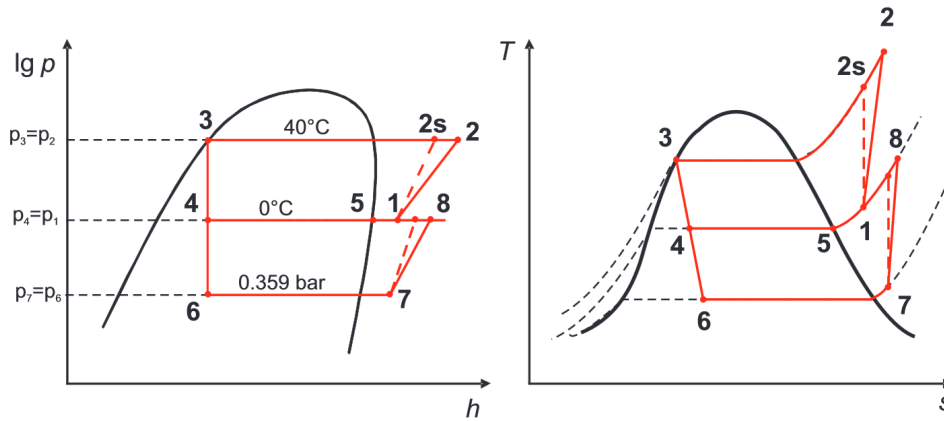


Musterlösung Aufgabe 1: «Kühl/Gefrierfach»

I. TEILAUFGABE A) ⇒ 6 PUNKTE



II. TEILAUFGABE B) ⇒ 3 PUNKTE

$$\dot{Q}_K = \dot{m}_K \cdot (h_5 - h_4) = 250 \text{ W} \Rightarrow \dot{m}_K = \frac{\dot{Q}_K}{h_5 - h_4}$$

$$h_4 = h_3 = h'(40^\circ\text{C}) = 296.82 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$$

$$h_5 = h''(0^\circ\text{C}) = 585.27 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$$

$$\dot{m}_K = \frac{250 \text{ W}}{(585.27 - 296.82) \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)} = 8.67 \cdot 10^{-4} \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) = 0.867 \left(\frac{\text{g}}{\text{s}}\right)$$

$$\dot{Q}_G = \dot{m}_G \cdot (h_5 - h_4) = 250 \text{ W} \Rightarrow \dot{m}_G = \frac{\dot{Q}_K}{h_7 - h_6}$$

$$h_6 = h_4 = h_3 = h'(40^\circ\text{C}) = 296.82 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$$

$$h_7 = h((-25^\circ\text{C} + 4\text{K}) = -21^\circ\text{C}, 0.359 \text{ bar}, \text{überhitzter Zustand}) = 556.06 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$$

$$\dot{m}_G = \frac{150 \text{ W}}{(556.06 - 296.82) \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)} = 5.786 \cdot 10^{-4} \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) = 0.5786 \left(\frac{\text{g}}{\text{s}}\right)$$

III. TEILAUFGABE C) ⇒ 5 PUNKTE

$$\eta_{s,V} = \frac{1}{1.25} = 0.8$$

$$P_{78} = \dot{m}_G \cdot w_{t,78}$$

$$\eta_{s,V} = \frac{w_{ts,78}}{w_{t,78}} \Rightarrow w_{t,78} = \frac{w_{ts,78}}{\eta_{s,V}} = \frac{h_{8s} - h_7}{\eta_{s,V}}$$

$$s_7 = s_8 = 2.4459 \left(\frac{kJ}{kgK} \right) \Rightarrow h_{8s} = 595.05 \left(\frac{kJ}{kg} \right)$$

$$w_{t,78} = \frac{595.05 - 556.06}{0.8} = 48.7 \left(\frac{kJ}{kg} \right)$$

$$P_{78} = 5.786 \cdot 10^{-4} \left(\frac{kg}{s} \right) \cdot 48.7 \left(\frac{kJ}{kg} \right) = 28.18 \text{ (W)}$$

$$h_8 = w_{t,78} + h_7 = 48.7 \left(\frac{kJ}{kg} \right) + 556.06 \left(\frac{kJ}{kg} \right) = 604.8 \left(\frac{kJ}{kg} \right)$$

