



Wärmeübertragung I

13. Übung (Kondensation)

1. Aufgabe

Aus der Endstufe einer Dampfturbine soll durch Kondensation ein Nassdampfmassenstrom von $\dot{M}_D = 40 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ bei einem Druck von $p_D = 0,05 \text{ bar}$ mit einem Dampfgehalt von $x = 0,9$ abgezogen werden. Zur Kühlung des Kondensators steht Flusswasser mit einer Temperatur von $T_{w,\text{ein}} = 10^\circ\text{C}$ zur Verfügung.

- Berechnen Sie den zur Totalkondensation minimal erforderlichen Kühlwassermassenstrom $\dot{M}_{w,\text{min}}$.
- Wie groß wird die erforderliche Austauschfläche des Kondensators für einen Kühlwassermassenstrom von $\dot{M}_w = 2 \cdot \dot{M}_{w,\text{min}}$, wenn man zunächst mit einem geschätzten Wärmedurchgangskoeffizienten von $k = 2000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}}$ rechnet?
- Wie viele parallele Kondensatorrohre 22x2 mm von 7 m Länge werden benötigt? Wie groß wird etwa der Mantelraumdurchmesser, wenn die Rohre in quadratischer Teilung von 35 mm angeordnet werden?
- Wie hoch ist die Strömungsgeschwindigkeit des Kühlwassers bei einem wasserseitigen Durchgang?
- Berechnen Sie nun den Wärmedurchgangskoeffizienten und korrigieren Sie gegebenenfalls die berechnete Austauschfläche.
- Wie ändert sich k durch Anlagerung einer 0,05 mm starken Gallertschicht ($\lambda_G = 0,35 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$) in den Rohren?

Daten:

Dampfdichte bei 0,05 bar: ($T_S = 33^\circ\text{C}$)

$$\rho'' = 0,0355 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Verdampfungsenthalpie bei 33°C

$$\Delta h_v = 2423 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Wärmeleitfähigkeit des Rohrwerkstoffes

$$\lambda_R = 80 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$$

Stoffwerte von Wasser:

$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$c_p, \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$	$\lambda, \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$	$\nu, \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	Pr
0	999,8	4217	0,569	$1,75\cdot 10^{-6}$	13,0
10	999,8	4192	0,587	$1,30\cdot 10^{-6}$	9,28
20	998,4	4182	0,604	$1,00\cdot 10^{-6}$	6,94
30	995,8	4178	0,618	$0,80\cdot 10^{-6}$	5,39
40	992,3	4179	0,632	$0,656\cdot 10^{-6}$	4,30
50	988,1	4181	0,643	$0,551\cdot 10^{-6}$	3,54

Die Dampfgeschwindigkeit und Einflüsse durch abtropfendes Kondensat auf weiter unten liegende Rohre können vernachlässigt werden.

2. Aufgabe (Klausuraufgabe)

Auf der Außenseite eines senkrechten Rohres (Länge L , Durchmesser D) kondensiert gesättigter Wasserdampf mit der Temperatur T_S . Im Ablauf wird für den stationären Betrieb ein Kondensatmassenstrom \dot{M}_K gemessen.

- a) Welcher Wärmestrom \dot{Q} wird durch die Rohrwände abgeführt?
 b) Wie groß ist die Kondensatfilmdicke ε am unteren Ende des Rohres im Falle laminarer Filmströmung? Gehen Sie dabei von folgendem Geschwindigkeitsprofil aus:

$$u(y) = \frac{g}{\nu_f} \cdot \left(\varepsilon \cdot y - \frac{y^2}{2} \right). \text{ Die Rohrkrümmung sei vernachlässigbar.}$$

- c) Zeigen Sie, dass für den Film folgende Beziehung gilt: $Re_f = Nu_f \cdot X_\Theta$ mit:

$$X_\Theta = K_L \cdot K_T \text{ und } K_L = \frac{L}{(\nu_f^2/g)^{1/3}}; \quad K_T = \frac{\lambda_f \cdot (T_S - T_W)}{\eta_f \cdot \Delta h_V}$$

- d) Berechnen Sie nun die mittlere Wandtemperatur T_W .

Daten:

Kondensatmassenstrom	$\dot{M}_K = 120 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$
Siedetemperatur	$T_S = 100^\circ\text{C}$
Rohrlänge	$L = 2 \text{ m}$
Rohrdurchmesser	$D = 0,05 \text{ m}$
Verdampfungsenthalpie bei T_S	$\Delta h_V = 2280 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
Erdbeschleunigung	$g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
mittlere Dichte des Kondensats	$\rho_f = 980 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
mittlere Wärmeleitfähigkeit	$\lambda_f = 0,65 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$
mittlere dyn. Viskosität	$\eta_f = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
mittlere Wärmekapazität	$c_{p,f} = 4200 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$

Verwendete Formelzeichen:

Re_f	-	Reynolds-Zahl im Film
Nu_f	-	Nusselt-Zahl
T_W	-	mittlere Wandtemperatur
ν_f	-	mittlere kinematische Viskosität
y	-	Koordinate senkrecht zur Rohrwand