

F O R S C H U N G S I N S T I T U T
MITTEILUNGEN
F Ü R W Ä R M E S C H U T Z
E . V . M Ü N C H E N

Reihe I. Allgemeine Fragen des Wärme- und Kälteschutzes

Nummer 9

Wärmeleitfähigkeit von Betonen und Massen
im Temperaturbereich von 200 bis 900 °C

Von

W. F. Cammerer

Wärmeleitfähigkeit von Betonen und Massen im Temperaturbereich von 200 bis 900 °C*)

Von W. F. Cammerer, München

Inhalt:

Die Wärmeleitfähigkeit von hydraulisch abbindenden Stoffen, z. B. Betonen oder Massen, bei hohen Temperaturen, ist vom Zuschlagstoff praktisch unabhängig, sie wird wesentlich

von der Rohdichte und dem Kristallwassergehalt beeinflusst. Bei nicht vorgeglühten Betonen ist i. allg. ein Minimum der Wärmeleitfähigkeit zwischen etwa 300 °C und 500 °C vorhanden.

Thermal conductivity of concretes and related masses in the temperature range from 200 to 900 °C

Abstract:

The thermal conductivity of materials with hydraulic setting properties, such as concretes and related masses, at high temperatures is nearly independent of the aggregate. The

thermal conductivity is mainly influenced by the density and the water of crystallization. Concrete without preliminary thermal treatment show generally a minimum in thermal conductivity in the temperature range of about 300 °C–500 °C.

DK 666.972.017:691.32:536.2.022

Im Kessel-, Industrieofen- und Schornsteinbau werden Betone und Massen unterschiedlicher Zusammensetzung verwendet. Zur Berechnung der Wärmedämmwirkung von Schichten aus diesen Materialien ist die Kenntnis der Wärmeleitfähigkeit in dem in Frage kommenden Temperaturbereich erforderlich. Bei hydraulisch abbindenden Stoffen ist zu beachten, daß sie je nach der Verwendungstemperatur ganz oder teilweise chemisch gebundenes Wasser abgeben, das als Kristall- oder Konstitutionswasser bezeichnet wird. Durch diesen Wasserverlust verringert sich die Wärmeleitfähigkeit des Betons, so daß ein Vorgeglühen von hydraulisch abbindenden Massen zu einer Wärmeleitfähigkeits-Charakteristik in Abhängigkeit von der Temperatur führt, die von derjenigen stark abweichen kann, die ohne diese Vorbehandlung ermittelt wird.

Die Wärmeleitfähigkeit eines porösen Stoffes ist abhängig von

1. der Wärmeleitfähigkeit des Feststoffgerüsts, d. h. bei Betonen des Zuschlagstoffs und des Zementsteins einschließlich Kristallwasser,
2. der Porosität, der Porengröße und der Porenform,
3. der Wärmeübertragung in den Poren durch Leitung, Konvektion und Strahlung, deren Anteile sich mit der Temperatur ändern.

In Tafel 1 ist die Wärmeleitfähigkeit von anorganischen und organischen Stoffen angegeben.

Tafel 1 Wärmeleitfähigkeit der festen Bestandteile von Bau- und Wärmedämmstoffen (1)

Stoffart	Wärmeleitfähigkeit [kcal/m · h · °C]
Anorganische Stoffe:	
kristallin	
senkrecht zur Kristallachse	4 ... 6
parallel zur Kristallachse	bis 10
Quarzit	5,2
Kalkstein, Marmor, Granit, Basalt, Feldspat, Sandstein	1,4 ... 3,5
amorph erstarrte Schmelzen wie Hochofenschlacke	0,6 ... 1,0
Natürliche organische Stoffe	etwa 0,25 ... 0,35
Kunststoffe	0,14 ... 0,30

