

Wärmetechnische Kopplung von Massiv- und Kühldecke

Einfluß einer wärmespeichernden Massivdecke auf die dynamische Leistungsaufnahme einer untergehängten Kühldecke



In der Realität verlaufen alle wärmetechnischen Vorgänge zur Raumheizung bzw. -kühlung instationär. In der Diskussion wird deshalb oftmals vorgeschlagen, keine Dämmung auf geschlossenen Kühldecken anzubringen und das Speichervermögen der darüberliegenden Massivdecke gezielt zur Spitzenlastdeckung zu nutzen. Zur Erzielung spezieller Grundaussagen wurde an eine Lamellendecke eine Massivdecke thermodynamisch angekoppelt.

Dr.-Ing. habil. Bernd Glück, Hamburg

Wärmetechnische Modellierung bei Einsatz geschlossener Kühldecken

Die charakteristischen Merkmale der vorgenommenen Modellierung sind nachfolgend zusammengestellt.

M1: Eine geschlossene Kühldecke zeichnet sich durch eine glatte Unterseite ohne offene Fugen aus; d.h., der Raum über den Kühlpaneelen steht mit dem eigentlichen Nutzraum in keiner luftseitigen Verbindung. Die Geometrie der untergehängten Deckenkonstruktion geht aus Bild 1 hervor.

M2: Der Wärmefluß im Massivbauteil (Decke) wird instationär betrachtet. Es findet der in [1, S. 74] dargestellte Algorithmus Verwendung. Er basiert auf dem Differenzverfahren mit einer speziellen Lösung für die Temperatur sich berührender, verschiedenartiger Stoffschichten.

M3: Der innere Wärmeübergangskoeffizient an die Massivdecke $\alpha_{MD,i}$ ist als Teilwärmedurchgangskoeffizient vom Hohlraum zwischen Kühldeckenlamelle und Dämmung definiert:

$$\alpha_{MD,i} = \kappa_a = \left(\frac{1}{\alpha_{HR}} + \frac{\delta_D}{\lambda_D} + R_L \right)^{-1} \quad (1)$$

Dabei bedeuten:

- α_{HR} Gesamtwärmeübergangskoeffizient (Strahlung plus Konvektion) vom Hohlraum an die Dämmung,
- δ_D Dicke der aufliegenden Dämmung,
- λ_D Wärmeleitfähigkeit der aufliegenden Dämmung,
- R_L äquivalenter Wärmeleitwiderstand der Luftschicht zwischen der Dämmung und der Massivdecke.

Als Regelwerte finden Anwendung:

$$\alpha_{HR} = 8 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}; \delta_D = 0,040 \text{ m}; \lambda_D = 0,040 \text{ W/(m K)}; R_L = 0,18 \text{ m}^2 \text{ K/W.}$$

Die zu $\alpha_{MD,i}$ gehörige Bezugstemperatur ist die Lufttemperatur im Hohlraum t_{HR} . Beim Wegfall der Dämmung werden in Gl. (1) der Summand $\delta_D/\lambda_D = 0$ und $R_L = 0$ gesetzt.

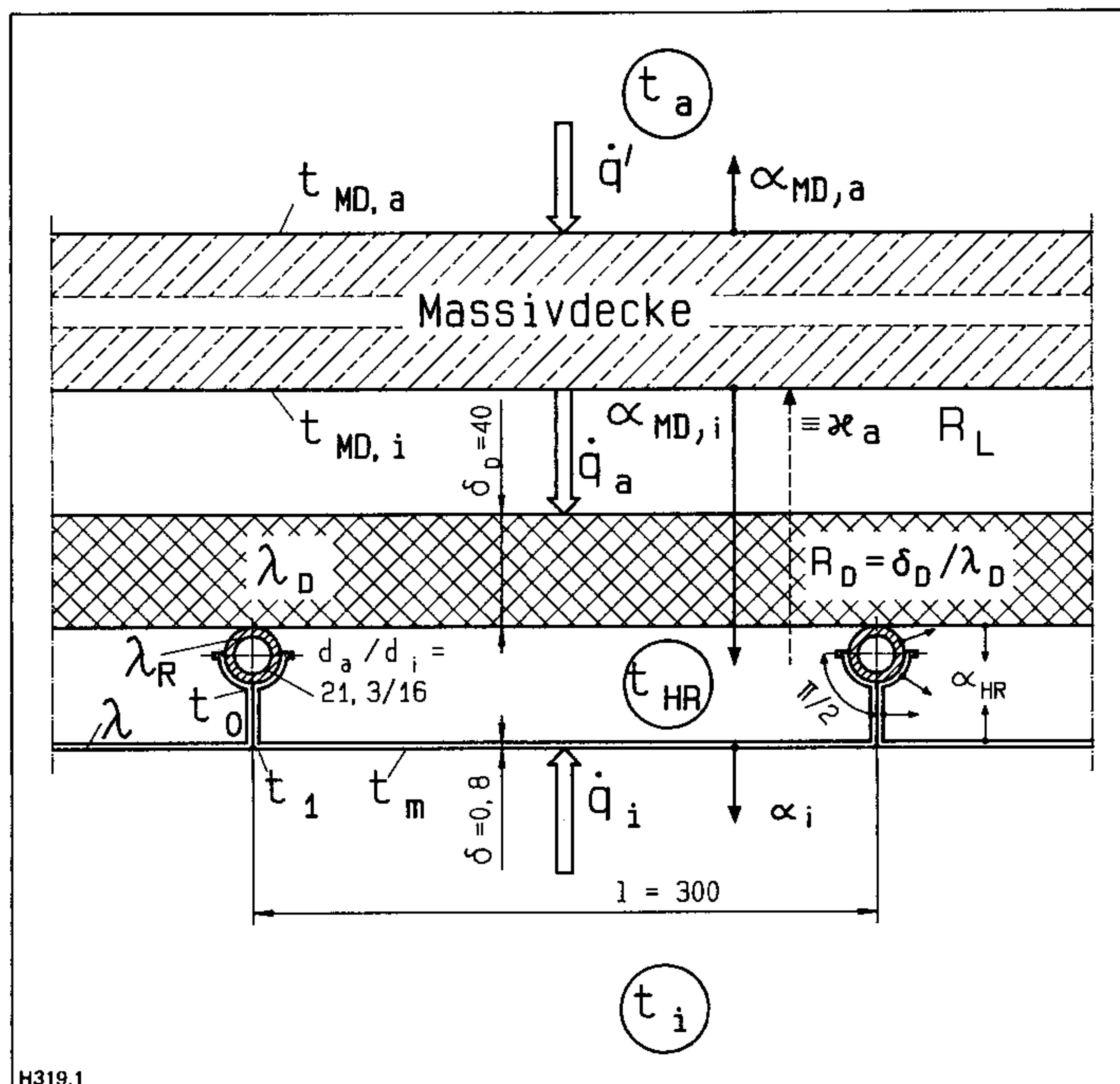


Bild 1: Massivdecke mit untergehängter, geschlossener Lamellen-Kühldecke und auf dem Rohrregister aufliegender Dämmmatte (Abmessungen in mm)

M4: Der äußere Wärmeübergangskoeffizient an die Massivdecke $\alpha_{MD,a}$ wird als konstant

$$\alpha_{MD,a} = 6 \text{ W/(m}^2 \text{ K)} \quad (2)$$

angenommen. Der niedrige Wert erklärt sich durch die Annahme, daß der Wärmefluß bei üblichen Betriebsfällen von oben nach unten gerichtet ist.

