in der auf die Rohdecke geklebten Lamelle und in der Kleberschicht an [2, S. 86 ff.].

Die Ergebnisse für die **Kühlleistung der Massivdecke** finden sich in den Bildern 2 und 3 mit den zusammengefassten Aussagen:

- 91 % der Gesamtkühlleistung werden im unteren Raum, 9 % im oberen Raum wirksam. Der Wärmestrom von unten wurde durch eine gesonderte Berechnung bestätigt, bei der die Decke nach oben adiabat gestaltet war.
- Bei einer mittleren Wassertemperatur von 16 °C und bei einer Raumtemperatur von 26 °C werden 45 W/m^2 an Kühl-gesamtleistung erreicht. Diese Temperaturkonstellation entspricht den Daten der Normprüfung nach DIN 4715 für Kühldecken.
- Bei einer Wassertemperatur von 18 °C – wie diese bei der üblichen Massiv-

deckenkühlung verwendet wird – beträgt die Kühlleistung $35,8 \text{ W/m}^2$, wobei $32,5 \text{ W/m}^2$ im unteren Raum wirksam werden.

- Eine veränderte Wassergeschwindigkeit in den Kapillarrohren bewirkt im praktischen Bereich keine Leistungsvariation.
- Eine Verringerung des Rohrabstandes führt nur zu marginalen Leistungsänderungen. Beim Übergang von RA 20 mm auf RA 10 mm folgt eine Leistungssteigerung um etwa 2,5 %. Damit besitzt die für die Basisberechnung ausgewählte Matte bereits eine optimale Geometrie.
- Eine Raumtemperaturerhöhung auf 27 °C – wie bei hohen Außentemperaturen nach DIN 1946/2 zulässig – bewirkt bei der Wassertemperatur 18 °C eine Leistungssteigerung von $35,8 \text{ W/m}^2$ auf $40,4 \text{ W/m}^2$, also um ca. 13 %. Diese Möglichkeit ist ohne weiteres nutzbar.
- Für die vergleichende Berechnung mit der ausgeschriebenen Rohr-Lamellen-Konstruktion wurden sehr günstige Bedingungen angenommen: Dicke der Alulamelle 0,8 mm (bei Fußbodentrockensystemen beträgt diese in der Regel nur 0,45 mm), kein Luftspalt um das Rohr, kein Luftspalt zwischen Lamelle und Kleberschicht, Dicke der wirksamen Massivlamelle unter der Alulamelle zum Temperaturengleich zwischen den Rohren 5 mm mit $\lambda = 1,2 \text{ W/(m K)}$. Dennoch entsteht eine Leistungsminderung von ca. 18 % gegenüber der Konstruktion mit Kunststoff-Kapillarrohrmatte. Bei der Annahme

