

Wärmeverluste isolierter Rohrleitungen

Von Dr.-Ing. U. GRIGULL VDI, Bohle & Cie. GmbH, Köln

Sonderdruck aus

BWK

Brennstoff-Wärme-Kraft

Bd. 3 (1951), H. 8, S. 253/258

Die Arbeitsblätter 17 und 18 sind dem Heft Nr. 9 entnommen

DEUTSCHER INGENIEUR-VERLAG GMBH., DÜSSELDORF

Wärmeverluste isolierter Rohrleitungen

Von Dr.-Ing. **U. Grigull** VDI, Bohle & Cie. GmbH, Köln



Zur Lösung der hier behandelten Aufgabe der Wärmeschutztechnik mußte man bisher die Oberflächentemperatur der Isolierung entweder schätzen oder gesondert bestimmen. Es wird ein Verfahren mitgeteilt, das die gesuchte Lösung unmittelbar ergibt.

Den Wärmeverlust eines isolierten Rohres zu ermitteln, erscheint auf den ersten Blick als einfache Aufgabe, die längst mit aller wünschenswerten Genauigkeit und Bequemlichkeit gelöst sein müßte. Eine eingehendere Betrachtung zeigt aber, daß das Problem keineswegs einfach ist, weil alle drei Arten der Wärmeausbreitung daran beteiligt sind: durch den Isolierstoff dringt die Verlustwärme durch Wärmeleitung und teilt sich dann auf der Isolierungsoberfläche durch Konvektion und Strahlung der Umgebung mit. Es sei davon abgesehen, daß auch die „Wärmeleitung“ durch den Isolierstoff aus Leitung, Konvektion und Strahlung bestehen kann.

Diese drei Einzelvorgänge gehorchen ganz verschiedenen Gesetzen, und es ist daher nicht gelungen, den Wärmeverlust durch eine einzige Gleichung von der Form

$$q = f(d_1, d_a, \lambda, t_1, t_2, w, C_a, C_2) \dots (1)$$

darzustellen. Insbesondere liegt die Schwierigkeit darin, daß die äußere Wärmeübergangszahl α u. a. auch von der

Übertemperatur der äußeren Isolierungsoberfläche über die Umgebung abhängt. Diese Übertemperatur ist aber zunächst nicht bekannt, und so läßt sich die Gleichung für den Verlustwärmestrom einer isolierten Rohres je Einheit der Rohrlänge (z. B. in kcal/m h)

$$q = \frac{\pi(t_1 - t_2)}{\frac{1}{\alpha d_a} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_a}{d_i}} \dots (2)$$

nicht auf die Form der Gl. (1) bringen, da

$$\alpha = f(t_a, t_2, d_a, w, C_a, C_2) \dots (3)$$

ist.

Seiner großen technischen Bedeutung wegen ist dieses Problem oftmals im Schrifttum behandelt worden, und man hat gewöhnlich zwei Wege eingeschlagen, um die mitgeteilte Schwierigkeit zu umgehen: Man schätzt zunächst die äußere Oberflächentemperatur, bestimmt damit die Wärmeübergangszahl α und prüft nachträglich die Richtigkeit der Schätzung; oder man bestimmt α und damit $(t_a - t_2)$ durch einen besonderen Rechnungsgang und ermittelt q aus dem reinen Wärmeleitungsvorgang im Inneren der Isolierung nach der Gleichung

$$q = \frac{2\pi\lambda(t_1 - t_a)}{\ln(d_a/d_i)} \dots (4)$$

Dieses Verfahren hat auch Cammerer¹⁾ angewandt und zu einem übersichtlichen Rechnungsgang ausgebaut. Er bestimmt zunächst die von ihm eingeführte Isolierkonstante

$$I = \frac{\ln(d_a/d_i)}{2\lambda} \dots (5)$$

und entnimmt die äußere Übertemperatur $(t_a - t_2)$ einem Diagramm als Funktion von $(t_1 - t_2)$ und $1/d_a I$. Danach wird q nach Gl. (4) ermittelt. Ein im Prinzip gleiches Verfahren benutzt auch Steinemann²⁾.

Borschke³⁾ weist nach, daß die nachträgliche Berichtigung einer geschätzten Übertemperatur $(t_a - t_2)$ schon in wenigen Schritten zum Ziele führt, und entwirft auf dieser Grundlage ein Diagramm zur Bestimmung der Wärmeverluste q , die bei ihm auf den m^2 äußere Isolierungsfläche bezogen sind.

Fertige Tabellen mit Wärmeverlusten für den technischen Bereich von Rohrdurchmessern und Isolierdicken rechnete W. Jürges⁴⁾ aus. Für den praktischen Gebrauch muß man zwischen den runden Werten der Wärmeleitahlen und Rohrtemperaturen interpolieren.

Nach einem Vorschlag von Jakob⁵⁾ führen die VDI-Regeln⁶⁾ den Fall des isolierten Rohres auf den der ebenen Wand zurück. Die Krümmung der Oberfläche wird durch einen Durchmesserfaktor berücksichtigt, ferner werden Temperatur- und Windfaktoren eingeführt. Cammerer⁷⁾ hat diese Methode später übernommen.

Im folgenden wird ein Verfahren mitgeteilt, das die Wärmeverluste des isolierten Rohres ohne Schätzung der Oberflächentemperatur aus einem Diagramm abzulesen gestattet. Es beruht auf der graphischen Lösung einer Doppelgleichung und ist auch für andere Fälle der zusam-

Formelzeichen	Benutzte Einheiten	Bedeutung
a	m ² /h	Temperaturleitzahl
C_a	kcal/m ² h °K ⁴	Strahlungszahl der Isolierungsoberfläche
C_s	kcal/m ² h °K ⁴	Strahlungszahl des schwarzen Körpers ($C_s = 4,96$)
C', C_2	kcal/m ² h °K ⁴	Strahlungszahl des Austauschs bzw. der Umgebung
c_p	kcal/kg grd	spez. Wärme bei konstantem Druck
D	m	Durchmesser des umgebenden Raumes
d_a	m	Außendurchmesser der Isolierung
d_i	m	Innendurchmesser der Isolierung gleich Außendurchmesser des Rohres
g	m/h ²	Erdbeschleunigung ($g = 127,1 \cdot 10^6$ m/h ²)
H	m	senkrechte Höhe einer ebenen Wand
I	m h grd/kcal	Isolierkonstante
K	°K ³	Temperaturfaktor der Strahlung
q	kcal/m h	Wärmeverlust des isolierten Rohres je Längeneinheit
q_k	kcal/m h	Wärmeverlust durch Konvektion
q_s	kcal/m h	Wärmeverlust durch Strahlung
q'	kcal/m ² h	Wärmeverlust des Rohres oder der ebenen Wand, bezogen auf die Flächeneinheit
s	m	Isolierdicke des Rohres oder der Wand
t_1	°C	Temperatur des im Rohr strömenden Stoffes
t_2	°C	Temperatur der Umgebungsluft
t_a	°C	Temperatur der Isolierungsoberfläche
t_i	°C	Temperatur des Rohres (hier stets gleich t_1 gesetzt)
t_m	°C	Mitteltemperatur $(t_a + t_2)/2$ für den äußeren Wärmeübergang
T_a, T_2, T_m	°K	absolute Temperaturen
w	m/s bzw. m/h	Windgeschwindigkeit
α	kcal/m ² h grd	äußere Wärmeübergangszahl
α_k, α_s	kcal/m ² h grd	Wärmeübergangszahlen der Konvektion bzw. der Strahlung
β	1/grd	therm. Ausdehnungszahl
γ	kg/m ³	Wichte
λ	kcal/m h grd	Wärmeleitzahl
ν	m ² /h	kinematische Zähigkeit

Gr = $g\beta(t_a - t_2)d_a^3/\nu^2$ Grashof'sche Zahl Pr = ν/a Prandtl'sche Zahl
 Nu = $\alpha d_a/\lambda$ Nusselt'sche Zahl Re = $w d_a/\nu$ Reynold'sche Zahl
 (Bei der ebenen Wand ist die Höhe bzw. Länge als maßgebende Abmessung einzusetzen)

1) J. S. Cammerer: Der Wärmeverlust isolierter Rohrleitungen. Mitt. Forschungsbereich f. Wärmeschutz, H. 2. 2. Aufl., München 1928.

