

Thermische Bauteilaktivierung

Kühlung mittels raumintegriertem Latentwärmespeicher

Teil 2: Rechenergebnisse für unterschiedliche Konstruktionen

Bernd Glück, Jößnitz

Mit dem verstärkten Einsatz der thermischen Bauteilaktivierung bzw. Betonkernaktivierung, die bei richtiger Auslegung im Jahresgang mit einem Großteil Umweltenergie – z. B. aus freier Kühlung – betrieben werden kann, wird zunehmend die Frage gestellt, ob der Einsatz von Latentwärmespeichern im Raum eine zusätzliche Verbesserung des Kühleffektes erbringt bzw. ob sich diese Systeme zur Nachrüstung bei Sanierungen eignen. Mit einem neu entwickelten Rechenprogramm wird dieser Frage nachgegangen.

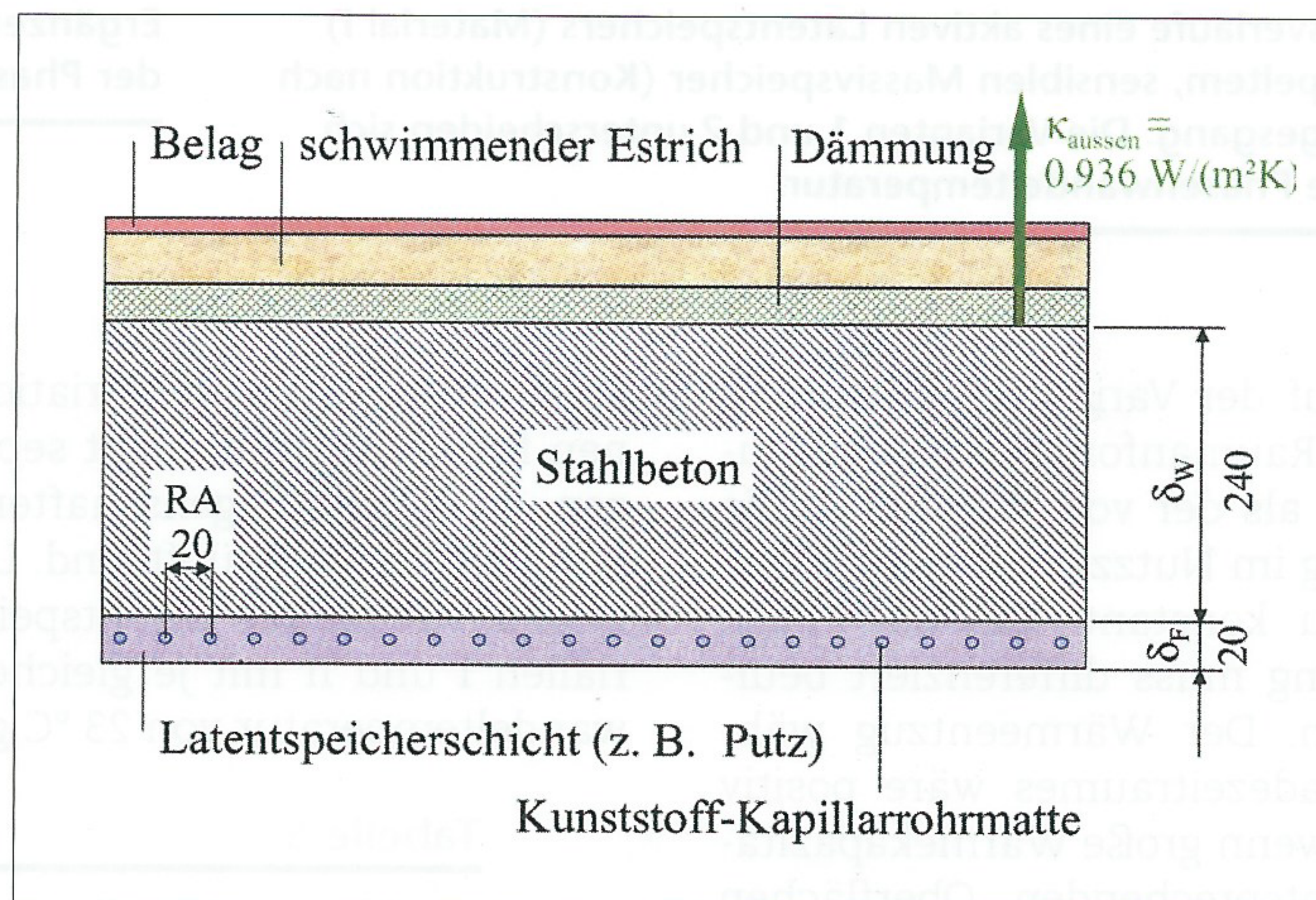


Bild 6

Deckenkonstruktion bestehend aus einer Stahlbetonmassivdecke mit darunter angekoppeltem Latentwärmespeicher – beispielsweise in Form eines Putzes mit integrierter Kapillarrohrmatte zur thermischen Aktivierung – und komplettem Fußbodenaufbau auf der Oberseite (Maße in mm)

Autor



Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück, Jahrgang 1942, war an der TU Dresden, in der Anlagenplanung, im Industriebereich 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.

Der erste Teil dieses Fachaufsatzes behandelte die mathematische Modellierung und das numerische Lösungsverfahren¹⁾ für ein neues Rechenprogramm. Im hier vorliegenden zweiten Teil des Fachbeitrags werden Rechenergebnisse für unterschiedliche Konstruktionen (Gedankenmodelle) vorgestellt und bewertet.

Ergebnisse und Auswertung

Aktiver Latentspeicher mit angekoppeltem, sensiblen Massivspeicher

Die Decke ist die einzige Raumumfassung, die nicht durch Einrichtungsgegenstände verstellt wird. Deshalb bietet sich der Einsatz eines an die Deckenfläche angekoppelten Latentspeichers an. Die Decke ist in der Regel eine Stahlbetonkonstruktion, so dass damit ein

zusätzlicher Massivspeicher rein temperaturabhängig (sensibel) wirkt. Die Konstruktion ist im Bild 6 dargestellt. Für die weiteren Betrachtungen gelten die in Tabelle 5 ausgewiesenen Daten.

Einfluss der Phasenwandeltemperatur

Die Leistungsverläufe der Varianten 1 (Material I, $t_{\text{Wandel}} = 23^\circ\text{C}$) und Variante 2 (Material I, $t_{\text{Wandel}} = 21^\circ\text{C}$) sind im Bild 7 auf 1 m² bezogen für die letzten 24 Stunden des Untersuchungszeitraumes veranschaulicht. Daraus lassen sich die folgenden Aussagen ableiten:

- Die Betriebsphase zwischen 42 h und 66 h repräsentiert noch keinen vollständig eingeschwungenen Zustand. Dies betrifft vor allem die Variante 2.
- Die stark unterschiedlichen Kühlleistungsverläufe, die lediglich durch die unterschiedlichen Phasenwandlungstemperaturen verursacht werden, sind bemerkenswert. Die Phasenwandeltemperatur ist somit ein sehr einflussreicher Parameter.

¹⁾ HLH Band 53 (2002), Nr. 11, S. 45-51

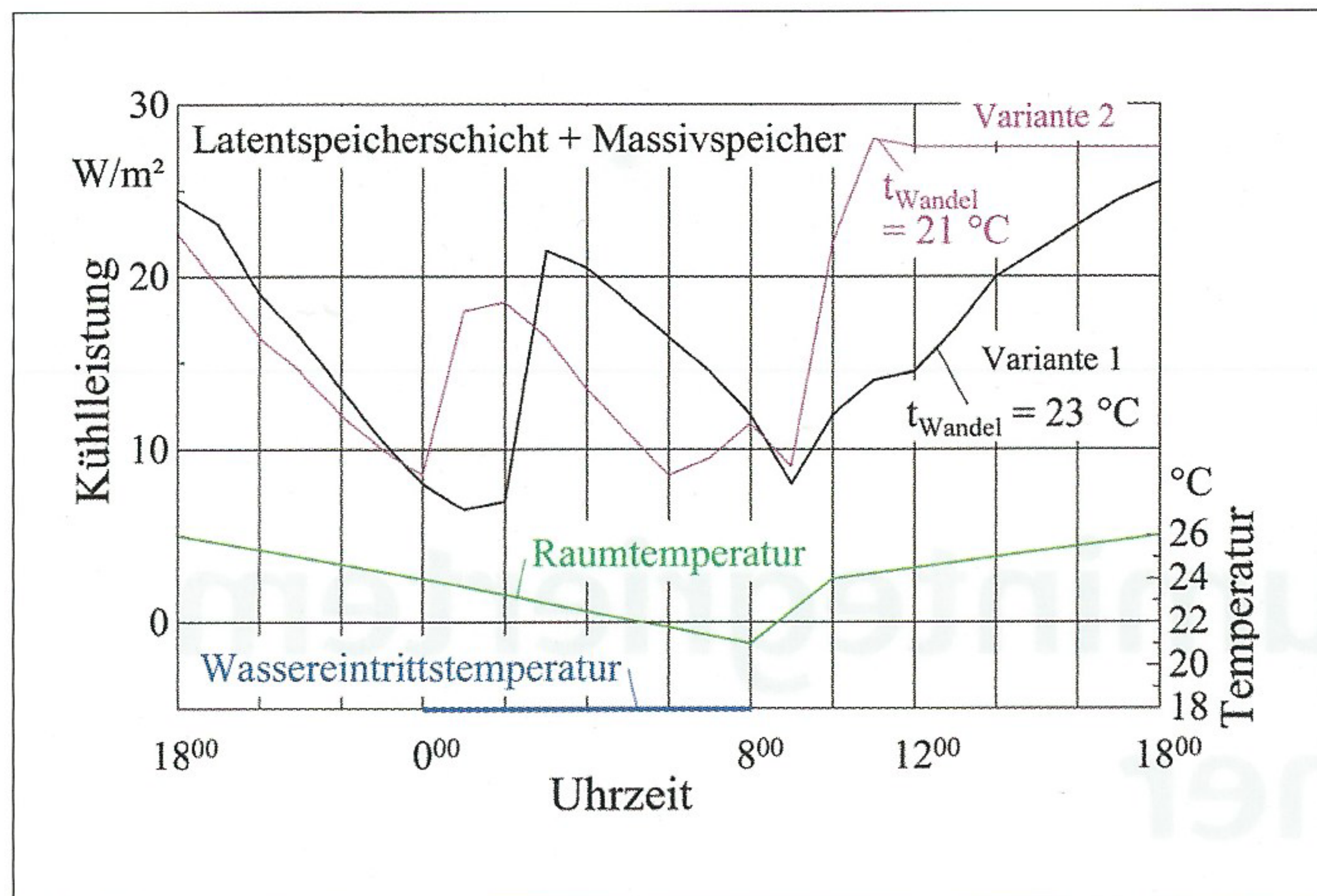


Bild 7

Kühlleistungsverläufe eines aktiven Latentspeichers (Material I) mit angekoppeltem, sensiblen Massivspeicher (Konstruktion nach Bild 6) im Tagesgang. Die Varianten 1 und 2 unterscheiden sich nur durch die Phasenwandeltemperatur.