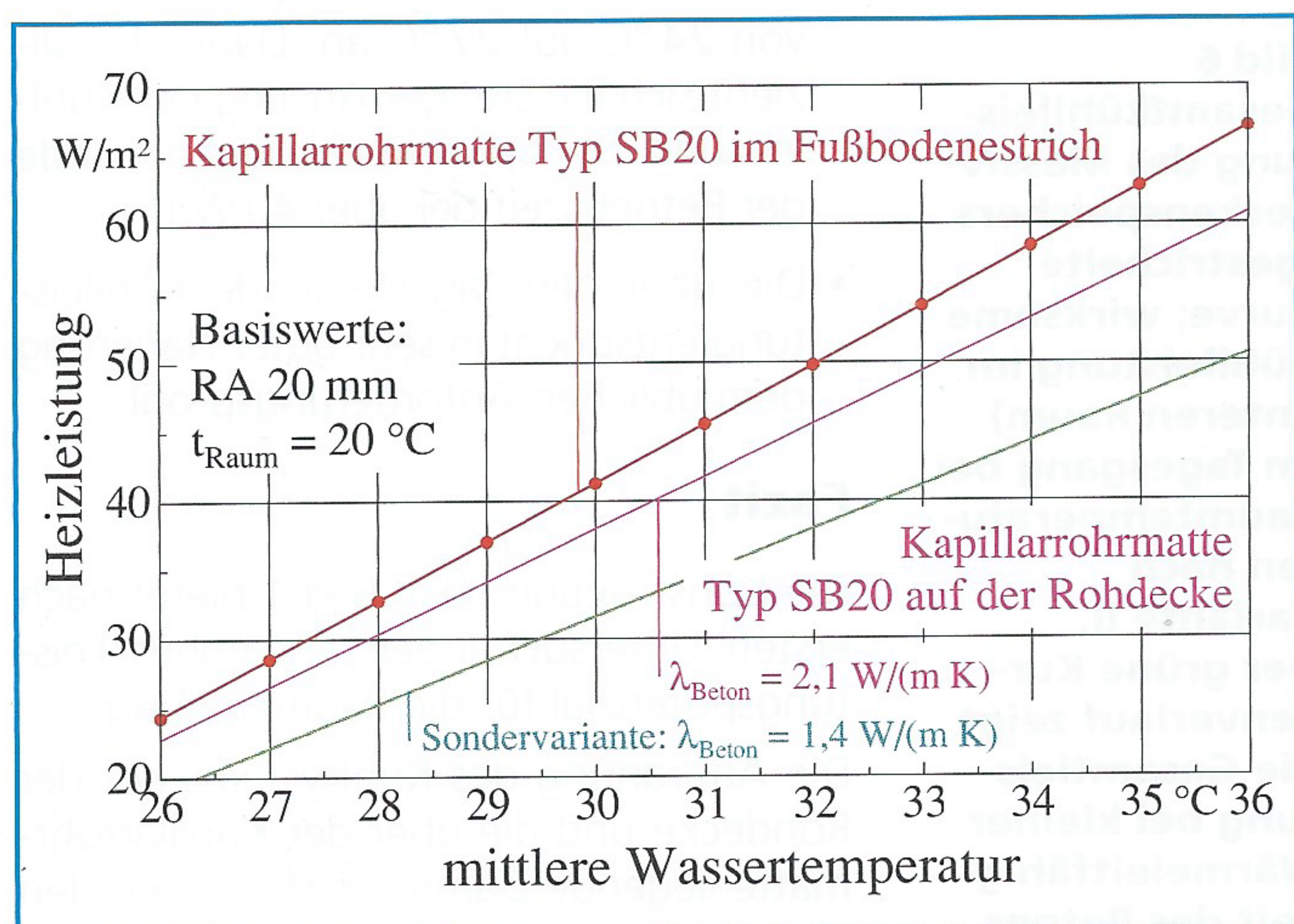


Bild 4 Gesamtheizleistungen der Massivspeicherdecke (89 % unterer Raum) und des aktiven Fußbodensystems (90 % oberer Raum) bei Einzelbetrieb im stationären Zustand

