Ein Vorschlag zur rationellen Berechnung von Wärmeübergangskoeffizienten bei Kondensation reinen Wasserdampfes an senkrechten Wänden

Dr. sc. techn. B. GLUCK
VEB Kombinat Technische Gebäudeausrüstung – Institut

Die Berechnung von dampfseitigen Wärmeübergangskoeffizienten α_D erfordert wegen der notwendigen Iterationen und des manuellen Rechenumfangs großen Aufwand. Besonders arbeitsintensiv sind das Aufsuchen und die Interpolationen der Stoffwerte sowie das Potenzieren mit unterschiedlichen Exponenten. Da die Stoffwerte temperaturabhängig sind, muß der genannte Ablauf bei jedem Iterationsschritt wiederholt werden.

Bei Anwenden der maschinellen Rechentechnik bereitet die Verarbeitung der zahlreichen Stoffwerte ebenfalls Schwierigkeiten. Um das Abspeichern von Tabellen sowie das Interpolieren zu vermeiden, werden die Stoffwerte im allgemeinen in Form von Approximationsgleichungen eingegeben. Das Aufstellen derartiger Gleichungen ist einerseits ebenfalls aufwendig, zum anderen addieren sich die relativen Abweichungen der einzelnen Näherungsgleichungen möglicherweise bei der Verknüpfung zum eigentlichen Berechnungsterm.

Zur Vereinfachung, Rechenzeiteinsparung und Erhöhung der Genauigkeit wurden die temperaturabhängigen Stoffwerte und die Konstanten gemäß den bekannten Berechnungsgleichungen verknüpft. Im einzelnen gelten für die Kondensation von ruhendem Sattdampf bei laminar ablaufendem Kondensatfilm nach *Nusselt*

$$\alpha_D = 0{,}943 \left[\frac{\lambda^3 \varrho^2 \Delta h_V g}{\eta \Delta\vartheta H}\right]^{0{,}25}, \tag{1}$$

bei turbulent ablaufendem Kondensatfilm nach *Grigull*

$$\alpha_D = 0{,}003 \left[\frac{\lambda^3 \varrho^2 g H \Delta\vartheta}{\eta^3 \Delta h_V}\right]^{0{,}5}. \tag{2}$$

Als Umschlagpunkt wird eine kritische *Reynolds*zahl von etwa 350 angegeben. Dies entspricht einem Gültigkeitsbereich der Gl. (1) von

$$\frac{\lambda H \Delta\vartheta}{\eta \Delta h_V} \sqrt[3]{\frac{g}{\nu^2}} \leqq 2680\,. \tag{3}$$

Es bedeuten:

λ — Wärmeleitkoeffizient in W/mK
ϱ — Dichte in kg/m³
Δh_V — Verdampfungsenthalpie in J/kg
η — dynamische Viskosität in kg/ms
ν — kinematische Viskosität in m²/s
g — 9,81 m/s²
H — Höhe der senkrechten Wand in m
$\Delta\vartheta$ — Temperaturdifferenz zwischen Sattdampftemperatur t_s und Wandtemperatur

Die genannten Werte sind für die flüssige Phase bei mittlerer Kondensatfilmtemperatur

$$t = t_s - \frac{\Delta\vartheta}{2} \tag{4}$$

einzusetzen.

Zur Abkürzung der Berechnung werden folgende Funktionen definiert:

$$K = 0{,}943 \left(\frac{\lambda^3 \varrho^2 \Delta h_V g}{\eta}\right)^{0{,}25} \tag{5}$$

$$L = 0{,}003 \left(\frac{\lambda^3 \varrho^2 g}{\eta^3 \Delta h_V}\right)^{0{,}5} \tag{6}$$

$$M = \frac{\lambda}{\eta \Delta h_V} \sqrt[3]{\frac{g}{\nu^2}} \tag{7}$$

Die Ergebnisse der Gln. (5) bis (7) sind in den Bildern 1 bis 3 wiedergegeben. Diese Kurven können durch quadratische Funktionen approximiert werden. Sie lauten:

