

F O R S C H U N G S H E I M
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 5

Der Konvektionseinfluß
auf die Wärmeleitfähigkeit von Wandisolierungen
aus Mineralfaserstoffen

Von
Dipl-Phys. W. F. CAMMERER

Der Konvektionseinfluß auf die Wärmeleitfähigkeit von Wandisolierungen aus Mineralfaserstoffen *)

Von W. F. CAMMERER **)

(Mitteilung aus dem Forschungsheim für Wärmeschutz e.V., München)

Inhalt: In luftdurchlässigen Isolierungen kann je nach den herrschenden Bedingungen bezüglich Temperatur, Abmessungen und Strömungswiderstand eine die Porenkonvektion überlagernde Luftbewegung auftreten, welche die Wärmeübertragung beeinflusst. Für die Wärmedämmwirkung von mineralischen Faserstoffen ist die Frage von großer Bedeutung. Zunächst wurde — vor allem im Zusammenhang mit der Neubearbeitung der VGB-Richtlinien [16] — der Konvektionseinfluß auf die Wärmeleitfähigkeit von senkrechten Wandisolierungen aus Mineralfasermatten mit handelsüblicher Rohdichte untersucht, und zwar in Abhängigkeit von Höhe und Schichtdicke im Temperaturbereich von -20°C bis $+300^{\circ}\text{C}$.

1. Bedeutung des Konvektionseinflusses

Mineralische Faserstoffe (wie Glas-, Gesteins- oder Hüttenwolle) werden heute in großem Umfange in der Wärme- und Kälteschutztechnik verwendet. Die gute Wärmedämmfähigkeit, verbunden mit Unbrennbarkeit, Widerstandsfähigkeit gegen Schimmel und Fäulnis, Beständigkeit bis zu verhältnismäßig hohen Temperaturen, und die leichte Verarbeitungsmöglichkeit haben den anorganischen Fasern einen großen Anwendungsbereich gesichert. In den letzten 15 Jahren wurden bei der Herstellung von dünnen Fasern und der Konfektionierung von Matten (gesteppt auf Wellpappe oder Drahtgeflecht) große Fortschritte erzielt. Mit der Verringerung der Faserdicke nahm die Rohdichte ab und damit der Luftgehalt zu. So besteht beispielsweise das Volumen einer handelsüblichen Mineralfasermatte mit einer Rohdichte von 100 kg/m^3 nur aus etwa 4% Feststoff und aus 96% Luft. Bei besonders leichten Matten (aus „superfeinen“ Fasern) mit einer Rohdichte von etwa 10 kg/m^3 beträgt der Luftanteil sogar über 99 Vol.-%. Die Frage einer eventuellen Beeinflussung der Wärmedämmfähigkeit durch eine Luftbewegung innerhalb der Isolierung gewinnt somit zunehmend an Bedeutung.

Die Wärmeleitfähigkeit von Mineralfasermatten wird im allgemeinen nur an Laboratoriumsproben mit

Abmessungen von höchstens $500\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ und etwa 40–60 mm Schichtdicke im Plattengerät nach *R. Poensgen* in waagrechter Lage [14a, 15] oder als Rohrisolierung [3, 14b, 15] gemessen. Ob aber diese Werte auf Wandisolierungen großer Schichthöhe und Schichtdicke (in denen eventuell eine merkliche Konvektion auftritt) ohne weiteres übertragen werden dürfen, konnte bisher nicht eindeutig geklärt werden. Diese Frage ist von großer Bedeutung sowohl für den Wohnungsbau, bei dem Wand- und Deckenisolierungen aus Mineralwolle vielfach Anwendung finden, als auch für industrielle Anlagen, beispielsweise den Dampfkesselbau, dessen Entwicklung durch immer leichtere Isolierungen von geringerer Wärmekapazität gekennzeichnet ist.

2. Theoretische Grundlagen

Die wärmedämmende Wirkung von Isolierstoffen beruht im wesentlichen auf der geringen Wärmeübertragung in Lufträumen kleiner Schichtdicke. Diese erfolgt durch Wärmeleitung der Luftmoleküle, Wärmitführung von bewegten Luftteilchen (Konvektion) und durch Wärmestrahlung zwischen den Porenwänden. Konvektion und Strahlung werden umso weniger an der Gesamtwärmeübertragung beteiligt, je kleiner die Lufträume sind. Die Isolierwirkung von porösen Stoffen aus gleichem Feststoff und gleicher Porosität — also mit

*) Vortrag auf der Mitgliederversammlung des Forschungsheims für Wärmeschutz am 11. 5. 1962 in Dortmund. Die Forschungsarbeit wurde mit Unterstützung durch die Fraunhofergesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., München, durchgeführt, wofür auch an dieser Stelle der besondere Dank des Verfassers ausgesprochen sei.

**) Dipl.-Phys. *Walter F. Cammerer*, wissenschaftlicher Leiter des Forschungsheims für Wärmeschutz e.V., München

demselben Luftgehalt — steigt daher mit abnehmender Porengröße.

Diese Gesetzmäßigkeit gilt aber zunächst nur, wenn die Luftbewegung lediglich in den kleinen Hohlräumen stattfindet, solange also nur eine „Porenkonvektion“ vorhanden ist. Bei Stoffen mit *zusammenhängenden Porenverbindungen*, wie dies in besonderem Maße für Mineralfaserstoffe zutrifft, kann sich jedoch eine Konvektion auf den ganzen Isolierkörper ausdehnen und damit die Porenkonvektion überlagern. Diese „freie Konvektion“ wird durch Dichteunterschiede der Luft als Folge von Temperaturdifferenzen hervorgerufen. Die sich ausbildende Luftbewegung im Isolierstoff hängt außer von den Temperaturunterschieden besonders vom Strömungswiderstand im Stoffgefüge ab. Je dichter eine Faserstoffisolierung ist, umso geringer sind die Möglichkeiten einer Luftkonvektion innerhalb der Isolierung.

