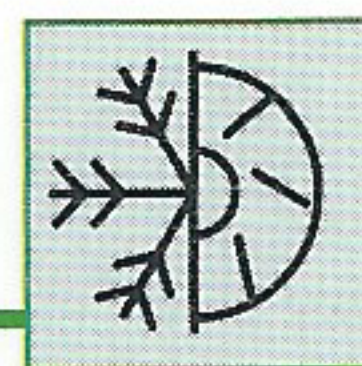




Filigrandecken mit integrierter thermischer Bauteilaktivierung

Alle technischen Lösungen, die sich langfristig durchsetzen, stellen wirtschaftliche, technische und ökologische Kompromisse dar. Aus dieser Sicht heraus wird die „reine“ Lehre der Bauteilkühlung mit ausschließlichem Umweltenergieeinsatz auf Nischen beschränkt bleiben. Mit der Idee, Kapillarrohrmatten in vorgefertigte Filigrandecken einzusetzen, sind enorme wirtschaftliche Vorteile verbunden, da die Einbringung des wasserführenden Systems im Betonwerk erfolgt.

■ Mit dem Einsetzen von Kapillarrohrmatten in vorgefertigten Filigrandecken sind Vorteile wie hohe Präzision der Rohrverlegung und schneller Bauablauf durch Montage der Decken mit ungestörter Ortbetoneinbringung verbunden. Die Umweltenergienutzung ist größtenteils gegeben und eine regelbare Nachkühlung mit Raumtemperaturgewährleistung ist möglich. Die Einsatzbreite der thermischen Bauteilaktivierung könnte stark ansteigen und beispielsweise auch Bauten mit „dünnen“ Decken sowie das Heizen und Kühlen von Eigenheimen einbeziehen. Die thermische Bauteilaktivierung hat in den letzten Jahren sehr an Bedeutung gewonnen. Die Hauptargumente, die für diese Technik sprechen, sind bekanntermaßen:

- wärmephysiologische Vorteile beispielsweise durch niedrigere Raumboberflächen-temperaturen im Sommer,
- energetische Vorteile durch geringeren Transportaufwand bei Einsatz von Wassersystemen,
- hohe Kühl- bzw. niedrige Heizmedientemperaturen durch Nutzung großer Wärmeübertragerflächen (z. B. Decken), wodurch Umweltenergie direkt mittels freier Kühlung (Kühlturm) oder mit geringer Transformationsenergie für Kältemaschinen bzw. Wärmepumpen einsetzbar ist,
- Nutzung des Massivspeichers zum erhöhten Umweltenergieeinsatz durch

Phasenverschiebung zwischen dem günstigen Angebot von „nächtlicher Kälte“ und der Wärmeaufnahme aus dem Raum am Tage,

- niedrigere Investitionskosten als bei konventioneller Vollklimatisierung.

Die betriebstechnischen und nutzungsbezogenen Nachteile werden oftmals weniger deutlich angesprochen. Es sind zu nennen:

- Im Tagesgang können Raumtemperaturabweichungen von der DIN 1946 T2 auftreten und die in den Raum eingetragenen Lasten sind bei anhaltender Hitzeperiode möglicherweise auch in einer 24-Stundenperiode nicht kompensierbar,
- der Deckenspeicher hat zwar ein gutes Selbstregelungsverhalten, wirkt aber wie ein Proportionalregler, denn je größer die Abweichung der Raumtemperatur von der Deckentemperatur ist, umso höher ist seine Leistung,
- die Entladung des Speicherbauteils erfolgt rein passiv ohne Einflussmöglichkeit des Nutzers, was Akzeptanzwillen voraussetzt,
- die Gewährleistung der Raumtemperatur ist nur bei regelbarem Zusatzsystem gegeben. Eingeführt sind ergänzende, schnell regelbare Heizsysteme. Zusatzkühlsysteme (Umluftkühler, zusätzliches oberflächennahes Rohrregister in der Decke, abgehängtes Kühlsegl usw.) sollten in die Betrachtung

■ Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück

F+E TGA Jößnitz (Plauen) und Westsächsische Hochschule Zwickau (FH)

tung mit dem Bauherren und Nutzer einbezogen werden,

- eine Abrechenbarkeit der verbrauchten Energie ist bei kleinen Mietbereichen meistens nicht gegeben. Im „Normalfall“ wird die gesamte Deckenfläche ohne Rücksicht auf spätere Raumaufteilungen mitunter sogar über unterschiedliche Nutzer- bzw. Mietbereiche hinweg mit Rohrregistern eines steuerbaren Wasserkreises belegt. Außerdem ist die Wirkung der Kühl- und/oder Heizfunktion geschossübergreifend gewünscht,
- die Steuerung der Beladung ist nach Prognose (Bedarf, Witterungsverlauf) und zeitlichem Temperaturangebot der Quelle zu optimieren. Indizien für den Ladezustand sind die Rücklauftemperatur und die Spreizung. Zur Vermeidung des zeitgleichen Kühlens und Heizens bei installiertem Zusatzsystem ist unbedingt ein „Energienullband“ vorzusehen, in dem weder geheizt noch gekühlt wird (z. B. unterhalb $t_E = 22^\circ\text{C}$ heizen, oberhalb $t_E = 25^\circ\text{C}$ kühlen).
- ist keine RLT-Anlage vorhanden, muss die Wassertemperatur angehoben werden, wodurch Kühlpotential ungenutzt bleibt, denn bei Kondensationsgefahr (Wetteränderung) ist im Gegensatz zu üblichen Kühldecken oder -segeln infolge der großen Systemträgheit das Absperren des Wasserkreises wirkungslos. Besonders un-

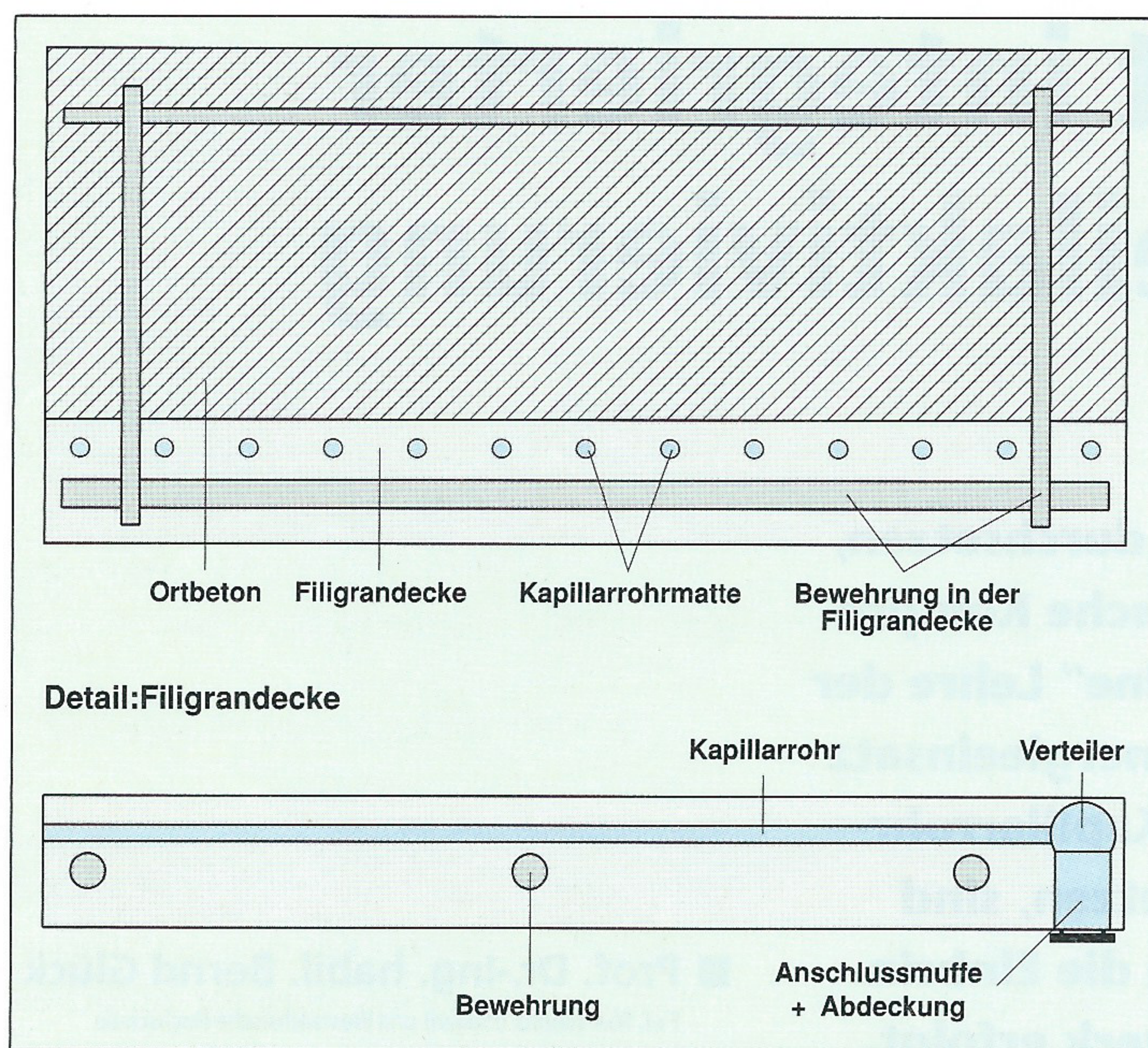


Bild 1: Schnitt durch eine Geschossdecke bestehend aus einer Filigrandecke mit integrierter Kunststoff-Kapillarrohrmatte und Ortbeton.

Der Anschluss der Kapillarrohrmatte wird bei der vorgestellten Detaillösung deckenbündig mit einer Muffe und einer Schutzkappe abgeschlossen

günstig wirkt sich die ungleiche Raumnutzung aus. Räume mit geringer Wärmelast und/oder hoher Feuchtelast sind besonders gefährdet.

Die Selbstregelung impliziert stets auch eine gewisse Energieverschwendung, d. h., die beschriebene thermische Bauteilaktivierung ist vor allem bei Umwelteneigeeinsatz gerechtfertigt. Wenn kostengünstige Energie nur zeitlich begrenzt zur Verfügung steht (z. B. infolge des Temperaturtagesganges), ist es aus umweltrelevanten und aus kostenmäßigen Gesichtspunkten vorteilhaft, diese Energie bis zur Bedarfsanforderung zwischenspeichern. Wenn die Masse des Baukörpers ohnehin verfügbar ist – d. h. die Geschossdecken massiv in einer Dicke von etwa 300 mm ausgeführt sind –, liegen optimale Bedingungen für den Einsatz der thermischen Bauteilaktivierung vor. Nur was nichts kostet und die Umwelt nicht belastet, darf evtl. verschwendet werden!

