

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 20

**Einfluß der Konvektion  
auf die Wärmeübertragung  
in Dämmkonstruktionen**

von  
Dipl.-Ing. (FH) M. Zeitler und Dipl.-Ing. R. Schreiner

# Einfluß der Konvektion auf die Wärmeübertragung in Dämmkonstruktionen

Beim Wärmeschutz von Dampferzeugern, Rauchgaskanälen und anderen betriebstechnischen Anlagen kann die Konvektion innerhalb der Wärmedämmung einen nicht unerheblichen Einfluß auf die Wärmeübertragung nehmen. Vor allem die Ausführungsart der Dämmkonstruktion bestimmt, inwieweit sich Konvektion ausbilden und sich unter Umständen zum Störfaktor entwickeln kann. Im Rahmen einer Forschungsarbeit\*) wurden Arbeitsdiagramme entwickelt, mit deren Hilfe auf der Basis des längenbezogenen Strömungswiderstandes des Dämmstoffes sich der Einfluß quantitativ abschätzen läßt.

M. Zeitler und R. Schreiner, Gräfelting

## Einleitung

Bei der Berechnung des Wärmeschutzes von betriebstechnischen Anlagen werden in der Regel, basierend auf der VDI-Richtlinie 2055 „Wärme- und Kälteschutz für betriebs- und haustechnische Anlagen“, pauschale Sicherheitsfaktoren für etwaige Stör- und Einflußgrößen bei der Wärmeübertragung in der Wärmedämmung verwendet. Der übliche Zuschlagswert von 10 bis maximal 30% auf die im Laboratorium festgestellte Wärmeleitfähigkeit ist auch für eine Reihe von Anwendungen ausreichend genau und deckt die möglichen Unsicherheiten bei der Verarbeitung ab. Neben den konstruktiven Störeinflüssen tritt vor allem die Konvektion in der Wärmedämmung als schwer erfaßbare Größe auf. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens sollten deshalb Zuschlagsgrößen auf die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von den die Konvektion beeinflussenden Größen ermittelt werden.

## Grundlagen und praktische Gegebenheiten

### Ursachen und Behandlung der Konvektion

#### Konvektion in Fluiden

In bewegten Fluiden überlagern sich grundsätzlich zwei Vorgänge der Wärmeübertragung: die reine (molekulare) Wärmeleitung und der molare Wärmeaustausch durch Mitführung (Konvektion). Je nach den Eigenschaften der Fluide und der Art der Strömung kann der eine oder der andere Vorgang überwiegen; die Wärmeübertragung ist jedoch nicht von der Fluidbewegung zu trennen.

Handelt es sich um Strömungen, die allein durch Temperaturunterschiede und damit Dichteunterschiede des Fluids hervorgerufen werden, so spricht man von *freier Konvektion* im Gegensatz zur „erzwungenen“ Konvektion, die nur durch Druckunterschiede verursacht wird.

Will man nun Versuchsergebnisse dieser Problematik verallgemeinern, so benötigt man spezielle Übertragungsregeln. Diese wurden von *Nusselt* aufgestellt. Man bezeichnet sie als „Gesetze der physikalischen Ähnlichkeit für die Wärmeübertragung“. Beim Aufsuchen dieser Modellgesetze gelangt man zu dimensionslosen Kenngrößen, die bei physikalischer Ähnlichkeit der Modelle den gleichen Zahlenwert besitzen müssen. Der Begriff der hier auftretenden physikalischen Ähnlichkeit erfordert neben der konstanten Proportion der Längen auch eine solche aller übrigen Größen, die das betreffende Problem enthält, z.B. Kräfte, Zeiten, Geschwindigkeiten, Temperaturen usw.

Führt man nun für den Fall der freien Konvektion diese sogenannte Dimensionsanalyse durch, so gelangt man zu den *dimensionslosen Kennzahlen* ( $Nu$ ,  $Pr$ ,  $Gr$ ), welche das physikalische Problem der freien Konvektion beschreiben [1].

Der Wärmeübergang bei freier Konvektion läßt sich dabei durch folgende Beziehung beschreiben:

$$Nu = f(Gr, Pr) \quad (1)$$

Vernachlässigt man die Beschleunigung, so ergibt sich für den Fall der schleichenden Bewegung der Zusammenhang

$$Nu = f(Gr \cdot Pr) = f(Ra) \quad (2)$$

mit der Rayleigh-Zahl

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{l^3 \cdot g \cdot \beta \cdot \Delta\theta \cdot c_p \cdot \rho}{\nu \cdot \lambda_{\text{Fluid}}} \quad (3)$$

Aus dem Fachschrifttum [2] ergibt sich für  $Ra_{\text{krit}} = 1,7 \cdot 10^3$  praktisch der Grenzwert für den Beginn der freien Konvektion in einem vertikalen Spalt,

$$Ra = Y(T_m) \cdot \frac{l^3}{\lambda_{\text{Fluid}}} \cdot \Delta\theta > 1,7 \cdot 10^3 \quad (3a)$$

wobei die temperaturabhängigen Stoffgrößen zu  $Y(T_m)$  zusammengefaßt sind:

$$Y(T_m) = \frac{g \cdot \beta \cdot c_p \cdot \rho}{\nu} \quad (4)$$

Die Mitteltemperatur  $T_m$  berechnet sich gemäß Gl. (4a) aus der Kaltseitentemperatur  $\theta_k$  und der Warmseitentemperatur  $\theta_w$  des Systems:

$$T_m = 273 + \frac{\theta_k + \theta_w}{2} \quad (4a)$$

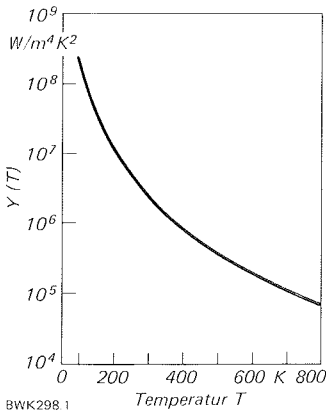
Bild 1 verdeutlicht die Temperaturabhängigkeit der Größe  $Y(T_m)$  Gl. (4), und somit auch der Konvektion. Sie nimmt mit zunehmender Temperatur ab.

#### Konvektion in luftdurchlässigen Stoffen

Es läßt sich zeigen, daß die Nusselt-Zahl auch anders definiert werden kann. Sie stellt das Verhältnis der effektiven Wärmeleitfähigkeit (durch Konvektion erhöht) und der Wärmeleitfähigkeit bei reiner Wärmeleitung und Strahlung dar;

$$Nu = \frac{\lambda_{\text{Leitung, Strahlung u. Konvektion}}}{\lambda_{\text{Leitung, Strahlung}}} = \frac{\lambda_{\text{eff}}}{\lambda_{\text{Leitung, Strahlung}}} \quad (5)$$

\*) Die Forschungsarbeit wurde von der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AIF), Köln, finanziert.