Da es sich bei dieser Konvektion praktisch um eine freie Konvektion in einer Luftschicht handelt, deren Strömungswiderstand durch die Faserfüllung erhöht ist, kann erwartet werden, daß im wesentlichen die gleichen physikalischen Gesetzmäßigkeiten wie in reinen Luftschichten gelten. Die Luftbewegung und die damit verbundene zusätzliche Wärmeübertragung wird daher mit der Temperaturdifferenz und der Schichtdicke zunehmen, mit steigender Temperatur jedoch geringer werden. Diese Eigenschaften ergeben sich aus der Abhängigkeit der freien Konvektion von der Grashof-Kenngröße und der Prandtl-Kenngröße [6]. Für abgeschlossene senkrechte Luftschichten ist ferner bekannt, daß die Wärmeübertragung mit zunehmender Höhe kleiner wird [9, 12], übrigens entgegen einer selbst in Fachkreisen häufig anzutreffenden falschen Vorstellung von einer Kaminwirkung, wodurch die Wärmeübertragung mit der Höhe ansteigen soll.

Fig. 1 zeigt schematisch die Darstellung der Luftkonvektion in einer senkrecht angeordneten Faserstoffisolierung nach G. B. Wilkes [13], die der Konvektion in einer reinen Luftschicht entspricht. An der warmen Oberfläche steigt die Luft hoch, strömt an der oberen Begrenzung zur Kaltseite (wo sie Wärme abgibt) und sinkt durch die erfolgte Abkühlung nach unten ab. In der Faserschicht besteht Druckausgleich, so daß die Luft an der Abgrenzung wieder zur Warmseite strömt.

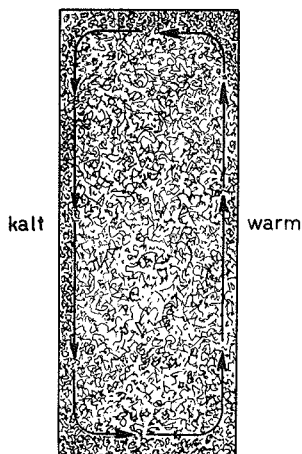


Fig. 1

Konvektion in einer Mineralfaser-Isolierung
(nach G. B. Wilkes [13])

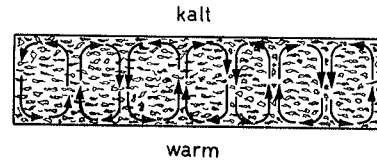


Fig. 2

Vermutlicher Konvektionsverlauf in waagrecht liegenden Faserisolierungen bei einem Wärmestrom von unten nach oben

Auf ihrem Weg von der warmen zur kalten Isolierungsoberfläche überträgt sie Wärme und erhöht dadurch die Wärmeleitfähigkeit der Isolierung. Da aber die mehr oder weniger regellos liegenden Fasern das Temperaturfeld beeinflussen, und da je nach der Isolierungsausführung Strukturunterschiede, Ungleichmäßigkeiten und dergleichen örtlich verschiedene Strömungswiderstände hervorrufen können, werden sich gewisse Verzerrungen des im Bild dargestellten idealisierten Vorganges ergeben.

Luftkonvektion tritt ebenfalls in einer waagrecht liegenden, luftdurchlässigen Isolierung auf, wenn sich die wärmere Seite unten befindet, so daß Luft in der gesamten Ausdehnung der warmen Oberfläche durch Auftrieb nach oben strömt. Je nach dem örtlichen Strömungswiderstand werden sich gleichartige oder verschieden geformte Wirbel bilden (Fig. 2). Verläuft die Wärmestromrichtung dagegen von oben nach unten, so kann eine Konvektion nur dadurch entstehen, daß die Fasern infolge ihrer größeren Wärmeleitfähigkeit gegenüber Luft das Temperaturfeld verzerren und damit örtliche Luftbewegungen hervorrufen. In waagrecht liegenden Luftschichten ist somit die Wärmeübertragung bei einer Wärmestromrichtung von unten nach oben stets größer als für die entgegengesetzte Richtung.

Im waagerechten Zweiplattengerät nach R. Poensgen verläuft der Wärmestrom in den Proben sowohl in Richtung der Schwerkraft als auch gegen die Richtung der Schwerkraft. Das Meßergebnis liefert daher einen Mittelwert der Wärmeleitfähigkeit bezüglich der für die beiden Fälle vorliegenden Einflüsse der Konvektion.

In Rohrisolierungen aus Mineralfaserstoffen können Konvektionsströme auftreten, wobei sich beim horizontal liegenden Rohr ein Mittelwert der Einflüsse aller Wärmestromrichtungen gegenüber der Schwerkraft-richtung ergeben wird. Bei senkrecht gelagerten Rohren ähneln die Vorgänge denjenigen von senkrechten Wandisolierungen.

3. Stand der Forschung

Über den Einfluß der Luftkonvektion auf die Wärmeleitfähigkeit von senkrecht angeordneten Faserstoff-Isolierungen sind in der Literatur, besonders in Großbritannien und USA, unterschiedliche Ergebnisse bekannt geworden. Die nachstehenden Angaben über die ausländischen Untersuchungen sind dem Buche von G. B. Wilkes [13] entnommen.