$$h_1 = \frac{\dot{m}_K \cdot h_5 + \dot{m}_G \cdot h_8}{\dot{m}_K + \dot{m}_G}$$

$$h_1 = \frac{8.67 \cdot 10^{-4} \left(\frac{kg}{s} \right) \cdot 585.27 \left(\frac{kJ}{kg} \right) + 5.786 \cdot 10^{-4} \left(\frac{kg}{s} \right) \cdot 604.8 \left(\frac{kJ}{kg} \right)}{8.67 \cdot 10^{-4} \left(\frac{kg}{s} \right) + 5.786 \cdot 10^{-4} \left(\frac{kg}{s} \right)} = 593.088 \left(\frac{kJ}{kg} \right)$$

$$s_{2s} = s_1 = 2.4388 \left(\frac{kJ}{kgK} \right) \Rightarrow h_{2s} = 644.41 \left(\frac{kJ}{kg} \right)$$

$$w_{t,12} = \frac{w_{ts,12}}{\eta_{s,V}} = \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_{s,V}} = \frac{644.41 - 593.88}{0.8} = 63.16 \left(\frac{kJ}{kg} \right)$$

$$P_{12} = \dot{m} \cdot w_{t,12} = \left(8.67 \cdot 10^{-4} \left(\frac{kg}{s} \right) + 5.786 \cdot 10^{-4} \left(\frac{kg}{s} \right) \right) \cdot 63.16 \left(\frac{kJ}{kg} \right) = 91.3 \text{ (W)}$$

IV. TEILAUFGABE D) \Rightarrow 1 PUNKTE

$$\varepsilon_K = \frac{\dot{Q}_0}{P} = \frac{\dot{Q}_{67} + \dot{Q}_{45}}{P_{78} + P_{12}} = \frac{(150 + 250)W}{(28.18 + 91.3)W} = 3.3$$

V. TEILAUFGABE E) \Rightarrow 5 PUNKTE

$$\eta_{ex.} = \frac{|\dot{E}_{\dot{Q}_{zu}}|}{P_{zu}} = \frac{|\dot{E}_{\dot{Q}_{67}} + \dot{E}_{\dot{Q}_{45}}|}{P_{78} + P_{12}}$$

$$\dot{E}_{\dot{Q}_{67}} = \left(1 - \frac{T_u}{T_{m,67}} \right) \cdot \dot{Q}_{67}$$

$$T_{m,67} = \frac{\Delta h_{67}}{\Delta s_{67}}$$

$$x_6 = \frac{h_6 - h'}{h'' - h'} = \frac{296.82 - 143.51}{549.98 - 143.51} = 0.37717$$

$$s_6 = s' + x_6 \cdot (s'' - s') = 0.7836 + 0.37717 \cdot (2.4216 - 0.7836) = 1.4014 \left(\frac{kJ}{kgK} \right)$$