M5: Die untergehängte Lamellen-Kühldecke wird nach dem in [2] vorgestellten Algorithmus berechnet. Abweichend davon, liegt jedoch die Dämmung eben auf dem Rohrregister gemäß Bild 1. Die Temperatur im Hohlraum t_{HR} wird iterativ bestimmt, wobei alle am Wärmeaustausch beteiligten Flächen mit dem einheitlichen Wärmeübergangskoeffizienten α_{HR} und ihren speziellen Oberflächentemperaturen t_m, t_0, t_1 usw. Berücksichtigung finden.

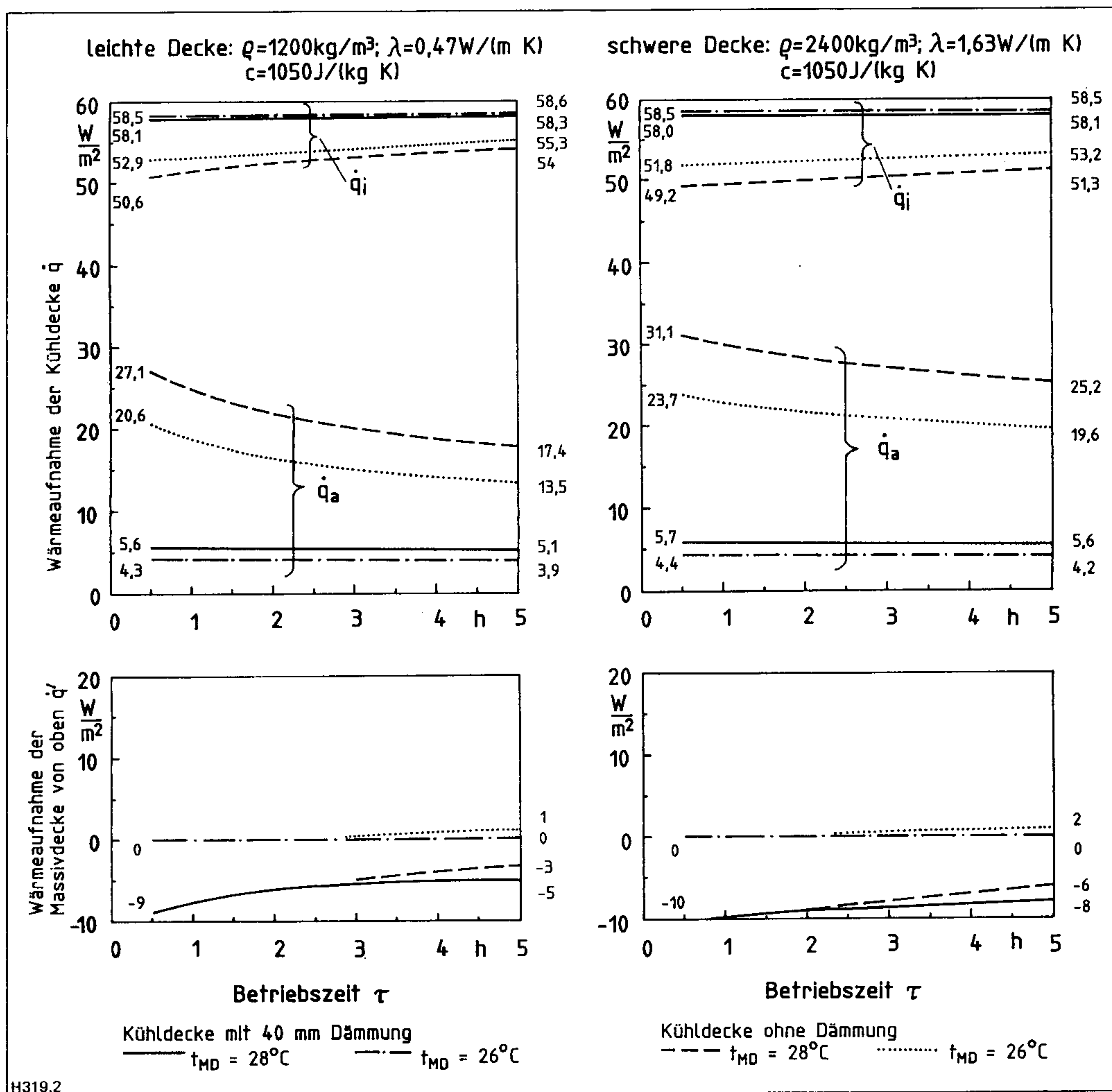


Bild 2: Wärmeströme, die in den ersten fünf Betriebsstunden von der Kühldecke und von der Massivdecke aufgenommen werden. Die Dämmung, die Eigenschaften und die Anfangstemperatur der Massivdecke werden dabei variiert

Bei Kühldecken mit Dämmung liegt die Hohlraumtemperatur in den meisten Fällen niedriger als die mittlere Lamellentemperatur ($t_{HR} < t_m$), so daß die Lamelle noch eine oberseitige Kühlung erfährt. Bei Weglassen der Dämmschicht kehren sich die Temperaturverhältnisse um.

Die Durchströmung der kühlwasserführenden Rohre erfolgt stets turbulent.

M6: Vereinfachend wird das Speichervermögen der Rohr-Lamellen-Konstruktion gegenüber der betrachteten Massivdecke vernachlässigt. Die Wärmekapazitäten betragen in der Gegenüberstellung für ein praktisches Beispiel:

Lamellendecke	
Stahlrohrregister	1 869 J/(m ² K)
Wasser	2 815 J/(m ² K)
Alu-Lamelle	1 987 J/(m ² K)
Dämmung	4 032 J/(m ² K)
Summe	10 703 J/(m ² K)
Massivdecke	250 000 bis 500 000 J/(m ² K)

Somit ist die Wärmekapazität der Betondecke um das 23- bis 47fache größer als die der untergehängten Kühldecke.

M7: Der Wärmeübergang vom Raum an die Kühldecke wird entsprechend der in [3] vorgestellten Basiskennlinie

$$\alpha_i = 8,92 (t_i - t_m)^{0,1} \text{ in W/(m}^2 \text{ K)} \quad (3)$$

Ist die Kühldecke außer Betrieb (es erfolgt keine Beaufschlagung mit einem Wasserstrom), so gilt die Annahme

$$\alpha_i = 8 \text{ W/(m}^2 \text{ K)} \quad (4)$$

Weiterhin werden in diesem Fall der Wärmeleitwiderstand der untergehängten Lamellendecke idealerweise gleich Null und der Widerstand für den Hohlraum $R_{HR} = 0,18 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ gesetzt. Damit ist eine maximale Entspeicherung der Massivdecke gegeben.