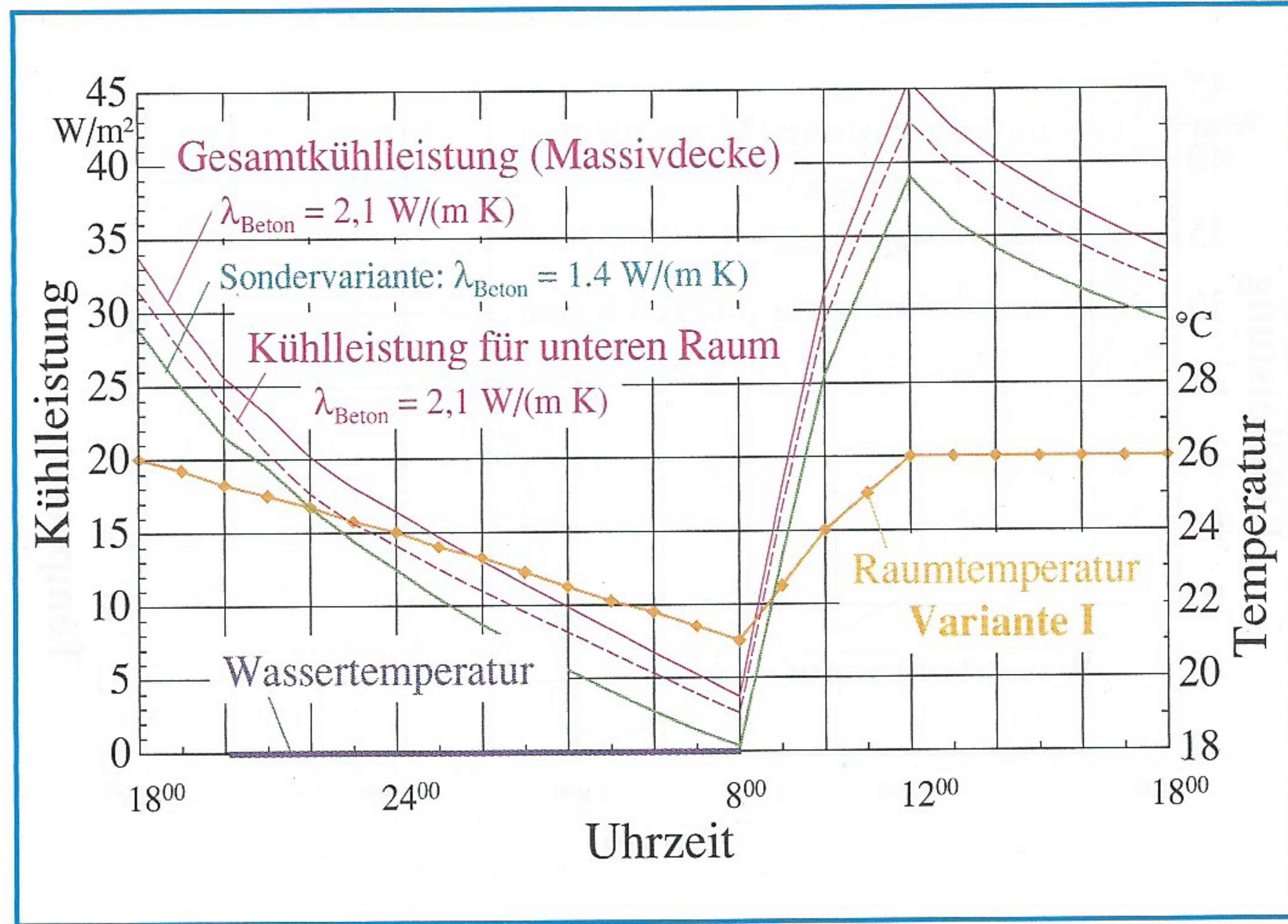


Bild 5 Gesamtkühlleistung des Massivdeckenspeichers (gestrichelte Kurve: wirksame Kühlleistung im unteren Raum) im Tagesgang bei Raumtemperaturen nach Variante I. Der grüne Kurvenverlauf zeigt die Gesamtleistung bei kleiner Wärmeleitfähigkeit des Betons

der thermisch wirksamen Dicke der Massivlamelle ist ein Manipulations-spielraum vorhanden, der nur durch ein aufwändigeres Simulationsmodell beseitigt werden kann. Demgegenüber sind die übrigen Annahmen zu positiv gewählt. In den Rohrumlenkbereichen ist keine Alulamelle vorhanden, ihre Dicke entspricht nicht der üblichen Realität und der Rohranschluss ohne Luftspalt stimmt keinesfalls mit der Baustellenpraxis überein.

- Eine Unsicherheit bei der Leistungsbestimmung stellt die Beschaffenheit der vorhandenen Betondecke dar. Der Stahlbeton ist nicht homogen, da die Bewehrungsstähle nach statischen Gesichtspunkten im Zugbereich angeordnet werden. Die Wärmeleitfähigkeit des Betons steigt mit der Dichte des Betons, wobei hauptsächlich die Zuschlagstoffe Einfluss nehmen. Eine umfassende Untersuchung ist in [7] enthalten. Die Leistungsreduzierung beim Übergang von $\lambda = 2,1 \text{ W/(m K)}$ auf $1,4 \text{ W/(m K)}$ beträgt etwa 20 %.

Die **Gesamtkühlleistung des Fußbodens** bei dessen Alleinbetrieb ist aus Bild 3 entnehmbar.

- Bei Normuntertemperatur (mittlere Wassertemperatur 16°C , Raumtemperatur 26°C) werden $35,4 \text{ W/m}^2$ Kühlleistung erreicht.
- Bei einer Wassertemperatur von 18°C beträgt die Kühlleistung $28,3 \text{ W/m}^2$ ($25,0 \text{ W/m}^2$ im oberen Raum).
- Somit werden ca. 88 % der Gesamtkühlleistung im oberen Raum und 12 % im unteren Raum wirksam.

Die **Gesamtheizleistungen** der Systeme

bei Einzelbetrieb finden sich im Bild 4. Hierbei werden bei der Massivdecke 89 % im unteren Raum und 11 % im oberen Raum wirksam. Für die Fußbodenheizung gilt die Aufteilung: 90 % der Gesamtleistung fließen zum oberen Raum, 10 % zum unteren Raum.

Die veränderte Leistungsaufteilung gegenüber dem Kühlfall ist auf die unterschiedlichen Wärmeübergangsbedingungen an den Bauteiloberflächen zurückzuführen.