**Bild 1:** Zusammenfassung der temperaturabhängigen Größen zu  $Y(T)$  für Luft bei atmosphärischem Druck

Wendet man die Gl. (5) auf luftdurchlässige Dämmstoffe an, so stellt die Nußelt-Zahl den zur Berechnung des Wärmeschutzes erforderlichen Zuschlagsfaktor dar:

$$\lambda_{\text{eff}} = Nu \cdot \lambda_{\text{Leitung, Strahlung}} \quad (6)$$

Man erhält eine äquivalente Größe (effektive Wärmeleitfähigkeit) für den Dämmstoff, die die erhöhte Wärmeübertragung durch Konvektion enthält.

Auch hier ist die Nußelt-Zahl von einer anderen dimensionslosen Kennzahl abhängig. Als zusätzlicher Parameter und Einflußgröße kommt bei luftdurchlässigen Stoffen der Strömungswiderstand hinzu, da das Feststoffgerüst der Konvektionsbewegung einen Widerstand entgegensetzt.

Die Dimensionsanalyse führt bei der Konvektion in luftdurchlässigen Stoffen zur sogenannten modifizierten Rayleigh-Zahl mit dem Konvektionsbeginn  $Ra^* > 4$  [3],

$$Ra^* = Y(T_m) \cdot \eta \cdot \frac{\Delta\theta \cdot l}{\lambda_{\text{eff}} \cdot E} = Y(T_m) \cdot \frac{K}{\lambda_{\text{eff}}} \cdot \Delta\theta \cdot l > 4 \quad (7)$$

Hierbei bedeutet  $K$  die Permeabilität des Dämmstoffes:

$$K = \frac{\eta}{E} \quad (8)$$

$$Nu = f(Ra^*) \quad (9)$$

Die Gl. (7) läßt, bedingt durch die vielfältigen Einflußgrößen, die Komplexität des Vorgangs „Konvektion in luftdurchlässigen Stoffen“ erahnen. Die Abhängigkeit der Konvektion von diesen verschiedensten Größen soll durch die Gl. (9) beschrieben werden, wobei der funktionelle Zusammenhang gesucht wird. Der Beginn der Konvektion wird dabei durch den Kurvenverlauf angezeigt, nämlich wenn  $Nu$  von dem Wert 1,0 in Werte  $> 1$  übergeht. Hieraus kann dann eine entsprechende Rayleigh-Zahl, genannt kritische Rayleigh-Zahl  $Ra^*_{\text{krit}}$ , abgeleitet werden.

### Einflußgrößen und beeinflussende Größen

#### Einflußgrößen

Will man nun ein reales Dämmsystem wärmetechnisch berechnen, so muß die Frage nach den Größen beantwortet werden, die einen zur Wärmeleitung zusätzlichen Beitrag bei der Wärmeübertragung leisten. Betrachtet werden sollen nur die Systeme, die frei von Wärmebrücken sind. Als Störgrößen verbleiben somit nur die Wärmeübertragung durch Strahlung und Konvektion. Als Medien in einem solchen Dämmsystem kommen nur Luft, die sich z.B. in Spalten befindet, oder der Dämmstoff selbst in Frage. Für die Luftschichten stehen dem Berechnungs-Ingenieur äquivalente Wärmeleitfähigkeiten zur Verfügung, die den Strahlungs- und konvektiven Anteil an der Gesamtwärmeübertragung berücksichtigen [4]. Es verbleiben somit nur noch Strahlung und konvektive Strömungsvorgänge im Dämmmaterial.

Die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes, die zur Berechnung des Wärmeschutzes als Grundlage benötigt wird, ermittelt man üblicherweise im Labor durch das Zweiplattenverfahren nach DIN 52612 im waagrecht Zustand. Kann sich eine globale oder lokale Strahlung in den Mineralfaserdämmstoffen durch Strahlungswärmetransport ausbilden, so ist dieser Anteil bereits in dem Meßwert der Wärmeleitfähigkeit des Mineralfaserdämmstoffes enthalten.

Eine das Forschungsvorhaben begleitende Meßreihe sollte einen eventuell vorhandenen konvektiven Anteil in dem Meßwert der Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes, ermittelt im Zweiplattengerät, zeigen. Es wurden zwei zusätzliche Messungen des gleichen Dämmmaterials im Einplattengerät (DIN 52612) durchgeführt. Um den Einfluß der Gravitation und somit der freien Konvektion zu erfassen, wurde bei der zweiten Messung im Einplattengerät Warm- und Kaltseite vertauscht. Unterscheiden sich jetzt die zwei ermittelten Wärmeleitfähigkeitswerte, so muß der Unterschied auf einen konvektiven Einfluß im Dämmstoff zurückzuführen sein. Die Auswertung ergab keine signifikante Änderung für den Dämmstoff mit einer Rohdichte von  $15 \text{ kg/m}^3$ . Der Meßwert der Wärmeleitfähigkeit kann somit frei von konvektiven Störgrößen angesehen werden. Dies liegt insbesondere daran, daß in der Meßapparatur der Dämmstoff praktisch spaltfrei durch die Heizung und die Kühlplatten abgedeckt wird.

Nur die Gegebenheiten im Dämmsystem der industriellen Anwendung selbst können die Druckverhältnisse so verändern, daß sich eine konvektive Luftbewegung durch die Mineralfaserdämmstoffe einstellt, Bild 2.

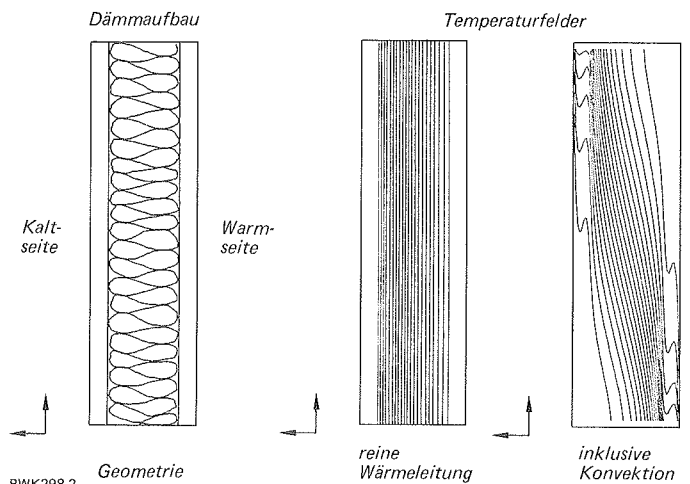
Um den Einfluß der Konvektion für den Wärmeschutz untersuchen zu können, müssen zuerst die Parameter gefunden werden, die eine Wirkung auf die Konvektion ausüben. Betrachtet man die Definitionsgleichung der für die freie Konvektion entscheidenden Rayleigh-Zahl (3), so lassen sich sofort folgende Parameter erkennen, die zunächst nur für einen Luftraum ohne Füllstoffe gelten:

- Mitteltemperatur des Systems,
- Temperaturdifferenz zwischen Warm- und Kaltseite,
- Wärmeleitfähigkeit der Luft,
- Abstand zwischen Warm- und Kaltseite.

