

Wenn Bauteilheizung oder -kühlung, dann aber bitte innovativ!

Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück, F+E TGA, 08547 Jöbnitz

Warum kann ein Sinneswandel sinnvoll sein?

In der Regel ist man in der Technik bestrebt Trägheiten zu vermeiden, da sonst Zustandsänderungen meistens mit Energiemehraufwendungen verbunden sind und/oder unser Willen in der raschen Umsetzung behindert wird. Dies läßt sich an beliebig vielen Beispielen - vom Automobilbau bis zur Heizungstechnik - demonstrieren. So entwickelten sich unsere Heizungssysteme systematisch auch zu trägheitsarmen Anlagen mit geringen Speichermassen bezogen auf die Heizflächen, das Rohrsystem und den Kessel. Die Begrenzung der Wärmeverluste und die gute, dem Bedarf sofort anpaßbare Wärmelieferung stellten die Zielstellungen dar. Analog arbeiten die RLT-Anlagen. Diese Entwicklung war grundsätzlich nicht falsch, wenn man von einigen Überspitzungen absieht.

Völlig andere Zielstellungen ergeben sich, wenn man ein kostengünstiges oder kostenfreies und/oder umweltschonendes Energiedargebot nutzen kann und will, was mit geringen Potentialunterschieden - beispielsweise Temperaturdifferenzen - und eventuell auch noch zeitlich verschoben zum Bedarf verfügbar ist. Speichervorgänge sind dann geradezu erwünscht. So wäre der Weinanbau in unseren Breiten ohne die Wärmespeicherung der steinigen Berghänge infolge der Sonneneinstrahlung und deren zeitversetzte Wärmeabgabe in den Nachtstunden nicht denkbar.

Werden bekannte, vielfach früher auch schon realisierte Überlegungen in die Technik wieder eingeführt, so meinen oftmals die Fachkollegen, daß das Rad neu erfunden worden wäre und man sich bezüglich des Entwicklungsverlaufs im Kreise drehe. In den allermeisten Fällen trifft dies nicht zu, da sich im Verlaufe der Zeit die Technik in ihrer Gesamtheit weiterentwickelte und damit neue Produkte und Wirkprinzipien entstanden, die nunmehr zusätzlich einsetzbar sind. Man denke beispielsweise an die moderne Steuer- und Regelungstechnik einschließlich der Fuzzy-Technik und der neuronalen Netze, die beispielsweise Speichervorgänge auch mit "Erfahrungswissen" steuern können. Wenn man die neueren Erkenntnisse in die Entwicklung unter Inanspruchnahme früherer Lösungsvarianten einfließen läßt, was in der Regel der Fall ist, wird man den Entwicklungsverlauf nicht mehr als kreisförmig, sondern als spiralförmig nach oben erkennen. Selbstverständlich zeigt der Blick vom spiralförmigen Weg nach unten dann mitunter Ähnlichkeiten, was ja gewollt ist. Der Ingenieur hat natürlich stets zu überprüfen, ob er auch das ganze verfügbare Know-how in die "alte" Lösung integriert hat, d. h., er bestimmt die Steigung der Spirale.

Welche Zielstellung verfolgt die instationär arbeitende Bauteilheizung und -kühlung und welche Grundbedingungen sind zu erfüllen?

Das Grundprinzip - z. B. des BATISO-Verfahrens - ist es, daß eine *große Speicherwärme* bei *niedriger Temperaturdifferenz zur Raumtemperatur* vorgehalten wird, so daß diese bei Absinken der Raumtemperatur zur Beheizung oder bei Ansteigen der Raumtemperatur zur Kühlung nahezu selbstregelnd einsetzbar ist.

Der niedrige Potentialunterschied (Temperaturdifferenz) der Speicherwärme zum thermischen Raumzustand gestattet über lange Zeiträume *Umweltenergie* - in welcher Form auch immer - zur Ladung des Speichers einzusetzen. So könnte beispielsweise die Beheizung mit Wasser aus Sonnenkollektoren einfacher, kostengünstiger Bauart und die Kühlung mit Wasser aus Vorrichtungen, die innovative Varianten der freien Kühlung einsetzen, erfolgen.

