

Musterlösung Aufgabe 1: «Linksläufiger Kreisprozess»

I. TEILAUFGABE A) ⇒ 1 PUNKTE

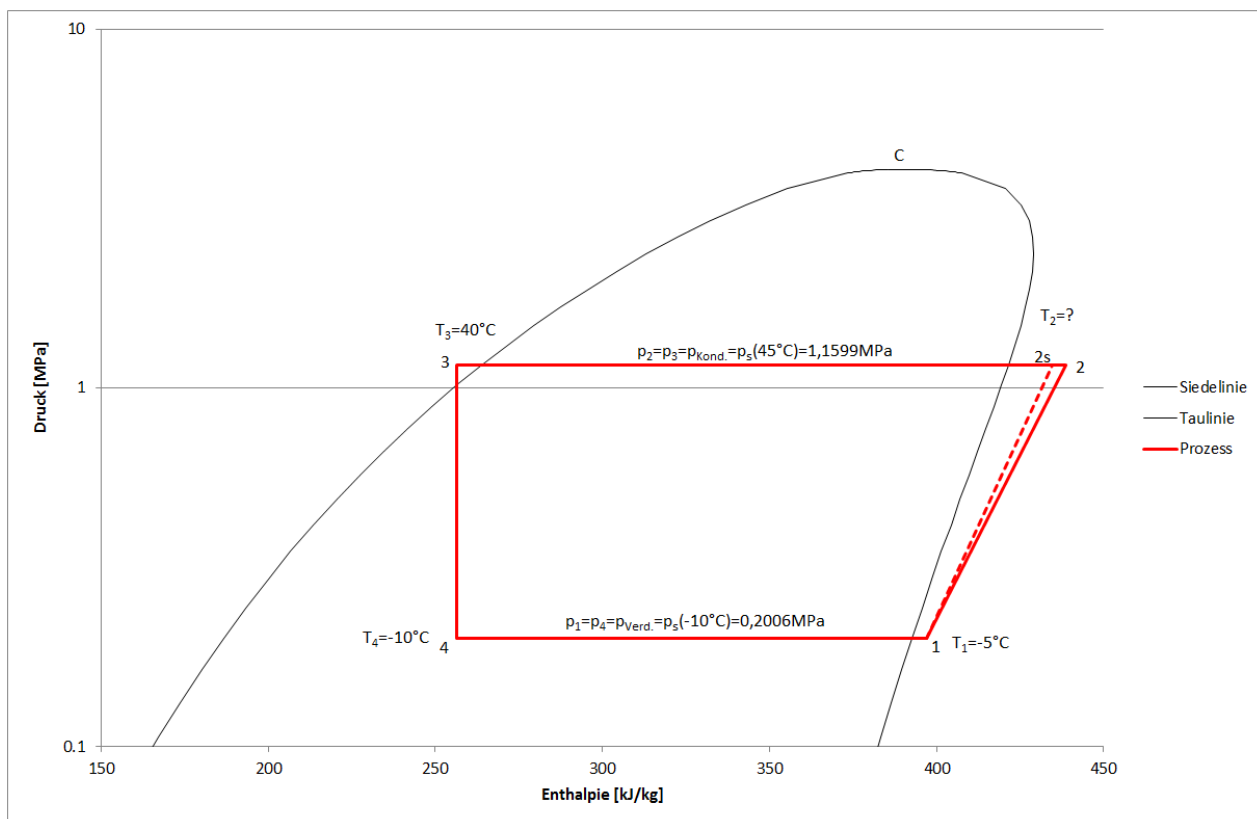
$$\dot{Q}_{Heiz} = \dot{Q}_{trans} + \dot{Q}_{Luft} - \dot{Q}_{solar} - \dot{Q}_{intern}$$

$$\dot{Q}_{trans} = A_{Haus} \cdot 11,3 \frac{W}{m^2} = 600 \text{ m}^2 \cdot 11,3 \frac{W}{m^2} = 6780 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{solar} = A_{Fenster} \cdot 40 \frac{W}{m^2} = 55 \text{ m}^2 \cdot 40 \frac{W}{m^2} = 2200 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{Heiz} = 6780 \text{ W} + 2100 \text{ W} - 2200 \text{ W} - 800 \text{ W} = 5,88 \text{ kW}$$