E. Griffiths [5] hat bei Versuchen mit loser Schlackenwolle einen starken Einfluß der Höhe festgestellt. Fig. 3 zeigt die Meßergebnisse in Abhängigkeit von Rohdichte und Schichthöhe. Entgegen der theoretischen Erwartung nimmt die Wärmeleitfähigkeit mit der Schichthöhe zu,

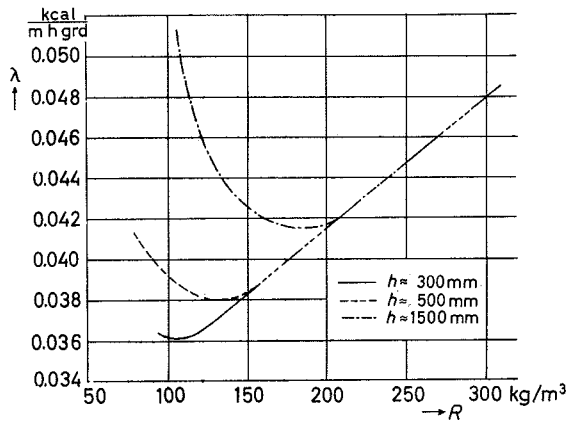


Fig. 3

Wärmeleitfähigkeit λ von Schlackenwolle in Abhängigkeit von Rohdichte R und Schichthöhe h (bei senkrechter Anordnung der Isolierschicht)
(nach E. Griffiths [5])

und zwar beispielsweise für eine Rohdichte von 100 kg/m^3 über 40 % bei einer Erhöhung der Schichthöhe von etwa 300 auf 1500 mm. Dagegen werden die theoretischen Voraussagen bestätigt, daß der Konvektionseinfluß mit zunehmender Rohdichte kleiner wird. Die Versuche sind mit Temperaturdifferenzen zwischen 20 und 50 grd und mit Schichtdicken zwischen etwa 30 und 150 mm durchgeführt worden.

E. A. Allcut u. F. G. Ewens [1] haben Meßergebnisse über die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit verschiedener Isolierstoffe von der Schichtdicke veröffentlicht. Wie aus Fig. 4 zu entnehmen ist, besteht bei praktisch luftundurchlässigen Korkplatten kein Dickeneinfluß, während ein solcher Einfluß bei verschiedenen Faserstoffen vorhanden ist. Die Forscher erklären diese Unterschiede ebenfalls durch Einwirkung der Luftkonvektion.

F. B. Rowley u. C. E. Lund [11] haben Steinwolle-Isolierungen bei senkrechter und bei waagrechter Lage untersucht, im letzteren Falle bei einem Wärmestrom von unten nach oben. Nach vielen Versuchen sind sie zu dem Ergebnis gekommen, daß kein merklicher Unterschied in der Wärmeleitfähigkeit bei beiden Anordnungen vorhanden ist. Angaben über Rohdichte und

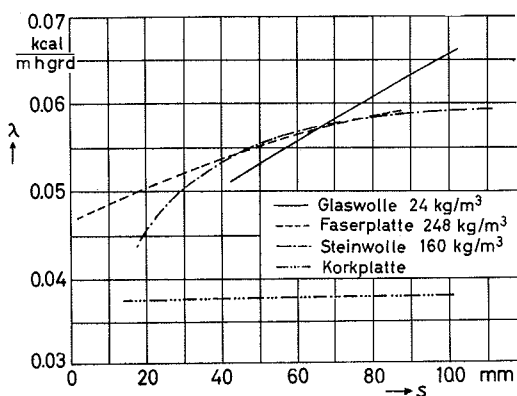


Fig. 4

Wärmeleitfähigkeit λ von verschiedenen Isolierstoffen in Abhängigkeit von der Isolierstärke s (bei senkrechter Anordnung der Isolierschicht)
(nach E. A. Allcut u. F. G. Ewens [1])

gewählte Temperaturdifferenzen werden nicht gemacht. Die Schichtdicke betrug in einem Falle etwa 150 mm.

J. L. Finck [4] und C. E. Lander [7] haben gleichfalls Versuche über den Einfluß der Orientierung des Meßgerätes auf die Wärmeleitfähigkeit von verschiedenen Stoffen (Pulver und Faserstoffe) durchgeführt und haben ebenfalls keinen deutlichen Unterschied in den Meßergebnissen feststellen können.

Ferner sind Messungen von G. Lorentzen u. E. Brendeng [8] zu erwähnen, die den Einfluß der Luftkonvektion in Kühlhauswänden aus verschiedenen Isolierstoffen untersucht und die Ergebnisse mit der Wärmeleitfähigkeit verglichen haben, die sich im waagrecht Plattengerät und mit theoretisch berechneten Werten aufgrund einer angenommenen Luftkonvektion ergeben. Bei den Wandversuchen wurden an der warmen und an der kalten Oberfläche je 5 Wärmefluß-Meßplatten übereinander angebracht und die Meßwerte gemittelt. Fig. 5 zeigt die Meßergebnisse.