M8: Das Wärmespeichervermögen der Wände und der Einrichtungsgegenstände sowie das Betriebsregime nehmen natürlich ebenso wie das wärmetechnische Verhalten der Decke – einge-

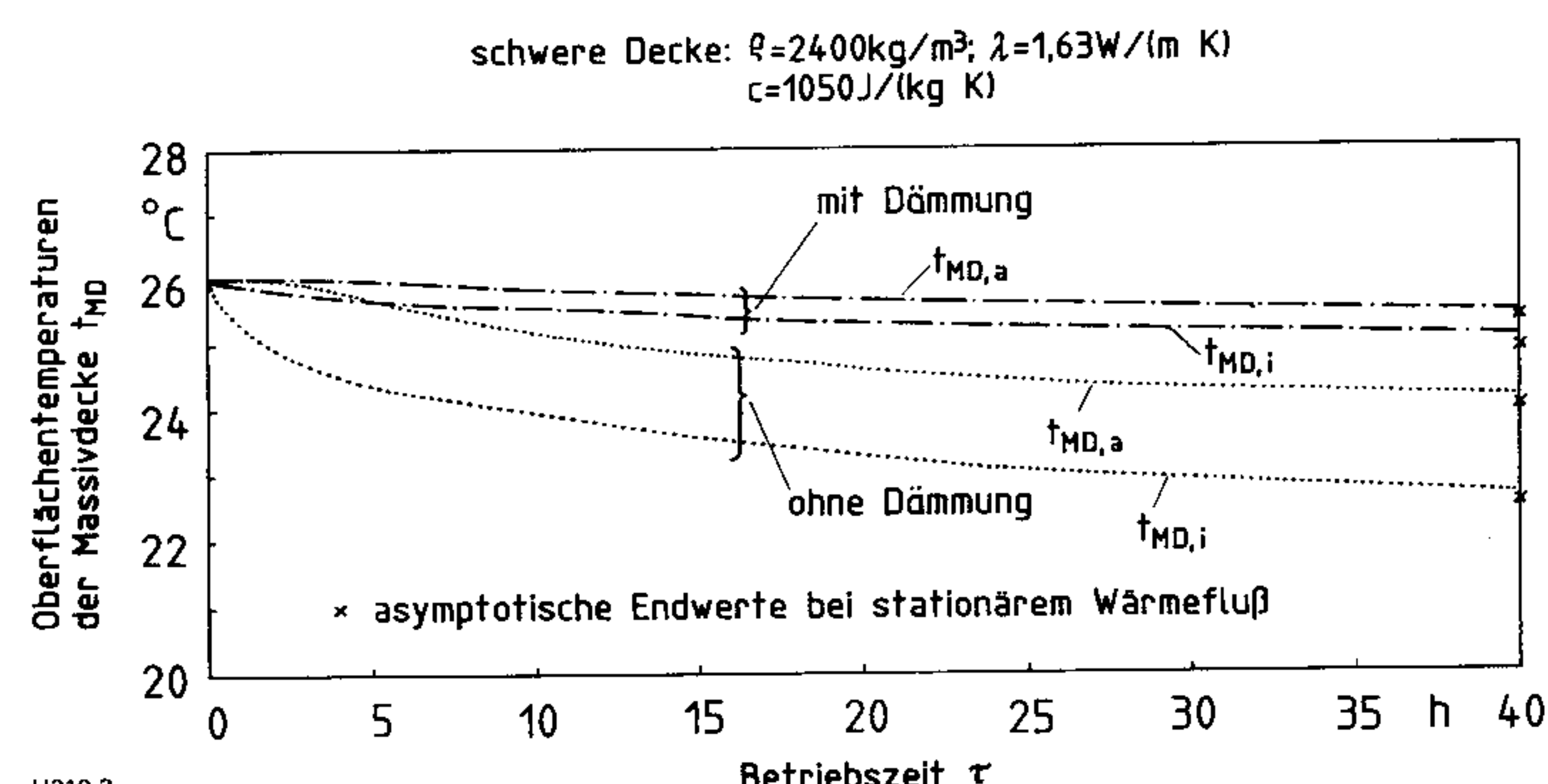


Bild 3: Verlauf der Oberflächentemperaturen einer schweren Massivdecke in den ersten 40 Betriebsstunden in Abhängigkeit der aufgetragenen Dämmschicht

schlossen die Kühldecke – bedeutenden Einfluß auf den Verlauf der Raumtemperatur. Um das Modell relativ einfach zu gestalten und um das instationäre Verhalten der Decke separiert von überlagerten Einflüssen beurteilen zu können, wird der Raumtemperaturverlauf vorgegeben. Dabei sind beliebige Variationen – gebunden an verschiedene Betriebszeitregime – möglich.

M9: Die Anfangsbedingung – bezogen auf den Speicherzustand der Betondecke – kann durch Eingabe der Temperaturverteilung Berücksichtigung finden. Außerdem ist die Kaltwassertemperatur zeitabhängig wählbar.

M10: Das unter M2 genannte Rechenprogramm zur instationären Betrachtung der Wärmeleitung in der Massivdecke bildet das Kernstück des Algorithmus. Als Unterprogramm für den innenseitigen Wärmeübergang wird der Algorithmus zur wärmetechnischen Berechnung der Kühldecke eingebunden. Für die zur jeweiligen Zeit gegebenen Umgebungsbedingungen werden die Wärmeströme zu den Oberflächen des Kühlpaneels bei vorgegebener Kaltwassertemperatur iterativ ermittelt.

Zeitabhängige Temperatur- und Wärmestromverläufe bei Einsatz geschlossener Kühldecken

Die Untersuchungen werden für zwei Massivdecken durchgeführt:

		schwere Decke	leichte Decke
Dicke	mm	200	200
Dichte	kg/m ³	2 400	1 200
Wärmeleitfähigkeit	W/(m K)	1,63	0,47
Wärmekapazität	J/(kg K)	1 050	1 050

Die charakteristischen Konstruktionsdaten der Lamellen-Kühldecke sind:

	Lamelle	Rohr	Dämmung
Material	Aluminium	Stahl	Mineralwolle
Abmessung	mm	21,3/16,0	40
Wärmeleitfähigkeit	W/(m K)	50	0,04

Form- und kraftschlüssiger Lamellenanschluß an das Rohr:
Rohrabstand: 300 mm; Umschlingungswinkel: $\pi/2$
Äquivalenter Wärmeleitwiderstand Lamelle – Rohr: 0,002 m² K/W.

Für den Luftraum zwischen Dämmschicht und Massivdecke wurde ein äquivalenter Wärmeleitwiderstand von $R_L = 0,18 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ angesetzt.

Bei der Abarbeitung des komplexen Rechenprogramms sind folgende Diskretisierungen getroffen worden:

Zeitschritte: $\Delta\tau = 60 \text{ s}$

Elementzahlen der Massivdecke: $z = 20$

Elementdicke: $\Delta x = 10,53 \text{ mm}$

(An den Deckenbegrenzungen liegt jeweils eine Halbschicht, wodurch sich die vorgenannte Elementdicke erklärt [$19 \cdot 10,53 \text{ mm} \approx 200 \text{ mm}$].) Die gewonnenen Ergebnisse sind grafisch aufgetragen. Es ergeben sich nachfolgende Feststellungen:

F1: Die Wärmeströme, die eine geschlossene Kühldecke in den ersten fünf Betriebsstunden vom Raum $\dot{q}_i$ und von einer „aufgeheizten“ Massivdecke $\dot{q}_a$ aufnimmt, stehen nach Bild 2 in folgender Relation:

- ohne aufliegende Dämmschicht $\dot{q}_a = (0,25 \text{ bis } 0,50) \dot{q}_i$
- mit aufliegender Dämmschicht $\dot{q}_a = 0,10 \dot{q}_i$.

Die Untersuchungen wurden für eine schwere und eine leichte Decke geführt. Die Temperatur der Massivdecke wurde zu Beginn der Betriebszeit homogen mit $t_{MD} = 28^\circ \text{C}$ bzw. $t_{MD} = 26^\circ \text{C}$ angenommen. Die Raumtemperaturen im unteren und oberen Raum folgen zu Betriebsbeginn einer Sprungfunktion auf $t_i = t_a = 26^\circ \text{C}$.