In sehr vielen Fällen wird die thermische Bauteilaktivierung aber nur eingesetzt, weil die niedrigeren Investitionskosten dazu „verlocken“. Die Betriebskosten finden nur untergeordnete oder überhaupt keine Beachtung. Auch das Anliegen der Umweltent-

lastung wird oftmals ignoriert, beispielsweise, wenn man konventionell erzeugte Kälte und/oder Wärme zur Beladung der Decken einsetzt. Durch Speicherverluste und nicht beeinflussbare, oftmals unnötige Wärmeströme vom Bauteil an den Raum bzw. umgekehrt, treten höhere Verbrauchswerte als bei zeitgleicher Bedarfsdeckung auf.

Übliche bautechnische Lösungen

Thermisch aktive Massivdecken werden durch zwei im Grundsatz unterschiedliche Konstruktionen realisiert.

Erstens erfolgt die Integration von wasserdurchflossenen Rohrregistern in der zu erstellenden Betondecke. Sie werden beispielsweise auf Baustahlmatten fixiert, die innerhalb der Stahlbewehrung angeordnet sind, und anschließend wird der plastische Beton in die Schalung eingebracht. Der Beton umhüllt die Bewehrung und die Rohrregister vollständig und härtet in dieser Form aus. Vorteilhaft ist, dass das Rohrregister in der Höhe fast beliebig eingeordnet werden kann. Zum Einsatz kommen derzeit vorwiegend mäanderförmig verlegte Rohre der Abmessungen 17 x 2 mm im Abstand von 150 mm. Thermodynamisch und hydraulisch bessere Eigenschaften haben allerdings Kunststoff-Kapillarrohrmatten mit Röhrchen 4,3 x 0,9 mm im Abstand von 30 mm.

Den Hauptnachteil stellt die aufwendige Fertigung dar, denn der übliche Bauablauf der Deckenfertigung muss infolge

des Einbringens und Fixierens des Rohrregisters unterbrochen werden. Das Betonieren muss besonders sorgfältig erfolgen, damit keine Beschädigung des Rohrregisters erfolgt. Zur Kontrolle ist das Rohrregister unter Überdruck zu setzen, und dieser Überdruck ist auch kontrolliert aufrecht zu erhalten. Hierzu bedarf es aufwendiger Druckhalte- und Kontrollsysteme.

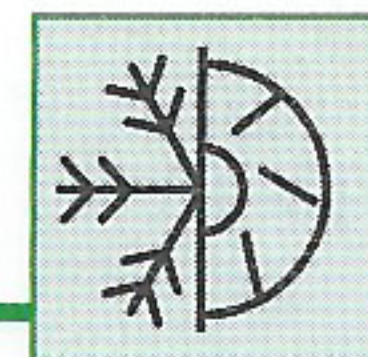
Die bautechnische Lösung ist in erster Linie zur Kälte- und Wärmespeicherung in der Decke und zur zeitverschobenen passiven, stark trägheitsbehafteten Lastkompensation im Raum geeignet. Eine rasche, bedarfsangepasste Lastkompensation ist mit dieser Konstruktion nicht möglich.

Die zweite Form der thermischen Aktivierung der Decke wird durch die nachträgliche, stoffschlüssige Verbindung zwischen fertiger Betondecke und einer eingebetteten Rohrschicht gestaltet. Es werden beispielsweise eine Kunststoff-Kapillarrohrmatte mit Röhrchen 3,4 x 0,55 mm im Abstand von 15 mm in die erste Lage des Deckenputzes eingebracht und mit der zweiten Lage die völlige Überdeckung des Rohrregisters sowie die endgültige Oberflächengestaltung vollzogen. Besonders positiv ist hierbei, dass die Fertigung der Geschossdecke in üblicher Weise erfolgen kann. Vorteilhaft ist weiterhin, dass diese bautechnische Lösung auch für die nachträgliche Anbringung geeignet ist und dass optisch sowie akustisch gute Eigenschaften erreicht werden.

Nachteilig sind die zusätzlichen Arbeitsgänge des Verputzens und der Integration des Rohrregisters, die Zeitaufwand und Kosten verursachen.

Diese Konstruktion ist vorzugsweise zur trägheitsarmen Lastkompensation im Raum geeignet. Eine Speicherung von Kälte oder Wärme, beispielsweise die Nutzung der tiefen nächtlichen Temperaturen zur „Einlagerung von Umweltenergie“, ist nur begrenzt möglich.

In beiden Fällen ist die thermische Aktivierung der Decke durch Einbringen von Rohrregistern nur mit erheblichem Mehraufwand auf der Baustelle erreichbar, und die thermische Aktivierung wirkt hauptsächlich zeitverzögert mit großer Speicherwirkung oder bevorzugt trägheitsarm mit geringer Speichermöglichkeit. Will man beide thermodynamischen Vorteile nutzen, sind zwei in der



Höhe versetzte Rohrregister anzuordnen. In [1] werden Vorschläge und Berechnungen hierzu vorgestellt.

Neuartige bautechnische Lösung

In eine vorgefertigte Deckenplatte – eine sogenannte Filigrandecke – wird bei der Herstellung im Betonwerk eine Kunststoff-Kapillarrohrmatte integriert. Diese Filigrandecken sind 4 bis 7 cm – in der Regel 5 cm – dick und an der Unterseite glatt. Sie dienen als verlorene Schalung für die zu errichtende Geschossdecke, die durch eine Ortbetonschicht auf die gewünschte Dicke gebracht wird. Die Filigrandecken enthalten bereits die untere Bewehrungslage für die Geschossdecke. Ein teilweise einbetonierter Gitterträger, der die Schubspannungen aufnimmt, ist in der Höhe nach der Fertigdecke bemessen. Die Deckenkonstruktion ist im Bild 1 gezeigt. Die Fertigteilabmessungen betragen 2,4 m bis 3 m Breite und bis zu 10 m Länge. Sie richten sich nach den benötigten Spannweiten und den möglichen Transportmaßen. In der Regel liegen die Filigrandecken auf Wänden oder Betonbalken auf. Sie werden bei größeren Spannweiten durch zusätzliche Joche während der Deckenfertigstellung abgestützt. Wegen der geringen Dicke des Filigranelementes kann nur eine Kunststoff-Kapillarrohrmatte – beispielsweise die sogenannte „Betonmatte“ der Fa. Clina in Berlin mit den Röhrchenabmessungen 4,3 x 0,8...0,9 mm und einem Rohrabstand von 30 mm – eingegossen werden.

Die Hauptvorteile liegen auf der bautechnischen Seite:

- einfache und präzise Einbringung der Kapillarrohrmatte in die Filigrandecke unter genau definierten und reproduzierbaren Bedingungen im Betonwerk,
- mit der Fertigung der Filigrandecke sind bereits die gesamten Bauaufwendungen der thermischen Bauteilaktivierung realisiert,
- kurze Montagezeiten auf der Baustelle (keine Unterbrechung der üblichen Deckenfertigung, kein Abdrücken des Rohrregisters auf der Baustelle, Wegfall von zusätzlichen Kontrollen bei der Ortbetoneinbringung).

Die Lage der Kunststoff-Kapillarrohrmatte kann unterhalb oder oberhalb der Bewehrung eingeordnet werden. Liegt sie unterhalb, ist die Dynamik der thermi-

schen Lastkompensation besser und der Speichereffekt reduziert. Wird die Kunststoff-Kapillarrohrmatte oberhalb der Bewehrung eingeordnet, so ergeben sich umgekehrte Verhältnisse. Damit kann durch die höhenmäßige Einordnung der Kapillarrohrmatte die thermische Eigenschaft der Decke gezielt beeinflusst werden. Bei mehreren Bewehrungslagen ist selbstverständlich auch eine dazwischenliegende Kapillarrohrmatte möglich. Der Anschluss wird deckenbündig an die Unterseite der Filigrandecke geführt und beispielsweise durch eine abnehmbare Schutzkappe oder einem entfernbar Stopfen bis zum endgültigen Anschluss des Installationssystems verschlossen.

Zum universellen Anschluss der Kapillarrohrmatte kann die Anschlussleitung auch in vorgegebener Länge aus dem Deckenelement nach unten herausgeführt werden. Die Anschlussleitung ist in diesem Fall während des Transportes der Filigrandeckenelemente besonders zu schützen.

In Abwandlung der Konstruktion ist auch ein oberer oder ein kombinierter Anschluss (unten und oben) möglich. Bei oberem Anschluss ist die Weiterführung der Leitung vor der Herstellung des Ortbetons vorzunehmen. Sie kann beispielsweise im Ortbeton direkt erfolgen oder in zu erstellenden Aussparungen vorläufig enden.

Bewertung der thermodynamischen Eigenschaften

Eine „Normprüfung“ zur Bewertung der dynamischen Leistungsfähigkeit von Deckenspeichern unter praxisnahen Bedingungen existiert nicht.

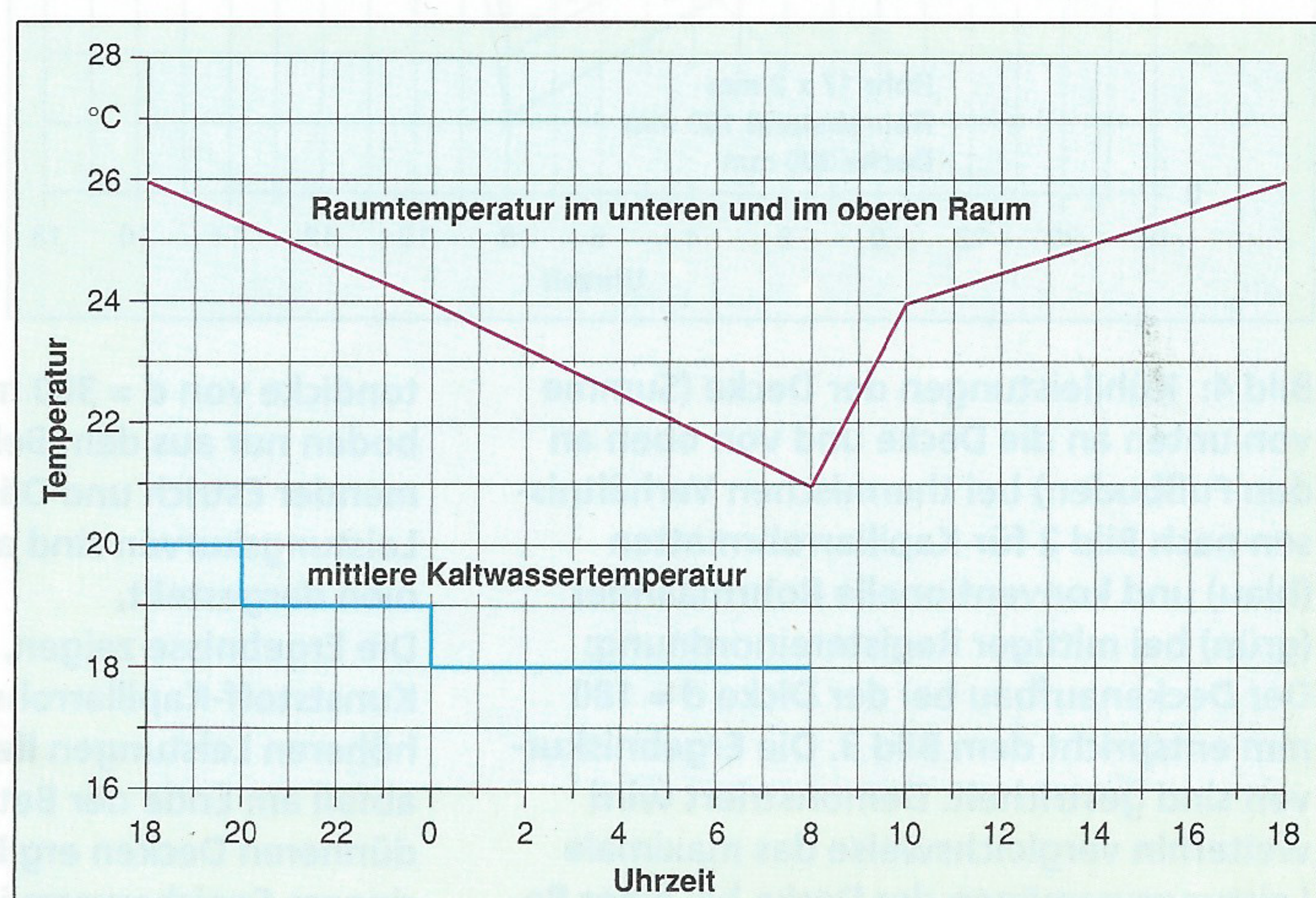
Es wäre möglich, eine komplexe Simulation eines Raumes mit dem jeweiligen

