

J. Straub, G. P. Merker \*

cfm 060.43:063.0:807

# Wärmedurchgangszahl k für Thermopanefenster mit zwei und drei Glasscheiben und verschiedenen Gasfüllungen

*Es wird der Einfluß der Gasfüllung und des Emissionsverhältnisses der Glasscheiben auf die Wärmedurchgangszahl für Thermopanefenster mit zwei- und drei Glasscheiben untersucht. Bei normalem Glas macht der Wärmetransport durch Strahlung etwa 2/3 des Gesamttransportes aus. Bei gegen Wärmestrahlung beschichteten Scheiben bringen Gasfüllungen mit schweren Edelgasen eine lohnenswerte Reduzierung der Wärmedurchgangszahl.*

**Thermal transmittance „k,, (British symbol is „U,,) for double and triple Thermopane window glazing, the space between filled with different gases**

*The influence on the heat-transfer coefficient of the kind of gas filling and the emissivity of the pane of glass was investigated for thermopane-windows with two and three panes. With normal glas, radiation accounts for 2/3 of the total heat transport. Coated panes, together with fillings with heavy noble gases leads to a remarkable reduction of the heat-transfer coefficient.*

**Valeur du coefficient de transmission thermique des fenêtres à verre Thermopane, doubles ou triples et avec différents gaz de remplissage**

*L'influence du gonflement et de la relation d'émission des vitres sur la taux de conductibilité thermique pour des fenêtres «thermopane» avec deux ou trois vitres était étudié. Le transfer de chaleur par radiation se monte à 2/3 pour le verre ordinaire, tandis que le gonflement des verres plaquées avec des gaz nobles et lourdes réduit la taux de conductibilité thermique profitablement.*

## 1. Einleitung

Seit der Verteuerung der Heizkosten werden viele Möglichkeiten diskutiert, um im Hochbau durch bessere Isolation an diesen zu sparen. Für normale Wandkonstruktionen ist es heute praktisch nur eine Kostenfrage, um auf Wärmedurchgangszahlen k von kleiner 1 W/m²K zu kommen. Bei Fensterflächen sind bessere Isoliermöglichkeiten sehr beschränkt, was sich bei modernen Bauten mit großflächigen Glasfenstern sehr bei den Heizkosten bemerkbar macht. Bei Thermopanefenstern bestehend aus zwei Glasscheiben sind bei den üblichen Abmessungen von 12 mm Scheibenabstand nur Wärmedurchgangszahlen von 2,8 W/m²K erreichbar.

In der vorliegenden Arbeit werden zur Reduzierung der Wärmedurchgangszahl k die folgenden drei Möglichkeiten untersucht:

1. als Füllgas werden Gase mit geringerer Wärmeleitfähigkeit als Luft eingesetzt.
2. durch geeignete Beschichtung der Innenflächen, die im Infrarot-Bereich das Emissionsverhältnis reduzieren, wird der Strahlungsaustausch verringert.
3. Thermopanefenster mit drei Glasscheiben werden bei verschiedenen Glasfüllungen untersucht.

## 2. Berechnungsgrundlage

Der Wärmetransport zwischen den vertikalen Glasscheiben erfolgt durch Leitung  $q_\lambda$ , Konvektion  $q_\alpha$  und Strahlung  $q_e$ . Für den Gesamtärmestrom gilt somit

$$q_{ges} = q_\lambda + q_\alpha + q_e = k (T_i - T_a) \quad (1)$$

Dabei ist k die Wärmedurchgangszahl,  $T_i$  die Innentemperatur des Raumes und  $T_a$  die Außentemperatur.

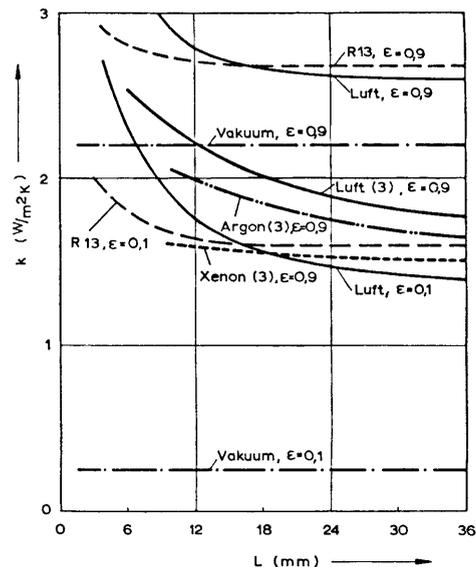
Bei engen Spalten lassen sich die Teilströme  $q_\lambda$  und  $q_\alpha$  durch Einführung einer scheinbaren Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_s$  zu einem resultierenden Wärmestrom  $q_s$  zusammenfassen:

$$q_s = q_\lambda + q_\alpha = \frac{\lambda_s}{L} (T_j - T_{j+1}) \quad (2)$$

wobei  $T_j$  und  $T_{j+1}$  die Temperaturen zweier Glasscheiben im Abstand L sind. Der Wärmewiderstand der Glasscheiben selbst kann vernachlässigt werden.