Betrachtet man nun einen mit luftdurchlässigem Dämmstoff verfüllten rechteckigen Raum, so ist in diesem System die modifizierte Rayleigh-Zahl (7) gültig.

Die Einflußparameter für Dämmsysteme mit Mineralfaserdämmstoffen sind demnach:

- Mitteltemperatur des Systems,
- Temperaturdifferenz zwischen Warm- und Kaltseite der Dämmung,



**Bild 2:** Darstellung der Temperaturfelder für den gegebenen Dämmaufbau mit Spalt an Warm- und Kaltseite, ohne und mit Konvektion

- Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes nach DIN 52612,
- längenbezogener Strömungswiderstand nach DIN 52213 als stoffspezifischer Wert z.B. eines Mineralfaserdämmstoffes bestimmter Rohdichte.

#### Beeinflussende Größen

Als weitere Randbedingung wirken die Wärmeübergangskoeffizienten an Warm- und Kaltseite. Die Wärmeübergangsvorgänge beeinflussen direkt das Temperaturfeld und den durch das System fließenden Wärmestrom. Vorstudien zeigten, daß die Wärmeübergangskoeffizienten bei verschiedenen Dämmaufbauten das Geschehen innerhalb der Dämmung merklich beeinflussen können. Im Hinblick auf die gegebenen Unsicherheiten bei der Festlegung solcher Randbedingungen in der Praxis und der gewünschten Transparenz des Ergebnisses, wurde für alle im folgenden beschriebenen Überlegungen und Berechnungen der Wärmeübergangskoeffizient an der Dämmung außen (Kaltseite) mit  $8 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  und der innere Wärmeübergangskoeffizient (Warmseite) mit  $1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  zur Vereinfachung festgesetzt.

Handelt es sich um Dämmaufbauten mit Spalte, die das Druckfeld verändern, so ist noch die Dämmschichtdicke als Einflußparameter zu nennen. Je kleiner die Dämmschichtdicke, desto kleiner wird der Widerstand, den die Mineralfaser einer Durchströmung durch das Fluid entgegensetzt.

Zusätzlich findet man eine Beeinflussung der Konvektion durch das Verhältnis der Permeabilitäten (vertikal/horizontal) in  $y/x$ -Richtung  $R_p = K_y/K_x$  aufgrund der Anisotropie der Mineralfaserdämmstoffe und den damit verbundenen unterschiedlichen Strömungswiderständen. Diese Zusammenhänge wurden in [5] näher diskutiert. Für hohlraumverfüllte vertikale Schichten wurde bei zunehmendem  $R_p$  eine Abnahme von  $Nu$  und somit der Konvektion festgestellt. Für alle hier betrachteten Dämmstoffe wurde im Labor ein Permeabilitätsverhältnis von  $R_p \approx 0,5$  ermittelt. Kennt man nun die elementaren Zusammenhänge zwischen den Parametern und die Auswirkung der einzelnen Parameter auf die Kenngröße der Konvektion, die Nußelt-Zahl, so wird die Konvektion zur berechenbaren (erfaßbaren) Einflußgröße im industriellen Wärmeschutz.

Als entscheidende beeinflussende Größe wird jedoch bei praxisorientierten Dämmaufbauten die Art der Ausführung und die Lage zur Schwerkraft (horizontal oder vertikal) sein.

#### Weg und Mittel zum Erreichen des Forschungsziels

Wie aus den vorangegangenen Abschnitten ersichtlich, ist eine zusätzliche Wärmeübertragung durch Konvektion von einer Reihe von Einflußgrößen abhängig. Da außerdem zu erwarten ist, daß neben den sehr vielen möglichen Varianten durch die physikalischen Einflußgrößen auch die Art der Ausführung der Wärmedämmung den Anteil an der Wärmeübertragung quantitativ beeinflusst, ergeben sich umfangreiche Parameterstudien, die durch Messungen allein nicht zu bewerkstelligen sind. Die Studien werden mit Hilfe einer leistungsfähigen Simulationssoftware aus der Strömungsmechanik auf einem Computer unter Berücksichtigung der entsprechenden praktischen Randbedingungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Messungen an einem Prüfstand und an ausgeführten Dämmungen können im Prinzip nur zu einem stichprobenartigen Vergleich zwischen Messung und Berechnung dienen.

Alle Untersuchungen beschränken sich auch auf die praxisrelevanten, vertikalen Dämmaufbauten.

#### Untersuchungen und Ergebnisse

##### Theoretische Untersuchungen und deren Ergebnisse

Die unterschiedlichen Ausführungsarten von Dämmsystemen lassen sich im wesentlichen auf drei Grundtypen im Hin-

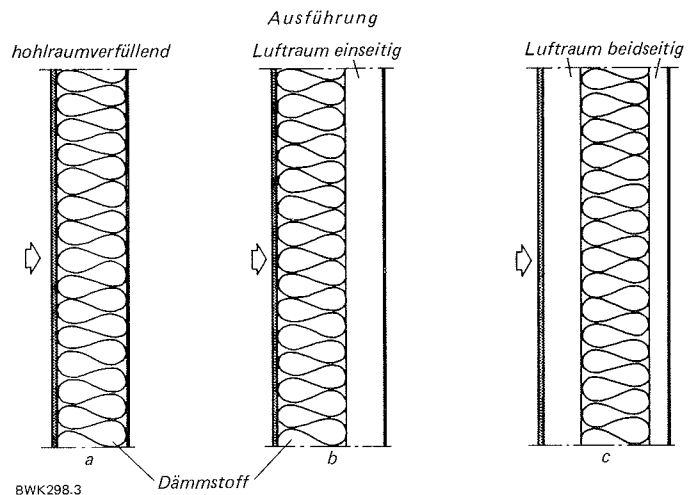


Bild 3: Verschiedene Grundtypen von Dämmsystemen (Ausführungsarten)