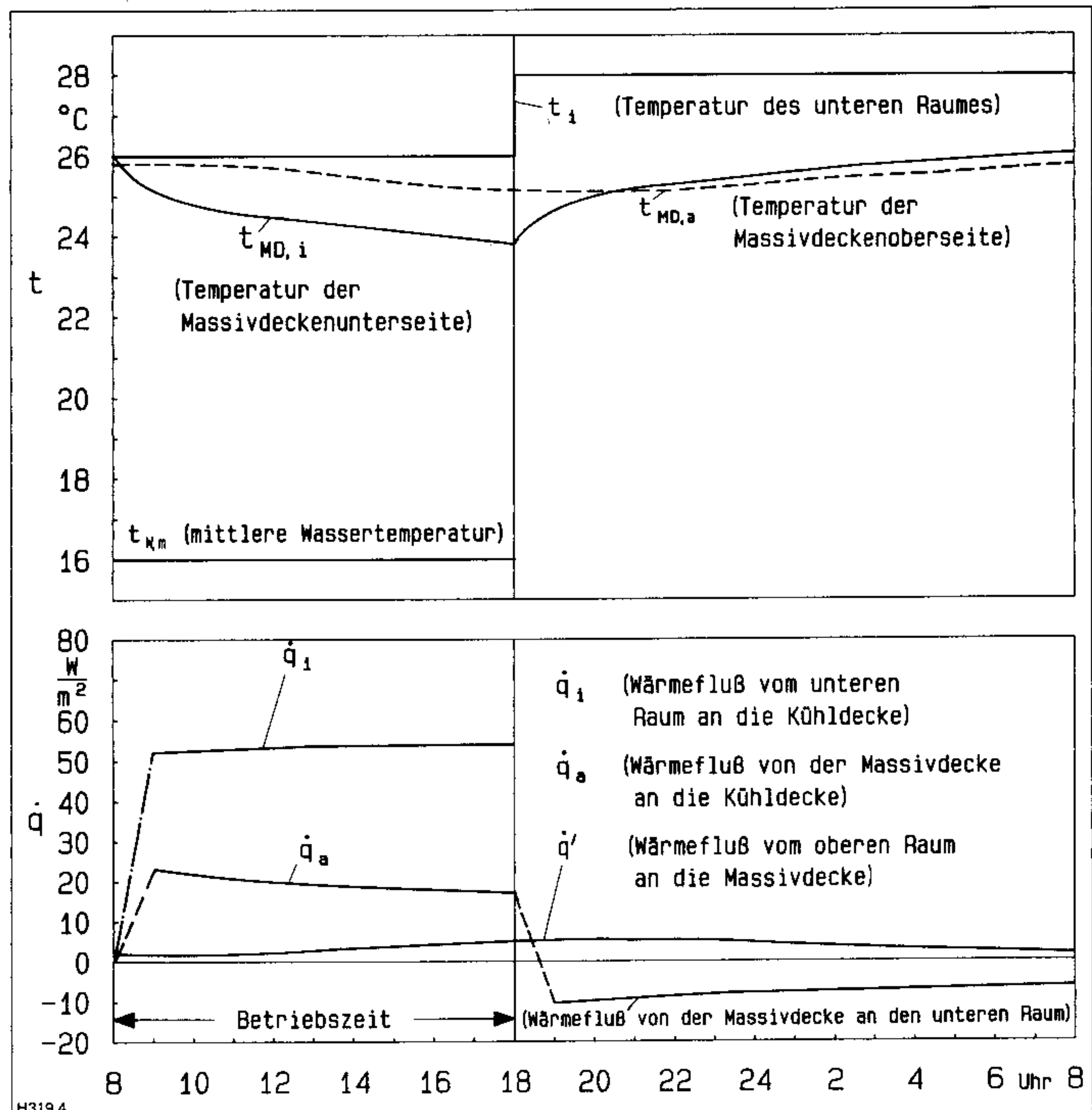


Bild 4: Temperatur- und Wärmestromverläufe einer schweren Massivdecke mit untergehängter, geschlossener Lamellenkühldecke im eingeschwungenen Zustand mit sprungförmigem Raumtemperaturverlauf

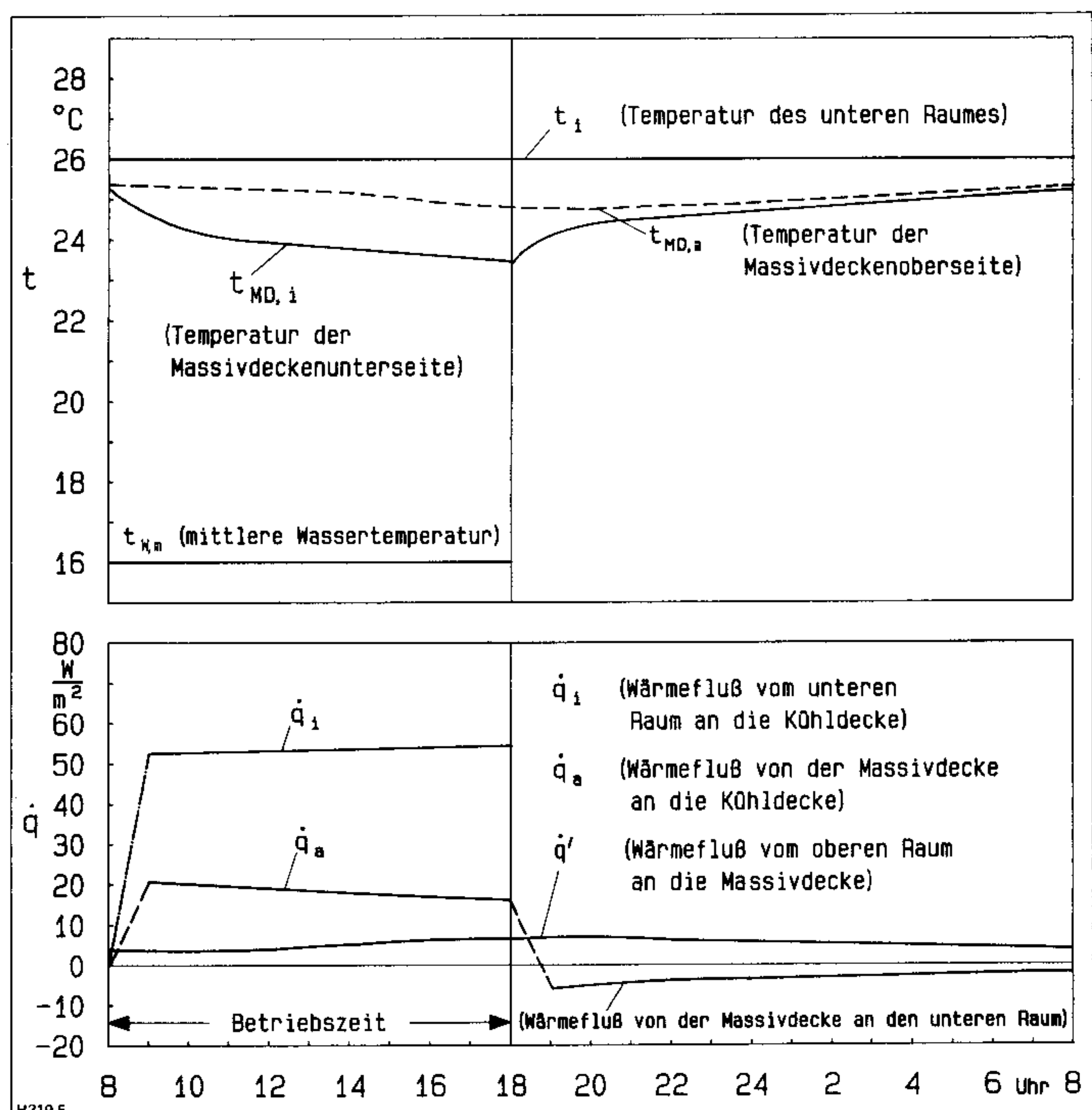


Bild 5: Temperatur- und Wärmestromverläufe einer schweren Massivdecke mit untergehängter, geschlossener Lamellenkühldecke im eingeschwungenen Zustand mit konstantem Raumtemperaturverlauf

Die mittlere Kaltwassertemperatur beträgt konstant $t_{W,m} = 16^\circ \text{C}$. Die Wärmeaufnahme der Massivdecke vom oberen Raum $\dot{q}'$, gebildet mit $\alpha_{MD,a}$ nach Gl. (2), wird in den ersten fünf Stunden von der Kühldecke praktisch nicht beeinflusst.