$$T_{m,67} = \frac{556.06 - 296.82}{2.4459 - 1.4014} = 248.198 \text{ (K)}$$

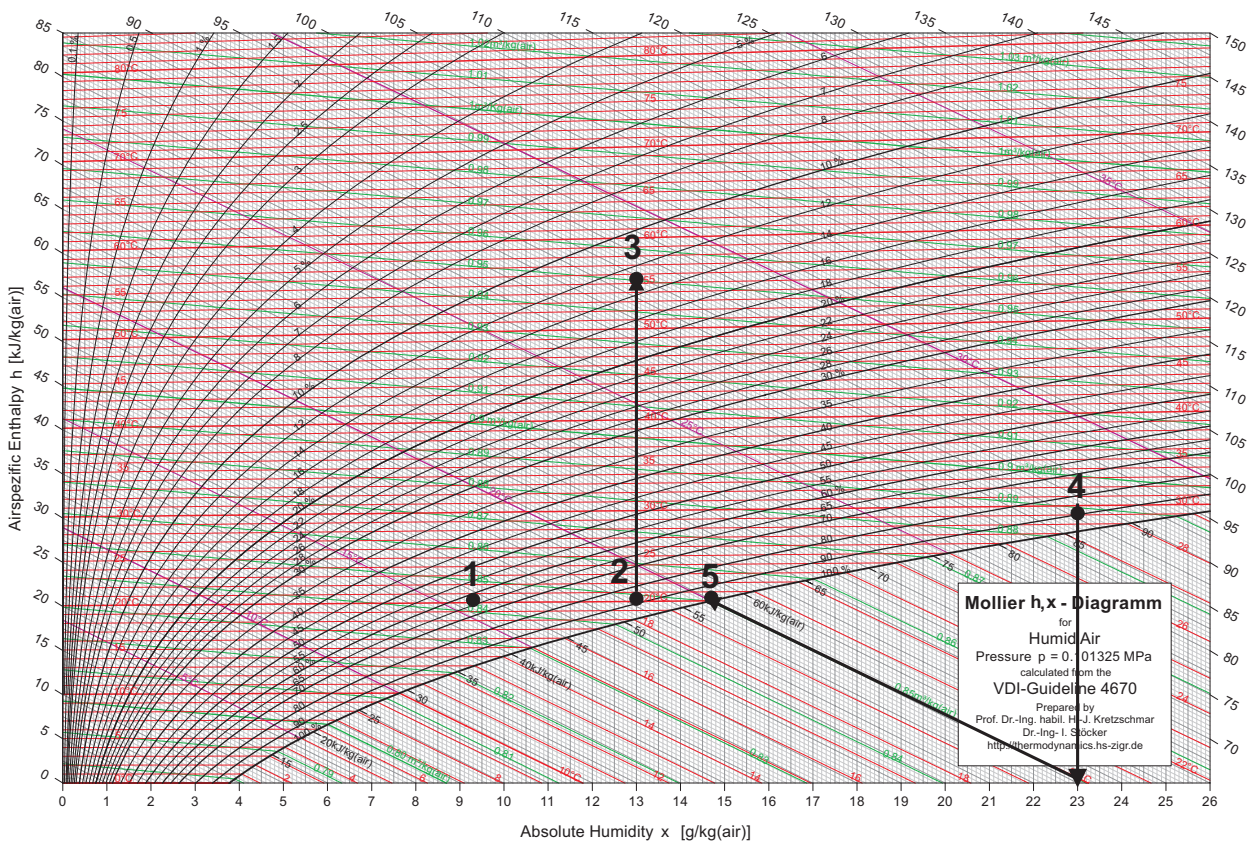
$$\dot{E}_{\dot{Q}_{67}} = \left(1 - \frac{298(K)}{248,198(K)} \right) \cdot 150(W) = -30.189 \text{ (W)}$$

$$\dot{E}_{\dot{Q}_{45}} = \left(1 - \frac{298(K)}{273.15(K)} \right) \cdot 250(W) = -22.8812 \text{ (W)}$$

$$\eta_{ex.} = \frac{|-30.189(W) + (-22.8812(W))|}{(28.18 + 91.3)W} = 44\%$$

Musterlösung Aufgabe 2: «Trockner»

I. TEILAUFGABE A) ⇒ 5 PUNKTE



II. TEILAUFGABE B) ⇒ 2 PUNKTE

$$\dot{m}_{f,P} = \dot{m}_{tr,P} + \dot{m}_W = \dot{m}_{tr,P} + x \cdot \dot{m}_{tr,P} = \dot{m}_{tr,P} \cdot (1 + x)$$

$$\dot{m}_{tr,P} = \frac{\dot{m}_{f,P, \text{ein}}}{1 + x_{\text{ein}}} = \frac{7.5 \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right)}{1 + 0.5} = 5 \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right)$$

$$\dot{m}_w = \dot{m}_{tr,P} \cdot (x_{\text{ein}} - x_{\text{aus}}) = 5 \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right) \cdot (0.5 - 0.05) = 2.25 \left(\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{h}}\right)$$

