

1 Parallelstromapparate - analytische Berechnung

1.1 Mantelrohrwärmeübertrager

In einem Mantelrohr-Wärmeübertrager (Doppelrohr-Wärmeübertrager), der im Gleichstrom betrieben werden soll, fließt im inneren Rohr (Kernrohr) Kühlwasser (Massenstrom $\dot{m}_k = 1 \text{ kg/s}$, Eintrittstemperatur $T' = 10 \text{ °C}$) und im äußeren Rohr (Mantelrohr) heißes Wasser (Massenstrom $\dot{m}_h = 2 \text{ kg/s}$, Temperatur $T' = 90 \text{ °C}$, $T'' = 60 \text{ °C}$), welches abgekühlt werden soll. Der Wärmedurchgangskoeffizient auf der Innenseite des inneren Rohres (Kernrohr) beträgt $k_i = 3660 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

Hinweis: Die spezifische Wärmekapazität des Kühl- und Heißwassers sei konstante 4200 J/(kg K) .

- a) Wie groß ist der übertragene Wärmestrom \dot{Q} , die Austrittstemperatur T'' des Kühlwassers und die innere wärmeübertragende Fläche des Kernrohres A_i ?
Überprüfen Sie ob der Apparat im Gleichstrom betrieben werden kann.

Fall 1: Der Massenstrom des Heißwassers wird auf $\dot{m}_h = 1 \text{ kg/s}$ reduziert.

- b) Bestimmen Sie die wärmeübertragende Fläche A_i , die Austrittstemperatur des Kühlwassers T'' und den übertragenen Wärmestrom \dot{Q} für eine Gegenstromführung.

Fall 2: Der Kühlwassermassenstrom wird auf $\dot{m}_k = 1.5 \text{ kg/s}$ erhöht, woraus sich auch eine Erhöhung des Wärmedurchgangskoeffizienten auf der Kernrohrinnenseite auf $k_i = 3900 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ergibt. Es wird weiterhin eine Gegenstromführung verwendet.

- c) Welche Austrittstemperaturen ergeben sich für die Arbeitsfluide und welcher übertragene Wärmestrom \dot{Q} stellt sich für den unter a) ausgelegten Wärmeübertragers ein?

Lösung

- a) $A_i = 2.103 \text{ m}^2$; $T_2'' = T_k'' = 70 \text{ °C}$; $\dot{Q} = 252 \text{ kW}$
 b) $A_i = 0.688 \text{ m}^2$, $T_2'' = T_k'' = 40 \text{ °C}$, $\dot{Q} = 126 \text{ kW}$
 c) $T_1'' = T_h'' = 53.634 \text{ °C}$, $T_2'' = T_k'' = 58.488 \text{ °C}$, $\dot{Q} = 305.474 \text{ kW}$

1.2 Kuhmilch

Bauer Moritz Molke will Kuhmilch ($c_{p,m} = 3.94 \text{ kJ/(kg K)}$, $\dot{m}_m = 1 \text{ kg/s}$) von 38 °C auf 8 °C abkühlen. In einem im Gegenstrom betriebenen Wärmeübertrager steht ihm dazu Kühlwasser ($c_{p,w} = 4.18 \text{ kJ/(kg K)}$, $\dot{m}_w = 1.5 \text{ kg/s}$) der Temperatur von 4 °C zur Verfügung.

- a) Welcher Wärmestrom \dot{Q} wird der Milch dabei entzogen?
 b) Mit welcher Temperatur T_w'' tritt das Kühlwasser aus?
 c) Wie groß ist die logarithmisch gemittelte Temperaturdifferenz θ_{\log} ?
 d) Welche Übertragungsfähigkeit $K = kA$ des Wärmeübertragers ist dazu erforderlich?

Lösung

- a) $\dot{Q} = 118.2 \text{ kW}$ b) $T_w'' = 22.85 \text{ °C}$ c) $\theta_{\log} = 8.37 \text{ K}$ d) $K = 14.1 \text{ kW/K}$

1.3 Doppelrohr-Wärmeübertrager

Der im Gegenstrom betriebene Doppelrohr-Wärmeübertrager von Ida Ideenreich besteht aus zwei konzentrischen Rohren und soll Brauchwasser ($\dot{m} = 1.5 \text{ kg/s}$, $c_p = 4.18 \text{ kJ/(kg K)}$) von 20 °C auf 80 °C erwärmen, wozu Geothermalwasser ($c_p = 4.31 \text{ kJ/(kg K)}$) mit einer Temperatur von 170 °C und einem Massenstrom $\dot{m} = 2.2 \text{ kg/s}$ zur Verfügung steht.

Der Wärmeübergangskoeffizient am Innenrohr des Wärmeübertragers (Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 15 \text{ W/(m K)}$, Innendurchmesser $D_i = 15 \text{ mm}$, Wandstärke $s = 2.5 \text{ mm}$) beträgt $\alpha_i = 900 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. An der Rohraußenseite tritt der konstante Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_a = 1350 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ auf.

- Bestimmen Sie den übertragenen Wärmestrom \dot{Q} und die Austrittstemperatur T_1'' des Geothermalwassers.
- Bestimmen Sie die notwendige Übertragungsfähigkeit $K = kA$ des Wärmeübertragers.
- Bestimmen Sie den auf die Innenfläche bezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten k_i und den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten k_L .
- Welche Rohrlänge L ist erforderlich?

Durch Ablagerungen (Fouling) bildet sich im Betrieb an der Rohrinneenseite der zusätzliche Wärmeübergangswiderstand $R_i = 4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$ aus. An der Rohraußenseite tritt der Foulingwiderstand $R_a = 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$ auf.

- Wie groß ist der dadurch veränderte Wärmedurchgangskoeffizient k_i^* ?
- Welche Auswirkung hat dies auf die erforderliche Rohrlänge L^* ?

Lösung

- a) $\dot{Q} = 376.2 \text{ kW}$ $T_1'' = 130.32 \text{ °C}$ b) $K = 3.77 \text{ kW/K}$
 c) $k_L = 26.03 \text{ W/(m K)}$ $k_i = 552.33 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ d) $L = 144.80 \text{ m}$
 e) $k_i^* = 432.81 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ f) $L^* = 184.79 \text{ m} \Rightarrow \text{Zunahme von } 27.62 \%$

1.4 Wasserleitung im Keller

In den Kellerräumen von Anja Assel ist eine ungedämmte Wasserleitung DN 20 aus Stahl (Innendurchmesser $D_i = 21.6 \text{ mm}$, Wandstärke $s = 2.65 \text{ mm}$, Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 50 \text{ W/(m K)}$, Länge $L = 8 \text{ m}$) horizontal verlegt. Das mit einer Geschwindigkeit von $w = 2 \text{ m/s}$ fließende Kaltwasser tritt mit einer Temperatur von $T' = 8 \text{ °C}$ in die Wasserleitung ein. Der Wärmeübergangskoeffizient an der Rohraußenseite zur konstanten Kellertemperatur $T_u = 15 \text{ °C}$ beträgt $\alpha_a = 12.5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

Hinweis: Die Stoffwerte des Wassers sind konstant bei 8 °C zu wählen.

- Wie groß ist der an der Rohrinneenseite auftretende Wärmeübergangskoeffizient α_i ?
- Wie groß ist der auf die innere Rohroberfläche bezogene Wärmedurchgangskoeffizient k_i ?
- Leiten Sie eine Gleichung für den Temperaturverlauf des Wassers im Rohr her und ermitteln Sie die allgemeine Lösung $T_w(x)$.
- Welche Temperatur $T_w(x = L)$ hat das Wasser am Ende des Rohrs angenommen?

Lösung

- a) $\alpha_i = 6764,94 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ b) $k_i = 15.52 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ d) $T(L) = 8.02 \text{ °C}$

1.5 Fruchtsaft

In der Fruchtfabrik von Sabine Saftig wird frisch gepresster Apfelsaft ($c_p = 4 \text{ kJ}/(\text{kg K})$, $\dot{m} = 1.8 \text{ t/h}$, $T' = 10 \text{ °C}$, $T'' = 80 \text{ °C}$) durch Erwärmung in einem Gegenstrom-Platten-Wärmeübertrager ($\alpha_i = 450 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, $\alpha_a = 20 \text{ kW}/(\text{m}^2\text{K})$, $\lambda = 15 \text{ W}/(\text{m K})$, $s = 2 \text{ mm}$) pasteurisiert. Der als Fluid 1 in den Wärmeübertrager eintretende Sattdampf ($T' = 100 \text{ °C}$, $\Delta h_f = 2257.5 \text{ kJ/kg}$) ist am Austritt gerade vollständig kondensiert.

- a) Welche Wärmeübertragungsfläche A ist erforderlich?
- b) Welcher Dampfmassenstrom \dot{m} wird benötigt?

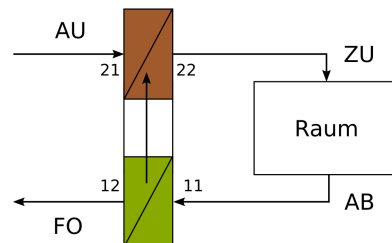
Lösung

a) $A = 7.24 \text{ m}^2$ mit $\theta_{\log} = 46.54 \text{ K}$, $\dot{Q} = 140 \text{ kW}$ und $k = 415,7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ b) $\dot{m} = 0.062 \text{ kg/s}$

1.6 Wärmerückgewinnung (WRG)

Nach VDI 2071 wird der Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung (WRG) in raumlufttechnischen Anlagen über die Rückwärmzahl Φ beschrieben:

$$\Phi = \frac{T_{22} - T_{21}}{T_{11} - T_{21}}$$



Der erste Index kennzeichnet dabei die Luftart (1: Fortluft, FO; 2: Außenluft, AU), der zweite den Eintritt bzw. Austritt in die Wärmerückgewinnung (1: Eintritt; 2: Austritt). Im Winterbetrieb einer Zu- und Abluftanlage mit einem Zuluftmassenstrom von $\dot{m} = 1 \text{ kg/s}$, einer spezifischen Wärmekapazität von $c_p = 1006 \text{ J}/(\text{kg K})$ und einer Zulufttemperatur von $T_{zu} = 24 \text{ °C}$ beträgt die Außenlufttemperatur $T_{21} = -12 \text{ °C}$, die Fortlufttemperatur $T_{11} = 22 \text{ °C}$ und die Rückwärmzahl $\Phi = 0.6$.