II. TEILAUFGABE B) ⇒ 2 PUNKTE



Kondensator:

$$T_{Vorlauf} = 35^{\circ}\text{C} \rightarrow T_{Kond.} = T_{Vorlauf} + \Delta T = 35^{\circ}\text{C} + 10 \text{ K} = 45^{\circ}\text{C} \rightarrow p_{Kond.} = p_s(45^{\circ}\text{C}) = 1,1599 \text{ MPa}$$

$$T_2 = ?$$

$$T_3 = T_{Vorlauf} + 10\text{K} - 5\text{K} = 40^{\circ}\text{C}$$

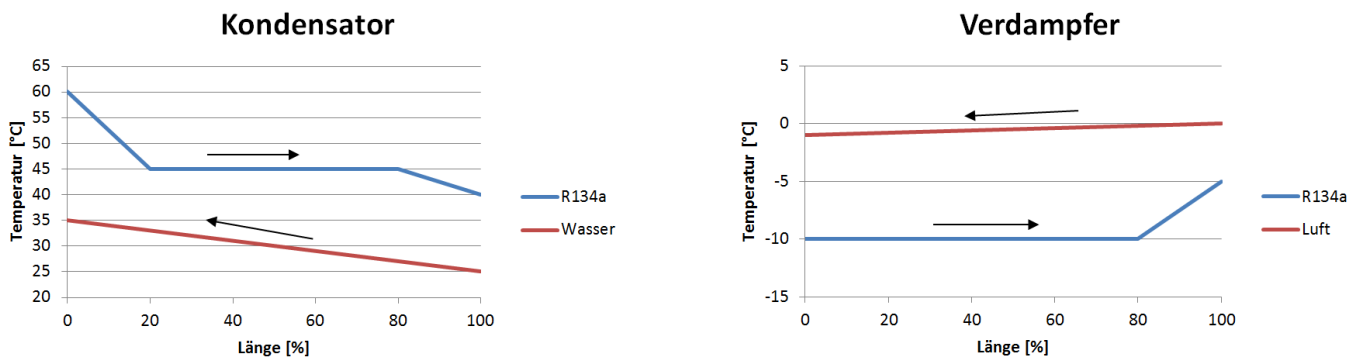
Verdampfer:

$$T_a = 0^\circ\text{C} \rightarrow T_{Verd.} = T_a - \Delta T = 0^\circ\text{C} - 10\text{ K} = -10^\circ\text{C} \rightarrow p_{Verd.} = p_s(-10^\circ\text{C}) = 0,2006\text{ MPa}$$

$$T_1 = T_{Verd.} + 5\text{ K} = -5^\circ\text{C}$$

$$T_4 = T_{Verd.} = -10^\circ\text{C}$$

III. TEILAUFGABE C) \Rightarrow 2 PUNKTE



IV. TEILAUFGABE D) \Rightarrow 8 PUNKTE

$$\epsilon_K = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\dot{Q}_{Heiz}}{P_{12}} = \frac{\dot{m}_{R134a} \cdot (h_3 - h_2)}{\dot{m}_{R134a} \cdot (h_2 - h_1)} = \frac{(h_3 - h_2)}{(h_2 - h_1)} = ?$$

$$h_1 = h(T_1; p_{Verd.}) = h(-5^\circ\text{C}; 0,2006\text{ MPa}) = 396,93 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$s_{2s} = s_1 = s(T_1; p_{Verd.}) = s(-5^\circ\text{C}; 0,2006\text{ MPa}) = 1,7494 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$h_{2s} = \left[433,03 + (438,57 - 433,03) \cdot \left(\frac{1,7494 - 1,7448}{1,7616 - 1,7448} \right) \right] \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 434,55 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\eta_{s,V} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \Rightarrow h_2 = h_1 + \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_{s,V}} = \left[396,93 + \frac{434,55 - 396,93}{0,9} \right] \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 438,73 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_3 = h'(45^\circ\text{C}) - c_{KM} \cdot (T_{Kond.} - T_3) = 263,94 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 1,496 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot (45^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}) = 256,46 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\epsilon_K = \frac{(256,46 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 438,73 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})}{(438,73 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 396,93 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})} = 4,36$$