Das Verfahren arbeitet um so effektiver, je mehr *Speicherwärme* verfügbar ist. Die Betonung liegt hierbei auf Speicherwärme und nicht auf Wärmespeicherkapazität. Häufig glaubt man irrtümlich, daß die Bereitstellung von Speicherkapazität, z. B. in Form von dicken Betondecken ausreichend für die Funktionstüchtigkeit ist. Sie bildet aber nur eine notwendige Voraussetzung. Nicht weniger wichtig ist die hinreichende Bedingung, die möglichst vollständige Beladung des Speicherbauteils. Als Idealfall wäre ein Bauteil mit völlig homogener Temperatur anzustreben.

Ist die Konstruktion der thermisch aktiven Speicherbauteile auf dem neuesten Stand?

Bei der Bauteilheizung und -kühlung besteht momentan die Sorge, daß die neuere technische Entwicklung ungenügend beachtet wurde, denn die realisierten Systeme erinnern zu sehr an "uralte Zeiten". Die sogenannte CRITTALL-Decke aus dem Jahre 1930 mit dicken Stahlrohrregistern ist lediglich durch Register aus dicken Kunststoffrohren "verjüngt" worden. (Die aufgetretenen Probleme der noch im Betrieb befindlichen CRITTALL-Decken sind mit den wärmetechnisch schlechten Außenwandkonstruktionen und der veränderten Nutzung durch große innere Lasten des modernen Bürobetriebs zu erklären und sollen nicht weiter erörtert werden.)

Derzeit werden Konstruktionen nach Bild 1 mit mehr oder weniger großen Abwandlungen realisiert. Betondecken mit 300 mm Dicke bilden eine große Wärmespeicherkapazität, die mit wasserdurchflossenen Rohren beispielsweise symmetrisch verlegt, beheizt oder gekühlt werden.

Man könnte nunmehr aufwendige Modelle aufstellen, die die Dynamik der Be- und Entladung in Abhängigkeit der Rohrlage, der Raumlasten, der Wassertemperatur usw. simulieren, aus denen dann die Vor- und Nachteile der Varianten bei tiefgründiger Auswertung folgten. Aussagekräftiger und sofort deutbar sind aber meistens Grenzbetrachtungen, weshalb sich im weiteren auf diese Vereinfachungen

chungen beschränkt wird. Mit einem ebenfalls mathematisch anspruchsvollen Simulationsprogramm nach [1, 2] wird der stationäre Zustand für einen typischen Kühlfall betrachtet, um festzustellen welche "negative" Speicherwärme bei einer Wassertemperatur von 18 °C und einer konstanten Raumtemperatur von 24 °C theoretisch verfügbar ist. Es gelten: geometrische Daten nach Bild 1 sowie Belagdicke 10 mm, Wärmeleitfähigkeit des Betons 1,4 W/(m K) und des Belages 0,07 W/(m K), spezifische Wärmekapazität des Betons 1050 J/(kg K), Betondichte 2400 kg/m³).

Die Ergebnisse lauten:

Kühlleistung (Wärmeaufnahme vom unteren Raum und insgesamt): 17,9 W/m²; 27,0 W/m²

mittlere, minimale und maximale Temperatur an der Deckenunterseite: 22,1 °C; 22,1 °C; 22,2 °C.

Aufschlußreich ist die Temperaturverteilung im Deckenquerschnitt für den halben Rohrabstand:

Temperaturen in °C	x = 0 mm	x = 50 mm	x = 100 mm	x = 150 mm
y = 150 mm	21,1	21,2	21,2	21,3
y = 100 mm	20,7	20,8	20,9	21,0
y = 50 mm	20,1	20,4	20,7	20,8
y = 0 mm	18,0 (Rohr)	20,2	20,7	20,8
y = -50 mm	20,4	20,7	21,0	21,1
y = -100 mm	21,4	21,4	21,5	21,6
y = -150 mm	22,1	22,1	22,2	22,2

Bezogen auf die Raumtemperatur von 24 °C sind in der Decke $Q = - 0,646 \text{ kWh/m}^2$ gespeichert.