- a) Welche Temperatur T_{22} besitzt die Außenluft nach der WRG?
- b) Mit welcher Temperatur T_{12} tritt die Fortluft aus der WRG aus?
- c) Wie hoch ist der Wärmewirkungsgrad ϵ der WRG?
- d) Welche Wärmeleistung \dot{Q}^* wird im Winterbetrieb im Heizregister der Lüftungsanlage eingespart? Wie hoch ist die relative Einsparung \dot{Q}_{rel}^* ?

Lösung

a) $T_{22} = 8.4 \text{ °C}$ b) $T_{12} = 1.6 \text{ °C}$ c) $\epsilon = 0.6$ mit $\dot{Q}_{\max} = 34.2 \text{ kW}$
 d) $\dot{Q}^* = 20.52 \text{ kW}$, $\dot{Q}_{rel}^* = 56.67 \%$

2 Parallelstromapparate & Kondensation - mit Diagrammen

2.1 Ammoniakkühler

In einem Gegenstromwärmeübertrager soll Ammoniak beim Druck von 1.4 MPa von 150 °C auf die Sättigungstemperatur $T_s = 36.3$ °C abgekühlt und bei dieser Temperatur vollständig kondensiert werden. Sein Massenstrom ist $\dot{m} = 0.2$ kg/s und einer Dampftafel von Ammoniak entnimmt man die spezifischen Enthalpien $h(T') = 1959.4$ kJ/kg, $h^g(T_s) = 1637.3$ kJ/kg und $h^{fl}(T_s) = 427.3$ kJ/kg. Es steht Kühlwasser mit $T' = 12$ °C zur Verfügung, das sich auf $T'' = 28.5$ °C erwärmen soll (mittlere spezifische Wärmekapazität $\bar{c}_p = 4.184$ kJ/(kg K)). Man berechne die mindestens erforderlichen Übertragungsfähigkeiten:

- $(kA)_{\text{abk}}$ für den Abkühlungsteil des Wärmeübertragers
- und $(kA)_{\text{kond}}$ für den Kondensationsteil.
- Skizzieren Sie den qualitativen Temperaturverlauf der Fluide in einem T(x)-Diagramm.

Lösung _____

- a) $(kA)_{\text{abk}} = 1.39$ kW/K mit $\Theta_m = 46,36$ K b) $(kA)_{\text{kond}} = 14.27$ kW/K mit $\Theta_m = 16,96$ K

2.2 Neuauslegung Doppelrohr-Wärmeübertrager

Die Auslegung von Ida Ideenreichs betriebenen Wärmeübertrager (*Aufgabe 1.3*) wird von ihrem Kollegen Mario Miesepeter angezweifelt. Projektieren Sie den Wärmeübertrager unter Zuhilfenahme des Diagramms für den Gegenstromwärmeübertrager komplett neu.

- Bestimmen Sie den übertragenen Wärmestrom \dot{Q} und die Austrittstemperatur T_1'' des Geothermalwassers.
- Bestimmen Sie die notwendige Übertragungsfähigkeit $K = kA$ des Wärmeübertragers.
- Beschreiben Sie verbal ein Vorgehen, um den Wärmeübertrager auszulegen!
- Welches Problem tritt auf?
- Welche Länge hat der Wärmeübertrager bei einem Innendurchmesser des Außenrohres $D_i = 120$ mm? Das Geothermalwasser ströme durch das Innenrohr.
- Geben Sie den auf die Innenfläche bezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten k_i und die auftretenden Wärmeübergangskoeffizienten α_i und α_a an.

Lösung _____

- a) $\dot{Q} = 376.2$ kW, $T_1'' = 130.32$ °C
 b) $K = 3.762$ kW/K aus $NTU_2 = 0.6$ mit $R_2 = 0.66$ und $P_2 = 0.4$
 d) Es fehlt eine geometrische Eigenschaft (Länge L oder Innendurchmesser des Außenrohres D_i).
 e) $L = 46.7$ m f) $k_i = 1710$ W/(m²K), $\alpha_i = 1808$ W/(m²K), $\alpha_a = 38096$ W/(m²K)

2.3 Mantelrohrwärmeübertrager im Gegenstrombetrieb

Der in der *Aufgabe 1.1* beschriebene Mantelrohrwärmeübertrager wird im Gegenstrom betrieben. Beantworten Sie folgende Fragen unter Nutzung der Diagramme:

- Wie groß muss die innere wärmeübertragende Fläche A_i des Kernrohres sein?
- Auf welche Austrittstemperatur T_2'' erwärmt sich das Kühlwasser?
- Wie groß ist der übertragene Wärmestrom \dot{Q} ?
- Wie verändern sich die Austrittstemperaturen T_1'' und T_2'' sowie der übertragene Wärmestrom \dot{Q} des Wärmeübertragers, wenn sich der Massenstrom des Kühlwassers auf $\dot{m}_2 = 1.5 \text{ kg/s}$ erhöht?
- Wie verändern sich die wärmeübertragende Fläche A_i , die Austrittstemperatur T_2'' sowie der übertragene Wärmestrom \dot{Q} , wenn statt der Veränderung des Kühlwassermassenstromes der Massenstrom des Heizfluides auf $\dot{m}_1 = 1.0 \text{ kg/s}$ reduziert wird?

Lösung

- $A_i = 2.12 \text{ m}^2$ mit $P_2 = 0.75$, $R_2 = 0.5 \Rightarrow \text{NTU}_2 = 1.85$
- $T_2'' = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ c) $\dot{Q} = 252 \text{ kW}$
- $T_1'' = 55.2 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_2'' = 56.4 \text{ }^\circ\text{C}$, $\dot{Q} = 292.32 \text{ kW}$ mit $R_2 = 0.75$, $\text{NTU}_2 = 1.2 \Rightarrow P_2 = 0.58$
- $A_i = 0.688 \text{ m}^2$ mit $\text{NTU} = 0.6$, $\dot{Q} = 126 \text{ kW}$, $T_2'' = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ mit $P = 0.375$

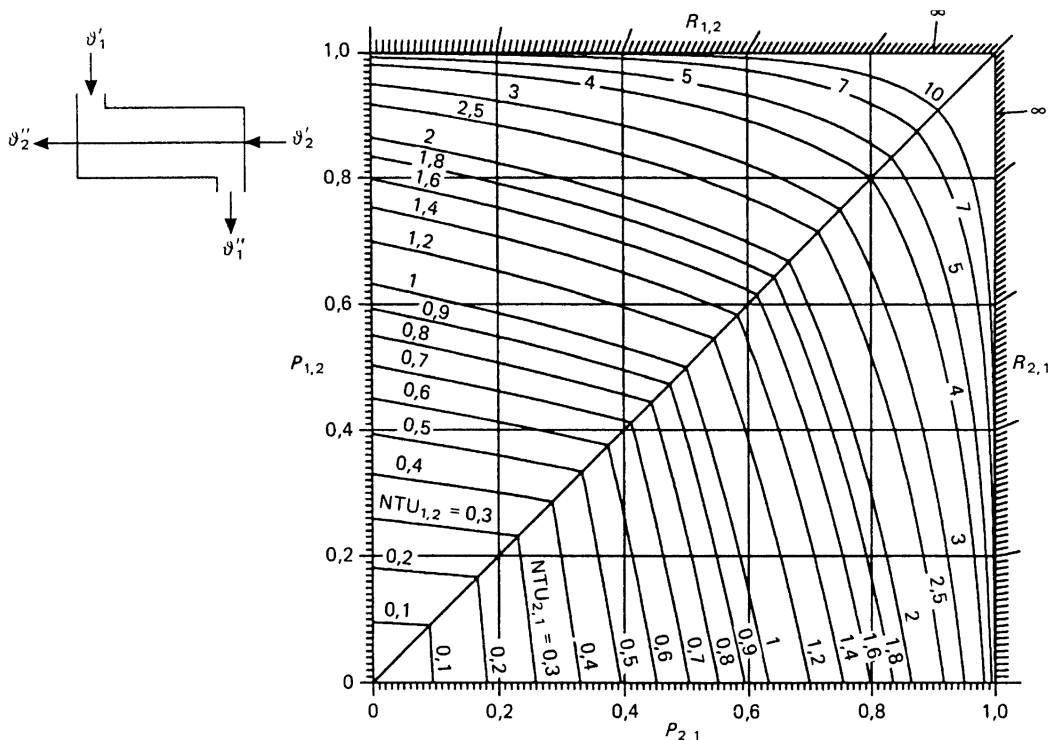


Abbildung 1: Diagramm des Gegenstromwärmeübertragers [VDI-Wärmeatlas, Roetzel & Spang, Kapitel „C1 Wärmeübertrager: Berechnungsmethoden“, Springer (2019)]

2.4 Gleich- & Gegenstromführung

In einem Wärmeübertrager mit einer Fläche von $A = 4 \text{ m}^2$ und einem Wärmedurchgangskoeffizienten $k = 40,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ strömen Luft ($\dot{m}_1 = 835 \text{ kg/h}$) mit einer Eintrittstemperatur von 100 °C und Wasser ($\dot{m}_2 = 100 \text{ kg/h}$) bei 20 °C Eintrittstemperatur im

- 1) Gleichstrom
- 2) Gegenstrom

Für die jeweiligen Fälle sollen folgende Teilaufgaben bearbeitet werden:

- a) Skizzieren Sie die Temperaturverläufe.
- b) Wie groß sind die Austrittstemperaturen und die Temperaturverhältnisse?
- c) Welche Grenzwerte würden bei unendlich großer Wärmeübertragungsfläche die Austrittstemperaturen annehmen?
- d) Wie groß ist die mittlere treibende Temperaturdifferenz für alle Betrachtungen im Fall des realen und des unendlichen langen Rekuperators?
- e) Wie groß ist der Wärmestrom für den realen Reku (Teilaufgabe b)) und den unendlichen langen Reku (c))?