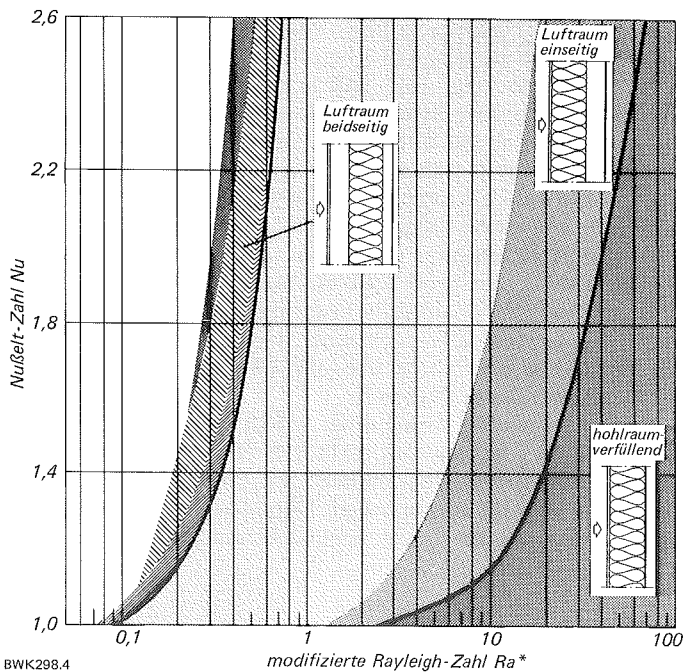
blick auf die konvektive Wärmeübertragung in einer vertikalen Dämmung reduzieren, Bild 3:

#### Formelzeichen

$A$	Quotient $\text{K}/^\circ\text{C}$
$B$	Bewertung
$c_p$	spezifische Wärmekapazität, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
$f_k$	Wärmeleitfähigkeitsfaktor für den Konvektionseinfluß in Dämmungen
$g$	Erdbeschleunigung $9,81 \text{ m/s}^2$
$Gr$	Grashof-Zahl
$H$	Höhe, m
$K$	Permeabilität des Dämmstoffes, $\text{m}^2$
$l$	charakteristische Länge, im Speziellen die Dämmdicke, m
$Nu$	Nußelt-Zahl
$Nu^*$	modifizierte Nußelt-Zahl
$Pr$	Prandtl-Zahl
$\dot{q}$	Wärmestromdichte, $\text{W}/\text{m}^2$
$Ra$	Rayleigh-Zahl
$Ra^*$	modifizierte Rayleigh-Zahl
$R_p$	Verhältnis der Permeabilitäten des Dämmstoffes in $y$ und $x$ -Richtung
$s$	Dämmdicke, m
$s_g$	Gesamtdicke, m
$T$	absolute Temperatur, $^\circ\text{K}$
$W$	Widerstand der Dämmung, $\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}$
$\alpha$	Wärmeübergangskoeffizient, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
$\beta$	Wärmeausdehnungskoeffizient, $1/\text{K}$
$\nu$	kinematische Zähigkeit, $\text{m}^2/\text{s}$
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
$\rho$	Dichte, $\text{kg}/\text{m}^3$
$\eta$	dynamische Zähigkeit, $\text{Pa} \cdot \text{s}$
$\Theta$	Temperatur, $^\circ\text{C}$
$\Delta\theta$	Temperaturdifferenz, $\text{K}$
$\varepsilon$	längenbezogener Strömungswiderstand, $\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^2$

#### Indizes:

a	außen	L	Leitung
A	Ausführungsart	m	mittel
D	Dämmung	Mess	Messung
eff	effektiv	Ref	Referenz
g	gesamt	S	Strahlung
i	innen	V	Variante
k	Kaltseite	w	Warmseite
krit	kritisch	x	x-Richtung
K	Konvektion	y	y-Richtung



BWK298.4

modifizierte Rayleigh-Zahl  $Ra^*$

**Bild 4:** Bereiche der Nußelt-Zahlen für die drei verschiedenen Ausführungsarten von Dämmsystemen

- a) Vollkommen hohlraumverfüllte Dämmung,
- b) Dämmung mit einseitigem Luftraum (Spalt),
- c) Dämmung mit beidseitigem Luftraum (Spalt).

Die gesetzmäßigen Zusammenhänge, wiedergegeben durch die Bewegungs-, Kontinuitäts- und Energiegleichung im zwei-dimensionalen Fall, wurden mit numerischem Verfahren simuliert. Als Ergebnis wurde der Quotient aus dem mittleren Gesamtwärmestrom und dem Wärmestrom von Leitung und Strahlung – berechnet aus der gemessenen Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes und der gegebenenfalls benachbarten Luftspalte – in der Form der Nußelt-Zahl  $Nu$  über der modifizierten Rayleigh-Zahl (7), Bild 4, aufgetragen.

Je nach Art des Aufbaues der Dämmung in Bezug auf mögliche angrenzende Luftspalte oder Luftschichten ergeben sich wiederum Kurvenscharen mit dem Verhältnis Höhe  $H$ /Gesamtdicke  $s_g$  als Parameter, wobei in dem nachstehenden Diagramm die möglichen Bereiche einer Lösung nur unterlegt dargestellt sind und keine einzelnen Parameter ausgewiesen sind.

### Messungen und der Vergleich mit den Berechnungsergebnissen

Zur Verifizierung der durch die Simulation gewonnenen Daten wurden auf einem Prüfstand und an Rauchgaskanälen verschiedene Dämmaufbauten untersucht. Dazu wurden stichprobenartig einzelne Punkte des umfangreichen Lösungsgebietes herausgegriffen und mit den Ergebnissen der Simulations-Berechnung unter den gegebenen Randbedingungen des Prüfstands verglichen.

Im Temperaturbereich von 50 bis 350 °C wurde dies an insgesamt ca. 30 verschiedenen untersuchten Fällen (Temperaturniveau und Aufbau) durchgeführt.

Die Nußelt-Zahl ergibt sich dabei aus der Beziehung  $Nu = \frac{\dot{q}_{\text{Mess}}}{\dot{q}_{\text{Ref}}}$  entsprechend Gl. (5) für jeweils gleiches Temperaturniveau und gleicher Temperaturdifferenz zwischen Warmseite und Umgebungstemperatur.

Hierbei ist

$\dot{q}_{\text{Mess}}$ : die meßtechnisch ermittelte Wärmestromdichte in  $W/m^2$  mit allen Anteilen der Wärmeübertragung Leitung, Strahlung und Konvektion und

$\dot{q}_{\text{Ref}}$ : die mit der Laboratoriums-Wärmeleitfähigkeit des verwendeten Dämmstoffes berechnete Referenz-Wärmestromdichte in  $W/m^2$  bei gegebenen Prüfstandrandbedingungen.

Bei mehrschichtigem Aufbau der Dämmung gilt die Beziehung

$$Nu = \frac{\lambda_{\text{Leitung, Strahlung u. Konvektion}}}{\lambda_{\text{Leitung, Strahlung}}} = \frac{\lambda_{L,S+K}}{\lambda_{L,S}} \quad (10)$$

für die untersuchte Dämmstoffschicht.

Die effektive Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{\text{eff}}$  oder  $\lambda_{L,S+K}$  berechnet sich dabei für die Schichtdicke  $s$  aus

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_{L,S+K} = \frac{\dot{q}_{\text{Mess}} \cdot s}{\Delta\theta_{\text{Mess}}} \quad (11)$$

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{L,S}$  entspricht dabei der wirksamen Wärmeleitfähigkeit auf der Grundlage des Meßwertes gemäß DIN 52612 bei gegebener Temperaturdifferenz zwischen Warm- und Kaltseite, wie sie sich bei angenommenen Wärmeübergangskoeffizienten (Prüfstand – Randbedingungen) ohne jeglichen Einfluß der Konvektion einstellen würde.

