

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 14

Die Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen bei höheren Temperaturen

von

Dipl.-Ing. (FH) M. Zeitler

Die Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen bei höheren Temperaturen

Von Dipl.-Ing. (FH) M. Zeitler

Die Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen ist insbesondere von der Temperatur abhängig. Vereinfacht kann dieser Zusammenhang über die Mitteltemperatur der Dämmung, das ist der arithmetische Mittelwert aus der warmen und kalten Oberflächentemperatur, beschrieben werden. Für stark gekrümmte Wärmeleitfähigkeitskurven oder auch bei hohen, wirksamen Temperaturdifferenzen, führt diese Vereinfachung allerdings zu recht großen Abweichungen zur tatsächlich wirksamen Wärmeleitfähigkeit. Je nach Meßverfahren, ob Platten-

gerät oder Rohrverfahren, ergeben sich entweder Stoffkennwerte oder Betriebswärmeleitfähigkeitswerte. Dieser Unterschied ist für Berechnungen des Wärmeschutzes nicht unbedeutend und deshalb entsprechend zu berücksichtigen. Wird der Wärmeschutz mit Hilfe von numerischen Rechenmethoden berechnet, lassen sich nur Stoffkennwertkurven heranziehen. Die höheren Werte einer Betriebswärmeleitfähigkeit ergeben sich über die Ermittlung der wirksamen Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes.

Die Wärmeübertragung in Wärmedämmstoffen erfolgt durch verschiedene Übertragungsarten. Je nach Beschaffenheit, Struktur und Zusammensetzung sind unterschiedliche Wärmeübertragungsarten mehr oder weniger wirksam oder sind gänzlich außer Kraft gesetzt. Die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes wird deshalb in der Regel eine äquivalente Größe darstellen. Die einzelnen Komponenten der Wärmeübertragung wirken jeweils als Summanden, wobei jeder Term der Beziehung (1) eine Funktion verschiedener Einflußgrößen sein kann.

Ziel bei der Herstellung des Dämmstoffes wird es deshalb unter anderem sein, die einzelnen Anteile der Wärmeübertragung auf ein Minimum zu reduzieren, selbstverständlich unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit.

Verwendete Formelzeichen

A	Fläche	m ²
Q	Wärmestrom	W
T	Temperatur absolut	°K
d	Durchmesser	m
l	Länge	m
s	Dicke	m
p	Druck	Pa
θ	Temperatur	°C
Δθ	Temperaturdifferenz	K
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante	5.67032 · 10 ⁻⁸ W/(K ⁴ m ²)

ε	Emissionskoeffizient	
Ξ	Längenspezifischer Strömungswiderstand	Ns/m ⁴
Λ	Wärmedurchlaßkoeffizient	W/(m ² K)
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(mK)
ρ	Rohdichte	kg/m ³
ψ	Porosität (Anteil des Gasvolumens, bezogen auf das Gesamtvolumen)	

Indizes

F	Feststoff
G	Gas (z. B. Luft)
K	Konvektion
R	Strahlung
L	Luftschicht
M	Meßwert
a	außen (Kaltseite)
i	innen (Warmseite)
w	warm
k	kalt
m	mittel
u _v	volumenbezogene Feuchte
WD	Wärmedämmung

(1)

$$\lambda_{WD} = \lambda_F(T, \rho_F) + \lambda_G(T, \rho, s_L) + \lambda_R(T, \epsilon_{W/K}, s, s_L, \phi_{WD}) + \lambda_K(\Delta\vartheta, T, \epsilon) + \lambda_{UV}$$

Das Qualitätsmerkmal „Wärmeleitfähigkeit“ hängt also, abgesehen von der Einflußgröße „Temperatur“ und dem Anteil der Wärmeübertragung durch Feuchte-transport, λ_{UV} vom Verfahren des Dämmstoffherstellers ab. Meß-technisch untersucht werden kann jedoch im Prinzip nur der gefertigte Dämmstoff als Ganzes, also die äquivalente Wärmeleitfähigkeit. Zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Dämm- und Baustoffen stehen im wesentlichen zwei genormte Meßverfahren zur Verfügung. Sie sind mit der DIN 52 612 „Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät“ und der DIN 52 613 „Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit nach dem Rohrverfahren“ genormt.