Die BIONIK lehrt uns, daß die Natur zwar keine direkt und vollständig realisierbaren "Blaupausen" liefert, daß aber viele Effekte und Teilvorgänge in technische Wirkprinzipien umsetzbar sind. Bezüglich der Temperierung der Raumumfassungsflächen ist eine Analogie zur Durchblutung der menschlichen Haut überprüfenswert. (Bewußt wird nicht von der Haut in ihrer Gesamtheit gesprochen, da deren Funktion so komplex ist, daß ein "Nachbau" völlig utopisch wäre.) Das Blutgefäßsystem, über das die Wärmeabgabe nach außen erfolgt, könnte eine technische Umsetzung durch Kapillarrohrmatten in der Decke erfahren. Diese Kapillarrohrmatten aus Polypropylen werden zur Zeit mit Röhrchendurchmesser 3,4/2,3 mm und mit Rohrabständen ab 10 mm gefertigt. Ihr Einsatz wird bereits sehr erfolgreich in Kühldecken praktiziert. Nach innovativen Patentanmeldungen der Herstellerfirma CLINA, Berlin und nach eigenen Überlegungen sind aber noch zahlreiche Anwendungsfälle im Sinne der BIONIK denkbar.

Substituiert man in der Betondecke die dicken Rohre durch die beschriebenen Kapillarrohrmatten mit einem Röhrenabstand von 15 mm (Bild 2), so liefert die stationäre Berechnung des Kühlfalls unter gleichen Randbedingungen wie vorher folgende Ergebnisse:

Kühlleistung (Wärmeaufnahme vom unteren Raum und insgesamt): 27,9 W/m²; 42,0 W/m²

mittlere, minimale und maximale Temperatur an der Deckenunterseite: 21,2 °C; 21,2 °C; 21,2 °C.

Aufschlußreich ist die Temperaturverteilung im Deckenquerschnitt für den halben Rohrabstand:

Temperaturen in °C	x = 0 mm	x = 2,5 mm	x = 5 mm	x = 7,5 mm
y = 150 mm	19,7	19,7	19,7	19,7
y = 100 mm	19,2	19,2	19,2	19,2
y = 50 mm	18,7	18,7	18,7	18,7
y = 0 mm	18,0 (Rohr)	18,2	18,2	18,3
y = -50 mm	19,2	19,2	19,2	19,2
y = -100 mm	20,2	20,2	20,2	20,2
y = -150 mm	21,2	21,2	21,2	21,2

Bezogen auf die Raumtemperatur von 24 °C sind in der Decke $Q = -0,982 \text{ kWh/m}^2$ gespeichert.

Die Wärmekapazität der Decke ist natürlich gleich geblieben, aufgrund der Einbringung der Kapillarrohrmatte entsteht aber eine Erhöhung der Speicherwärme - in diesem Fall der "gespeicherten Kälte" - um 52 %.

Die Grafik im Bild 3 stellt diesen großen Unterschied nochmals gegenüber. Die Temperaturverläufe in unterschiedlichen Abständen unterhalb der Rohrebene sind jeweils entlang des halben Rohrabstandes aufgetragen. Sie liegen im Bauteil mit der Kapillarrohrmatte deutlich niedriger. Die grauen Pfeile kennzeichnen den Temperaturbereich der Betondecke im stationären Ladezustand.

Es ist weiterhin bemerkenswert, daß die *Kühlleistung* (Wärmeaufnahme) des Bauteils im Falle des Kapillarrohrmatteneinsatzes ebenfalls um **56 %** höher liegt, als im Falle herkömmlicher Verrohrung. Dieses thermodynamisch günstige Verhalten ist in zweifacher Weise vorteilhaft:

- Der Vorteil der Lastverschiebung liegt beispielsweise darin, daß nachts bei niedrigen Außentemperaturen besonders viel "Kühlenergie" umweltgerecht zur Verfügung steht. Damit muß die Decke, aber auch der Raum mit den übrigen Raumumfassungen und dem Interieur heruntergekühlt werden. Das bedeutet, daß man ein System benötigt, welches der Deckenmasse möglichst gleichmäßig und intensiv die Wärme entnimmt, gleichzeitig aber auch eine möglichst große Leis-

tung aus dem Raum abführt.

