

Thermodynamik I

Lösung –BSc - WS 2003/04

Aufgabe 1:

$$\dot{W}_{KV} = \dot{m}_L (h_{L,1} - h_{L,2}) + \dot{m}_W (h_{W,in} - h_{W,out})$$

mit der Annahme, dass Luft als ideales Gas betrachtet werden kann:

$$\dot{m} = \frac{(AV)_1}{v_1} = \frac{p_1(AV)_1}{RT_1} = \frac{\left(10^5 \text{ N/m}^2\right) \left(9 \text{ m}^3/\text{min}\right)}{\left(\frac{8314 \text{ N}\cdot\text{m}}{28.97 \text{ kg}\cdot\text{K}}\right)(293 \text{ K})} = 10.703 \frac{\text{kg}}{\text{min}}$$

Mit Tabelle A-22, der spezifischen mittleren Wärme für Wasser Tabelle A-19, $c=4.19 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$, und der Gleichung $\Delta h = c\Delta T + v\Delta p$ und $\Delta p=0$ folgt:

$$\begin{aligned} \dot{W}_{KV} &= \left(10.703 \frac{\text{kg}}{\text{min}}\right)(293.2 - 434.5) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + \left(8.6 \frac{\text{kg}}{\text{min}}\right) \left(4.19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right)(290 - 298) \text{K} = \\ &= (-1512.3 - 288.3) \left(\frac{\text{kJ}}{\text{min}}\right) \left(\frac{\text{min}}{60 \text{ s}}\right) \left(\frac{\text{kW}}{\text{kJ/s}}\right) = -30.01 \text{ kW} \end{aligned}$$

oder mit Tabelle:

$$\begin{aligned} h_{L,1} &= 293.166 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, \quad h_{L,2} = 434.484 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, \quad s_{L,1}^o = 1.678298 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}, \quad s_{L,2}^o = 2.072341 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \\ h_{W,in} &= 71.38 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, \quad h_{W,out} = 104.89 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, \quad s_{W,in} = 0.2535 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}, \quad s_{W,out} = 0.3674 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \end{aligned}$$

Für die Entropiebilanz gilt:

$$\begin{aligned}
 0 &= \sum \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \dot{m}_L (s_1 - s_2) + \dot{m}_W (s_{W,in} - s_{W,out}) + \dot{S}_{erz} \\
 \text{bzw. mit } \sum \frac{\dot{Q}_j}{T_j} &= 0 \Rightarrow \\
 \dot{S}_{erz} &= \dot{m}_L \left(s_2^o - s_1^o - R \ln \frac{p_2}{p_1} \right) + \dot{m}_W \cdot c \cdot \ln \frac{T_{W,out}}{T_{W,in}} \\
 &= \left(10.703 \frac{\text{kg}}{\text{min}} \right) \left(2.07234 - 1.6783 - \frac{8.314}{28.97} \ln(5) \right) \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} + \\
 &\quad + \left(8.6 \frac{\text{kg}}{\text{min}} \right) \left(4.19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) \ln \left(\frac{298}{290} \right) = \\
 &= (-0.72617 + 0.9801) \left(\frac{\text{kJ}/\text{min}}{\text{K}} \right) \left(\frac{\text{min}}{60 \text{ s}} \right) \left(\frac{\text{kW}}{\text{kJ}/\text{s}} \right) \\
 &= 4.23 \cdot 10^{-3} \text{ kW/K}
 \end{aligned}$$

Aufgabe 2)

Der 1. Hauptsatz für offene Systeme (ohne potentielle und kinetische Energie)

$$\dot{Q}_{KV} - \dot{W}_{KV} = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

Entropiebilanz:

$$\dot{S}_{erz} = -\frac{\dot{Q}_{KV}}{T_\infty} + \dot{m}(s_2 - s_1) \Rightarrow \dot{Q}_{KV} = \dot{m}T_\infty(s_2 - s_1) - T_\infty\dot{S}_{erz}$$

Damit ergibt sich für die Arbeit:

$$\dot{W}_{KV} = \dot{m}[(h_1 - h_2) + T_\infty(s_2 - s_1)] - T_\infty\dot{S}_{erz}$$

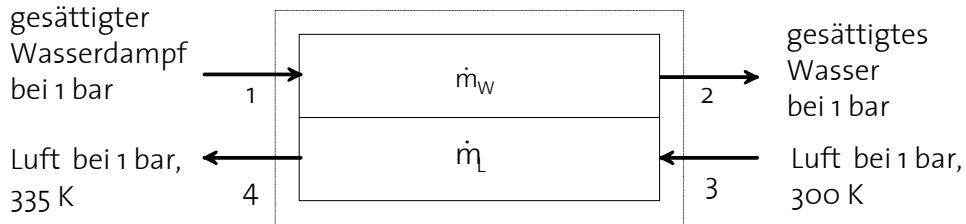
Der erste Summand (Term in Klammern) ist gegeben durch die Randbedingungen. Der zweite Summand (Entropieerzeugung) ist entweder grösser oder gleich Null. Die theoretisch maximal mögliche Arbeit des Kraftwerks erhält man somit unter der Bedingung, dass die Entropieerzeugung gleich Null ist. Das heisst:

$$\begin{aligned}\dot{W}_{KV} &= \dot{m}[(h_1 - h_2) + T_\infty(s_2 - s_1)] - T_\infty\dot{S}_{erz}^= \Rightarrow \\ \dot{W}_{KV}^{\max} &= \dot{m}[(h_1 - h_2) + T_\infty(s_2 - s_1)]\end{aligned}$$

