

# Thermodynamik I – Lösung Rechenübung 10

## Aufgabe 1

a) Energiebilanz im stationären Zustand:

$$0 = \dot{Q}_{KV} - P_{KV} + \dot{m}[(h_1 - h_2) + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} + \underbrace{g(z_1 - z_2)}_{=0}]$$

$$\Rightarrow w_t = \frac{P_{KV}}{\dot{m}} = \frac{\dot{Q}_{KV}}{\dot{m}} + (h_1 - h_2) + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2}$$

Aus Tabelle A-4 bzw. A-2:  $h_1 = 3230.9 \text{ kJ/kg}$  und  $h_2 = 2676.1 \text{ kJ/kg} \Rightarrow$

$$w_t = -30 \text{ kJ/kg} + (3230.9 - 2676.1) \text{ kJ/kg} + \left[ \frac{(160 \text{ m/s})^2 - (100 \text{ m/s})^2}{2} \right] \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \frac{\text{kJ}}{10^3 \text{ Nm}}$$

$$= 532.6 \text{ kJ/kg}$$

Exergiebilanz für offenes System und mit dem Term für  $w_t \Rightarrow$

$$e_v = \frac{\dot{E}_v}{\dot{m}} = \left(1 - \frac{T_o}{T_b}\right) \frac{\dot{Q}_{KV}}{\dot{m}} - \frac{P_{KV}}{\dot{m}} + [(h_1 - h_2) - T_o(s_1 - s_2) + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2}]$$

$$= \left(1 - \frac{T_o}{T_b}\right) \frac{\dot{Q}_{KV}}{\dot{m}} - \left[ \frac{\dot{Q}_{KV}}{\dot{m}} + (h_1 - h_2) + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} \right] + [(h_1 - h_2) - T_o(s_1 - s_2) + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2}]$$

$$= T_o(s_2 - s_1) - \frac{T_o}{T_b} \frac{\dot{Q}_{KV}}{\dot{m}}$$

mit Tab. A-2 und A-4  $\Rightarrow$

$$e_v = \frac{\dot{E}_v}{\dot{m}} = 295 [(7.3549 - 6.9212) - (\frac{-30}{400})] \text{ kJ/kg} = 150.11 \text{ kJ/kg}$$

b)  $\Rightarrow e_v = \frac{\dot{E}_v}{\dot{m}} = 300 [(7.3549 - 6.9212) - (\frac{-30}{300})] \text{ kJ/kg} = 160.11 \text{ kJ/kg}$

Für Fall b) ist der Exergieverlust grösser, da der Exergieverlust beim Wärmetausch mit der Umgebung mit in die Bilanz eingeht.

## Aufgabe 2

Annahmen:

- Das Kontrollvolumen ist im stationären Zustand.
- Es gibt keine Arbeit, keinen Wärmeübergang zur Umgebung, keine Änderung der kinetischen und potentiellen Energie.
- Ideales Gasmodell für beide Ströme.

a) Die Energiebilanz des Systems:

$$0 = \underbrace{\dot{Q}_{KV}}_{=0} - \underbrace{\dot{W}_{KV}}_{=0} + \dot{m}[(h_1 - h_2) + \underbrace{\frac{1}{2}(v_1^2 - v_2^2)}_{=0} + g \underbrace{(z_1 - z_2)}_{=0}] + \dot{m}[(h_3 - h_4) + \underbrace{\frac{1}{2}(v_3^2 - v_4^2)}_{=0} + g \underbrace{(z_3 - z_4)}_{=0}]$$

ergibt für  $h_4$  mit Werten aus Tabelle A-22:

$$h_4 = h_1 - h_2 + h_3 = 617.53 - 888.27 + 1068.89 = 798.15 \text{ kJ/kg}$$

Durch Interpolation mit Tabelle A-22 folgt  $T_4 = 778 \text{ K}$ .