- Für den Fall, daß die Lastspitzen im Raum nicht allein durch die Speicherdynamik kompensierbar sind, muß durch konventionelle Kältetechnik Kaltwasser bereitgestellt werden. Es kommt dann darauf an, einen schnellen und intensiven Wärmeaustausch mit dem Raum herzustellen.

In beiden Fällen liefert die im Beton integrierte Kapillarrohrmatte bessere Voraussetzungen als die konventionelle Rohrverlegung.

Die eingangs gestellte Frage: "Ist die Konstruktion der thermisch aktiven Speicherbauteile auf dem neuesten Stand?", ist nach diesen einfachen Überlegungen eindeutig mit "Nein" zu beantworten, denn Speicherbeladung und momentane Leistungswerte sind mit Alternativsystemen um den Faktor 1,5 besser!

Wie verhält sich die Dynamik der verschiedenen Speichersysteme?

Wie bereits erwähnt, ist die Simulation dieser Prozesse sehr kompliziert und werde hier bewußt umgangen. Bei der vergleichenden Bewertung der Systeme sei dagegen eine einfache Überlegung verwendet. Die Dynamik der gezielten, d. h. aktiven Be- oder Entladung des Speichers wird bei gleicher Temperaturleitfähigkeit des Speichermaterials von der Entfernung der "Speicherzelle" von der Wärmequelle bzw. -senke, dies sind im vorliegenden Fall die Rohre, abhängen. Die Auswertung der "Wärmetransportlängen", gewichtet mit den Anteilen der Speicherkapazität des jeweiligen Volumenelementes bezogen auf die gesamte Speicherkapazität ergibt für:

- konventionelles Rohrsystem 115 mm
- Kapillarrohrmatte in Bauteilmitte 75 mm.

Das letzte Ergebnis leuchtet sofort ein, denn die enge Rohranordnung der Kapillarrohre führt logischerweise zu einer "Wärmetransportlänge", die genau der Hälfte der unter und oberhalb der Matte liegenden Massivelementdicke entspricht. Die beim konventionellen System um die 1,53-fach größere "Wärmetransportlänge" wird sich negativ auf die aktive Beeinflussung des Speicherbauteils auswirken.

Für eine exakte dynamische Betrachtung sind in den mit Kapillarrohrmatten bestückten Bauteilen wirklichkeitsnahe Vereinfachungen möglich. Die stationären Temperaturverteilungen (zweite Tabelle und Bild 3) zeigen bereits ab einem senkrechten Abstand von 10 mm - gerechnet von der Mitte der Rohrebene - Isothermen parallel zur Bauteilberandung. Dieser ideale Zustand wird sich auch bei anschließenden dynamischen Vorgängen nicht ändern, so daß für diese Bereiche eine eindimensionale instationäre Betrachtung ausreichend ist. In der Nähe der Matten (± 10 mm) könnte unter Einfügen bestimmter Modifikationen mit einer zweidimensionalen quasistationären Wärmeleitung ge-

arbeitet werden, und an den raumseitigen Bauteilbegrenzungen wäre der Anschluß des Programmsystems "Raummodell" nach [3] zur wärmetechnischen und wärmephysiologischen Beurteilung des Raumes denkbar.

Können die Bauteil-Speichersysteme konstruktiv weiter verbessert werden?