Lösungen	Gleichstrom	Gegenstrom
b) Austrittstemperatur Heizmedium	$t_1'' = 77,03 \text{ °C}$	$73,74 \text{ °C}$
Austrittstemperatur Kühlmedium	$t_2'' = 66,40 \text{ °C}$	$73,60$
c) Austrittstemperatur Heizmedium ($L \rightarrow \infty$)	$t_1'' = 73,86 \text{ °C}$	$60,40 \text{ °C}$
Austrittstemperatur Kühlmedium ($L \rightarrow \infty$)	$t_2'' = 72,80 \text{ °C}$	$100,00 \text{ °C}$
d) log. Temperaturdifferenz (real)	$\Theta_{\log} = 33,03 \text{ K}$	$38,15 \text{ K}$
log. Temperaturdifferenz ($L \rightarrow \infty$)	$\Theta_{\log} = 77,78 \text{ K}$	0
e) übertragener Wärmestrom (real)	$\dot{Q} = 5,39 \text{ kW}$	$6,16 \text{ kW}$
übertragener Wärmestrom ($L \rightarrow \infty$)	$\dot{Q} = 6,13 \text{ kW}$	$9,29 \text{ kW}$

3 Rohrbündelwärmeübertrager ohne Verluste

3.1 Allgemeine Gleichungen

In einem Rohrbündelwärmeübertrager wird Wasser mit einem Durchsatz von $\dot{m} = 27 \text{ t/h}$ von 20 °C auf 80 °C in Kupferrohren (Durchmesser [mm]: 20/ 24) vorgewärmt. Dazu wird als Heizmedium gesättigter Wasserdampf mit dem Dampfdruck von $p = 125 \text{ kPa}$ verwendet. Der äußere Wärmedurchgangskoeffizient beträgt $k_a = 1.8 \text{ kW/(m}^2\text{K)}$.

Hinweis: Verwenden Sie die Stoffwerte des Wassers bei 20 °C .

- Skizzieren Sie den Temperaturverlauf.
- Welche Wärmeleistung \dot{Q} wird übertragen?
- Wie viele Rohre n müssen für das Rohrbündel vorgesehen werden, wenn die mittlere Strömungsgeschwindigkeit $v = 0.55 \text{ m/s}$ beträgt?
- Welche Länge L haben in diesem Fall die Kupferrohre?

Lösung

b) $\dot{Q} = 1.883 \text{ MW}$ c) $n = 44 \text{ Rohre}$ d) $L = 6.43 \text{ m}$

3.2 Warmwassererzeugung

In einem eingängigen Rohrbündelwärmeübertrager soll Wasser um $\Delta T = 20 \text{ K}$ erwärmt werden. Als Heizmedium dient Heißwasser mit einer Temperatur von 90 °C . Aus konstruktiven Gründen soll die Länge des Rohrbündels 4 m nicht überschreiten und Rohre mit einem Innendurchmesser D_i von 1 cm verwendet werden. Bekannt sind weiterhin:

$$\dot{W}_1 = 2\dot{W}_2; \dot{V}_1 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}; \rho_1 = \rho_2 = 10^3 \text{ kg/m}^3; c_{p1} = c_{p2} = 4.18 \text{ kJ/(kg K)}$$

- Berechnen Sie die Austrittstemperatur des Heizmediums t_1'' .
- Wie groß sind die Wassermassenströme \dot{m}_1 und \dot{m}_2 ?
- Bestimmen Sie die logarithmische Temperaturdifferenz Θ_{\log} für eine Gegenstromführung und skizzieren Sie maßstäblich den Temperaturverlauf, wenn die kleinste Temperaturdifferenz zwischen Heiz- und Kühlmedium $\Delta T = 5 \text{ K}$ beträgt.
- Berechnen Sie die Mindestanzahl der Rohre für $k_i = 2.8 \text{ kW/(m}^2\text{K)}$.

Lösung

a) $t_1'' = 80 \text{ °C}$ b) $\dot{m}_1 = 2 \text{ kg/s}$, $\dot{m}_2 = 1 \text{ kg/s}$ c) $\Theta_{\log} = 9.102 \text{ K}$ d) 27 Rohre

3.3 Rohrbündelwärmeübertrager ein- und zweigängig

In einem stahlverarbeitenden Betrieb soll Öl ($\dot{V}_1 = 2 \text{ L/s}$, $t'_1 = 50 \text{ °C}$) mit einem vorhanden, beidseitig eingängigem Rohrbündelwärmeübertrager gekühlt werden. Als Kühlmedium steht Wasser ($\dot{V}_2 = 5 \text{ L/s}$, $t'_2 = 15 \text{ °C}$) zur Verfügung. Wasser und Öl durchströmen den mit 10 Umlenblechen versehenen Wärmeübertrager in entgegengesetzter Strömungsrichtung, wobei das Öl im Mantelrohr ($\alpha_1 = 2 \text{ kW}/(\text{m}^2\text{K})$) und das Wasser ($\alpha_2 = 8.19 \text{ kW}/(\text{m}^2\text{K})$) die im Inneren angeordneten 40 Rohre ($D_i = 10 \text{ mm}$, $D_a = 12 \text{ mm}$, $\lambda = 50 \text{ W}/(\text{mK})$, $L = 50 \text{ cm}$, $K = 0.04 \text{ mm}$) gleichmäßig durchströmt.

Verwenden Sie folgende, konstante Stoffwerte:

	ρ [kg/m ³]	c_p [kJ/(kg K)]	λ [W/(m K)]	ν [m ² /s]	Pr [-]
Wasser	998	4.181	0.6	$1.0 \cdot 10^{-6}$	7
Öl	990	1.885	0.1	$1.5 \cdot 10^{-6}$	21

Berechnen Sie für folgende gesuchte Größen:

- den Druckverlust durch Rohrreibung pro Rohr Δp_{v1} und für das gesamte Wasser Δp_v
- den äußeren Wärmedurchgangskoeffizienten k_a
- die Austrittstemperaturen t''_1 , t''_2
- den übertragene Wärmestrom \dot{Q}

Um das Öl noch stärker abzukühlen, wird das Wasser nun zweigängig durch den Wärmeübertrager geführt. Berechnen Sie ohne die Nutzung der Diagramme:

- den gesamten wasserseitigen Druckverlust Δp_v durch Rohrreibung
- den äußeren Wärmedurchgangskoeffizient k_a
- die Austrittstemperaturen t''_1 , t''_2
- den übertragene Wärmestrom \dot{Q}

Lösung

a) $\Delta p_v = 71 \text{ kPa}$ mit $\Delta p_{v1} = 1.78 \text{ kPa}$; $\xi = 0.028$; $v = 1.59 \text{ m/s}$; $\text{Re} = 15.9 \cdot 10^3$

b) $k_a = 1.5 \text{ kW}/(\text{m}^2\text{K})$

c) $t''_1 = 41.6 \text{ °C}$ $t''_2 = 16.5 \text{ °C}$ d) $\dot{Q} = 32.45 \text{ kW}$ mit $\Theta_{\log} = 29.71 \text{ K}$

e) $\Delta p_v = 313.45 \text{ kPa}$ mit $\Delta p_{v1} = 15.67 \text{ kPa}$; $\xi = 0.031$; $v = 3.2 \text{ m/s}$; $\text{Re} = 3.18 \cdot 10^4$

f) $k_a = 1.65 \text{ kW}/(\text{m}^2\text{K})$ mit $\alpha = 14.33 \text{ kW}/(\text{m}^2\text{K})$

g) $t''_1 = 39.10 \text{ °C}$ $t''_2 = 16.95 \text{ °C}$ h) $\dot{Q} = 36.6 \text{ kW}$

3.4 Mehrgängiger Rohrbündelwärmeübertrager

In einer Anlage soll Schmieröl ($\dot{m}_1 = 2.5 \text{ kg/s}$) von $t'_1 = 300 \text{ °C}$ auf $t''_1 = 150 \text{ °C}$ mit einem Rohrbündelwärmeübertrager bestehend aus 40 Rohren mit 2 inneren Durchgängen ($D_i = 16 \text{ mm}$, $D_a = 20 \text{ mm}$) abgekühlt werden. Als Kühlmedium steht Wasser mit $t'_2 = 15 \text{ °C}$ zur Verfügung, welches sich maximal auf $t''_2 = 80 \text{ °C}$ erwärmen darf und durch den mit mindestens 5 Umlenklechen versehenen Mantelraum strömt. Eine Foulingschicht ($R_F = 6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$) bildet sich wasserseitig auf den Rohren ($\lambda = 16 \text{ W/(mK)}$, $\alpha_2 = 4 \text{ kW/(m}^2\text{K)}$), dessen Flächenvergrößerung als vernachlässigbar angesehen werden kann.