mit Tabelle A-22 und der Annahme, dass Luft als ideales Gas betrachtet werden kann, folgt:

$$\begin{aligned}\dot{W}_{KV}^{\max} &= \dot{m}[(h_1 - h_2) + T_\infty(s_2 - s_1)] = \\ &= \dot{m} \left[(h(T_1) - h(T_2)) + T_\infty \left(s^\circ(T_2) - s^\circ(T_1) - \bar{R} \ln \frac{p_2}{p_1} \right) \right] \text{ mit } p_2 = p_1 \Rightarrow \\ \dot{W}_{KV}^{\max} &= \dot{m}[(h(T_1) - h(T_2)) + T_\infty(s^\circ(T_2) - s^\circ(T_1))] = \\ &= \left(3.9 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) \left[(295.17 - 706.8) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 761 \text{K} (2.5635 - 1.68515) \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] = \\ &= 1001.5 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \left(\frac{1 \cdot \text{MW}}{10^3 \text{kJ/s}} \right) \approx 1 \text{MW}\end{aligned}$$

Aufgabe 3:



a)

$$\text{Die Kontinuitätsgleichung: } \dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_w; \quad \dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_L$$

Der 1. Hauptsatz für offene Systeme und den entsprechenden Werten aus Tabelle A-3 und A-22:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{KV}^{=0} - \dot{W}_{KV}^{=0} &= \dot{m}_w (h_2 - h_1) + \dot{m}_L (h_4 - h_3) \Rightarrow \\ \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_w} &= \frac{(h_1 - h_2)}{(h_4 - h_3)} = \frac{2258 \text{ kJ/kg}}{(335.38 - 300.19) \text{ kJ/kg}} = 64.17 \frac{\text{kg(Luft)}}{\text{kg(Wasser)}} \end{aligned}$$

b)

$$ex_2 - ex_1 = (h_2 - h_1) - T_o (s_2 - s_1) = \left(-2258 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) - 300 \text{ K} \left(1.3026 - 7.3594 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) = -440.96 \frac{\text{kJ}}{\text{kg(Wasser)}}$$

c)

$$\begin{aligned} ex_4 - ex_3 &= (h_4 - h_3) - T_o (s_4 - s_3) = (h_4 - h_3) - T_o \left(s^o(T_4) - s^o(T_3) - \bar{R} \ln \frac{p_4}{p_3} \right) = \\ &= (h_4 - h_3) - T_o (s^o(T_4) - s^o(T_3)) = \\ &= \left(335.38 - 300.19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) - 300 \text{ K} \left(1.8129 - 1.70203 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) = 1.929 \frac{\text{kJ}}{\text{kg(Luft)}} \end{aligned}$$

d.h. die Exergieänderung pro kg Wasser ergibt sich zu:

$$\frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_w} (ex_4 - ex_3) = 64.17 (1.929) = 123.78 \frac{\text{kJ}}{\text{kg(Wasser)}}$$

d)

mit der Angabe, dass es sich hier um einen stationär arbeitenden Wärmetauscher handelt berechnet sich der Exnergieverlust zu:

$$\begin{aligned} o &= \sum_{i=1}^4 \left(1 - \frac{T_o}{T_i} \right) \delta Q_i - \left[\dot{W} - p_o \frac{dV}{dt} \right] - \Delta ex|_1^2 - \Delta ex|_3^4 - T_o \dot{S}_{erz} \Rightarrow \\ \frac{\dot{S}_{erz} T_o}{\dot{m}_w} &= \left[(-\Delta ex|_1^2) + \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_w} (-\Delta ex|_3^4) \right] = \left[(\Delta ex|_2^1) + \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_w} (\Delta ex|_4^3) \right] = \\ &= \left[(ex_1 - ex_2) + \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_w} (ex_3 - ex_4) \right] = (440.96 - 123.78) \frac{\text{kJ}}{\text{kg(Wasser)}} = 317.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg(Wasser) \cdot K}} \end{aligned}$$

Aufgabe 4:

1. Hauptsatz für geschlossene Systeme:

$$Q - W_R = \Delta U \Rightarrow -W_R = \Delta U_{\text{Eisen}} + \Delta U_{\text{Wasser}}$$
$$-W_R = [m \cdot c \cdot (T_2 - T_1)]_{\text{Eisen}} + [m \cdot c \cdot (T_2 - T_1)]_{\text{Wasser}}$$

mit

$$m_{\text{Wasser}} = \rho V = (1000 \cdot \text{kg/m}^3)(0.08 \cdot \text{m}^3) = 80 \text{ kg}$$
$$W_R = P_R \cdot \Delta t = \dot{W}_R \cdot \Delta t = (0.2 \cdot \text{kJ/s})(25 \cdot 60 \cdot \text{s}) = 300 \text{ kJ}$$

und den entsprechenden Werten für die spez. Wärmekapazität von Eisen und Wasser; Tabelle A-19 folgt (W_R wird zugeführt):

$$-(-300 \text{ kJ}) = m_{\text{Eisen}} \left(0.447 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) (27 - 90) \text{ K} + (80 \text{ kg}) \left(4.179 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) (27 - 20) \text{ K}$$
$$\Rightarrow m_{\text{Eisen}} = 72.449 \text{ kg}$$