Zusammenfassung der stationären Untersuchungsergebnisse

Für die im Bild 1 vorgestellte Konstruktion mit den integrierten Kapillarrohrmatten-systemen des Typs SB 20 gelten die zusammengefassten Werte der Tabelle 1. Näherungsweise werden im Kombinationsbetrieb die Einzelleistungen der Systeme, die in den Räumen wirken, addiert, da durch die dicke Dämmschicht eine

sehr gute thermische Trennung der Systeme vorhanden ist.

Anmerkungen:

- Im stationären Kühlbetrieb können auch bei hohen Kaltwassertemperaturen – z. B. bei 18°C – beachtliche Leistungen realisiert werden. Aus Behaglichkeitsgründen ist die Kühlleistung des Fußbodens zu begrenzen.
- Die erforderliche Heizleistung von beispielsweise 40 W/m^2 könnte auch vom Fußbodensystem allein erbracht werden. Bemerkenswert sind die sehr niedrigen Heizwassertemperaturen. Es ist allerdings zu überprüfen, ob an der Fassade die Gefahr des Kaltluftabfalls besteht. Als vorbeugende Maßnahme kann eine Brüstungsheizung empfohlen werden.

Dynamisches Verhalten der Massivspeicherdecke

Da die Fußbodenkühlung ein sehr trägheitsarmes System darstellt, wie aus den Untersuchungen für Fußbodenheizungen

Tab. 1 Stationäre Leistungsdaten für den Kühl- und Heizfall

Alle Leistungen in W/m^2		Einzelbetrieb Massivdecke		Einzelbetrieb Fußboden		Kombinationsbetrieb
		unterer Raum	oberer Raum	unterer Raum	oberer Raum	unterer + oberer Raum
Kühlfall	Wassertemperatur 18°C Raumtemperatur 26°C	32,5	3,3	3,4	25,0	57,5
	Wassertemperatur 17°C Raumtemperatur 26°C	36,7	3,7	3,8	28,1	64,8
Heizfall	Wassertemperatur 30°C Raumtemperatur 20°C	33,8	4,2	4,1	37,1	70,9
	Wassertemperatur 28°C Raumtemperatur 22°C	20,3	2,5	2,5	21,9	42,2