Auf dem Gebiet der internationalen Normung sind diese Verfahren mit den Normen DP 8302 „Guarded hot plate apparatus“ und DP 8497 „Pipe insulation apparatus“ im Entwurfsstadium festgeschrieben.

Das Meßverfahren nach dem Wärmestrommesser-Prinzip (DIN 52 616 „Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Wärmestrommeßplattengerät“) ist für die Überlegungen im Rahmen dieser Arbeit ohne Bedeutung. Es soll trotzdem erwähnt sein, da es sich um eine durchaus geeignete Einrichtung handelt, um im Bereich der Raumtemperatur Untersuchungen mit relativ geringem Aufwand durchzuführen. Die Verfahren nach der Heißdraht-Methode (DIN 51 046 „Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit bei Temperaturen bis 600 °C nach dem Heißdraht-Verfahren“) sind in der Regel für Dämmstoffe ungeeignet und für Baustoffe je nach Porosität nur bedingt brauchbar.

Physikalische Grundlagen

Grundlage für die Meßverfahren stellen die einschlägigen Gleichungen für die Wärmeübertragung dar, und zwar für das Zweiplattenverfahren:

$$Q = \frac{\Delta\vartheta}{s} \cdot \lambda \cdot 2A \quad W \quad (2) \text{ und}$$

für das Rohrverfahren:

$$Q = \frac{\Delta\vartheta}{\ln \frac{d_a}{d_i}} 2\pi \lambda \cdot l \quad W \quad (3)$$

Die Meßapparaturen müssen so bemessen und konzipiert sein, daß die genannten Gleichungen uneingeschränkt Gültigkeit haben. Beim Zweiplattengerät ist deshalb dafür Sorge zu tragen, daß die gesamte Wärme durch den zu messenden Probekörper strömt und daß beim Rohrverfahren die Wärmeverluste über die Stirnseiten vermieden oder entsprechend berücksichtigt werden. Dies geschieht entweder durch Heizringe oder Schutzheizungen bzw. durch Korrekturen (nach v. Rinsum) beim Rohrverfahren.

Bekannte systematische Fehler sind zu berücksichtigen und zufällige Fehler weitgehendst auszuschließen oder zu vermeiden. Sieht man von dem physikalischen Effekt des Dickeneinflusses bei strahlungsdurchlässigen Dämmstoffen ab, so sind die verschiedenen Anteile an der Wärmeübertragung durch die Beschaffenheit, Struktur und Zusammensetzung des Dämmstoffproduktes festgelegt; das Qualitätsmerkmal „äquivalente Wärmeleitfähigkeit“ kann also durch eine Messung in Abhängigkeit von der Temperatur (λ, ϑ -Kurve) eindeutig bestimmt werden.

Sie wird der, für die Wärmeübertragung wirksamen Temperaturdifferenz, im gegebenen Temperaturbereich zugeordnet.

(4)

$$\lambda = \frac{1}{\vartheta_w - \vartheta_k} \int_{\vartheta_k}^{\vartheta_w} \lambda(\vartheta) d\vartheta$$

Für kleine Temperaturdifferenzen z. B. beim Wärmeschutz im Hochbau oder bei linearer Abhängigkeit von Wärmeleitfähigkeit und Temperatur entspricht