Die Speicherbauteile sollen vorrangig - wie ausführlich beschrieben und bekannt - durch zeitliche *Verschiebung des Lastbedarfs* die *Nutzung der Umweltenergie in großem Umfang* ermöglichen. Das weiterentwickelte System soll zusätzlich *innerhalb des Gebäudes die Wärmeströme so verschieben*, daß eine möglichst große Bedarfsglättung erfolgt. Hierbei können Speichervorgänge mitunter störend wirken, so beispielsweise wenn ein Raum geheizt werden muß, in einem anderen aber plötzlich große innere Wärmelasten zeitgleich entstehen. Der über die Speichermassen geführte Ausgleich kann dies möglicherweise nicht gewährleisten, so daß "nachgeheizt" werden muß. Der ähnliche Fall tritt ein, wenn die Lastspitzen generell nicht durch die verfügbare Umweltenergie kompensiert werden können. Das Heizen oder Kühlen mit konventionell erzeugter Wärme oder Kälte führt beim Einspeisen in das Speicherbauteil zu einer großen Energieaufnahme und stark verzögerter Kompensation der thermischen Raumlasten. In der Übergangszeit kann es zu täglichen Wechseln kommen, die letztlich eine Energievergeudung bedeuten. Das vielfach gehörte Argument, daß dies nur selten passiere befriedigt nicht. In einigen Projekten werden auch zusätzlich Heizsysteme mit örtlichen Heizkörpern unter den Fenstern eingesetzt, die fehlende Heizleistungen kompensieren und gleichzeitig den Kaltluftabfall verhindern. Wie aber werden fehlende Kühlleistungen im Spitzenfall ergänzt? Das Abkühlen der gesamten Decke mit konventionell erzeugter Kälte läuft dem eigentlichen Bemühen völlig entgegen.

Eine konstruktive Weiterentwicklung könnte darin bestehen z. B. zwei Kapillarrohrmatten einzulegen, wovon eine oberflächennah eingegossen ist. Diese könnte dann analog zu einer Kühldecke die kurzfristige Spitzenlastdeckung ohne vorrangige Speicherverluste übernehmen oder zur zeitgleichen Lastverschiebung zwischen den Räumen eines Gebäudes herangezogen werden. Die möglichen, steuerbaren Lastverschiebungsvarianten gestalten sich damit außerordentlich umfangreich. Die Lage der für die Speicherung maßgeblichen Kapillarrohrmatte kann in relativ großen Grenzen variiert werden. Würde sie beispielsweise nur 50 mm unter dem Belag (vergleiche Bild 2) angeordnet und *allein* betrieben, so reduzierte sich das Speichervermögen bei sonst analogem, stationärem Betrieb als Grenzfall nur auf $-0,889\text{kWh/m}^2$. Dies sind immer noch 38 % mehr, als bei der jetzigen konventionellen mittigen Anordnung der dicken Rohrregister.

Folgte man diesem Vorschlag, ergäben sich auch größere Gestaltungsfreiheiten bei der bautechnischen Fertigung, da man die Matten eventuell außerhalb des Bewehrungsbereiches einbringen könn-

te.

Der Materialaufwand an Kunststoff (Volumen pro Bauteilfläche) beträgt ohne Beachten der Verteilungen:

- konventionelles Rohrsystem 0,000377 m³/m²
- Kapillarrohrmatte 0,000328 m³/m².

Dies bedeutet eine Reduzierung des Kunststoffeinsatzes um 13 %.

Die Nachfrage bei der Herstellerfirma CLINA, Berlin ergab, daß auch andere Rohrteilungen und Rohrdurchmesser gefertigt werden können.

Als Anmerkung sei erwähnt, daß wissenschaftlich-technische Untersuchungen - die in Kürze veröffentlicht werden - zeigen, daß in ähnlicher Weise die Wärmeleistung von Fußbodenheizungen mit Kapillarrohrmatten gegenüber herkömmlichen Systemen deutliche Vorteile bietet. So kann beispielsweise bei Naßverlegesystemen als auch bei Trockenverlegesystemen unter Beibehaltung der Leistung die Differenz Wassertemperatur minus Raumtemperatur von 20 K bei konventionellen Systemen auf 12 K bis 13 K bei innovativen Lösungen gesenkt werden. Dieser Effekt verbessert die Einsatzbedingungen für Solarenergie und von Wärmepumpen wesentlich!