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}_{\dot{Q}_c}}{P_{12}} = \frac{\dot{m}_{R134a} \left(1 - \frac{T_a}{T_{m,23}} \right) \cdot |h_3 - h_2|}{\dot{m}_{R134a} \cdot (h_2 - h_1)} = \frac{\left(1 - \frac{T_a}{T_{m,23}} \right) \cdot |h_3 - h_2|}{(h_2 - h_1)} = ?$$

$$T_{m,23} = \frac{(h_3 - h_2)}{(s_3 - s_2)}$$

$$s_3 = c_{KM} \cdot \ln \left(\frac{T_3}{T'_3} \right) + s'_3 = 1,496 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot \ln \left(\frac{273,15 + 40}{273,15 + 45} \right) + 1,2139 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} = 1,1902 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$s_2 \text{ interpolieren: } s_2 = 1,7616 + (1,7779 - 1,7616) \cdot \frac{438,73 - 438,57}{444,03 - 438,57} = 1,7621 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$T_{m,23} = \frac{(h_3 - h_2)}{(s_3 - s_2)} = \frac{(256,46 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 438,73 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})}{(1,1902 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} - 1,7621 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}})} = 318,72 \text{ K}$$

$$\eta_{ex} = \frac{\left(1 - \frac{273,15 \text{ K}}{318,72 \text{ K}} \right) \cdot |256,46 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 438,73 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}|}{(438,73 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 396,93 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})} = 0,6235$$

V. TEILAUFGABE E) ⇒ 2 PUNKTE

$$-\dot{Q}_{Heiz} = \dot{m}_{R134a} \cdot (h_3 - h_2)$$

$$\Rightarrow \dot{m}_{R134a} = \frac{-\dot{Q}_{Heiz}}{(h_3 - h_2)} = \frac{-5,88 \text{ kW}}{(256,46 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 438,73 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})} = 0,03226 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{Q}_{Luft} = -\dot{Q}_{41} = -\dot{m}_{R134a} \cdot (h_1 - h_4)$$

$$\text{mit: } h_4 = h_3 = 256,46 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{Q}_{Luft} = -0,03226 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (396,93 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 256,46 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}) = -4,532 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{Luft} = \dot{m}_{Luft} \cdot c_{p,Luft} \cdot (T_{a2} - T_a) \Rightarrow T_{a2} = T_a + \frac{\dot{Q}_{Luft}}{\dot{m}_{Luft} \cdot c_{p,Luft}}$$

$$T_{a2} = 0^\circ\text{C} + \frac{-4,532 \text{ kW}}{4,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1,004 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}} = -1,003^\circ\text{C}$$

VI. TEILAUFGABE F) ⇒ 1 PUNKTE

Vereisung des Verdampfers → Verkleinerung des Strömungsquerschnitts → angesaugter Luftstrom sinkt → aufgenommener Wärmestrom sinkt → Heizleistung sinkt → COP sinkt

