Die Isolation

Nr. 4/5/6 1967

Verband Schweizerischer Isolierfirmen Zürich
Rämistraße 35
Telephon 051 34 24 74

Erscheint monatlich
Abonnementspreis:
12 Monate Fr. 5.—

Wärmeverlust exzentrischer Rohrisolierungen

Von Prof. Dr.-Ing. Ulrich Grigull
Institut für Technische Thermodynamik der Technischen Hochschule München

In den letzten Jahrzehnten werden mehr und mehr Rohrisolierungen in Form von gepreßten Schalen oder Halbschalen verwendet, deren Montage wesentlich schneller vor sich geht als die der Stopf- oder Mattenisolierungen. Durch die Verwendung von Bindemitteln besitzen die Schalen eine solche Festigkeit, daß sie meist ohne Abstandhalter ans Rohr gebracht werden. Dabei kann es vorkommen, daß die Rohrisolierung im Laufe der Jahre durch ihr Eigengewicht oder durch zusätzliche Belastung exzentrisch zum Rohr liegt. Es ist zwar allgemein bekannt, daß eine exzentrische Isolierung einen höheren Wärmeverlust besitzt als eine konzentrische, jedoch herrscht wenig Klarheit darüber, wie stark der Wärmeverlust durch die Exzentrizität zunimmt. Diese Frage wird im folgenden behandelt.

Wir nehmen gemäß Bild 1 an, eine kreisförmige Rohrisolierung vom Radius r_1 habe am Rohr vom Radius r_2 einen Durchhang e, ihre Exzentrizität, die gleich dem Abstand der beiden Mittelpunkte der Kreise mit den Radien r_1 und r_2 ist. Die Wärmeleitfähigkeit λ sei auch in der exzentrischen Isolierung überall gleich, das heißt wir schließen etwa solche Fälle aus, bei denen sich ein luftgefüllter Hohlraum gebildet hat, der den Wärmedurchgang in schwer kontrollierbarer Weise verändert. Ferner sei vereinfachend angenommen, daß sowohl die Rohrwand als auch die äußere Isolierungsoberfläche je eine Fläche gleicher Temperatur darstellen.

Den Wärmestrom Φ durch derartige Anordnungen stellt man am besten als Produkt aus drei Faktoren in der Form

$$\Phi = \lambda S (t_2 - t_1) \tag{1}$$

dar, wobei die Wärmeleitfähigkeit λ ein reiner Stoffwert ist, der Formkoeffizient S (englisch shape factor) nur geometrische Größen enthält und $(t_2 - t_1)$ das treibende Temperaturgefälle bedeutet.

Unter den gemachten Voraussetzungen ist der Formkoeffizient S_e der exzentrischen Isolierung durch den folgenden Ausdruck, dessen Ableitung hier übergangen sei, gegeben:

$$S_e = \frac{2 \pi l}{\operatorname{arcosh} [(r_1^2 + r_2^2 - e^2)/2 r_1 r_2]} \tag{2}$$

Darin bedeuten l die Rohrlänge und arcosh die Area-Kosinusfunktion, die Umkehrfunktion der hyperbolischen Kosinusfunktion, die in Tafelwerken tabelliert ist. Zur Funktion des natürlichen Logarithmus besteht die Beziehung

$$\operatorname{arcosh} x = \ln \; [x + (x^2 - 1)^{1/2}] \tag{3}$$

wenn x ein beliebiges Argument ist. Für die Exzentrizität $e = o$ entsteht die konzentrische Rohrisolierung. Setzt man in Gl. (2) $e = o$ und benutzt Gl. (3), so erhält man für den Formkoeffizienten S_k der konzentrischen Rohrisolierung den wohlbekannten Ausdruck

$$S_k = \frac{2 \pi l}{\ln (r_1/r_2)} \tag{4}$$

der sich natürlich auch direkt hätte ableiten lassen.

Durch Vergleich zwischen den Gleichungen (2) und (4) läßt sich die Erhöhung des Wärmeverlustes durch die Exzentrizität berechnen. Es ist aber vorteilhafter, den Radius r_1 und die Exzentrizität e durch Größen zu ersetzen, die bequemer zu handhaben sind. Wir führen ein:

Isolierdicke der
konzentrischen Isolierung $b = r_1 - r_2$
Relative Exzentrizität $\varepsilon = e/b$.