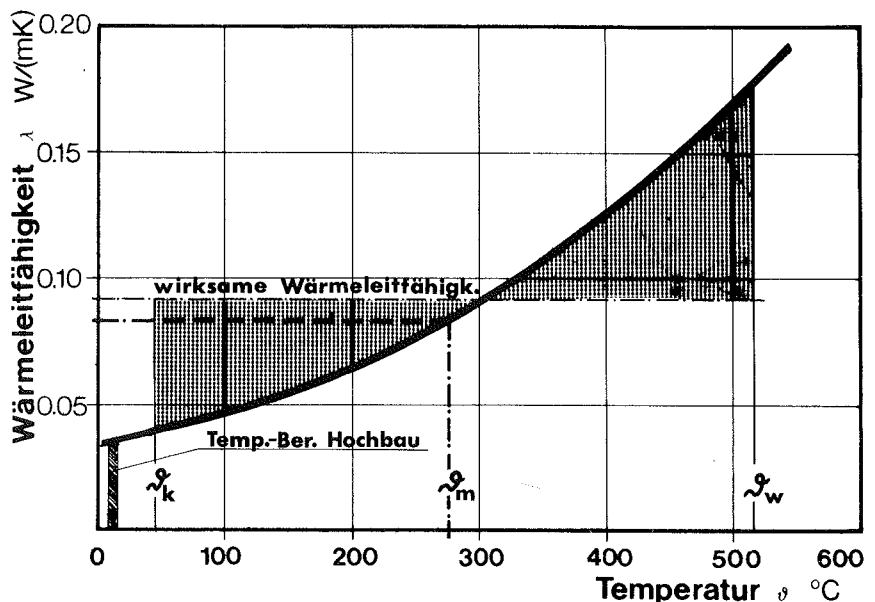


Bild 1: Die wirksame Wärmeleitfähigkeit ergibt sich als das geometrische Mittel für den Bereich der wirksamen Temperaturdifferenz ($\vartheta_w - \vartheta_k$).

der Wert der Wärmeleitfähigkeit beim arithmetischen Mittelwert ϑ_m aus den Temperaturen der begrenzenden Oberflächen (Warm- und Kaltseite) auch dem des geometrischen Mittel unter der Kurve (Bild 2).

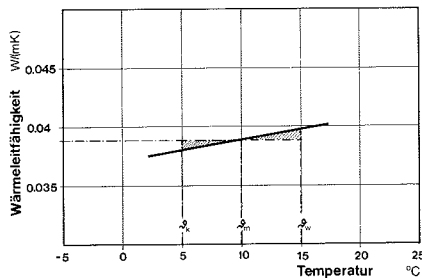


Bild 2: Bei linearer Abhängigkeit ergibt sich die Wärmeleitfähigkeit über das arithmetische Mittel aus Warm- und Kaltseite $\vartheta_m = 0,5 (\vartheta_w + \vartheta_k)$.

Dieses Bestimmungsverfahren eignet sich auch näherungsweise bei λ , ϑ -Charakteristiken mit geringer Temperaturabhängigkeit [1].

Bei Dämmstoffen für den Wärmeschutz industrieller oder betriebstechnischer Anlagen ist der Einfluß der Temperatur in der Regel nicht zu vernachlässigen. Er ist vor allem abhängig von dem Anteil der Wärmeübertragung durch

- In Luftschichten läßt sich der Anteil der Strahlung an der Wärmeübertragung durch das Stefan-Boltzmannsche-Gesetz beschreiben

$$\Lambda_R = \frac{\sigma}{\frac{1}{\epsilon_w} + \frac{1}{\epsilon_k} - 1} \cdot \frac{(T_w^4 - T_k^4)}{\Delta \vartheta} \quad \text{W}/(\text{m}^2\text{K}) \quad (5 \text{ a})$$

und näherungsweise gilt

$$\Lambda_R = \frac{4\sigma}{\frac{1}{\epsilon_w} + \frac{1}{\epsilon_k} - 1} \cdot T_m^3 \quad \text{W}/(\text{m}^2\text{K}) \quad (5 \text{ b})$$

wobei sich die Größe λ_R aus

$$\lambda_R = \Lambda_R \cdot s_L \quad \text{W}/(\text{mK}) \quad (6)$$

bestimmt werden kann.

Strahlung sowie der Temperaturabhängigkeit der Luftwärmeleitfähigkeit; auch die Wärmeleitfähigkeit des Feststoffes ist von der Temperatur nicht unabhängig.