Der Tafel ist zu entnehmen, daß kristalline Stoffe eine höhere Wärmeleitfähigkeit haben als amorphe. Bild 1 zeigt, daß die Wärmeleitfähigkeit von Kristallen mit zunehmender Temperatur fällt, während die Wärmeleitfähigkeit von glasigen Bestandteilen ansteigt. Nach W i l k e s (3) kann bereits ein kleiner Anteil von amorphen Substanzen den Charakter des Verlaufs der Wärmeleitfähigkeit mit steigender Temperatur stark verändern. In der Praxis liegen immer Mischungen aus kristallinen und glasigen Stoffen vor, z. B. beim Zementstein, so daß sich diese je nach der Größe der jeweiligen Anteile auf die Wärmeleitfähigkeit auswirken werden. Bild 1 enthält auch die Temperaturabhängigkeit des Leitungsanteils und des Strahlungsanteils der Porenluft. Während die Leitfähigkeit der Luft mit der Temperatur nur geringfügig zunimmt, steigt der Strahlungsanteil mit der 3. Potenz der absoluten Temperatur an. Der Konvektionsanteil der Wärmeleitfähigkeit ist in den Poren von nur wenigen Zehntel mm Durch-

messer sehr gering und nimmt außerdem mit steigender Temperatur ab, so daß er ohne Bedeutung ist. Der Strahlungsanteil wächst ferner mit der Porengröße stark an, wie aus Bild 2 zu entnehmen ist. Wärmedämmende Betone oder Massen, die bei hohen Temperaturen verwendet werden, sollten daher möglichst kleine Poren aufweisen.

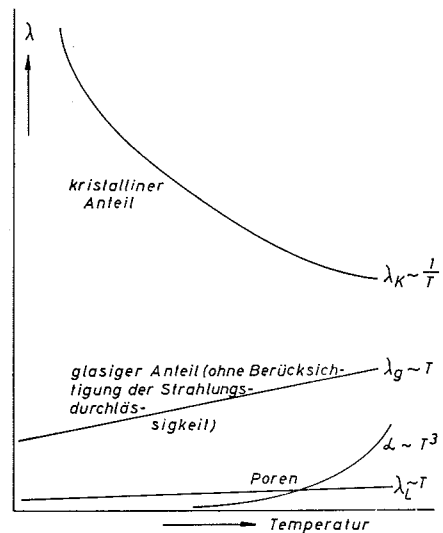


Bild 1

Qualitativer Verlauf der Wärmeleitfähigkeit der Bestandteile von porösen Stoffen bei hohen Temperaturen (nach H.-E. Schwiete und P. Jeschke (2))

Wie bereits eingangs erwähnt wurde, beeinflusst ein unterschiedlicher Gehalt an Kristallwasser die Wärmeleitfähigkeit, so daß die Wärmeleitfähigkeit einer nicht vorgeglühten Masse mit steigender Temperatur abnehmen und nach Austreibung dieses chemisch gebundenen Wassers wieder zunehmen kann.

Im Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München wurde die Wärmeleitfähigkeit von Betonen und Massen mit verschiedenen Zuschlagstoffen, z. B. Perlit, Vermiculit, Kieselgur, Schamotte, Hüttenbims, Blähton u. a., unter Verwendung von Portlandzement und Tonerdeschmelzzement zwischen etwa 200 und 900 °C untersucht. Vor dem Einbau in das Prüfgerät waren die Proben bei 105 °C getrocknet worden, weil das während der Messung verdampfende freie Wasser durch Kondensation Störungen in der Meßapparatur hervorrufen kann und der Austrocknungsvorgang außerdem die Prüfung stark verzögert.

Die Wärmeleitfähigkeitsmessungen wurden mit einem im Institut entwickelten Zweiplattengerät für hohe Temperaturen durchgeführt, das nach dem Schutzringprinzip von Poensgen arbeitet, jedoch nur bis zu einer höchsten Warmseitentemperatur von etwa 1000 °C verwendet werden kann (4). Wie aus Bild 3 zu entnehmen ist, können durch die Messung 4 Normalsteine erfaßt werden, d. h. die Meßfläche beträgt 250 mm × 250 mm. Wenn sich in der Schutzringzone das gleiche Material

*) Vortrag anläßlich des RILEM-Symposiums über Feuerbetone in Karlsbad, Mai 1971.

Anschrift des Verfassers: Dr. rer. nat. W. F. Cammerer, Wissenschaftlicher Leiter des Forschungsinstituts für Wärmeschutz e.V., München.