□ Der Verlauf der Variante 2 entspricht hierbei den Raumanforderungen bedeutend besser als der von Variante 1. Die Kühlleistung im Nutzzeitraum ist höher und nahezu konstant. Die nächtliche Raumkühlung muss differenziert beurteilt werden. Der Wärmeentzug während des Ladezeitraumes wäre positiv zu werten, wenn große Wärmekapazitäten mit entsprechenden Oberflächen (Interieur, Akten) in den instationären Speichervorgang einbezogen werden könnten. Sind diese nicht vorhanden, müsste wegen eventuell zu starker Raumtemperaturabsenkung die Ladezeit verkürzt werden. Dies wirkt sich jedoch negativ auf die Leistung am Tag aus.

□ Bei Variante 1 ($t_{\text{Wandel}} = 23 \text{ °C}$) vollzieht sich im Latentspeichermaterial nur zu einem geringen Umfang ein Phasenwandel. So liegt die Temperatur in rohrnahen Bereichen stets unterhalb von 23 °C („feste“ Phase). Im oberflächen-nahen Gebiet beginnt der Phasenwandel z.B. über dem Rohr erst um 17:00 Uhr und beträgt um 18:00 Uhr erst 93 %. Variante 2 arbeitet aus wärmetechnischer Sicht effektiver, da an allen Prüf-orten ein Phasenwandel erfolgt. Die Speicherkapazität der Massivdecke wird nur ungenügend genutzt, z.B. schwingt die Betontemperatur in Deckenmitte mit einer maximalen Amplitude von 1 K.

□ Eine Extrapolation der vorgestellten Ergebnisse auf veränderte Phasenwandeltemperaturen ist bei der wärmetechnisch sensibel reagierenden Konstruktion – wie weitergehende Untersuchungen (Bild 8) zeigen – nicht möglich.

Materialeinfluss

Ähnlich einflussreich wie die Phasenwandeltemperatur sind auch weitere

Stoffwerte. Parametervariationen können für reale Stoffe nicht separat erfolgen, da die Stoffeigenschaften komplex miteinander verknüpft sind. Um dies zu zeigen, werden die Latentspeichermaterialien I und II mit je gleicher Phasenwandeltemperatur von 23 °C gegenüber-

gestellt (Varianten 1 und 3). Die Leistungsverläufe sind aus Bild 9 ersichtlich. Daraus lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

□ Beide Kühlleistungsverläufe entsprechen den üblichen Anforderungen nur ungenügend.

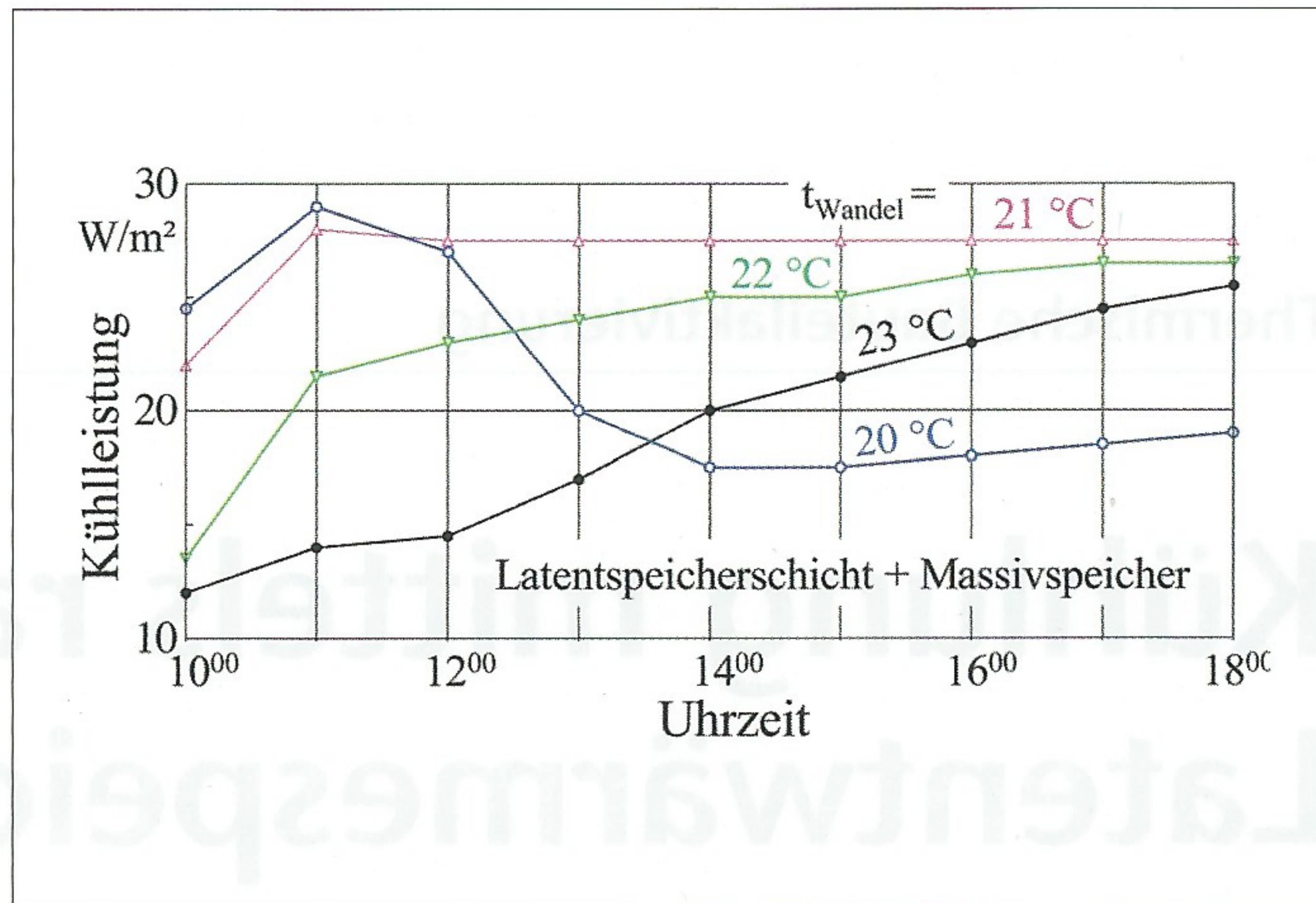


Bild 8

Ergänzende Kühlleistungsverläufe zu Bild 7 bei weiterer Variation der Phasenwandeltemperatur unter sonst gleichen Bedingungen

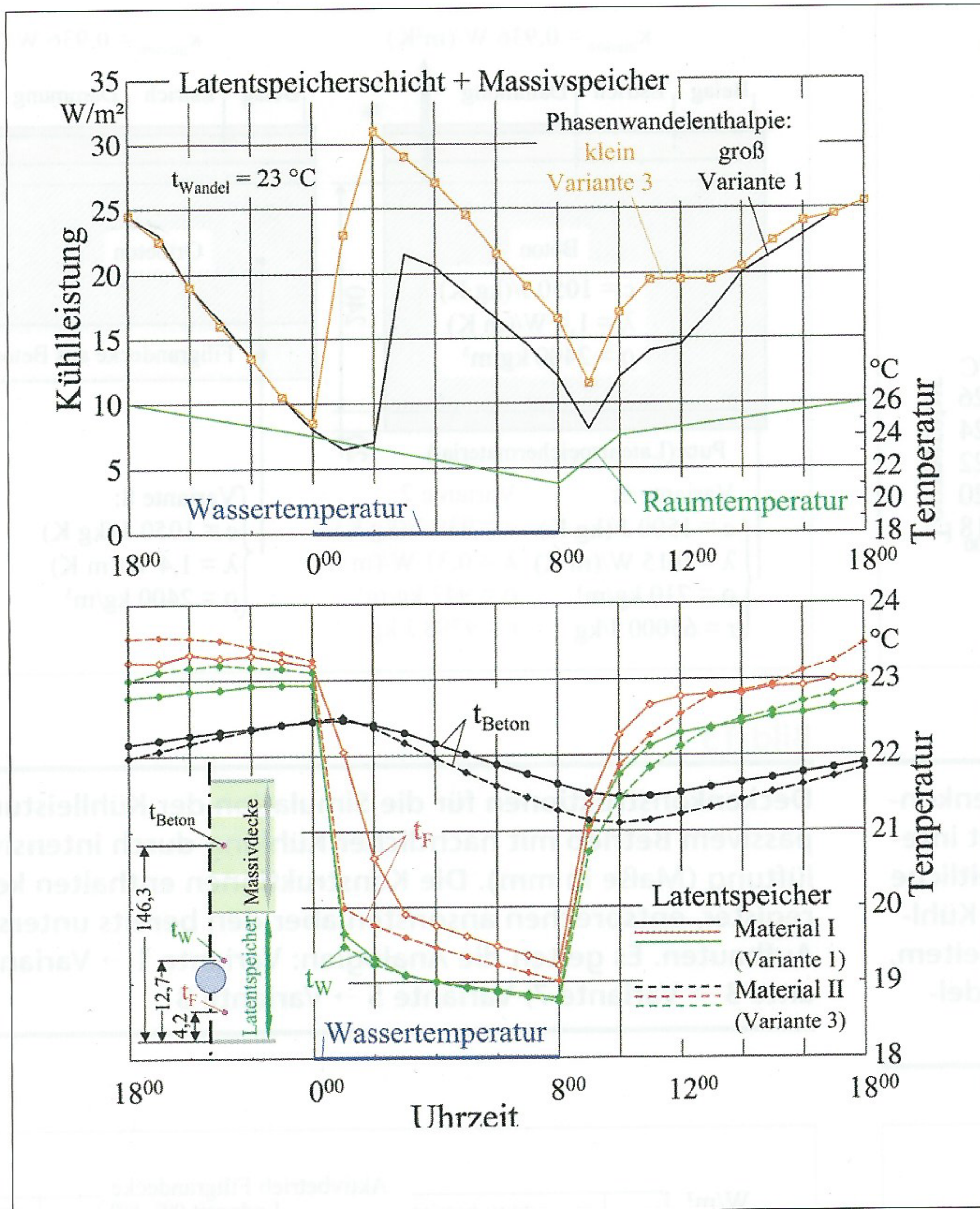
Tabelle 5

Berechnungsgrundlagen für einen aktiven Latentspeicher mit einem angekoppelten, sensiblen Massivspeicher