Speicherelement unter definierten Lastverläufen vorzunehmen und im Ergebnis den Raumtemperaturverlauf zu ermitteln. Diese Verläufe wären dann aber auch von den individuellen Raumeinflüssen (z. B. vom Speicherverhalten der übrigen Umfassungen und des Interieurs) stark überlagert, so dass die Wirksamkeit des Speicherelementes bei Variationen der Parameter (z. B. der Geometrie und Lage des Rohrregisters im Bauteil) nicht objektiv und verallgemeinerungsfähig darstellbar sind.

Es werden deshalb ähnlich dem Verfahren einer Normprüfung „enger“ definierte Randbedingungen für das Speicherbauteil, die natürlich möglichst realistisch sein sollten, bevorzugt. Der Raum wird dabei nur über die zeitlichen Raumtemperaturverläufe angeschlossen. Für den unteren und oberen Raum gelten bei Geschossbauten: $t_{Ru}(\tau) = t_{Ro}(\tau)$. Der Temperaturverlauf des Kaltwassers $t_w(\tau)$ und die Betriebszeiten sind für alle Varianten einheitlich definiert.

Für diese „Normbedingungen“ werden die Kühlleistungen der unterschiedlichen Systeme während des Einschwingens

Bild 2: Normierter Raumtemperaturverlauf aufgrund praktischer Erfahrungen für gekühlte Büroräume und Wassertemperaturverlauf zur wirklichkeitsnahen Bewertung der unterschiedlichen Deckenkonstruktionen hinsichtlich der Kühlleistung, Raumtemperatur unter und über der Decke: Zu Arbeitsbeginn um 8.00 Uhr 21 °C, schnell ansteigend durch innere Lasten bis 10.00 Uhr, weiter langsam steigend bis Dienstschluss um 18.00 Uhr, dann infolge Nachtkühlung und fehlender Lasten Abfall bis auf 21 °C. Zur Kühlung steht Kaltwasser ab 18.00 Uhr bis 8.00 Uhr mit sinkender Temperatur (angenommen wurden Temperaturstufen) zur Verfügung



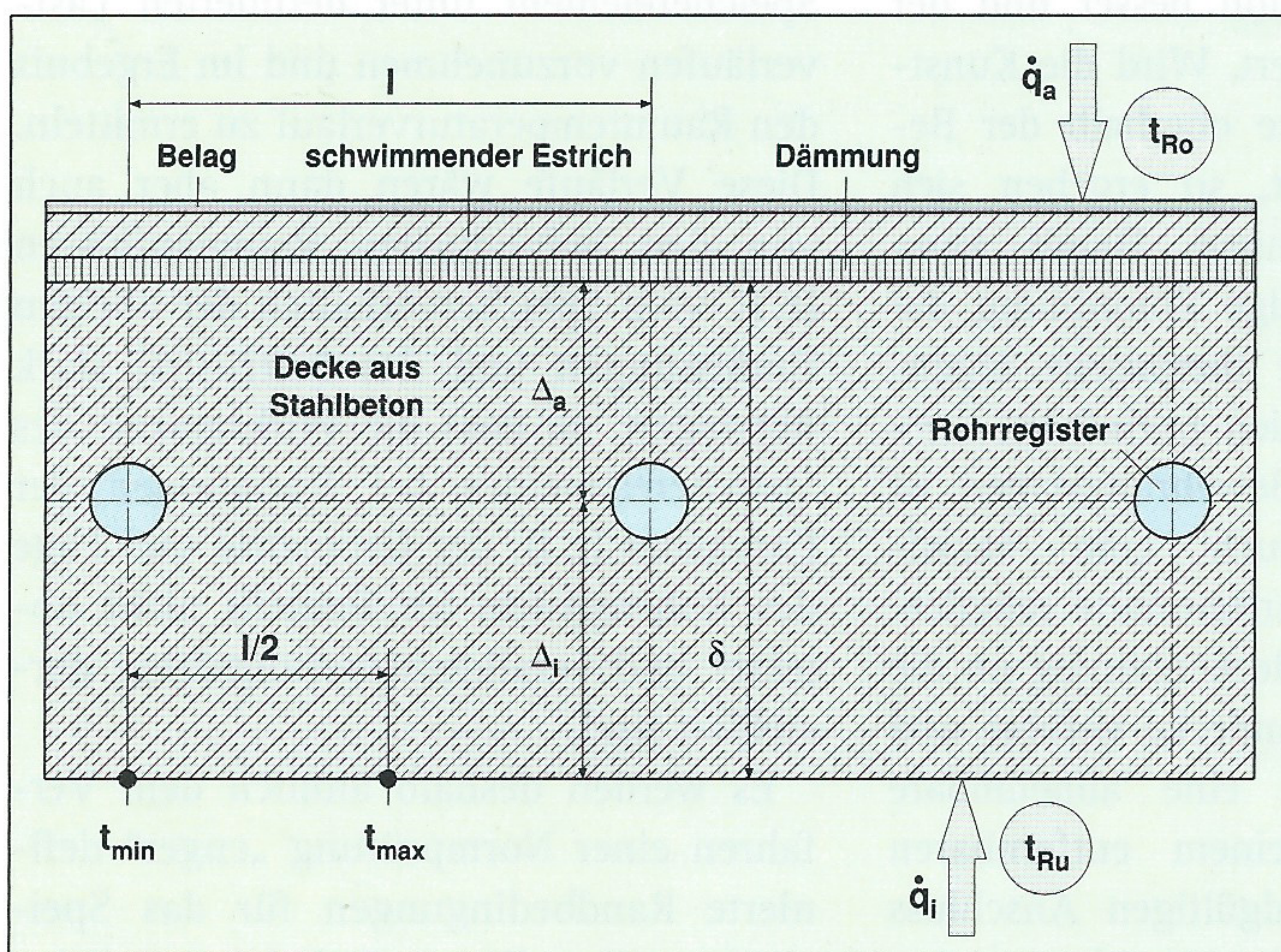


Bild 3: Deckenkonstruktion mit Rohrregister in der Deckenmitte ($\Delta_i = \Delta_a$) und Fußbodenaufbau:

Deckenbeton: $\delta = 180 \text{ mm}$, $\lambda = 1,4 \text{ W/(m K)}$, $c = 1050 \text{ J/(kg K)}$, $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$

Kapillarrohrmatte: $4,3 \times 0,8 \text{ mm}$,
 $\lambda_R = 0,21 \text{ W/(m K)}$, $\alpha_F = 1000 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
 oder Rohrmäander: $17 \times 2 \text{ mm}$,
 $\lambda_R = 0,35 \text{ W/(m K)}$, $\alpha_F = 2400 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

Fußboden: $\delta_{\text{Dämmung}} = 30 \text{ mm}$,

$\lambda_{\text{Dämmung}} = 0,04 \text{ W/(m K)}$

$\delta_{\text{schwimmender Estrich}} = 45 \text{ mm}$,

$\lambda_{\text{schwimmender Estrich}} = 1,4 \text{ W/(m K)}$

$\delta_{\text{textiler Belag}} = 10 \text{ mm}$,

$\lambda_{\text{textiler Belag}} = 0,07 \text{ W/(m K)}$

und im eingeschwungenen Zustand (dritter Simulationstag) mit einem Rechenprogramm nach [1] berechnet und miteinander verglichen. Für die Untersuchungen gelten die im Bild 2 getroffenen Festlegungen für die Raumtemperaturen und für die mittlere Wassertemperatur. Von 8.00 Uhr bis 18.00 Uhr ist der Wasserkreislauf nicht in Betrieb.

Beispielhaft werde zunächst die im Bild 3 dargestellte Deckenkonstruktion untersucht. Die geometrischen und wärmetechnischen Daten sind in der Bildunterschrift vermerkt. Im Gegensatz zu den