b) Änderung der Exergie im Luftstrom:

$$\begin{aligned} \dot{m}(e_{x,2,str} - e_{x,1,str}) &= \dot{m}[(h_2 - h_1) - T_0(s_2 - s_1)] \\ &= \dot{m}[(h_2 - h_1) - T_0(s_2^0 - s_1^0 - R \ln \frac{p_2}{p_1})] \\ &= 90 \frac{\text{kg}}{\text{s}} [(888.27 - 617.53) \text{ kJ/kg} - 300 \text{ K} (2.79783 - 2.42644 - \frac{8.314}{28.97} \ln \frac{9.7}{10}) \text{ kJ/kg K}] \\ &= 14.1 \text{ MW} \end{aligned}$$

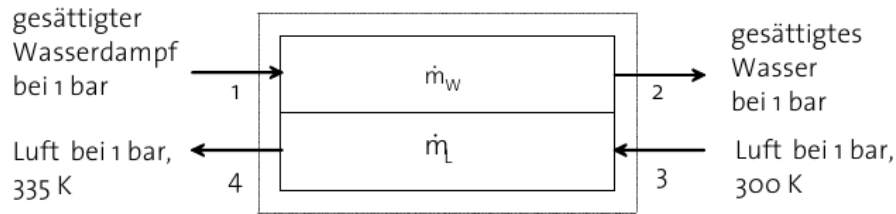
Änderung der Exergie im Strom des Verbrennungsgases:

$$\begin{aligned} \dot{m}(e_{x,4,str} - e_{x,3,str}) &= \dot{m}[(h_4 - h_3) - T_0(s_4^0 - s_3^0 - R \ln \frac{p_4}{p_3})] \\ &= 90 \frac{\text{kg}}{\text{s}} [(798.15 - 1068.89) \text{ kJ/kg} - 300 \text{ K} (2.68769 - 2.99034 - \frac{8.314}{28.97} \ln \frac{1}{1.1}) \text{ kJ/kg K}] \\ &= -16.93 \text{ MW} \end{aligned}$$

c) Der Exergieverlust resultiert aus einer Exergiebilanz:

$$\begin{aligned} 0 &= \sum_j \underbrace{(1 - \frac{T_0}{T_j})}_{=0} \dot{Q}_j - \underbrace{\dot{W}_{KV}}_{=0} + \dot{m}(e_{x,1,str} - e_{x,2,str}) + \dot{m}(e_{x,3,str} - e_{x,4,str}) - T_0 \dot{S}_{erz} \\ \dot{E}_{x,Verlust} &= T_0 \dot{S}_{erz} = \dot{m}(e_{x,1,str} - e_{x,2,str}) + \dot{m}(e_{x,3,str} - e_{x,4,str}) \\ &= -14.1 \text{ MW} + 16.93 \text{ MW} = 2.83 \text{ MW} \end{aligned}$$

## Aufgabe 3



- a) Die Kontinuitätsgleichung:  $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_W$ ;  $\dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_L$

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

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

- b)

$$e_{x,2} - e_{x,1} = (h_2 - h_1) - T_0(s_2 - s_1) = (-2258) \text{ kJ/kg} - 300 \text{ K}(1.3026 - 7.3594) \text{ kJ/(kg K)} = -440.96 \frac{\text{kJ}}{\text{kg(Wasser)}}$$

- c)

$$\begin{aligned} e_{x,4} - e_{x,3} &= (h_4 - h_3) - T_0(s_4 - s_3) = (h_4 - h_3) - T_0(s^0(T_4) - s^0(T_3) - R \ln \frac{p_4}{p_3}) \\ &= (h_4 - h_3) - T_0(s^0(T_4) - s^0(T_3)) \\ &= (335.38 - 300.19) \text{ kJ/kg} - 300 \text{ K}(1.8129 - 1.70203) \text{ kJ/kg K} \\ &= 1.929 \frac{\text{kJ}}{\text{kg(Luft)}} \end{aligned}$$