Fazit

Der Einsatz von thermisch aktiv gesteuerten Speicherbauteilen in Gebäuden um einen möglichst großen Anteil an Umweltenergie zum Heizen und Kühlen verwenden zu können, ist begrüßenswert. Die derzeit eingesetzte Konstruktion der wasserdurchflossenen Rohrregister in diesen Bauteilen ist aber unbedingt zu überdenken. Es handelt sich hierbei um eine überholte Technik, die die geforderte Flexibilität an eine effiziente thermische Be- bzw. Entladeeinrichtung nicht bietet. Moderne Systeme sollten die vorhandene Speicherkapazität in den Bauteilen zu einem möglichst hohen Anteil nützen und eine Möglichkeit für rasche thermische Ausgleichsvorgänge im Gebäude ebenso bieten, wie notwendige, ergänzende Spitzenlastdeckungen möglichst ohne störende Speichervorgänge realisieren. Eine sehr gute Möglichkeit wird im Einsatz von Kapillarrohrmatten gesehen. Zur Aufgabentrennung ist auch das Einbringen zweier, voneinander getrennter Lagen zu überlegen.

Große thermodynamische Reserven, Kostenvorteile und ein größerer konstruktiver Gestaltungsspielraum sind derzeit noch ungenutzt!

Literatur

- [1] GLÜCK, B.: Strahlungsheizung - Theorie und Praxis. Berlin: Verlag für Bauwesen und Karlsruhe: C. F. Müller Verlag 1991
- [2] GLÜCK, B.: Wärmeübertragung - Wärmeabgabe von Raumheizflächen und Rohren (Reihe Bausteine der Heizungstechnik). 2. Auflage. Berlin: Verlag für Bauwesen 1990
- [3] GLÜCK, B.: Wärmetechnisches Raummodell. Heidelberg: C. F. Müller Verlag 1997

Bildunterschriften

- Bild 1 Betondecke als Speicherbauteil mit derzeit üblichem Rohrregister
- Bild 2 Betondecke als Speicherbauteil mit Kapillarrohrmatte zur Erhöhung der Wärmespeicherung und zur Verbesserung der Dynamik
- Bild 3 Temperaturverläufe bei Kühlung des Bauteils im stationären Zustand bei einer Wassertemperatur von 18 °C und einer Raumtemperatur von 24 °C, dargestellt von einer Rohrachse bis zur Mitte der jeweils rechts davon liegenden nächsten Rohrachse. Die grauen Pfeile kennzeichnen den Temperaturbereich des Betons im stationären Ladezustand.
- links: konventionelle Konstruktion nach Bild 1
- rechts: Konstruktion mit Kapillarrohrmatte nach Bild 2
- Die bezogen auf das Raumtemperaturniveau gespeicherte "Kälte" ist beim Kapillarrohrein-satz um 52 % größer als bei der konventionellen Lösung.