Aus den Beziehungen (5 b und 6) ist ersichtlich, daß die Wärmeübertragung durch Strahlung von der Temperaturdifferenz unabhängig und nur von der Emission der im Strahlungsaustausch stehenden Oberflächen sowie der Dicke s_L der Luftschicht beeinflusst wird. Die absolute Temperatur dagegen geht mit der dritten Potenz in die Beziehung ein. Bei den Dämmstoffen werden diese

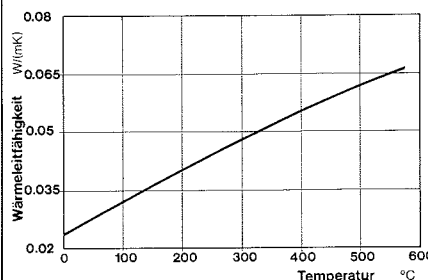


Bild 3: Die Wärmeleitfähigkeit der Lufttemperatur bei einem Luftdruck von 1 bar kann in dem vorgegebenen Temperaturbereich als Polynom zweiten Grades beschrieben werden.

$$\lambda_L = 0,0243 + 7,8421 \cdot 10^{-5} \vartheta - 2,0755 \cdot 10^{-8} \vartheta^2.$$

Abhängigkeiten, wenn auch je nach Beschaffenheit, Struktur, Zusammensetzung und Rohdichte vermindert, wiederzufinden sein.

- Die Wärmeleitfähigkeit des Gases, also der Luft, für die vorkommenden Dämmstoffe ist für die gegebenen Temperaturbereiche ausreichend bekannt und im Prinzip druckunabhängig. Erst wenn die freie Weglänge des Luftmoleküls größer wird als der Abstand der Begrenzungsflächen – und dies geschieht bei abnehmendem Druck –, wird die Wärmeleitung im Gas beeinflusst [2] und [3]. Im atmosphären Druckbereich läßt sich die Wärmeleitfähigkeit der Luft als ein Polynom zweiten Grades beschreiben.

- Die Wärmeleitung über dem Feststoff eines Dämmstoffes ist für große Temperaturbereiche von der Temperatur als linear abhängig anzusehen.

Aus vorgenannten Gründen liegt es deshalb nahe, die Temperaturabhängigkeit der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit durch Polynome dritten Grades zu beschreiben. Umfangreiche Untersuchungen im FIW ¹⁾ an unterschiedlichsten Dämmstoffen haben dies auch bestätigt.

Meßverfahren

- Beim Zweiplattenverfahren [4] kann die Wärmeleitfähigkeit an zwei quadratischen Probepplatten mit Hilfe einer elektrisch zu beheizenden Platte und den entsprechenden Temperaturen an den Probenoberflächen ermittelt werden. Grundlage für die Bestimmung stellt die Beziehung (2) bei bekannter Dicke der Probepplatten und gegebenen Heizplattengröße dar.

Ein Heizring, welcher mit geeigneten Regeleinrichtungen auf die gleiche Temperatur wie die Heiz-

¹⁾ Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V.

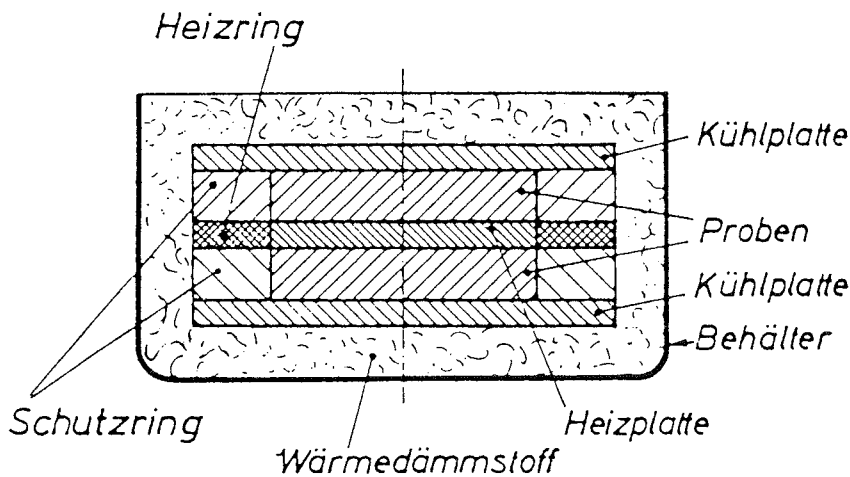


Bild 4: Schematische Darstellung des Zweiplattengerätes.

platte geregelt wird, sorgt für minimalen seitlichen Fehlerwärmestrom.