Die scheinbare Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_s$  ist nach Jakob [1] eine Funktion der Grashof-Zahl Gr und läßt sich in drei Gr-Bereichen darstellen:

$$\frac{\lambda}{\lambda_s} = \begin{cases} 1 + 0.001 Gr^{0.6} & 0 \leq Gr \leq 2 \cdot 10^4 \\ 0.18 Gr^{1/4} (H/L)^{-1/9} & 2 \cdot 10^4 \leq Gr \leq 2 \cdot 10^5 \\ 0.065 Gr^{1/3} (H/L)^{-1/9} & 2 \cdot 10^5 \leq Gr \leq 11 \cdot 10^5 \end{cases} \quad (3)$$



Abhängigkeit der k-Zahl von der Spaltweite L für das Zweischeibenfenster mit Luft und R 13 als Füllgas mit  $\epsilon = 0,9$  und  $0,1$  und für das Dreischeibenfenster mit Luft (3), Argon (3) und Xenon (3) als Füllgas mit  $\epsilon = 0,9$  bei  $t_i = 20^\circ C$  und  $t_a = -10^\circ C$ . Im Vergleich dazu Vakuum bei  $\epsilon = 0,9$  und  $0,1$ .

\* Dr.-Ing. J. Straub ist Akademischer Direktor und Dr.-Ing. G. P. Merker Wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl A für Thermodynamik der Technischen Universität München. Manuskript eingereicht im Juli 1976.

Der Korrekturfaktor  $(H/L)^{-1}$  berücksichtigt den Einfluß der Fensterhöhe H zur Spaltweite L, der mit  $H/L = 100$  angenommen wurde. Die Grashof-Zahl berücksichtigt die Konvektion im Spalt, mit der als Stoffparameter des Füllgases die kinematische Viskosität  $\nu$  eingeht.

Für den Wärmestrom infolge Strahlung  $q_e$  zwischen parallelen Glasscheiben gilt, [2]

$$q_e = \frac{C_s}{\frac{1}{\epsilon_j} + \frac{1}{\epsilon_{j+1}} - 1} \left[ \left( \frac{T_{j+1}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_j}{100} \right)^4 \right] \quad (4)$$

$C_s = 5,755 \text{ W/m}^2\text{K}^4$  ist die Strahlungskonstante des schwarzen Körpers und  $\epsilon_j$  bzw.  $\epsilon_{j+1}$  sind die Emissionsverhältnisse der beiden Glasscheiben.

Die einzelnen Wärmewiderstände lassen sich analog dem elektrischen Blockschaltbild darstellen und zum Gesamtwiderstand addieren. Für ein Mehrscheibenfenster mit n Scheiben erhält man somit

$$\frac{1}{k_n} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_n} + \sum_{j=1}^n \left[ \frac{\lambda_{s,j}}{L_{j,j+1}} + \frac{10^{-8} \cdot C_s}{\epsilon_j + \epsilon_{j+1} - 1} (T_j + T_{j+1})(T_j^2 + T_{j+1}^2) \right]^{-1} \quad (5)$$

Wärmedurchgangszahl k für das Zweischeibenfenster bei  $\epsilon = 0,9$  und  $0,1$  und prozentualer Anteil der Teilwärmeströme durch Leitung  $q_\lambda$ , Konvektion  $q_\alpha$  und Strahlung  $q_e$  bei verschiedenen Gasfüllungen

Stoff	Stoffwerte		$\epsilon = 0,9$				$\epsilon = 0,1$			
	$\lambda$ W mk	$\nu$ $\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \cdot 10^4$	k W/m <sup>2</sup> K	$q_\lambda$ %	$q_\alpha$ %	$q_e$ %	k W/m <sup>2</sup> K	$q_\lambda$ %	$q_\alpha$ %	$q_e$ %
Luft	0,0243	13,30	2,78	32	5	63	1,75	75	15	10
R13	0,0116	3,0	2,70	17	17	66	1,64	40	50	10
Clor	0,0081	3,82	2,54	13	11	76	1,24	41	43	16
SO <sub>2</sub>	0,0086	4,10	2,55	14	11	75	1,25	43	42	15
SF <sub>6</sub>	0,0140	2,50	2,83	18	22	60	1,92	37	55	8
Argon	0,0174	14,50	2,64	27	3	70	1,43	75	13	12
Krypton	0,0088	6,23	2,50	15	7	78	1,12	51	31	18
Xenon	0,0051	3,57	2,43	9	8	83	0,95	36	42	22
Vakuum	—	—	2,20	—	—	100	0,24	—	—	100

Die Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_i$  bzw.  $\alpha_n$  an der Fensterinnen- bzw. -außenseite wurden zu 7 bzw. 20 W/m<sup>2</sup>K angenommen.