### Ergebnisse und deren praktische Anwendung

#### Einschränkende Faktoren

#### Vollkommen hohlraumverfüllte Dämmung

Betrachtet man die Definitionsgleichung der modifizierten Rayleigh-Zahl (7), so erkennt man eine indirekte Proportionalität von  $Ra^*$  zum längenbezogenen Strömungswiderstand der luftdurchlässigen Dämmstoffe. Dämmstoffe mit einem Strömungswiderstand oberhalb des zu  $Ra_{\text{krit}}^*$  gehörenden kritischen Strömungswiderstandes  $\Xi_{\text{krit}}$  lassen praktisch keine Konvektion im Dämmstoff mehr zu. Eine zusätzliche Wärmeübertragung durch Konvektion findet nicht statt. Bei Dämmstoffen mit Strömungswiderständen kleiner als der kritische Strömungswiderstand muß mit Auftreten von Konvektion gerechnet werden ( $Nu > 1$ ). Geht man von der kritischen Grenze mit  $Ra_{\text{krit}}^* = 2$  bis 4 (siehe Bild 4) aus, woraus sich für vollkommen mit Dämmstoff verfüllte Hohlräume – d.h. Dämmungen ohne jegliche Lufträume und Spalte mit idealem Kontakt zwischen Objektwand und der Ummantelung – je nach Temperaturniveau ein kritischer längenbezogener Strömungswiderstand von 2000 bis 5000  $Pa \cdot s/m^2$  ergibt. Eine Anforderung, die ohne Schwierigkeit von fast allen luftdurchlässigen Dämmstoffen erfüllt wird.

Trotzdem läßt sich zeigen, daß auch hier Konvektionsbewegungen auftreten, die das Temperaturfeld verzerren und gegebenenfalls auch zu einer merklichen Erhöhung des Gesamtwärmeverlustes beitragen. Dies liegt daran, daß in der Praxis der erforderliche ideale Kontakt zwischen Dämmstoff und den anschließenden Flächen nicht gegeben ist. Kleinste Spalte, bedingt durch Unebenheit von Objektwand und Ummantelung, durch die Oberflächenbeschaffenheit des Dämmstoffes wie z.B. Oberflächenprofilierung, Unebenheit durch Versteppung und letztendlich auch durch verarbeitungstechnisch bedingte Vorgänge bei der Montage, können bereits Ursache für das Auftreten von Konvektion sein. Solche Einflüsse lassen sich aber mit Simulationsberechnungen nicht mehr nachvollziehen.

#### Dämmung mit einseitigem Luftraum (Spalt)

In vielen Fällen und Bereichen der Dämmtechnik sind Dämmungen mit einseitigem Luftraum erforderlich, was in bauphysikalischen oder montagetechnischen Überlegungen begründet sein kann.

Für diese Ausführungsart ergibt sich wie bei der vollkommen hohlraumverfüllten Dämmung ein Bereich für die „kritische Rayleigh-Zahl  $Ra_{\text{krit}}^*$ “ und somit kritische längenbezogene Strömungswiderstände. Diese liegen, ein idealer – dieses-

mal nur einseitiger – Kontakt zwischen Objektwand oder der Ummantelung vorausgesetzt, ebenfalls ungefähr in dem gleichen Bereich von 2000 bis 5000 Pa·s/m<sup>2</sup> für die in der Praxis gegebenen Temperaturrandbedingungen bei der Dämmung wärmeleitender betriebstechnischer Anlagen.

Geht man von einem längenbezogenen Strömungswiderstand von 10000 Pa·s/m<sup>2</sup> aus, welcher von fast allen in der Dämmtechnik eingesetzten Mineralfaserdämmstoffen ohne Schwierigkeiten erreicht wird, so dürfte auch bei dieser Ausführungsart keine Konvektion entstehen können.

Eindeutig im Widerspruch dagegen sind die Erfahrungen aus der Praxis und die im Rahmen der Forschungsarbeit ermittelten Werte. Der Grund liegt ebenfalls wieder, wie bei der vollkommen hohlraumverfüllenden Dämmung, an dem schwer zu realisierenden idealen Kontakt des Dämmstoffes, in diesem Fall zu einer der angrenzenden Wände des Dampferzeugers oder des Kanals.

Der Aufbau ist im Vergleich zu vollkommen hohlraumverfüllten Dämmungen stärker konvektionsgefährdet, da ja bereits ein an den Dämmstoff grenzender Luftraum vorgegeben ist, so daß sich das Druckfeld fast ungehindert ausbilden kann.

Auch hier ergibt sich die Schwierigkeit der Vorausberechnung. Der Einfluß der rein zufälligen, teilweise auch nur örtlich begrenzten Spalte auf die sich auszubildende Konvektion kann praktisch durch Simulationsberechnungen mit idealen Randbedingungen nicht nachvollzogen werden, obwohl sich in der Praxis ca. 20 bis 40% ( $Nu = 1,18$  bis  $1,37$ ) Anteile an der Wärmeübertragung durch Konvektion nachweisen lassen.

#### Dämmung mit beidseitigem Luftraum

Anders wie bei den – in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen – mit schwer faßbaren Unsicherheiten behafteten Ausführungen, kann für Aufbauten mit beidseitigem Luftraum, d.h. unter genau definierten Randbedingungen, die Konvektion mehr oder weniger exakt mit dem Berechnungsprogramm simuliert werden. Die berechneten Nußelt-Zahlen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den meßtechnisch ermittelten Werten. Dies gilt für das Niveau bei unterschiedlichen Strömungswiderständen des Dämmstoffes genauso, wie für die Abhängigkeit von der in der Dämmung herrschenden Temperatur (Bild 5), d.h., daß für diese Art der Ausführung eigentlich keine einschränkenden Faktoren vorliegen.