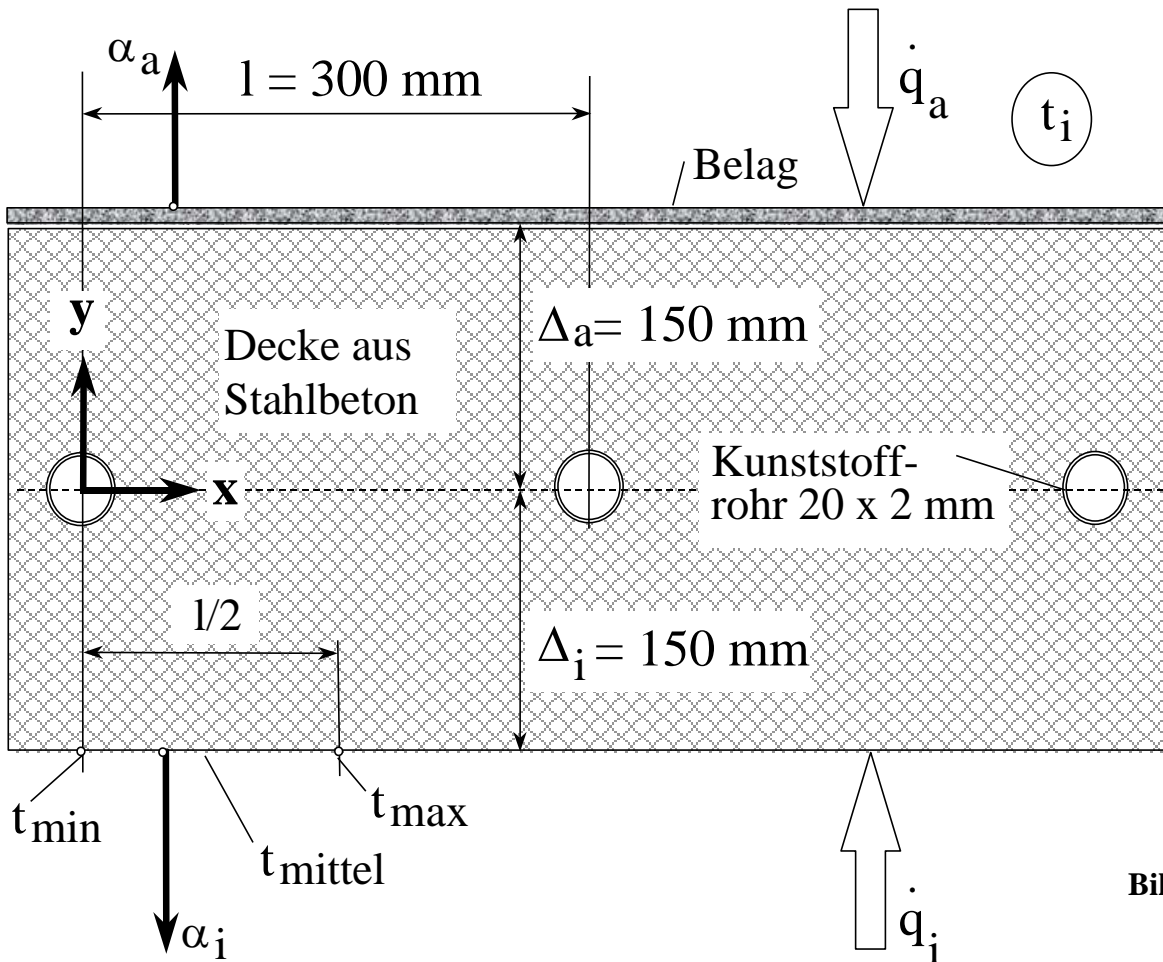


Bild 1

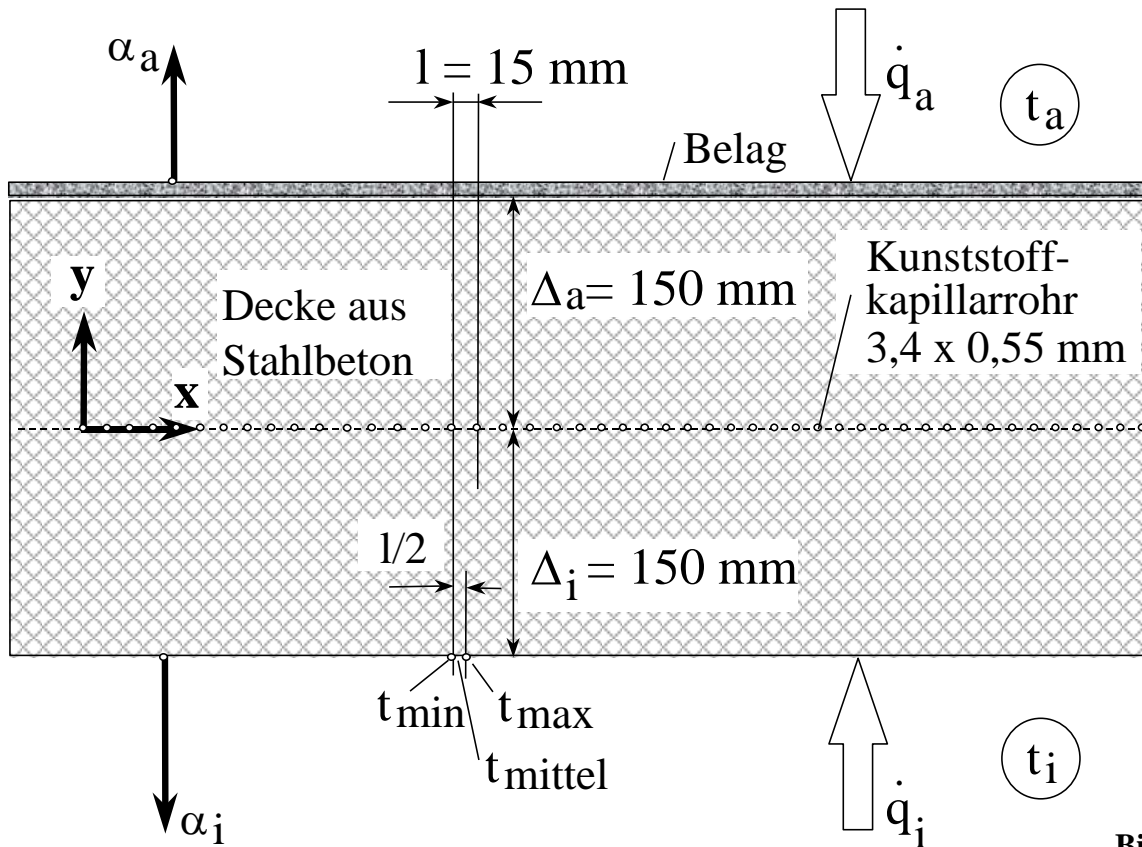