2) A. Steinemann: Über die schnelle Ermittlung der Druck- und Wärmeverluste in Dampfleitungen und Ventilen. AEG-Mitt. 1923, S. 278/82 u. 300/03.

3) E. Borschke: Neues Verfahren zur graphischen Bestimmung von Wärmeverlusten. Selbstverlag der Deutschen Priiform-Werke, Köln 1928.

4) Wärme- und Kälteverluste isolierter Rohrleitungen und Wände. Hrsg. von Grünzweig & Hartmann GmbH., Berlin 1928.

5) M. Jakob: Zur Definition der Wärmewiderstände. Z. ges. Kälte-Ind. Bd. 34 (1927) S. 141.

6) Regeln für die Prüfung von Wärme- und Kälteschutz-Anlagen. Berlin 1930.

7) J. S. Cammerer: Der Wärme- und Kälteschutz in der Industrie. Berlin 1935.

mengesetzten Wärmeübertragung mit Vorteil anzuwenden. Wie bei allen oben erwähnten Methoden soll auch hier der innere Wärmeübergangsvorgang außer Acht bleiben; die Rohrtemperatur t_1 wird also stets der Temperatur des strömenden Stoffes t_1 gleichgesetzt. Das geschilderte Verfahren ließe sich im übrigen auch auf die Wärmeübertragung im Rohr anwenden.

Theoretische Grundlagen

Im Beharrungszustand müssen der Wärmestrom durch die Isolierung und der durch die Isolierungsoberfläche gleich groß sein. Es läßt sich also, unter Benutzung der Isolierkonstanten I nach Gl. (5), schreiben:

$$\frac{\pi(t_1 - t_a)}{I} = q = \alpha \pi d_a (t_a - t_2) \quad (6).$$

In dieser Doppelgleichung ist t_a unbekannt, was zu der eingangs erwähnten Schwierigkeit führt. Andererseits ist aber $(t_1 - t_a) + (t_a - t_2)$ gleich dem gegebenen Gesamttemperaturgefälle $(t_1 - t_2)$ zwischen Rohr und Umgebung.

Unser Verfahren besteht nun darin, daß wir die beiden Hälften der Doppelgleichung (6) gleichzeitig und unter Einführung des gegebenen Gesamt-Temperaturgefälles graphisch lösen. Bild 1 veranschaulicht diese Methode. Die rechte Diagrammseite enthält die Gleichung

$$q = \frac{\pi(t_1 - t_a)}{I} \quad (7)$$

mit der Isolierkonstanten $I = \ln(d_a/d_i) / 2\lambda$ als Parameter. Es entsteht also ein Strahlenbüschel, das durch den Nullpunkt geht. Im linken Diagrammteil ist die Gleichung

$$q = \alpha \pi d_a (t_a - t_2) \quad (8)$$

dargestellt, wobei d_a als Parameter benutzt wird. Beide Diagrammseiten haben als gemeinsame Ordinate

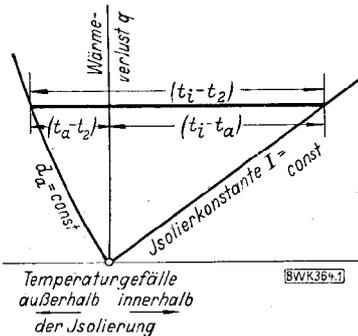


Bild 1. Verfahren zur graphischen Lösung der Doppelgleichung der Wärmestromdichte Gl. (6).

die Wärmeverluste q . Wenn nun auch der Wert von t_a in beiden Einzeldiagrammen unbekannt ist, so gibt es doch einen und nur einen Wert von $(t_1 - t_2) = (t_1 - t_a) + (t_a - t_2)$, der die Doppelgleichung (6) befriedigt. Es ist also derjenige Wert von q aufzusuchen, für den der Betrag $(t_1 - t_2)$ gerade zwischen die vorgegebenen Werte d_a und I hineinpaßt. Diese letzteren spielen also die Rolle von Leitkurven. Die beiden Abschnitte von $(t_1 - t_2)$, die durch die Ordinate q abgeteilt werden, ergeben die Temperaturgefälle innerhalb und außerhalb der Isolierung und damit gleichzeitig auch den Wert von t_a , der auf diese Weise ohne Benutzung eines weiteren Diagramms gefunden ist.

Die rechte Seite des Diagramms nach Bild 1 ist nun völlig unabhängig von den Wärmeübergangszuständen der linken Seite und bleibt für beliebige Außenzustände (ruhende und bewegte Luft, hohe und niedrige Strahlungszahlen usw.) immer gleich. Andererseits ist die Funktion der Wärmeübergangszahl der linken Diagrammseite keinerlei Beschränkungen unterworfen und darf beliebig kompliziert sein, wenn es die Gesetze der Wärmeübertragung erfordern. Insbesondere ist einer analytischen Lösung zuliebe keine Vereinfachung notwendig, wie sie einige der zitierten Autoren vornehmen mußten. Dadurch ist der Gesamtbereich eines solchen Diagramms nicht mehr eingengt.

Die Wärmeübergangszahlen

Freie Konvektion (ruhende Luft)

Es ist allgemein üblich, Innenleitungen so zu berechnen, als ob sich die Umgebungsluft nur durch natürlichen Auftrieb bewegt; man sieht also von Zugluft durch offene Türen und Fenster stets ab.

Aus einer großen Zahl von Beobachtungen an waagerechten Rohren leitet *McAdams*⁸⁾ folgende Gleichung ab:

$$Nu = 0,53 (Gr \cdot Pr)^{1/4} \quad (9).$$

Als kennzeichnende Länge ist der äußere Isolierungsdurchmesser d_a zu benutzen; ferner sind die Stoffwerte bei der Mitteltemperatur t_m zwischen Isolierungsoberfläche und

Zahlentafel 1. Stoffwerte von trockener Luft bei 760 Torr.

Mitteltemperatur t_m °C	0	10	20	30	40	50	60	70
Wärmeleitfähigkeit* λ kcal/m h grd	0,0204	0,0210	0,0216	0,0222	0,0228	0,0234	0,0240	0,0246
Temperaturleitfähigkeit* α m ² /h	0,0654	0,0700	0,0743	0,0787	0,0834	0,0883	0,0932	0,0983
Kinemat. Zähigkeit** ν m ² /h	0,0476	0,0508	0,0540	0,0574	0,0608	0,0643	0,0678	0,0715
f (t_m) d. Gl. (10) kcal/m ^{7/4} h grd ^{5/4}	1,19	1,18	1,17	1,16	1,15	1,13	1,12	1,11

*) *M. ten Bosch*: Die Wärmeübertragung. Berlin 1936, S. 257.

**) *J. D'Ans u. E. Laz*: Taschenbuch für Chemiker u. Physiker. Berlin 1943, S. 1110.

Umgebungsluft einzusetzen, wie es im amerikanischen Schrifttum üblich ist (film temperature $t_m = (t_a + t_2)/2$). Die Ausdehnungszahl für Luft ist hier $\beta = 1/T_m$. Löst man die dimensionslosen Kennzahlen der Gl. (9) auf, so erhält man

$$\alpha_k = f(t_m) \cdot \left(\frac{t_a - t_2}{d_a}\right)^{1/4} \quad (10).$$

Der Ausdruck $f(t_m) = 0,53 \lambda \left(\frac{g}{T_m \nu \alpha}\right)^{1/4}$ ändert sich innerhalb des Temperaturbereichs von 0 bis 60° C etwas mit der Mitteltemperatur t_m , wie aus Zahlentafel 1 hervorgeht, in die auch die Stoffwerte von Luft bei 760 Torr eingetragen sind.