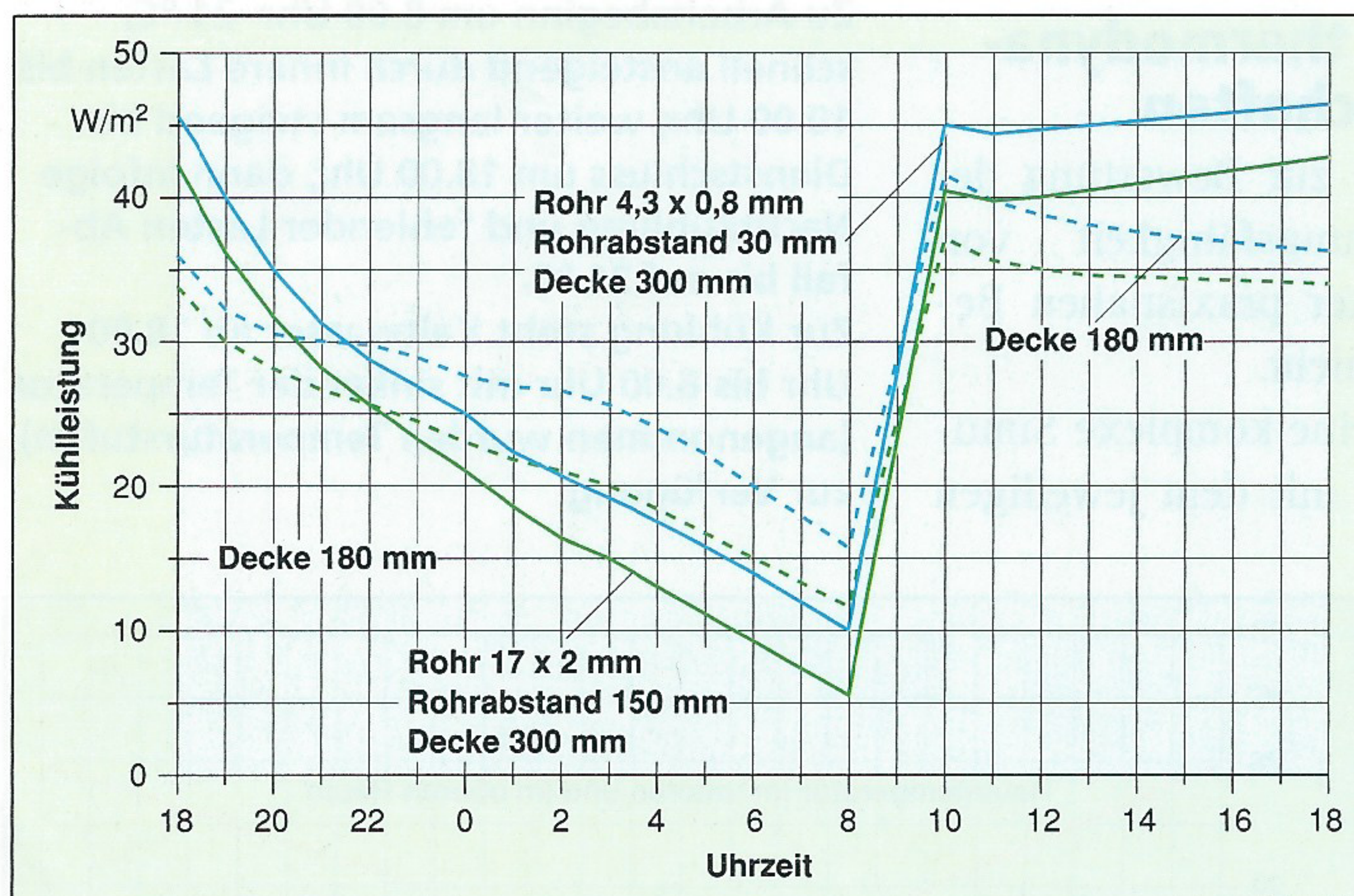


Bild 4: Kühlleistungen der Decke (Summe von unten an die Decke und von oben an den Fußboden) bei thermischen Verhältnissen nach Bild 2 für Kapillarrohrmatten (blau) und konventionelle Rohrmäander (grün) bei mittlerer Registereinordnung: Der Deckenaufbau bei der Dicke $d = 180 \text{ mm}$ entspricht dem Bild 3. Die Ergebniskurven sind gestrichelt. Demonstriert wird weiterhin vergleichsweise das maximale Leistungsvermögen der Decke bei einer Be-

tondicke von $d = 300 \text{ mm}$, wobei der Fußboden nur aus dem Belag besteht (schwimmender Estrich und Dämmung fehlen). Die Leistungskurven sind als durchgezogene Linien dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass integrierte Kunststoff-Kapillarrohrmatten stets die höheren Leistungen liefern. Der Leistungsabfall am Ende der Betriebszeit bei den dünneren Decken ergibt sich durch das geringere Speichervermögen

meist üblichen Betrachtungen ist in diesem Fall eine dünne Decke mit 180 mm Massivbeton und einem Fußbodenaufbau mit Trittschalldämmung und schwimmenden Estrich gewählt worden. Damit stellt diese Decke nicht den Optimalfall dar, da die thermische Ankopplung an den oberen Raum durch den Fußbodenaufbau begrenzt ist und die Deckendicke nur 180 mm beträgt. Variiert wurden die Rohrregister. Sie liegen stets in der Mitte, bestehen aber aus unterschiedlichem Rohrmaterial:

- konventionelle Rohrmäander $17 \times 2 \text{ mm}$, Rohrabstand 150 mm ,
- Kapillarrohrmatten $4,3 \times 0,8 \text{ mm}$, Rohrabstand 30 mm .

Die Kühlleistungen über einen Tag sind für den eingeschwungenen Zustand im Bild 4 dargestellt. Die Leistungskurven sind gestrichelt gezeichnet: Kapillarrohrmatten (blau), konventionelle Rohrmäander (grün).

Vergleichsweise wird das maximale Leistungsvermögen der Decke bei einer Betondicke von 300 mm , wobei der Fußboden nur aus dem textilen Belag besteht (schwimmender Estrich und Dämmung fehlen), gegenübergestellt. Die Leistungskurven bei mittlerer Registereinordnung sind als durchgezogene Linien gezeichnet: Kapillarrohrmatten (blau), konventionelle Rohrmäander (grün).

Die Ergebnisse zeigen, dass integrierte Kapillarrohrmatten stets die höheren Leistungen liefern (siehe auch [2]). Der Leistungsabfall am Ende der Betriebszeit bei den dünneren Decken ergibt sich durch das geringere Speichervermögen. Dieser kann sich noch stärker auswirken, wenn man die im Bild 4 deutlich werdende, größere nächtliche Kühlleistung bei der dünnen Decke wegen zu großer Raumauskühlung durch verkürzte Ladezeiten begrenzen muss.

Die angesprochene verkürzte Ladezeit – beispielsweise von 0.00 Uhr bis 8.00 Uhr mit einer mittleren Kaltwassertemperatur von 18°C – reduziert die nächtliche Auskühlung und führt z. B. zu einer ab 10.00 Uhr erhöhten Raumtemperatur. Diese Annahmen und die Kühlleistung als Ergebnis sind im Bild 5 gezeigt. Deutlich werden der steile Leistungsanstieg zu Mittag und der anschließende große Abfall bis zu Diensten.

Die im Bild 5 dargestellte Charakteristik verdeutlicht, dass die Ermittlungen der Kühlleistungsverläufe sowie die oft-



mals üblichen Berechnungen des Raumtemperaturverlaufs nur vergleichende Aussagen liefern können. Denn beispielsweise die Änderung der Raumtemperatur hat einen eminenten Einfluss auf die Leistung und damit auch auf das Speicherverhalten der Decke. Die im Bild 5 gezeigte Raumtemperaturerhöhung ab 10.00 Uhr könnte durch die Wirkung der inneren Wärmequellen, die nur in einem Raum wirken oder durch die versehentliche, unkontrollierte Fensteröffnung entstanden sein. Dies bedeutet, dass die für das gesamte Gebäude, zumindest für fassadenweise Bereiche, wirkende thermische Bauteilaktivierung in der Realität raumweise sehr differenzierte Temperatur- und Leistungsverläufe zeigen werden.

Untersuchung der thermodynamischen Eigenschaften der neuen Konstruktion

Es wird im Weiteren die im Bild 6 dargestellte Konstruktion mit den in der Bildunterschrift vermerkten geometrischen und wärmetechnischen Eigenschaften betrachtet.

Vergleichende Leistungsbetrachtung

Der ersten Untersuchung liegen die Raum- und mittleren Wassertemperaturverläufe nach Bild 2 zugrunde. Variiert wird die Überdeckung der Kapillarrohrmatte zwischen 9 mm und 35 mm. Die Ergebnisse sind im Bild 7 vergleichend zu den Werten bei mittlerer Registereinordnung dargestellt. Während des Nutzzeitraumes von 8.00 Uhr bis 18.00 Uhr weichen die Leistungen nur relativ ge-

Bild 5: Vergleich der Kühlleistungsverläufe (Summe: unten plus oben) für eine Deckenkonstruktion nach Bild 3 bei unterschiedlichen Raum- und Wassertemperaturverläufen: Deutlich werden die bedeutenden Leistungsänderungen bei nur geringen Temperatur- und Betriebszeitkorrekturen.

Im oberen Bild entsprechen die Temperaturen dem Bild 2 und die Leistungen

7.2.04

ring von der mittleren Lage ab. Sie liegen zwischen den Varianten mit Kapillarrohrmatten und Rohrmäandern. Die Lage im vorgefertigten Deckenelement (Filigrandecke) ist von relativ geringem Einfluss. Sehr bedeutsam ist aber der Verlauf der Kühlleistung nachts während der Ladephase. Die sehr hohen Wärmeaufnahmen vom Raum werden zu einer stärkeren Unterkühlung führen. Bis zu einer gewissen Leistung ist dies vorteilhaft, da dann das Interieur des Raumes

in den instationären Speichervorgang einbezogen wird. Darüber hinausgehend erfolgt aber eine zu starke Abkühlung des Raumes, so dass man in den folgenden Nächten die Kühlung vermindern wird, wodurch auch die eingespeicherte „Kälte“ sinkt und sich die Kühlleistung während der Nutzzeit reduziert. D. h., die im Bild 7 dargestellten roten Kurven sind nicht realisierbar.

Die „Zacken“ in den Leistungskurven resultieren aus den Raumtemperaturver-

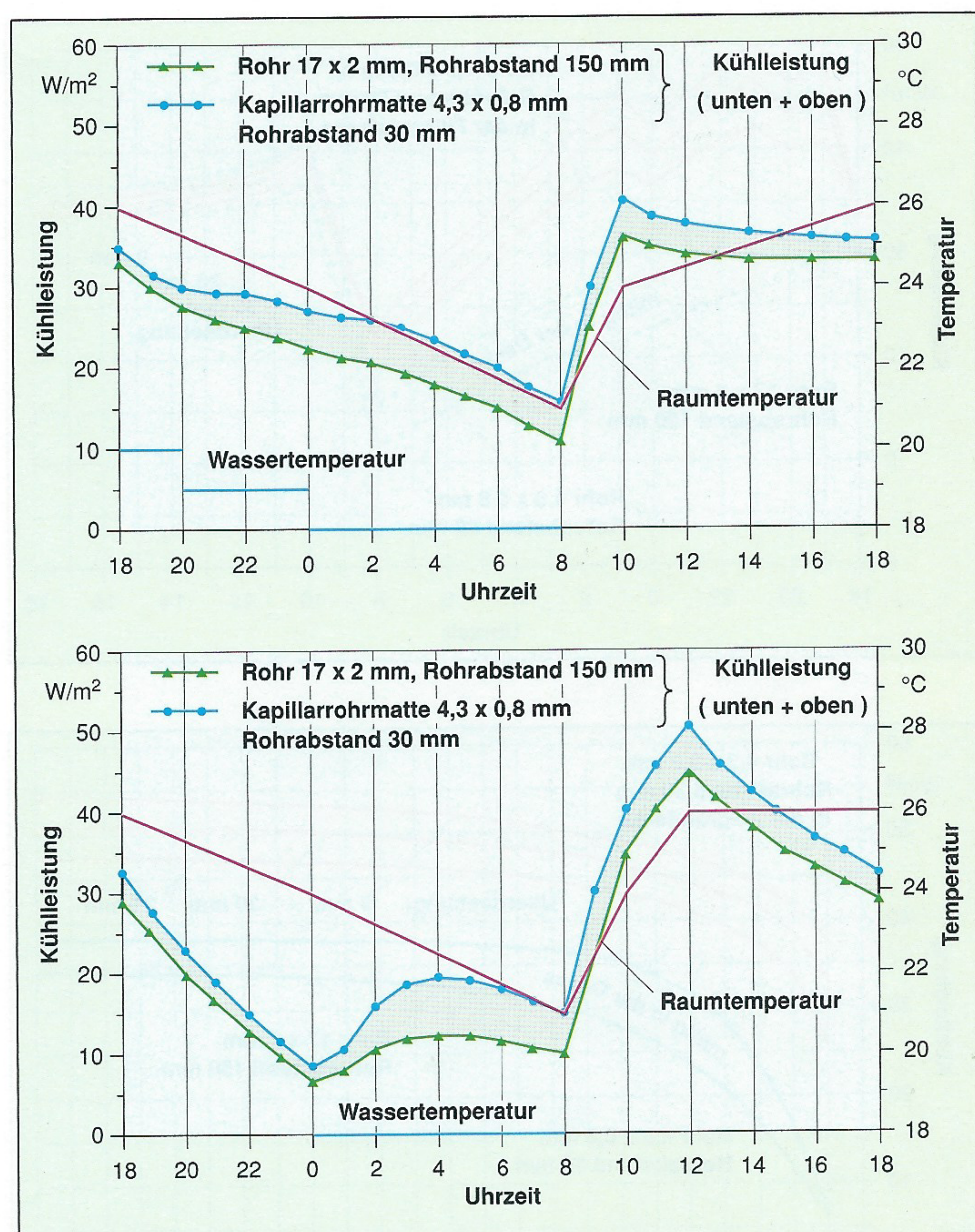


Bild 6: Deckenkonstruktion bestehend aus Filigranelement mit integrierter Kunststoff-Kapillarrohrmatte, Ort beton und Fußbodenaufbau mit Angabe der geometrischen Abmessungen sowie Kennzeichnung der relevanten wärmetechnischen Größen:

Filigrandecke: $\delta_F = 50 \text{ mm}$, $\lambda_F = 1,4 \text{ W/(m K)}$,

$c_F = 1050 \text{ J/(kg K)}$, $\rho_F = 2400 \text{ kg/m}^3$

Deckenbeton: $\delta_B = 130 \text{ mm}$, $\lambda_B = 1,4 \text{ W/(m K)}$,

$c_B = 1050 \text{ J/(kg K)}$, $\rho_B = 2400 \text{ kg/m}^3$

Kapillarrohrmatte: $4,3 \times 0,8 \text{ mm}$,
 $\lambda_R = 0,21 \text{ W/(m K)}$, $\alpha_F = 1000 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

Fußboden: $\delta_{\text{Dämmung}} = 30 \text{ mm}$,

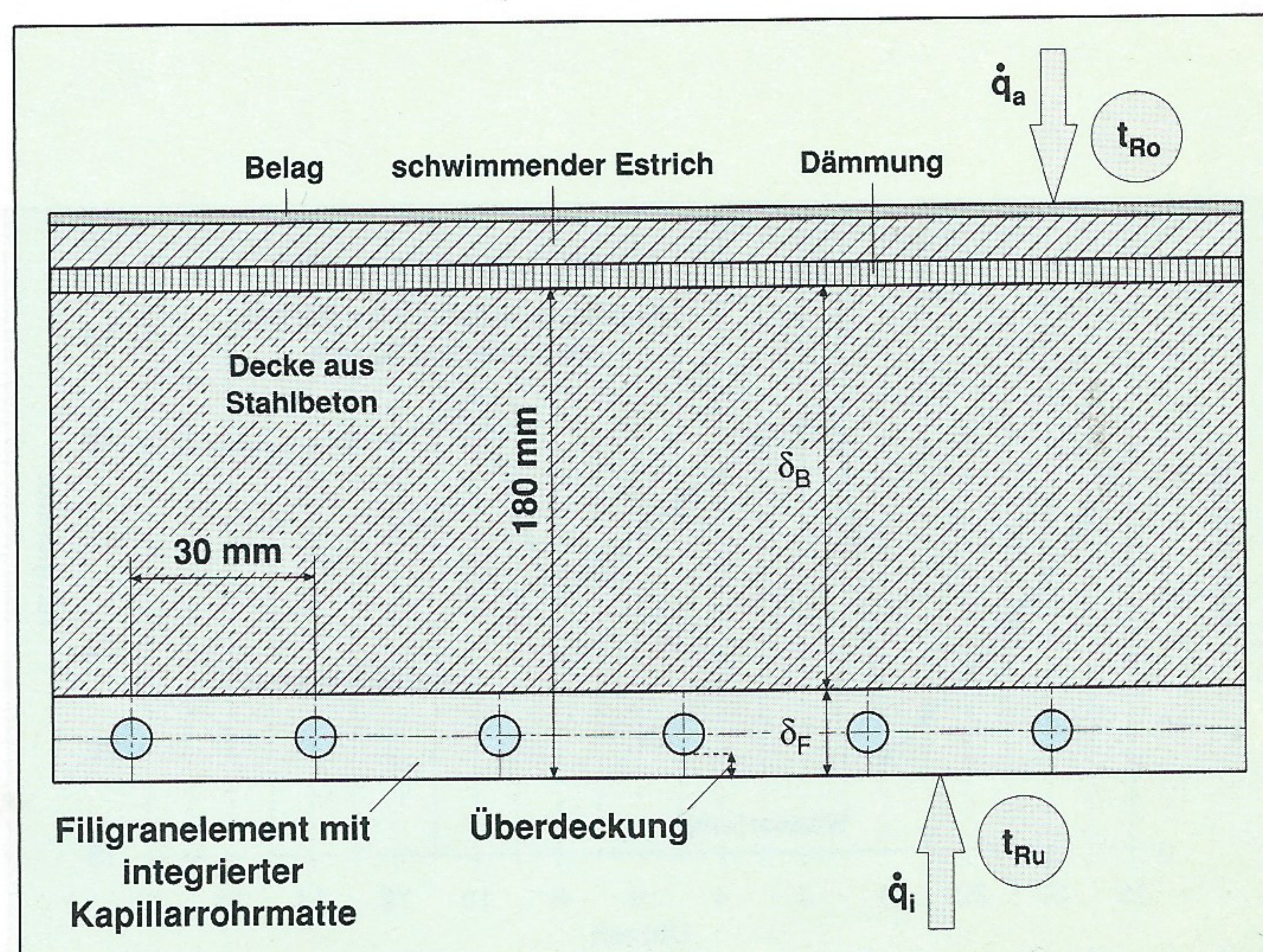
$\lambda_{\text{Dämmung}} = 0,04 \text{ W/(m K)}$

$\delta_{\text{schwimmender Estrich}} = 45 \text{ mm}$,

$\lambda_{\text{schwimmender Estrich}} = 1,4 \text{ W/(m K)}$

$\delta_{\text{textiler Belag}} = 10 \text{ mm}$,

$\lambda_{\text{textiler Belag}} = 0,07 \text{ W/(m K)}$



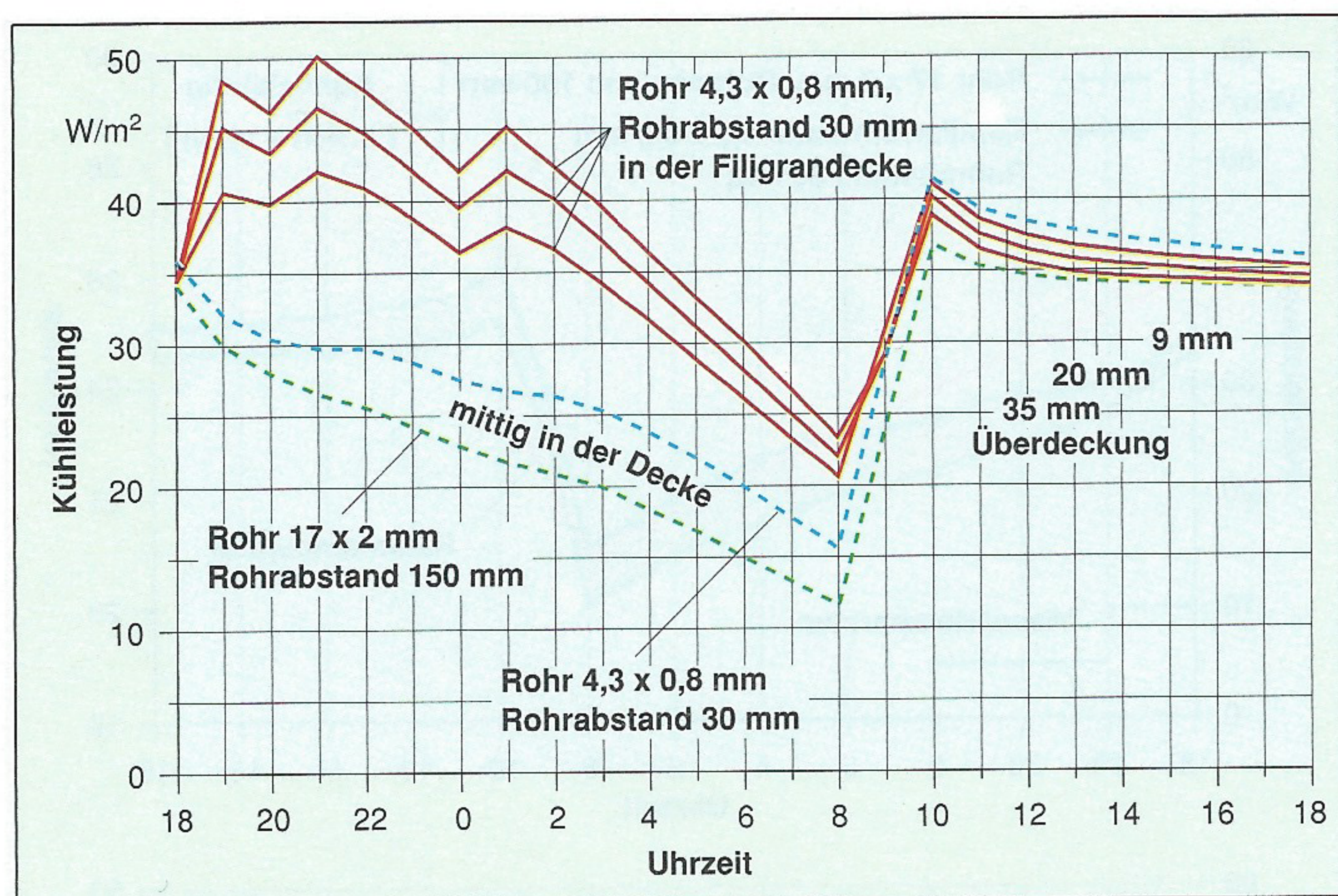


Bild 7: Kühlleistungen der Decke (Summe von unten an die Decke und von oben an den Fußboden) bei thermischen Verhältnissen nach Bild 2:

Der Deckenaufbau (Dicke 180 mm) entspricht Bild 3 bzw. Bild 6. Die Leistungskurven bei mittlerer Registereinordnung (Bild 3) sind gestrichelt dargestellt: Kapillarrohrmatten (blau), konventionelle Rohrmäander (grün). Diese Kurven sind mit dem Bild 4 identisch. Die weiteren Ergebnisse (rote Kurven) gelten für die Einordnung der Kapillarrohrmatte nach Bild 6 bei verschiedenen Überdeckungen. Die sehr starke nächtliche Kühlung ist nicht praktikabel