Fußboden
• Textiler Belag: $\delta = 10 \text{ mm}$; $\lambda = 0,07 \text{ W/(m K)}$ • Schwimmender Estrich: $\delta = 45 \text{ mm}$; $\lambda = 1,4 \text{ W/(m K)}$ • Dämmung: $\delta = 30 \text{ mm}$; $\lambda = 0,04 \text{ W/(m K)}$ • Mit einem konstanten Wärmeübergangskoeffizienten auf der Fußbodenoberseite von $\alpha_{\text{FB}} = 7 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ ergibt sich für den gesamten Fußbodenaufbau ein Teilwärmedurchgangskoeffizient von $\kappa_{\text{ausßen}} = 0,936 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$.
Deckenbeton
$\delta_{\text{W}} = 240 \text{ mm}$; $\lambda = 1,4 \text{ W/(m K)}$; $c = 1\,050 \text{ J/(kg K)}$; $\rho = 2\,400 \text{ kg/m}^3$.
Latentspeicher (Material I oder II)
$\delta_{\text{F}} = 20 \text{ mm}$; $t_{\text{Wandel}} = 23 \text{ °C bis } 20 \text{ °C}$.
Kapillarrohrmatte
$4,3 \times 0,8 \text{ mm}$; $\lambda_{\text{R}} = 0,21 \text{ W/(m K)}$; $RA = 20 \text{ mm}$.
Modellierung des Berechnungsgebietes
• Modullänge: $2\,000 \text{ mm}$; $\Delta x = 181,82 \text{ mm}$ ($i_{\text{max}} = 10$), • Modulbreite: $1\,000 \text{ mm}$, • Moduldicke Latentspeicherschicht (Front): $20,3 \text{ mm}$; $\Delta y_{\text{F}} = 1,69 \text{ mm}$ ($j_{\text{Fmax}} = 11$), • Moduldicke Stahlbetonschicht (Wand): 240 mm; $\Delta y_{\text{W}} = 12 \text{ mm}$ ($j_{\text{Wmax}} = 19$), • Rohrlage im Frontmodul: $j_{\text{FRmin}} = 5$; $j_{\text{FRmax}} = 6$; $k_{\text{Rmax}} = 0$, • Rohrabstand: $20,3 \text{ mm}$; $\Delta z = 1,69 \text{ mm}$ ($k_{\text{max}} = 5$), • Rohrumfang: $13,52 \text{ mm}$ ($= 8 \cdot 1,69 \text{ mm}$; Realität: $13,51 \text{ mm}$), • Rohrquerschnitt ^{a)}: $11,42 \text{ mm}^2$ ($= 4 \cdot 1,69^2 \text{ mm}^2$; Realität: $14,52 \text{ mm}^2$), • Zeitschrittweite: 2 s.
Modellierung der Belastung während des Untersuchungszeitraums
• Untersuchungszeitraum: 66 h; Beginn um $0:00 \text{ Uhr}$, • Raumtemperaturverlauf gemäß Bild 5, • Ladezeitraum (täglich): 8 h; von $0:00$ bis $8:00 \text{ Uhr}$, • Wassereintrittstemperatur: 18 °C, • Wasserdurchsatz: 250 kg/h.

^{a)} Die richtige Approximation des Rohrumfanges ist für die Wärmeübertragung vom Rohr an das Speichermaterial von dominanter Bedeutung. Der Rohrquerschnitt nimmt nur Einfluss auf die Bauteilspeicherwärme und ist weniger wichtig. Der wasserseitige Wärmeübergangs- und Teilwärmedurchgangskoeffizient werden stets für das reale Rohr bestimmt.

Bild 9



Kühlleistungsverläufe und spezielle Temperaturverläufe (Prüferte sind vermerkt) zwei unterschiedlicher, aktiver Latentspeicher mit angekoppeltem, sensiblen Massivspeicher (Konstruktion nach Bild 6) im Tagesgang. Bei Variante 1 wird Material I und bei Variante 3 Material II eingesetzt. Die Phasenwandeltemperatur beträgt stets 23 °C.

Nachmittag nähern sich die Temperaturen beider Varianten an, wodurch sich die Kühlleistungen kaum noch unterscheiden.

Aktiver Normalputz mit angekoppeltem, sensiblen Massivspeicher

Vergleichend zu den bisherigen Untersuchungen wird eine Putzdecke mit einer integrierten Kapillarrohrmatte, die an einer Betondecke haftet, betrachtet (Variante 4). Es gilt weiterhin eine Konstruktion gemäß Bild 6 mit den zugehörigen Daten. Lediglich anstelle des Speichermaterials ist der Gipsputz wie folgt zu substituieren:

$\delta_F = 13 \text{ mm}$,
 $\lambda = 0,35 \text{ W/(m K)}$,
 $c = 840 \text{ J/(kg K)}$,
 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$,
 $r = 0 \text{ J/kg}$.

Die Ergebnisse sind in Bild 10 dargestellt:

□ Bereits während der Beladung zeigt die Kühlleistung der untersuchten Deckenkonstruktion (Normalputz auf Betondecke) hohe Werte infolge der relativ großen Wärmeleitfähigkeit des Putzes und der verringerten Schichtdicke. Un-

□ Dass die Kühlleistung bei Einsatz eines Latentspeichermaterials mit kleinerer Umwandlungsenthalpie (Material II) größer ist als bei höheren Schmelzwärmen erscheint zunächst paradox. Die Ursachen sind vielfältig:

– Die geringere Phasenwandelenthalpie bewirkt eine raschere Auskühlung der Latentspeicherschicht, wodurch sich niedrigere raumseitige Oberflächentemperaturen ergeben.

– Die niedrigeren Schichttemperaturen und die größere Wärmeleitfähigkeit des Materials II führen bereits während der Ladezeit zu einem hohen Wärmestrom vom Raum zum Speicher. Gleichzeitig erfolgt auch eine größere Abkühlung der angekoppelten Betondecke. Niedrigere Temperaturen in der Latentspeicherschicht und in der Betondecke bewirken höhere Kühlleistungen am Vormittag. Am

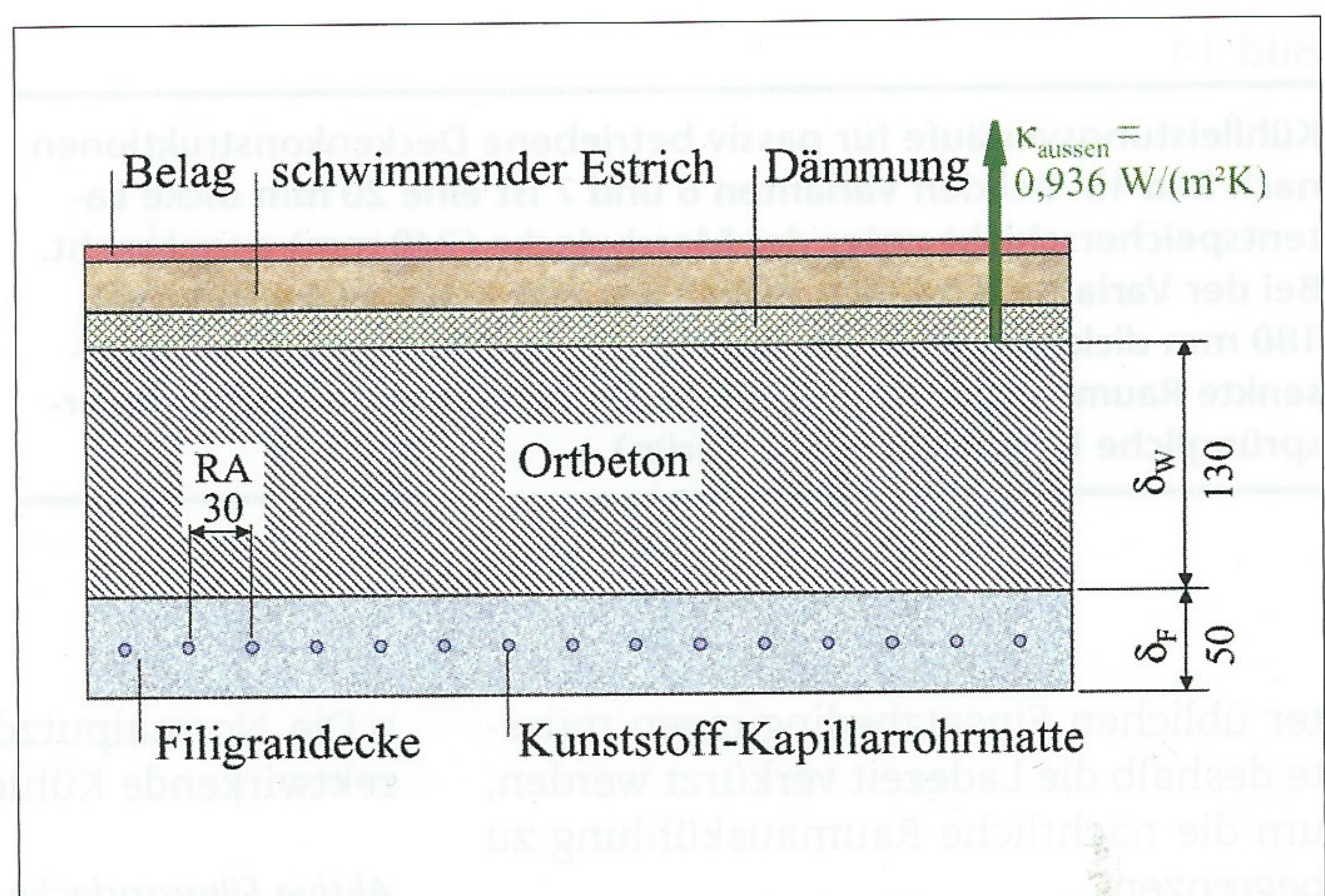
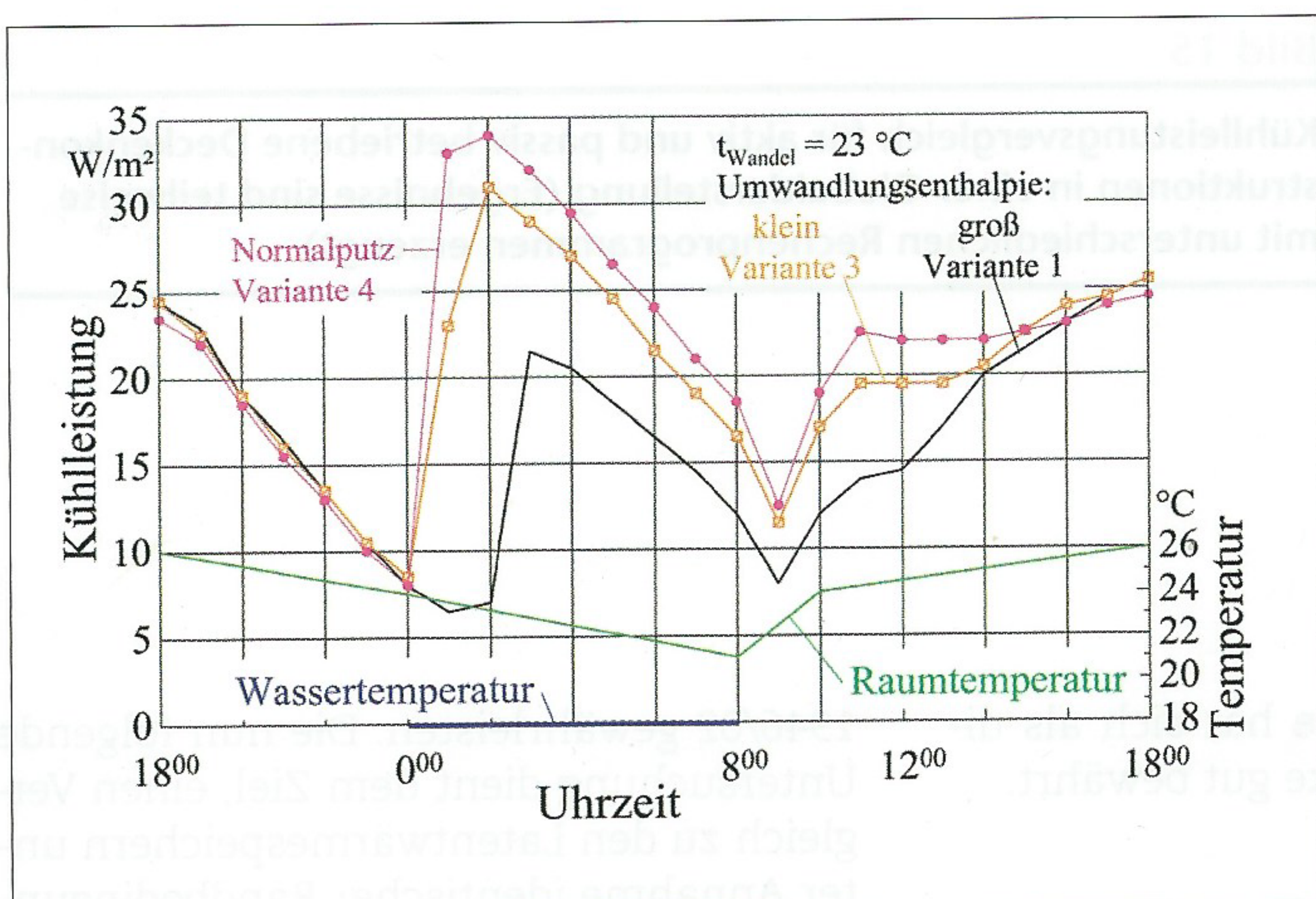