Gl. (10) gilt nur für laminare Strömung um den Isolierungsmantel. Nimmt man wie bei der senkrechten Platte an, daß der laminare Bereich⁹⁾ für Luft ($Pr = 0,73$) etwa bis $Gr = 2,5 \cdot 10^9$ reicht, so würden dicke Rohre mit hoher Isolierdicke schon in das turbulente Gebiet fallen. Andererseits gibt *McAdams*⁸⁾ gerade für größere Durchmesser um etwa 10% kleinere Wärmeübergangszahlen an. Man muß also annehmen, daß der Turbulenzbeginn die mittlere Wärmeübergangszahl um das Rohr noch nicht merklich verändert; Gl. (10) wurde daher für den ganzen technischen Bereich beibehalten.

Es muß beachtet werden, daß weder die Oberflächen-temperatur t_a noch die Wärmeübergangszahl α_k über den Umfang konstant sind. Es handelt sich also hier stets um Mittelwerte. Die Schlierenaufnahmen von *E. Schmidt*¹⁰⁾ und ihre Auswertung zeigen anschaulich, wie sich t_a und α_k über den Umfang ändern.

Strahlung

Der Wärmeverlust der Isolierungsoberfläche durch Strahlung je Einheit der Rohrlänge beträgt:

$$q_s = \pi d_a C' \left[\left(\frac{T_a}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right] \quad (11),$$

worin die Konstante des Strahlungsaustausches C' durch

$$C' = \frac{1}{C_a} + \frac{d_a}{D} \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_s} \right)$$

8) *W. H. McAdams*: Heat Transmission. 2. Aufl., New York u. London 1942.

9) *O. A. Saunders*: Natural convection in liquids. Proc. Roy. Soc. London (A) Bd. 172 (1939) S. 55/71.

10) *E. Schmidt*: Schlierenaufnahmen des Temperaturfeldes in der Nähe wärmeabgebender Körper. Forsch. Ing.-Wes. Bd. 3 (1932) S. 131/89.

gegeben ist. Da gewöhnlich der Durchmesser des umschließenden Raumes $D \gg d_a$ ist, so wird in unserem Falle $C' = C_a$.

Es ist der bequemeren Rechnung wegen üblich, auch für den Strahlungsanteil eine Wärmeübergangszahl α_s an Stelle der Gl. (11) einzuführen. Sie ist durch folgende Gleichung definiert:

$$q_s = \alpha_s \pi d_a (t_a - t_2) \dots \dots \dots (12).$$

Aus Gl. (11) und (12) entnimmt man, daß diese Wärmeübergangszahl

$$\alpha_s = C_a \left[\left(\frac{T_a}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] / (t_a - t_2) = C_a \cdot K \dots (13)$$

sein muß. Der Temperaturfaktor K hängt also nur von t_a und t_2 ab, Zahlentafel 2. Man könnte auch den Wärmeverlust durch eine Potenz von $(t_a - t_2)$ wiederzugeben versu-

chen¹¹⁾, jedoch gelingt das nur für einen kleinen Bereich von $(t_a - t_2)$ näherungsweise. Dagegen sind Gl. (12) und (13) völlig exakte Schreibweisen des Stefan-Boltzmannschen Gesetzes gemäß Gl. (11).

Die Strahlungszahl C_a hängt stark von der Beschaffenheit des Isoliermantels ab. Sie liegt für Bandagen aus Dachpappe usw. sowie für die meisten Lackanstriche (mit Ausnahme von Metallbronzen) in der Nähe der Strahlungszahl des schwarzen Körpers ($C_s = 4,96 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ \text{K}^4$), jedoch für verzinkte und verbleite

Zahlentafel 2. Temperaturfaktor der Strahlung K .

t_a [°C]	K [°K ³]	
	$t_2 = 0^\circ \text{C}$	$t_2 = 20^\circ \text{C}$
10	0,860	—
20	0,906	1,006
30	0,959	1,065
40	1,008	1,111
50	1,066	1,172
60	1,124	1,234
70	1,182	1,293
80	1,247	1,361
90	1,310	1,427
100	1,379	1,497

Bleche auch nach etwaiger Oxydation erheblich darunter. Nun hat man es in der Praxis meist mit starken Verschmutzungen des Isoliermantels durch Ruß und Staub zu tun. Daher wurde im folgenden mit einer Strahlungszahl $C_a = 4,0 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ \text{K}^4$ gerechnet.

Nimmt man an, daß die umgebenden Körper die Temperatur der Umgebungsluft haben, kann man die Wärmeübergangszahlen der Konvektion und der Strahlung addieren und erhält für die Gesamt-Wärmeübergangszahl

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_s \dots \dots (14).$$

Erzwungene Konvektion (Wind)

Bei Freileitungen ist es üblich, als Mittelwert des jährlichen Windes eine Queranströmung mit einer Geschwindigkeit von 5 m/s anzunehmen bei einer Umgebungstemperatur von 0°C. Damit entstehen Reynoldszahlen von $Re = 40\,000$ bis $400\,000$, für die sich nach den Messungen von *Hilpert*¹²⁾ die Wärmeübergangsgleichung schreiben läßt:

$$Nu = 0,024 Re^{0,8} \left(\frac{T_a}{T_2} \right)^{1/4} \dots (15).$$

Der Temperaturfaktor dient dazu, die gemessenen Werte auf andere Oberflächen- und Umgebungstemperaturen beziehen zu können. Sein Einfluß ist von *Hilpert* nur bis $Re = 4\,000$ untersucht worden, während die Messungen bei $t_a \approx 100^\circ \text{C}$ bis $Re = 400\,000$ ausgedehnt wurden. Gleichwohl soll Gl. (15) hier als gültig angesehen werden. Für die Stoffwerte in den Kennzahlen setzte *Hilpert* die integralen Mittelwerte zwischen t_a und t_2 ein, während wir die Werte bei der Temperatur $(t_a + t_2)/2$ benutzen wollen.

Löst man die Kennzahlen der Gl. (15) auf, so erhält man für die Wärmeübergangszahl

$$\alpha_k = 0,024 \frac{\lambda w^{0,8}}{d_a^{0,2} \nu^{0,8}} \left(\frac{T_a}{T_2} \right)^{1/4} \dots (16).$$

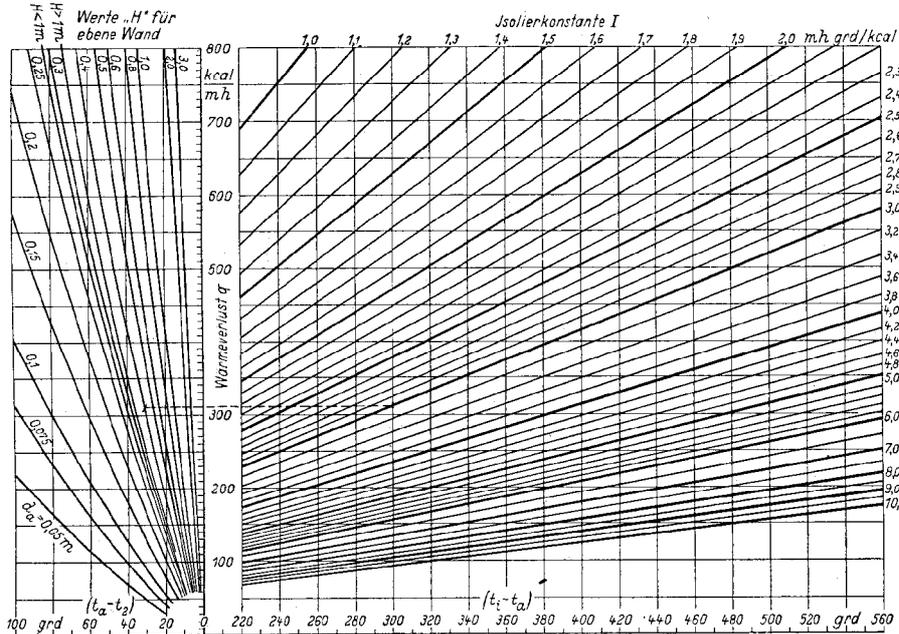


Bild 2. Wärmeverlust isolierter Innenleitungen. Lufttemperatur $t_2 = 20^\circ \text{C}$, ruhende Luft; $C_a = 4,0 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ \text{K}^4$.

