

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 II: Wärmeschutz in der Industrie

Nummer 13

**Betriebswärmeleitfähigkeit von Wärmedämmungen
industrieller und betriebstechnischer Anlagen**

Dipl.-Ing. (FH) Martin Zeitler

Nachdruck wksb Sonderausgabe 1985

Betriebswärmeleitfähigkeit von Wärmedämmungen industrieller und betriebstechnischer Anlagen

Dipl.-Ing. (FH) Martin Zeitler

Inhalt

Die Betriebswärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs bei ausgeführten Wärmedämmungen kann zwar als eine garantiefähige Größe für den Wärmeschutz einer betriebstechnischen Anlage angesehen werden, eine örtliche Überprüfung dieser Größe läßt jedoch aufgrund der möglichen vielfältigen Einflußgrößen selten auf die Qualität der gesamten ausgeführten Wärmedämmung schließen und steht im allgemeinen nicht im Einklang mit dem Gesamt-Wärmeverlust einer Anlage.

Bei entsprechender Berücksichtigung der bekannten beeinflussenden Größen wie Rohdichte, Dicke, Temperatur, evtl. Feuchte, Ort und Zeit auf die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes und unter Einbeziehung zusätzlicher Verluste der Wärmebrücken z. B. berechnet mit geeigneten Berechnungsmethoden, besteht durchaus die Möglichkeit, den Gesamt-Wärmeverlust verlässlich vorauszuberechnen. Dies setzt eine genaue Kenntnis der Wärmeleitfähigkeit des eingesetzten Dämmstoffes einschließlich der gegebenen Qualitätsschwankungen und gesicherte Angaben über den zusätzlichen Wärmeverlust von Wärmebrücken voraus.

Qualitätsunterschiede der Dämmstoffe sollen dabei jedoch nicht durch vereinheitlichte Grenzkurven für die Berechnung überdeckt werden. Bei entsprechender statistischer Absicherung in Bezug auf die fertigungsbedingten Qualitätsschwankungen lassen sich ausreichend abgesicherte individuelle Werte der Wärmeleitfähigkeit eines Dämmstoffes bestimmen.

Bedeutung der Betriebswärmeleitfähigkeit

Der Begriff der Betriebswärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung betriebstechnischer oder industrieller Anlagen kann nicht ohne Zusammenhang mit der Gewährleistung verschiedener wärmeschutztechnischer Größen gesehen werden. Zu gewährleistende Eigenschaften müssen jedoch zweckentsprechend und sinnvoll sein, d. h. sie müssen einerseits die geforderten Eigenschaften kennzeichnen und andererseits mit genügender Sicherheit angegeben, eingehalten und nachgeprüft werden können.

Dabei ist zu beachten, daß Garantien nur für die Eigenschaften einer Lieferung oder Herstellung einer Ware gegeben werden können, auf die der Lieferant oder Hersteller entsprechenden Einfluß hat. Dies sollte auch für die Gewährleistungen bei der Erstellung von Wärmedämmungen und somit deren Betriebswärmeleitfähigkeit gelten.

Größen, welche durch eine Dämmfirma nicht zu beeinflussen sind, müssen aus den Gewährleistungen selbstverständlich ausgenommen werden, was jedoch nicht heißen darf, daß sie nicht zu berücksichtigen sind.

Für die Betreiber von Wärmeerzeugern oder sonstigen betriebstechnischen Anlagen macht es letztendlich auch keinen Unterschied, worauf erhöhte Wärmeverluste und somit die Beeinflussung des Wirkungsgrades ihrer Anlagen zurückzuführen sind. Auch sicherheitstechnische Aspekte spielen bei den Anforderungen an Wärmedämmungen eine nicht untergeordnete Rolle.

Aus diesen Gründen ist es auch verständlich, daß trotz aller Öffentlichkeitsarbeit, Stellungnahmen etc. [1-3] und auch Richtlinien für den Wärme- und Kälteschutz [4] weiterhin

- a) höchstzulässige Wärmeverluste,
- b) höchstzulässige Oberflächentemperaturen (oder Über-temperaturen zur Umgebungstemperatur),
- c) örtlicher oder zeitlicher Temperaturabfall von strömenden Medien in Rohrleitungen oder Behälterfüllungen,
- d) Verhinderung von Tauwasser an «Kälteleitungen»,

in den Spezifikationen für die Wärmedämmung von Wärmeerzeugern oder betriebstechnischen Anlagen gefordert werden und wie bisher auch durch die ausführenden Firmen akzeptiert und wenn nötig, auch garantiert werden. Die Grundlage für die Erfüllung dieser Anforderungen letztendlich stellt die «Betriebswärmeleitfähigkeit der ausgeführten Wärmedämmung» dar.

Begriff der Betriebswärmeleitfähigkeit

Nach Abschnitt 3.2.3.1 der VDI 2055 gibt es eine Betriebswärmeleitfähigkeit einer homogenen Dämmschicht in Abhängigkeit von der Mitteltemperatur, wobei ein Körper homogen hinsichtlich der Massenverteilung ist, wenn die Dichte überall gleich ist. Einflüsse von Abstandshaltern, Stirnscheiben oder sonstiger konstruktiver Elemente sind also aus dem Begriff Betriebswärmeleitfähigkeit ausgenommen.

Es handelt sich somit nicht um die «Betriebswärmeleitfähigkeit der ausgeführten Wärmedämmung», dem eigentlichen Lieferumfang einer Dämmfirma, sondern um die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes im Betrieb. Neben der fachgerechten und einwandfreien Anbringung der Wärmedämmung entsprechend dem Stand der Technik wird nicht nur die sachgemäße Wahl des Dämmstoffes gefordert, vielmehr ist auch die Wahl und das fachgerechte Anbringen von Abstandshaltern, Abdeckblechen etc. wesentlicher Bestandteil der Ausführung.

Die Betriebswärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes – im Sinne der VDI 2055 Abschnitt 5.2.2.1 nachprüfbar – kann jedoch durch eine Dämmfirma, abgesehen von verarbeitungstechnisch bedingten Fugen, Stößen oder Falten so gut wie nicht beeinflusst werden und gibt außerdem nur sehr eingeschränkt Auskunft über die Qualität der gesamt ausgeführten Arbeiten und somit den damit verbundenen tatsächlichen Wärmeverlust der betriebstechnischen Anlage.

Eine Überprüfung gemäß dem genannten Abschnitt der Richtlinie hat jedoch Aussagekraft über die Qualität des Dämmstoffes und ist insbesondere bei ortsgefertigten Dämmstoffen (z. B. Ortschaum DIN 18159-PUR) von nicht untergeordneter Bedeutung. Die «Betriebswärmeleitfähigkeit» des Dämmstoffes steht für den «Rechenwert» zur Berechnung des Wärmeschutzes von betriebstechnischen Anlagen. Für die Berechnung des Wärmeschutzes gemäß der HeizAnIV [5] werden Rechenwerte für Dämmstoffe an Rohrleitungen bei Heizungsanlagen durch einen Sachverständigenausschuß bearbeitet und festgesetzt.

Für eine Festsetzung sind hierbei entsprechende Voraussetzungen zu erfüllen und Vorschriften zu beachten.

Dies sind z. B. statistisch abgesicherte Rechenwerte aus mindestens 5 Meßwerten und Güteüberwachung, festgelegt durch Bescheide des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau; eine Vielfalt von Vorschriften und

Reglementierungen, wobei sich in einem oder anderen Fall bei der Festlegung und Einordnung in Wärmeleitfähigkeitsgruppen gewisse Härten nicht vermeiden lassen.

Andererseits werden diese Veröffentlichungen und Festsetzungen von den Industriebetrieben zur Herstellung derartiger Dämmstoffe auch gerne zu Werbezwecken ausgenutzt.

Gegenteilige Bestrebungen, nämlich eine Vereinheitlichung durch Grenzwerte oder Grenzkurven ohne Rücksicht auf die Qualitätsunterschiede der Produkte, können mit Sicherheit auch nicht im Interesse der beteiligten Partner liegen.

- Dem Hersteller eines Dämmstoffes ist es sicher ein Bedürfnis, die Qualitätsmerkmale seines Produktes herauszustellen, um diese auch marktwirtschaftlich ausnützen zu können.
- Ein seriöser Verarbeiter wird auf die Verarbeitbarkeit und die thermophysikalischen Eigenschaften der Stoffe genauso achten wie auf den Preis.
- Für den Anwender ist die Qualität der verwendeten Materialien schon allein aus Gewährleistungs-Gründen von Bedeutung.

Würde sich nicht im Falle einer Vereinheitlichung der Eigenschaften ein Preisverfall, der nicht zuletzt auch auf den Einkauf ungeachtet der Qualitätsmerkmale der Dämmstoffe zurückzuführen ist, zum Qualitätsverfall wenden?

Um beides zu vermeiden, müssen einerseits Wettbewerbsverzerrungen aufgrund falscher oder ungenügend angegebener Werte für die Eigenschaften der Dämmstoffe vermieden werden, andererseits ist auf pauschalisierte und vereinheitlichte Rechen- oder Grenzwerte in Richtlinien weitestgehend zu verzichten.

Die Tafeln 8 und 9 der VDI 2055 geben Anhaltswerte für die Betriebswärmeleitfähigkeit verschiedener Wärmedämmstoffe an.

Bei den Mineralfaserstoffen z. B. wurde dabei jedoch nicht auf den bekannten und nicht zu vernachlässigenden Rohdichteinfluß auf die Wärmeleitfähigkeit Rücksicht genommen, so daß diese angegebenen Werte, insbesondere für höhere Temperaturen, von Laborwerten teilweise sogar überschritten werden können. Im AGI-Arbeitsblatt Q 132 «Mineralfasern als Dämmstoffe» werden Grenzkurven der Wärmeleitfähigkeit angegeben, in die sich die jeweiligen Produkte einordnen lassen und zwar unabhängig von der Rohdichte des Mineralfaserproduktes. Hier wird den Qualitätsunterschieden entsprechend bereits eine gewisse Graduierung vorgenommen, wobei diese Kurven die Grenzkurven von Laborwerten darstellen. In dieser Richtlinie wird bezüglich der Betriebswärmeleitfähigkeit im Sinne der VDI 2055 auf 10% bis 20% höhere Werte hingewiesen.