Bild 10

Kühlleistungsverlauf für eine nur sensibel speichernde Deckenkonstruktion bestehend aus einer Normalputzschicht mit integrierter Kapillarrohrmatte und einer Massivbetondecke (Variante 4) gegenübergestellt den Kühlleistungsverläufen zweier unterschiedlicher, aktiver Latentspeicher mit angekoppeltem, sensiblen Massivspeicher (identisch Bild 9) im Tagesgang. Alle Konstruktionen entsprechen Bild 6, wobei die Frontdicke bei Normalputz 13 mm und bei Latentspeicherschichten 20 mm beträgt. Bei Variante 1 kommt Material I und bei Variante 3 Material II zum Einsatz. Die Phasenwandeltemperatur beträgt jeweils 23 °C.

Bild 11

Deckenkonstruktion, bestehend aus einer Filigrandecke mit integrierter Kapillarrohrmatte und einer Ort betonschicht sowie einem kompletten Fußbodenaufbau auf der Oberseite

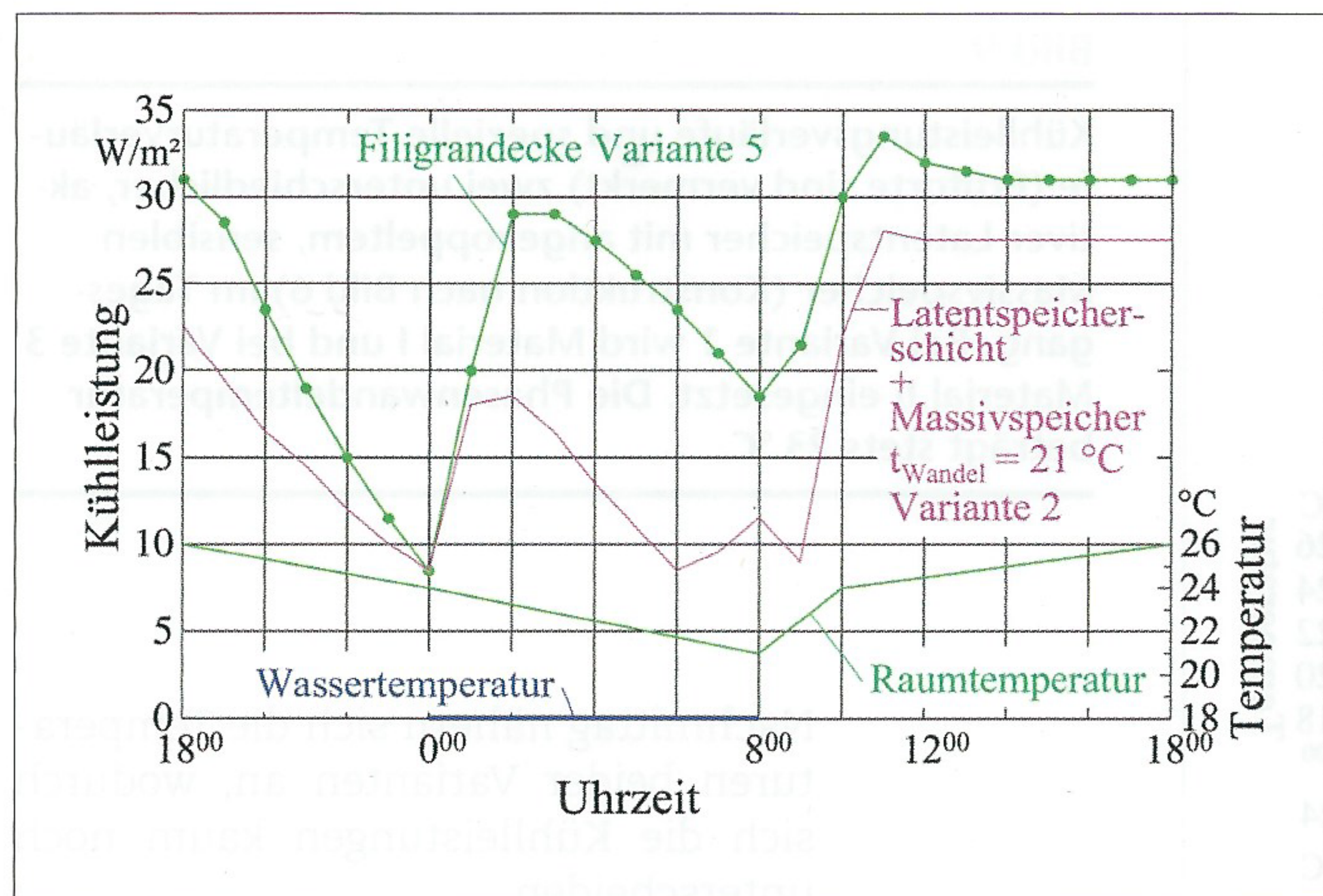


Bild 12

Kühlleistungsverlauf für eine nur sensibel speichernde Deckenkonstruktion nach Bild 11, bestehend aus einer Filigrandecke mit integrierter Kapillarrohrrmatte und einer Ortbetonschicht (einheitliche Stoffwerte für beide Betonbauteile) gegenübergestellt dem Kühlleistungsverlauf eines aktiven Latentspeichers mit angekoppeltem, sensiblen Massivspeicher (Variante 2, Material I, Phasenwandeltemperatur 21 °C) im Tagesgang