Mit diesen Größen erhält man für das Verhältnis der beiden Formkoeffizienten S_e und S_k den Ausdruck

$$\frac{S_e}{S_k} = \frac{\ln(1 + b/r_2)}{\operatorname{arcosh}\left[1 + \frac{1 - \varepsilon^2}{(1 + r_2/b)\, 2r_2/b}\right]} \qquad (5)$$

Nach dieser Gleichung ist das Verhältnis S_e / S_k nur eine Funktion der relativen Exzentrizität $\varepsilon = e/b$ und der relativen, auf den Rohrradius r_2 bezogenen Isolierdicke b/r_2.

In praktischen Fällen dürfte der Bereich von b/r_2 zwischen 0,4 und 2,4 liegen. Das bedeutet zum Beispiel, daß man im allgemeinen ein Rohr von 50 mm Durchmesser nicht stärker als 60 mm und ein Rohr von 100 mm Durchmesser nicht schwächer als 20 mm isolieren wird. Der technisch wichtige Bereich dürfte damit erfaßt sein. Das Verhältnis S_e / S_k, also die relative Erhöhung des Wärmeverlustes einer Rohrleitung, verursacht durch die Exzentrizität der Isolierung, ist in Zahlentafel 1 wiedergegeben und in Bild 2 für die beiden Extremwerte $b/r_2 = 0{,}4$ und 2,4 dargestellt. Es zeigt sich, daß S_e / S_k nur wenig von der relativen Isolierdicke b/r_2 abhängt.

Wichtiger ist aber die Feststellung, daß der Wärmeverlust bei mäßigen Exzentrizitäten im ganzen Bereich von b/r_2 nur sehr geringfügig erhöht wird. Bei $\varepsilon = 20$ Prozent steigt der Wärmeverlust nur um 2 Prozent an, und selbst bei $\varepsilon = 40$ Prozent, ein für praktische Fälle bereits undiskutabler Wert, wird der Wärmeverlust nur 8 bis 9 Prozent höher als bei konzentrischer Isolierung. Erst bei höheren Werten von ε steigt der Wärmeverlust stark an und erreicht bei $\varepsilon = 1$ den Wert unendlich, weil sich hierbei nach unseren Voraussetzungen zwei Isothermen berühren würden. Das Rechenergebnis zeigt, daß mäßige Exzentrizitäten ohne weiteres hingenommen werden können, solange die Voraussetzung erfüllt ist, daß die Wärmeleitfähigkeit überall gleich ist.

Unsere Betrachtungen lassen sich auch auf die Messung der Wärmeleitfähigkeit von Isolierstoffen in einem Versuchsrohr anwenden. Hierbei wird der Wärmestrom Φ und das Temperaturgefälle $(t_2 - t_1)$ gemessen und die Wärmeleitfähigkeit λ aus der aus Gl. (1) folgenden Beziehung

$$\lambda = \frac{\Phi}{S\,(t_2 - t_1)} \qquad (6)$$

berechnet. Bei gleichen gemessenen Werten von Φ und $(t_2 - t_1)$ erhält man für den konzentrischen und exzentrischen Fall verschiedene Werte von λ, die nach Gl. (6) durch die Beziehung

$$\lambda_e / \lambda_k = S_k / S_e \qquad (7)$$

gegeben sind. Ist die Versuchsapparatur aus irgendeinem Grunde nicht vollständig exakt zentriert, ohne daß der Bearbeiter es bemerkt, so wird zur Berechnung von λ nach Gl. (6) der Formkoeffizient S_k benutzt, obwohl der Wert $S_e > S_k$ angewendet werden müßte. Nach Gl. (7) wird damit die Wärmeleitfähigkeit λ zu groß berechnet. Die Zahlenwerte von Zahlentafel 1 zeigen, daß in praktischen Fällen keine Exzentrizitäten auftreten können, die einen nennenswerten Einfluß auf die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit λ haben.

Zusammenfassung: Der Wärmeverlust exzentrischer Rohrisolierungen läßt sich exakt berechnen. Ein Vergleich mit dem Fall der konzentrischen Isolierung zeigt, daß praktisch mögliche Exzentrizitäten nur einen sehr geringen Einfluß auf den Wärmeverlust haben und unbedenklich hingenommen werden können. Auch der mögliche Einfluß der Exzentrizität auf die Messung der Wärmeleitfähigkeit bleibt in praktischen Fällen zu vernachlässigen.