Verwenden Sie folgende, konstante Stoffwerte:

	$\rho \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$c_p \text{ [kJ/(kg K)]}$	$\lambda \text{ [W/(m K)]}$	$\nu \text{ [m}^2\text{/s]}$	Pr [-]
Wasser	998	4.2	0.6	$1.0 \cdot 10^{-6}$	7
Öl	750	2.5	0.117	$1.3 \cdot 10^{-6}$	21

- Skizzieren Sie ein $T(x)$ -Diagramm für den Apparat und indizieren Sie die entsprechenden Größen.
- Bestimmen Sie den nötigen Kühlwassermassenstrom \dot{m}_2 .
- Berechnen Sie den mittleren äußeren Wärmedurchgangskoeffizienten k_a und schätzen Sie die Rohrlänge L ab.
- Wie groß muss die wärmeübertragende Rohroberfläche A_a sein?
- Wie groß müsste die wärmeübertragende Fläche eines idealen Gegenstromwärmeapparates bei unverändertem Wärmedurchgangskoeffizienten sein?
- Wie groß muss die wärmeübertragende Oberfläche eines Gegenstromapparates im Fall einer Stromführung mit 3 inneren Durchgängen sein, wenn zusätzlich noch eine 40 %ige Erhöhung des Wärmeübergangskoeffizienten auftritt? Nutzen Sie die entsprechenden Diagramme und machen Sie ihr Vorgehen ersichtlich.

Lösung

- b) $\dot{m}_2 = 3.434 \text{ kg/s}$ c) $k_a = 415.97 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ mit $\alpha_1 = 883.67 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ $L = 11.01 \text{ m}$
 d) $A_a = 13.83 \text{ m}^2$ e) $A_a \geq 135.23 \text{ m}^2$ f) $A_a = 9.7 \text{ m}^2$

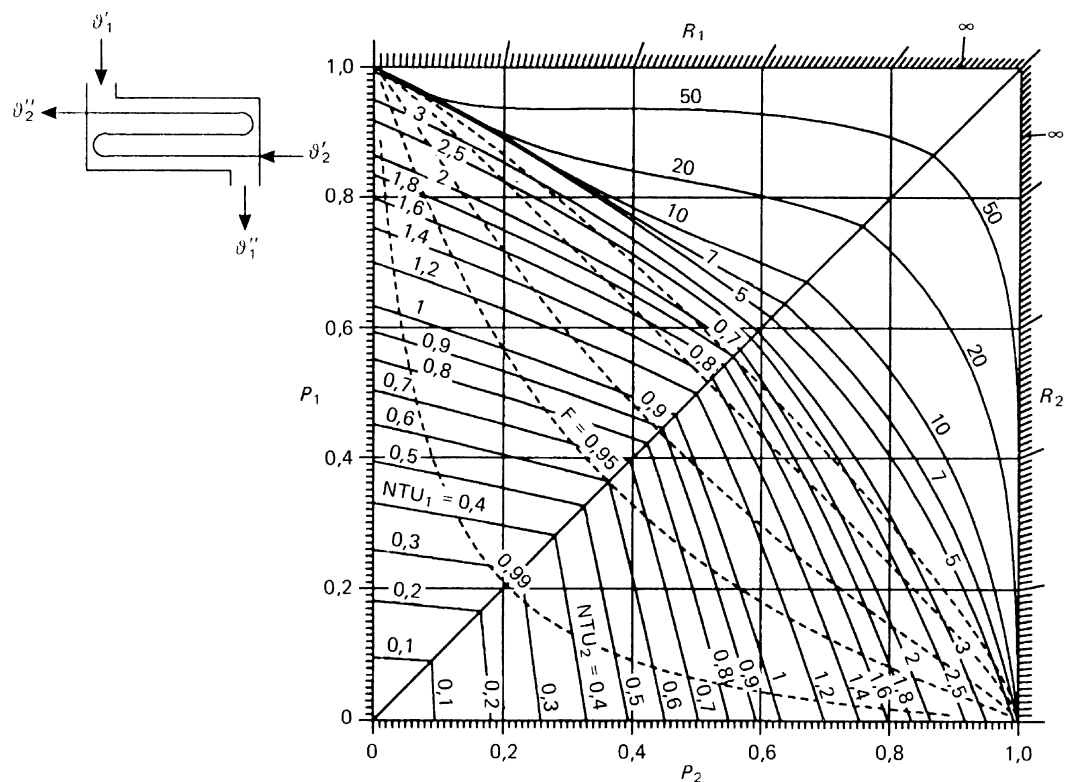


Abbildung 2: Diagramm des Gegenstromwärmeübertragers mit 3 inneren Durchgängen, zwei davon im Gegenstrom [VDI-Wärmeatlas, Roetzel & Spang, Kapitel „C1 Wärmeübertrager: Berechnungsmethoden“, Springer (2019)]

3.5 Kondensator: Gleich- oder Gegensinn?

In einem Prozess soll Sattedampf ($\dot{m}_1 = 0.1 \text{ kg/s}$; $p = 1 \text{ bar}$) auf 30 °C abgekühlt werden. Dazu soll Flusswasser mit $t_2 = 15 \text{ °C}$ zur Verfügung und darf sich maximal um 2 K erwärmen. Für die Realisierung soll ein Gegenstromrekuperator mit minimaler Wärmeübertragerfläche A verwendet werden.

Hinweis: Es sei von konstanten Wärmedurchgangskoeffizienten auszugehen: im Kondensator $k_K = 100 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, im Wärmeübertrager $k_W = 20 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

- Welcher Kühlwassermassenstrom \dot{m}_2 ist notwendig?
- Welche Durchlauführung: Gegensinn (Kühler \Rightarrow Kondensator) oder Gleichsinn (Kondensator \Rightarrow Kühler) würden Sie festlegen?
Bestimmen Sie dazu die Wassertemperatur t_w zwischen Kondensator und Kühler sowie die entsprechenden Teilflächen A_K , A_W der Bauteile.

Lösung

- a) $\dot{m}_2 = 30.47 \text{ kg/s}$ **Gegensinn:** $t_w = 15.23 \text{ °C}$ $A_W = 36.78 \text{ m}^2$ $A_K = 26.90 \text{ m}^2$
Gleichsinn: $t_w = 16.77 \text{ °C}$ $A_W = 40.01 \text{ m}^2$ $A_K = 26.83 \text{ m}^2$

Diagramme

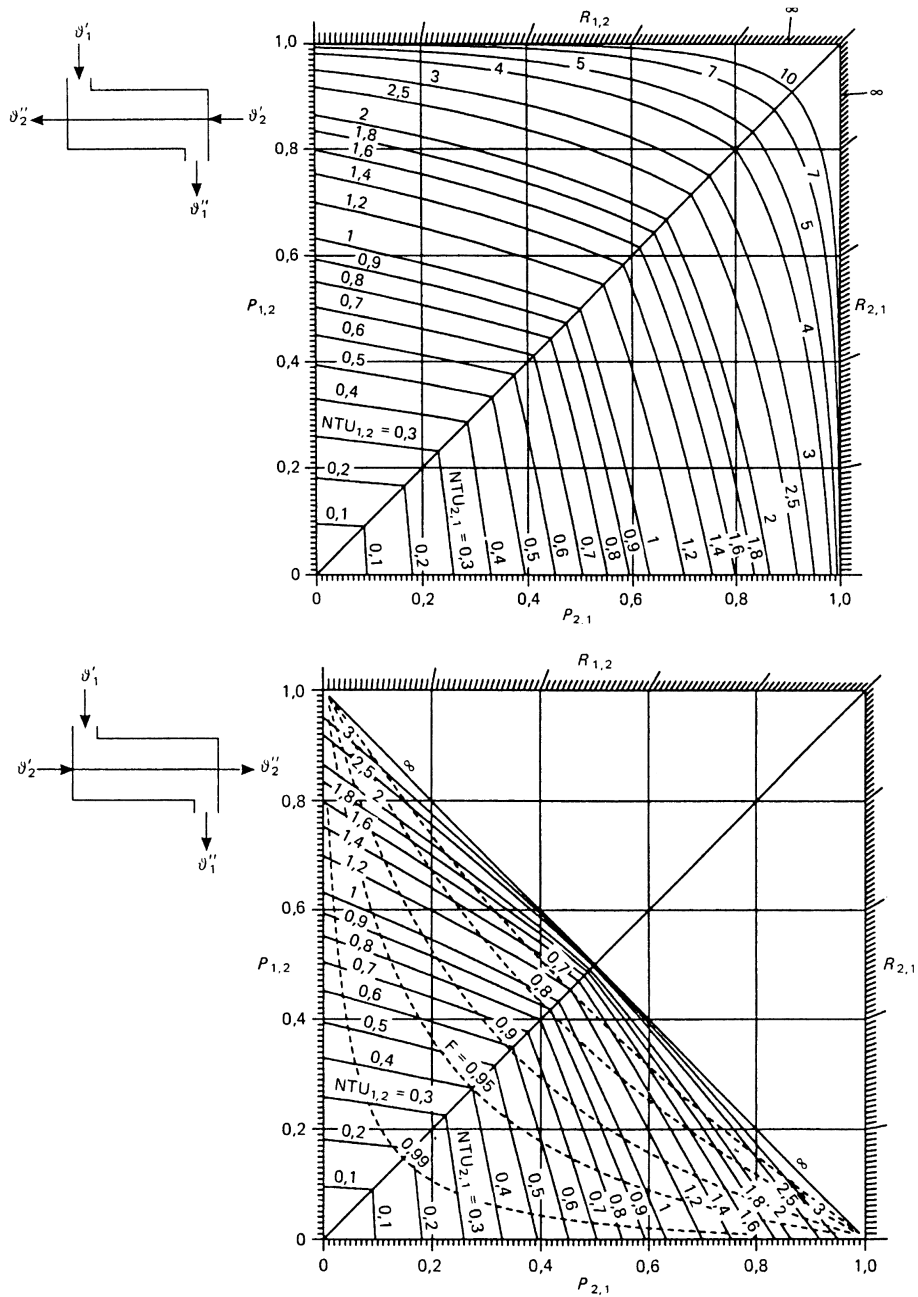


Abbildung 3: Diagramm des Gegen- und Gleichstromwärmeübertragers [VDI-Wärmeatlas, Roetzel & Spang, Kapitel „C1 Wärmeübertrager: Berechnungsmethoden“, Springer (2019)]