In Bild 4 ist das Lösungsgebiet für diese Art der Ausführung ebenfalls eingetragen. Wie man leicht erkennen kann, liegt die kritische Grenze bei einer modifizierten Rayleigh-Zahl  $Ra_{krit}^* \approx 0,1$ , was ungefähr einem längenbezogenen Strömungswiderstand des Dämmstoffes von 20000 bis 50000 Pa·s/m<sup>2</sup> entspricht. Der relativ steile Anstieg der Kurven läßt bereits die sich ergebenden Mängel erahnen, wenn der Wärmeschutz der betriebstechnischen Anlage – gedämmt mit einer derartigen Ausführung (z.B. die sogenannte Totraumversion) – mit dem heute üblichen Zuschlag für verarbeitungstechnisch bedingte

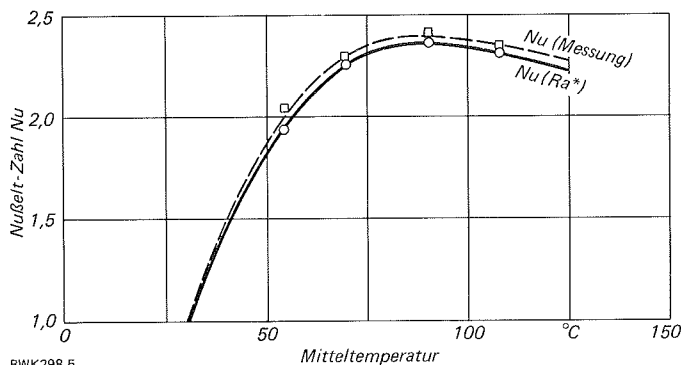


Bild 5: Vergleich zwischen den meßtechnisch ermittelten und berechneten Nußelt-Zahlen in Abhängigkeit von der Mitteltemperatur des Dämmstoffes

Unsicherheiten bei der Montage von nur 10% auf die Laboratoriums-Wärmeleitfähigkeit berechnet wurde. Das Forschungsergebnis zeigt klar, daß gegebenenfalls die zwei- bis dreifachen Wärmeverluste als über die reine Wärmeleitungs-Gleichung berechnet, zu erwarten sind. Solche Ausführungen sind deshalb bereits während der Planung entweder zu vermeiden, oder es sind entsprechende vorbeugende Maßnahmen zu ergreifen, um solche Störgrößen erst gar nicht aufkommen zu lassen. Daraus resultiert aber auch, daß es völlig unnötig ist, Nußelt-Zahlen, die größer als vielleicht 1,1 bis 1,2 sind, mit entsprechender Genauigkeit abschätzen zu können. Hinzu kommt gegebenenfalls noch eine mangelnde Akzeptanz für ein Berechnungsverfahren über die Größe der modifizierten Rayleigh-Zahl beim Praktiker.

In den folgenden Abschnitten wird deshalb ein Verfahren vorgeschlagen, woraus mit einfachen Mitteln unter Zuhilfenahme von Arbeitsdiagrammen das komplexe Gebiet der Konvektion in luftdurchlässigen Dämmstoffen (porösen Stoffen) trotzdem relativ einfach behandelt werden kann.

#### Einführung von Arbeitsdiagrammen

Eine Loslösung von der dimensionslosen modifizierten Rayleigh-Zahl, und damit eine erhoffte Vereinfachung der Handhabung zur Abschätzung des Konvektionseinflusses bringt eine getrennte Behandlung der Einflußparameter mit sich. Ziel ist es hierbei, durch praxisorientierte Abhängigkeiten der Einflußgrößen diese selbst zu begrenzen. So wurde eine Kopplung der Mitteltemperatur im Dämmsystem mit der Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes vorgenommen. Als Zusammenhang wurde die „Grenzkurve 2“ der Wärmeleitfähigkeit von Mineralfasermatten des AGI-Arbeitsblattes Q 132 verwendet.<sup>1)</sup> Sie kann als Stand der Technik angesehen werden.

Durch dieses Vorgehen sind nun die Mitteltemperatur, die Temperaturdifferenz und die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes miteinander gekoppelt in die Diagramme eingearbeitet, Tabelle 1.

Die Variation der Gesamtdicke in drei Schritten 0,200 m, 0,300 m und 0,600 m ergibt jeweils ein neues Arbeitsdiagramm (Bilder 6, 7, 8). Die verbleibende Einflußgröße, die Dämmschichtdicke  $s$  taucht schließlich in dem Strömungswiderstand  $W$  der Mineralfaserdämmstoffe und einer modifizierten Nußelt-Zahl  $Nu^*$  auf.

$$W = \varepsilon \cdot s \quad \text{in Pa} \cdot \text{s/m} \quad (12)$$

$$Nu^* = (Nu - 1) \cdot \frac{s_g}{2s} + 1 \quad (13)$$

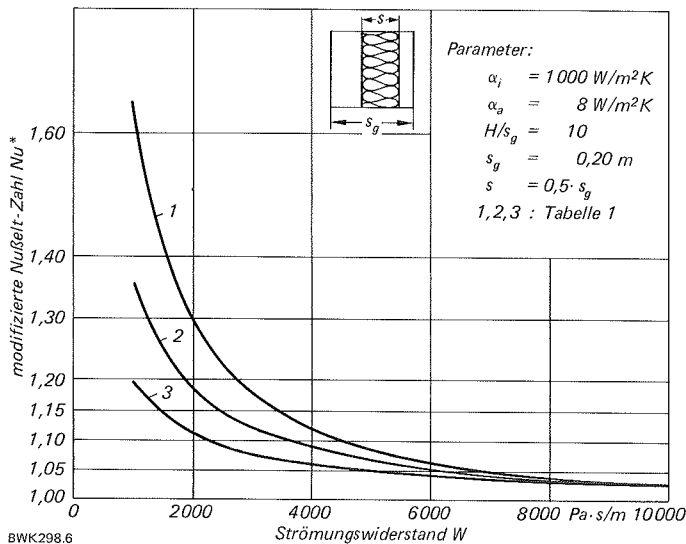
Im jeweiligen Arbeitsdiagramm für die gewählte Gesamtdicke  $s_g$  des Dämmbaus kann bei dem entsprechenden Temperaturniveau und Strömungswiderstand des Mineralfaserdämmstoffes die modifizierte Nußelt-Zahl abgelesen werden. Für Gesamtdicken zwischen den gewählten Gesamtdicken der Arbeitsdiagramme können die Nußelt-Zahlen durch entsprechendes Interpolieren aus zwei Arbeitsdiagrammen ermittelt werden.

Das Höhen-dickenverhältnis für alle Arbeitsdiagramme beträgt entsprechend der häufigsten praktischen Gegebenheiten  $H/s_g = 10$ .

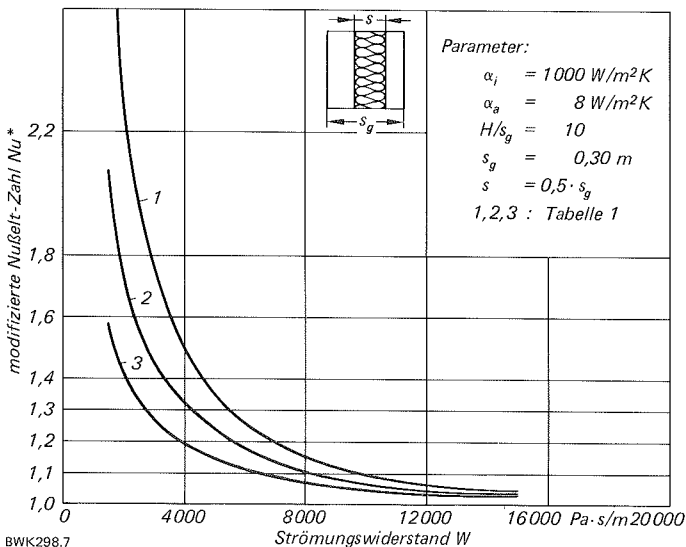
Hat sich auf beiden Seiten des Dämmstoffes ein wirksamer Spalt ausgebildet, so ist die Größe sowie die Lage (Kalt- oder Warmseite) des Luftraumes von untergeordneter Bedeutung. Als entscheidende Größe tritt dann nur der Strömungswiderstand der Dämmung auf. Er ist entscheidend maßgeblich für die Austauschströmung zwischen der Kalt- und der Warmseite.