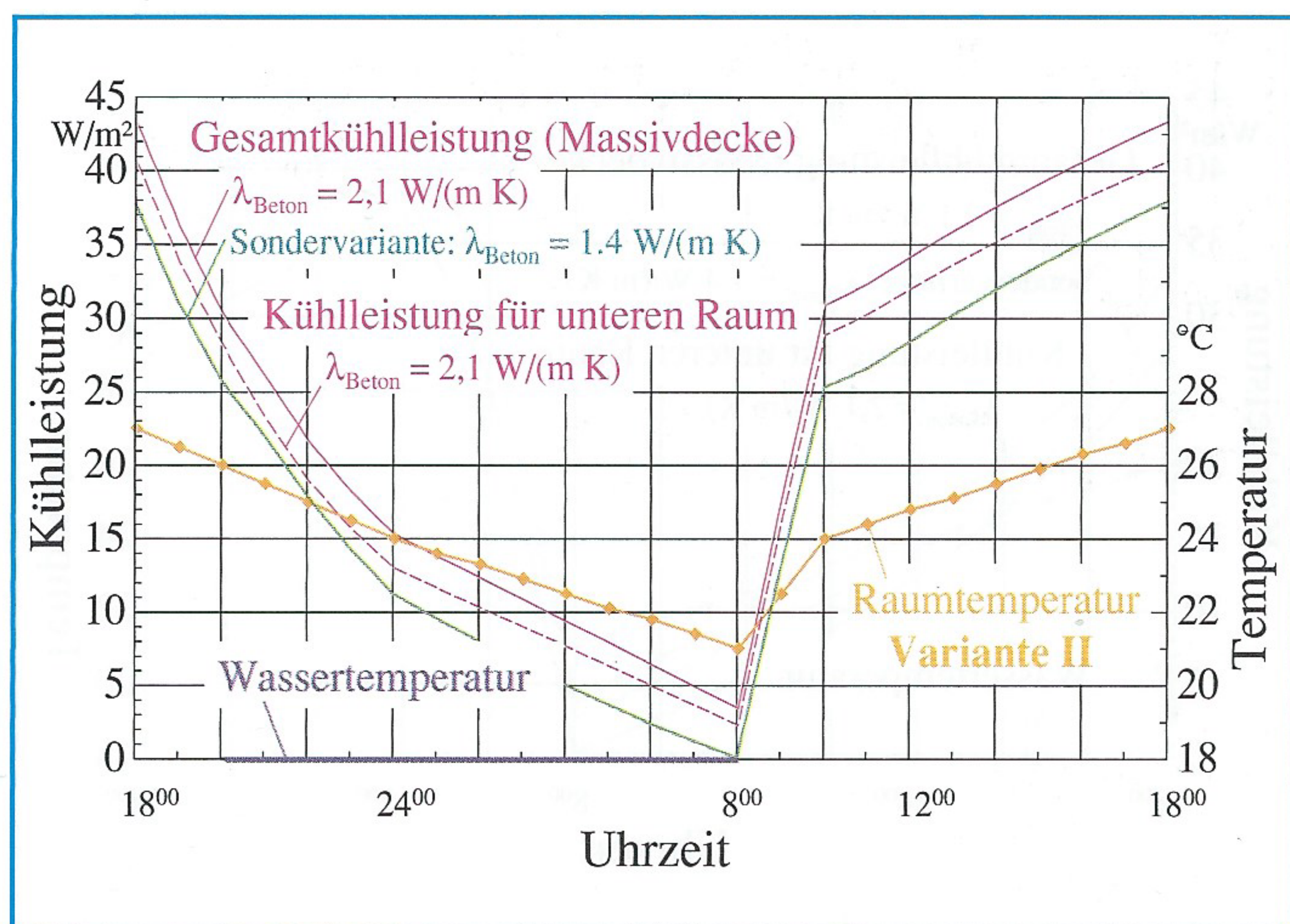


Bild 6
Gesamtkühlleistung des Massivdeckenspeichers (gestrichelte Kurve: wirksame Kühlleistung im Tagesgang bei Raumtemperaturen nach Variante II. Der grüne Kurvenverlauf zeigt die Gesamtleistung bei kleiner Wärmeleitfähigkeit des Betons)

mit integrierten Kunststoff-Kapillarrohrmatten übernommen werden kann [2, 8], ist nur der zeitliche Verlauf der Kühlleistung durch die Massivspeicherdecke von Interesse. Zur Berechnung der zweidimensionalen, instationären Temperaturverteilung wird wegen der komplizierten heterogenen Rand- und Anfangsbedingungen ein numerisches Verfahren nach [2, S. 117 ff.] benutzt. Dem Algorithmus liegt dabei eine fest definierte Gittergestaltung mit den Abständen Δx und Δy sowie eine bestimmte Zeitschrittweite $\Delta \tau$ zugrunde. Der gesamte Untersuchungszeitraum umfasste 72 h bei $\Delta \tau = 3$ s, wobei nur der letzte der drei Tage detailliert ausgewertet wird, da dann mit Sicherheit ein eingeschwungener Zustand vorliegt. Für die Untersuchungen gelten nachfolgende Annahmen und Randbedingungen:

- Die Ladezeit erstreckt sich über 12 h von 20 Uhr bis 8 Uhr.
- Die mittlere Wassertemperatur während der Ladezeit beträgt 18 °C.
- Das Fußboden-Rohrregister wird nicht betrieben.
- Die Raumtemperaturen im unteren und im oberen Raum sind gleich.
- Bezüglich des Raumtemperaturverlaufs werden zwei Varianten unterschieden. Variante I geht davon aus, dass beispielsweise am Vormittag die Kühlleistung für den Raum durch die Entladung der Massivspeicherdecke erbracht wird. Von 12 Uhr bis 18 Uhr erfolgt der zusätzliche Betrieb des Fußbodenkühlsystems, das die Konstanz der Raumtemperatur bei 26 °C gewährleistet. Variante II könnte den alleinigen Betrieb der Massivspeicherdecke charakterisieren, der durch einen fortwährenden Anstieg der Raumtemperatur bis auf 27 °C gekennzeichnet ist. Die Raumtemperaturverläufe sind aus den Bildern 5 und 6 ersichtlich.