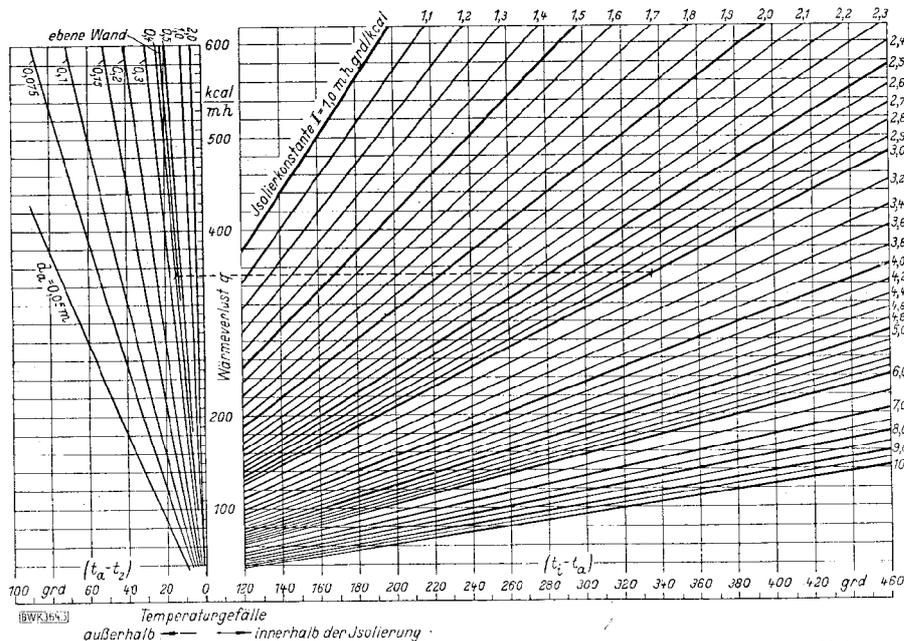


Bild 3. Wärmeverlust isolierter Außenleitungen. Lufttemperatur $t_2 = 0^\circ \text{C}$, Wind 5 m/s. $C_a = 4,0 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ \text{K}^4$.

¹¹⁾ A. Mondiez: Les lois de la transmission de la chaleur et le chauffage des lieux habités. Chal. et Ind. Bd. 31 (1950) S. 43/54, 65/75 u. 91/100.

¹²⁾ R. Hilpert: Wärmeabgabe von geheizten Drähten und Rohren im Luftstrom. Forsch. Ing.-Wes. Bd. 4 (1933) S. 215/24.

Mit $w = 5 \text{ m/s}$, $T_2 = 273^\circ \text{K}$ und den Stoffwerten der Zahlentafel 1 läßt sich für Mitteltemperaturen der Luft von 5 bis 50°C Gl. (16) auch schreiben:

$$\alpha_k = 13,9/d_a^{0,2} [\text{kcal/m}^2 \text{h grad}] \quad \dots (17),$$

wobei d_a in [m] einzusetzen ist und der Zahlenwert keine größeren Abweichungen als 2% zeigt. Die Wärmeübergangszahl kann also in diesem Bereich, im Einklang mit Feststellungen früherer Autoren, als von der Mitteltemperatur unabhängig betrachtet werden.

Unter den Voraussetzungen des vorigen Abschnitts muß zu dieser konvektiven Wärmeübergangszahl α_k noch die der Strahlung α_s addiert werden, womit dann die gesamte Wärmeabgabe der Isolieroberfläche an die Umgebung

$$q = (\alpha_k + \alpha_s) \pi d_a (t_a - t_2) \quad \dots (18)$$

wird.

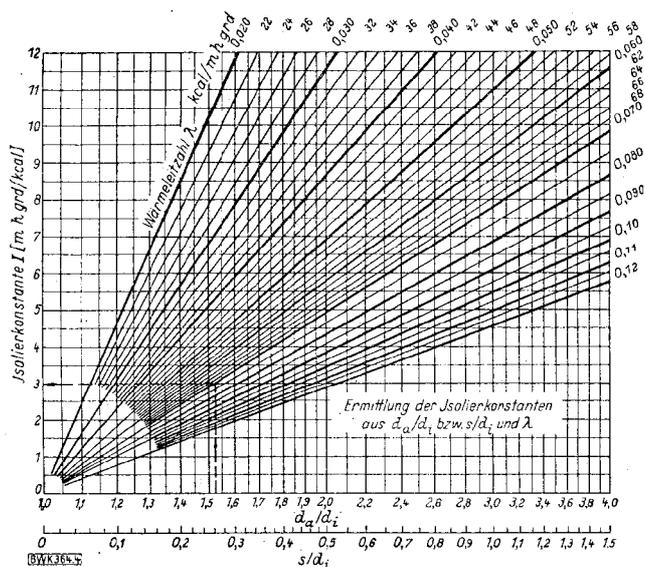


Bild 4. Diagramm zur Ermittlung der Isolierkonstanten $I = \ln(d_a/d_i)/2\lambda$ [m h grad/kcal], s [m] = Isolierdicke.

Graphische Darstellung

Für die praktische Anwendung des Verfahrens eignet sich am besten die lineare Darstellung gemäß Bild 1. Zur Erhöhung der Ablesegenauigkeit war es zweckmäßig, den Nullpunkt der rechten Diagrammhälfte zu unterdrücken, wodurch man gleichzeitig die Fläche besser ausnutzen konnte. Bild 2 zeigt das Schaubild für freie Konvektion (ruhende Luft) von 20°C , gibt also die Wärmeverluste einer Innenleitung wieder. Bild 3 gilt für Wind von 5 m/s quer zum Rohr und eine Lufttemperatur von 0°C , also für eine Außenleitung. In beiden Fällen ist angenommen, daß sich die Umgebung auf jeweils derselben Temperatur wie die Luft befindet. Als Strahlungszahl wurde in beiden Fällen $C_a = 4,0 \text{ kcal/m}^2 \text{h}^\circ \text{K}^4$ eingesetzt¹³.

Da die rechte Diagrammseite (bei gleichem Maßstab) ungeändert bleibt, kann man für die linke Seite auch beliebige andere Zustände zugrunde legen, wenn es die besonderen Umstände erfordern, insbesondere auch den Fall, daß die Gegenstände der Umgebung eine andere Temperatur als die der umgebenden Luft haben. Dazu muß nur die Gl. (8) bzw. (18) entsprechend abgeändert werden.

Will man die Wärmeverluste beim Rohr auf den m^2 äußere Isolieroberfläche beziehen, so ließe sich auch dafür ein entsprechendes Diagramm zeichnen, bei dem der Parameter der rechten Seite ($d_a \cdot I$) ist, entsprechend der Gleichung

$$q' = (t_1 - t_a)/d_a I.$$

¹³ Es sei hier der Vorschlag gemacht, diese beiden Umgebungszustände für Innen- bzw. Außenleitungen in einer künftigen Neu-Auflage der VDI-Regeln zur einheitlichen Anwendung zu empfehlen. Sie haben sich ohnehin schon weitgehend eingebürgert und stellen gute Durchschnittswerte dar.

Da jedoch häufiger nach dem Wärmeverlust je lfd. m Rohrlänge gefragt ist, bleiben wir bei der Darstellung nach Bild 1.

Um in die Diagramme Bild 2 und 3 eingehen zu können, muß man noch die Isolierkonstante $I = \ln(d_a/d_i)/2\lambda$ kennen. Zu ihrer Ermittlung kann Bild 4 dienen, in dem I als Funktion von (d_a/d_i) bzw. s/d_i dargestellt ist; die Wärmeleitfähigkeit λ dient als Parameter. In halblogarithmischer Darstellung ergeben die Kurven $\lambda = \text{const}$ ein Strahlenbüschel durch den Nullpunkt der Ordinate. Zwischen den beiden Skalen der Abszisse besteht die Beziehung

$$(d_a/d_i) = 1 + 2(s/d_i)^{14},$$

Praktische Anwendung des Verfahrens

Ermittlung der Wärmeverluste und der Übertemperatur der Isolieroberfläche

Folgende Werte sind gegeben:

- Rohraußendurchmesser d_i ;
- Isolierdicke s ;
- Betriebs-Wärmeleitfähigkeit des Isolierstoffs bei der zu erwartenden Mitteltemperatur λ ;
- Rohrtemperatur t_1 ;
- Lufttemperatur t_2 .