F2: Die Massivdecke hat wegen ihrer hohen Wärmespeicherfähigkeit eine sehr große Trägheit.

Bild 3 zeigt die zeitabhängigen Temperaturverläufe und deren asymptotische Endwerte bei stationärem Wärmefluß an der inneren und äußeren Oberfläche $t_{MD,i}$ und $t_{MD,a}$ nach Inbetriebnahme

der Kühldecke zum Zeitpunkt $\tau = 0$. Die Massivdecke hatte die homogene Ausgangstemperatur von $t_{MD} = t_{MD,i} = t_{MD,a} = 26^\circ\text{C}$.

Während der Betrachtungszeit betragen die Raumtemperaturen $t_i = t_a = 26^\circ\text{C}$ und die mittlere Kaltwassertemperatur $t_{W,m} = 16^\circ\text{C}$.

F3: Die Entspeicherung der Massivdecke belastet während der Betriebszeit der ungedämmten Kühldecke die Kälteanlage zusätzlich. Die Wärmeaufladung der Massivdecke außerhalb der Betriebszeit ist wenig bedeutungsvoll. Man könnte denselben Effekt durch eine verlängerte Betriebszeit bei niedrigeren Anlagen- und Betriebskosten erreichen.

Diese Aussage folgt aus den *Bildern 4 bis 6*. Allen Untersuchungen liegen schwere Massivdecken und eine 10stündige Betriebszeit mit einer mittleren Kühlwassertemperatur von $t_{W,m} = 16^\circ\text{C}$ zu-

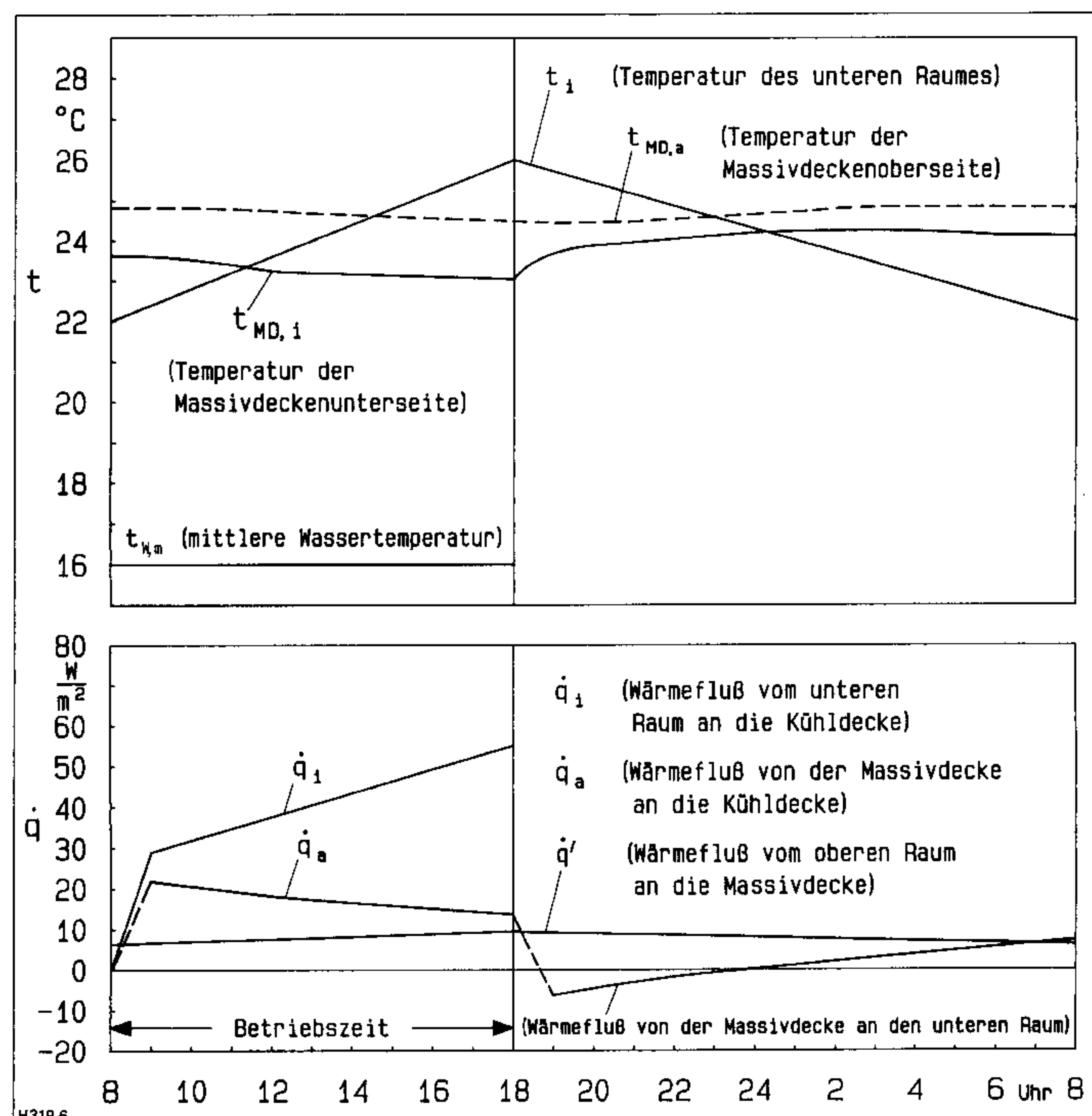


Bild 6: Temperatur- und Wärmestromverläufe einer schweren Massivdecke mit untergehängter, geschlossener Lamellenkühldecke im eingeschwungenen Zustand mit gleitendem Raumtemperaturverlauf