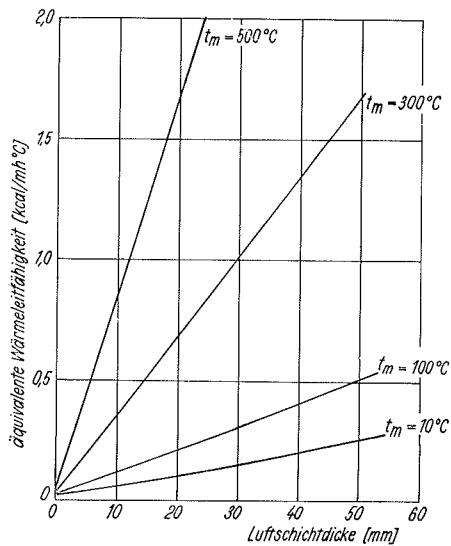


Bild 2

Äquivalente Wärmeleitfähigkeit von Luftschichten bei einem Strahlungskoeffizienten der Begrenzungsflächen von $4,6 \text{ kcal/m}^2\text{hK}^4$ und einer Temperaturdifferenz von 10°C bei verschiedenen Mitteltemperaturen

wie in der Meßzone befindet, können die Gegen- und Schutzringheizungen auf der kalten Seite der Proben entfallen. Allerdings kann dann das Temperaturgefälle an den Proben nicht beliebig eingestellt werden, sondern es ergibt sich zwangsläufig aus der Heizleistung und dem Wärmedurchlaßwiderstand der Proben sowie der Wärmedämmung auf der Kaltseite. Der benötigte Wärmestrom wird elektrisch erzeugt und gemessen, die

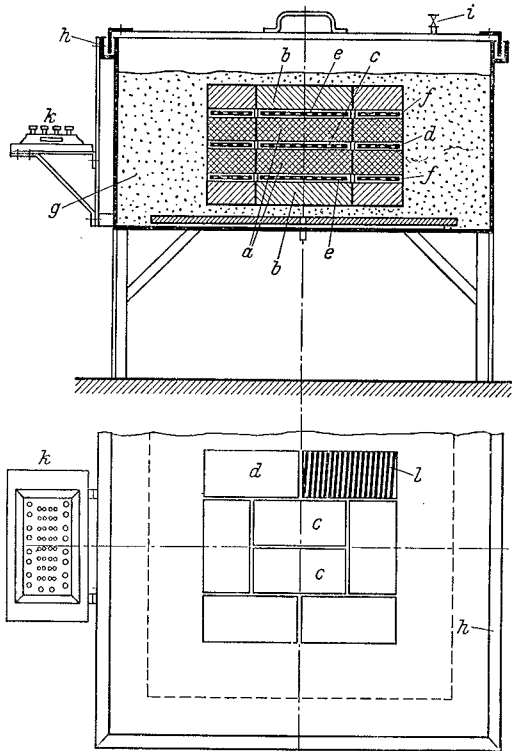


Bild 3

Plattengerät zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit bei hohen Temperaturen

- a – Versuchsplatten
- b – Isolierplatten
- c – Heizplatten
- d – Heizring (c und d im Grundriß freigelegt)
- e – Gegenheizplatten
- f – Gegenheizringe
- g – pulverförmige gebrannte Magnesia
- h – Dichtungsrinne
- i – Stützen für Gaszufuhr
- k – Umschalter für Thermoelemente
- l – Chromnickelband

Schutzringheizung wird automatisch geregelt, und die Temperaturen werden mit Nickelchrom-Nickel-Thermoelementen bestimmt. Die in der Abbildung vorgesehene Füllung mit einem Schutzgas wird heute nicht mehr verwendet.

Trägt man die Wärmeleitfähigkeit der untersuchten Steine und Massen aus verschiedenen Zuschlagstoffen und hydraulischen Bindemitteln bei einer Mitteltemperatur von 500°C (arithmetisches Mittel aus den Temperaturen der warmen und kalten Probenoberfläche) als Funktion der mittleren Rohdichte (arithmetisches Mittel der Rohdichten vor und nach Versuch) in einem Diagramm auf, so ergibt sich die in Bild 4 wiedergegebene deutliche Abhängigkeit von der Rohdichte. Es ist kein merklicher Einfluß des Zuschlagstoffs zu erkennen. Die Vergleichstemperatur von 500°C wurde gewählt, weil bei dieser Temperatur das Kristallwasser weitgehend ausgeschieden ist. Im Rohdichtebereich von 150 bis 1600 kg/m^3 ergeben sich Werte der Wärmeleitfähigkeit von etwa $0,1$ bis $0,6 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$.