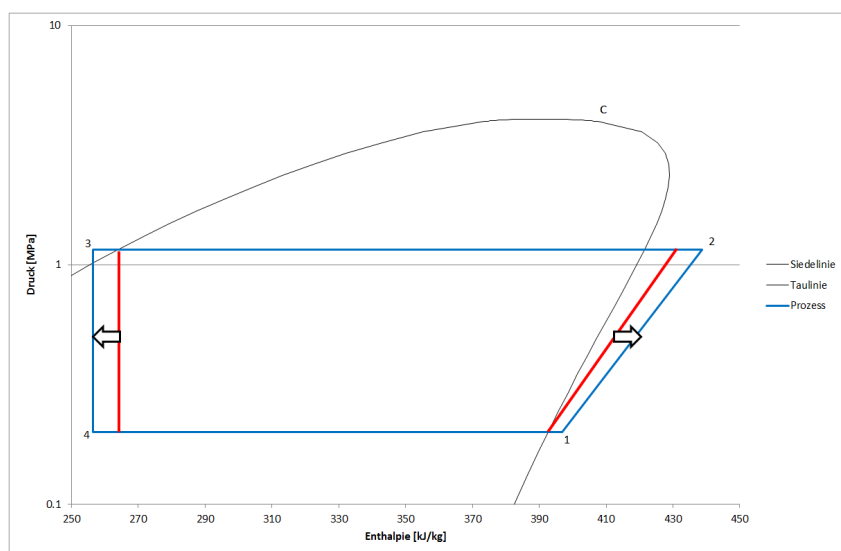
VII. TEILAUFGABE G) ⇒ 2 PUNKTE

Verdampfer:

- Vermeidung von Tropfenbildung im Kompressor; Tropfen können Kompressor beschädigen
- Aufnahme einer größeren Wärmemenge im Verdampfer

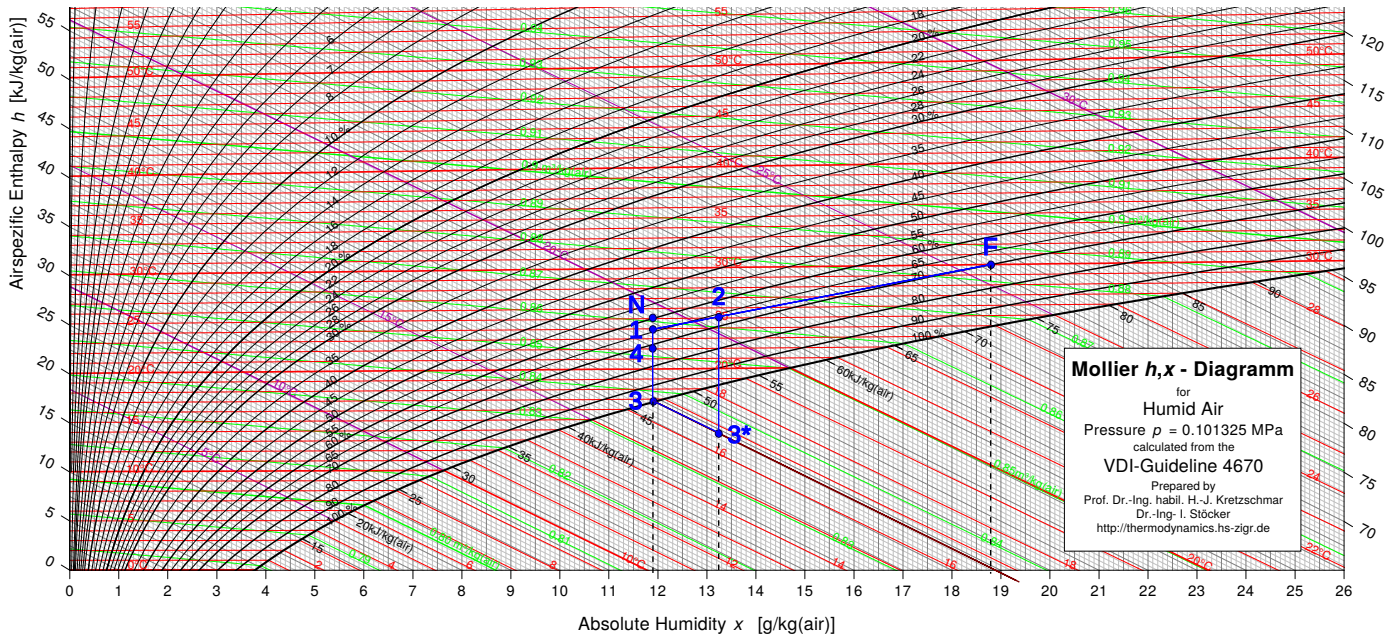
Kondensator:

- Übertragung eines größeren Wärmestroms im Kondensator
- Übertragung eines größeren Wärmestroms im Verdampfer



Musterlösung Aufgabe 2: «Klimakammer»

I. TEILAUFGABE A)



II. TEILAUFGABE B) ⇒ 5 PUNKT

$$\sum \dot{Q} = \dot{m}_{tr.Luft} |\Delta h_{1+x,14}|$$

$$N_{KG} \dot{Q}_{KG} - \dot{Q}_{Boden} = \dot{m}_{tr.Luft} \cdot |h_{1+x,4} - h_{1+x,1}|$$

$$x_1 = x_N = ?$$

$$x_N = 0.622 \frac{\varphi_N \cdot p_{s,H_2O}(t_N)}{p_{ges} - \varphi_N \cdot p_{s,H_2O}(t_N)}$$

$$t_N = 25^\circ C \Rightarrow T_N = 298.15 K ; \varphi_N = 0.6$$

$$p_{s,H_2O}(25^\circ C) = \exp\left(12.40682 - \frac{4222.037}{298.15 - 31.95 K}\right) mbar = 31.632 mbar$$

$$x_N = \frac{0.6 \cdot 31.632}{1013.25 - 0.6 \cdot 31.632} = 0.011875 \frac{kg(Wasser)}{kg(Luft)} = 11.875 \frac{g(Wasser)}{kg(Luft)}$$

$$h_{1+x,1} = c_{p,L} \cdot t_1 + x_1 (\Delta h^v + c_{p,Wd} \cdot t_1)$$

$$t_1 = 24^\circ C$$

$$h_{1+x,1} = 1.004 \cdot 24 \frac{kJ}{kg} + 0.011875 (2500 + 1.86 \cdot 24) \frac{kJ}{kg} = 54.314 \frac{kJ}{kg}$$

$$t_4 = 22^\circ C ; x_4 = x_1 = 0.011875 \frac{kg(Wasser)}{kg(Luft)}$$

$$h_{1+x,4} = c_{p,L} \cdot t_4 + x_4 (\Delta h^v + c_{p,Wd} \cdot t_4)$$

$$h_{1+x,4} = 1.004 \cdot 22 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0.011875(2500 + 1.86 \cdot 22) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 52.262 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{m}_{tr.Luft} = \frac{8 \cdot 50 \text{ W} - 200 \text{ W}}{|52.262 - 54.314| \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = \frac{200 \text{ W}}{2.052 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0.097458 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

III. TEILAUFGABE C) ⇒ 5 PUNKTE

$$x_F = 0.622 \frac{\varphi_F \cdot p_{s,H_2O}(t_F)}{p_{ges} - \varphi_F \cdot p_{s,H_2O}(t_F)}$$

$$t_F = 30^\circ\text{C} \Rightarrow T_F = 303.15 \text{ K} ; \varphi_F = 0.7$$

$$p_{s,H_2O}(30^\circ\text{C}) = \exp\left(12.40682 - \frac{4222.037}{303.15 - 31.95 \text{ K}}\right) \text{ mbar} = 42.376 \text{ mbar}$$

$$x_F = \frac{0.7 \cdot 42.376}{1013.25 - 0.7 \cdot 42.376} = 0.018762 \frac{\text{kg(Wasser)}}{\text{kg(Luft)}} = 18.762 \frac{\text{g(Wasser)}}{\text{kg(Luft)}}$$