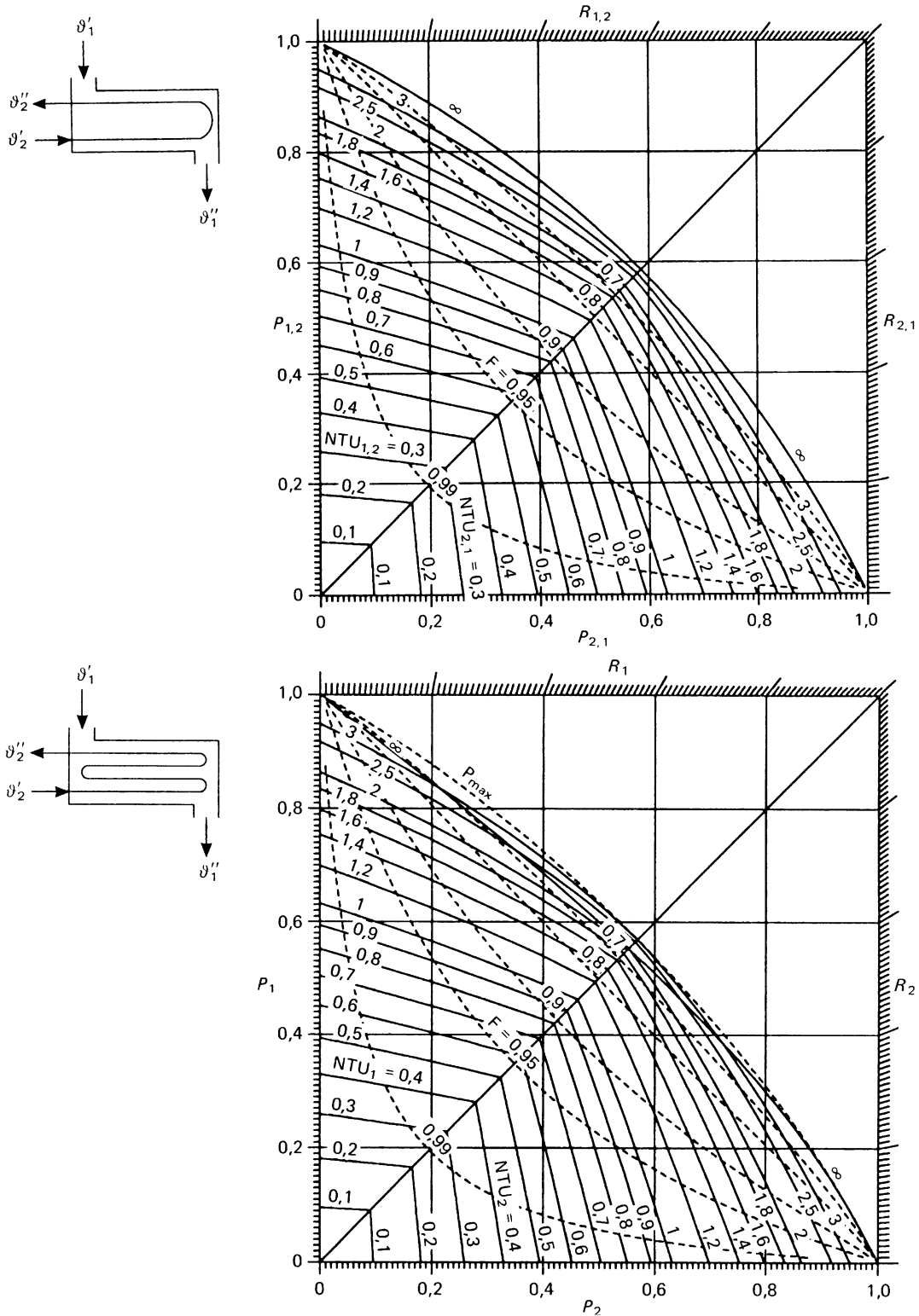


Abbildung 4: Diagramm des Gegenstromwärmeübertragers mit 2 und 4 inneren Durchgängen [VDI-Wärmeatlas, Roetzel & Spang, Kapitel „C1 Wärmeübertrager: Berechnungsmethoden“, Springer (2019)]

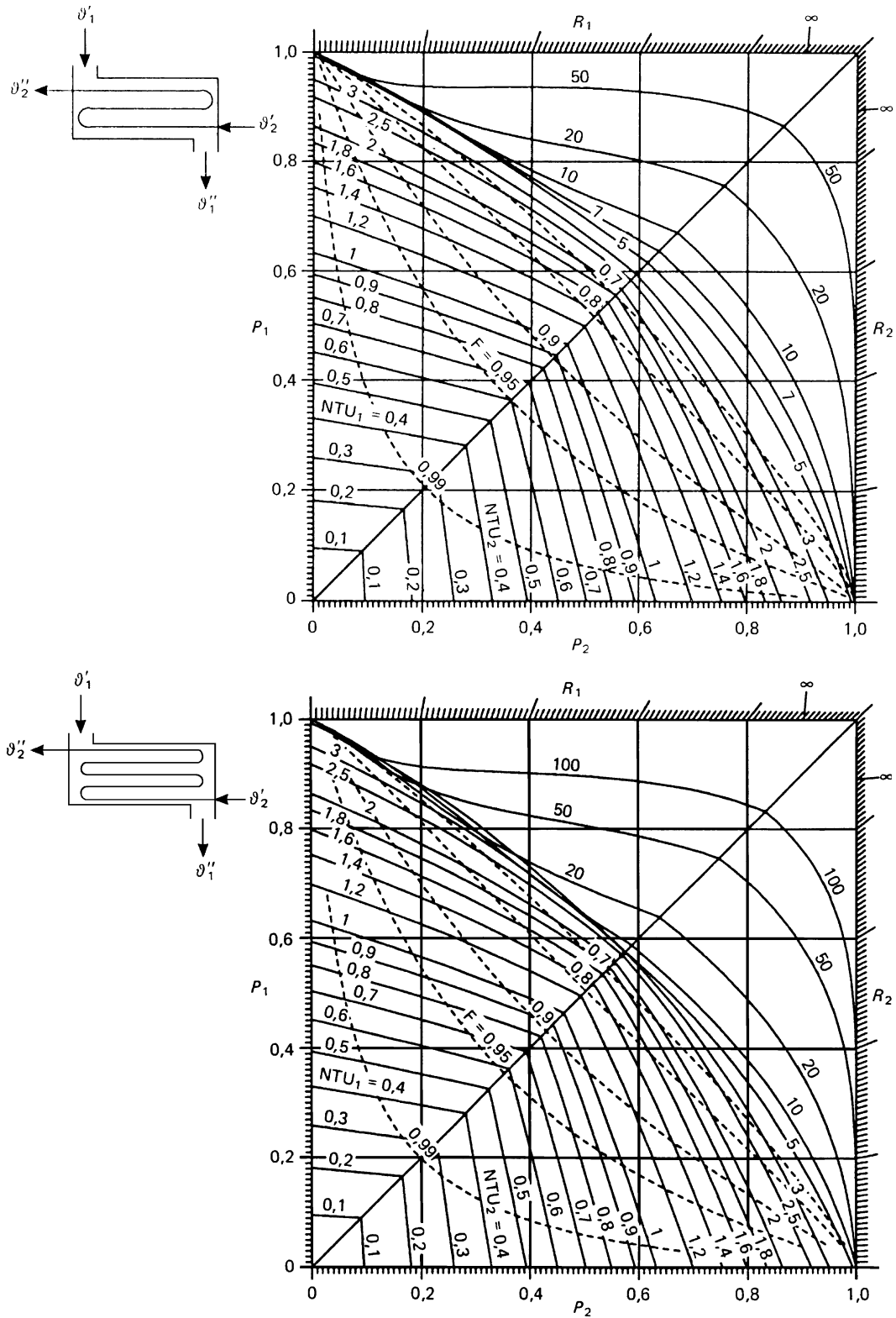


Abbildung 5: Diagramm des Gegenstromwärmeübertragers mit 3 und 5 inneren Durchgängen [VDI-Wärmeatlas, Roetzel & Spang, Kapitel „C1 Wärmeübertrager: Berechnungsmethoden“, Springer (2019)]