Die Wärmeleitfähigkeit nimmt bei allen als Kühlhauswand geprüften Materialien mit steigender Rohdichte ab, während die im Plattengerät gefundene Wärmeleitfähigkeit kaum eine Abhängigkeit von der Rohdichte zeigt. Bei der Stopfisolierung ist ferner ein merklicher Unterschied zwischen den Meßergebnissen der Wandisolierung und des Plattengerätes bzw. den Rechenwerten festzustellen. Auch bei der Mattenisolierung erkennt man einen, wenn auch geringeren, Unterschied zwischen den Meßwerten des Wandversuchs und des Plattengerätes. Nur bei kunstharzgebundenen Mineralfaserplatten ist die Abweichung zwischen beiden Untersuchungsarten gering. In allen Fällen ist die an der senkrechten Wandisolierung gemessene Wärmeleitfähigkeit höher als diejenige, die im waagrecht Plattenapparat ermittelt wurde. Ein Einfluß von Schichthöhe und Schichtdicke ist nicht unter-

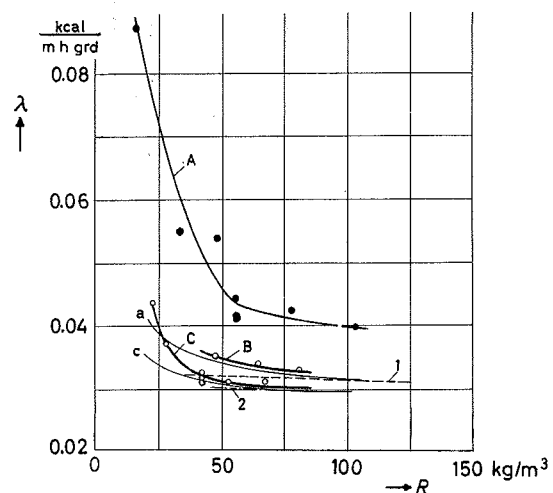


Fig. 5

Vergleich der Meßergebnisse mit der theoretischen mittleren, scheinbaren Wärmeleitfähigkeit von senkrechten Wandisolierungen aus Fasermaterial in Abhängigkeit von der mittleren Dichte R bei etwa 0°C Mitteltemperatur
(nach G. Lorentzen u. E. Brendeng [8])

- A Stopfisolierung
- B Mattenisolierung
- C harzgebundene Mineralwolleplatten

- a theoretisch berechnete Kurve für A
- c theoretisch berechnete Kurve für C

- 1 Wärmeleitfähigkeit von A, gemessen im waagrecht Plattengerät mit Schutzring
- 2 Wärmeleitfähigkeit von B und C, gemessen im waagrecht Plattengerät mit Schutzring

sucht worden. Zu beachten ist bei den Wandversuchen, daß in einem Versuchskühlraum gemessen wurde und somit wohl ein Einfluß der Ecken auf die Konvektion miterfaßt worden ist.

J. S. Cammerer [2] hat neuerdings Wärmeleitfähigkeitsmessungen an Glas-, Stein- und Hüttenwolleplatten durchgeführt, und zwar bei waagrecht und bei senkrechter Lage sowie mit und ohne Abdeckung der kalten Oberfläche. Es sollte festgestellt werden, mit welchen Werten bei Fasermatten im Wohnungsbau zu rechnen ist. Die Rohdichten lagen zwischen 20 und 80 kg/m³, die Wandhöhe betrug bis zu 1500 mm. Die ermittelte Wärmeleitfähigkeit für 10 °C Mitteltemperatur nimmt mit steigender Rohdichte von 0.039 auf 0.033 kcal/m h grd ab, wobei kein erkennbarer Unterschied zwischen waagrecht und senkrechter Lage der Proben festzustellen war. Die kalte Oberfläche grenzte an Luft, und es ließ sich auch kein Einfluß einer Abdeckung erkennen.

Aus den bisher vorliegenden Meßergebnissen lassen sich somit keine eindeutigen Folgerungen über den Einfluß einer Luftkonvektion auf die Wärmeleitfähigkeit von Wandisolierungen aus Mineralfaserstoffen ziehen. Man gewinnt den Eindruck, daß die Meßergebnisse entscheidend von den gewählten Versuchsbedingungen abhängen.

4. Versuchsanordnung des Forschungsheims

Im Forschungsheim wurden daher Versuche geplant zur Messung des Konvektionseinflusses auf die Wärmeleitfähigkeit senkrechter Wandisolierungen aus luftdurchlässigen Isolierstoffen unter Ausschaltung aller eventuellen undefinierten Einflüsse.

Zur Verwirklichung dieser Forderung ist eine Meßanordnung als Versuchshaus entsprechend Fig. 6 aufgebaut worden. Das Haus besteht aus einer Heiz- und einer Kühlkammer, welche durch die zu untersuchende Wandisolierung getrennt werden. Der Kühlraum hat die Abmessungen 1.5 m × 1.5 m × 1.3 m, der Heizraum die Abmessungen 1.5 m × 1.5 m × 0.3 m. Die zu untersuchende Wandfläche besitzt daher eine Größe von 1500 mm × 1500 mm. Die Kühlung erfolgt durch ein Linde-Kühlaggregat, mit dem Raumtemperaturen bis etwa -35 °C erzeugt werden können. Der Kühlraum ist mit Korkplatten von 240 mm Dicke isoliert. Die Heizkammer besitzt eine Isolierung aus Steinwolle von

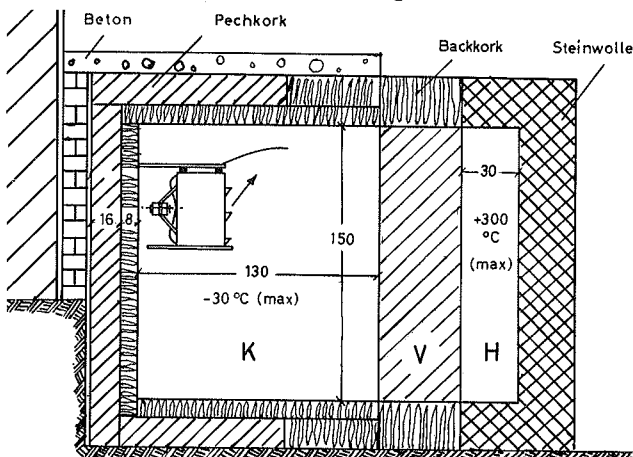


Fig. 6

Längsschnitt durch das Versuchshaus

H = Heizwand K = Kühlkammer V = Versuchswand
(Maße in mm)

gleicher Isolierdicke mit beidseitiger Abdeckung aus verzinktem Eisenblech.