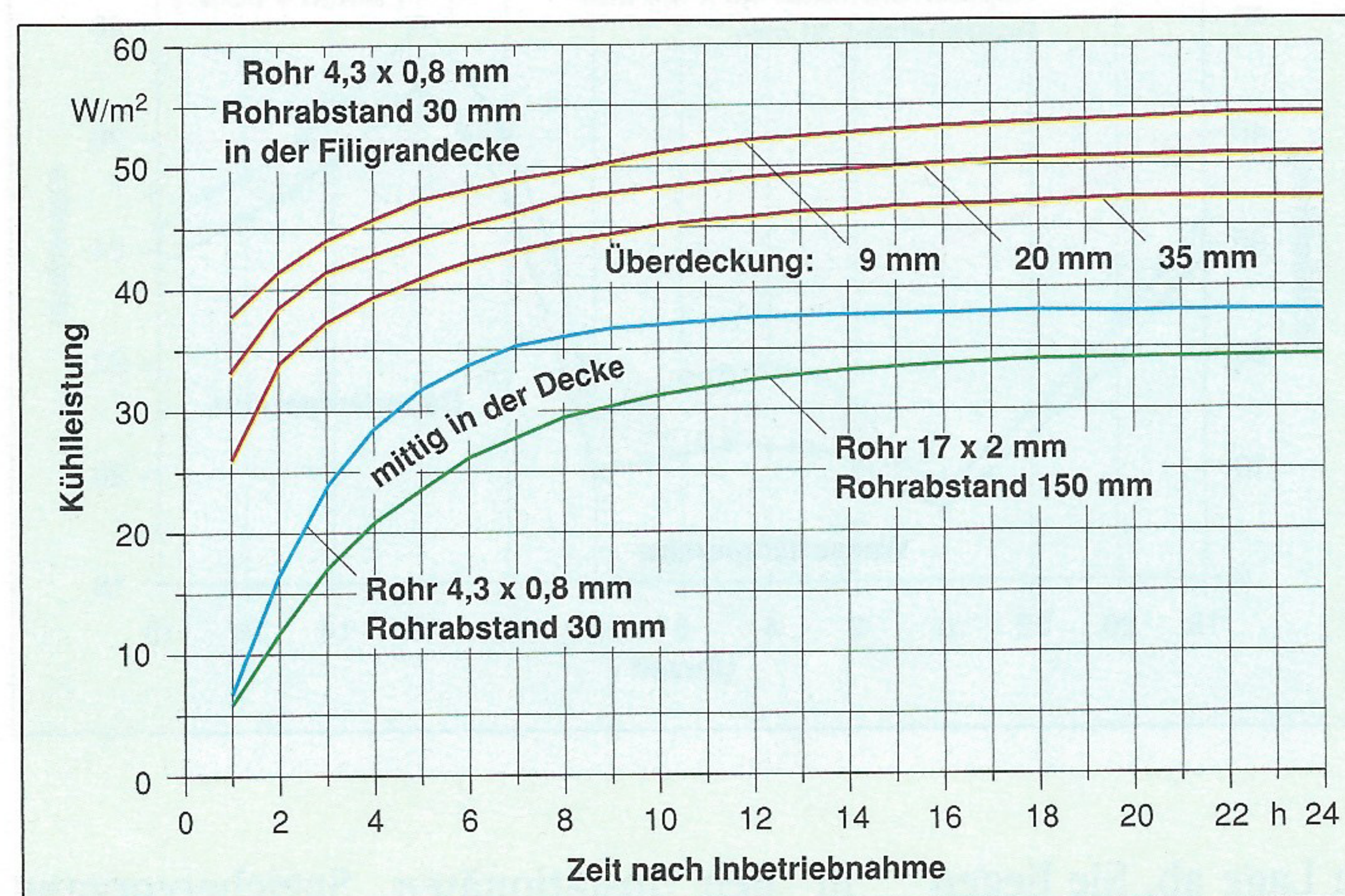


Bild 8: Inbetriebnahmeverhalten (Kühlleistungen) der Decke (Summe von unten an die Decke und von oben an den Fußboden) bei der Raumtemperatur von 24 °C: Zu Beginn lag eine homogene Deckentemperatur von 24 °C vor. Zum Zeitpunkt 0 springt die mittlere Kaltwassertemperatur ohne Zeitverzögerung auf 18 °C und bleibt konstant.

Der Deckenaufbau (Dicke 180 mm) entspricht Bild 3 bzw. Bild 6. Die Leistungskurven bei mittlerer Registereinordnung

(Bild 3) haben einen kleinen Anstieg und die Endwerte sind auch gering: Kapillarrohrmatten (blau), konventionelle Rohrmäander (grün). Die Leistungen liegen nach 2 h Betriebszeit um etwa 15 W/m². Damit ist keine bedarfsgerechte Lastkompensation möglich. Die Leistungen der Kapillarrohrmatten in der vorgefertigten Decke (rote Kurven) betragen nach einer Stunde bereits über 30 W/m², so dass eine aktive Leistungsanpassung realisierbar ist

laufen und vor allem aus den Temperaturänderungen und Schaltstufen bei der Kühlwasserbereitstellung. Sie deuten auf eine „reaktionsschnelle“ Leistungsanpassung hin.

Anfahrverhalten der neuen Konstruktion

Die mit Kapillarrohrmatten bestückte Filigrandecke steht konstruktiv den üblichen Kühldecken sehr nahe, und es interessiert deshalb auch in besonderem Maße die Dynamik bei einer bedarfsgerechten Nachkühlung am Tage mit dem Ziel, eine Spitzenlastkompensation vorzunehmen.

Es wird deshalb das Inbetriebnahmeverhalten ausgehend von dem sehr ungünstigen Zustand einer homogenen Deckentemperatur von 24 °C bei einer konstanten Raumtemperatur von 24 °C mit einer mittleren Wassertemperatur von 18 °C untersucht. Die Ergebnisse finden sich grafisch aufbereitet im Bild 8. Vergleichend sind die Ergebnisse bei mittlerer Rohrregisteranordnung (konventionelle Mäander und Kapillarrohrmatten) vermerkt.

Die Konstruktion mit der Filigrandecke zeigt, dass bereits nach einer Stunde über 30 W/m² verfügbar sind (rote Kurven). Damit ist eine aktive Leistungsan-

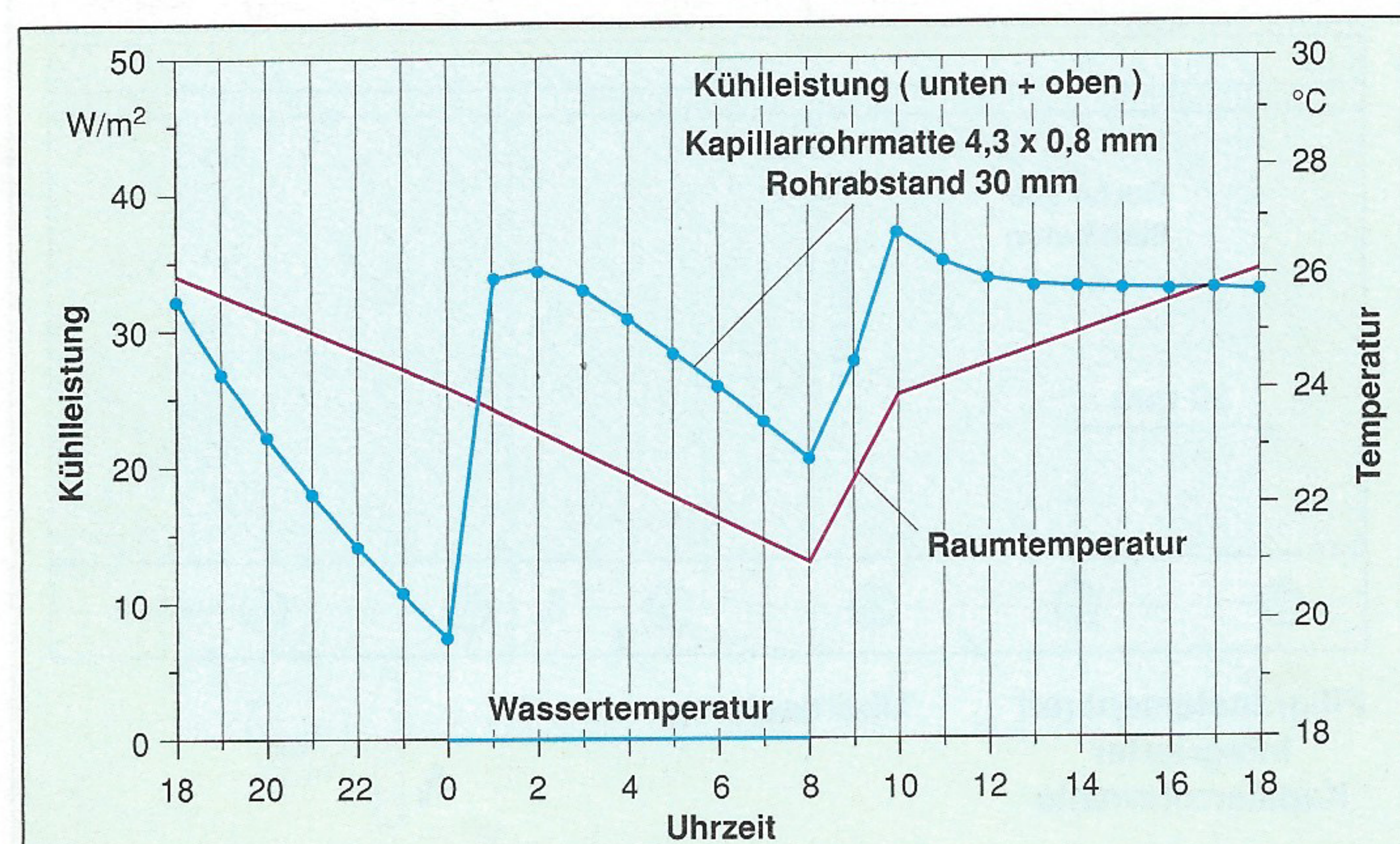
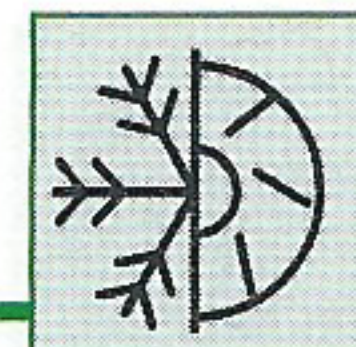


Bild 9: Kühlleistung der Massivdecke mit integrierter Kapillarrohrmatte im Filigranelement:

Die Raumtemperatur beträgt um 8.00 Uhr 21 °C, um 10.00 Uhr 24 °C und erreicht um 18.00 Uhr 26 °C. Der Wasserkreis arbeitet mit 18 °C zwischen 0.00 Uhr und 8.00 Uhr. Die nächtliche Kühlleistung ist sehr hoch. Die Charakteristik während der Nutzungszeit entspricht gut der Anforderung



passung an den Kühlbedarf des Raumes möglich. Diese Möglichkeit besteht bei mittlerer Einordnung nicht.