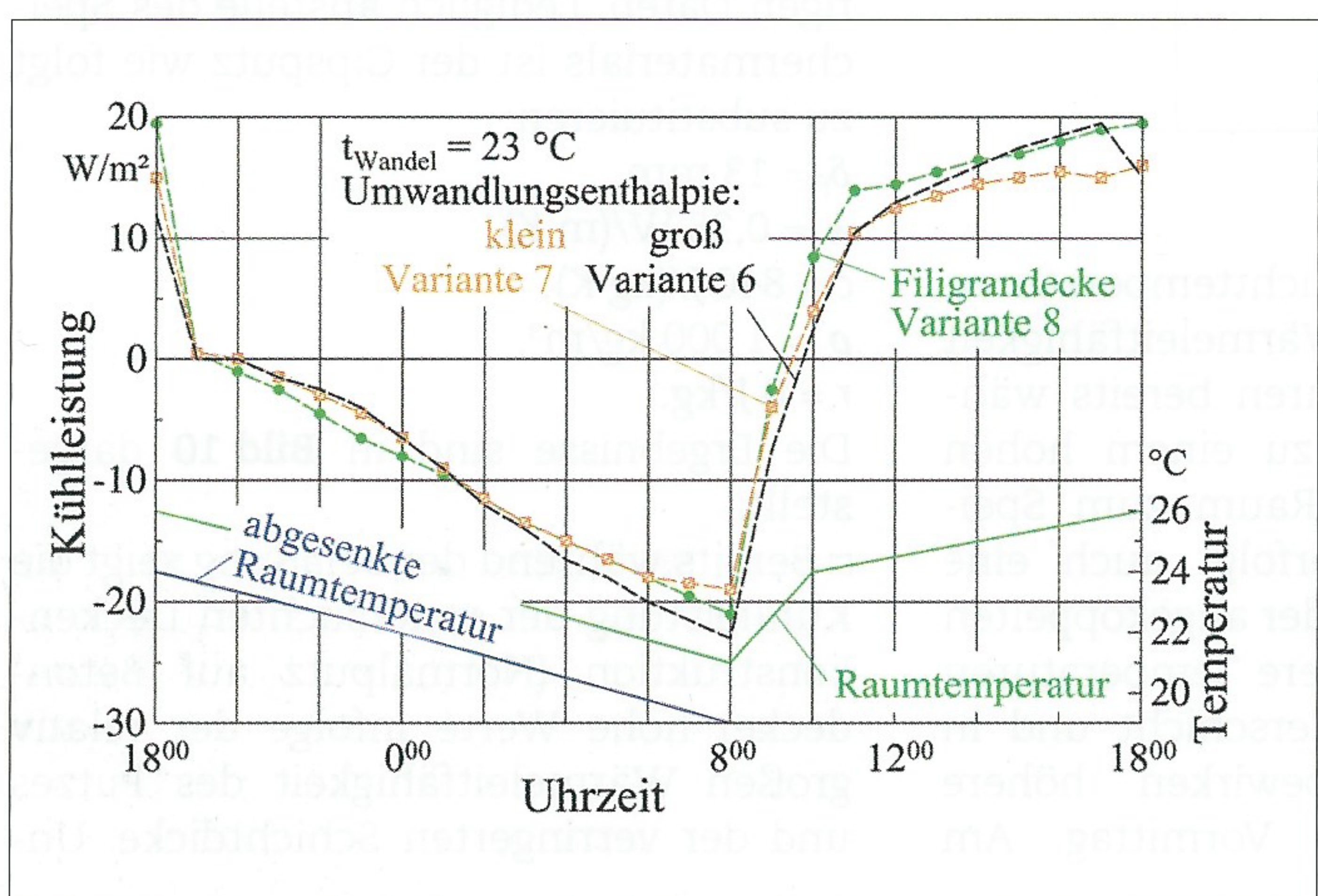


Bild 14

Kühlleistungsverläufe für passiv betriebene Deckenkonstruktionen nach Bild 13. Bei den Varianten 6 und 7 ist eine 20 mm dicke Latentspeicherschicht unter der Massivdecke (240 mm) angebracht. Bei der Variante 8 handelt es sich um eine sensibel speichernde, 180 mm dicke Betondecke. Von 18:00 bis 8:00 Uhr gilt die abgesenkte Raumtemperatur (blau), in der restlichen Tageszeit die ursprüngliche Raumtemperatur (grün).

ter üblichen Einsatzbedingungen müssen deshalb die Ladezeit verkürzt werden, um die nächtliche Raumauskühlung zu begrenzen.

Die intensive Abkühlung des Betons während der Beladungsphase führt zu einer verbesserten Nutzung des Deckenspeichers während des Nutzzeitraumes. Generell ist festzustellen, dass alle drei dargestellten Varianten bezüglich ihrer Leistungscharakteristika die an die Kühlung von Büroräumen gestellten Anforderungen nicht erfüllen.

Die Normalputzdecke hat sich als direktwirkende Kühldecke gut bewährt.

Aktive Filigrandecke

Thermisch aktive Filigrandecken mit einer Ortbetonschicht üblicher Dicke wurden bereits in [4] untersucht. Es wurde festgestellt, dass sie zur Kompensation von Raumkühllasten besonders gut geeignet sind, wenn eine Nachkühlung am Nachmittag erfolgt. Sie können dann auch eine Raumtemperatur nach DIN

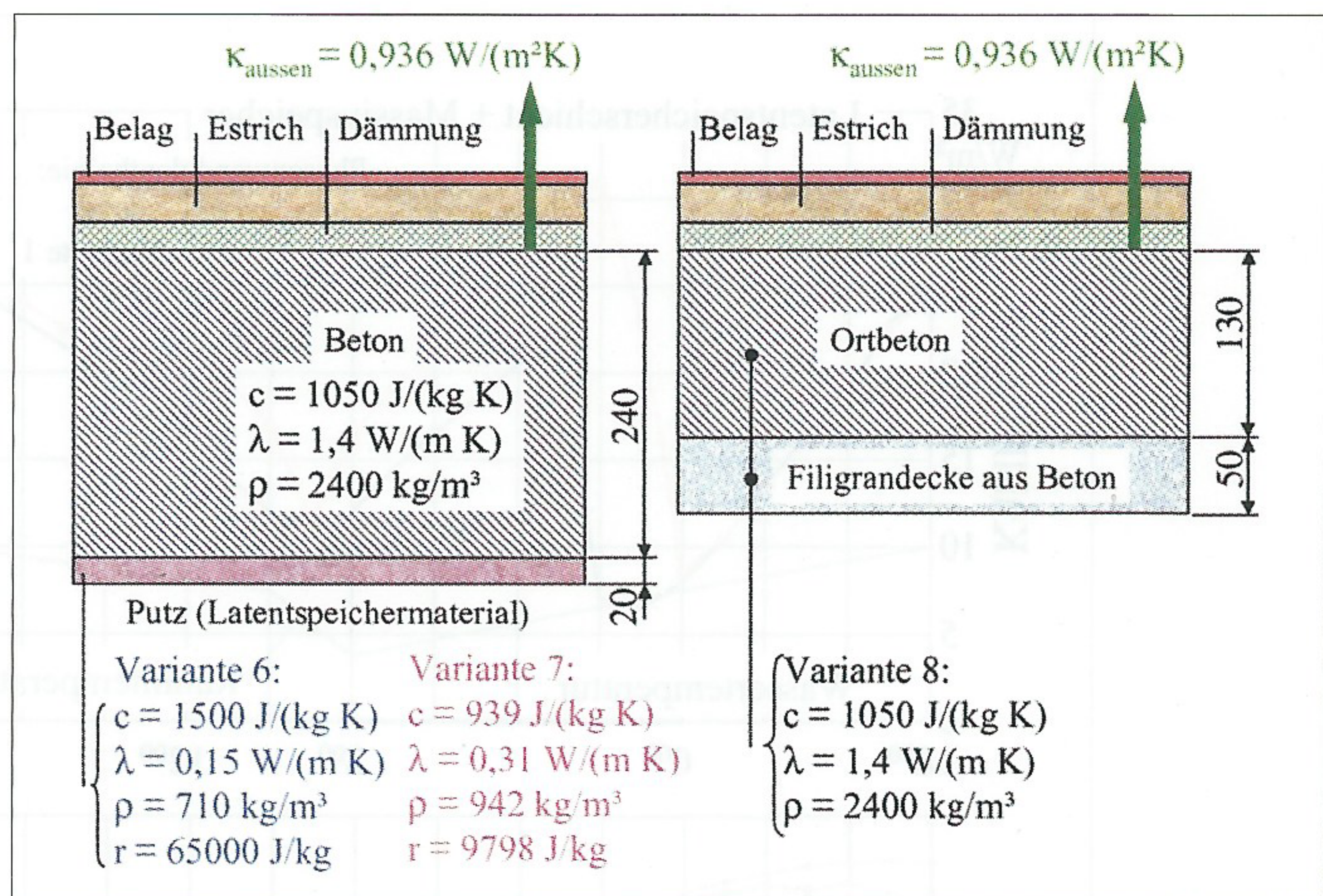


Bild 13

Deckenkonstruktionen für die Simulation der Kühlleistungen bei passivem Betrieb mit nächtlicher Kühlung durch intensive Raumlüftung (Maße in mm). Die Konstruktionen enthalten keine Rohrregister, entsprechen ansonsten aber den bereits untersuchten Aufbauten. Es gelten die Analogien: Variante 1 → Variante 6; Variante 3 → Variante 7; Variante 5 → Variante 8

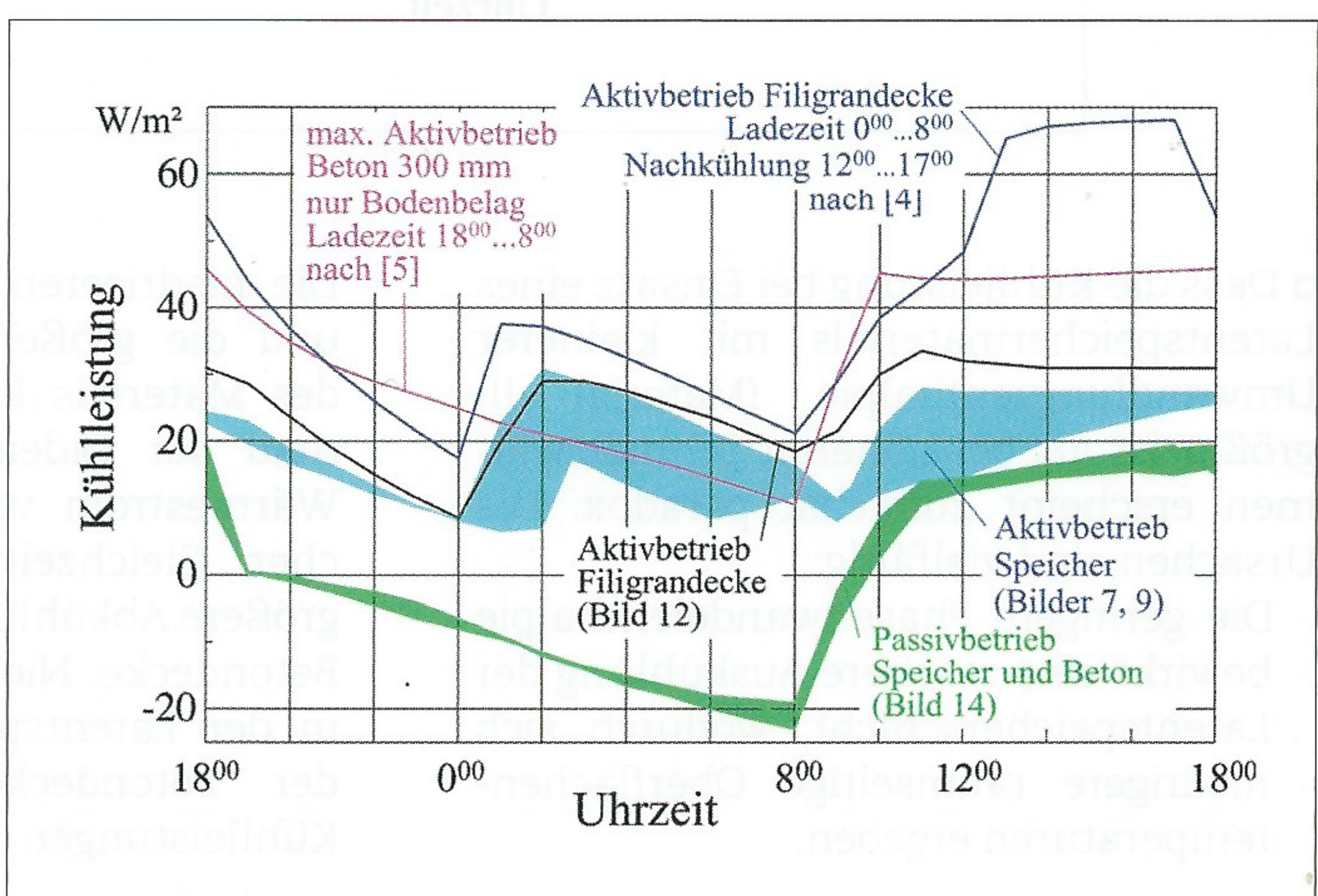


Bild 15

Kühlleistungsvergleich für aktiv und passiv betriebene Deckenkonstruktionen in einer Globaldarstellung (Ergebnisse sind teilweise mit unterschiedlichen Rechenprogrammen erzeugt)