Andererseits werden in der Q 156 «Wirtschaftliche Dämmdicken» für die Wärmeleitfähigkeit am betriebsfertig gedämmten Rohr Werte vorgeschlagen, die ca. 5% unterhalb der Grenzkurve 1 für die Laborwerte von Mineralfaser-Matten liegen [6].

Die Betriebswärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes verliert jedoch an Bedeutung bei den – insbesondere für Kernkraftwerke – vorgefertigten, gekapselten Wärmedämm-Elementen. Hier entscheidet die «Qualität der Konstruktion» der Elemente über die Höhe der Wärmeverluste oder der äußeren Oberflächen-Temperaturen bei den meist metallischen Deckschichten der Stirnseiten. Hier tritt an die Stelle der Betriebswärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes automatisch die Betriebswärmeleitfähigkeit der ausgeführten Wärmedämmung. Die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes wird aber noch immer die Grundlage für den Wärmeschutz derartiger Ausführungen bilden.

Diese Größe steht jedoch immer noch nicht im Einklang mit dem Gesamt-Wärmeverlust betriebstechnischer Anlagen

oder Anlagenteile. Konstruktive Elemente aus statischen oder sicherheitstechnischen Gesichtspunkten (Ausschlagsicherungen, Stoßbremsen etc.) nehmen oftmals nicht unwesentlichen Einfluß auf die Wärmeverluste in einem Kraftwerk. Aus diesem Grund werden Betreiber solcher Anlagen an Pauschal-Garantien festhalten wollen.

Abschnitt 5.1.2.2 c) der VDI 2055 ermöglicht mit der Bestimmung des «Betriebs-Wärmedurchlaßkoeffizienten» die Überprüfung einer derartigen Pauschal-Garantie für den Gesamt-wärmeverlust im Falle von definierten Randbedingungen.

Physikalische und technische Grundlagen

Die Wärmeübertragung folgt der Laplace'schen Differentialgleichung.

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} = 0, \quad (1)$$

wobei ϑ für die Temperatur und x, y, z für die Raumkoordinaten des kartesischen Koordinaten-Systemes stehen.

Die Lösungen für die verschiedenen Sonderfälle der Wärmeübertragung in einer ebenen Wand oder bei Rohrdämmungen sind hinreichend bekannt und sind zusammen für einfache und mehrschichtige Aufbauten in den einschlägigen Richtlinien zusammengestellt [4–6].

So gilt für die Wärmestromdichte

a) für die ebene Wand

$$q = \frac{\vartheta_M - \vartheta_L}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum_{j=1}^n \left(\frac{s_j}{\lambda_j} \right) + \frac{1}{\alpha_a}} \text{ W/m}^2 \quad (2)$$

b) für die Wärmeübertragung bei Rohrdämmungen

$$q = \frac{\vartheta_M - \vartheta_L}{\frac{1}{\alpha_i d_i} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \frac{1}{\lambda_j} \ln \frac{d_j}{d_{j-1}} + \frac{1}{\alpha_a d_a}} \text{ W/m} \quad (3)$$

c) für die ebene, aus parallel nebeneinander liegenden Einzelteilen bestehende Wand

$$q = \frac{\vartheta_M - \vartheta_L}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{S}{\sum_{j=1}^n (A_j \cdot \lambda_j)} + \frac{1}{\alpha_a}} \text{ W/m}^2 \quad (4)$$

worin

ϑ_M = Temperatur des Mediums in °C

ϑ_L = Temperatur der Umgebung (Luft) in °C

s = Dicke der Dämmschicht in m

d = Durchmesser der Zylinder (Rohr) in m

α_i = Übergangskoeffizient innen in $\text{W/m}^2\text{K}$

α_a = Übergangskoeffizient außen in $\text{W/m}^2\text{K}$

λ = Wärmeleitfähigkeit der Dämm- und Baustoffe in W/mK

q = Wärmestromdichte in W/m^2 bei der Wand, W/m beim Rohr

A = Fläche senkrecht zur Wärmestromrichtung in m^2

n = Anzahl von Schichten oder Einzelteilen

j = Indize für die einzelnen Schichten

i = innen

a = außen

bedeuten.

Die Übergangskoeffizienten sind ein Maß für die Wärmestromdichte in W/m^2 an der Oberfläche des Körpers bei 1 K Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Fluid und sind von den Umgebungsbedingungen (z. B. Windgeschwindigkeit, Temperatur etc.) und den praktischen Gegebenheiten (Oberflächenbeschaffenheit der Abdeckung) abhängig und sind somit für die gegebenen Randbedingungen jeweils zu berechnen.

Die Wärmeleitfähigkeit ist eine temperaturabhängige Stoffeigenschaft, deren Wert angibt, welcher Wärmestrom in Watt senkrecht von 1 m Dicke bei 1 K Temperaturdifferenz zwischen den Oberflächen von $1m^2$ fließt.

Für «praktische Bedingungen» ist nach VDI 2055 für die Wärmeleitfähigkeit die «Betriebswärmeleitfähigkeit» zuzüglich etwaiger ausführungsbedingter Zuschläge einzusetzen.

Für weitere besondere Anwendungen, z. B. «Erdverlegte Rohrleitungen», «Wärmeverluste über Halterungen annähernd konstanten Querschnitts», «Wärmeverluste von Behältern», stehen neben den speziellen Lösungen auch Näherungsformeln zur Berechnung des Wärmeverlustes bei den jeweils gegebenen Verhältnissen zur Verfügung [7 u. 8]. Diese Berechnungsverfahren sind zum Teil recht komplex und nur noch sinnvoll mit programmierbaren Rechenmaschinen durchzuführen.

Für die Berechnung von Wärmebrücken (Halterungen auch beliebigen Querschnitts) stehen heute ebenfalls Programme zur numerischen Lösung der dreidimensionalen Laplace'schen Differentialgleichung (1) nach der Finiten-Differenzen-(FD) oder Finiten-Elemente (FE)-Methode zur Verfügung.

Im FIW kann mit einem Programm nach der Finiten-Differenzen-Methode praktisch für beliebige Gebiete (Konstruktionen) das Temperatur- und Wärmestromfeld berechnet werden. Das Programm wurde im Rahmen eines Forschungsvorhabens entwickelt, wobei die Übereinstimmung mit den praktischen Gegebenheiten bei der Wärmeübertragung durch aufwendige meßtechnische Untersuchungen nachgewiesen wurde; dies gilt für geringfügige Beeinflussung durch Wärmebrücken genauso wie bei extrem hohen Verlusten.

Entscheidend für eine gute Übereinstimmung von Berechnung und tatsächlichen Größen – und dies trifft nicht nur für die Berechnungen nach der FD-Methode zu, sondern auch für die Berechnungen mit den Formeln für die speziellen Lösungen – sind die Werte der Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes und die Werte der «Betriebswärmeleitfähigkeit».

Überschreitungen von gewährleisteten Größen in der Praxis bestätigen jedoch immer wieder, daß die Voraussetzungen zur Festlegung dieser Werte nicht hinreichend gegeben oder auch bekannt sind. Ursache sind entweder ungenügend berücksichtigte Einflußgrößen bei der Berechnung und / oder von den Annahmen abweichende Werte, die durch die Ausführung beeinflußt werden.

Die Einflußgrößen auf die oftmals zu gewährleistenden Größen, wie Oberflächentemperatur, Wärmeverlust etc., sollen deshalb im nachstehenden in physikalisch-technische und ausführungstechnische Einflußgrößen unterteilt aufgeführt werden:

a) Physikalisch-technische Einflußgrößen

- Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes von verschiedenen Größen wie
 - Temperatur
 - Rohdichte
 - Dicke
 - Feuchte

– Zeit (Alterung)

– Lage

● Übergangsverhältnisse an den Oberflächen

- Oberflächenbeschaffenheit (Strahlungskoeffizient)
- Strahlungsaustausch mit der Umgebung
- Luftströmungen etc.

● Lieferform des Dämmstoffes

- Matten, Platten oder Schalen

● Meßverfahren zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes

- Plattenverfahren nach DIN 52612
- Rohrverfahren nach DIN 52613

● Qualitätsschwankungen des Dämmstoffes

- Rohstoff, Zellgasgehalt
- örtliche Dichteschwankungen
- Schmelzperlengehalt, Faser-Abmessungen und Verteilung bei Faserstoffen, Zellgröße etc.
- Versteppung, Verklebung, Bindung

● Wärmebrücken bei der ausgeführten Dämmung

- Abstandshalter und sonstige konstruktive Elemente zur Halterung von Dämmung oder deren Abdeckung
- Beeinflussung durch sonstige konstruktive Elemente, wie Ausschlagsicherung, Stoßbremsen, Rohrlager etc.

● Konvektive Wärmeübertragung

- im Dämmstoff
- durch Fugen

b) Ausführungstechnische und praktische Einflußgrößen:

● Ausführungsmängel

- Fugen, Stöße, Spalten, Hohlräume etc.

● Veränderte Rohdichten des Dämmstoffes bei der ausgeführten Dämmung

- Dichteerhöhung bedingt durch die Rohrkrümmung bei ebenen Mineralfaser-Matten
- Abweichungen von Liefer- und Nenndichte

● Dickenverminderung aufgrund von Überschreitungen der Anwendungsgrenztemperatur

- durch falsche Produktwahl
- durch falsche Angabe der Anwendungsgrenztemperatur.

Ein Wärmedämm-Unternehmen hat letztendlich nur Einfluß auf die Ausführung, auf die Sorgfalt mit der das Dämmmaterial verarbeitet wird und bei der Wahl des Produktes oder Lieferform, der Abstandshalter und der Halterungen und Befestigungselemente.

Alle anderen Einflußgrößen sind entsprechend zu berücksichtigen, aus der Gewährleistung auszuklammern oder gemäß Abschnitt 5.3.2.5 und 5.3.2.6 der VDI 2055 (z. B. Übergangsverhältnisse) auf die Gewährleistungsvoraussetzungen umzurechnen.