III. TEILAUFGABE C) ⇒ 4 PUNKTE

$$\dot{m}_w = \dot{m}_{tr,P} \cdot (x_{\text{ein}} - x_{\text{aus}}) = \dot{m}_{tr,L,3} \cdot (x_4 - x_3) \Rightarrow \dot{m}_{tr,L,3} = \frac{\dot{m}_w}{x_4 - x_3}$$

$$x_3 = 0.013 \left(\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg Luft}}\right), t_4 = 29^\circ\text{C}, \varphi_4 = 0.9 \Rightarrow x_4 = 0.023 \left(\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg Luft}}\right) \quad (\text{abgelesen})$$

$$\dot{m}_{tr,L,3} = \frac{2.25 \left(\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{h}}\right)}{0.023 - 0.013 \left(\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg Luft}}\right)} = 225 \left(\frac{\text{kg Luft}}{\text{h}}\right) = 0.0625 \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)$$

$$\dot{m}_{tr,L,3} = \dot{m}_{tr,L,1} + \dot{m}_{tr,L,5}$$

$$\Rightarrow \dot{m}_{tr,L,5} = \dot{m}_{tr,L,3} - \dot{m}_{tr,L,1} = (225 - 72) \left(\frac{kg}{h}\right) = 153 \left(\frac{kg}{h}\right) = 0.0425 \left(\frac{kg}{s}\right)$$

IV. TEILAUFGABE D) \Rightarrow 3 PUNKTE

Punkt 5 liegt auf der Isotherme $20^\circ C$ und bei $\varphi_5 = 1$ (nach der Kondensation)

$$\Rightarrow x_5 = 14.7 \left(\frac{g}{kg}\right) \text{ (abgelesen)}$$

Massenerhaltung:

$$\dot{m}_{tr,L,2} \cdot x_2 = \dot{m}_{tr,L,1} \cdot x_1 + \dot{m}_{tr,L,5} \cdot x_5 \Rightarrow x_1 = \frac{\dot{m}_{tr,L,2} \cdot x_2 - \dot{m}_{tr,L,5} \cdot x_5}{\dot{m}_{tr,L,1}}$$

$$x_1 = \frac{225 \left(\frac{kg}{h}\right) \cdot 0.013 - 153 \left(\frac{kg}{h}\right) \cdot 0.0147}{72 \left(\frac{kg}{h}\right)} = 9.3875 \cdot 10^{-3} \left(\frac{kg \text{ H}_2\text{O}}{kg \text{ Luft}}\right) = 9.3875 \left(\frac{g \text{ H}_2\text{O}}{kg \text{ Luft}}\right)$$

$$\Rightarrow \varphi_1 = 65\% \text{ (abgelesen)}$$

V. TEILAUFGABE E) \Rightarrow 6 PUNKTE

$$\dot{H}_{Pilz,ein} + \dot{H}_3 = \dot{H}_{Pilz,aus} + \dot{H}_4$$

$$\dot{H}_3 = \dot{H}_{Pilz,aus} - \dot{H}_{Pilz,ein} + \dot{H}_4$$

$$\dot{m}_{tr,L,3} \cdot h_{1+x,3} =$$

$$\dot{m}_{tr,P} \cdot c_{p,P} \cdot (t_{aus} - t_{ein}) + \dot{m}_{w,in P,aus} \cdot c_{p,w} \cdot t_{aus} - \dot{m}_{w,in P,ein} \cdot c_{p,w} \cdot t_{ein} + \dot{m}_{tr,L,4} \cdot [c_{p,L} \cdot t_4 + x_4 \cdot (r_0 + c_{p,D} \cdot t_4)]$$

$$\dot{m}_{tr,L,3} \cdot h_{1+x,3} =$$

$$= 5 \left(\frac{kg}{h}\right) \cdot 1.25 \left(\frac{kJ}{kg}\right) \cdot (30 - 20) K + 0.25 \left(\frac{kg}{h}\right) \cdot 4.19 \left(\frac{kJ}{kg}\right) \cdot 30 (^\circ C) - 2.5 \left(\frac{kg}{h}\right) \cdot 4.19 \left(\frac{kJ}{kg}\right) \cdot 20 (^\circ C)$$

$$+ 225 \left(\frac{kg}{h}\right) \cdot \left[1.007 \left(\frac{kJ}{kg}\right) \cdot 29 (^\circ C) + 0.023 \cdot \left(2500 \left(\frac{kJ}{kg}\right) + 1.86 \left(\frac{kJ}{kg}\right) \cdot 29 (^\circ C)\right)\right]$$

$$= 19671,7395 \left(\frac{kJ}{h}\right)$$

$$h_{1+x,3} = \frac{19671,7395 \left(\frac{kJ}{h}\right)}{225 \left(\frac{kg}{h}\right)} = 87,43 \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