1946/02 gewährleisten. Die nun folgende Untersuchung dient dem Ziel, einen Vergleich zu den Latentwärmespeichern unter Annahme identischer Randbedingungen zu führen. Filigrandecke und Ortbetonschicht werden geometrisch getrennt betrachtet, weisen aber gleiche Stoffwerte auf. Die Konstruktion ist im Bild 11 skizziert. Der Kühlleistungsverlauf der Variante 5 ist im Bild 12 dem bisher besten Ergebnis für eine Latentspeicherschicht (Variante 2: Material I, $t_{\text{Wandel}} = 21\text{ °C}$) gegenübergestellt:

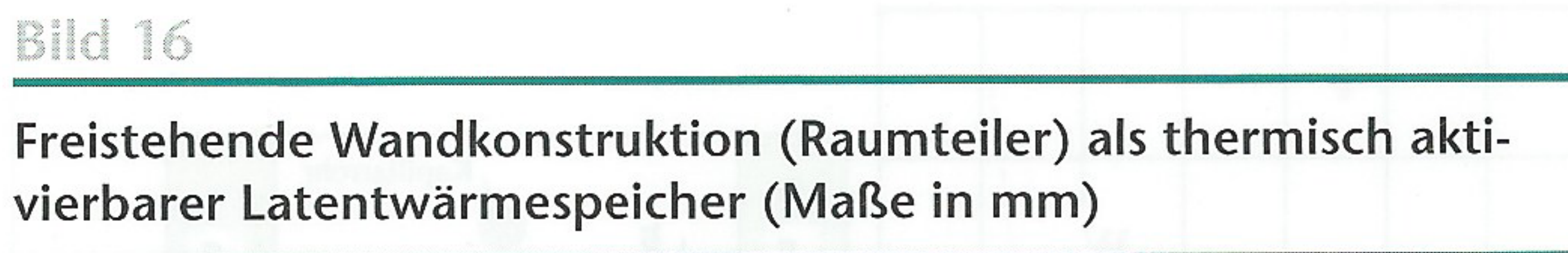


Bild 17

Kühlleistungsverlauf der aktivierten Latentspeicherwand nach Bild 16 (Material I, $t_{\text{Wandel}} = 23\text{ °C}$ bzw. 21 °C , Dicke 20 mm) und spezielle Temperaturverläufe im Speichermaterial im Tagesgang (Kurvenverläufe geglättet)

- Die verfügbare Kühleistung der reinen Betonspeicherdecke liegt höher als bei einer Kombination bestehend aus Latentspeicherschicht und Betondecke. Dabei ist zu beachten, dass die reine Betondecke dünner als bei der Kombinationsvariante gewählt wurde.
- Nachteilig beim Betonspeicher ist die große Wärmeaufnahme aus dem Raum bereits während der Beladung.
- Der reine Betonspeicher eignet sich, wie bereits früher festgestellt [4], sehr gut für eine nächtliche Grundkühlung des Raumes, eine Lastkompensation am Vormittag und eine bedarfsgerechte Nachkühlung am Nachmittag. Die Reaktionszeit ist wegen der guten Wärmeleitfähigkeit des Betons relativ kurz. (Es sei daran erinnert, dass die ermittelte Leistungsangabe den Summenwert über die vorangegangene Stunde darstellt.)

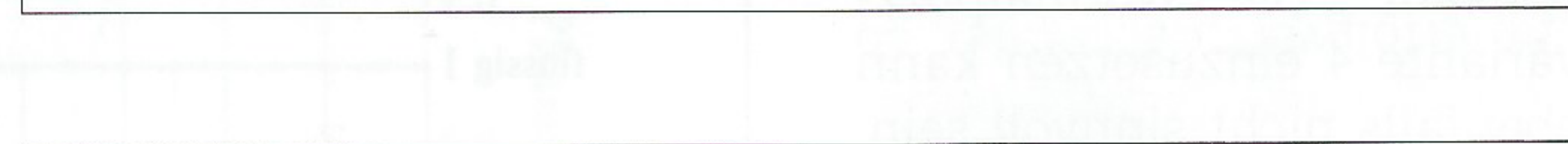


Bild 18

Kühlleistungsverläufe aktivierter Latentspeicherwände nach Bild 16 (Material I) bei unterschiedlichen Phasenwandeltemperaturen und variabler Speicherdicke

Passive Latentspeicher mit angekoppeltem sensiblen Massivspeicher im Vergleich zum rein sensiblen Massivspeicher

Die bisher untersuchten Latentspeicher-Konstruktionen wiesen keine überzeugenden Ergebnisse auf. Es soll deshalb ihre Eignung bei rein passivem Betrieb unter Nutzung einer intensiven Nachtluftkühlung untersucht werden. Die Aufbauten sind im **Bild 13** dargestellt. Die geometrischen und wärmetechnischen Basiswerte sind vermerkt. Sie entsprechen den früher untersuchten Varianten 1, 3 und 5. Da die Kühlung nur mit Luft erfolgt, ist die Variante 2 mit der Phasenwandeltemperatur von 21 °C praktisch nicht relevant. Die Normalputzvariante 4 einzusetzen kann ebenfalls nicht sinnvoll sein, da die Wärmeleitfähigkeit des Putzes unter der des Betons liegt. Damit ist die Realisierung einer Sichtbetonfläche erfolgversprechender, so dass auf die Filigrandeckenkonstruktion zurückgegriffen wird. Der Raumtemperaturverlauf entspricht Bild 5 mit der Absenkung um 2 K von 18:00 bis 8:00 Uhr.

Es wird angenommen, dass dieser thermische Zustand durch intensive Lüftung der Räume mit Außenluft erreicht werden kann. Es ist zu beachten, dass sich die Raumtemperatur aus der Lufttemperatur und der Strahlungstemperatur zusammensetzt. Der Untersuchungszeitraum beträgt erneut 66 h. Die Hauptergebnisse der Simulationen (letzten 24 h) sind unter Variante 6 bis 8 im **Bild 14** zu finden:

- Die verfügbaren Kühlleistungen von nur etwa 15 W/m² bei der rein passiven Betriebsweise der Speicherdecken sind relativ klein.
- Unter praktischen Gesichtspunkten unterscheiden sich die Kühlleistungsverläufe der im Aufbau sehr unterschiedlichen Speicherdecken nicht. Die Konstruktion mit der größten Phasenwandelenthalpie (Variante 6, Material I) weist keine besonders hohe Kühlleistung auf.

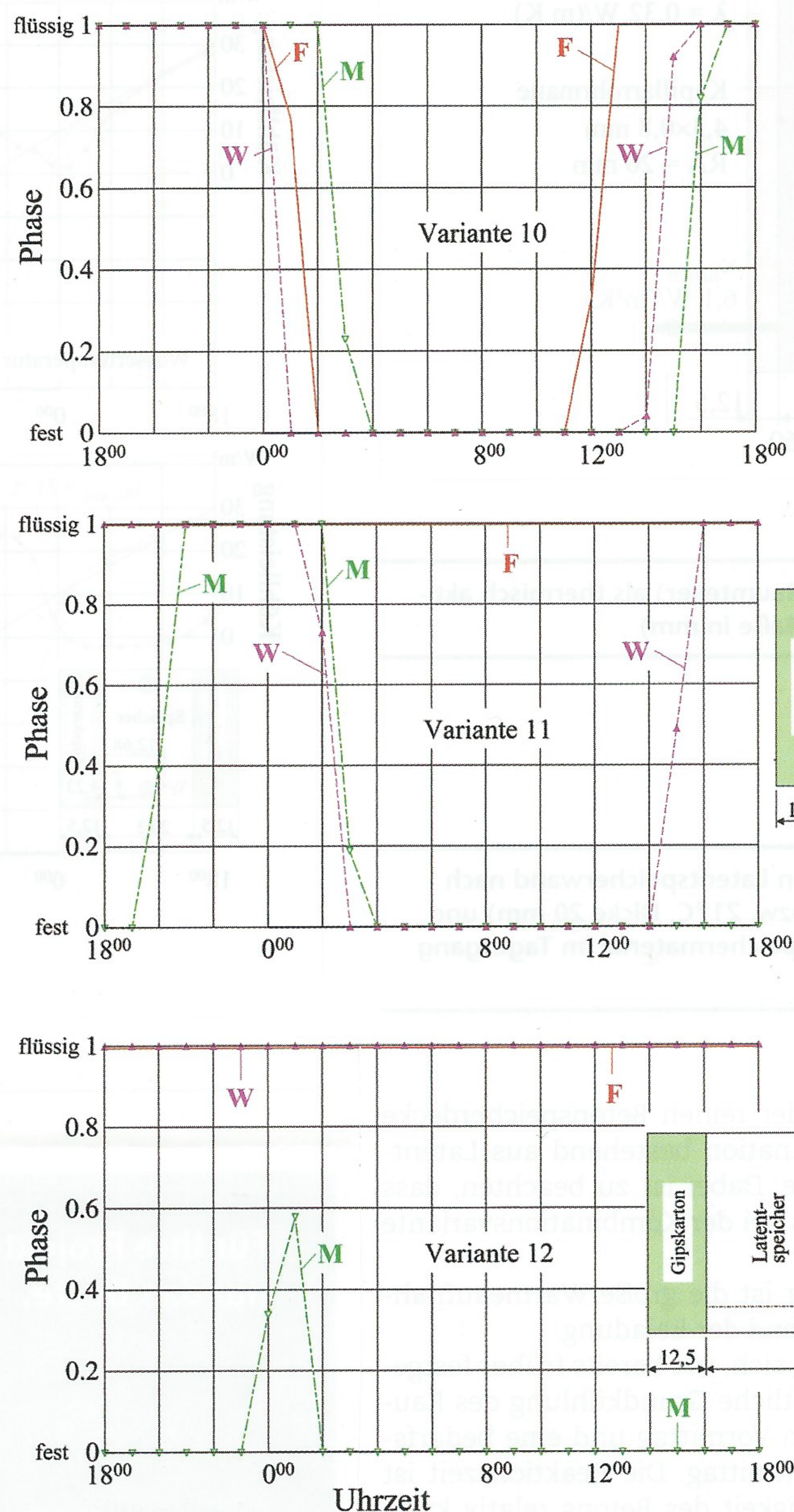


Bild 19

Phasenzustände an ausgewählten Orten in der Latentspeicherschicht (Material I, $t_{\text{Wandel}} = 21 \text{ °C}$) im Tagesverlauf. Es werden Nennspeicherdicken von 20, 40 und 60 mm betrachtet. Die Prüforte sind gekennzeichnet und vermaßt (Maße in mm)

tung auf. Dies liegt daran, dass nur im raumnahen Bereich der Latentspeicherschicht ein Phasenwandel auftritt (Prüfort t_F). In den tieferen Bereichen (t_W) liegt die Temperatur stets über 23 °C. Dies wird durch die niedrige Wärmeleitfähigkeit verursacht. Bei der Variante 7 vollzieht sich an den beiden Prüforten (Lageskizze im Bild 9) ein Phasenwandel, t_W sinkt z.B. bis auf etwa 22 °C ab. Wegen der relativ kleinen Phasenwandelenthalpie, ist der Latentspeichereffekt an diesen Orten aber bereits um 14:00 Uhr wieder egalisiert.