Im nachstehenden sind nun diese Größen mit ihren beeinflussenden Merkmalen auf die Wärmeleitfähigkeit nochmals aufgeführt und erläutert.

- Die Abhängigkeiten der Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes von Temperatur und Rohdichte am Beispiel der Mineralfaser.

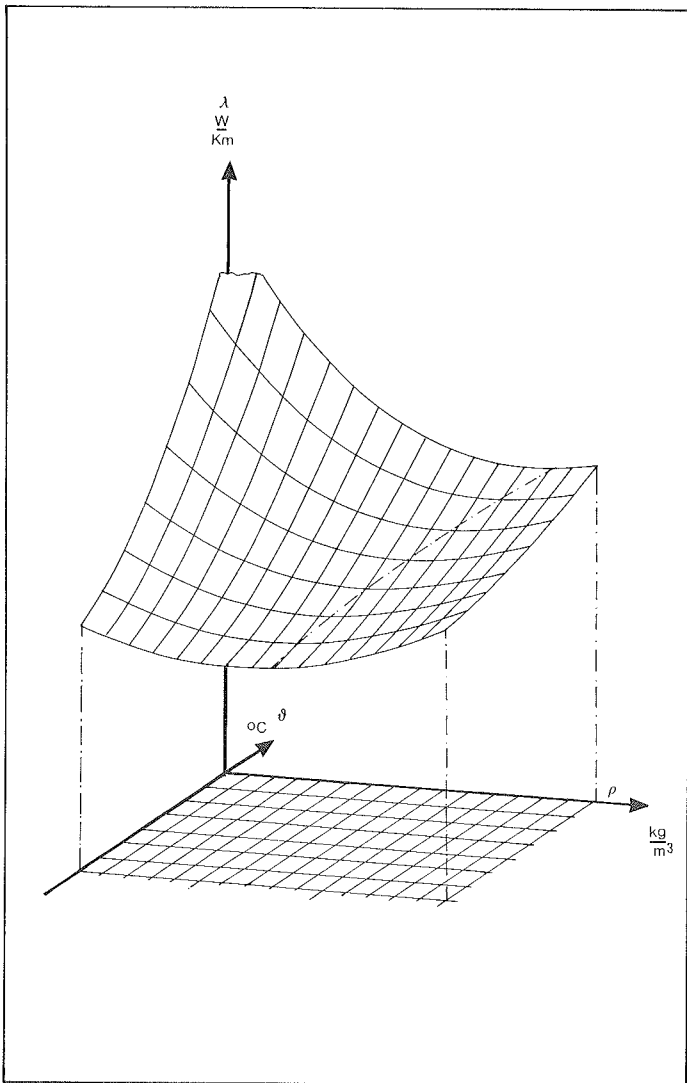


Bild 1: Wärmeleitfähigkeit λ von Mineralfaser-Dämmstoffen in Abhängigkeit von Temperatur und Rohdichte ρ .

Die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von Temperatur und Rohdichte stellt eine gekrümmte Fläche (Bild 1) dar, welche bei geringer Dichte und hohen Temperaturen ein Maximum erreicht. Das Minimum der Fläche liegt je nach Temperatur bei ca. 60 kg/m^3 für 50°C bis hin zu ca. 180 kg/m^3 bei 400°C für diesen gewählten Dämmstoff (Bild 2).

- Für die Berechnung des Wärmeschutzes gemäß den einschlägigen Richtlinien ist die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit zu berücksichtigen. Sie läßt sich über das arithmetische Mittel aus Warm- und Kaltseite bestimmen.

Dieses Näherungsverfahren ist für viele Anwendungsfälle auch ausreichend und entspricht weitgehend den tatsächlichen Gegebenheiten. Bei stark gekrümmten λ, ϑ -Kurven ergeben sich jedoch bei hohen wirksamen Temperaturunterschieden unter Umständen Abweichungen zwischen der näherungsweise ermittelten und der wirksamen Wärmeleitfähigkeit bis zu 15%. Die eigentliche «Wirksame Wärmeleitfähigkeit» wird über das Integral der Funktion $\lambda(\Theta)$ [9], (Bild 3) ermittelt:

$$\lambda = \frac{1}{\vartheta_W - \vartheta_K} \int_{\vartheta_K}^{\vartheta_W} \lambda(\Theta) d\Theta \quad (5)$$

Die λ, ϑ -Kurven für Mineralfaserstoffe lassen sich durch Polynome dritten Grades beschreiben, womit eine genaue Bestimmung über das Integral schon mit den heute üblichen Taschenrechnern leicht möglich ist.

Dieser Unterschied von gemessener und wirksamer Wärmeleitfähigkeit ist unter Umständen mit einer der gravierendsten aber auch einer der unbekanntesten und am wenigsten beachteten Größen bei den Differenzen von garantierter und tatsächlicher «Betriebswärmeleitfähigkeit» nach Abschnitt 5.1.2.2 der VDI 2055. Bei der Berechnung des Wärmeschutzes mit elektronischem Rechner nach der FD-Methode wird dieser Einfluß durch eine Unterteilung der Dämmschichtdicke automatisch berücksichtigt.

Der Temperaturabfall in der Wärmedämmung wird hierbei entsprechend den tatsächlichen Gegebenheiten berechnet und nicht vereinfacht als linear angenommen, wie dies bei der Benutzung der üblichen Formeln der Fall ist.

- Ein weiterer Einfluß auf die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes ist die Feuchte [10–12] bei Dämmstoffen im Kälteschutz. An dem Beispiel von Polyurethan-Hartschaum soll die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von dem Feuchtegehalt (volumenbezogen) gezeigt werden (Bild 4).

Verändern sich Wärmeverluste oder Temperaturen aufgrund dieses Einflusses, so hat dies abgesehen vom Einfluß der baupraktischen Feuchte bei Baustoffen meist einen entsprechenden Mangel in der Ausführung als Ursache (z.B. undichte Dampfbremse, Fugen etc.).

- Auch die zeitliche Änderung der Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen mit hochmolekularen Zellgasen (z.B. Polyurethan, Hartschaum, Polystyrol-Extruderschaum) kann von Ausführungsarten abhängig sein, wenn Deckschichten nicht die erforderlichen Dicken und Dichtigkeit aufweisen, die erforderlich sind, um einem Gasaustausch zwischen Zelle und Umgebung auf lange Sicht zu verhindern. Hierbei handelt es sich jedoch um geringfügige Änderungen, die unter Umständen durch andere Einflußgrößen weit überdeckt werden. Werden diese Schaumkunststoffe ohne diffusionsdichte Abdeckungen eingesetzt, ist jedoch mit Änderungen entsprechend nachstehendem Diagramm zu rechnen [13], (Bild 5).

- Der Einfluß der Dicke auf die Wärmeleitfähigkeit ist nur bei Materialien mit hoher Strahlungsdurchlässigkeit, also bei Materialien mit niedriger Rohdichte von Bedeutung [14]. Er spielt also im Anwendungsbereich des industriellen Wärmeschutzes in der Regel eine unbedeutende Rolle.

Trotzdem sei in Bild 6 an dem Beispiel einer organischen Faser mit ca. $8,6 \text{ kg/m}^3$ der Einfluß gezeigt.

Diese Kurve läßt sich durch eine Funktion

$$\lambda = \frac{s}{R_0 + \frac{s}{\lambda_\infty}} \quad (6)$$

beschreiben, wobei λ_∞ den Grenzwert der Wärmeleitfähigkeit beschreibt und R_0 vom möglichen Strahlungsaustausch zwischen Warm- und Kaltseite abhängig ist.

- Bei der Ortsabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit ist zwischen konvektiven Einflüssen (Bild 7 u. 8) und konstruktiv bedingten Beeinflussungen (Bild 9) zu differenzieren, wobei die konvektiven Einflüsse je nach Lage der Hauptwärmestromrichtung zur Schwerkraft unterschiedlich sind [15].

Die zusätzlichen Wärmeverluste durch Konvektion sind bei den Fasermaterialien mit den üblichen höheren Rohdichten für die Dämmung von betriebstechnischen Anlagen mit hohen Betriebstemperaturen praktisch ohne Bedeutung. Lediglich örtlich unterscheiden sich scheinbar wirksame Leitfähigkeitswerte von dem mittleren Wert; Temperatur- und Wärmestromfeld sind entsprechend verzerrt.

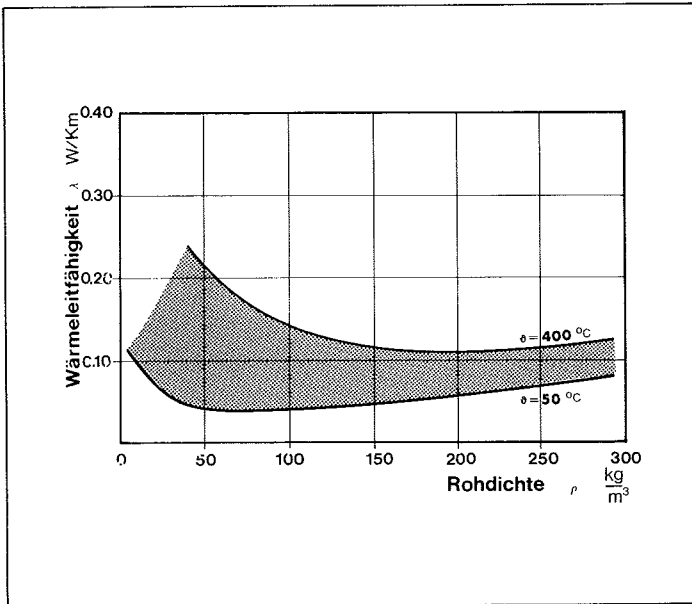


Bild 2: Bereich der Wärmeleitfähigkeitswerte von einem Mineralfaser-Produkt je nach Rohdichte und Anwendungstemperatur.