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

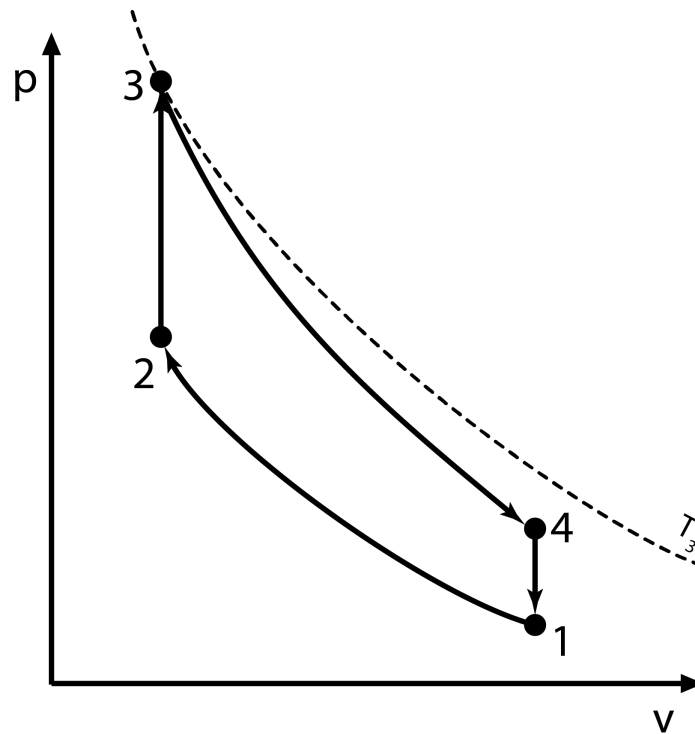
$$\frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_W}(e_{x,4} - e_{x,3}) = 64.17 \cdot 1.929 = 123.78 \text{ kJ/kg(Wasser)}$$

- d) Mit der Angabe, dass es sich hier um einen stationär arbeitenden Wärmetauscher handelt, berechnet sich der Exergieverlust zu:

$$\begin{aligned} 0 &= (1 - \frac{T_0}{T_b})\dot{Q} - [\dot{W} - p_o \frac{\partial V}{\partial t}] - \dot{m}_W \Delta e_x|_1^2 - \dot{m}_L \Delta e_x|_3^4 - T_0 \dot{S}_{erz} \Rightarrow \\ \frac{\dot{S}_{erz} T_0}{\dot{m}_W} &= (-\Delta e_x|_1^2) + \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_W} (-\Delta e_x|_3^4) \\ &= (\Delta e_x|_2^1) + \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_W} (\Delta e_x|_4^3) \\ &= [(e_{x,1} - e_{x,2}) + \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_W} (e_{x,3} - e_{x,4})] = (440.96 - 123.78) \frac{\text{kJ}}{\text{kg(Wasser)}} \\ &= 317.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg(Wasser)}} \end{aligned}$$

## Aufgabe 4

a) p-v Diagramm



b) Es wird nur Tabelle A-22 verwendet.

$$1 | \quad u_1 = 214.07 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad v_{r1} = 621.2$$

$$2 | \quad \frac{v_{r1}}{v_{r2}} = \frac{V_1}{V_2} = r \quad v_{r2} = \frac{v_{r1}}{r} = 69.022 \quad u_2 = 514.497 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{ (interpoliert)}$$

$$3 | \quad u_3 - u_2 = q_{23} - w_{23} \quad u_3 = u_2 + q_{23} = 1714.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ v_{r3} = 2.612 \text{ (interpoliert)}$$

$$4 | \quad \frac{v_{r4}}{v_{r3}} = \frac{V_4}{V_3} = r \quad v_{r4} = r \cdot v_{r3} = 23.504 \quad u_4 = 778.906 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{ (interpoliert)}$$

$$c) \quad \eta_{th} = 1 - \frac{|Q_{kalt}|}{|Q_{heiss}|} = 1 - \frac{u_4 - u_1}{u_3 - u_2} = 0.529$$

$$d) \quad P = \dot{W}_{net} = \underbrace{\frac{3200 \frac{\text{U}}{\text{min}}}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}}_{\# \text{ Otto-Zyklen pro s}} \cdot \frac{1 \text{ zyklus}}{2 U} \cdot \underbrace{4 \cdot m_{cyl} \cdot q_{23} \cdot \eta_{th}}_{W_{net} \text{ pro Otto-Zyklus}}, m_{cyl} = \frac{p_1 V_1}{RT_1} = 5.46 \cdot 10^{-4} \text{ kg}$$

$$P = \dot{W}_{net} = 36.98 \text{ kW} = 50.32 \text{ PS}$$