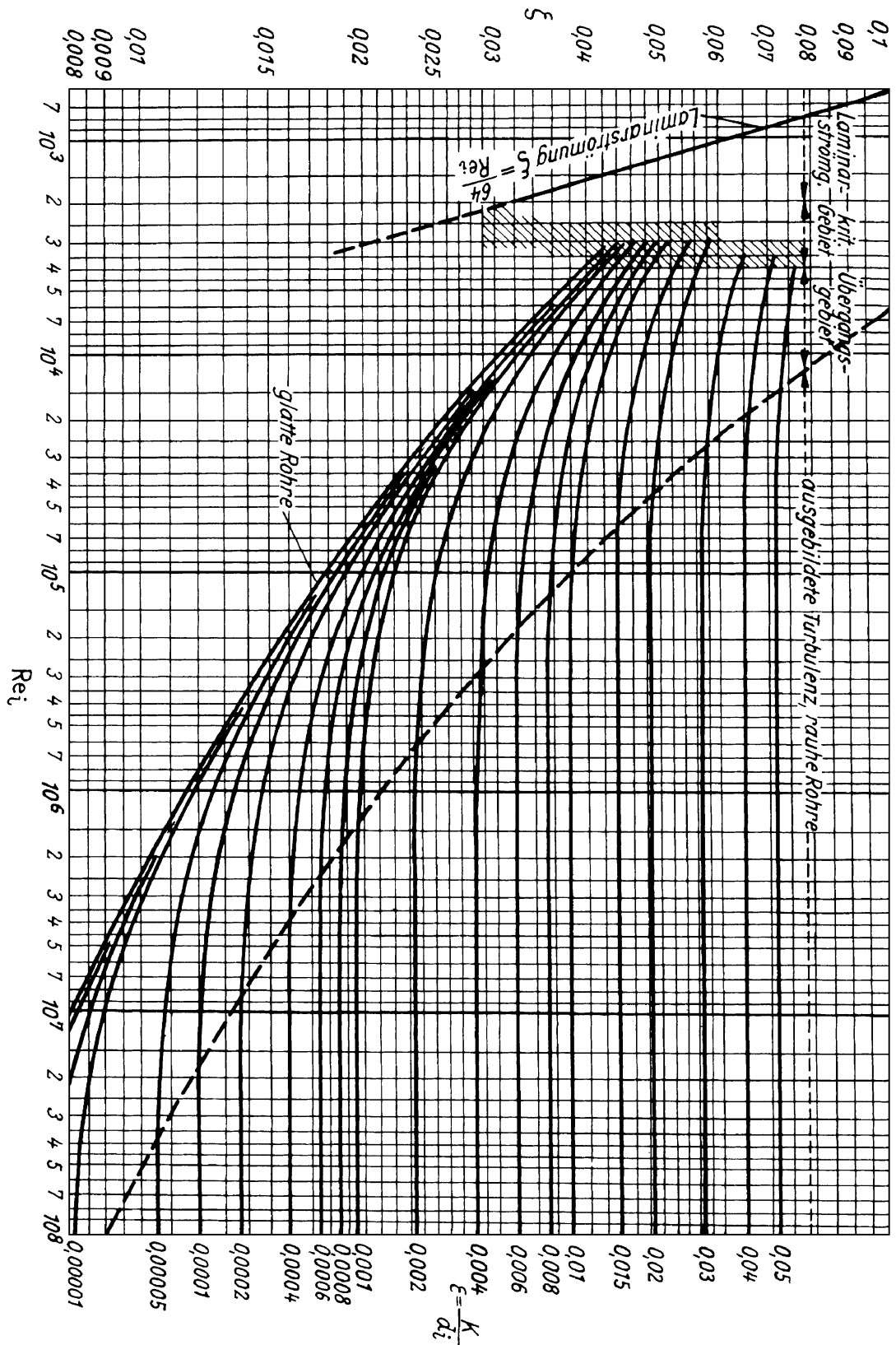


Abbildung 6: Rohrreibungswiderstand ξ in Abhängigkeit von Reynoldszahl Re und Rohrrauigkeit ϵ [VDI-Wärmeatlas, Nirschl, Kapitel „L1.2 Druckverlust in durchströmten Röhren“, Springer (2019)]

Berechnungsgleichung Rohrbündelwärmeübertrager

Die Indizierung i richtet sich nach der Stromführung: Strom 1 passiert den Wärmeübertrager im Mantel, Strom 2 befindet sich in den Rohren. Das Indize m zählt die Anzahl der inneren Durchgänge

Diese Berechnungsgleichungen sind u.a. im VDI-Wärmeatlas („C1 Wärmeübertrager: Berechnungsmethoden“ Springer, 2019) zu finden.

Das NTU-Verhältnis ε bezieht sich auf die Verteilung der Übertragungsfähigkeit $K = kA$ der einzelnen Durchgänge bezogen auf alle Durchgänge, dabei zählt man den Anteil der Gleichstromführung (GL):

$$\varepsilon = \frac{K_{\text{GL}}}{K_{\text{gesamt}}} = \frac{(kA)_{\text{GL}}}{(kA)_{\text{gesamt}}} \quad (1)$$

Da theoretisch neben dem Wärmedurchgangskoeffizient auch die wärmeübertragende Oberfläche gezielt angepasst werden kann, muss dies mit berücksichtigt werden. Im Beispielfall eines einfachen Rohrbündelwärmeübertragers mit 3 inneren Durchgängen, 2 davon im Gegenstrom, und mit konstanten Rohrabmessungen sowie konstant anzunehmenden Wärmedurchgangskoeffizienten ergibt sich somit $\varepsilon = 1/3$. Bei gleichem Rohrbündelwärmeübertrager mit 2 inneren Durchgängen wird $\varepsilon = 1/2$.

Es wird folgende Darstellung für die inversen trigonometrischen Funktionen verwendet:

$$\coth^{-1} = \text{arcCoth} = \text{arcus Cotangenz hyperbolicus.}$$

Ein äußerer und zwei innere Durchgänge

$$\frac{1}{P_i} = 0.5[1 + R_i + S \cdot \coth(0.5 \cdot S \cdot \text{NTU}_i)], \quad \text{mit Grenzkurve } P_{i,m \rightarrow \infty} = \frac{2}{1 + R_i + S} \quad (2)$$

$$\text{NTU}_i = \frac{2}{S} \coth^{-1} \left(\frac{2 - P_i(1 + R_i)}{SP_i} \right) \quad (3)$$

mit

$$S = \sqrt{1 + R_i^2 + 2R_i(2\varepsilon - 1)} \quad (4)$$

Temperatur des Rohrstromes t_{2z} zwischen den Durchgängen

$$\frac{t_{2z} - t'_2}{t'_1 - t'_2} = 1 - \frac{SP_i \exp[0.5\text{NTU}_1(1 + R_1(2\varepsilon - 1))]}{2 \sinh(0.5\text{NTU}_1 \cdot S)} \quad \text{für Gegensinn} \quad (5)$$

$$\frac{t_{2z} - t'_2}{t'_1 - t'_2} = 1 - P_i \frac{SP_i \exp[0.5\text{NTU}_1(1 + R_1(2\varepsilon - 1))]}{2 \sinh(0.5\text{NTU}_1 \cdot S)} \quad \text{für Gleichsinn} \quad (6)$$

Ein äußerer und eine gerade Anzahl an inneren Durchgängen

Die Anzahl der inneren Durchgänge wird mit $2m$ gezählt.

$$S = \sqrt{1 + \left(\frac{R_1}{m}\right)^2} \quad (7)$$

$$\frac{1}{P_1} = \frac{S}{1 - \exp(-\text{NTU}_1 S)} + \frac{R_1}{1 - \exp(-R_1 \text{NTU}_1)} - \frac{R_1 m}{1 - \exp(-R_1 \text{NTU}_1 / m)} + 0.5 + \frac{R_1}{2m} - \frac{S}{2} \quad (8)$$

mit Grenzkurve

$$P_{1,m \rightarrow \infty} = \frac{2}{1 + 2R_1 - \frac{R_1}{m} + S} \quad (9)$$

Ein äußerer und drei innere Durchgänge - zwei im Gegenstrom

Für den Fall $R_1 \neq 1$:

$$S_{1,2} = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{\frac{p^2}{4} - q}, \quad S_3 = 0.5R_1NTU_1(1 - \varepsilon) \quad (10)$$

mit

$$p = NTU_1[1 - 0.5R_1(1 - 3\varepsilon)], \quad q = 0.5\varepsilon(1 - \varepsilon)NTU_1^2R_1(1 - R_1) \quad (11)$$

$$P_1 = \frac{S_1(e^{S_1} + e^{S_3})(e^{S_2} - 1) + S_2(e^{S_2} + e^{S_3})(1 - e^{S_1}) + NTU_1(1 - R_1)(e^{S_2} - e^{S_1})(1 + e^{S_3})}{S_1(e^{S_1} + e^{S_3})(R_1e^{S_2} - 1) + S_2(e^{S_2} + e^{S_3})(1 - R_1e^{S_1}) + NTU_1(1 - R_1)(e^{S_2} - e^{S_1})(1 + R_1e^{S_3})} \quad (12)$$

mit Grenzkurve

$$P_{1,m \rightarrow \infty} = \begin{cases} 1 & \text{für } R_1 \leq 1 \\ 1/R_1 & \text{für } R_1 > 1 \end{cases} \quad (13)$$

Für den Fall $R_1 = 1$

$$S_1 = 1 - \varepsilon, \quad S_2 = 1 + 3\varepsilon \quad (14)$$

$$\frac{P}{1 - P} = NTU \frac{\varepsilon S_1}{S_2} - 2 \left(\frac{1 + \varepsilon}{S_2} \right)^2 \left[(e^{-0.5NTU \cdot S_2} - 1)^{-1} + (e^{-0.5NTU \cdot S_1} + 1)^{-1} \right]^{-1} \quad (15)$$

Stoffwerte

Stoffwerte von Luft

t	Celsius-Temperatur	λ	Wärmeleitfähigkeit	Pr	PRANDTL-Zahl
T	Temperatur	η	dynamische Viskosität	β	Ausdehnungskoeffizient
ρ	Dichte	ν	kinematische Viskosität	w_s	Schallgeschwindigkeit
c_p	spezifische Wärmekapazität	a	Temperaturleitfähigkeit		