### 3. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Rechnung sind für das Zweischeibenfenster in der Tabelle dargestellt, wobei der Scheibenabstand entsprechend heute üblicher Norm mit  $L = 12 \text{ mm}$  gewählt wurde. Der Einfluß der Strahlung wurde für zwei Fälle mit jeweils gleichem Emissionsverhältnis der Scheiben untersucht: einmal mit  $\epsilon = 0,9$ , entsprechend einer normalen Glasscheibe, zum anderen mit  $\epsilon = 0,1$ , entsprechend einer gegen Wärmestrahlung beschichteten Scheibe. Aus den prozentualen Anteilen der drei Wärmeströme Leitung, Konvektion und Strahlung erkennt man, daß bei fast allen Gasen über  $2/3$  der Wärme allein durch Strahlung übertragen wird.

Betrachtet man die Abhängigkeit der k-Zahl vom Füllgas, so erkennt man, daß Xenon den niedrigsten k-Wert ergibt. Die k-Zahl wird dabei aber nur um 13% reduziert, während

die Wärmeleitfähigkeit von Xenon nur  $1/5$  der von Luft beträgt. Da die kinematische Viskosität bei Xenon auch niedriger ist, wird die Konvektion entsprechend verstärkt und somit der günstige Einfluß der kleineren Wärmeleitfähigkeit teilweise wieder aufgehoben. Für das vorliegende Problem wäre als Füllung ein Gas mit einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit und einer hohen kinematischen Viskosität erwünscht. Leider widerspricht dies der kinematischen Gastheorie, nach der die Wärmeleitfähigkeit direkt proportional der Viskosität, der Bewegungsfreiheitsgrade der Moleküle und umgekehrt proportional der molaren Masse ist. Da bei einatomigen Gasen die Bewegungsfreiheitsgrade den Minimalwert drei haben, erhält man mit den schweren Edelgasen Xenon und Krypton die niedrigsten k-Werte, wie es die Tabelle zeigt.

Betrachtet man die Rechnung unter der Voraussetzung, daß zwischen den Scheiben Vakuum herrsche, also nur Strahlungstransport stattfindet, so wird die k-Zahl gegenüber Luft bei  $\epsilon = 0,9$  nur um 21% niedriger, bei  $\epsilon = 0,1$  jedoch um 87% reduziert. Man erkennt deutlich, daß erst nach einer Reduktion des Strahlungsanteils das Füllgas eine entscheidende Verbesserung bringen kann; so kommt man mit  $\epsilon = 0,1$  bei einer Xenon-Füllung auf einen k-Wert unter eins und auf eine Verringerung gegenüber Luft von 46%. Die Abhängigkeit des k-Wertes von der variablen Außentemperatur zwischen 10 °C und -20 °C gegenüber konstanter Innentemperatur von 20 °C macht etwa 2% aus. Im Bild erkennt man die Abhängigkeit der k-Zahl von der Spaltweite L, die sich bei größeren Spaltweiten asymptotisch einem konstanten Wert nähert. Ferner sind auch die

Ergebnisse für Thermopanefenster mit drei Scheiben für die Gase Luft (3), Argon (3) und Xenon (3) eingetragen. Die Rechnung zeigt, daß gleiche Scheibenabstände die niedrigsten k-Werte liefern, daher sind hier nur die Spaltweiten  $L_{1,2} = L_{2,3}$  eingetragen. Für Luft (3) dürfte bei etwa 24 mm Gesamtscheibenstärke der optimale k-Wert erreicht sein, der hier trotz unbeschichteter Scheiben einen Wert kleiner zwei erreicht.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen deutlich, daß die Strahlung einen erheblichen Einfluß auf die Wärmedurchgangszahl von Thermopanefenstern hat. Es ist also zunächst lohnend, das Emissionsverhältnis der Glasscheiben im infraroten Bereich durch geeignete Beschichtung zu erniedrigen. Danach kann es auch zweckmäßig werden, andere Gasfüllungen als Luft in Betracht zu ziehen.

### Literatur

- [1] Jakob, M.: Free heat convection through enclosed plane gas layers. Trans. Amer. Soc. mech. Eng. 68 (1946), 189/194.
- [2] Grigull, U.: Grundlagen der Wärme- und Stoffübertragung, 3. Bericht. Neudruck (1963), Springer-Verlag.