Aus diesen Werten werden errechnet:

- Außendurchmesser der Isolierung $d_a = d_i + 2s$;
- Isolierkonstante $I = \ln(d_a/d_i)/2\lambda$, die nach Bild 4 ermittelt werden kann;
- Temperaturgefälle $(t_1 - t_2)$.

Aus Bild 2 für Innenleitungen bzw. Bild 3 für Außenleitungen wird nun der Wärmeverluststrom q je m Rohrlänge entnommen, und zwar auf folgende Weise: Man sucht den Ordinatenwert q auf, für den die Strecke $(t_1 - t_2)$ im Diagrammaußmaß gerade zwischen die zugehörigen Parameterwerte für d_a (links) und I (rechts) hineinpaßt. Dazu nimmt man zweckmäßig die Strecke $(t_1 - t_2)$ in einen Stechzirkel und verschiebt dessen Spitzen mit Hilfe eines (durchsichtigen) Lineals parallel zur Abszissenachse, bis man die zusammengehörenden Werte d_a , I und $(t_1 - t_2)$ gefunden hat. Das Lineal schneidet dann die Ordinate im gesuchten Wert q . Da der Nullpunkt der rechten Abszissen in Bild 2 und 3 unterdrückt ist, muß die Spannung des Stechzirkels um den weggelassenen Teil kleiner sein, man mißt also die Strecke $(t_1 - t_2)$ am einfachsten vom Fußpunkt der Ordinatenachse aus nach rechts.

Gleichzeitig können auch die Werte $(t_a - t_2)$ im linken und $(t_1 - t_a)$ im rechten Diagrammteil abgelesen werden, so daß man sofort sagen kann, welcher Anteil des Gesamtgefälles $(t_1 - t_2)$ innerhalb und welcher außerhalb der Isolierung liegt. Damit ist auch die Oberflächentemperatur der Isolierung t_a ermittelt.

Ein Zahlenbeispiel soll die Anwendung des beschriebenen Verfahrens erläutern:

Gegeben sei eine Rohrleitung vom äußeren Durchmesser $d_i = 0,267 \text{ m}$, die mit einer Isolierung von $s = 0,07 \text{ m}$ Isolierdicke und der Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,070 \text{ kcal/m h grad}$ versehen werden soll (äußere Strahlungszahl $C_a = 4,0 \text{ kcal/m}^2 \text{h}^\circ \text{K}^4$). Daraus errechnet sich $s/d_i = 0,262$ bzw. $d_a/d_i = 1,524$, womit aus Bild 4 eine Isolierkonstante $I = 3,0 \text{ m h grad/kcal}$ ermittelt wird. Die Rohrtemperatur betrage $t_1 = 350^\circ \text{C}$, so daß für eine Innenleitung $(t_1 - t_2) = 330 \text{ grad}$ wird. Diese Strecke (verkürzt um den unterdrückten Temperaturbereich) muß nun in Bild 2 zwischen die Parameter $I = 3,0 \text{ m h grad/kcal}$ (rechts) und $d_a = d_i + 2s = 0,407 \text{ m}$ (links) gelegt werden und schneidet die Ordinate im gesuchten Wert des Wärmeverlustes $q = 314 \text{ kcal/m h}$. Außerdem liest man auf den Abschnitten des Gesamt-Temperaturgefälles $(t_1 - t_2)$ die Einzelbeträge $(t_1 - t_a) = 300 \text{ grad}$ und $(t_a - t_2) = 30 \text{ grad}$ ab, woraus sich $t_a = 50^\circ \text{C}$ errechnet (Lufttemperatur $t_2 = 20^\circ \text{C}$).

¹⁴ Die Isolierkonstante I kann auch nach dem Nomogramm Tafel III bei Cammerer (Fußnote 1) bestimmt werden.

Handelt es sich um eine Außenleitung, die sich in Luft von $t_2 = 0^\circ\text{C}$ mit einer Geschwindigkeit von 5 m/s quer zum Rohr befindet, so muß der Wärmeverlust nach Bild 3 ermittelt werden. Man erhält dabei mit dem Gesamt-Temperaturgefälle $(t_1 - t_2) = 350\text{ grd}$ einen Wärmeverlust $q = 352\text{ kcal/m h}$ und eine Temperatur der Isolierungsoberfläche $t_a = 14^\circ\text{C}$, entsprechend den Abschnitten $(t_1 - t_a) = 336\text{ grd}$ und $(t_a - t_2) = 14\text{ grd}$. Das behandelte Zahlenbeispiel ist in die Bilder 2, 3 und 4 eingezeichnet¹⁵.

Ermittlung der Isolierdicke bei vorgegebenem Wärmeverlust

Handelte es sich bisher darum, den Wärmeverlust eines Rohres bei den gegebenen Werten d_a , s , λ und $(t_1 - t_2)$ zu ermitteln, so ist auch die umgekehrte Aufgabe leicht zu lösen: Wie stark muß man eine bestimmte Leitung isolieren, um einen vorgegebenen Wärmeverlust nicht zu überschreiten? Dies Problem hat für Fernleitungen besondere Bedeutung. Dazu erhält man für einen bestimmten Ordinatenwert q durch waagerechtes Verschieben der Strecke $(t_1 - t_2)$ eine Reihe zusammengehörender Wertepaare d_a und I , aus denen sich dann rückwärts über das Diagramm, Bild 4, die notwendige Isolierdicke s ermitteln läßt, nachdem der Rohrdurchmesser der Leitung festgelegt ist.

Weitere Anwendungen

Auch eine Reihe anderer Fragen läßt sich beantworten. So gilt im Kesselbau mitunter die „Faustregel“, daß die äußere Übertemperatur der Isolierung nicht über 40 grd betragen darf. Die vorgesehene Isolierdicke ist dann mit diesem Wert $(t_a - t_2)$ leicht auf diese Bedingung zu überprüfen. Ähnlich läßt sich ein reiner Berührungsschutz für nur zeitweise benutzte Leitungen festlegen, wie es z. B. für Entwässerungsleitungen, Ausblasleitungen für Sicherheitsventile usw. oft verlangt wird. Von der Aufzählung weiterer Anwendungsbeispiele sei abgesehen.

Ebene Wand

Auch dieser Fall läßt sich durch das geschilderte Verfahren behandeln. An die Stelle der Doppelgleichung (6) tritt hier die Gleichung

$$\frac{\lambda}{s} (t_1 - t_a) = q' = \alpha (t_a - t_2) \dots (19),$$

worin der Wärmeverlust auf die Flächeneinheit bezogen ist. Wir können also auch hier Bild 1 zur Lösung benutzen, wenn im rechten Diagrammteil als Parameter $\pi s/\lambda$ anstelle von I verwendet wird und der Ordinatenmaßstab die Dimension $[\text{kcal/m}^2\text{h}]$ bekommt. Dann sind auch Bild 2 und 3 benutzbar¹⁶.

Bei freier Konvektion läßt sich die Wärmeübergangszahl für die ebene senkrechte Wand nach Schmidt und Beckmann¹⁷ durch die Gleichung

$$\alpha_k = 4,80 \left(\frac{t_a - t_2}{T_2 H} \right)^{1/4} [\text{kcal/m}^2\text{h grd}] \dots (20)$$

wiedergeben, die für laminare Grenzschicht bis zu Temperaturdifferenzen von 115 grd bei 760 Torr Barometerstand bestätigt ist. Beschränkt man sich auf Plattenhöhen von $H = 1\text{ m}$, so liegen die meisten technischen Fälle im laminaren Bereich.