<sup>1)</sup> Arbeitsblatt der Arbeitsgemeinschaft Industriebau e.V. mit dem Titel: Mineralwolle als Dämmstoff für betriebstechnische Anlagen.

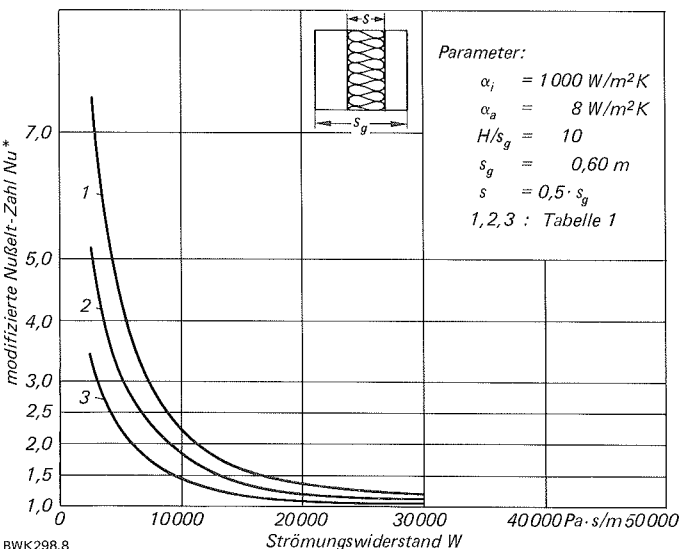
# WÄRMEDÄMMUNG



BWK298.6  
Bild 6: Arbeitsdiagramm für eine Gesamtdicke des Dämmbaufes von  $s_g = 0,200$  m



BWK298.7  
Bild 7: Arbeitsdiagramm für eine Gesamtdicke des Dämmbaufes von  $s_g = 0,300$  m



BWK298.8  
Bild 8: Arbeitsdiagramm für eine Gesamtdicke des Dämmbaufes von  $s_g = 0,600$  m

## Verfahren zur Berücksichtigung der Konvektion bei der Berechnung des Wärmeschutzes – Empfehlungen für verschiedene Ausführungsarten

Die in den Arbeitsdiagrammen aufgeführten Nußelt-Zahlen gelten nur für zwei an die Dämmung angrenzende, voll ausgebildete Luftspalte. Geht man davon aus, daß der Kalt- und Warmseitenluftraum nicht durch z.B. verarbeitungstechnische, horizontale Fugen direkt miteinander im Fluidaustausch stehen, stellen die Zuschlagswerte für Konvektion der Arbeitsdiagramme (Nu-Zahlen) Maximalwerte dar.

Andere Ausführungs-Arten einschließlich ihrer, in der Regel nicht exakt erfaßbaren Unsicherheitsfaktoren, sollen durch Bewertungsfaktoren entsprechend ihrer Wirksamkeit zur Minderung des Konvektionseinflusses berücksichtigt werden. Aus einer Beziehung, in die dann u.a. auch die ermittelte modifizierte Nußelt-Zahl, Gl. (13), eingeht, ergibt sich ein Faktor zur Berücksichtigung des Konvektionseinflusses für die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes.

$$f_K = 1 + \frac{(Nu^* - 1) 2s}{(1 + B_A + B_V) s_g} \quad (14)$$

wobei

$f_K$  Faktor zur Berücksichtigung des Konvektionseinflusses in der Dämmung auf die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes

$B_A$  Bewertungsgröße je nach Aufbau (Tabelle 2)

$B_V$  Bewertungsgröße je nach eingesetzter Variante (Tabelle 3)

ist.

Neben verschiedenen anderen Faktoren – für z.B. montagebedingte Einflüsse – dient der Faktor  $f_K$  zur Berechnung der Betriebswärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes je nach geplanter Ausführungsart [6].

Abschließend sollen noch die Messungen der vorangegangenen Kapitel unter Verwendung der Arbeitsdiagramme „konvektiv“ bewertet werden. Ausgehend von der Gesamtdicke des Dämmbaufes  $s_g$  wählt man ein dazu passendes Arbeitsdiagramm. Nach Berechnung des Strömungswiderstandes des Mineralfaserdämmstoffes nach Gl. (12) läßt sich aus dem Arbeitsdiagramm die modifizierte Nußelt-Zahl  $Nu^*$  ablesen. Anschließend erfolgt die Bewertung des Dämmbaufes entsprechend Tabelle 2 und 3. Mit Hilfe der Bewertungsgrößen läßt sich schließlich nach Gl. (14) der „Wärmeleitfähigkeitsfaktor“ für den Konvektionseinfluß  $f_K$  berechnen.

Eine Gegenüberstellung der Nußelt-Zahlen, ermittelt durch Messungen und über die Arbeitsdiagramme, soll die Brauchbarkeit der Arbeitsdiagramme aufzeigen, Tabelle 4.

Ergänzend zu den Arbeitsdiagrammen zeigt Bild 9 den Zusammenhang zwischen der Temperaturdifferenz an der Kaltseite zwischen dem oberen und unteren Bereich eines Dämmsystems und dem Zuschlagsfaktor auf die Wärmeleitfähigkeit  $f_K$  (oder Nußelt-Zahl). Aus dem Diagramm kann die Temperaturfeldverzerrung auf der Kaltseite zu einem aus den Arbeitsdiagrammen ermittelten  $f_K$ -Wert abgeschätzt werden. Will man eine absolute Kaltseitentemperatur (z.B. konvektiv erhöhte Temperatur im oberen Bereich) näherungsweise bestimmen, so muß darauf geachtet werden, daß das Temperaturniveau der Oberfläche stark vom äußeren Wärmeübergangskoeffizienten geprägt wird.