□ Die Betondecke kompensiert die Raumkühlleistung mindestens genauso gut wie die Latentspeicherkonstruktionen, so dass es keinen Grund für deren bedeutend aufwändigeren Einsatz gibt.

Gesamtvergleich zwischen Latentspeichern mit angekoppeltem, sensiblen Massivspeicher und rein sensiblen Massivspeichern

Die simulierten Kühlleistungsverläufe aktiv und passiv arbeitender Latentspeicher, die unter Massivdecken angebracht sind, und Betondecken, die eine

direkte Raumbegrenzung darstellen, sind im Gesamtvergleich im **Bild 15** gezeigt. Es ist festzustellen:

- Der Einsatz von Latentwärmespeichern, die auf Massivbauteilen angeordnet sind, ergeben bei aktivem Betrieb kleinere Kühlleistungen als die Aktivierung der Massivbauteile selbst. Nur bei niedrigen Phasenwandeltemperaturen ($t_{\text{Wandel}} = 21^\circ\text{C}$) lassen sich annähernd die Kühlleistungen aktiv beladener Filigrandecken am Nachmittag erreichen.
- Der reale Vergleich muss jedoch mit der thermischen Bauteilaktivierung von beispielsweise 300 mm dicken Betondecken geführt werden. Im Maximalfall, bei mittlerer Lage der Kapillarrohrmatten und nur einem einfachen Fußbodenbelag, sind nach [5] bei einem Raumtemperaturverlauf gemäß Bild 5 mittlere Kühlleistungen über den Nutzzeitraum von mehr als 40 W/m^2 erreichbar. In diesem Fall ergeben sich nachts auch kleinere Wärmeströme aus dem Raum, so dass längere Ladezeiten gewählt werden können.
- Der Einsatz von raumnah angeordneten Rohrregistern – wie bei Filigrandecken üblich – sollte den Einsatzfällen mit bedarfsgerechter Nachkühlung vorbehalten bleiben. Es bedarf dann keines Zusatzkühlsystems zur Gewährleistung der Raumtemperatur.
- Bei passivem Betrieb der untersuchten Konstruktionen ergeben sich keine markanten Leistungsunterschiede zwischen den Systemen.
- Damit kann bei Einsatz der modellierten Speichermaterialien kein Vorteil für deren Anwendung erkannt werden.

Freistehender aktiver Latentspeicher

Um die Möglichkeiten des Latentspeichereinsatzes zur Raumkühlung annähernd komplett bewerten zu können, werden im Weiteren noch freistehende Konstruktionen – beispielsweise Raumteiler – nach **Bild 16** untersucht. Die wärmetechnischen Daten sind angegeben, $\alpha_{\text{Wand}} = 8 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ sei konstant. Die Geometrie und Betriebsweise werden wie beim aktiven Latentspeicher mit angekoppeltem sensiblen Massivspeicher modelliert.

Einfluss der Phasenwandeltemperatur

Die Simulationsergebnisse für Variante 9 (Material I, $t_{\text{Wandel}} = 23^\circ\text{C}$) und für Variante 10 (Material I, $t_{\text{Wandel}} = 21^\circ\text{C}$) sind im **Bild 17** dargestellt. Die Schichtdicke beträgt jeweils 20 mm. Die Kühlleistungen für den Betriebszeitraum von

42 h bis 66 h beziehen sich auf 1 m^2 Raumteilerfläche (Vor- und Rückseite). Zusätzlich sind die Temperaturverläufe an zwei Prüforten vermerkt. Daraus lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- Während der Betriebsphase der letzten 24 h liegt ein eingeschwungener Zustand vor.
- Die unterschiedlichen Kühlleistungsverläufe werden lediglich durch die unterschiedlichen Phasenwandeltemperaturen verursacht. Diese stellen somit auch bei dieser Konstruktion einen sehr einflussreichen Parameter dar. Bei der Variante 9 ($t_{\text{Wandel}} = 23^\circ\text{C}$) vollzieht sich während der Nutzungszeit nur teilweise ein Phasenwandel, bei der Variante 10 ($t_{\text{Wandel}} = 21^\circ\text{C}$) wird er dagegen komplett durchlaufen. Da der Phasenwandel frühzeitig beginnt, ist der Speicher ab 16:00 Uhr bereits erschöpft. Die Speicherschicht sollte deshalb dicker gewählt werden.
- Die großen nächtlichen Kühlleistungen der Varianten deuten bei der gegebenen Speicherkapazität auf eine zu lange Ladezeit hin.

Einfluss der Speicherschichtdicke

Es zeigt sich, dass die niedrige Phasenwandeltemperatur leistungsfördernd beim Aktivspeicherbetrieb wirkt und dass die Materialdicke daher größer gewählt werden sollte. Für Material I und $t_{\text{Wandel}} = 21^\circ\text{C}$ werden bei sonst gleicher Geometrie und mittlerer Rohrregisterlage im Folgenden Variationen der Speicherdicke von 40 mm und 60 mm betrachtet. Die Ergebnisse dieser Varianten 11 und 12 werden den bisherigen Ergebnissen im **Bild 18** gegenübergestellt. Zur detaillierten Optimierung der Speicherdicke sind die Phasenzustände an speziellen

Orten zu untersuchen. **Bild 19** zeigt einige ortsabhängige Verläufe:

- Für $t_{\text{Wandel}} = 21^\circ\text{C}$ ergeben sich dem praktischen Bedarf angepasste Leistungsverläufe.
- Mit zunehmender Schichtdicke sinkt wegen des größeren Rohrabstandes von der Oberfläche der Wärmestrom während der nächtlichen Beladungszeit vom Raum an den Speicher.
- Eine 20 mm dicke Speicherschicht ist zu gering bemessen, wie die frühzeitige Erschöpfung des Speichers ab 16:00 Uhr zeigt. Da an allen Prüfpunkten Phasenwechsel durchlaufen werden, ist das Latentspeichermaterial gut genutzt.
- Bei einer Schichtdicke von 40 mm ergibt sich ein optimaler Verlauf bezüglich der Bedarfsanforderung. An den oberflächennahen Bereichen (Prüfort F) erfolgt kein Phasenwechsel, die Temperatur liegt stets über 21°C . Nachteilig ist weiterhin, dass der Phasenwandel in der Schichtmitte (Prüfort M) erst nach 18:00 Uhr eintritt. Dadurch ergeben sich auch nach 18:00 Uhr noch relativ hohe Kühlleistungen, wie Bild 18 verdeutlicht.
- Bei der Dicke von 60 mm setzt sich der vorgenannte Negativeinfluss fort. Außer im Punkt F erfolgt nunmehr auch am Punkt W kein Phasenwechsel mehr (Temperatur stets über 21°C). Andererseits wird in der Speichermitte nur kurzzeitig die Schmelztemperatur 21°C überschritten und der Phasenwandel vollzieht sich nur zu etwa 60 %. Das heißt, die oberflächennahen Schichten und der Speicherkern nehmen praktisch nicht am Phasenwandel teil.

Aufgrund der Bilder 18 und 19 sowie den zugehörigen Aussagen könnte die weitere Speicheroptimierung erfolgen. Untersuchenswert wäre beispielsweise eine Speicherdicke von 30 mm, das An-

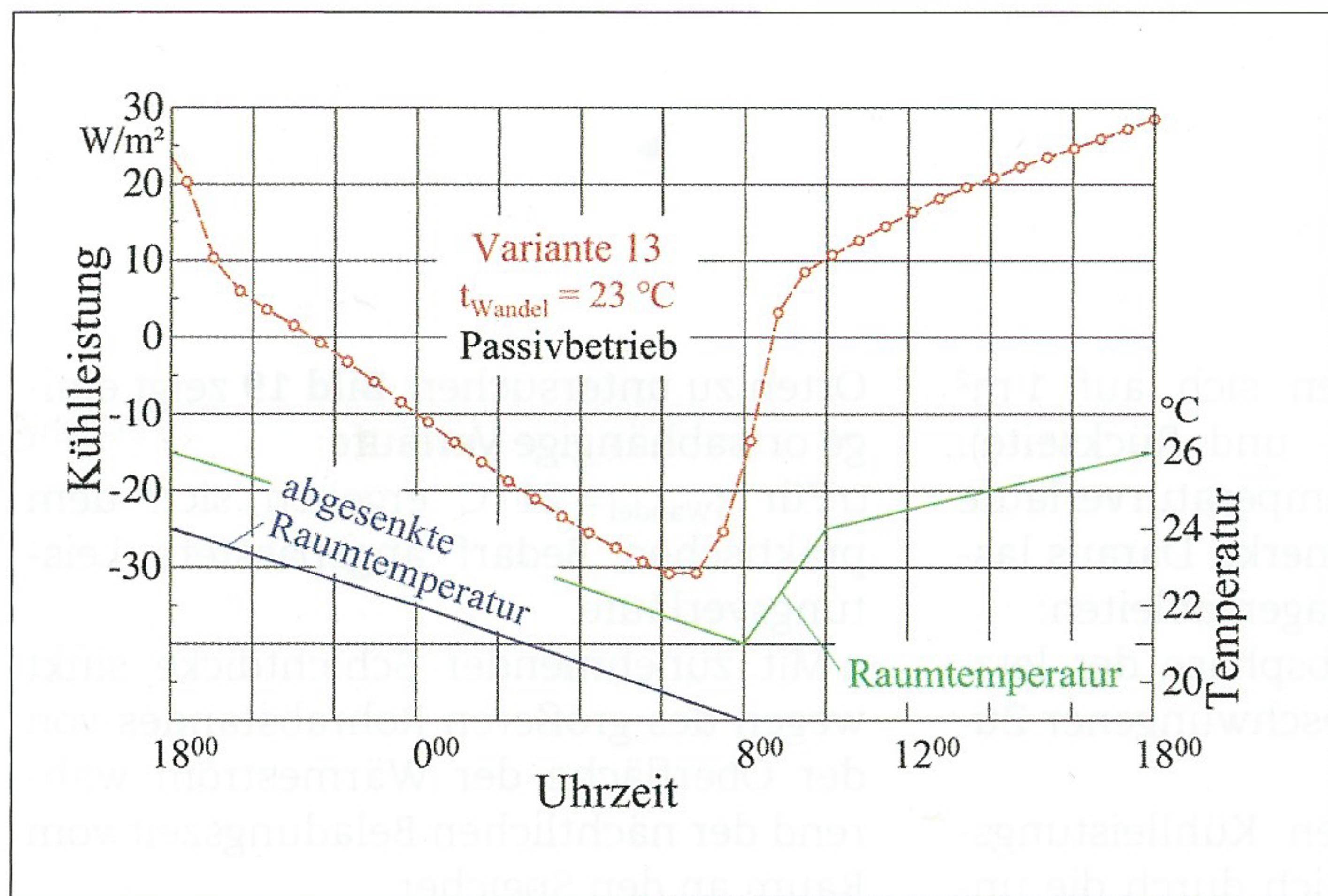


Bild 20

Kühlleistungsverlauf der passiv betriebenen, 20 mm dicken Latentspeicherwand (Material I, $t_{\text{Wandel}} = 23^\circ\text{C}$) im Tagesgang (Kurvenverlauf geglättet). Von 18:00 bis 8:00 Uhr gilt die abgesenkte Raumtemperatur (blau), in der restlichen Tageszeit die ursprüngliche Raumtemperatur (grün)