$$K = 7036{,}5 + 64{,}025\,t - 0{,}1825\,t^2 \tag{8}$$

$$L = -264 + 8{,}046\,t + 0{,}01896\,t^2 \tag{9}$$

$$M = -3{,}696 + 0{,}14675\,t + 0{,}00414\,t^2 \tag{10}$$

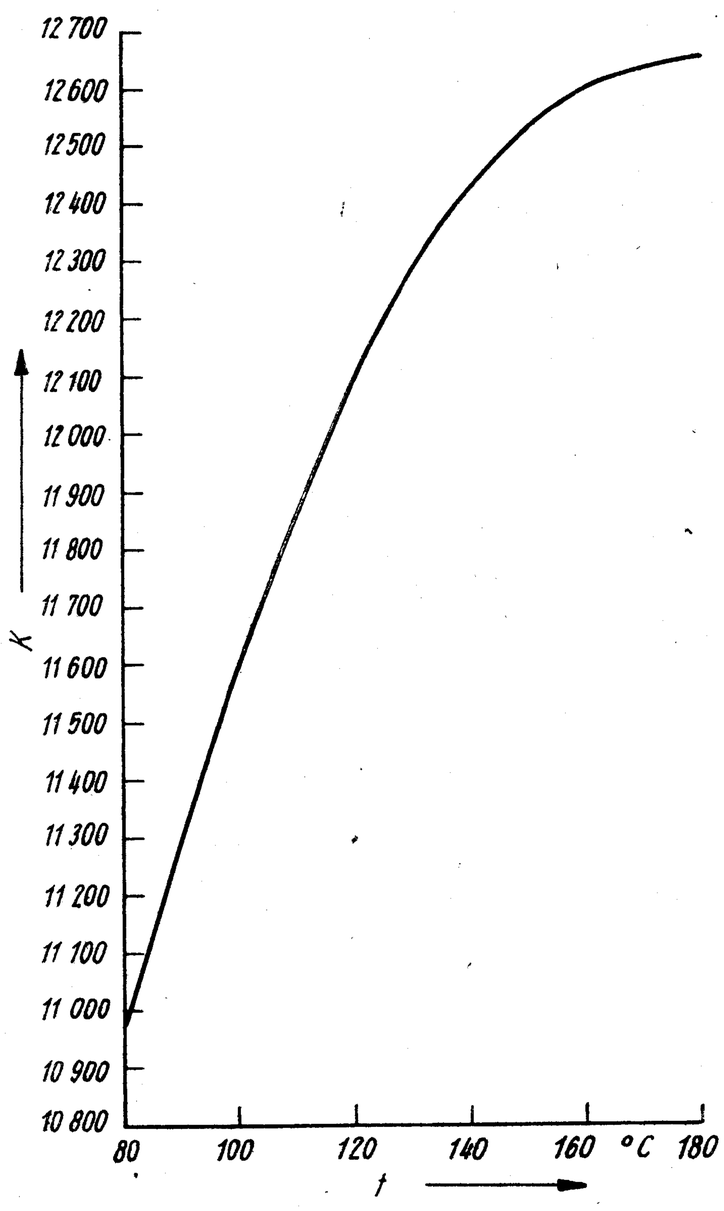
Im Bereich von $t = 80$ °C bis $t = 180$ °C liegen die relativen Fehler zwischen 0 . . . 1 Prozent. Diese Genauigkeit ist unter Beachtung der vorhandenen Annahmen völlig ausreichend.