Bild 2

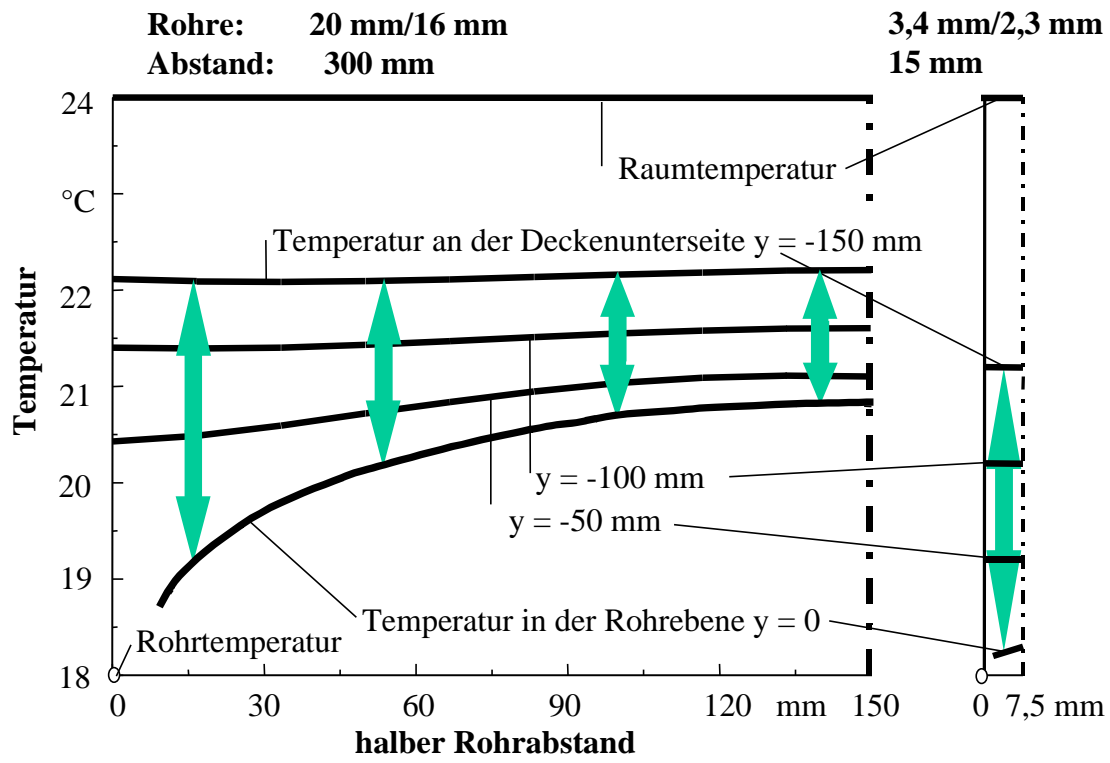


Bild 3