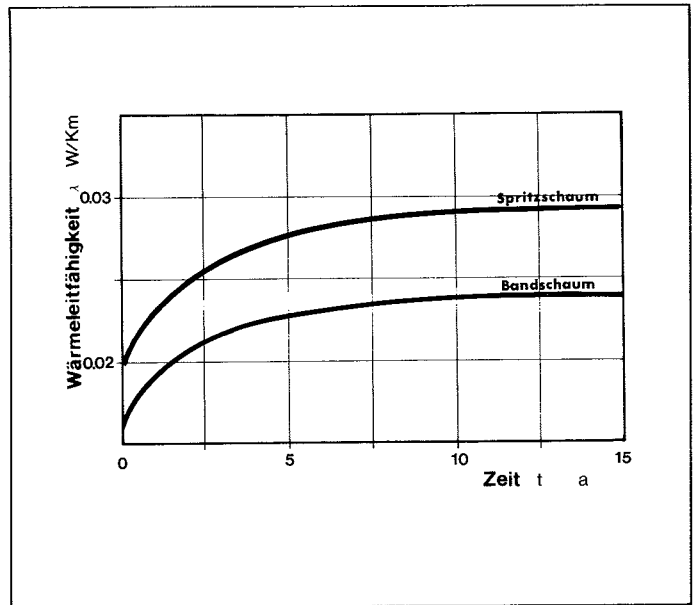


Bild 5: Änderung der Wärmeleitfähigkeit von Polyurethan-Hartschaum ohne diffusionsdichte Deckschichten in Abhängigkeit von der Zeit.

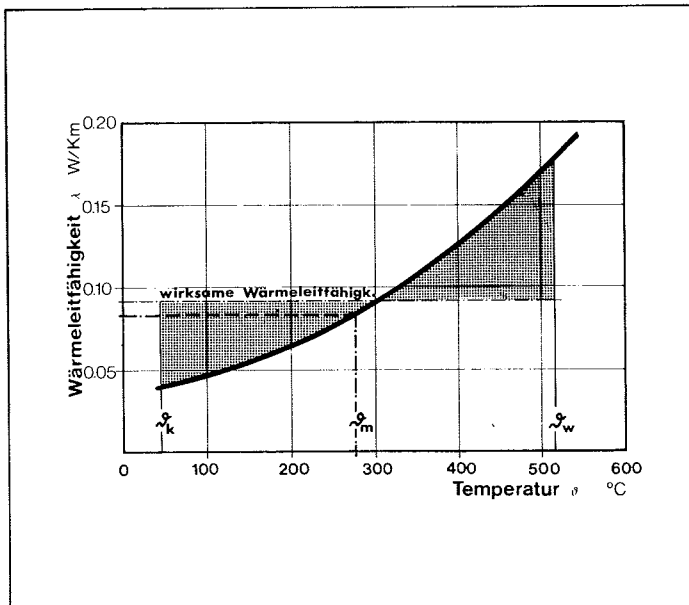


Bild 3: Unterschied bei der Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit über die Näherung mit dem arithmetischen Mittel aus Warm- und Kaltseitentemperatur $\theta_m = \frac{1}{2}(\theta_w + \theta_k)$ und dem Verfahren über das Integral.

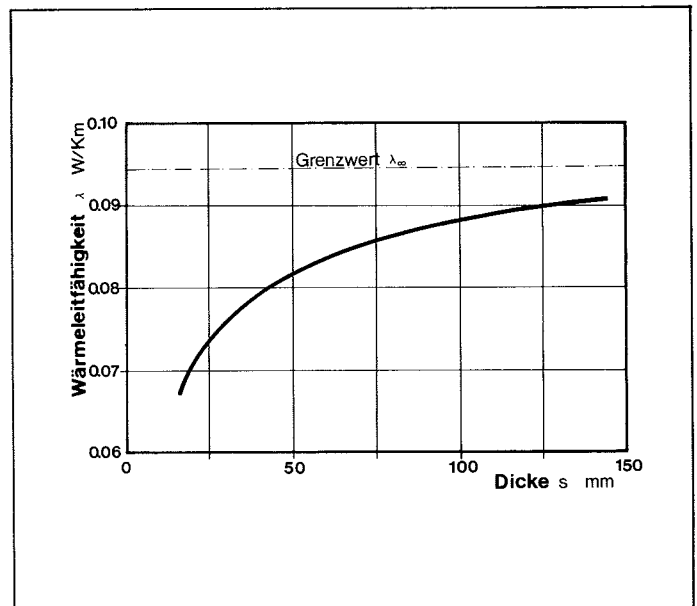


Bild 6: Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Dicke eines organischen Faserdämmstoffs mit 8,6 kg/m³.

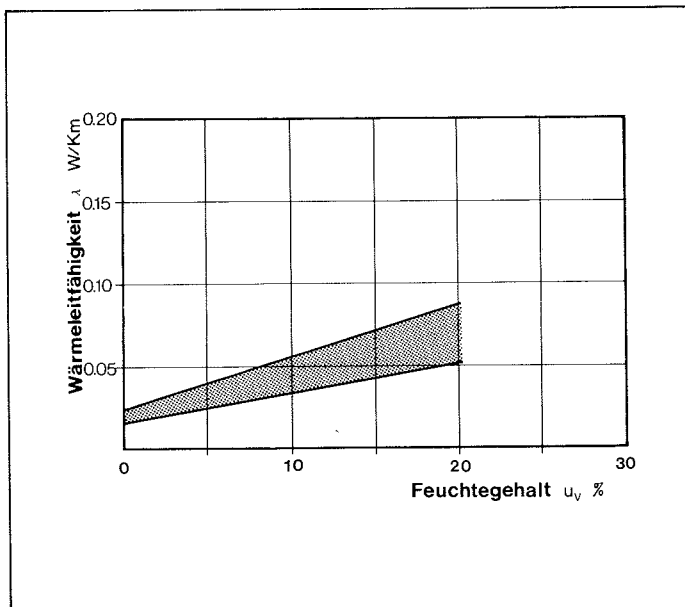


Bild 4: Bereich der Wärmeleitfähigkeit von Polyurethan-Hartschaum unterschiedlicher Dichte und Herstellungsverfahren in Abhängigkeit vom volumenbezogenen Feuchtegehalt bei 10°C Mitteltemperatur.

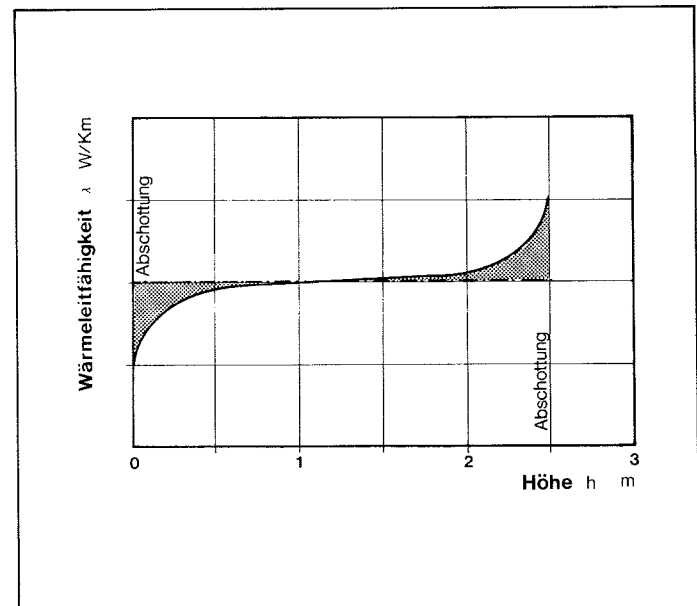


Bild 7: Scheinbare Wärmeleitfähigkeit an der Kaltseite einer Wärmedämmung bei Wärmeübertragung durch Konvektion in Abhängigkeit von der Höhe bei einer ebenen Wand.

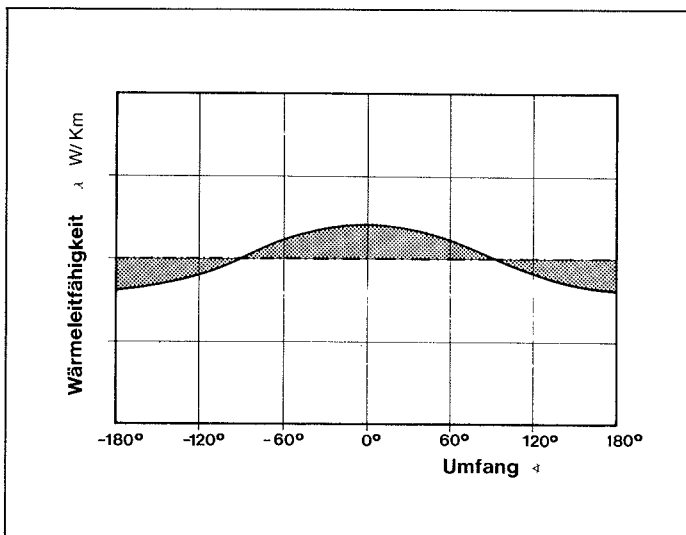


Bild 8: Scheinbare Wärmeleitfähigkeit an der Oberfläche einer Rohr-Wärmedämmung bei zusätzlicher Wärmeübertragung durch Konvektion in Abhängigkeit vom Umfang.

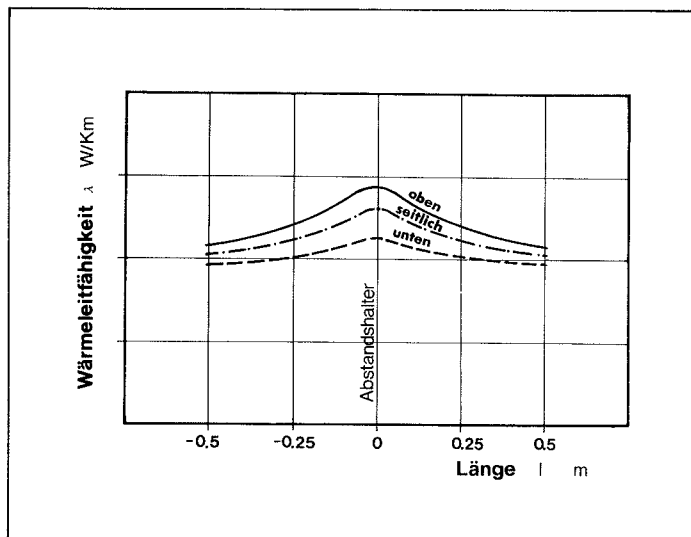


Bild 9: Scheinbare Wärmeleitfähigkeit in axialer Richtung einer ausgeführten Rohr-Wärmedämmung mit Einfluß der Abstandshalter.