Zahlentafel 1

Verhältnis S_e / S_k nach Gl. (5) als Funktion von ε und b/r_2

ε	b/r_2			
	0,4	1,0	1,6	2,4
0	1	1	1	1
0,1	1,01	1,01	1,00	1,00
0,2	1,02	1,02	1,02	1,02
0,3	1,05	1,05	1,05	1,04
0,4	1,09	1,09	1,09	1,08
0,5	1,15	1,15	1,15	1,14
0,6	1,25	1,24	1,24	1,23
0,7	1,40	1,38	1,38	1,36
0,8	1,67	1,65	1,63	1,61
0,9	2,29	2,26	2,22	2,18
1	∞	∞	∞	∞

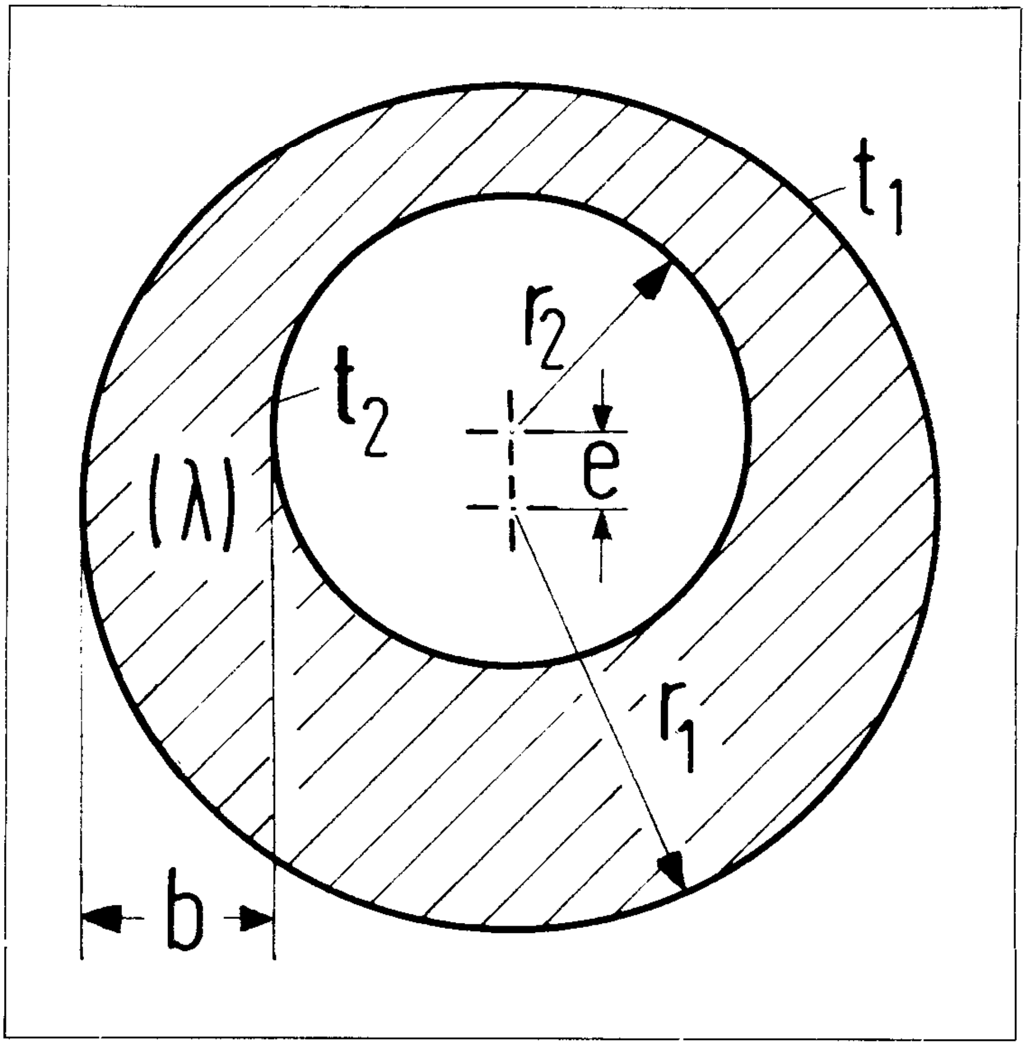

Bild 1. Exzentrische Rohrisolierung.

r_1 und r_2 Radien des Isoliermantels und des Rohres; t_1 und t_2 Oberflächentemperaturen; e Exzentrizität; $b = r_1 - r_2$ Isolierdicke der konzentrischen Isolierung.