Während die kalte Oberfläche der zu untersuchenden Wandisolierung mit einer versteiften Eisenblechplatte abgedeckt und durch die Kältemaschine gekühlt wird, erfolgt die Heizung der warmen Oberfläche durch eine Heizplatte mit Schutzring und Eisenblechabdeckung ähnlich dem Plattenmeßverfahren nach R. Poensgen. Nach den ersten Versuchen wurde nämlich von der Raumheizung auf eine Flächenbeheizung übergegangen, um eine möglichst gleichmäßige Oberflächentemperatur zu erzielen (Fig. 7). Die Heizfläche hat eine Größe von 1200 mm × 1200 mm bei einer Schutzringbreite von 150 mm. Die Wärmemenge wird durch 4 übereinanderliegende Wärmefluß-Meßplatten (300 mm × 300 mm) [10] gemessen, und zwar im Temperaturbereich von -35 °C bis +80 °C mit je 4 Wärmeflußmessern an der warmen und an der kalten Oberfläche der Wand. Über 80 °C bis 300 °C konnten nur die 4 Wärmeflußmesser an der Kaltseite benutzt werden, da das Gummimaterial höhere Temperaturen als 80 °C nicht verträgt. In der Abbildung sind die 4 übereinanderliegenden Wärmeflußmesser W mit je 2 Temperaturmeßstellen und ferner Kontrollmeßstellen zur Feststellung eventueller Randstörungen skizziert. Die Schutzringheizung ist in 4 Abschnitte unterteilt, deren Heizungen einzeln mittels Differential-Thermoelemente und Temperaturregler gesteuert werden. Diese Maßnahme ist notwendig, da durch die auftretende Luftkonvektion die untere Kante der Heizfläche kälter ist als die obere. An der kalten Isolierungsoberfläche befindet sich die gleiche Anordnung von Meßplatten und Thermoelementen.

Entscheidend für eindeutige und reproduzierbare Meßergebnisse ist die Abgrenzung des bei der Messung erfaßten Wandelementes, so daß eine eventuelle Konvektion nur innerhalb stattfinden kann. Es sind daher in den untersuchten Fasermatten, die Heiz- und Ringfläche bedeckten, luftundurchlässige Mekanitstreifen parallel zum Wärmestrom (also senkrecht zur Bildebene von Fig. 7) eingesetzt worden, um eine Konvektion und damit eine Abführung von Wärme in die kältere Ringzone zu verhindern. Zur Nachprüfung, ob bei größeren Schichtdicken Wärme in die Ringzone abgegeben wird, dienen Wärmefluß-Meßstreifen in der Breite der Wanddicke, die stets Null anzeigten. Für die Temperaturmessung sind insgesamt 40 Thermoelemente eingebaut

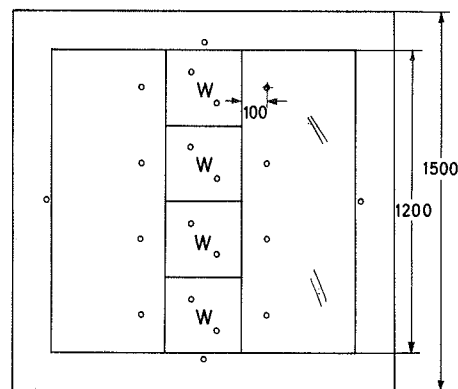


Fig. 7

Heizplatte mit Schutzring und Wärmefluß-Meßplatten

W Wärmefluß-Meßplatten

• Temperatur-Meßstellen

(Maße in mm)

worden. Zur Registrierung der Meßwerte dient ein Kompensations-Zwölfachsreiber mit elektronischer Verstärkung.

In Abänderung des ursprünglichen Programms, nach dem die Untersuchung von gestopften und geschütteten körnigen Isolierstoffen vorgesehen war, wurden Mineralfasermatten der üblichen Rohdichte von 100 kg/m^3 gewählt, da besonders ein Konvektionseinfluß bei Kesselisulierungen im Zusammenhang mit der Neubearbeitung der Richtlinien für die Einmauerung von Dampfkesseln interessierte [16]. Mineralfasermatten besitzen außerdem den Vorteil, daß die Herstellung verschiedener Isolierdicken mit gleichmäßiger Struktur durch Aneinanderlagerung mehrerer Vliese leicht möglich ist.

Um einen eventuellen Konvektionseinfluß auf die Wärmeleitfähigkeit der Fasermatte sichtbar zu machen, wurden Messungen bei Schichtdicken von 50, 100 und 200 mm und mit Schichthöhen von 300, 600 und 1200 mm vorgenommen sowie zusätzliche Messungen im waagrecht Zweiplattengerät durchgeführt. Zur Feststellung eines Einflusses der Randabgrenzung des erfaßten Wandelementes und damit der Brauchbarkeit von Betriebsmessungen mit Wärmeflußmessern an großen Wandflächen — wobei selbstverständlich keine solche Abgrenzungen ohne Störung der tatsächlichen Konvektion eingesetzt werden können — wurden außerdem Messungen mit Schichthöhen von 300 und 600 mm mit und ohne Randabgrenzung vorgesehen.