Da in der Meßpraxis jedoch immer eine endliche Heizringverstellung gegeben sein wird, ist der Fehlerwärmestrom zu berücksichtigen [5] und [6], und die Meßwerte sind entsprechend zu korrigieren. Eine hohe Temperaturdifferenz an der zu messenden Probe wirkt sich zur Minimierung dieses Fehlerwärmestromes positiv aus. Aus diesem Grund bleibt bei dem nach Poensgen benannten und bis heute überlieferten Meßverfahren die Kühlplatte unregelt, so daß sich die Temperaturdifferenz mit steigender Mitteltemperatur erhöht.

Die Temperatur an der metallischen Kaltseitenplatte stellt sich

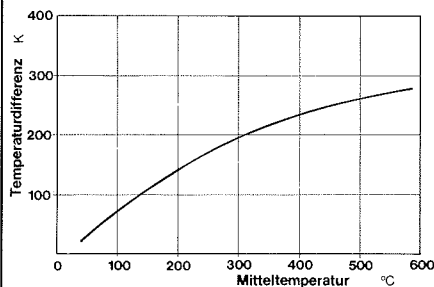


Bild 5: Temperaturdifferenz an der Probe bei dem Verfahren zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit bei höheren Temperaturen nach der klassischen Methode.

entsprechend der Wärmedurchlaßwiderstände von Proben und Wärmedämmung des Plattengerätes im Meßapparat für die gegebenen Heizleistungen ein.

Der Nachteil dieses Verfahrens liegt jedoch – insbesondere bei Materialien, welche eine stark gekrümmte λ, ϑ -Charakteristik aufweisen – auf der Hand.

Der Meßwert, also die wirksame Wärmeleitfähigkeit bei gegebener Temperaturdifferenz (Bild 1) im

Auswertverfahren

Zur Berücksichtigung des Einflusses der endlichen Temperaturdifferenz während der Messung auf

Plattengerät, wird dem arithmetischen Mittel aus der Warm- und Kaltseitentemperatur zugeordnet [7]. Die Folge ist, daß die Meßwertkurve nicht unabhängig von der Temperaturdifferenz ist und somit indirekt auch nicht unabhängig von der Dicke sein kann und von der eigentlichen Stoffkenngröße „Wärmeleitfähigkeit“ abweichen muß. Diese Abweichung wird um so größer, je höher die anliegende Temperaturdifferenz an der Probe während der Messung ist.

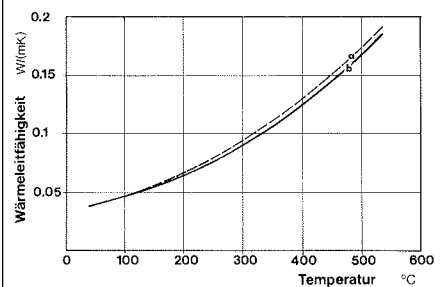


Bild 6: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur

a) bei endlicher und zunehmender Temperaturdifferenz der zunehmenden Mitteltemperatur in der Probe zugeordnet; b) als Stoffkennwert unabhängig von der Temperaturdifferenz.

die λ, ϑ -Charakteristik erfolgt die Auswertung der Meßwerte bei endlicher Temperaturdifferenz gemäß folgendem Ansatz.

$$\lambda(\vartheta_w, \vartheta_k) = \frac{1}{\vartheta_w - \vartheta_k} \int_{\vartheta_k}^{\vartheta_w} \lambda(\vartheta) d\vartheta \quad (7)$$

Wird in die Beziehung (7) für die Funktion $\lambda(\vartheta)$ ein Polynom

$$\lambda(\vartheta) = \sum_{j=0}^m a_j \vartheta^j \quad (8)$$

mit dem Koeffizienten a_j eingesetzt und für $\lambda(\vartheta_k, \vartheta_w)$ die Meßwerte λ mit $i = 1, n$ benützt, so erhält man (Gleichung 9)

$$\frac{1}{\vartheta_w^i - \vartheta_k^i} \int_{\vartheta_k^i}^{\vartheta_w^i} \sum_{j=0}^m a_j \cdot \vartheta^j d\vartheta = \lambda_M^i \quad (9)$$