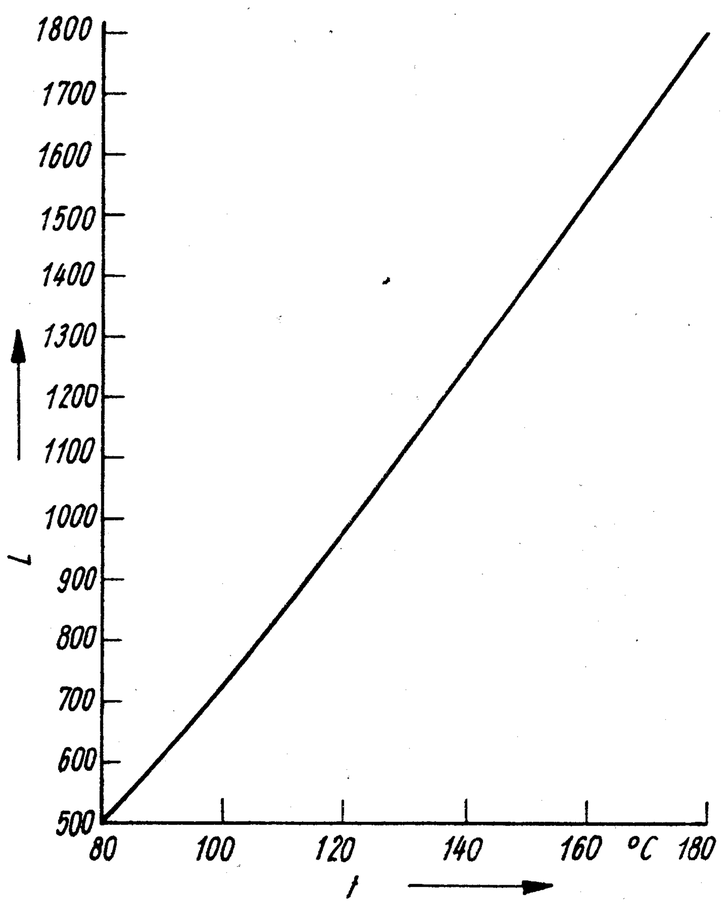
Die Substitution der Funktionen $K = K(t)$, $L = L(t)$ und $M = M(t)$ in die Gln. (1) bis (3) ergibt die Gleichungen

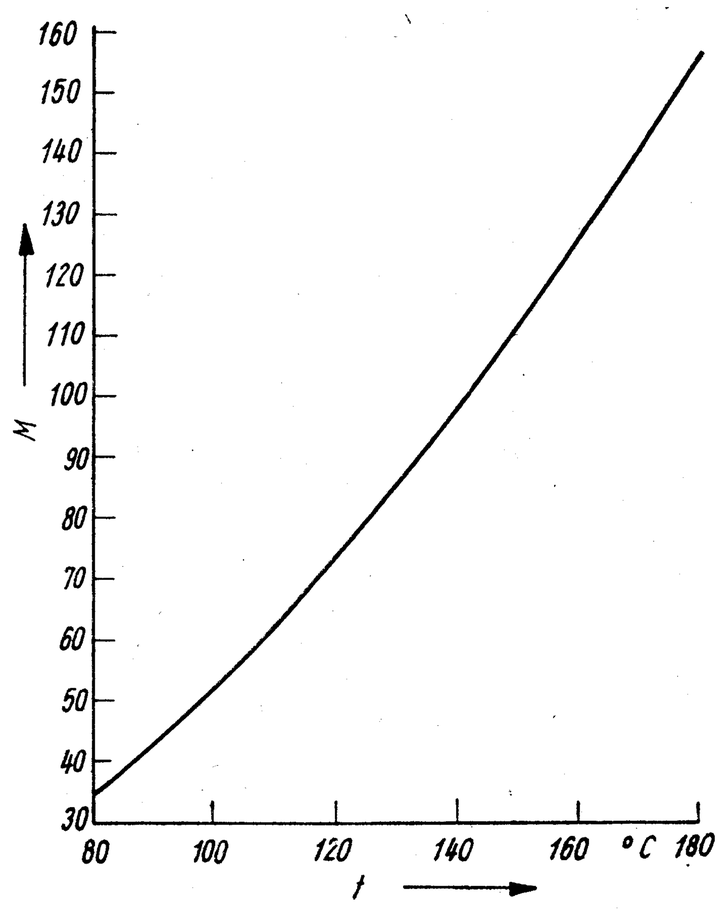
$$\alpha_D = \frac{K}{(\Delta\vartheta H)^{0{,}25}} \tag{11}$$

$$\alpha_D = L\,(\Delta\vartheta H)^{0{,}5} \tag{12}$$

$$M\,(\Delta\vartheta H) \leqq 2680\,. \tag{13}$$







Um die Wandtemperatur berechnen zu können, muß Kenntnis über den Wärmedurchgangskoeffizienten k und über die Temperatur t_W des Kühlmediums herrschen. Es gilt für die ebene Wand der Wärmedurchgangskoeffizient