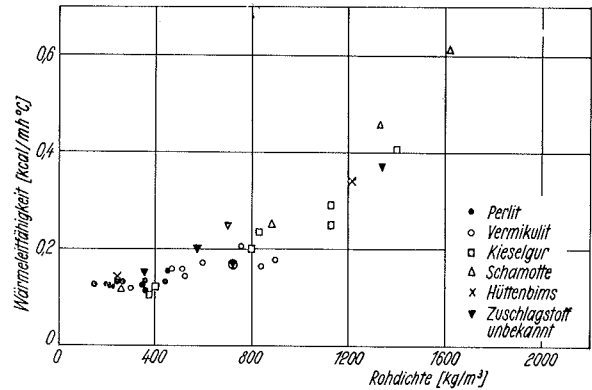


Bild 4 Wärmeleitfähigkeit von Betonen und hydraulisch abbindenden Massen mit unterschiedlichen Zuschlagstoffen bei einer Mitteltemperatur von 500°C

Bild 5 zeigt die Wärmeleitfähigkeit von einigen Perlit-Betonen mit den Mischungsverhältnissen $1:7$; $1:10$; $1:11$ und $1:15$ zwischen 50 und 450°C Mitteltemperatur. Es ist zu erkennen, daß stets die Rohdichte für die Wärmeleitfähigkeit maßgebend ist. Bei etwa 500°C haben alle untersuchten Proben etwa die gleiche Wärmeleitfähigkeit, was auch aus Bild 4 zu entnehmen ist. Die Ursache liegt in dem mit steigender Rohdichte abnehmenden Strahlungseinfluß. Bemerkenswert ist, daß kein Einfluß eines Kristallwasserverlustes zu erkennen ist, der Gewichtsverlust der Proben während der Messung beträgt auch nur 2 bis 6% .

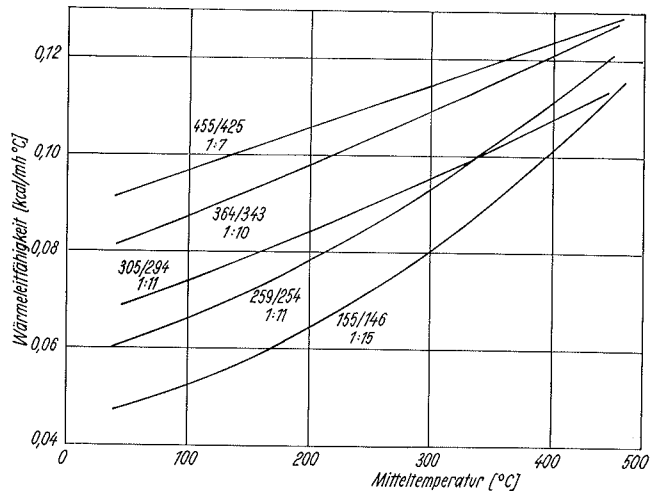


Bild 5 Wärmeleitfähigkeit von Perlit-Betonen in Abhängigkeit von der Mitteltemperatur und der Rohdichte vor und nach der Messung mit Angabe des Mischungsverhältnisses

In Bild 6 sind die Meßergebnisse eines Perlitbetons aufgetragen, bei dem als Bindemittel Tonerdeschmelzzement verwendet wurde. Der Gewichtsverlust ist mit etwa 14% größer als bei den Proben von Bild 5, und es ergab sich bei der Wiederholung des Meßpunktes bei 120°C (Meßpunkt 1) eine Absenkung der Wärmeleitfähigkeit um etwa 16% (Meßpunkt 5), während Meßpunkt 2 und Meßpunkt 6 praktisch identisch sind.