Zur Bestimmung der unbekanntenen Polynomkoeffizienten a_j wird

$$A_{ij} = \frac{1}{\vartheta_w^i - \vartheta_k^i} \int_{\vartheta_k^i}^{\vartheta_w^i} \vartheta^j d\vartheta$$

$$= \frac{1}{\vartheta_w^i - \vartheta_k^i} \frac{1}{(j+1)} \left((\vartheta_w^i)^{j+1} - (\vartheta_k^i)^{j+1} \right) \quad (10)$$

für $i = 1, n$ und $j = 0, m$ eingeführt, woraus sich ein lineares Gleichungssystem ergibt:

$$\sum_{j=0}^m A_{ij} \cdot a_j = \lambda_M^i \quad \text{für } i = 1, n \quad (11)$$

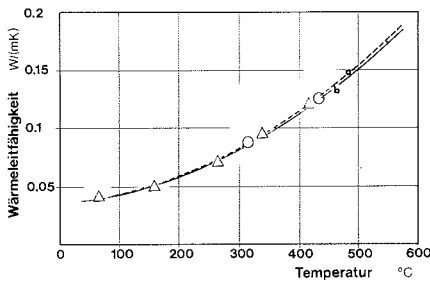


Bild 7: Wärmeleitfähigkeit als Stoffkennwertkurve über die klassische Methode und vorgenannten Auswertverfahren ermittelt (durchgezogene Linie)

- a) Meßwerte bei kleiner Temperaturdifferenz;
- b) Meßwerte bei hoher Temperaturdifferenz.

Für die mindestens vier vorliegenden Meßwerte λ_M läßt sich nun mit den üblichen Algorithmen das Gleichungssystem lösen und die Koeffizienten für das Polynom dritten Grades der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit (Stoffkennwerte) ermitteln. Eine weitere Möglichkeit, die Stoffkennwertkurve zu bestimmen, ohne das vorgenannte Auswertverfahren heranziehen zu müssen,

besteht darin, die Temperaturdifferenz auch mit zunehmender Mitteltemperatur der Probe möglichst klein zu halten. Das Niveau der Mitteltemperatur wird hierbei entweder durch Aufheizen des gesamten Plattengerätes oder Beheizen der Kaltseitenplatte erreicht. Bei diesem Verfahren ist es jedoch notwendig, den möglichen Fehlerwärmeströmen, insbesondere bei höheren Temperaturen, größte Aufmerksamkeit zu widmen.

Daß beide Verfahren zum gewünschten Erfolg führen, zeigt das Beispiel Bild 7.

In dem Diagramm sind zu der λ, ϑ Kurve, ermittelt über die klassische Methode mit dem vorgenannten Auswertverfahren, die Meßwerte bei „kleinen Temperaturdifferenzen“ (ca. 100 K) als Punkte eingezeichnet. Die Wärmeleitfähigkeitskurve dieses Materials läßt sich durch folgendes

$$\lambda(\vartheta) = a_0 + a_1 \vartheta + a_2 \vartheta^2 + a_3 \vartheta^3$$

$$a_0 = 0,0352; \quad a_1 = 8,83956 \cdot 10^{-5}; \quad a_2 = 1,36971 \cdot 10^{-7}; \quad a_3 = 2,92531 \cdot 10^{-10} \quad (12)$$

Polynom beschreiben (Gleichung 12).

• Bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit nach dem Rohrverfahren zu höheren Temperaturen wird aufgrund der hohen anliegenden Temperaturdifferenz an dem Dämmstoff entsprechend den praktischen Gegebenheiten und der Erfassung des Fugeneinflusses bereits die Betriebswärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes im Sinne der VDI-Richtlinie 2055 [8] ermittelt. Die Betriebswärmeleitfähigkeitskurven weisen für gleiches Material bei gleicher Rohdichte eine stärkere Temperaturabhängigkeit auf als die Plattengerät-Ergebnisse, da die Meßwerte der Wärmeleitfähigkeit dem arithmetischen Mittel aus Warm- und Kaltseitentemperatur zugeordnet sind.

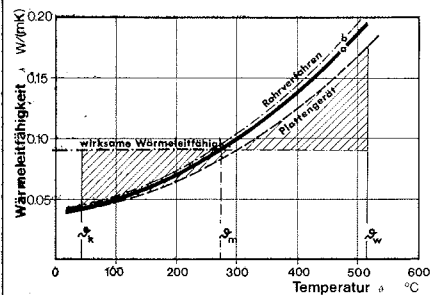


Bild 8: Gegenüberstellung von λ, ϑ -Kurven eines Dämmstoffes gleicher Rohdichte, mit dem Rohrverfahren bzw. Plattengerät ermittelt.