Die Hauptergebnisse finden sich ebenfalls in den Bildern 5 und 6, woraus die Aussagen folgen:

- Die Kühlleistung von Massivspeicherdecken ist in sehr starkem Maße vom Raumtemperaturverlauf abhängig.
- Bei der stark reduzierten Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 2,1$ W/(m K) auf 1,4 W/(m K) verringert sich die Kühlleistung um etwa 15 %. (Bei mittlerer Rohrlage in der Decke betrug die Veränderung 10 % [7].) Die weitere Diskussion bezieht sich auf die zu $\lambda = 2,1$ W/(m K) gehörenden Leistungsverläufe.
- Beide Varianten I und II erreichen ab 10 Uhr durchweg Leistungen > 30 W/m².
- Bei Variante I steigt die Raumtemperatur bis 12 Uhr bereits auf 26 °C an, wodurch eine sehr hohe Kühlleistung realisierbar ist. Der Spitzenwert liegt bei über 40 W/m². Dies wird durch die tiefen Deckentemperaturen am Ende der Ladezeit bewirkt. (Damit kann sogar der Wert des stationären Betriebs von 35,8 W/m², der für eine Wassertemperatur von 18 °C und eine Raumtemperatur von 26 °C galt, übertroffen werden.)
- Im praktischen Betrieb dürfte damit bis 12 Uhr die Speicherkälte der Decke – die vorwiegend aus Umweltkälte stammt – zur Kühlung der Büros ausreichend sein.
- Wird die Raumtemperatur durch ein regelbares Zusatzkühlsystem auf 26 °C = const. gehalten, dann sinkt die Kühlleistung ab, unterschreitet aber 30 W/m² nicht.
- Bei Variante I erbringt die Massivkühldecke einen maßgeblichen Anteil der Kühlleistung!
- Bei Variante II steigt die Raumtemperatur von 10 Uhr bis 18 Uhr kontinuierlich

von 24 °C auf 27 °C an. Dadurch vollzieht sich ein stetiger Anstieg der Kühlleistung. Der Spitzenwert liegt am Ende der Betriebszeit bei über 40 W/m².

- Die über den Tag steigende Kühlleistung entspricht in sehr guter Näherung dem üblichen Anforderungsprofil.

Fazit

Die Konstruktion nach Bild 1 bietet nach ersten Untersuchungen ein hohes Leistungspotenzial für die Raumkühlung.

Die Anordnung des Kühlsystems auf der Rohdecke und die über der Kapillarrohrmatte liegende Dämmschicht bieten den Vorteil einer hohen „Kältebeladung“ der Massivdecke, so dass auch noch nachmittags eine hohe Wärmestromaufnahme aus dem unteren Raum möglich ist.

Die regelbare Kühlleistung des Bodens wird nur aus wärmephysiologischen Gründen begrenzt.

Das Zusammenwirken der beiden Bauteile ist durch einen geeigneten Steuerungs- und Regelungsalgorithmus noch zu optimieren.

Die erforderliche Heizleistung ist problemlos zu erbringen.

Literatur

- [1] Glück, B.: Atmosphärische Luft als Wärmesenke für die thermische Bauteilaktivierung. KI Luft- und Kältetechnik (in Vorbereitung)
- [2] Glück, B.: Thermische Bauteilaktivierung – Nutzen von Umweltenergie und Kapillarrohren. C. F. Müller Verlag. Heidelberg (1999)
- [3] Glück, B.: Kombinationen verschiedener Aktivflächensysteme im Raum, ihre Einflüsse auf die Behaglichkeit und die erforderlichen Wassertemperaturen. Heizung-Lüftung-Haustechnik (im Druck)
- [4] Fraaß, M.: Ein Beitrag zur Theorie des thermisch aktivierbaren Bauteils. Dissertation, TU Berlin (2001)
- [5] Adä, W.; Lutz, K.: Trippe + Partner Ingenieurgesellschaft mbH, Leinfelden-Echterdingen (persönl. Mitteilung)
- [6] Daniel, T.; Gräff, B.: Leistungsbestimmung von Kühlböden. DKV-Tagung 1996, Band IV, S. 241 ff.
- [7] Glück, B.: Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Betons und der Bewehrung auf die Kühlleistung von Massivspeicherdecken. Heizung-Lüftung-Haustechnik 53 (2002) 2, S. 42–47
- [8] Glück, B.: Wassertemperaturen und Aufheizzeiten von Fußbodenheizungen mit Estrichverlegung. Heizung-Lüftung-Haustechnik 51 (2000) 6, S. 26–33
- [9] Nüßle, F.: Zent-Frenger Gesellschaft für Gebäudetechnik (persönl. Mitteilung)

Schlüsselwörter

Thermische Bauteilaktivierung
Betonkernaktivierung
Bauwerksanierung