Der Turbulenzeintritt ist bei der senkrechten Platte eindeutiger als beim waagerechten Rohr. Oberhalb

¹⁵ Die Bilder 1, 3 und 4 sind im vergrößerten Maßstab auf den BWK-Arbeitsblättern 15 und 16 wiedergegeben.

¹⁶ Die in H. 9 dieser Zeitschrift erscheinenden BWK-Arbeitsblätter 17 u. 18 geben Bild 2 für Innenleitungen wieder zusammen mit einem Diagramm, das bis $(t_1 - t_a) = 220\text{ grd}$ reicht für genaueres Arbeiten im unteren Temperaturbereich.

¹⁷ Vgl. U. Grigull: Oberflächentemperatur und Wärmeverlust. Wärmeschutz u. Kälteschutz, Beilage zu Haustechn. Rundschau, Mai 1951.

¹⁸ E. Schmidt u. W. Beckmann: Das Temperatur- und Geschwindigkeitsfeld vor einer Wärme abgebenden senkrechten Platte bei natürlicher Konvektion. Forsch. Ing.-Wes. (Techn. Mech. Thermodyn.) Bd. 1 (1930) S. 341/49 u. 391/406.

$\text{Gr} = 2,5 \cdot 10^9$ für Luft ist die Wärmeübergangszahl gegeben durch¹⁸)

$$\text{Nu} = 0,12 (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{1/3} \dots (21).$$

Löst man die Kennzahlen auf, so erhält man für den hier interessierenden Bereich mit genügender Genauigkeit

$$\alpha_k = 1,2 (t_a - t_2)^{1/3} [\text{kcal/m}^2\text{h grd}] \dots (22).$$

Die Wärmeübergangszahl ist also bei turbulenter Grenzschicht und freier Konvektion von der Plattenhöhe unabhängig.

In Bild 2 wurden gemäß den Gl. (20) und (22) auch die Kurven für die ebene Wand eingezeichnet, von denen die eine bis zu einer senkrechten Höhe von rd. 1 m, die andere für größere Plattenhöhen gelten sollen.

Bei erzwingener Konvektion benutzen wir für die Wärmeübergangszahl eine von ten Bosch¹⁹) aufgestellte Gleichung

$$\frac{\text{Nu}}{\text{Re Pr}} = \frac{\alpha}{w c_p \gamma} = 0,0019 \dots (23),$$

die für den Übergangsbereich von $\text{Re} = 10^5$ bis 10^7 gilt, der auch gerade für uns von Interesse ist. In die Kennzahlen ist dabei die Plattenlänge in Windrichtung einzusetzen. Da die rechte Seite von Gl. (23) konstant ist, bedeutet das, daß die Wärmeübergangszahl von der Länge der Wand im betrachteten Bereich annähernd unabhängig ist. Für eine Windgeschwindigkeit von 5 m/s = 18 000 m/h läßt sich Gl. (23) auch schreiben

$$\alpha_k = 34,2 \cdot c_p \cdot \gamma [\text{kcal/m}^2\text{h grd}] \dots (24).$$

Mit dieser Gleichung wurde die Kurve für die ebene Wand bei 760 Torr in Bild 3 eingezeichnet. Bei der Anwendung ist auf den geänderten Ordinatenmaßstab und die neue Bedeutung des Parameters im rechten Teil zu achten gemäß Gl. (19). Der Anteil der Strahlung α_s wurde zu Gl. (20), (22) und (24) gemäß den Ausführungen des Abschnitts „Strahlung“ (S. 4) addiert.

Die Gleichungen für die ebene Wand sind auch für das senkrechte Rohr zu verwenden, solange der Durchmesser d_a groß gegen die Grenzschichtdicke ist, was in technischen Fällen immer angenommen werden kann. Zur Umrechnung auf den m Rohrlänge dient die Gleichung

$$q = q' \pi d_a.$$

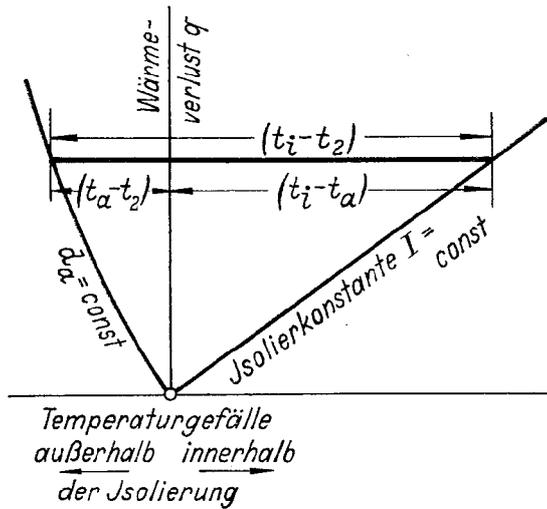
Zusammenfassung

Eine geschlossene Lösung für den Wärmeverlust des isolierten Rohres scheidet daran, daß die äußere Wärmeübergangszahl u. a. von der zunächst unbekanntem Oberflächentemperatur abhängt. Nach der mitgeteilten Methode wird die Doppelgleichung der Kontinuität der Wärmestromdichte unter Einführung des Gesamttemperaturgefälles zwischen Rohr und Außenluft graphisch gelöst. Hierbei kann das genaue Gesetz des Wärmeübergangs ohne Vernachlässigungen beibehalten werden. Als Parameter für die graphische Lösung dienen der äußere Isolierungsdurchmesser d_a und die Isolierkonstante $I = \ln(d_a/d_i)/2\lambda$. Die Oberflächentemperatur der Isolierung wird gleichzeitig ohne besonderen Aufwand mitbestimmt. Neben dem Aufsuchen des Wärmeverlustes lassen sich auch andere Aufgaben der Wärmeschutztechnik lösen, z. B. das Einhalten eines vorgegebenen Wärmeverlustes oder einer bestimmten Oberflächentemperatur. Auch die Wärmeverluste einer ebenen Wand lassen sich ermitteln, wobei die Parameter und der Ordinatenmaßstab ihre Bedeutung ändern, wenn dasselbe Diagramm beibehalten wird.

Die mitgeteilte Methode läßt sich auch für andere Probleme der zusammengesetzten Wärmeübertragung anwenden und ist nach entsprechender Anpassung auch für den Wärmedurchgang sowie für andere Austauschvorgänge brauchbar. BWK 364

¹⁸ M. Fishenden u. O. A. Saunders: An Introduction to Heat Transfer. Oxford 1950, S. 97.

¹⁹ M. ten Bosch: Die Wärmeübertragung. Berlin 1936, S. 147.