- a) λ, ϑ -Kurve ohne Einfluß der Fugen;
- b) λ, ϑ -Kurve mit Einfluß der Fugen (Meßkurve).

Wird die „wirksame“ Wärmeleitfähigkeit aus der Stoffkennwertkurve für dieselben gegebenen Temperaturdifferenzen ermittelt, ergeben sich die gleichen Werte, wie die an der Kurve a) (Bild 8), also ohne Einfluß der Fugen.

Schlußbemerkung

Für den Anwender der Dämmstoffe zur Wärmedämmung industrieller und betriebstechnischer Anlagen sind abschließend noch einige Hinweise gestattet.

- Ausgehend vom **Stoffkennwert** des Dämmstoffes, λ , ϑ -Kurve mit dem Plattengerät ermittelt, läßt sich mit Hilfe der angegebenen Polynomkoeffizienten die „wirksame“ **Wärmeleitfähigkeit** als Funktion der anliegenden Temperaturdifferenz im gegebenen Temperaturbereich über das Integral des Polynoms berechnen (siehe auch Tabelle).

verständlich Voraussetzung – sind bei entsprechender Unterteilung der Dämmschichtdicke nur die Stoffkennwertkurven sinnvoll. Die wirksame Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes ergibt sich automatisch aufgrund der Unterteilung der Dämmschichtdicke durch mehrere Gitterlinien.

- Die λ , ϑ -Kurve, über das Rohrverfahren bestimmt, ist jedoch nur geeignet, um den Wärmeschutz an Rohrleitungen über die „einfache Rohrformel“ [8] nachzuweisen. Für die Berechnung des Wärmeschutzes mit numerischen Rechenverfahren sind die

Erst dadurch ist eine ausreichende Sicherheit bei der Berechnung des Wärmeschutzes betriebstechnischer Anlagen für das vorgesehene Dämmstoff-Produkt gegeben. Den jeweiligen „**Rechenwert**“ dazu stellt dann die ermittelte **abgesicherte Stoffkennwertkurve** für ebene Produkte oder die **abgesicherte Betriebswärmeleitfähigkeitskurve** für Produkte zur Dämmung von Rohrleitungen in den technischen Datenblättern des Dämmstoffherstellers dar, welche z. B. durch eine Fremdüberwachung anerkannter Prüfstellen im Rahmen der VDI-Gütesicherung entsprechend untermauert sein sollten.

(13)

$$\lambda_{\text{wirksam}} = \frac{1}{\vartheta_w - \vartheta_k} \left[a_0 (\vartheta_w - \vartheta_k) + \frac{a_1}{2} (\vartheta_w^2 - \vartheta_k^2) + \frac{a_2}{3} (\vartheta_w^3 - \vartheta_k^3) + \frac{a_3}{4} (\vartheta_w^4 - \vartheta_k^4) \right]$$

Mit einem Zuschlag (z. B. ca. 5 % bis 10 %) für verarbeitungstechnisch bedingte Fugen und Stöße ergibt sich die **Betriebswärmeleitfähigkeit** im Sinne der VDI-Richtlinie 2055. Dieser Zuschlag ist abhängig von der Anzahl der Lagen der auszuführenden Wärmedämmung. Gegebenenfalls kann auf einen derartigen Zuschlag bei einer fachgerecht ausgeführten mehrlagigen Wärmedämmung verzichtet werden. Der Einfluß der Rohdichte-Erhöhung, bedingt durch die Krümmung bei Rohrdämmungen, kann sich positiv auf die Höhe der Betriebswärmeleitfähigkeit auswirken.