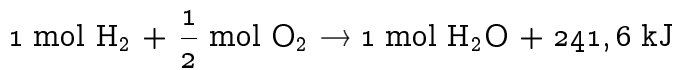
$$h_{1+x,3} = [c_{p,L} \cdot t_3 + x_3 \cdot (r_0 + c_{p,D} \cdot t_3)] = t_3 \cdot (c_{p,L} + c_{p,D} \cdot x_3) + x_3 \cdot r_0$$

$$\Rightarrow t_3 = \frac{h_{1+x,3} - x_3 \cdot r_0}{(c_{p,L} + c_{p,D} \cdot x_3)} = \frac{87,34 - 0.013 \cdot 2500}{(1.007 + 1.86 \cdot 0.013)} = 53,2691 \text{ } ^\circ C$$

Musterlösung Aufgabe 3

I. TEILAUFGABE A)

Reaktionsformel



Leistung der Brennstoffzelle

$$P_{\text{Zelle}} = \frac{P}{\eta_{\text{Zelle}}} = \frac{30 \text{ kW}}{0,65} = 46,15385 \text{ kW}$$

Molenstromstrom bei der Reaktionstemperatur $\Theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\dot{n} = \frac{P_{\text{Zelle}}}{\Delta^R h_\Theta} = \frac{46,15385 \text{ kW mol}}{241,6 \text{ kJ}} = 0,1910341 \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

spezifisches Normvolumen ($T_n = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ und $p_n = 1 \text{ atm}$)

$$(v_m)_n = \frac{R_m \cdot T_n}{p_n} = 22,414 \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}}$$

Normvolumenstrom

$$\dot{V}_n = \dot{n} \cdot (v_m)_n = 0,1910341 \frac{\text{mol}}{\text{s}} \cdot 22,414 \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}} = 4,281839 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

II. TEILAUFGABE B)

Teilchenanzahl im Tank

$$n_{\text{Tank}} = \frac{m_{\text{Tank}}}{M_{\text{H}_2}} = \frac{2,8 \text{ kg kmol}}{2,0155 \text{ kg}} = 1,389233 \text{ kmol}$$

Zeit bis der Tank vollständig geleert ist

$$t = \frac{n_{\text{Tank}}}{\dot{n}} = \frac{1,389233 \text{ kmol s}}{0,1910341 \text{ mol}} = 7272,174 \text{ s}$$

in dieser Zeit zurückgelegte Strecke

$$s = v \cdot t = \frac{120 \text{ m}}{3,6 \text{ s}} \cdot 7272,174 \text{ s} = 242,4058 \text{ km}$$

III. TEILAUFGABE C)

benötigte spezifische Wärme zum Aufheizen des Wasserstoffs

$$q_{\text{Aufheizen}} = c_p^0 \Big|_{25^\circ\text{C}}^{300^\circ\text{C}} \cdot (300^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) + (h(25^\circ\text{C}) - h')$$

$$= 1,92 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} \cdot 275 \text{ K} + 15,95 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} = 16,478 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

Reaktionsenthalpie bei der Reaktionstemperatur $T_R = 300^\circ\text{C}$

(beachten: Wasserstoff ist schon auf 300°C aufgeheizt)

$$\Delta^R h_{T_R} = \Delta^R h_{T_\theta} + (1 \cdot c_{p\text{H}_2\text{O}} - 0,5 \cdot c_{p\text{O}_2}) (T_R - T_\theta)$$

$$= -241,6 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} + \left(1 \cdot 34,69 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} - 32,82 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} \right) \cdot (300^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) = -236,573 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

spezifische Verlustwärme der Brennstoffzelle

$$q_{\text{Verlust}} = (1 - \eta_{\text{Zelle}}) \cdot \Delta^R h_{T_R} = (1 - 0,65) \cdot \left(-236,573 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right) = -82,80055 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

Damit ist $|q_{\text{Verlust}}| \geq q_{\text{Aufheizen}}$ und somit reicht die Energie zum Vorheizen des Wasserstoffs aus.