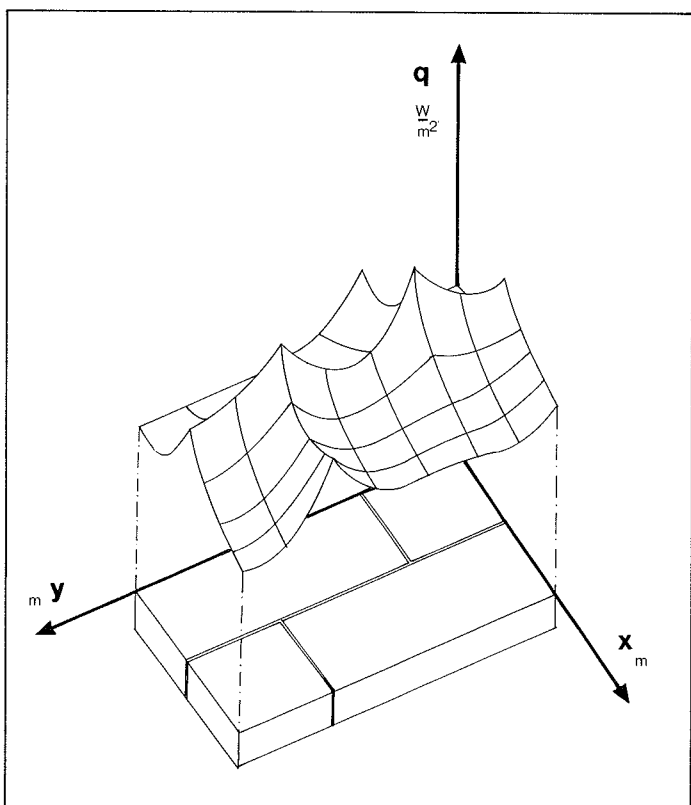


Bild 10: Örtlich scheinbare Wärmeleitfähigkeit bei ebenen metallgekapselten Dämmelementen.

Können Luftströmungen, sei es aufgrund von aufgezwungenen Druckdifferenzen (z. B. bei Belüftungsanlagen) oder auch durch die auftriebsbedingten Druckunterschiede ungehindert in Fugen oder Spalten auftreten, so wird unter Umständen ein beträchtlicher zusätzlicher Wärmeverlust infolge Wärmeübertragung durch Stofftransport erzeugt. Die Werte hierfür lassen sich je nach Anlage und Ausführung unter Umständen mit 10% und mehr bezogen auf die Wärmeverluste durch Transmission beziffern.

- Aus Bild 9 geht hervor, wie Abstandshalter die Wärmestromdichte an der Oberfläche einer Rohr-Wärmedämmung längs des Rohres beeinflussen.

Bei der Wärmedämmung mit metallgekapselten Elementen ergeben sich durch die Brückenwirkung der stirnseitigen Abdeckbleche oder Folien oftmals sehr hohe Werte für den örtlichen Wärmeverlust (Bild 10). Sie können das 10 bis 100fache des Wärmeverlustes im ungestörten Bereich annehmen.

- Bei der Dämmung von Rohren mit Matten wird die Länge der Bahn entsprechend dem äußeren Umfang abgestimmt. Dies hat eine Dichteerhöhung der Fasermatte im Bereich des Rohres zur Folge [17]. In der Praxis finden jedoch Zuschnitte mit etwas geringerer Länge als der äußere Durchmesser Verwendung, wobei hierfür keine funktionalen Zusammenhänge bekannt sind, sondern meist nur auf Erfahrungswerte der Wärmedämmfirmen zurückgegriffen werden kann.

Die Zusammenhänge zwischen Rohrdurchmesser, Dämmschichtdicke und Dichteerhöhung sind im Diagramm von Bild 11 zusammengestellt.

- Neben diesen ausführungsbedingten Dichteänderungen sind die lieferungsbedingten Dichteunterschiede zu beachten. Bei Mineralfaserprodukten sind Rohdichteschwankungen unter Umständen von 10 bis 15% völlig normal und in der Herstellung begründet.

Wie Dichteänderungen bei Mineralfaser-Produkten auf die Wärmeleitfähigkeit Einfluß nehmen können, soll Bild 12 zeigen. In diesem Diagramm ist als Beispiel für eine Verdichtung von $V = 1.2$ die Änderung der Wärmeleitfähigkeit bezogen auf die Wärmeleitfähigkeit der Mineralfasermatte bei der Rohdichte vor der Verdichtung als Korrekturfaktor f aufgetragen.

Ändert sich die Rohdichte um den Faktor $V = 1.2$ von z. B. 100 kg/m^3 auf 120 kg/m^3 , so ist bei 50°C Mitteltemperatur eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit um ca. 7,5% zu erwarten; bei 400°C Mitteltemperatur kann mit ca. 9%iger Verminderung der Wärmeleitfähigkeit gerechnet werden ($\lambda_V = 1.2 = f \cdot \lambda_{V=1.0}$). Eine Beeinflussung durch Quetschfalten, wie sie insbesondere bei kleinem Verhältnis von d/s auftreten können, bleiben dabei unberücksichtigt.

- Weiche elastische Dämmstoffe erfahren bei höheren Temperaturen unter Belastung eine Dickenverminderung (Bild 13). Je nach Temperatur und Belastung vermindert sich die Dicke der Dämmung und entsprechend umgekehrt proportional verhält sich der Wärmeverlust [19].

Der Kurvenverlauf ist abhängig von Belastung, Temperatur und der Zeit. Die größten Dickenänderungen ergeben sich in den ersten Stunden der Temperatureinwirkung. Nach 24-stündiger Temperatureinwirkung ist in der Regel ca. 90% der maximalen Dickenänderung bei gegebener Temperatur erreicht. Um unnötig erhöhte Wärmeverluste zu vermeiden, sind die «Anwendungsgrenztemperaturen» der eingesetzten Stoffe zu beachten und wenn möglich nicht zu überschreiten.

- Qualitätsschwankungen sind je nach Grundstoff der Faserdämmprodukte eine nicht zu vernachlässigende Größe. Je nach Schmelzperlengehalt können bei gleicher Rohdichte

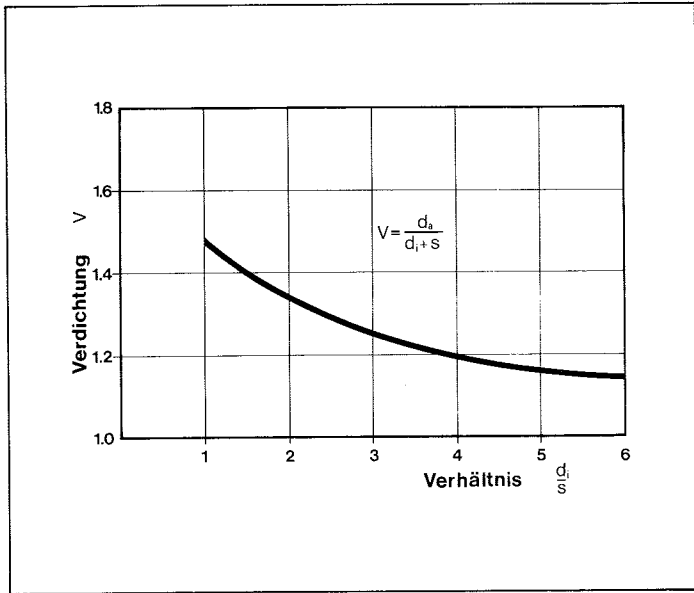


Bild 11: Verdichtung V des Dämmstoffes bei der Wärmedämmung mit Matten (einlagig) von Rohren bezogen auf die Dichte im ebenen Zustand in Abhängigkeit vom Verhältnis Rohrdurchmesser d_i zur Dämmschichtdicke S .

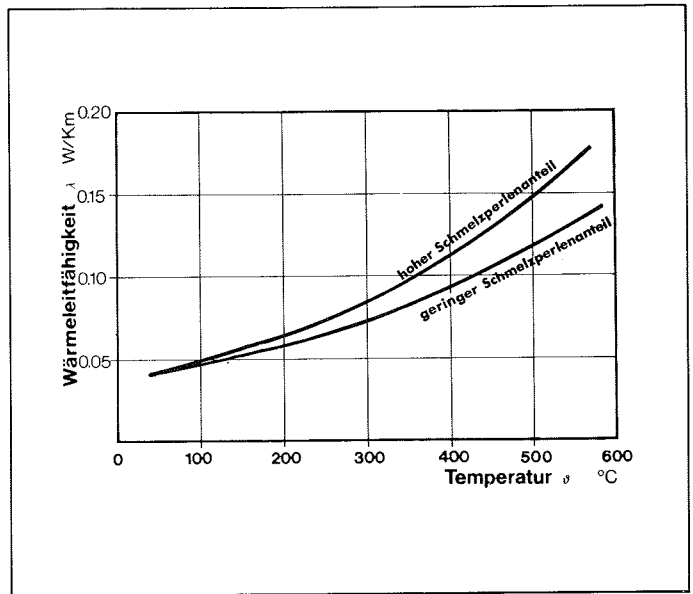


Bild 14: Die Wärmeleitfähigkeit (λ, θ -Kurve) eines Faserproduktes gleichen Herstellers bei gleicher Dichte, jedoch bei unterschiedlichem Schmelzperlenanteil.