5. Versuchsergebnisse

Wenn innerhalb einer senkrecht angebrachten Isolierung eine Luftkonvektion auftritt — wenn also gemäß Fig. 1 Luft an der warmen Oberfläche aufsteigt, an der kalten Oberfläche Wärme abgibt und durch Abkühlung wieder nach unten sinkt — so muß der Wärmefluß an der warmen Oberfläche unten größer sein als oben und an der kalten Oberfläche oben größer sein als unten. Da nämlich ein Teil der unten in die Isolierung einströmenden Wärme nach oben abgeführt wird, tritt unten mehr Wärme ein als auf der gegenüberliegenden kalten Seite abfließen kann. Entsprechend strömt oben weniger Wärme ein als unten, weil die Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und aufsteigender Warmluft geringer ist als unten zwischen der Oberfläche und der zurück-

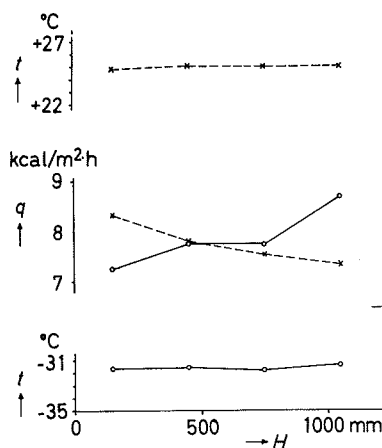


Fig. 8

Wärmestromdichte q und Oberflächentemperatur t einer Mineralfasermatte in Abhängigkeit von der Meßhöhe H ($h = 1200 \text{ mm}$, $s = 200 \text{ mm}$)

— Kaltseite - - - Warmseite

strömenden kalten Luft. *G. Lorentzen* u. *E. Brendeng* [8] haben erstmals diese Erscheinung experimentell festgestellt. Fig. 8 zeigt die Verhältnisse, wie sie im Forschungsheim bei einer Schichtdicke von $s = 200 \text{ mm}$ und einer Mitteltemperatur von $t_m = -3 \text{ °C}$ ermittelt wurden. Bei den anderen Messungen ist dieses Bild nicht so klar ausgeprägt. Die Ursache ist darin zu suchen, daß die Zirkulation (wie sie in Fig. 1 skizziert ist) sich umso ungestörter ausbilden kann, je dicker die Isolierung ist. Je niedriger ferner die Mitteltemperatur liegt, umso größer ist die Strömungsgeschwindigkeit, da die Zähigkeit von Gasen — im Gegensatz zu Flüssigkeiten — mit abnehmender Temperatur kleiner wird.

Wenn nun aufgrund der Wärmefluß- und Temperaturmessung an irgend einer Stelle H der Isolierung die Wärmeleitfähigkeit berechnet wird, so ergibt sich aus Fig. 8, daß man je nach der ausgewählten Stelle längs der Schichthöhe und je nach dem, ob man an der warmen oder an der kalten Oberfläche mißt, sehr unterschiedliche Ergebnisse erhalten kann.

Fig. 9 zeigt die Auswertung für zwei Schichtdicken, und zwar für $s = 100 \text{ mm}$ und $s = 200 \text{ mm}$ bei einer Mitteltemperatur von $t_m = -3 \text{ °C}$. Das rechte Bild bezieht sich somit auf Fig. 8. Auf der Abszisse ist die Schichthöhe h und auf der Ordinate die für diese Höhe ermittelte Wärmeleitfähigkeit λ aufgetragen. Die ausgezogene Kurve ergibt sich aus den Messungen an der Kaltseite und die gestrichelte Linie aus den Messungen an der Warmseite. Die an der Kaltseite oben und unten gefundenen Werte der Wärmeleitfähigkeit unterscheiden sich um etwa 20%. Mittelt man alle 8 Werte — erfaßt man also den ganzen Isolierkörper, in dem eine Konvektion möglich ist, das heißt die gesamte an der warmen Oberfläche eintretende und an der kalten Oberfläche wieder austretende Wärme — so erhält man eine Wärmeleitfähigkeit, die durch die strichpunktierte Linie dargestellt ist. Interessant ist der Vergleich der beiden Mittelwerte für die Isolierdicken von 100 und 200 mm: die Werte unterscheiden sich nur um 1%. Eine Abhängigkeit des Konvektionseinflusses auf die Wärmeleitfähigkeit der Isolierdicke, wie er von *E. A. Allcut* u. *F. G. Ewens* [1] festgestellt wurde, konnte daher nicht ermittelt werden.

Auch ein nennenswerter und eindeutiger Einfluß der Schichthöhe, wie er in starkem Maße von *E. Griffiths* [5] gefunden wurde, hat sich bei diesen Versuchen nicht ergeben. Hierbei gilt allerdings wieder die Voraus-

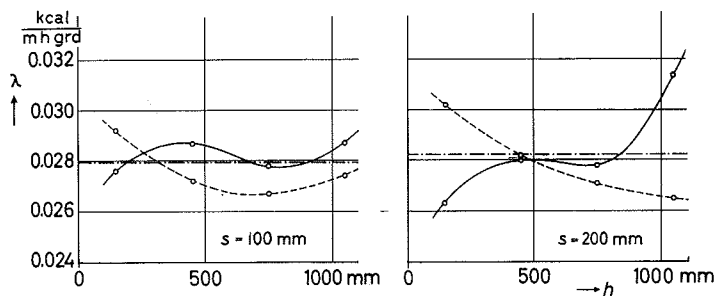


Fig. 9

Scheinbare Wärmeleitfähigkeit λ einer senkrechten Mineralfasermatten-Isolierung von 1200 mm Höhe in Abhängigkeit von H bei etwa -3 °C

— Kaltseite
- - - Warmseite
- · - · - wahre Wärmeleitfähigkeit

setzung, daß die ganze Schichthöhe erfaßt wird, in der eine Konvektion auftreten kann. Diese Forderung ist experimentell in der Weise verwirklicht worden, daß die Isolierung an den Berührungslinien der Wärmeleitfähigkeitsmeßplatten von 300 mm Höhe derart waagrecht unterteilt wurde, daß Schichthöhen von 300 und 600 mm Höhe entstehen.