Tabelle 1: Stoffwerte von trockener Luft beim Druck $p = 1$ bar

t	T	ρ	c_p	λ	η	ν	a	Pr	β	w_s
°C	K	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$	$10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m K}}$	10^{-6} Pa s	$10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	$10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	–	$10^{-3} \frac{1}{\text{K}}$	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
-150	123.15	2.8600	1.0206	11.679	8.664	3.029	4.001	0.7571	8.3947	221.3
-100	173.15	2.0193	1.0090	16.205	11.780	5.834	7.954	0.7335	5.8490	263.5
-50	223.15	1.5632	1.0061	20.416	14.614	9.349	12.980	0.7202	4.5094	299.5
0	273.15	1.2758	1.0059	24.360	17.218	13.500	18.980	0.7110	3.6738	331.5
20	293.15	1.1885	1.0064	25.873	18.205	15.320	21.630	0.7081	3.4209	343.4
40	313.15	1.1124	1.0071	27.354	19.165	17.230	24.420	0.7056	3.2007	354.9
60	333.15	1.0455	1.0082	28.804	20.099	19.220	27.320	0.7035	3.0073	365.9
80	353.15	0.9862	1.0097	30.225	21.009	21.300	30.350	0.7018	2.8361	376.7
100	373.15	0.9333	1.0115	31.620	21.896	23.460	33.500	0.7004	2.6833	387.0
120	393.15	0.8858	1.0136	32.989	22.763	25.700	36.75	0.6994	2.5463	397.1
140	413.15	0.8428	1.0160	34.336	23.610	28.01	40.10	0.6986	2.4225	406.9
160	433.15	0.8039	1.0188	35.660	24.439	30.40	43.54	0.6982	2.3103	416.4
180	453.15	0.7684	1.0218	36.964	25.251	32.86	47.08	0.6980	2.2081	425.7
200	473.15	0.7359	1.0252	38.248	26.046	35.39	50.70	0.6981	2.1145	434.7
250	523.15	0.6655	1.0347	41.382	27.970	42.03	60.10	0.6993	1.9120	456.2
300	573.15	0.6075	1.0454	44.417	29.811	49.07	69.95	0.7016	1.7450	476.6
350	623.15	0.5587	1.0568	47.367	31.579	56.52	80.22	0.7046	1.6048	495.9
400	673.15	0.5172	1.0688	50.240	33.284	64.35	90.89	0.7081	1.4855	514.3
450	723.15	0.4815	1.0808	53.047	34.932	72.56	101.95	0.7117	1.3827	532.0
500	773.15	0.4503	1.0927	55.795	36.530	81.12	113.39	0.7154	1.2932	549.0
550	823.15	0.4230	1.1043	58.490	38.084	90.04	125.23	0.7190	1.2147	565.4
600	873.15	0.3988	1.1154	61.139	39.597	99.30	137.46	0.7224	1.1451	581.3
650	923.15	0.3772	1.1260	63.745	41.073	108.90	150.10	0.7255	1.0830	596.7
700	973.15	0.3578	1.1361	66.312	42.517	118.83	163.14	0.7284	1.0274	611.7
750	1023.15	0.3403	1.1455	68.846	43.931	129.09	176.60	0.7310	0.9772	626.3
800	1073.15	0.3245	1.1544	71.348	45.317	139.67	190.49	0.7333	0.9317	640.6
850	1123.15	0.3100	1.1628	73.822	46.679	150.57	204.79	0.7352	0.8902	654.6
900	1173.15	0.2968	1.1706	76.271	48.018	161.78	219.53	0.7370	0.8522	668.3
950	1223.15	0.2847	1.1778	78.695	49.336	173.31	234.70	0.7384	0.8174	681.7
1000	1273.15	0.2735	1.1846	81.099	50.635	185.14	250.31	0.7396	0.7853	694.8

Quelle: VDI-Wärmeatlas. Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2006

Stoffwerte von Wasser

t	Celsius-Temperatur	λ	Wärmeleitfähigkeit	Pr	PRANDTL-Zahl
T	Temperatur	η	dynamische Viskosität	β	Ausdehnungskoeffizient
ρ	Dichte	ν	kinematische Viskosität		
c_p	spezifische Wärmekapazität	a	Temperaturleitfähigkeit		

Tabelle 2: Stoffwerte von Wasser beim Druck $p = 1$ bar

t	T	ρ	c_p	λ	η	ν	a	Pr	β
$^{\circ}\text{C}$	K	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$	$\frac{\text{W}}{\text{m K}}$	10^{-6} Pa s	$10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	$10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	–	$10^{-3} \frac{1}{\text{K}}$
0	273.15	999.84	4.219	0.5620	1791.5	1.792	0.1332	13.45	-0.0677
1	274.15	999.90	4.216	0.5641	1730.9	1.731	0.1338	12.94	-0.0497
2	275.15	999.94	4.213	0.5662	1673.4	1.673	0.1344	12.45	-0.0324
3	276.15	999.97	4.210	0.5683	1618.9	1.619	0.1350	11.99	-0.0156
4	277.15	999.97	4.207	0.5703	1567.2	1.567	0.1356	11.56	0.0006
5	278.15	999.97	4.205	0.5723	1518.1	1.518	0.1361	11.15	0.0163
6	279.15	999.94	4.203	0.5743	1471.4	1.472	0.1367	10.77	0.0315
7	280.15	999.90	4.201	0.5763	1427.0	1.427	0.1372	10.40	0.0463
8	281.15	999.85	4.199	0.5782	1384.7	1.385	0.1377	10.06	0.0606
9	282.15	999.78	4.197	0.5801	1344.4	1.345	0.1382	9.727	0.0746
10	283.15	999.70	4.195	0.5820	1305.9	1.306	0.1388	9.414	0.0881
11	284.15	999.61	4.194	0.5838	1269.1	1.270	0.1393	9.117	0.1013
12	285.15	999.50	4.193	0.5857	1234.0	1.235	0.1398	8.834	0.1142
13	286.15	999.38	4.191	0.5875	1200.4	1.201	0.1403	8.565	0.1267
14	287.15	999.25	4.190	0.5893	1168.3	1.169	0.1407	8.308	0.1389
15	288.15	999.10	4.189	0.5910	1137.6	1.139	0.1412	8.063	0.1509
20	293.15	998.21	4.185	0.5995	1001.6	1.003	0.1435	6.991	0.2066
25	298.15	997.05	4.182	0.6075	890.08	0.893	0.1457	6.127	0.2569
30	303.15	995.65	4.180	0.6150	797.35	0.801	0.1478	5.419	0.3029
35	308.15	994.04	4.179	0.6220	719.32	0.724	0.1497	4.833	0.3453
40	313.15	992.22	4.179	0.6286	652.98	0.658	0.1516	4.341	0.3849
45	318.15	990.22	4.179	0.6348	596.07	0.602	0.1534	3.924	0.4222
50	323.15	988.05	4.180	0.6405	546.85	0.553	0.1551	3.568	0.4574
55	328.15	985.71	4.181	0.6458	503.98	0.511	0.1567	3.263	0.4910
60	333.15	983.21	4.183	0.6508	466.40	0.474	0.1582	2.998	0.5231
65	338.15	980.57	4.185	0.6554	433.27	0.442	0.1597	2.767	0.5541
70	343.15	977.78	4.188	0.6596	403.90	0.413	0.1611	2.565	0.5841
75	348.15	974.86	4.192	0.6635	377.75	0.387	0.1624	2.386	0.6132
80	353.15	971.80	4.196	0.6670	354.35	0.365	0.1636	2.229	0.6417
85	358.15	968.62	4.200	0.6702	333.35	0.344	0.1647	2.089	0.6695
90	363.15	965.32	4.205	0.6730	314.41	0.326	0.1658	1.964	0.6970
95	368.15	961.89	4.211	0.6755	297.29	0.309	0.1668	1.853	0.7241
99.61	372.76	958.64	4.216	0.6776	282.92	0.295	0.1676	1.760	0.7489

Quelle: VDI-Wärmeatlas. Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2006

Stoffwerte von Wasser im Sättigungszustand

Tabelle 3: Stoffwerte von Wasser im Sättigungszustand (Teil 1)