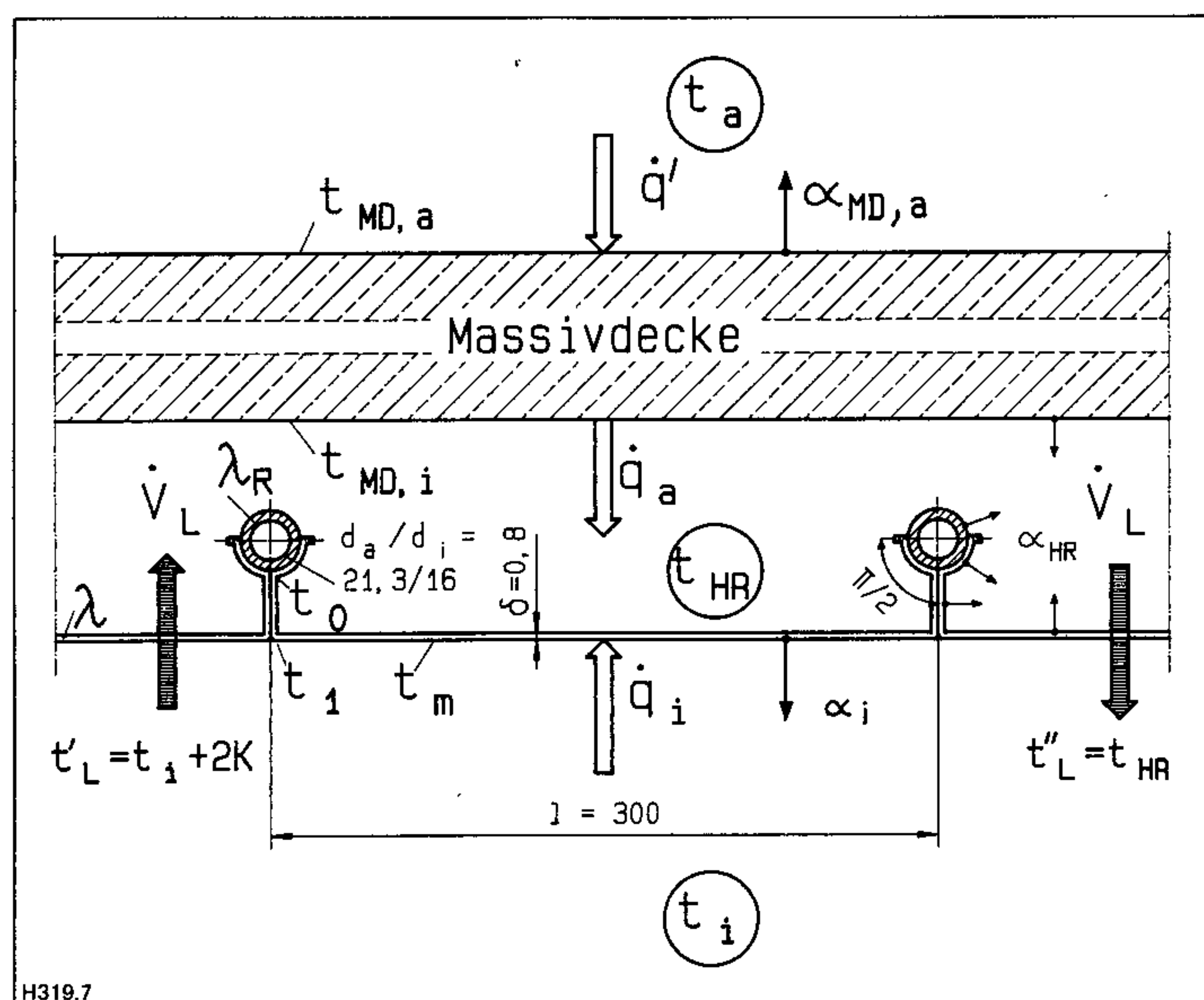


Bild 7: Massivdecke mit untergehängter, offener Lamellenkühldecke ohne Dämmschicht (Abmessungen in mm)

grunde. Unterschiedlich sind lediglich die vorgegebenen Raumtemperaturverläufe $t_i(\tau)$:

- *Bild 4:* $t_i(\tau = 8 \text{ bis } 18 \text{ Uhr}) = 26^\circ\text{C}$
 $t_i(\tau = 18 \text{ bis } 8 \text{ Uhr}) = 28^\circ\text{C}$
- *Bild 5:* $t_i(\tau = 8 \text{ bis } 8 \text{ Uhr}) = 26^\circ\text{C}$
- *Bild 6:* $t_i(\tau = 8 \text{ Uhr}) = 22^\circ\text{C}$; $t_i(\tau = 18 \text{ Uhr}) = 26^\circ\text{C}$
dazwischen linear ansteigend bzw. abfallend.

Für den darüberliegenden Raum gelte einheitlich $t_a(\tau) = 26^\circ\text{C} = \text{const.}$

Die in den *Bildern 4 bis 6* aufgezeichneten Temperatur- und Leistungsverläufe entsprechen einem eingeschwungenen Zustand nach einer siebentägigen Wiederholung der vorgenannten Annahmen. Die qualitativen Aussagen sind für alle Varianten gleich. Für den praxisrelevanten Fall – dem dachförmigen Raumtemperaturverlauf gemäß *Bild 6* – ergeben sich während der Betriebszeit für eine ungedämmte Kühldecke folgende Verhältnisse:

- mittlerer Wärmestrom von der Massivdecke an die Kühldecke $\dot{q}_{a,m} = 0,41 \dot{q}_{i,m}$
- mittlerer Wärmestrom vom darüberliegenden Raum an die Massivdecke $\dot{q}'_m = 0,19 \dot{q}_{i,m}$
- mittlerer Speicherwärmestrom $\dot{q}_{s,m} = 0,22 \dot{q}_{i,m}$

Dies bedeutet, daß während der Betriebszeit zur Entspeicherung der Decke ein mittlerer Wärmestrom benötigt wird, der in seiner Größe 22% des Wärmestromes vom primär zu kühlenden, unteren Raum an die Kühldecke entspricht.

Wärmetechnische Modellierung bei Einsatz offener Kühldecken

Die früher genannten Modellbedingungen werden nachfolgend für diesen speziellen Anwendungsfall ergänzt.

M11: Unter einer offenen Kühldecke werden hinterlüftete Kühlpaneele verstanden. Die aufsteigende Warmluft tritt durch beispielsweise 2 cm breite Deckenfugen hindurch, kühlt sich auf der Oberseite der Kühlpaneele ab und strömt mit niedrigerer Temperatur in den Raum zurück. Um wärmetechnisch vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wird von der analogen Geometrie wie in *Bild 1* ausgegangen. Die Lösung ohne Dämmschicht ist in *Bild 7* veranschaulicht. Im Hohlraum zwischen Aluminiumlamelle und Massivdecke wird eine zusätzliche Beaufschlagung mit einem Luftvolumenstrom $\dot{V}_L$ vorgesehen. Er könnte beispielsweise durch Fugen zwischen den Kassettenplatten ein- und austreten.

M12: Aufgrund der Hinterlüftung der Kühlpaneele ist der Anteil der konvektiven Wärmeabgabe größer als bei geschlossenen Ausführungen. Die Annahme des zirkulierenden Luftvolumenstromes kann nur mit großer Unsicherheit erfolgen. Im vorstehenden Beispielfall wird $\dot{V}_L = 20 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ h})$ gewählt. Er folgt aus einer Abschätzung der Druckbilanzen, wobei der Staudruck der aufsteigenden Warmluft und der Auftrieb innerhalb der Konstruktionshöhe der Paneele druckerzeugend und die Widerstände zwischen den Paneeleugen einschließlich des Strömungsaufbaus druckverbrauchend wirken.

M13: Die in den Deckenhohlraum einströmende Warmluft wird mit einer Übertemperatur von 2 K gegenüber der Raumtemperatur t_i angesetzt. Sie verläßt den Hohlraum mit der dort herrschenden Temperatur t_{HR} . Die unter M5 beschriebene Wärmebilanz ist um die Abkühlung des zirkulierenden Luftvolumenstromes erweitert.