Fig. 10 zeigt die Abhängigkeit der mittleren Wärmeleitfähigkeit λ_m der Fasermatte von der Mitteltemperatur t_m für $h = 300, 600$ und 1200 mm bei einer Schichtdicke von $s = 100$ mm. Wenn die Reihenfolge der Kurven ohne Berücksichtigung der jeweiligen Meßgenauigkeit als richtig angenommen wird, so stellt man eine Abnahme der Wärmeleitfähigkeit mit der Schichthöhe fest, im Gegensatz zu E. Griffiths, der eine Zunahme gefunden hatte.

Das jetzige Ergebnis stimmt mit der eingangs dargelegten Theorie überein, die schon bei reinen Luftschichten bestätigt werden konnte. Hier hat sich nämlich eindeutig ergeben, daß der Konvektionsanteil an der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit mit wachsendem Verhältnis h/s abnimmt. Diese Erscheinung ist anschaulich dadurch zu erklären, daß — wie aus Fig. 1 entnommen werden kann — mit zunehmender Schichthöhe h der Zirkulationsweg länger und damit der Anteil des als Wärmebrücke wirkenden Luftstromes an der Wärmeübertragung je Flächeneinheit kleiner wird. Diese gleiche Gesetzmäßigkeit deutet sich bei Fasermatten an. Es ist dabei zu berücksichtigen, daß der größte Unterschied bezüglich der Wärmeleitfähigkeit bei einer bestimmten Mitteltemperatur, jedoch verschiedener Schichtdicke bzw. Schichthöhe 6% betrug. Bei einer Meßgenauigkeit von etwa $\pm 5\%$ können daher aus diesen Ergebnissen noch keine eindeutigen Gesetzmäßigkeiten abgeleitet werden.

Zur eindeutigen Klärung dieser Frage ist es notwendig, den Konvektionseinfluß durch Herabsetzen des Strömungswiderstandes zu vergrößern, das heißt also, durch eine Verminderung der Rohdichte. Entsprechende Versuche sollen demnächst in einem zweiten Forschungs-

vorhaben durchgeführt werden, das auf einen größeren Temperaturbereich und auf verschiedene Orientierungsrichtungen der Meßanordnung zum Schwerfeld der Erde sowie auf gestopfte und körnige Isolierstoffe erweitert ist.

Interessant ist auch ein anderes Ergebnis der Versuche. In Fig. 10 ist noch eine Kurve eingezeichnet, die an denselben Mineralfasermatten im waagrechten Zweiplattengerät erhalten wurde. Die Werte liegen nicht etwa tiefer — wie man nach G. Lorentzen u. E. Brendeng [8] erwarten würde — sondern sogar höher, besonders bei größeren Mitteltemperaturen. Die punktierten Kurven zeigen die Werte bei einem Wärmestrom von unten nach oben und umgekehrt.

6. Folgerungen

Aus den Versuchsergebnissen lassen sich zunächst nachstehende Folgerungen ziehen:

a) In Mineralfasermatten der handelsüblichen Ausführung mit einer Rohdichte von etwa 100 kg/m^3 ist bei senkrechter Lage ein geringer Einfluß einer Luftkonvektion innerhalb der Isolierung auf die Wärmeübertragung vorhanden. Diese Aussage gilt für einen Bereich von etwa -10 bis $+200$ °C Mitteltemperatur und für ein Temperaturgefälle bis zu 20 grad/cm . Die Abweichungen der Wärmeleitfähigkeit für verschiedene Schichtdicken (50 bis 200 mm) und verschiedene Schichthöhen (300 bis 1200 mm) liegen praktisch innerhalb der Meßgenauigkeit, mit der diese Größe bestimmt werden kann.

b) Die Meßergebnisse an den betrachteten Fasermatten mit dem waagrechten Zweiplattengerät sind eher größer als kleiner und können daher — selbstverständlich unter Berücksichtigung von Zuschlägen für Stoßfugen und Halterungen — auf senkrechte Mattenisolierungen übertragen werden.

c) Wärmeleitfähigkeitsmessungen an senkrechten Mattenisolierungen ergeben nur dann eindeutige und damit für die Praxis brauchbare Werte, wenn bei der Messung die Wärmeabgabe der ganzen Isolierungshöhe erfaßt wird. An Teilflächen können je nach der Lage der Meßstelle innerhalb der Gesamthöhe und der ausgewählten Oberfläche (Warm- oder Kaltseite) größere oder kleinere Wärmeleitfähigkeiten gemessen werden, als für die Berechnung des Wärmeverlustes der Anlage zugrunde zu legen sind.

Eine gleiche meßtechnische Forderung gilt für senkrechte Rohrisolierungen.