Die Endwerte nach „unendlich langer“ Zeit entsprechen den Leistungswerten bei stationärem Betrieb, wie gesonderte Berechnungen mit einem speziellen Rechenprogramm nach [1] zeigen.

Dass die roten Kurven nach dem raschen Anstieg sehr langsam den hohen Endwert der Kühlleistung erreichen, liegt an der oberflächennahen Lage der Kapillarrohrmatten, wodurch es länger dauert bis der gesamte Beton abgekühlt ist.

Variationen der Betriebsweise für die neue Konstruktion

Da die Kurvenverläufe im Bild 7 wegen der hohen nächtlichen Kühlung nicht praktikabel sind, werden unterschiedliche Betriebsverhältnisse betrachtet, denen allen eine verkürzte nächtliche Kühlung eigen ist. Weiterhin wird für die nachfolgenden Betrachtungen eine etwa mittige Lage der Kapillarrohrmatte im Filigranelement angenommen.

Im Bild 9 wird von dem Raumtemperaturverlauf nach Bild 2 ausgegangen, die Kaltwasserbeaufschlagung erfolgt aber nur nachts von 0.00 Uhr bis 8.00 Uhr. Die Kühlleistung wird wegen der oberflächennahen Anordnung der Kapillarrohrmatte direkt von dieser Betriebszeit beeinflusst.

Die Kühlleistung erreicht während der Nutzzeit um 10.00 Uhr das Maximum 37 W/m², sie sinkt bis um 18.00 Uhr auf 32 W/m² ab. Damit liegt eine gute Charakteristik vor, wenn die intensive nächtliche Kühlung am Morgen nicht zu einer zu niedrigen Raumtemperatur führt.

Die im Bild 10 dargestellten Verhältnisse gehen von einem gering veränderten Raumtemperaturverlauf aus. Er steigt vormittags rasch an und bleibt ab 12.00 Uhr mit 26 °C konstant. Die Betriebsbedingungen des Kaltwasserkreises bleiben wie im Vorgängerbeispiel unverändert bestehen. Die Leistungscharakteristik ist durch die kleine Änderung des Raum-

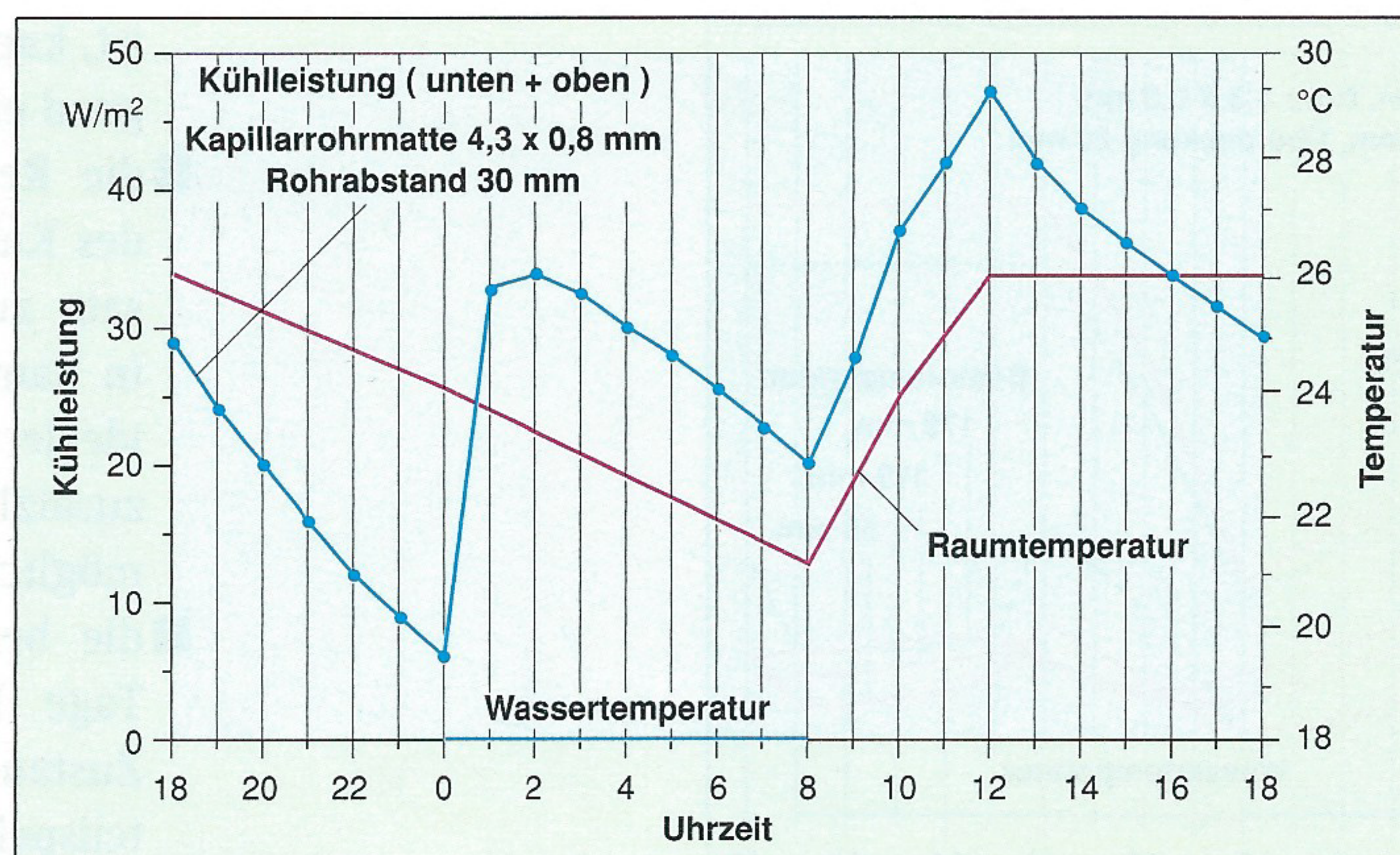


Bild 10: Kühlleistung der Massivdecke mit integrierter Kapillarrohrmatte im Filigranelement:

Die Raumtemperatur beträgt um 8.00 Uhr 21 °C, um 10.00 Uhr 24 °C und ab 12.00 Uhr 26 °C. Der Wasserkreis arbeitet mit 18 °C zwischen 0.00 Uhr und 8.00 Uhr. Die nächtliche Kühlleistung ist sehr hoch. Die Charakteristik während der Nutzzeit entspricht in der Regel nicht den Anforderungen, so dass nachmittags ein Anstieg der Raumtemperatur folgen wird

temperaturverlaufs jedoch stark verändert.

Die Kühlleistung erreicht während der Nutzzeit um 12.00 Uhr das Maximum 46 W/m², sie sinkt bis um 18.00 Uhr relativ stark auf 29 W/m² ab. Die Leistungscharakteristik wird in den meisten Fällen die Anforderung am Nachmittag nicht erfüllen, so dass ein Raumtemperaturanstieg auftreten wird.

Die oberflächennahe Rohrlage an der Deckenunterseite ergab gemäß Bild 8 ein sehr gutes dynamisches Verhalten. Diese Eigenschaft der Decke soll im Weiteren für eine Nachkühlung der Decke am Nachmittag genutzt werden. Unter Beibehaltung des Raumtemperaturverlaufs wie im Bild 10 wird nunmehr außer der nächtlichen Kühlung in der Zeit von 12.00 Uhr bis 17.00 Uhr ebenfalls der Wasserkreis mit der mittleren Temperatur von 18 °C betrieben. Das Ergebnis ist im Bild 11 aufgezeichnet. Der Verlauf der Kühlleistung zeigt eine enorme Veränderung.

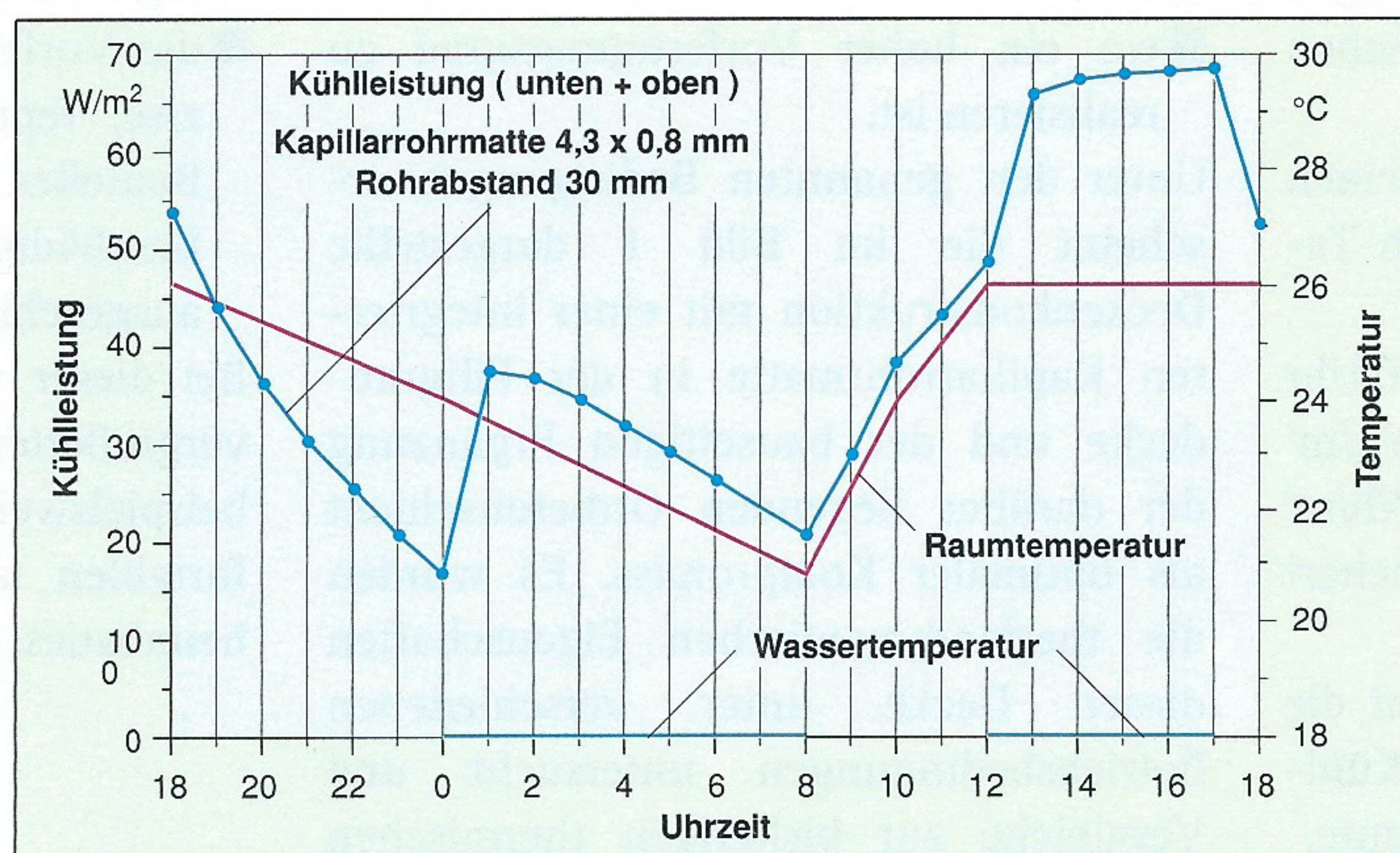


Bild 11: Kühlleistung der Massivdecke mit integrierter Kapillarrohrmatte im Filigranelement:

Die Raumtemperatur beträgt um 8.00 Uhr 21 °C, um 10.00 Uhr 24 °C und ab 12.00 Uhr 26 °C. Der Wasserkreis arbeitet mit 18 °C zwischen 0.00 Uhr und 8.00 Uhr. Es wird beispielsweise Wasser aus dem Kühlturm verwendet. Die nächtliche Kühlleistung ist beachtlich. Außerdem wird der Kaltwasserkreis ebenfalls mit 18 °C zwischen 12.00 Uhr und 17.00 Uhr betrieben. Hierbei wird z. B. Wasser aus einem Kaltwassersatz verwendet. Die Charakteristik am Nachmittag entspricht der einer Kühldecke, d.h., die Leistung kann dem Kühlbedarf des Raumes angepasst werden

Die Kühlleistung erreicht während der Nutzzeit um 12.00 Uhr den Wert 48 W/m² aufgrund der im Bauteil eingespeicherten „Kälte“. Infolge der Nachkühlung kann nachmittags eine Leistung bis 68 W/m² von der Decke aufgenommen werden. Die Leistungscharakteristik während dieser Direktkühlung ist fast völlig frei gestaltbar, indem die Kaltwassertemperatur und die Betriebszeit variiert werden. Damit ist eine ideale Leistungsanpassung an den Bedarf möglich,

so dass auch eine vorgegebene Raumtemperatur gewährleistet werden kann.

Für dieses letzte Beispiel wurden weiterhin die Temperaturverhältnisse an den Bauteiloberflächen und im Inneren des Bauteiles detailliert untersucht. Die Ergebnisse finden sich im Bild 12.

■ Die Fußbodentemperatur (grün gepunktete Kurve) folgt wegen der relativ geringen Kühlleistung des Bodens (verursacht durch den Fußbodenaufbau) recht genau der Raumtemperatur. Die Kühlleistung des Bodens beträgt nur 1,2 bis 5,5 W/m²,

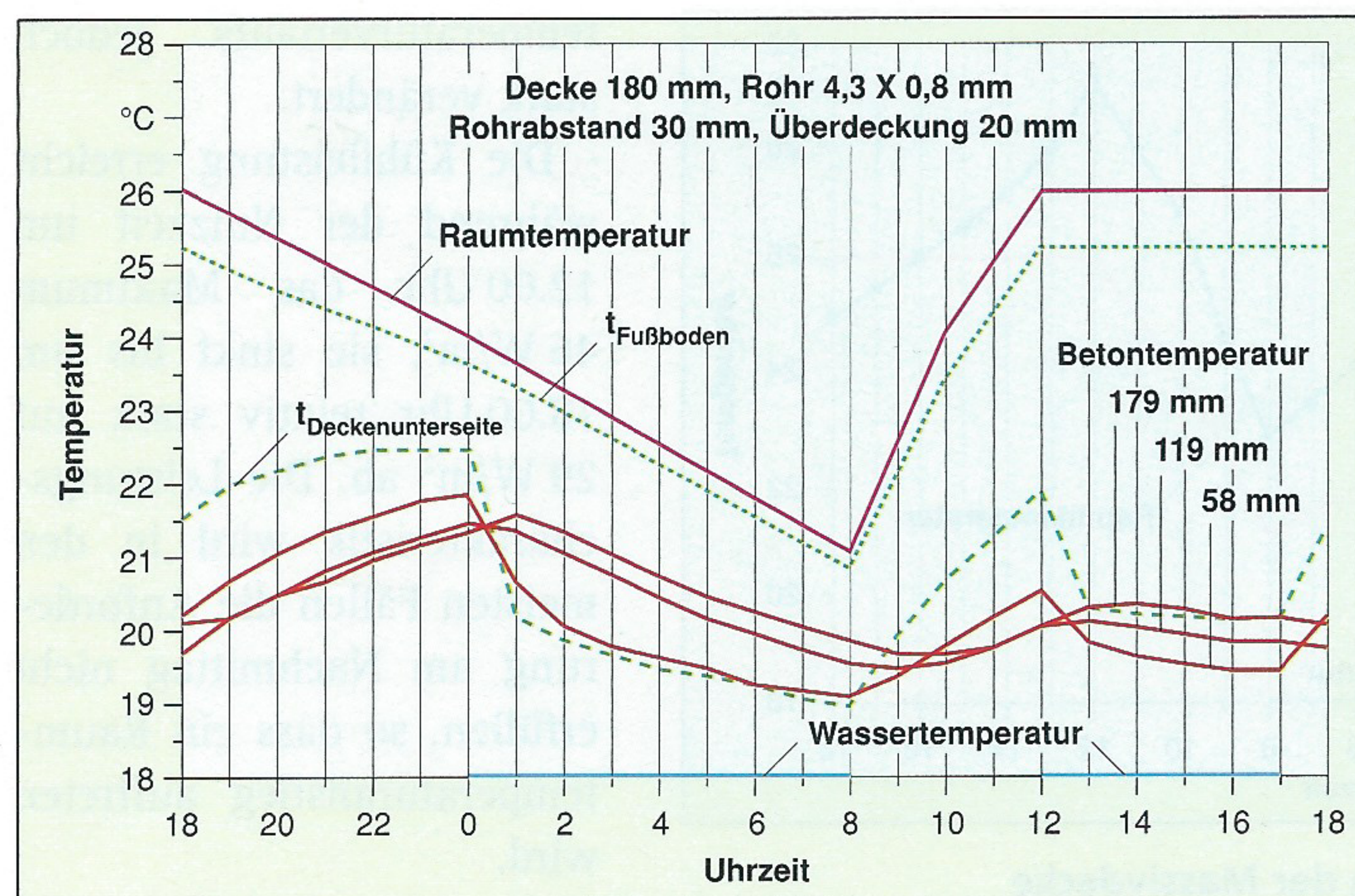


Bild 12: Zeitliche Verläufe der Raumtemperatur, der Kühlmedientemperatur, der Oberflächentemperaturen und ausgewählter Betontemperaturen im Deckeninneren (Tiefe von der Deckenunterseite aus gerechnet) für den im Bild 11 vorgestellten Betriebsfall

- Die Deckentemperatur (grün gestrichelte Kurve) wird durch die Wassertemperatur – mit relativ geringer Verzögerung – beeinflusst,
- Die Betontemperaturen (rote Kurven) ändern sich im mittleren und oberen Bereich wegen der Entfernung zur Rohrschicht relativ wenig, im rohrnahen Bereich stärker. Insgesamt liegen die Betontemperaturen stets zwischen 19,0 °C und 21,8 °C,
- Der Speichervorgang mit seinen charakteristischen Werten wird in Tabelle 1 deutlich.

Im Zeitraum von 12.00 Uhr bis 18.00 Uhr ist somit eine Wärme von ca. 376 Wh/m² aus dem Raum aufgenommen und 33 Wh/m² sind im Bauteil zusätzlich gespeichert worden.

Während der Nachkühlzeit kommt die durch das Kaltwasser eingebrachte Kühlleistung vornehmlich dem Raum zugute.

- die relativ dünne Decken einsetzen,
- in denen die nachts verfügbare „Umweltkälte“ dennoch genutzt werden soll,
- wo eine Bedarfskühlung am Tage zur Komfortverbesserung und Leistungsanpassung vorgesehen ist,
- die niedrige Investitionskosten anstreben,
- wo ein hoher Vorfertigungsgrad zu realisieren ist.

Unter den genannten Bedingungen erscheint die im Bild 1 dargestellte Deckenkonstruktion mit einer integrierten Kapillarrohrmatte in der Filigrandecke und der bauseitigen Ergänzung der darüber liegenden Ortbetonschicht als optimaler Kompromiss. Es wurden die thermodynamischen Eigenschaften dieser Decke unter verschiedenen Betriebsbedingungen untersucht und Vergleiche zur bisherigen thermischen

Zeit		12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
t_R	°C				26			
t_W	°C				18			–
$q_s^{1)}$	Wh/m ²	-708	-762	-778	-788	-795	-801	-741
$q_s^{2)}$	W/m ²	48,3	65,4	67,1	67,7	68,0	68,2	53,7

1) Speicherwärme in der Decke (< 0 bedeutet „eingelagerte Kälte“) bezogen auf die Raumtemperatur

2) Kühlleistung der Decke und des Fußbodens

Tabelle 1: Speichervorgang

Fazit

Die in der Einleitung vorgestellte Philosophie zur „idealen“ thermischen Bauteilaktivierung ist für die Bauten zu überdenken,

Bauteilaktivierung gezogen. Die oberflächennahe Einordnung der Kunststoff-Kapillarrohrmatte hat nachfolgende wärmetechnische und bautechnische Merkmale:

- Die Umweltenergienutzung, die bei dünnen Decken ohnehin eingeschränkt

ist, kann zumindest teilweise nutzbringend eingesetzt werden,

- die Reaktion auf die Inbetriebnahme des Kaltwasserkreislaufs ist im Gegensatz zur Anordnung der Rohrregister in Bauteilmittte sehr flink, so dass eine ideale Spitzenlastkompensation ohne zusätzliches Kühlsystem im Raum möglich wird,
- die bedarfsgerechte Nachkühlung am Tage bewirkt im eingeschwungenen Zustand nur eine relativ geringe Bauteilspeicherung,
- die zusätzlichen Energieaufwendungen bei der Nachkühlung mit einer Kälteanlage sind geringer, da eine gute Regelungsmöglichkeit existiert,
- eine raumweise Temperaturregelung ist bei entsprechender Gestaltung der Filigrandecken und der Anschlussverrohrung – beispielsweise in der abgehängten Flurdecke – lösbar,
- die Investitionskosten sind gering,
- der Bauablauf wird gegenüber der traditionellen Geschossdeckenfertigung nicht verändert, er ist bedeutend einfacher als bei der bisher üblichen thermischen Bauteilaktivierung, da das Einformen des wasserführenden Rohrregisters im Betonwerk erfolgt,
- die Vorfertigung ermöglicht eine präzise, reproduzierbare Herstellung des Bauteiles mit dem Rohrsystem, so dass Beschädigungen der Rohre praktisch ausgeschlossen sind.

Bei dieser vereinfachten Lösung ist ein vergrößerter Nutzerkreis erschließbar, so beispielsweise auch im Bereich des komfortablen und energiebewussten Eigenheimbaues.

Literatur

- [1] Glück, B.: Thermische Bauteilaktivierung. Heidelberg: C. F. Müller Verlag 1999 (ISBN 3-7880-7674-7)
- [2] Glück, B.: Wärmeübertragung durch raumbegrenzende Heiz- und Kühlflächen mit geringem Exergieverlust – Lehren aus der BIONIK. Gesundheits-Ingenieur 2000, Heft 4