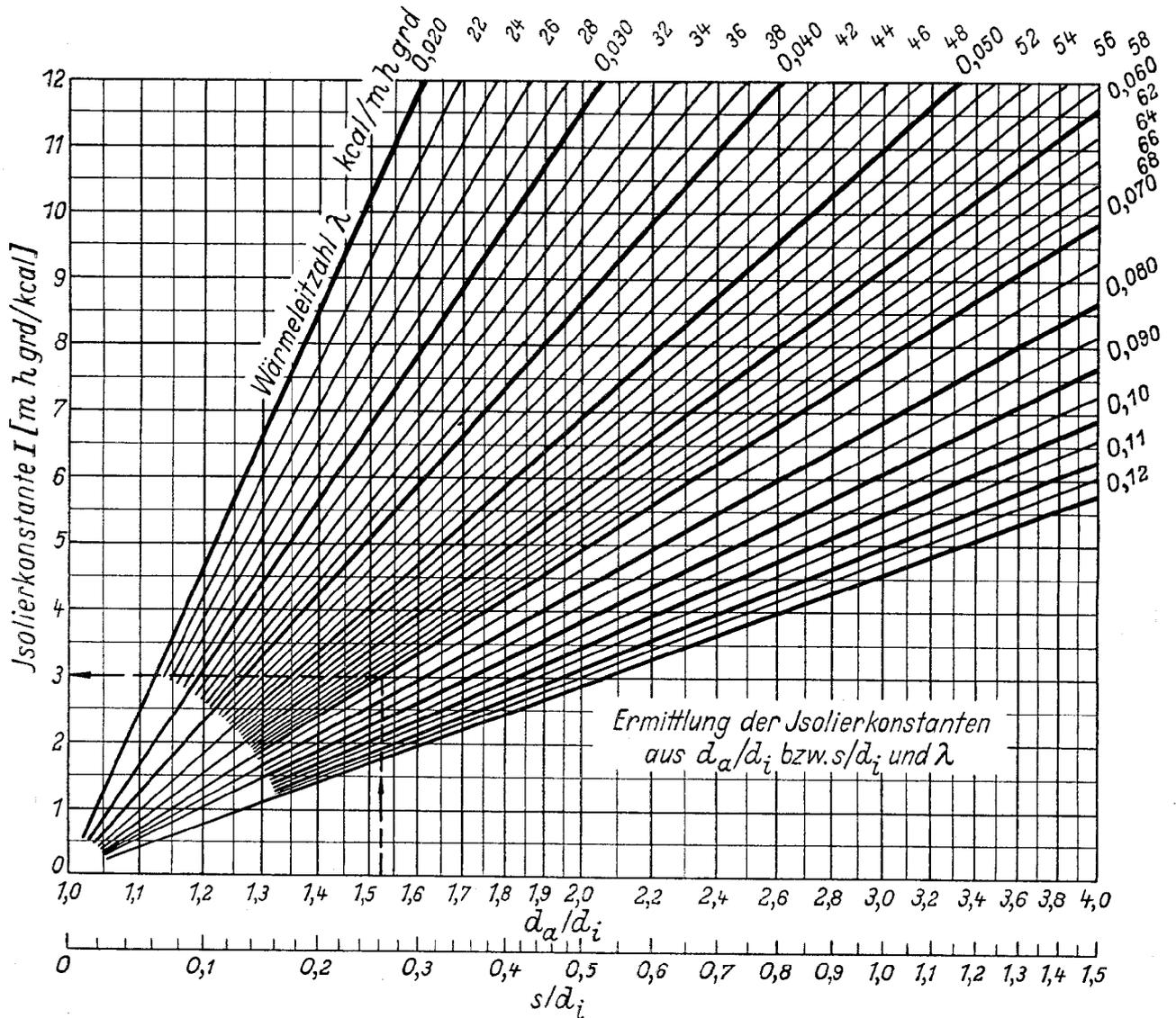
Graphische Lösung der Doppelgleichung

$$\pi (t_i - t_a) / l = q = \alpha \pi d_a (t_a - t_2)$$

$$\text{mit } (t_i - t_2) = (t_i - t_a) + (t_a - t_2)$$

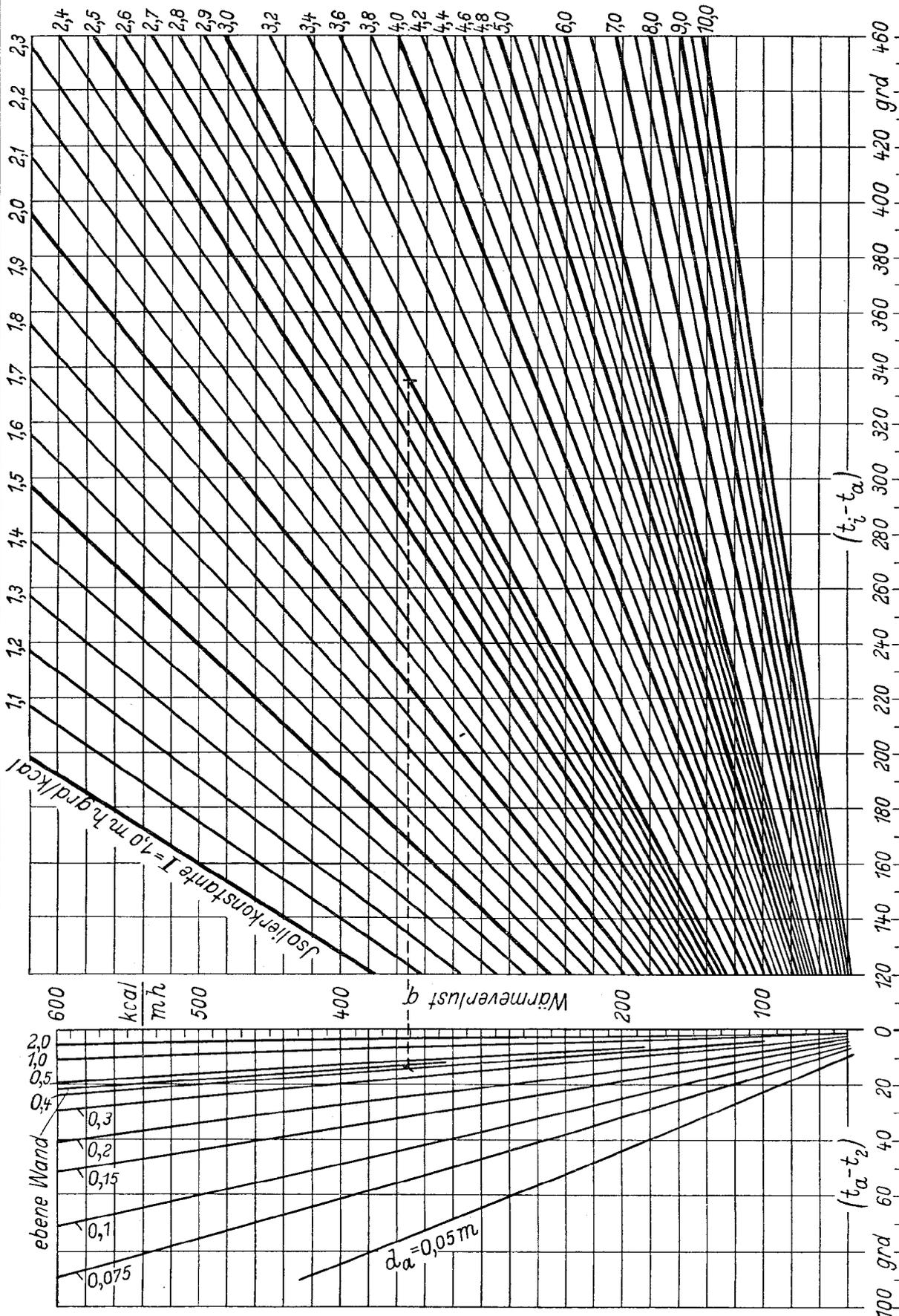
Abkürzungen:

- q kcal/m h Wärmeverlust je Längeneinheit
- t_i °C Rohrtemperatur
- t_a °C Außentemperatur der Isolierung
- t₂ °C Lufttemperatur
- d_i m Rohrdurchmesser
- d_a m Außendurchmesser der Isolierung
- s m Isolierdicke
- l m h grd/kcal Isolierkonstante
- λ kcal/m h grd Wärmeleitzahl



Beispiel: Gegeben $d_i = 0,267$ m $s = 0,07$ m $\lambda = 0,07$ kcal/m h grd $t_i = 350^\circ$ C.
Mit $s/d_i = 0,262$ ermittelt man aus dem unteren Diagramm $I = 3,0$ m h grd/kcal.
Es ist ferner $d_a = d_i + 2s = 0,507$ m.
Der Wärmeverlust wird nach dem Schema oben links bestimmt (vgl. das umseitige Arbeitsblatt 16).

Nachdruck, auch auszugsweise, nicht gestattet



Beispiel: Gegeben $(t_i - t_2) = 350$ grad, außerdem $l = 3,0 \text{ m h grad/kcal}$ und $d_a = 0,407 \text{ m}$ (vgl. das umseitige Arbeitsblatt 15).
Damit ergibt sich aus obigem Diagramm:
Wärmeverlust $q = 352 \text{ kcal/m h}$ und
Außentemperatur der Isolierung $t_a = 14^\circ\text{C}$.