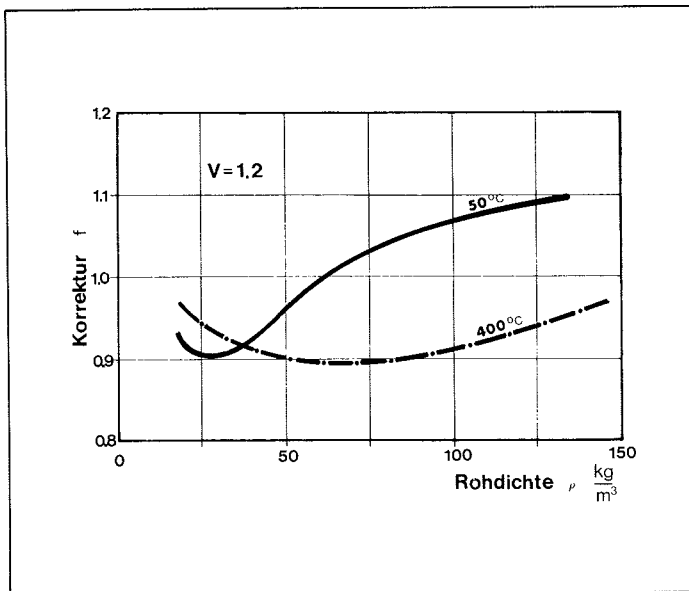


Bild 12: Korrekturfaktor f für die Änderung der Wärmeleitfähigkeit bei einer Verdichtung von $V = 1.2$ bei 50°C und 400°C Mitteltemperatur in Abhängigkeit von der Rohdichte.

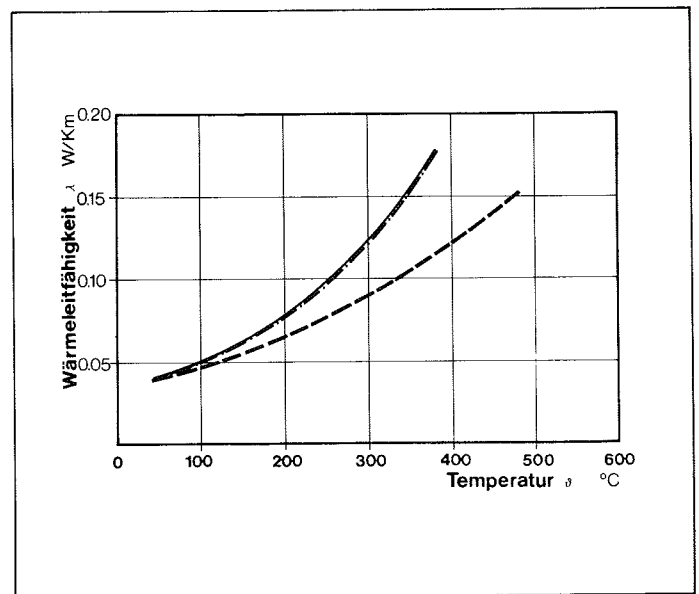


Bild 15: λ, θ -Kurve von Mineralfaser-Matten unterschiedlicher Hersteller.
 — Hersteller 1, Rohdichte 100 kg/m^3
 - - - Hersteller 2, Rohdichte 40 kg/m^3
 ····· Hersteller 3, Rohdichte 100 kg/m^3

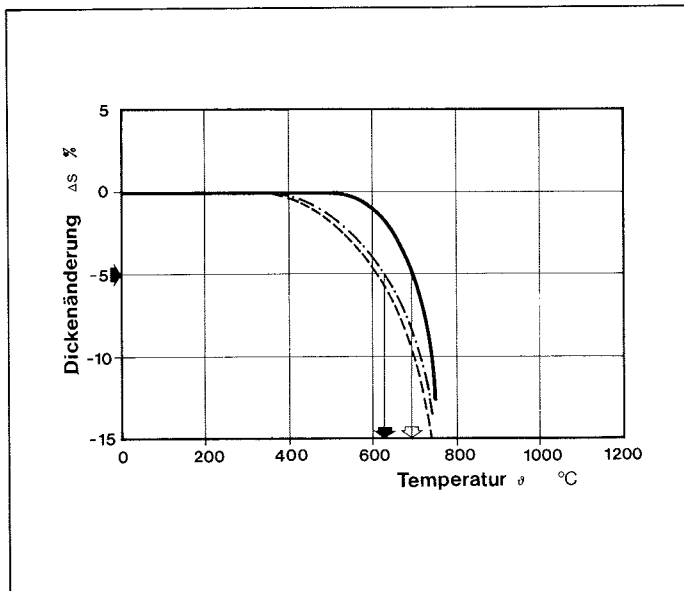


Bild 13: Dickenverminderung von Mineralfaser-Dämmstoff ($\rho = 100 \text{ kg/m}^3$) bei einer flächenbezogenen Belastung von 1 kN/m^2 und einseitiger Temperatureinwirkung.
 — bei stetiger Temperatursteigerung 5 K/min
 - - - nach 24-stündiger Temperatureinwirkung
 ····· nach 7-tägiger Temperatureinwirkung

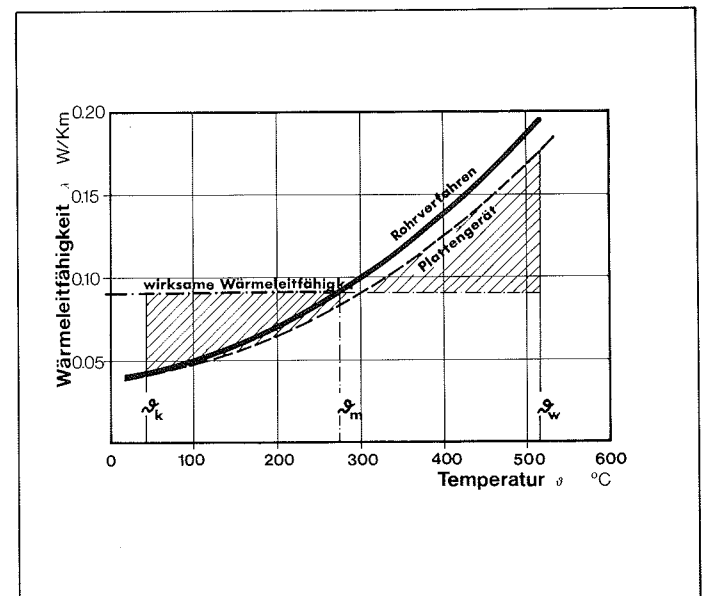


Bild 16: Unterschied zwischen der Wärmeleitfähigkeit bestimmt nach dem Plattenverfahren nach DIN 52 612 und dem Rohrverfahren nach DIN 52 613 ohne möglichen Einfluß von Stoß- und Längsfugen von Mineralfaser-Matten.

erhebliche Differenzen bei den λ , ϑ -Kurven auftreten (Bild 14). Schmelzperlen erhöhen die Masse und somit die «Rohdichte» des Faserproduktes, tragen aber nicht zur wärmedämmenden Wirkung wie die faserigen Anteile bei.

- Vergleicht man die Produkte unterschiedlicher Hersteller, so lassen sich bei gleicher Rohdichte (vergleiche in Bild 15 die λ , ϑ -Kurve von Hersteller 1 mit der von Hersteller 3, $\rho = 100 \text{ kg/m}^3$) Unterschiede bis zu 55% bei Anwendungstemperaturen von 300°C Mitteltemperatur erkennen. Hersteller 2 erreicht bei diesem Beispiel praktisch die gleichen Wärmeleitfähigkeitswerte bereits mit einer Dichte von 40 kg/m^3 des Mineralfaserproduktes.

Außerdem sind Qualitätsunterschiede je nach Rohstoff-Herstellungsvorgang oder Lieferform festzustellen. Dies gilt insbesondere für Formstücke wie Rohrschalen etc.

- Hinzu kommt, daß sich beim Verfahren zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit nach dem Rohrverfahren unter Umständen abweichende Werte gegenüber dem nach dem Plattenverfahren ergeben. Dies gilt insbesondere für Messungen bei höheren Temperaturen und den damit verbundenen hohen Temperaturdifferenzen und dem Einfluß der gegebenen Fuge bei dem betriebsfertig gedämmten Versuchsrohr. Entsprechend den praktischen Gegebenheiten werden zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit nach dem Rohrverfahren (DIN 52613) die vorgefertigten Rohrschalen, Schläuche oder Matten den Verarbeitungsrichtlinien des Herstellers gemäß auf das Versuchsrohr aufgebracht. Die Messung erfaßt also erhöhte Wärmeverluste durch Fugen und Spalten etc., deren Einflüsse somit in die Auswertung eingehen.

Die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Temperatur wird dabei durch eine Erhöhung der Prüfröhrtemperatur erreicht. Die Kaltseite stellt sich dabei entsprechend den Übergangsbedingungen und den Temperaturen im Laboratoriumsraum ein. Den ermittelten Wert der Wärmeleitfähigkeit bezieht man dann auf das arithmetische Mittel von Warm- und Kaltseite und das entspricht praktisch somit der «Wirksamen Wärmeleitfähigkeit». (Bild 16). Diese Werte eignen sich jedoch nicht für die Berechnungen nach der FD-Methode bei Unterteilung der Dämmschichtdicke in mehrere Schichten. Bei dem derzeit angewendeten Plattenverfahren ändert sich aus versuchstechnischen Gründen zwar mit steigender Mitteltemperatur der Probe auch die Temperaturdifferenz; der Einfluß ist hier in der Regel relativ gering und kann über ein Korrektionsverfahren bei Bedarf berücksichtigt werden, so daß die λ , ϑ -Kurve praktisch die «Wahre Wärmeleitfähigkeit» des Dämmstoffes darstellt [19].

Die maximale relative Meßunsicherheit kann für das Plattenverfahren mit $\pm 2\%$ beziffert werden. Beim Rohrverfahren liegt die Meßunsicherheit ebenfalls unter 3%.