7. Zusammenfassung

Zur Klärung des Konvektionseinflusses auf die Wärmeleitfähigkeit von Wandisolierungen aus Mineralfasermatten wurden Messungen an handelsüblichen Matten mit einer Rohdichte von 100 kg/m^3 bei senkrechter Anbringung durchgeführt, und zwar bei Schichtdicken von 50 bis 200 mm und Schichthöhen von 300 bis 1200 mm sowie zusätzlich im waagrechten Zweiplattengerät. Die Ergebnisse zeigen, daß die Abweichungen praktisch innerhalb der möglichen Meßgenauigkeit liegen. Die Untersuchungen sollen in einem zweiten Forschungsvorhaben auf geringere Rohdichten, auf gestopfte und körnige Isolierstoffe sowie auf einen größeren

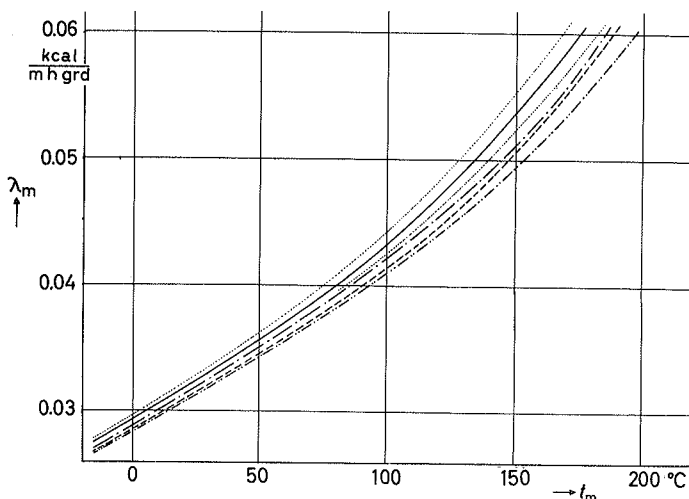


Fig. 10

Mittlere Wärmeleitfähigkeit λ_m einer Mineralfasermatte ($R = 100 \text{ kg/m}^3$) von 100 mm Dicke in Abhängigkeit von Mitteltemperatur t_m und Schichthöhe h

— · · · · · $h = 1200 \text{ mm}$ — — — — — Messung im waagrechten Zweiplattengerät
 - - - - - $h = 600 \text{ mm}$ · · · · · Wärmestrom von unten nach oben bzw. oben nach unten im Plattengerät
 - · · · · $h = 300 \text{ mm}$

Temperaturbereich und auf verschiedene Lagen der Matten zum Schwerfeld der Erde erweitert werden.

Es hat sich jedoch bereits eindeutig ergeben, daß richtige und reproduzierbare Wärmeleitfähigkeitsmessungen an senkrechten luftdurchlässigen Isolierungen nur dann vorgenommen werden können, wenn die *gesamte* Isolierungshöhe und nicht nur eine Teilhöhe erfaßt wird.

Benutzte Zeichen

Symbole

- H* Meßhöhe, m
h Schichthöhe, m
q Wärmestromdichte, kcal/m² h
R Rohdichte, kg/m³
s Schichtdicke, m
t Temperatur, °C
 λ Wärmeleitfähigkeit, kcal/m h grd

Index

- m* Mittelwert

Literatur

- [1] *E. A. Allcut* u. *F. G. Ewens*: Thermal conductivity of insulating materials; *Canad. J. Res. A* 17 (1939) S. 209/215
 [2] *J. S. Cammerer*: Wärmeleitzahlen von Faserdämmschichten mit niedrigen Rohwichten (Ber. aus d. Bauforschung H. 23); Berlin 1962
 [3] *W. F. Cammerer*: Garantiefragen im Wärmeschutz; *Allg. Wärmetechnik* 9 (1960) S. 273/279

- [4] *J. L. Finck*: Mechanism of heat flow in fibrous materials; *Nat. Bur. Stand., J. Res.* 5 (1930) S. 973/984
 [5] *E. Griffiths*: *Heat Insulators*; London 1929
 [6] *H. Gröber, S. Erk* u. *U. Grigull*: *Die Grundgesetze der Wärmeübertragung*; Berlin 1961
 [7] *C. H. Lander*: Factors affecting thermal conductivity; *Engng. Exp. Station Univ. Minnesota, Techn. Pap.* 49 (1944)
 [8] *G. Lorentzen* u. *E. Brendeng*: The influence of free convection in insulated vertical walls; *Insulation Rev.* 4 (1960) S. 17/23
 [9] *W. Mull* u. *H. Reiher*: Der Wärmeschutz von Luftschichten; *Beih. Gesundh.-Ing. R.I H.* 28 (1930) S. 1/26
 [10] *E. Raisch* u. *K. Schropp*: Die thermoelektrische Temperatur- und Wärmeflußmessung; *Mitt. Forschungsh. f. Wärmeschutz München H.* 8 (1930) S. 1/93
 [11] *F. B. Rowley* u. *C. E. Lund*: Heat transmission through insulation as affected by orientation of wall; *Trans. Amer. Soc. Heat. Ventil. Engrs* 49 (1943) S. 331
 [12] *E. Schmidt*: Versuche zum Wärmeübergang bei natürlicher Konvektion; *Chem.-Ing.-Techn.* 28 (1956) S. 175/180
 [13] *G. B. Wilkes*: *Heat Insulation*; New York 1950
 [14] Deutscher Normenausschuß: a) Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät; DIN 52612 (Berlin, Juli 1959) — b) Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit nach dem Rohrverfahren; DIN 52613 (Berlin, April 1961)
 [15] Verein Deutscher Ingenieure: Wärme- und Kälteschutz VDI 2055 (Berlin, Dez. 1958)
 [16] Verein d. Großkesselbesitzer: Richtlinien für die Einmauerung von Dampfkesseln; Essen 1960