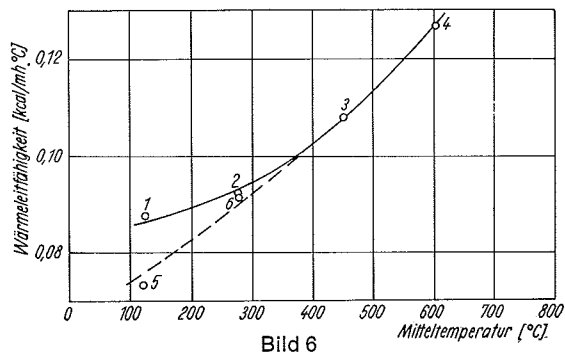


Bild 6

Wärmeleitfähigkeit von Perlit-Beton, MV 1:10, Körnung 0–4 mm, und Tonerdeschmelzzement, Rohdichte 393/339 kg/m³

Die Wärmeleitfähigkeits-Charakteristik einer Masse aus Kieselgurpulver und Tonerdeschmelzzement ist in Bild 7 dargestellt. Der Kurvenverlauf entspricht vielen anderen Meßergebnissen von Betonen aus Tonerdeschmelzzement. Nach Meßpunkt 4 wurde Meßpunkt 1 wiederholt (Meßpunkt 5), wobei sich eine Erniedrigung der Wärmeleitfähigkeit um etwa 35 % ergab. Der Gewichtsverlust während der Messung betrug etwa 11 %.

Eine Stampfmasse unbekannter Zusammensetzung wurde vor der Messung langsam bis 500 °C erhitzt. Während der Prüfung wurde kein Gewichtsverlust festgestellt, und die Meßergebnisse zeigten kein Minimum der Wärmeleitfähigkeit bei einer bestimmten Temperatur, sondern einen gleichmäßigen Anstieg mit zunehmender Temperatur.

Aus etwa 40 Meßreihen über die Wärmeleitfähigkeit von Betonen und hydraulisch abbindenden Massen im Temperaturbereich zwischen 200 und 900 °C ergibt sich, daß

1. eine deutliche Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Rohdichte vorhanden ist, und zwar praktisch unabhängig

vom Zuschlagstoff, sofern das Kristallwasser durch Vorglühen bei mindestens 500 °C im wesentlichen ausgetrieben ist,

2. die Wärmeleitfähigkeit von nicht vorgeglühten Betonen zwischen etwa 300 und 500 °C Mitteltemperatur ein Minimum aufweisen kann, insbesondere bei Verwendung von Tonerdeschmelzzement.

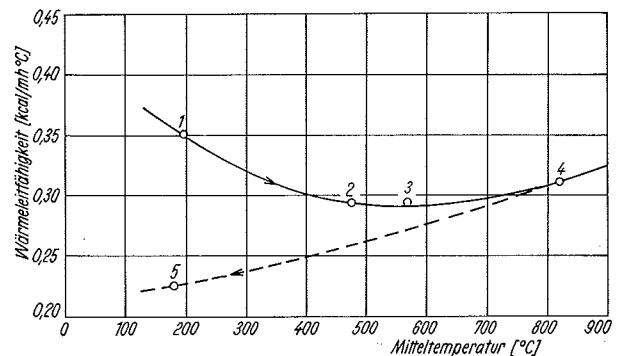


Bild 7 Wärmeleitfähigkeit einer Masse aus Kieselgurpulver und Tonerdeschmelzzement, Rohdichte 1190/1055 kg/m³

Schrifttum:

1. Cammerer, J. S.: Der Wärme- und Kälteschutz in der Industrie. 4. Aufl. Berlin - Göttingen - Heidelberg: Springer-Verlag 1962.
2. Schwiete, H.-E.; Jeschke, P.: Die Wärmeleitfähigkeit von neuen und gebrauchten Schamotte-, Magnesit-, Chrommagnesit- und Forsteritsteinen. Tonind.-Ztg. **87** (1963), S. 386–400, S. 427–442.
3. Wilkes, G. R.: The thermal conductivity of refractories. J. Amer. Ceram. Soc. **17** (1934), S. 173.
4. Raisch, E.: Neuere Prüfverfahren des Forschungsheims für Wärmeschutz. Arch. f. Wärmewirtsch. u. Dampfkesselwesen **10** (1929), Nr. 11.