Zeitabhängige Temperatur- und Wärmestromverläufe bei Einsatz offener Kühldecken

Die Untersuchungen wurden wiederum für die schwere Massivdecke mit der bereits vorgestellten ungedämmten Lamellenkühldecke durchgeführt. Der Wärmeleitwiderstand der Dämmung und

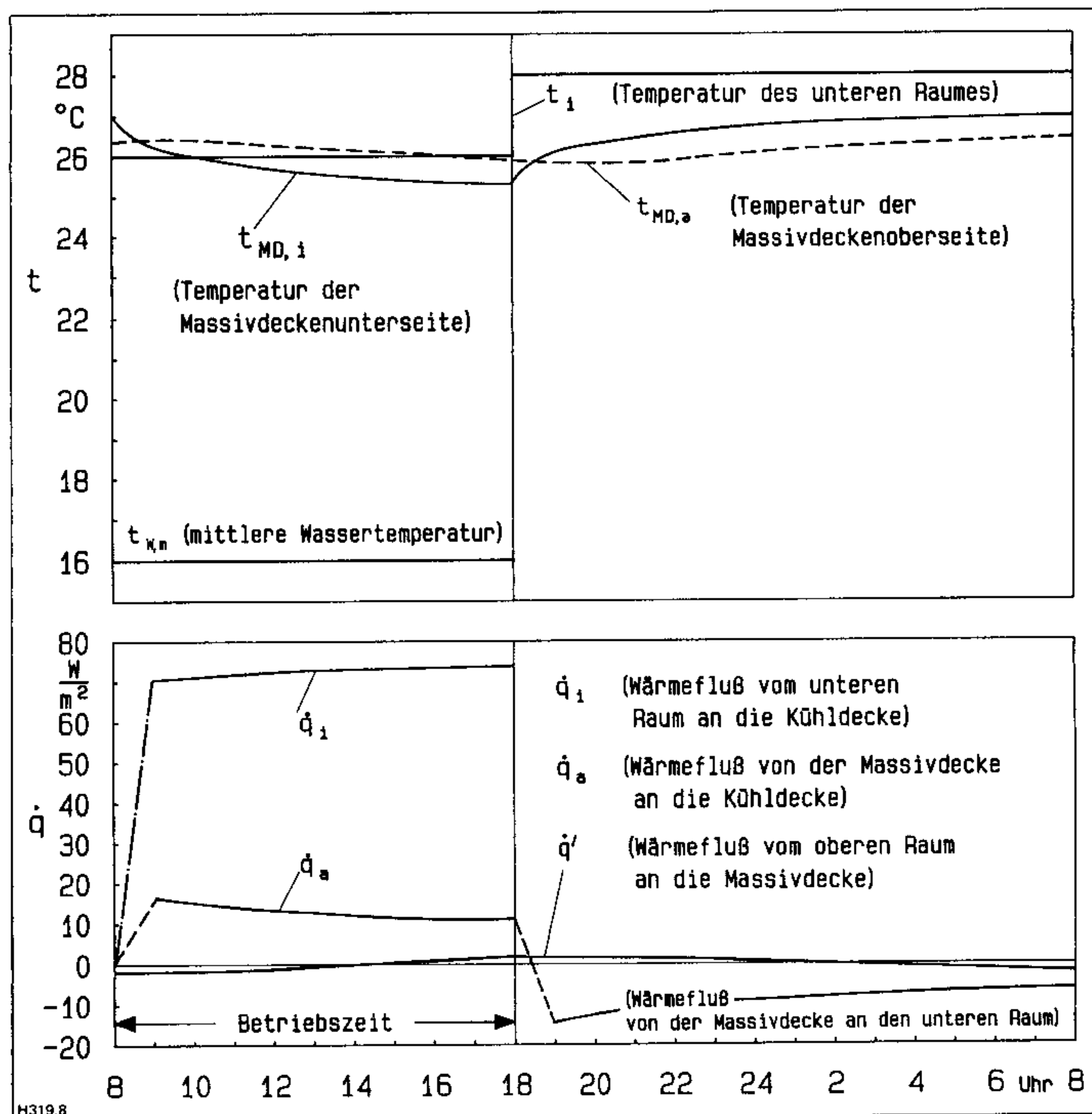


Bild 8: Temperatur- und Wärmestromverläufe einer schweren Massivdecke mit untergehängter, offener Lamellenkühldecke im eingeschwungenen Zustand mit sprunghaftem Raumtemperaturverlauf

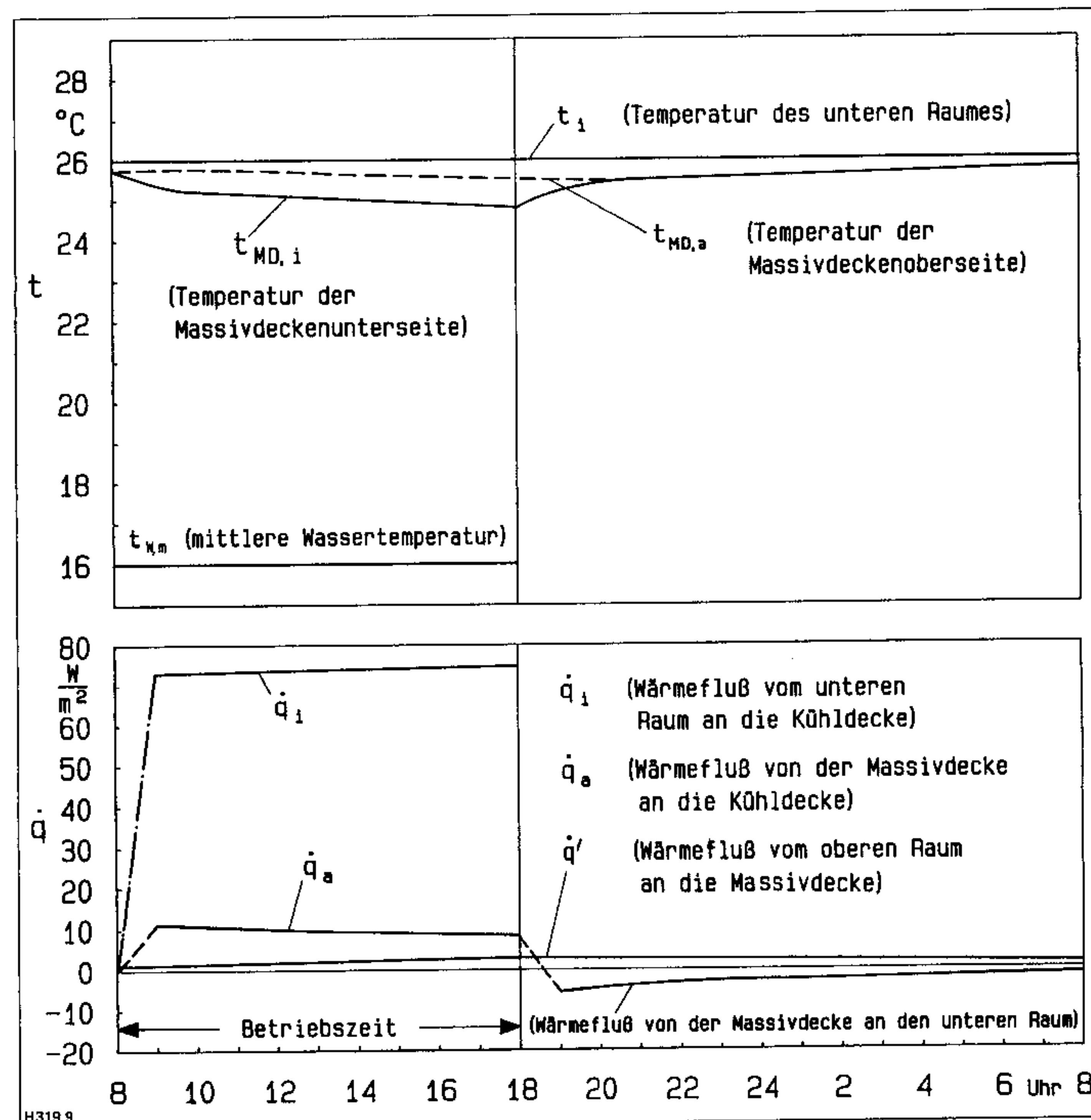


Bild 9: Temperatur- und Wärmestromverläufe einer schweren Massivdecke mit untergehängter, offener Lamellenkühldecke im eingeschwungenen Zustand mit konstantem Raumtemperaturverlauf

der Luftschicht sind modellgemäß jeweils Null ($\delta_D/\lambda_D = 0$; $R_L = 0$). Die Orts- und Zeitdiskretisierungen bleiben wie bei der ersten Variantenrechnung erhalten. Die Ergebnisse führen zu folgenden Feststellungen:

F4: Die Hinterlüftung der Kühlpaneele bewirkt relativ hohe Lufttemperaturen im Hohlraum zwischen Massiv- und Kühldecke, wodurch der Wärmeaustausch zwischen Massivdecke und Kühldecke stark reduziert wird.