Praktische Gegebenheiten

Wie aus vorangegangenen Abschnitten ersichtlich ist, sind die möglichen Einflußgrößen auf die Betriebswärmeleitfähigkeit einer ausgeführten Wärmedämmung vielfältig und es bedarf einer außerordentlichen Akribie, alle Möglichkeiten zu beachten und gegebenenfalls für die Berechnungen des Wärmeschutzes zu berücksichtigen. Dies ist für einen Praktiker in der Regel sehr aufwendig und sicher auch nicht in allen Fällen möglich. Die aufgeführten Einflußgrößen sollen einerseits zeigen, daß die Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen keine starre Größe darstellt, sondern die Abhängigkeit bei genauer Kenntnis unter Umständen je nach Anwendungszweck bei optimalem Einsatz ausgenutzt werden kann, sei es zu wirtschaftlichen oder technischen Vorteilen. Andererseits ist es sicher außerordentlich schwer, wenn nicht sogar unmöglich, durch eine oder auch mehrere punktuelle Messungen der «Betriebswärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes» auf die Quali-

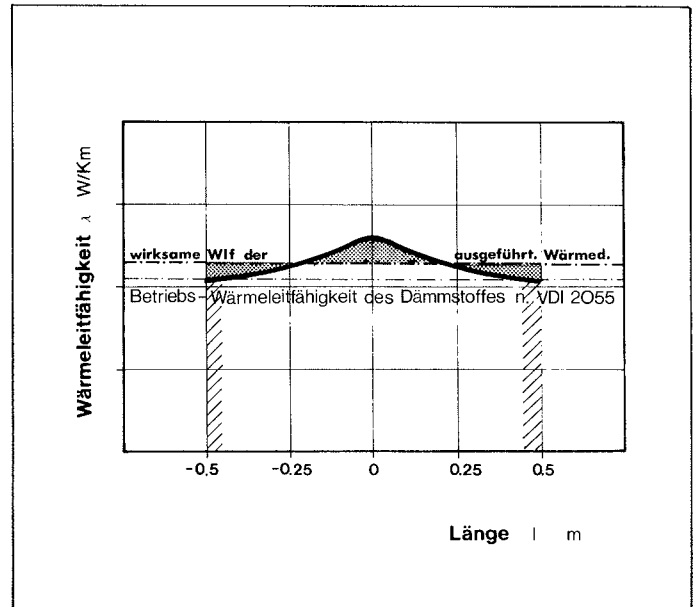


Bild 17: Verlauf der ortsabhängigen scheinbaren Wärmeleitfähigkeit in axialer Richtung einer ausgeführten Wärmedämmung mit Abstandshalter.

tät der ausgeführten Dämmung zu schließen, zumal die Dämmfirma hierauf nur einen geringen Einfluß hat. Möchte der Kunde die Qualität des Dämmstoffes überprüfen lassen, so kann er dies genauer und preiswerter durch die Laboratoriumsuntersuchungen tun. Die Qualität der ausgeführten Dämmung läßt sich jedoch nur durch Ermittlung von Wärmeverlust und Temperatur an großflächigen Bereichen oder bei Rohrleitungen über einen repräsentativen Bereich längs der Leitung bestimmen. Dies kann für die Ermittlung des Wärmestromes mit Hilfe von kleinen etwas unempfindlichen Wärmestrommessern oder auch den empfindlichen Wärmestrommesser nach E. Schmidt bei entsprechenden Vorkehrungen geschehen. Hierbei werden die erhöhten Wärmeverluste bei nicht fachgerecht ausgeführten Stößen genauso erfaßt, wie zu hoch leitende Abstandshalter oder Stirnscheiben etc. (Bild 17), wobei vorher abzuklären ist, inwieweit die ausführende Firma hierfür Gewährleistungen übernommen hat.

Der Mittelwert entspricht der wirksamen Wärmeleitfähigkeit der ausgeführten Wärmedämmung und liegt höher als die Betriebswärmeleitfähigkeit nach VDI 2055 Abschnitt 5.1.2.2. Wärmebrücken (Abstandshalter etc.) werden nach den VDI-Richtlinien als additiver Zuschlag auf die Betriebswärmeleitfähigkeit λ_D berücksichtigt, z. B. für keramische Stützen ist $\Delta \lambda_D = 0,003 \text{ W/(mK)}$. Die zusätzlichen Verluste über die Wärmebrücken sind jedoch nicht unabhängig von der Wärmeableitung der Abdeckbleche und den herrschenden Übergangsverhältnissen: Nachstehendes Beispiel einer Messung der «Betriebswärmeleitfähigkeit» soll die Gegebenheiten nochmals verdeutlichen.

Gemessen wurde an einer Frischdampfleitung mit 278 mm Durchmesser mit 508°C Betriebstemperatur, wärmege-dämmt mit 3 Lagen Mineralfasermatte mit einer Gesamtdämmschichtdicke von 270 mm.

Die Blechabdeckung war ein 1 mm dickes verzinktes Stahlblech, die Abstandshalter waren keramische Stützen. Die Außentemperatur betrug ca. 44°C.

Im Bild 18 sind die Wärmeverluste (Wärmestromdichte) längs der Leitung (axiale Richtung), und zwar jeweils seitlich, oberhalb und unterhalb der Leitung dargestellt. Die örtliche Wärmestromdichte wurde mit dem Wärmestrommesser nach E. Schmidt in jeweils 125 mm Abstand ermittelt.

Die Auswertung mit dem gemessenen Temperaturprofil ergibt für die mittlere Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung einen Wert von 0,097 W/mK.

Bezogen auf den Laboratoriumswert der Wärmeleitfähigkeit

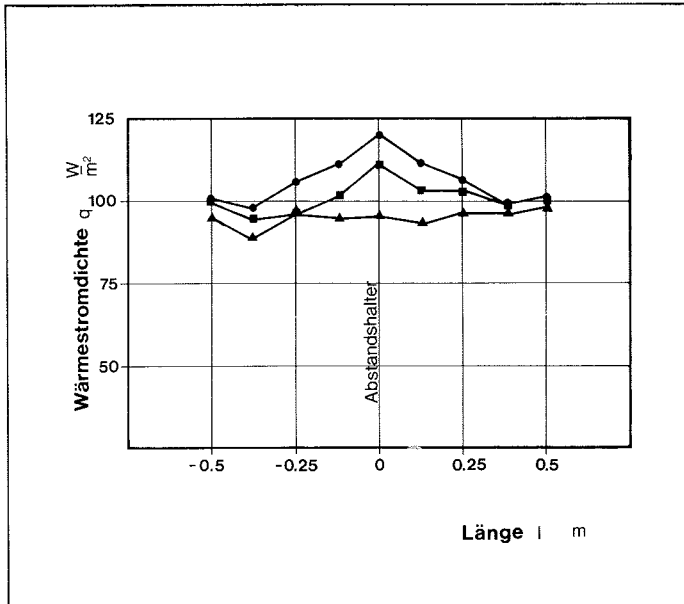


Bild 18: Wärmeverlust längs einer Frischdampfleitung \varnothing 278 mm mit 508°C Betriebstemperatur, wärmegeädämmt mit 270 mm, 3-lagig aufgebracht Mineralfasermatte. Die Werte ergeben sich für einen Übergangskoeffizienten von 5,0 W/m²K und 44°C Außentemperatur

- oberhalb
- seitlich
- ▲ unterhalb

der Leitung.

bei gleicher Dichte des Mineralfaserproduktes entspricht dies einer Erhöhung von ca. 19%. Wie sich weitere ausgewertete Größen, bezogen auf die wirksame Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes gemäß Gleichung (5), darstellen, ist aus der Gegenüberstellung in Tabelle 1 ersichtlich.

Tabelle 1

Wärmeleitfähigkeit			
1	2	3	4
Laborwert über $\vartheta_m = \frac{\vartheta_W + \vartheta_K}{2}$ ermittelt	«Wirksame Wärmeleitfähigkeit» des Dämmstoffes über $\lambda = \frac{1}{\vartheta_W - \vartheta_K} \int \lambda(\vartheta) d\vartheta$ ermittelt	Betriebswärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes nach VDI 2055 Abschnitt 5.1.2.2 ermittelt	Betriebswärmeleitfähigkeit der angeführten Wärmedämmung einschl. Abstandshalter
0,0814	0,0898	0,0897	0,0969
-9,5%*	±0%*	-0,1%*	+7,9%*

*Diese Angaben entsprechen den prozentualen Abweichungen der verschiedenen Wärmeleitfähigkeitswerte bezogen auf die «Wirksame Wärmeleitfähigkeit» des Dämmstoffes gemäß Spalte 2.

Die λ, ϑ -Kurve des verwendeten Mineralfaserdämmstoffes kann durch ein Polynom dritten Grades beschrieben werden.

$$\lambda(\vartheta) = \lambda_0 + a_1 \vartheta + a_2 \vartheta^2 + a_3 \vartheta^3,$$

wobei für λ_0 und die weiteren Koeffizienten a_1 bis a_3 nachstehende Werte für die meßtechnisch ermittelte Kurve (mit* gekennzeichnet) gegeben sind.

$$\lambda_0^* = 0.03225; a_1^* = 1.4338 \cdot 10^{-4}; a_2^* = -7.8326 \cdot 10^{-8}; a_3^* = 7.3803 \cdot 10^{-10}.$$

Berücksichtigt man den Einfluß der endlichen Temperaturdifferenz während der Messung [19], so ergeben sich folgende Koeffizienten:

$$\lambda_0 = 0,032019; a_1 = 1.4927 \cdot 10^{-4}; a_2 = -1.1811 \cdot 10^{-7}; a_3 = 7.7067 \cdot 10^{-10}$$

Die beiden Kurven unterscheiden sich unwesentlich bei niederen Temperaturen; bei ca. 300°C ergeben sich Abweichungen von ca. 2%. Nach dem üblichen Näherungsverfahren über die Mitteltemperatur ergibt sich aus der Meßwertkurve

für das genannte Beispiel bei $\vartheta_m = 276^\circ\text{C}$ für die Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{Labor}} = 0.0814 \text{ W/mK}$. Zur Berechnung der «Wirksamen Wärmeleitfähigkeit» über die Gleichung (5) ist das gegebene Polynom in dem Bereich der wirksamen Temperaturdifferenz zu integrieren.

$$\lambda_{\text{wirksam}} = \frac{1}{\vartheta_W - \vartheta_K} \left[\lambda_0 (\vartheta_W - \vartheta_K) + \frac{a_1}{2} (\vartheta_W^2 - \vartheta_K^2) + \frac{a_2}{3} (\vartheta_W^3 - \vartheta_K^3) + \frac{a_3}{4} (\vartheta_W^4 - \vartheta_K^4) \right]$$

Für die gegebenen Temperaturen $\vartheta_W = 508^\circ\text{C}$ und $\vartheta_K = 44^\circ\text{C}$ ergibt sich somit eine «Wirksame Wärmeleitfähigkeit» $\lambda_{\text{wirksam}} = 0.0898 \text{ W/mK}$.