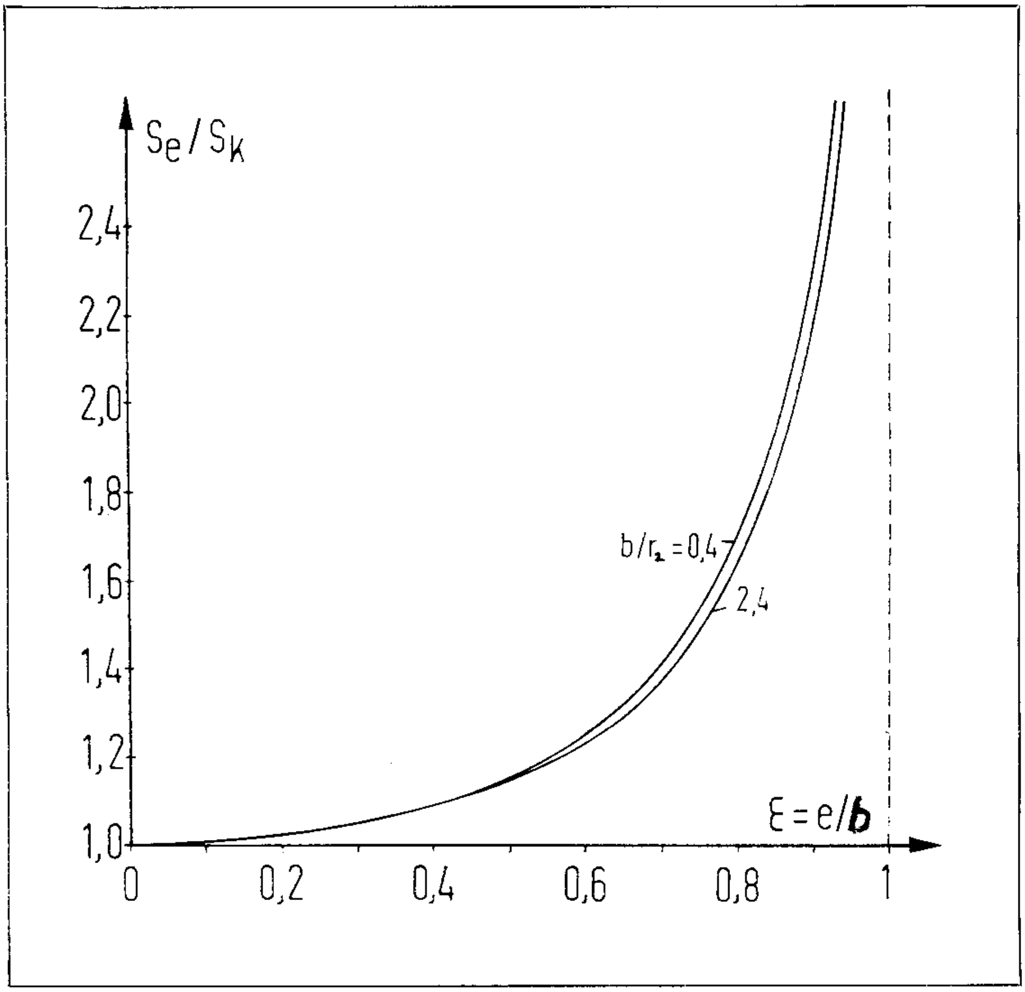

Bild 2. Verhältnis der Formkoeffizienten S_e und S_k bei exzentrischer und konzentrischer Rohrisolierung als Funktion der relativen Exzentrizität $\varepsilon = e/b$ mit den Werten $b/r_2 = 0{,}4$ und $2{,}4$ als Parameter.

Die Lieferung der Umschlaghüllen für die Jahre 1967 68 erfolgt mit einer der nächsten Nummern.