Diese Aussage folgt aus den Bildern 8 bis 10 in Gegenüberstellung der Bilder 4 bis 6, denen jeweils gleiche Raumtemperaturverläufe

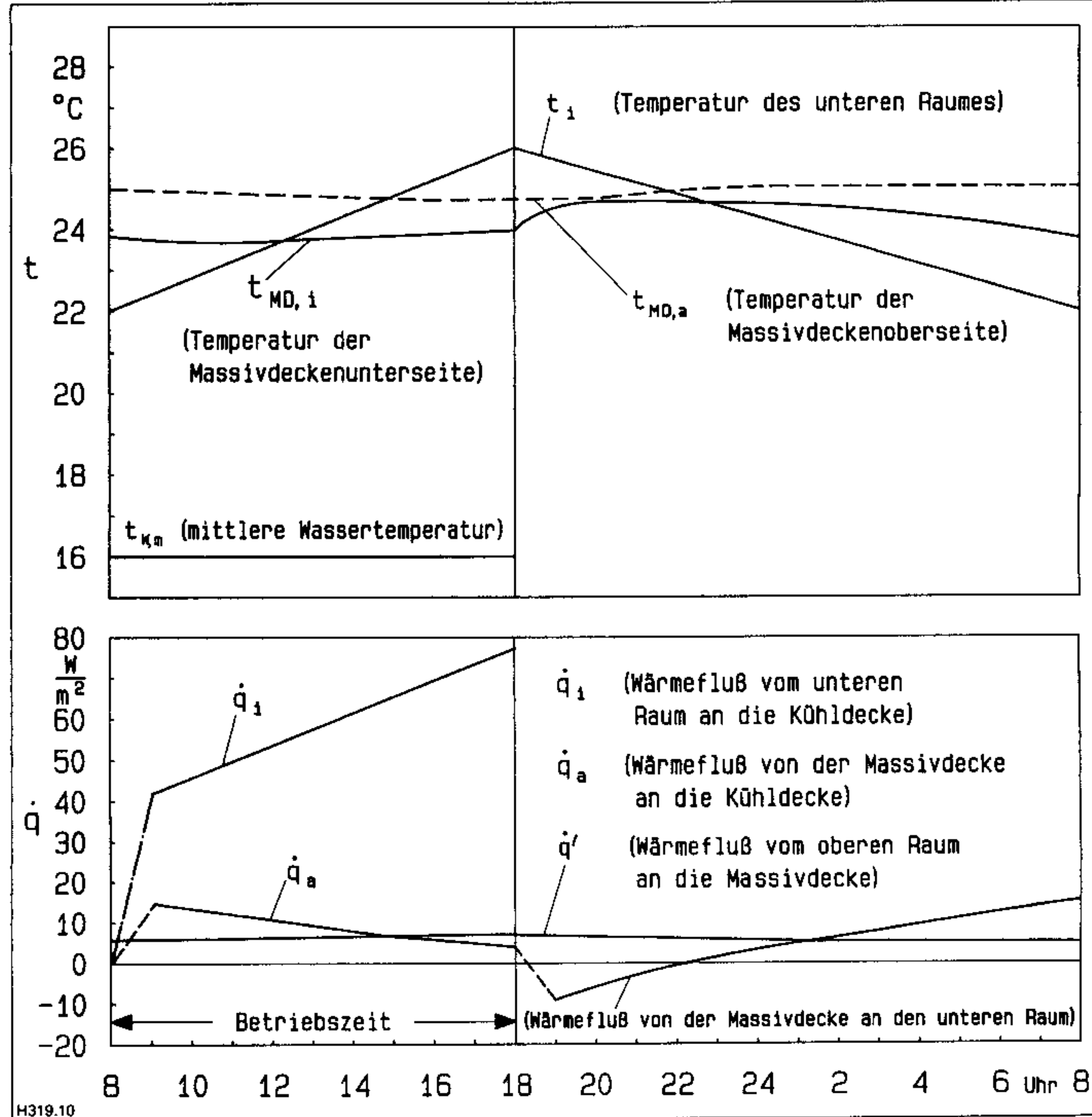


Bild 10: Temperatur- und Wärmestromverläufe einer schweren Massivdecke mit untergehängter, offener Lamellenkühldecke im eingeschwungenen Zustand mit dachförmigem Raumtemperaturverlauf

$t_i(\tau)$ und $t_a(\tau)$ aufgeprägt sind. Für den zwischen $t_i = 22^\circ\text{C}$ und $t_i = 26^\circ\text{C}$ linear pendelnden Raumtemperaturverlauf gilt:

- mittlerer Wärmestrom von der Massivdecke an die Kühldecke $\dot{q}_{a,m} = 0,15 \dot{q}_{i,m}$
- mittlerer Wärmestrom vom darüberliegenden Raum an die Massivdecke $\dot{q}'_m = 0,10 \dot{q}_{i,m}$
- mittlerer Speicherwärmestrom $\dot{q}_{s,m} = 0,05 \dot{q}_{i,m}$

Dies bedeutet, daß am Ende der Betriebszeit der Wärmefluß von der Massivdecke an die Kühlpaneele kleiner ist als der Wärmestrom vom darüberliegenden Raum an die Massivdecke. Damit kann zur Deckung der Spitzenlast die Massivdecke geringfügig beitragen. Weiterhin ist hervorzuheben, daß die Wärmestromaufnahme von oben im Spitzenlastfall nur 5% des Wärmestromentzuges vom Raum darstellt, eine durchaus akzeptable Größe.

Zusammenfassung

Die instationäre Betrachtung mit Hilfe eines vereinfachten Modells (Massivdecke und Kühldecke wärmetechnisch direkt gekoppelt; Raumtemperaturverlauf in Varianten vorgegeben) zeigt, daß geschlossene Kühldecken auf der Oberseite wärmedämmend ausgeführt werden sollten und daß die konstruktiv bedingte ungedämmte Bauweise der offenen Kühldecke nicht nachteilig ist.

Ergänzend sei erwähnt, daß die Untersuchung der erforderlichen systemabhängigen Kühlleistung eines Raumes [4], die für stationäre Bedingungen und vollkommene Raumankopplung durchgeführt wurden, deutliche Vorteile für gedämmte Kühldeckensysteme ergab. [H 319]

Literaturangaben

- [1] Glück, B.: Wärmeübertragung, Wärmeabgabe von Raumheizflächen und Rohren. 2. Auflage, Berlin, Verlag für Bauwesen 1990.
- [2] Glück, B.: Leistungsparameter von Kühldecken CCI (1990) Nr. 14, S. 43/44.
- [3] Glück, B.: Leistung von Kühldecken. HLH 42 (1991) Nr. 3, S. 213/215.
- [4] Glück, B.: Erforderliche stationäre Kühlleistung in Abhängigkeit des im Raum installierten Kühlsystems. Gesundheitsingenieur (1992) Heft 1, S. 3/15.