- Bei der Berechnung des Wärmeschutzes über das numerische Rechenverfahren – die Möglichkeit, die Wärmeleitfähigkeit temperaturabhängig zu berücksichtigen, ist selbst-

se Werte der Wärmeleitfähigkeit nicht geeignet, da sie eben den Einfluß einer hohen wirksamen Temperaturdifferenz schon beinhalten und zusammen mit dem Einfluß für verarbeitungstechnisch bedingter Fugen und Stöße die Betriebswärmeleitfähigkeitswerte im Sinne der VDI 2055 darstellen. Eine Berechnung über die „wirksame“ Wärmeleitfähigkeit entsprechend (13) erübrigt sich somit. Beide λ , ϑ -Kurven, die Stoffkennwerte sowie die Betriebswärmeleitfähigkeitswerte, stellen jedoch nur einzelne Meßwertkurven dar und gelten nur für das speziell untersuchte Material. Fertigungstechnisch bedingte Qualitätsschwankungen können nur durch entsprechende **statistische Absicherungen der Wärmeleitfähigkeitskurven mehrerer Proben** erfaßt wer-

Literatur

- [1] CAMMERER, W. F.: „Genauigkeit und allgemeine Gültigkeit experimentell bestimmter Wärmeleitzahlen“ „Allgemeine Wärmetechnik“ Heft 10 S. 209–214.
- [2] J. D. VERSCHOOR and Paul GREEBLER, Manville, N. J.: „Heat Transfer by Gas Conduction and Radiation in Fibrous Insulations.“
- [3] KRISCHER, O.; KAST, W.: „Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik.“ 3. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1978.
- [4] DIN 52612: „Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät.“
- [5] ALBRECHT, W.: „Entwicklung und Erprobung eines Plattengeräts zur Messung der Wärmeleitfähigkeit mit geringer Meßunsicherheit.“ „WKSB-Sonderausgabe 1985“
- [6] WOODSIDE W., W. ISON A.: „Unbalance Errors in Guarded Hot Plate Measurements“; Symposium on Thermal Conductivity Measurements and Applications of Thermal Insulation, A.S.T.M. STP 217, 1957, pp. 32–46.
- [7] ZEITLER, M.: „Betriebswärmeleitfähigkeit von Wärmedämmungen industrieller und betriebstechnischer Anlagen.“ „WKSB-Sonderausgabe 1985“.
- [8] VDI-Richtlinie 2055: „Wärme und Kälteschutz für betriebstechnische und haustechnische Anlagen“ (März 1982).

Δk °C	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
Δw °C	λ W/(mK)										
100	0.042	0.042	0.042	0.042	0.043	0.043	0.043	0.044	0.044	0.044	0.044
150	0.045	0.045	0.045	0.046	0.046	0.046	0.046	0.047	0.047	0.047	0.048
200	0.048	0.048	0.049	0.049	0.049	0.050	0.050	0.050	0.051	0.051	0.051
250	0.052	0.052	0.053	0.053	0.053	0.054	0.054	0.054	0.055	0.055	0.056
275	0.054	0.055	0.055	0.055	0.056	0.056	0.056	0.057	0.057	0.057	0.058
300	0.057	0.057	0.057	0.058	0.058	0.058	0.059	0.059	0.059	0.060	0.060
325	0.059	0.059	0.060	0.060	0.060	0.061	0.061	0.062	0.062	0.062	0.063
350	0.062	0.062	0.062	0.063	0.063	0.063	0.064	0.064	0.065	0.065	0.065
375	0.064	0.065	0.065	0.065	0.066	0.066	0.067	0.067	0.067	0.068	0.068
400	0.067	0.068	0.068	0.068	0.069	0.069	0.070	0.070	0.070	0.071	0.071
420	0.070	0.070	0.070	0.071	0.071	0.072	0.072	0.073	0.073	0.073	0.074
440	0.072	0.073	0.073	0.073	0.074	0.074	0.075	0.075	0.076	0.076	0.077
460	0.075	0.075	0.076	0.076	0.077	0.077	0.077	0.078	0.078	0.079	0.079
480	0.078	0.078	0.078	0.079	0.079	0.080	0.080	0.081	0.081	0.082	0.082
500	0.080	0.081	0.081	0.082	0.082	0.083	0.083	0.084	0.084	0.085	0.085
520	0.084	0.084	0.084	0.085	0.085	0.086	0.086	0.087	0.087	0.088	0.088
540	0.087	0.087	0.088	0.088	0.089	0.089	0.090	0.090	0.091	0.091	0.092