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_W} + R + \frac{1}{\alpha_D}} \tag{14}$$

und die Wärmebilanz

$$k\,(t_s - t_W) = \alpha_D\,\Delta\vartheta\,. \tag{15}$$

Zur Ermittlung des dampfseitigen Wärmeübergangskoeffizienten wird nachfolgender Ablauf vorgeschlagen:

1. Zusammenstellung der Werte α_W; R; t_s; t_W; H
2. Schätzen von $\Delta\vartheta$, z. B. 10 K
3. Berechnen der mittleren Kondensattemperatur $t = t_s - \frac{\Delta\vartheta}{2}$
4. Bestimmen des Terms $M\,(\Delta\vartheta \cdot H)$ unter Verwendung des Bildes 3
5. Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten:
   bei $M\,(\Delta\vartheta \cdot H) \leqq 2680$ nach
   $$\alpha_D = \frac{K}{(\Delta\vartheta\,H)^{0,25}} \qquad \text{(Verwendung von Bild 1)}$$
   bei $M\,(\Delta\vartheta \cdot H) > 2680$ nach
   $$\alpha_D = L\,(\Delta\vartheta \cdot H)^{0,5} \qquad \text{(Verwendung von Bild 2)}$$
6. Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten
   $$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_W} + R + \frac{1}{\alpha_D}}$$
7. Überprüfung der Temperaturdifferenz
   $$\Delta\vartheta^* = \frac{k}{\alpha_D}\,(t_s - t_W)$$
8. Bei $|\,\Delta\vartheta^* - \Delta\vartheta\,| > 1$ K, $\Delta\vartheta = \Delta\vartheta^*$ setzen und Rücksprung zum Berechnungsschritt 3 (Iteration), sonst Rechnung beendet.

Beispiel:

Ein stehender Wärmeübertrager ist mit Kupferrohren bestückt. Der Wärmeleitwiderstand der Kupferrohre einschließlich einer Inkrustationsschicht beträgt $R = 0{,}00013$ m²K/W. Für den Wärmeübergangskoeffizienten der Kühlmedienseite gilt $\alpha_W = 4717$ W/m²K. Weiterhin sind anzunehmen: $t_s = 165$ °C, $t_W = 90$ °C und $H = 0{,}5$ m.

Die Berechnung erfolgt in Tabellenform nach den angegebenen Schritten:

Schritt	Größe	Iterationen 1.	2.	3.
2.	$\Delta\vartheta$	10	19,3	21,8
3.	t	160	155,4	154,1
4.	$M\,(\Delta\vartheta\,H)$	630	1158	1286
5.	α_D	8426	7132	$\boxed{6912}$
6.	k	2171	2074	2055
7.	$\Delta\vartheta^*$	19,3	21,8	22,3
8.	$\lvert\,\Delta\vartheta^* - \Delta\vartheta\,\rvert$	9,3	2,5	0,5

Der Wert $\alpha_D = 6912$ W/m²K stellt das gesuchte Endergebnis dar.

Anmerkung:

Es besteht auch die Möglichkeit, den Rechengang grafisch zu vollziehen. Der vorgeschlagene Weg führt jedoch bei Verwendung eines Taschenrechners und der Bilder 1 bis 3 schneller zum Ziel, und die Ergebnisse lassen genauere Werte erwarten.

Es ist beabsichtigt, für stehende Wärmeübertrager mit typischen Rohrmaterialien und mittleren Verschmutzungsschichten in Abhängigkeit der thermischen Parameter die Wärmedurchgangskoeffizienten maschinell zu ermitteln und zu tabellieren.