$$h_{1+x,F} = c_{p,L} \cdot t_F + x_F(\Delta h^v + c_{p,Wd} \cdot t_F)$$

$$t_F = 30^\circ\text{C}$$

$$h_{1+x,F} = 1.004 \cdot 30 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0.018762(2500 + 1.86 \cdot 30) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 78.071 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{1+x,2} = 0.2h_{1+x,F} + 0.8h_{1+x,1} = 0.2 \cdot 78.071 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0.8 \cdot 54.314 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 59.065 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$x_2 = 0.2x_F + 0.8x_1 = (0.2 \cdot 0.018762 + 0.8 \cdot 0.011875) \frac{\text{kg(Wasser)}}{\text{kg(Luft)}} = 0.013252 \frac{\text{kg(Wasser)}}{\text{kg(Luft)}}$$

$$h_{1+x,2} = c_{p,L} \cdot t_2 + x_2(\Delta h^v + c_{p,Wd} \cdot t_2) \Rightarrow t_2 = \frac{h_{1+x,2} - x_2 \cdot 2500}{c_{p,L} + x_2 \cdot c_{p,Wd}}$$

$$t_2 = \frac{59.065 - 0.013252 \cdot 2500}{1.004 + 0.013252 \cdot 1.86} \text{ } ^\circ\text{C} = 25.212 \text{ } ^\circ\text{C} = 298.362 \text{ K}$$

$$x_2 = 0.622 \frac{\varphi_2 \cdot p_{s,H_2O}(t_2)}{p_{ges} - \varphi_2 \cdot p_{s,H_2O}(t_2)} \Rightarrow \varphi_2 = \frac{x_2 \cdot p_{ges}}{p_{s,H_2O}(t_2)(0.622 + x_2)}$$

$$p_{s,H_2O}(25.212^\circ\text{C}) = \exp\left(12.40682 - \frac{4222.037}{298.362 - 31.95 \text{ K}}\right) \text{ mbar} = 32.034 \text{ mbar}$$

$$\varphi_2 = \frac{0.013252 \cdot 1013.25}{32.034(0.622 + 0.013252)} = 0.6598 = 65.98 \%$$

IV. TEILAUFGABE D) ⇒ 2 PUNKTE

$$x_1 = x_N = 0.011875 \frac{\text{kg(Wasser)}}{\text{kg(Luft)}}$$

$$p_{s,H_2O}(x_1) = \frac{x_1 \cdot p_{ges}}{0.622 + x_1} = \frac{0.011875 \cdot 1.01325 \text{ bar}}{0.622 + 0.011875} = 0.01897942 \text{ bar}$$

$$\ln\left(\frac{p_s}{p_0}\right) = 12.40682 - \frac{4222.037 \text{ K}}{T_s - 31.95 \text{ K}} \Rightarrow T_s = 31.95 \text{ K} + \frac{4222.037 \text{ K}}{12.40682 - \ln\left(\frac{p_s}{p_0}\right)}$$

$$T_s = 31.95 \text{ K} + \frac{4222.037 \text{ K}}{12.40682 - \ln(0.01897942)} = 289.84 \text{ K} = 16.69^\circ\text{C}$$

V. TEILAUFGABE E) ⇒ 3 PUNKTE

$$t_{3^*} = t_s(x_1) = 16.69^\circ C$$

$$x_{3^*} = x_2 = 0.013252 \frac{kg(Wasser)}{kg(Luft)} ; x_3 = x_1 = 0.011875 \frac{kg(Wasser)}{kg(Luft)}$$

$$h_{1+x,3^*} = c_{p,L} \cdot t_{3^*} + x_3(\Delta h^v + c_{p,Wd} \cdot t_{3^*}) + c_{p,W} t_{3^*}(x_{3^*} - x_3)$$

$$\begin{aligned} h_{1+x,3^*} &= 1.004 \cdot 16.69 \frac{kJ}{kg} + 0.011875(2500 + 1.86 \cdot 16.69) + 4.18 \cdot 16.69(0.013252 - 0.011875) \frac{kJ}{kg} \\ &= 46.913 \frac{kJ}{kg} \end{aligned}$$

$$\dot{Q}_{W\ddot{U}} = \dot{m}_{tr.Luft}(h_{1+x,3^*} - h_{1+x,2}) = 0.097458 \frac{kg}{s}(46.913 - 59.065) \frac{kJ}{kg} = -1184.31 W$$

$$\dot{m}_W = \dot{m}_{tr.Luft}(x_{3^*} - x_3) = 0.097458 \frac{kg}{s}(0.013252 - 0.011875) \frac{kg(Wasser)}{kg(Luft)} = 0.1342 \frac{g}{s} = 483.22 \frac{g}{h}$$