Der Temperaturunterschied zwischen dem oberen und unteren Bereich der Kaltseite berechnet sich somit für den jeweiligen  $f_K$ -Wert aus

$$\Delta \vartheta_K = A \cdot \vartheta_W \quad (15)$$

## Schlussbetrachtung

Die Ergebnisse der Forschungsarbeiten bestätigen anschaulich die erwartete Komplexität der Konvektion als Einfluß auf die Wärmeübertragung in der Wärmedämmung von betriebstechnischen Anlagen, wie z.B. Dampferzeuger und Rauchgaskanäle. Sie zeigen, daß eine zusätzliche Wärmeüber-

**Tabelle 1: Parameter für die Arbeitsdiagramme zur Bestimmung des konvektiven Einflusses in Abhängigkeit vom Strömungswiderstand des Dämmstoffes bei praktischen Dämmungen**

Bezeichnung der Parameter in den Arbeitsdiagrammen	Warmseiten-temperatur °C	Mittel-temperatur °C	Wärmeleitfähigkeit W/m · K
1	180	100	0,050
2	440	230	0,075
3	580	300	0,100

**Tabelle 2: Empfehlungen für die „konvektive Bewertung“ von praktischen Dämm-aufbauten**

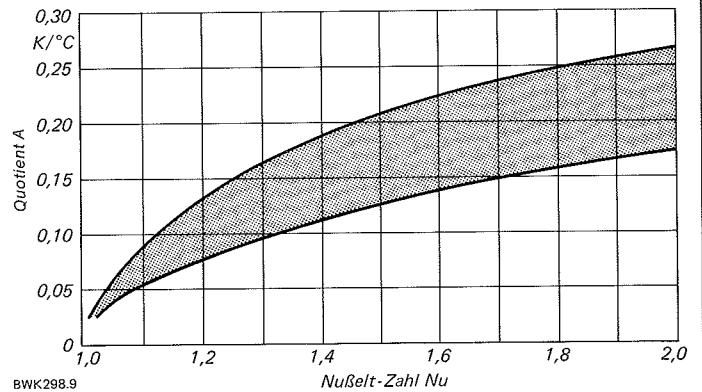
Aus-führung	Beschreibung	Bilder	Bewertungs-größe $B_A$
1	<i>Totraum</i> Dämmung ohne Abdeckungen; beide Dämmstoffoberflächen grenzen an einen Hohlraum		0
2	<i>Konturfolgend</i> Dämmstoff der Kontur der Oberfläche der betriebstechnischen Anlage folgend mit örtlich begrenzten Hohlräumen		1
3	<i>Luftraum</i> Dämmung an Warm- oder Kaltseite weitgehendst dicht anliegend		2 bis 3
4	<i>Hohlraumfüllend</i> Dämmung an Warm- und Kaltseite weitgehendst dicht anliegend		4 bis 6

**Tabelle 3: Empfehlungen für die Bewertung von eventuell einbezogenen Ausführungs-Varianten mit zusätzlichen Folien**

Variante Nr.	Beschreibung	Bilder	Bewertungs-größe $B_A$
1	Folie als Konvektionssperre zwischen den Lagen		5 bis 7
2	Folie auf Dämmstoff kaschirt oder absolut dicht anliegender Dämmstoff (vollständig verklebt)		9 bis 10
3	keine Folie		0

**Tabelle 4: Gegenüberstellung einiger Nußelt-Zahlen ermittelt aus Messungen ( $Nu_{Mess}$ ) und den praxisorientierten Arbeitsdiagrammen ( $f_K$ )**

Ausführungs-Nr. gemäß Tabelle 2	$Nu_{Mess}$	$f_K$
4	1,05	1,1
3	1,17	1,2
1	2,41	> 2
1	1,67	1,7
3	1,18	1,2
3	1,35	1,3
3	1,14	1,2



**Bild 9: Differenz der Temperatur des oberen und unteren Bereiches der Kaltseite  $\Delta\theta_K$  bezogen auf die Temperatur der Warmseite  $\theta_W$  als Funktion von der Nußelt-Zahl bzw. des „Konvektionsfaktor“  $f_K$**

tragung durch Konvektion ganz entscheidend von den gegebenen Randbedingungen, insbesondere aber von der Art der Ausführung der Dämmung abhängig ist. So können einerseits die bisherigen Erkenntnisse untermauert werden, daß bereits bei Dämmstoffen mit relativ geringen längenbezogenen Strömungswiderständen keine Konvektion auftreten kann. Hierzu sei jedoch an dieser Stelle noch einmal ausdrücklich vor einer möglichen Falsch-Interpretation gewarnt. Diese Aussage gilt nämlich nur dann, und eben nur dann, wenn der Dämmstoff in idealem Kontakt mit den begrenzenden Flächen, frei von jeglichen Spalten, vollkommen hohlraumfüllend eingebracht ist.

Andererseits wird gezeigt, in welchem Maße verschiedene in der Praxis übliche Ausführungsarten im höchsten Grade „konvektionsgefährdet“ sind, d.h. wo sich die Konvektion zur Störgröße entwickeln kann. Durch einfach zu handhabende Arbeitsdiagramme wird nun auch dem Praktiker die Möglichkeit gegeben, den etwaigen Einfluß der Konvektion auf die Wärmeübertragung bei seiner gewählten Ausführungsart abschätzen zu können. Für den Fall des Auftretens ( $Nu > 1$ ) können somit bereits im Planungsstadium entsprechende vorbeugende Maßnahmen getroffen werden. Es wird empfohlen, keine Konstruktionen zuzulassen, für die sich „Konvektionsfaktoren“ größer als 1,1 bis 1,2 ergeben. Für diese Fälle ist jedoch immer noch zu prüfen, ob durch die zugelassene Konvektion andere zu gewährleistenden Größen wie z.B. örtliche Temperaturen gefährdet sind. Das Diagramm zur Ermittlung des Unterschiedes der Temperaturen im oberen und unteren Bereich einer betriebstechnischen Anlage rundet das Forschungsergebnis ab und läßt somit auch diesbezüglich keine Frage mehr offen.

Ein weiteres nebensächliches, aber deshalb nicht unbedeutenderes Ergebnis ist die Tatsache, daß ein hoher längenbezogener Strömungswiderstand des Dämmstoffes einen großen Beitrag zur Minderung der Konvektion leisten kann und somit ein wichtiges Qualitätsmerkmal neben der Wärmeleitfähigkeit darstellt.

### Schrifttum

- [1] Eckert, E.: Einführung in den Wärme- und Stoffaustausch. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag, 1959
- [2] Gröber/Erk/Grigull: Grundgesetze der Wärmeübertragung. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag
- [3] Fournier, D. and Karlsfeld, S.: Some Recent Experimental Data on Glass Fiber Insulation Materials and Their Use for a reliable Design of Insulations at low Temperatures. American Society for Testing and Materials, 1974
- [4] Zahlentafel 2 „Wärmeleitfähigkeit von mineralischen Faserstoffen“, Mitteilungen aus dem Forschungsbereich für Wärmeschutz e.V.; München Heft 9, 1955
- [5] Joshi, D.K., and Sukhatme, S.P.: Convective Heat Transfer within Fibrous Insulation Slabs. Wärme- und Stoffübertragung 3 (1973), S. 183/190.
- [6] Zeitler, M.: Dämmstoffe: Meß- und Rechenwerte der Wärmeleitfähigkeit. VDI Bericht 676, VDI Verlag, 1988.