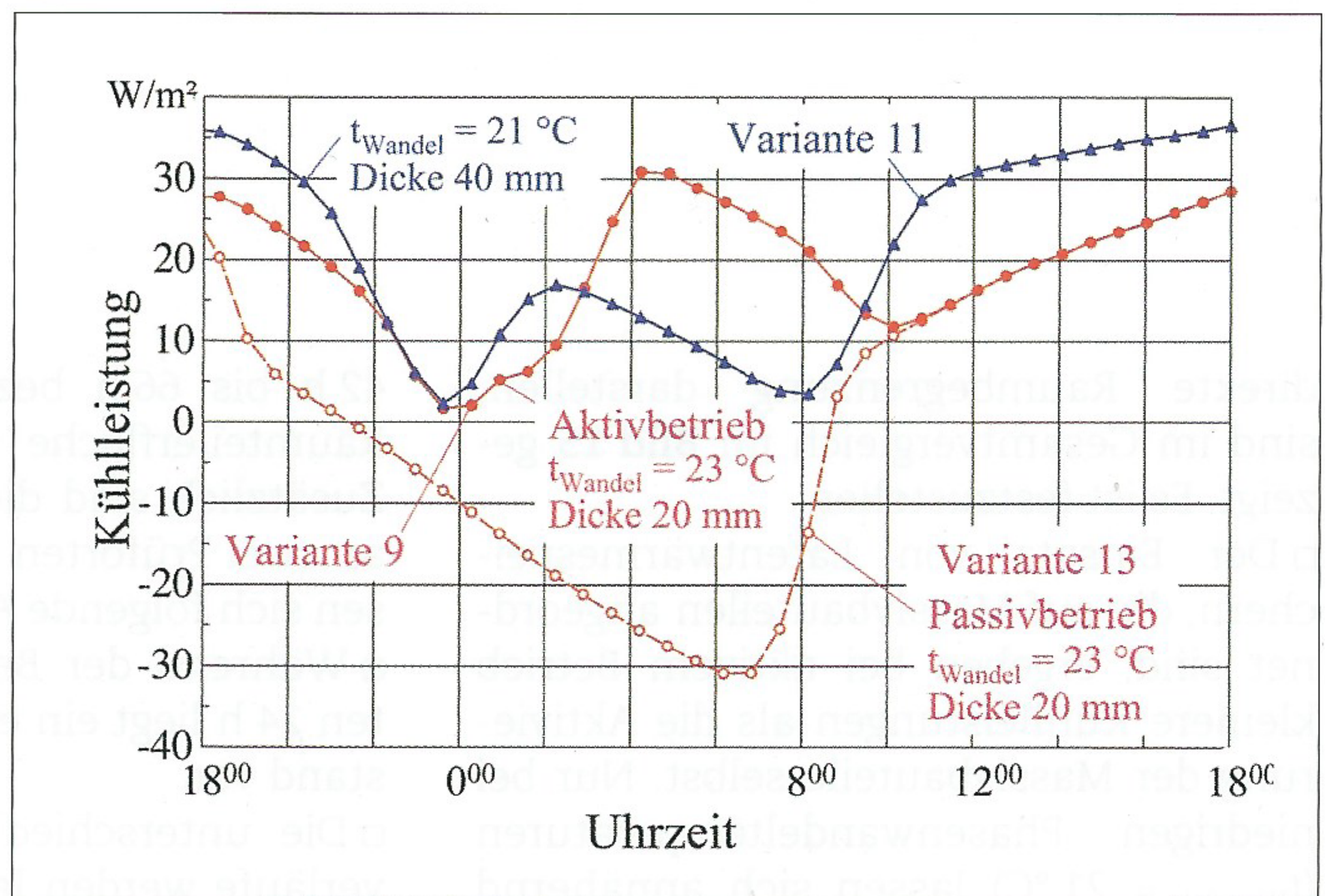


Bild 21

Ausgewählte Kühlleistungsverläufe für aktiv und passiv betriebene, freistehende Wandspeicher nach Bild 16 (Kurvenverläufe geglättet, Leistungsbezug auf 1 m² Wandfläche mit Vor- und Rückseite)

bringen einer dickeren, sensibel speichernden Hülle, der Einsatz von gut wärmeleitenden Speichermaterialien oder entsprechenden, z.B. metallischen Einbauten in der Speicherschicht. Bei dicken Speicherschichten könnten auch zwei Rohrregister sinnvoll sein.

Damit sind die Untersuchungsmethodik und die Variationsmöglichkeiten für die Speicherkonstruktion vorgestellt. Die endgültige Speicheroptimierung ist aber nur bei Kenntnis des zum Einsatz kommenden Speichermaterials sinnvoll.

Freistehender passiver Latentspeicher

Wird im Bild 16 das Rohrregister entfernt, so kann die Latentspeicherkonstruktion für einen passiven Betrieb genutzt werden. Hierbei soll das Material I mit $t_{\text{Wandel}} = 23^\circ\text{C}$ und einer Schichtdicke von 20 mm verwendet werden. Die Kühlung der Konstruktion durch intensive nächtliche Raumlüftung erfolgt modellgemäß von 18:00 bis 8:00 Uhr nach dem im Bild 5 gezeigten Verlauf. Das Untersuchungsergebnis (Variante 13) ist im Bild 20 aufgezeigt. Die Leistungsangabe erfolgt für 1 m² Stellwandfläche. Daraus ergeben sich folgende Aussagen:

- Der qualitative Kühlleistungsverlauf ist bedarfsgerecht.
- Seine Größe ist für den Einsatz in Büros zur Lastkompensation aber zu niedrig. Würde ein Arbeitsplatz von 10 m² in einem Großraumbüro mit 6 Raumteilern (Höhe 2 m) eingehaust, ergäbe sich bei halbseitiger Nutzung eine Kühlleistung von etwa $6 \cdot 20/10 \text{ W/m}^2 = 12 \text{ W/m}^2$.

Gesamtvergleich von aktiv und passiv betriebenen, freistehenden Latentspeichern

Die Ergebnisse für Stellwände im Aktiv- und Passivbetrieb werden im Bild 21 direkt gegenübergestellt. Zunächst erfolgt ein Vergleich für das Material I, $t_{\text{Wandel}} = 23^\circ\text{C}$ und die Materialdicke 20 mm (Varianten 9 und 13). Ergänzend wird auch die aktiv arbeitende Variante 11 mit dem Material I, $t_{\text{Wandel}} = 21^\circ\text{C}$ bei einer Materialdicke von 40 mm einbezogen. Aussagen:

- Generell handelt es sich um relativ kleine Kühlleistungen, die in der Regel, z.B. beim Einsatz in Büroräumen, nur unterstützend zur Raumkühlung herangezogen werden können.
- Beim Passivbetrieb erscheint die Verwendung einer Speichermasse mit einer Phasenwandeltemperatur von 23°C sinnvoll. Nachmittags sind Kühlleistungen um 20 W/m^2 Raumteilerfläche zu erwarten.
- Beim Aktivbetrieb sind Speichermassen mit einer Phasenwandeltemperatur von 21°C einzusetzen, deren Dicke etwa 40 mm betragen sollte. Die nächtlichen Kühlleistungen liegen in der Größenordnung von etwa 10 W/m^2 Raumteilerfläche, am Nachmittag sind Leistungen von mehr als 30 W/m^2 zu erwarten.

Zusammenfassung

Die zusätzliche Ankopplung eines Passivspeichers an einen rein sensibel arbeitenden Massivspeicher (z.B. an eine Betondecke üblicher Dicke) verbessert den Kühlleistungsverlauf gegenüber der direkten Aktivierung des Massivbauteilspeichers nicht.

Der aktive Betrieb eines Massivdeckenspeichers ergibt eine zwei- bis dreifach höhere Kühlleistung als die passive Nutzung mittels intensiver, nächtlicher Raumlüftung.

Die Entwicklung einer im Raum angeordneten Latentspeicherkomponente (z.B. eines Raumteilers) stellt ein umfassendes Optimierungsproblem dar. Außer den wärmetechnischen Stoffwerten des Speichermaterials gelten als Haupteinflüsse die Phasenwandeltemperatur, die Dicke der Speicherschicht und Tiefe des Rohrregisters sowie der Tagesgang der Raumtemperatur.

Aktiv betriebene Latentspeicherkomponenten sollten eine niedrigere Phasenwandeltemperatur – z.B. 21°C – haben als passiv genutzte Einrichtungen, für die z.B. ein Bereich um 23°C sinnvoll ist. Die Kühlleistungen im Nutzzeitraum unterscheiden sich mindestens um den Faktor 1,5.

Genaue Aussagen zu den Leistungsverläufen sind nur für ein determiniertes Speichermaterial möglich. Mit dem neu entwickelten Rechenprogramm kann durch gezielte Parametervariationen eine Optimierung von speziellen Speicherkomponenten erfolgen. H 326

Literatur

- [4] Glück, B.: Filigrandecken mit integrierter thermischer Bauteilaktivierung. Technik am Bau (TAB), 2001 H.1.
- [5] Glück, B.: Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Betons und der Bewehrung auf die Kühlleistung von Massivspeicherdecken. HLH Band 53 (2002) Nr. 2, S. 42–47.