Temperaturgefälle
außerhalb \leftarrow innerhalb der Isolierung

Nachdruck, auch auszugsweise, nicht gestattet

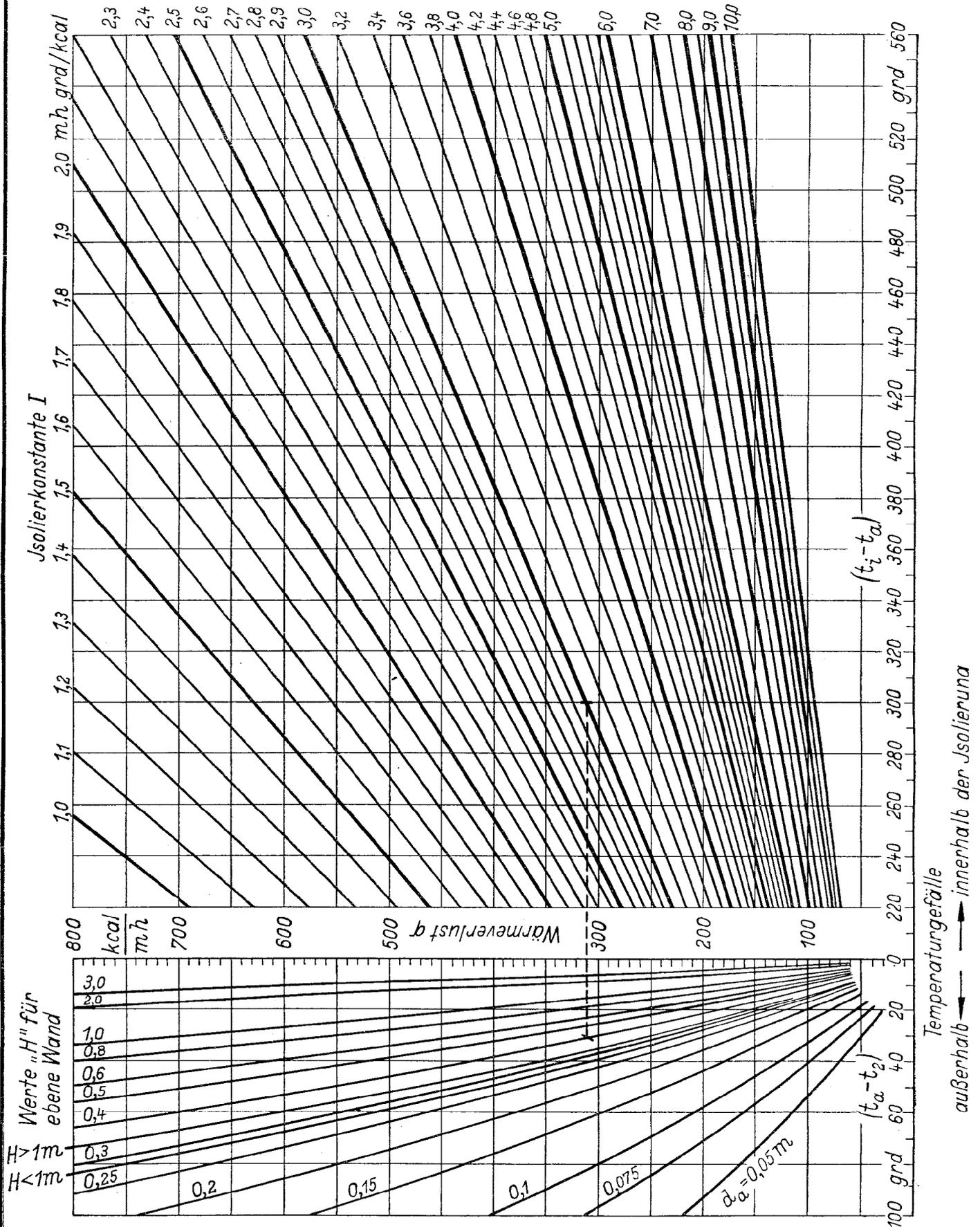
DK
536.2:
621.643

Wärmeverluste isolierter Innenleitungen

Lufttemperatur $t_2 = 20^\circ\text{C}$, ruhende Luft
Temperaturgefälle in der Isolierung bis 560 grad

BWK
Arbeitsblatt 1'

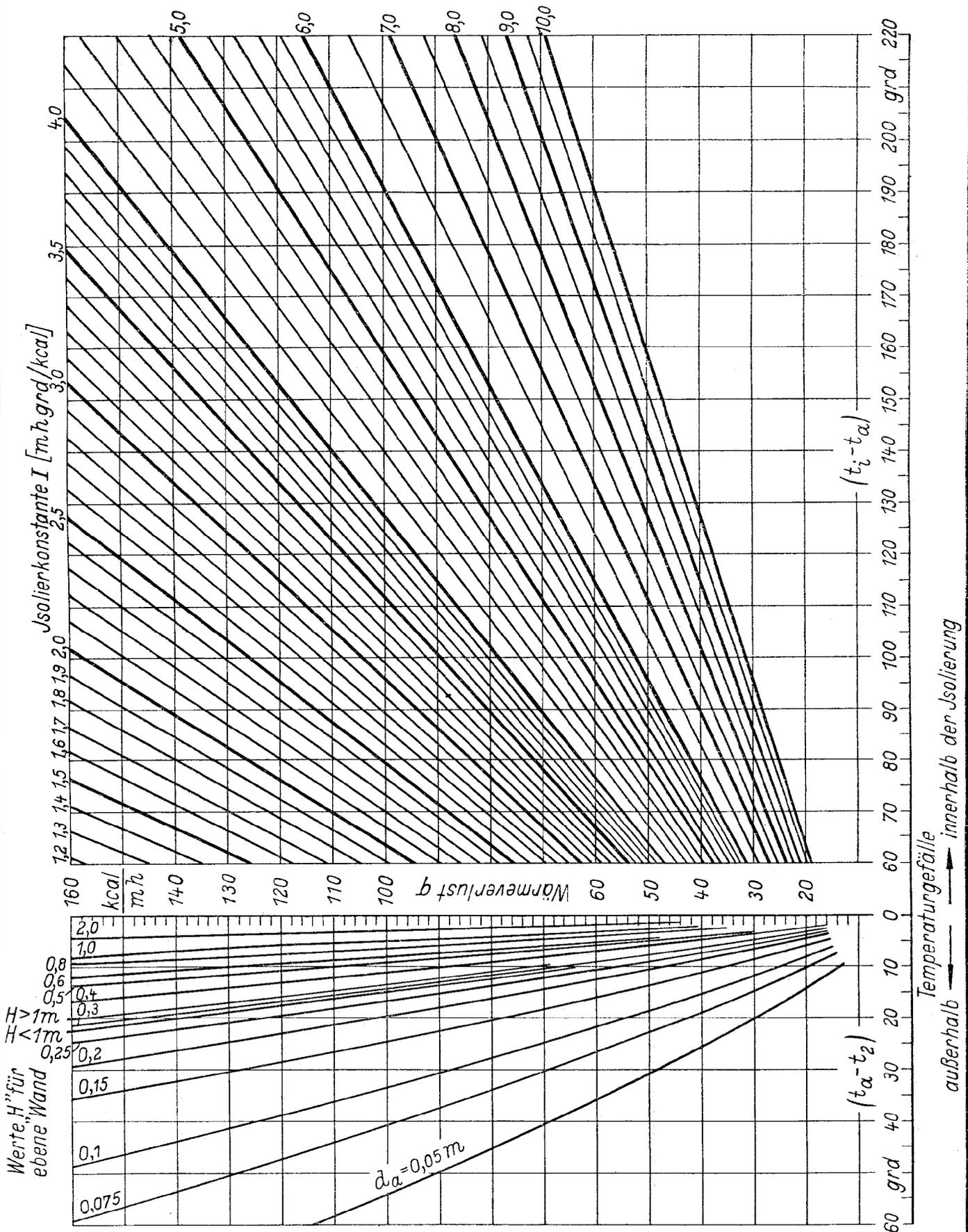
Nachdruck, auch auszugsweise, nicht gestattet



September
1951

Vergrößerte Wiedergabe von Bild 2 aus: Wärmeverluste isolierter Rohrleitungen. BWK Bd. 3 (1951) S. 253/58.

U. Grigull



Nachdruck, auch auszugsweise, nicht gestattet