t	p	ρ'	ρ''	h'	h''	c'_p	c''_p	β'	β''	Δh_v
$^{\circ}\text{C}$	bar	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$	$10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$	$10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$	$10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$	$10^{-3} \frac{1}{\text{K}}$	$10^{-3} \frac{1}{\text{K}}$	$10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$
0.01	0.006117	999.79	0.004854	0.000612	2500.9	4.220	1.888	-0.06789	3.681	2500.9
5.0	0.008726	999.92	0.006802	21.019	2510.1	4.205	1.892	0.01599	3.618	2489.1
10.0	0.012282	999.65	0.009407	42.021	2519.2	4.196	1.896	0.08789	3.559	2477.2
15.0	0.017057	999.05	0.01284	62.984	2528.4	4.189	1.900	0.1507	3.501	2465.4
20.0	0.023392	998.16	0.01731	83.920	2537.5	4.185	1.906	0.2065	3.447	2453.6
25.0	0.031697	997.00	0.02307	104.84	2546.5	4.182	1.912	0.2568	3.395	2441.7
30.0	0.042467	995.61	0.03041	125.75	2555.6	4.180	1.918	0.3028	3.346	2429.9
35.0	0.056286	994.00	0.03967	146.64	2564.6	4.179	1.925	0.3453	3.298	2418.0
40.0	0.073844	992.18	0.05124	167.54	2573.5	4.179	1.932	0.3849	3.254	2406.0
45.0	0.095944	990.18	0.06556	188.44	2582.5	4.179	1.940	0.4222	3.211	2394.1
50.0	0.12351	988.01	0.08314	209.34	2591.3	4.180	1.948	0.4574	3.171	2382.0
55.0	0.15761	985.67	0.10455	230.24	2600.1	4.181	1.957	0.4910	3.133	2369.9
60.0	0.19946	983.18	0.13042	251.15	2608.8	4.183	1.966	0.5232	3.098	2357.7
65.0	0.25041	980.53	0.16145	272.08	2617.5	4.185	1.976	0.5542	3.064	2345.4
70.0	0.31201	977.75	0.19842	293.02	2626.1	4.188	1.987	0.5841	3.033	2333.1
75.0	0.38595	974.83	0.24218	313.97	2634.6	4.192	1.999	0.6133	3.005	2320.6
80.0	0.47415	971.78	0.29366	334.95	2643.0	4.196	2.012	0.6417	2.979	2308.1
85.0	0.57867	968.60	0.35387	355.95	2651.3	4.200	2.026	0.6696	2.955	2295.4
90.0	0.70182	965.30	0.42388	376.97	2659.5	4.205	2.042	0.6970	2.934	2282.5
95.0	0.84609	961.89	0.50489	398.02	2667.6	4.211	2.059	0.7241	2.916	2269.6
100.0	1.0142	958.35	0.59814	419.10	2675.6	4.217	2.077	0.7510	2.901	2256.5
110.0	1.4338	950.95	0.82686	461.36	2691.1	4.230	2.121	0.8044	2.880	2229.7
120.0	1.9867	943.11	1.1220	503.78	2705.9	4.246	2.174	0.8580	2.871	2202.1
130.0	2.7026	934.83	1.4968	546.39	2720.1	4.265	2.237	0.9124	2.876	2173.7
140.0	3.6150	926.13	1.9665	589.20	2733.4	4.286	2.311	0.9683	2.894	2144.2
150.0	4.7610	917.01	2.5478	632.25	2745.9	4.310	2.396	1.026	2.927	2113.7
160.0	6.1814	907.45	3.2593	675.57	2757.4	4.338	2.492	1.087	2.975	2081.8
170.0	7.9205	897.45	4.1217	719.21	2767.9	4.369	2.599	1.152	3.038	2048.7
180.0	10.026	887.01	5.1583	763.19	2777.2	4.406	2.716	1.222	3.117	2014.0
190.0	12.550	876.08	6.3948	807.57	2785.3	4.447	2.846	1.297	3.214	1977.7
200.0	15.547	864.67	7.8603	852.39	2792.1	4.494	2.990	1.379	3.332	1939.7
210.0	19.074	852.73	9.5875	897.73	2797.4	4.548	3.150	1.469	3.474	1899.7
220.0	23.193	840.23	11.614	943.64	2801.1	4.611	3.328	1.570	3.643	1857.5
230.0	27.968	827.12	13.984	990.21	2803.0	4.683	3.528	1.683	3.845	1812.8
240.0	33.467	813.36	16.748	1037.5	2803.1	4.767	3.755	1.811	4.085	1765.6
250.0	39.759	798.89	19.965	1085.7	2801.0	4.865	4.012	1.958	4.372	1715.3
260.0	46.921	783.62	23.710	1134.8	2796.6	4.981	4.308	2.130	4.717	1661.8
270.0	55.028	767.46	28.072	1185.1	2789.7	5.119	4.655	2.334	5.137	1604.6
280.0	64.165	750.27	33.163	1236.7	2779.8	5.286	5.070	2.580	5.658	1543.1
290.0	74.416	731.91	39.128	1289.8	2766.6	5.492	5.581	2.886	6.316	1476.8
300.0	85.877	712.14	46.162	1344.8	2749.6	5.752	6.223	3.274	7.167	1404.8
310.0	98.647	690.67	54.529	1402.0	2727.9	6.088	7.051	3.785	8.297	1325.9
320.0	112.84	667.08	64.616	1462.1	2700.7	6.541	8.157	4.483	9.858	1238.6
330.0	128.58	640.78	77.018	1525.7	2666.2	7.189	9.738	5.504	12.16	1140.5
340.0	146.00	610.68	92.731	1594.4	2622.1	8.217	12.24	7.186	15.89	1027.7
350.0	165.29	574.69	113.62	1670.9	2563.6	10.10	16.64	10.36	22.66	892.7
360.0	186.66	527.84	143.99	1761.5	2481.0	14.87	27.57	18.81	39.74	719.5
370.0	210.43	450.03	202.18	1892.6	2333.5	47.10	93.40	79.65	148.0	440.9
373.0	218.13	395.81	248.68	1974.1	2227.6	231.91	401.13	435.72	679.1	253.5
373.946	220.64	322.00		2087.5		∞		∞		0.0

Quelle: VDI-Wärmeatlas. Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2006

Tabelle 4: Stoffwerte von Wasser im Sättigungszustand (Teil 2)

t	p	λ'	λ''	η'	η''	ν'	ν''	Pr'	Pr''	σ	b
°C	bar	$10^{-3} \frac{W}{mK}$		$10^{-6} \frac{kg}{ms}$		$10^{-6} \frac{m^2}{s}$		–		$10^{-3} \frac{N}{m}$	$10^{-3} m$
0.01	0.006117	562.0	16.49	1791	9.216	1.792	1899	13.45	1.055	75.65	2.778
5.0	0.008726	572.3	16.85	1518	9.336	1.518	1373	11.16	1.048	74.94	2.765
10.0	0.012282	581.9	17.21	1306	9.461	1.306	1006	9.417	1.042	74.22	2.752
15.0	0.017057	591.0	17.58	1138	9.592	1.139	747.0	8.065	1.037	73.49	2.739
20.0	0.023392	599.5	17.95	1002	9.727	1.003	561.9	6.993	1.033	72.74	2.726
25.0	0.031697	607.5	18.33	890.1	9.867	0.8928	427.6	6.128	1.029	71.97	2.713
30.0	0.042467	615.0	18.71	797.4	10.01	0.8009	329.2	5.420	1.026	71.19	2.700
35.0	0.056286	622.0	19.09	719.3	10.16	0.7237	256.0	4.833	1.024	70.40	2.688
40.0	0.073844	628.6	19.48	653.0	10.31	0.6581	201.2	4.341	1.022	69.60	2.675
45.0	0.095944	634.7	19.88	596.1	10.46	0.6020	159.6	3.924	1.021	68.78	2.661
50.0	0.12351	640.5	20.28	546.8	10.62	0.5535	127.7	3.569	1.020	67.94	2.648
55.0	0.15761	645.8	20.69	504.0	10.77	0.5113	103.1	3.263	1.019	67.10	2.635
60.0	0.19946	650.8	21.10	466.4	10.93	0.4744	83.84	2.998	1.019	66.24	2.621
65.0	0.25041	655.3	21.53	433.3	11.10	0.4419	68.73	2.767	1.019	65.37	2.607
70.0	0.31201	659.6	21.96	403.9	11.26	0.4131	56.75	2.565	1.019	64.48	2.593
75.0	0.38595	663.4	22.41	377.7	11.43	0.3875	47.18	2.387	1.019	63.58	2.579
80.0	0.47415	667.0	22.86	354.3	11.59	0.3646	39.48	2.229	1.020	62.67	2.565
85.0	0.57867	670.1	23.32	333.3	11.76	0.3441	33.23	2.089	1.022	61.75	2.550
90.0	0.70182	673.0	23.80	314.4	11.93	0.3257	28.14	1.964	1.023	60.82	2.535
95.0	0.84609	675.5	24.29	297.3	12.10	0.3091	23.96	1.853	1.025	59.87	2.520
100.0	1.0142	677.8	24.79	281.7	12.27	0.2940	20.51	1.753	1.028	58.91	2.504
110.0	1.4338	681.3	25.85	254.7	12.61	0.2678	15.25	1.582	1.035	56.96	2.473
120.0	1.9867	683.6	26.96	232.1	12.96	0.2461	11.55	1.441	1.045	54.97	2.439
130.0	2.7026	684.8	28.15	212.9	13.30	0.2277	8.886	1.326	1.057	52.93	2.405
140.0	3.6150	684.9	29.42	196.5	13.65	0.2122	6.940	1.230	1.072	50.86	2.369
150.0	4.7610	683.9	30.77	182.5	13.99	0.1990	5.492	1.150	1.089	48.74	2.331
160.0	6.1814	681.8	32.22	170.2	14.34	0.1876	4.399	1.083	1.109	46.59	2.292
170.0	7.9205	678.7	33.77	159.6	14.68	0.1778	3.562	1.027	1.130	44.41	2.251
180.0	10.026	674.6	35.42	150.1	15.03	0.1693	2.913	0.9805	1.152	42.19	2.209
190.0	12.550	669.5	37.19	141.8	15.37	0.1618	2.403	0.9417	1.176	39.95	2.164
200.0	15.547	663.4	39.10	134.3	15.71	0.1553	1.999	0.9099	1.202	37.67	2.117
210.0	19.074	656.3	41.14	127.6	16.06	0.1496	1.675	0.8843	1.230	35.38	2.069
220.0	23.193	648.2	43.34	121.5	16.41	0.1446	1.413	0.8644	1.260	33.07	2.017
230.0	27.968	639.1	45.72	116.0	16.76	0.1402	1.199	0.8497	1.294	30.74	1.963
240.0	33.467	629.0	48.32	110.9	17.13	0.1363	1.023	0.8401	1.331	28.39	1.906
250.0	39.759	617.8	51.16	106.1	17.49	0.1328	0.8762	0.8356	1.372	26.04	1.846
260.0	46.921	605.6	54.30	101.7	17.88	0.1298	0.7540	0.8363	1.418	23.69	1.783
270.0	55.028	592.2	57.81	97.50	18.28	0.1270	0.6511	0.8427	1.471	21.34	1.715
280.0	64.165	577.7	61.79	93.51	18.70	0.1246	0.5639	0.8555	1.534	18.99	1.643
290.0	74.416	562.0	66.37	89.66	19.15	0.1225	0.4895	0.8761	1.611	16.66	1.566
300.0	85.877	545.0	71.75	85.90	19.65	0.1206	0.4257	0.9066	1.704	14.36	1.483
310.0	98.647	526.5	78.24	82.17	20.21	0.1190	0.3706	0.9502	1.821	12.09	1.392
320.0	112.84	506.5	86.35	78.41	20.85	0.1175	0.3226	1.013	1.969	9.864	1.292
330.0	128.58	484.8	96.96	74.54	21.61	0.1163	0.2805	1.105	2.170	7.703	1.180
340.0	146.00	461.4	111.7	70.43	22.55	0.1153	0.2432	1.254	2.471	5.625	1.052
350.0	165.29	436.5	134.5	65.87	23.82	0.1146	0.2096	1.525	2.946	3.665	0.9004
360.0	186.66	411.9	176.6	60.36	25.73	0.1144	0.1787	2.179	4.016	1.877	0.7062
370.0	210.43	418.1	309.5	51.92	29.70	0.1154	0.1469	5.848	8.964	0.3882	0.3997
373.0	218.13	535.0	507.0	46.42	33.22	0.1173	0.1336	20.13	26.280	0.0648	0.2118
373.946	220.64	–	–	39.43	–	0.1225	–	∞	–	0	0

Quelle: VDI-Wärmeatlas. Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2006