Wie aus Tabelle 1 ersichtlich, ist die auf diese Weise berechnete «Wirksame Wärmeleitfähigkeit» praktisch identisch mit der Betriebswärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes mit dem Verfahren nach VDI 2055 Abschnitt 5.1.2.2.a) ermittelt. Bezogen auf den Wert nach dem Näherungsverfahren bestimmt, ergibt sich jedoch ein Unterschied von ca. 10%.

Die ausgeführte Wärmedämmung wurde augenscheinlich beurteilt. Sie war sorgfältig ohne jegliche Fugen, Spalten oder wesentliche Hohlräume aufgebracht.

Das Beispiel zeigt, daß die Betriebswärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes nach VDI 2055 Abschnitt 5.1.2.2 unter Berücksichtigung der wesentlichen Einflüsse (Rohdichte und Temperaturabhängigkeit) exakt bestimmt werden kann. (Abweichung -0,1%). Es zeigt weiter, daß bei sorgfältig aufgetragenen Matten keine zusätzlichen Verluste zu erwarten sind. Das Beispiel verdeutlicht aber auch, daß die Zuschläge für Abstandshalter nach VDI 2055 die tatsächlichen Gegebenheiten nicht unbedingt abdecken. ($\Delta\lambda \approx 0.007 \text{ W/mK}$ anstatt 0.003 W/mK).

Die Verdichtung durch die Krümmung bleibt bei verwendeter Fasermatte mit ca. 100 kg/m^3 Rohdichte und bei gegebenem Temperaturbereich ohne Einfluß, da sich die Verminderung der Wärmeleitfähigkeit im höheren Temperaturbereich weitgehend kompensiert (siehe Bild 12).

Schlußfolgerung

- Die Betriebswärmeleitfähigkeit eines Dämmstoffes zur Wärmedämmung von betriebstechnischen Anlagen kann für die Berechnung des Wärmeschutzes nicht als pauschale Größe oder Kurve zugrunde gelegt werden. Temperatur und Rohdichte etc. haben insbesondere bei Faserdämmstoffen einen entscheidenden Einfluß auf die wirksame Wärmeleitfähigkeit im Betrieb.

Sie läßt sich praktisch aus der Laborwärmeleitfähigkeit, ermittelt nach dem Plattenverfahren gemäß DIN 52612, bestimmen. Außer der ortsabhängigen, auf Konvektion zurückzuführende Beeinflussung, lassen sich alle sonstigen Einflußgrößen bei bekannter funktioneller Abhängigkeit abschätzen und somit die «Leitfähigkeit im Betrieb» berechnen. Als nicht unwesentlicher Unsicherheitsfaktor bleibt dabei nur noch der Einfluß der Qualitätsschwankungen der Produkte über. Für Wärmedämmungen in Kernkraftwerken werden deshalb schon in den Spezifikationen Überprüfungen der Wärmeleitfähigkeit aus den entsprechenden Fertigungen (z.B. zu Beginn, während und am Ende der Fertigung) gefordert. Dies sind zwar recht hohe Forderungen, die jedoch unter Umständen bei hohen Fertigungsschwankungen (siehe Bild 14) und gegebenem Auftragsvolumen aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten wahrscheinlich auch vertretbar sind. Diese Praxis kann aber nicht auf andere Anwendungsbereiche übertragen werden. Es erscheint vielmehr als sinnvoll, wenn die Hersteller von Dämmstoffen für den industriellen Einsatz Werte für

die Wärmeleitfähigkeit angeben, die dem tatsächlichen Querschnitt der Fertigung, abgesichert durch statistisch bestimmte Bereiche entsprechen. Eine Qualitätssicherung gemäß den einschlägigen Richtlinien (z.B. VDI 2055) ermöglicht eine laufende Überprüfung und somit auch eine Bestätigung der angegebenen und garantierten Werte.

- Die «Betriebswärmeleitfähigkeit der ausgeführten Wärmedämmung» läßt sich somit weitgehend bei bekannter Beeinflussung der standardisierten Abstandshalter etc. angeben. Für spezielle Ausführungen und Konstruktionen können heute mit den allgemein anerkannten numerischen Berechnungsverfahren (z.B. FD-Methode) die erhöhten Wärmeverluste, in der Regel vorher, bestimmt werden, so daß nun ein weiteres bisher unbekanntes Glied aus der Vielfalt der beeinflussenden Größen verschwinden kann.
- Bleibt nur noch ein Hinweis an die Hersteller betriebstechnischer Anlagen oder auch an die Lieferanten von betriebstechnischen oder konstruktiven Elementen, sei es zur Befestigung von Dämmstoffen oder auch sonstiger Bauelemente (Rohrleitungsaufhängungen etc.), daß sie neben den Eigenschaften bezüglich ihres hauptsächlichen Anwendungsbereiches (z.B. Festigkeitswerte) auch konkrete Angaben über Wärmeverluste oder entsprechend äquivalenten Größen ihrer Bauelemente oder Konstruktionsteile angeben.
- Unter Berücksichtigung aller beeinflussenden Größen müßte es dann auch gelingen, für betriebstechnische Anlagen oder Anlagenteile verlässliche Gesamt-Wärmeverluste anzugeben, die auch einer Überprüfung entsprechend VDI 2055 Abschnitt 5.1.2.2c) «Betriebswärmedurchgangskoeffizient» stand halten. Ist dies nicht der Fall, so erhebt sich die Frage des Verschuldens, wobei entweder die Wärmebrücken nicht ausreichend erfaßt worden sein können oder die ausgeführte Wärmedämmung weist höhere Wärmeverluste auf als garantiert wurden. Eine Überprüfung der Betriebswärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes gemäß Abschnitt 5.1.2.2a) kann deshalb erst in zweiter Linie von Interesse sein, nämlich dann, wenn sich die Frage nach Einhaltung der garantierten Werte für die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes stellt. Die richtige Berechnung der wirksamen Wärmeleitfähigkeit (Betriebswärmeleitfähigkeit) wird dabei als selbstverständlich vorausgesetzt.

Literaturverzeichnis

- [1] Cammerer, W.F.: Garantiefragen im Wärmeschutz «Allgemeine Wärmetechnik» Band 9 (1960), Heft 13, S. 273–279.
- [2] Cammerer, W.F.: Über die Garantie einer mittleren Gesamtwärmeverlustzahl der Isolierung von Dampfleitungen, «Brennstoff-Wärme-Kraft» (BWK) Band 13 (1967) Nr. 3, S. 118–120, mit Stellungnahme von K. Kuhn sowie Erwiderung von W.F. Cammerer.
- [3] Cammerer, W.F., Achtziger, J.: Wärmeschutztechnische Garantien bei Kesselmauerungen «Mitteilungen der Vereinigung der Großkesselbesitzer» Heft 72, S. 180–191.
- [4] VDI – 2055: Wärme- und Kälteschutz für betriebs- und haustechnische Anlagen, Ausgabe März 1982.
- [5] HeizAnIV: Verordnung über energiesparende Anforderungen an heiztechnischen Anlagen und Brauchwasseranlagen (Heizungsanlagen-Verordnung).
- [6] AGI-Arbeitsblätter: Arbeitsgemeinschaft Industriebau e.V. (AGI).
- [7] Zeitler, M.: Berechnungsverfahren zur Bestimmung des Wärmeschutzes von verschiedenen Verlegesystemen erdverlegter Rohrleitungen «Fernwärme International» (1980) Heft 3, S. 170–179.
- [8] Schulz, H.B.: Zur Berechnung der Wärmeverluste von Behältern, «Brennstoff-Wärme-Kraft» (BWK) Band 14 (1962) Nr. 2, S. 56–60.
- [9] VDI-Wärmeatlas: Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, VDI-Verlag.
- [10] Cammerer, W.F.: Der Einfluß der Feuchtigkeit auf die Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Isolierstoffen nach dem gegenwärtigen Stand der Forschung, «Kälteschutz» Band 13 (1961) S. 413–420.
- [11] Achtziger, J.: Messung der Wärmeleitfähigkeit von Schaumkunststoffen mit beliebigem Feuchtigkeitsgehalt «Kunststoffe im Bau», Themaheft 23.
- [12] Zehendner, H.: Einfluß von Feuchtigkeit auf die Wärmeleitfähigkeit von Schaumkunststoffen im Bereich von -30 bis $+30^{\circ}\text{C}$, «Kunststoffe im Bau», Heft 1/1979.
- [13] Zehendner, H.: Wärmeleitfähigkeit von Schaumkunststoffen mit hochmolekularen Zellgasen, Sonderdruck der Bauphysik 5, (1983) Heft 5, S. 169–171.
- [14] Cammerer, W.F.: Thermal Conductivity as a function of the thickness of insulating materials.
- [15] Cammerer, W.F.: Der Konvektionseinfluß auf die Wärmeleitfähigkeit von Wandisolierungen aus Mineralfasern, «Allgemeine Wärmetechnik», Band 11 (1962) S. 55–101.
- [16] Raisch, E.: Wärmeverluste durch Stützringe für Blechmäntel, Mitteilungen aus dem Forschungsheim für Wärmeschutz e.V., München, Heft 9 (1955) S. 29–38.
- [17] Cammerer, W.F.: Die Bedeutung der Wärmeleitfähigkeit in der Wärme- und Kaltschutztechnik, «Die Isolation», Nr. 4–9 (1965).
- [18] Zehendner, H.: Verhalten von Mineralfaser-Dämmstoffen bei höheren Temperaturen «Isolierung», Heft 2, (1980).
- [19] Cammerer, W.F.: Genauigkeit und allgemeine Gültigkeit experimentell bestimmter Wärmeleitfähigkeiten «Allgemeine Wärmetechnik», (1953) Heft 10, S. 209–214.