VI. TEILAUFGABE F) ⇒ 1 PUNKTE

$$t_3 = t_{3^*} = 16.69^\circ C ; x_3 = x_1 = 0.011875 \frac{kg(Wasser)}{kg(Luft)}$$

$$h_{1+x,3} = c_{p,L} \cdot t_3 + x_3(\Delta h^v + c_{p,Wd} \cdot t_3)$$

$$h_{1+x,3} = 1.004 \cdot 16.69 \frac{kJ}{kg} + 0.011875(2500 + 1.86 \cdot 16.69) = 46.817 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{Q}_{Heiz} = \dot{m}_{tr.Luft}(h_{1+x,4} - h_{1+x,3}) = 0.097458 \frac{kg}{s}(52.262 - 46.817) \frac{kJ}{kg} = 530.61 W$$

VII. TEILAUFGABE G) ⇒ 2 PUNKTE

a) Die Abluft 1, die Frischluft F oder die Mischluft 2 können mithilfe eines inneren Wärmeübertragers durch die kalte entfeuchtete Luft 3 vorgekühlt werden. Dadurch muss weniger Kälteleistung aufgebracht werden um die Luft zu entfeuchten. Außerdem muss nach der Entfeuchtung weniger Heizleistung aufgebracht werden.

b) Auf beiden Seiten des Wärmeübertragers sind minimale Temperaturdifferenzen $\Delta T_{W\ddot{U}} \geq 0$ einzuhalten (2. Hauptsatz).

Musterlösung Aufgabe 3: «Raumfahrt-Schubdüse»

I. TEILAUFGABE A) ⇒ 5 PUNKTE

gesucht: T_{max} (adiabate Verbrennungstemperatur)

$$\frac{Q}{n_{MMH}} = \sum_{Edukte} \Delta h_{E_i \rightarrow R} + \Delta^R h(T_R) + \sum_{Produkte} \Delta h_{R \rightarrow P_i} = 0 \quad (\text{da adiabat}) \quad (1)$$

und es gilt: $T_{P_i} = T_{max}$

mit $T_R = T_\Theta \Rightarrow \Delta^R h(T_\Theta) = \sum \nu_i \Delta^B h_\Theta$

Brücksichtigung der Phasenübergänge

- MMH $T_s = 360,1 \text{ K} > T_\Theta$
- NTO $T_s = 294,25 \text{ K} < T_\Theta$
- Wasser $T_s = 358,1 \text{ K} > T_\Theta$

Edukte $T_{E,i} \rightarrow T_\Theta$:

$$\Delta h_{E_i \rightarrow \Theta} = |\nu_{MMH}| c_{p,MMH,liq}(T_\Theta - T_{MMH}) + |\nu_{NTO}| \cdot [c_{p,NTO,liq}(T_s - T_{NTO}) + \Delta^V h_{NTO}(T_s) + c_{p,NTO,vap}(T_\Theta - T_s)]$$

Reaktion bei T_Θ : $\Delta^R h(T_\Theta) = \sum \nu_i \Delta^B h_\Theta$

Produkte $T_\Theta \rightarrow T_{max}$:

$$\Delta h_{\Theta \rightarrow P} = \nu_{H_2O} \cdot [c_{p,H_2O,liq}(T_s - T_\Theta) + \Delta^V h_{H_2O}(T_s) + c_{p,H_2O,vap}(T_{max} - T_s)] + \nu_{CO_2} c_{p,CO_2}(T_{max} - T_\Theta) + \nu_{N_2} c_{p,N_2}(T_{max} - T_\Theta)$$

Einsetzten in (1)

$$\begin{aligned} \Rightarrow & -\Delta h_{E_i \rightarrow \Theta} - \Delta^R h_\Theta - \nu_{H_2O} [c_{p,H_2O,liq}(T_s - T_\Theta) + \Delta^V h_{H_2O}(T_s)] \\ & = \nu_{H_2O} c_{p,H_2O,vap}(T_{max} - T_s) + \nu_{CO_2} c_{p,CO_2}(T_{max} - T_\Theta) + \nu_{N_2} c_{p,N_2}(T_{max} - T_\Theta) \\ & = T_{max} \cdot (\nu_{H_2O} c_{p,H_2O,vap} + \nu_{CO_2} c_{p,CO_2} + \nu_{N_2} c_{p,N_2}) - \nu_{H_2O} c_{p,H_2O,vap} T_s - \nu_{CO_2} c_{p,CO_2} T_\Theta - \nu_{N_2} c_{p,N_2} T_\Theta \end{aligned}$$

$$\Rightarrow T_{max} = \frac{-\Delta h_{E_i \rightarrow \Theta} - \Delta^R h_\Theta - \nu_{H_2O} [c_{p,H_2O,liq}(T_s - T_\Theta) + \Delta^V h_{H_2O}(T_s) - c_{p,H_2O,vap} T_s] - (\nu_{CO_2} c_{p,CO_2} + \nu_{N_2} c_{p,N_2})_\Theta}{(\nu_{H_2O} c_{p,H_2O,vap} + \nu_{CO_2} c_{p,CO_2} + \nu_{N_2} c_{p,N_2})}$$

⇒ $T_{max} = 4325,14 \text{ K}$

II. TEILAUFGABE B) ⇒ 3 PUNKTE

gesucht: $\frac{Q}{n_{MMH}}$ bei $T_R = 2500 \text{ K}$

$$\begin{aligned} \frac{Q}{n_{MMH}} &= (h_\theta - h_E) + \Delta^R h_\theta + \nu_{H_2O} \cdot \left[c_{p_{H_2O,liq.}} \cdot (T_S - T_\theta) + \Delta^V h_{H_2O}(T_S) + c_{p_{H_2O,vap.}} \cdot (T_R - T_S) \right] \\ &\quad + \nu_{CO_2} \cdot c_{p_{CO_2,vap.}} \cdot (T_R - T_\theta) + \nu_{N_2} \cdot c_{p_{N_2,vap.}} \cdot (T_R - T_\theta) \\ \Rightarrow \frac{Q}{n_{MMH}} &= -514,421 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \end{aligned}$$

III. TEILAUFGABE C) ⇒ 2 PUNKTE

gesucht: Vorheizen auf $T_{MMH} = T^* = ?$ bei Nutzung von 15 % Q_b

$$\begin{aligned} \frac{0,15 \cdot Q}{n_{MMH}} &= c_{p_{MMH,liq.}} \cdot (T^* - T_{e1}) \\ \Rightarrow T^* &= \frac{0,15 \cdot Q}{n_{MMH} \cdot c_{p,liq}} + T_{e1} = 793,15 \text{ K} \end{aligned}$$

Da $T^* > T_s$ Phasenübergang:

$$\begin{aligned} \frac{0,15 \cdot |Q|}{n_{MMH}} &= c_{p_{MMH,liq.}} \cdot (T_S - T_{e1}) + \Delta^V h_{MMH}(T_S) + c_{p_{MMH,vap.}} \cdot (T^* - T_S) \\ \Rightarrow T^* &= \frac{1}{c_{p_{MMH,vap.}}} \cdot \left[\frac{0,15 \cdot |Q|}{n_{MMH}} - c_{p_{MMH,liq.}} \cdot (T_S - T_{e1}) - \Delta^V h_{MMH}(T_S) \right] + T_S \\ \Rightarrow T^* &= 611,958 \text{ K} \end{aligned}$$