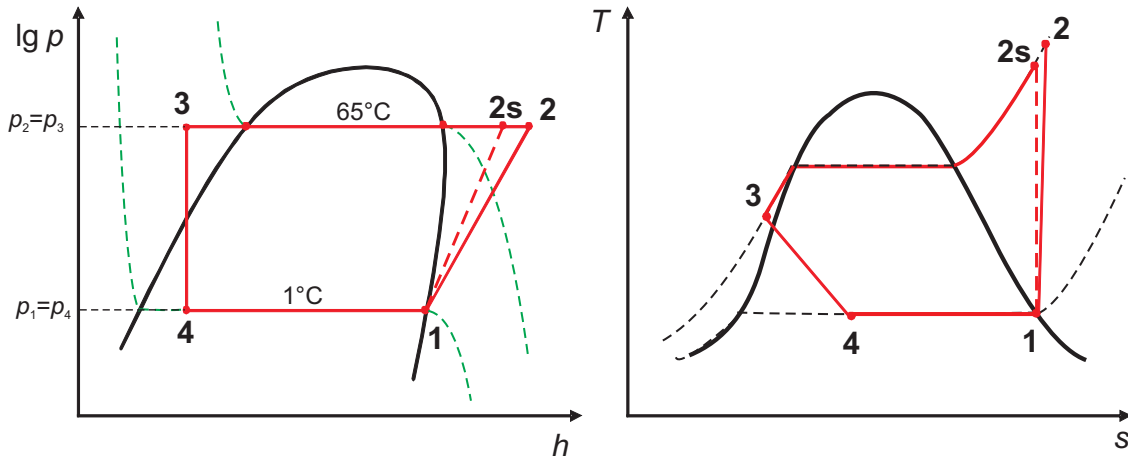


Musterlösung Aufgabe 1: «Wärmepumpe»

I. TEILAUFGABE A) ⇒ 4 PUNKTE



II. TEILAUFGABE B) ⇒ 2 PUNKTE

$$\dot{Q}_{41} = \dot{m}_{KM} \cdot (h_1 - h_4) \Rightarrow \dot{m}_{KM} = \frac{\dot{Q}_{41}}{h_1 - h_4}$$

$$h_1 = h''(1^\circ\text{C}, 4.4568 \text{ bar}) = 1606.46 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$h_4 = h_3 = h(60^\circ\text{C}, 29.491 \text{ bar}) = 635.02 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$\dot{m}_{KM} = \frac{0.5 \cdot 10^3 \text{ kW}}{(1606.46 - 635.02) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0.515 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

III. TEILAUFGABE C) ⇒ 3 PUNKTE

$$P_{12} = \dot{m}_{KM} \cdot w_{t,12} = \dot{m}_{KM} \cdot (h_2 - h_1)$$

$$s_1 = s'' = 6.0796 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \Rightarrow s_2 = s_1 + \Delta s = 6.0796 + 0.1 = 6.1796 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

Interpolation:

$$h_2 = 1906.62 + \frac{1949.79 - 1906.62}{6.2 - 6.1} \cdot (6.1796 - 6.1) = 1940.98 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$P_{12} = 0.515 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (1940.98 - 1606.46) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 0.515 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 334.52 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 172.28 \text{ kW}$$

IV. TEILAUFGABE D) ⇒ 4 PUNKTE

$$\varepsilon_{WP} = \frac{|q_{23}|}{w_{t,12}} = \frac{|h_3 - h_2|}{w_{t,12}} = \frac{|635.02 - 1940.98| \frac{kJ}{kg}}{334.52 \frac{kJ}{kg}} = 3.9$$

$$\eta_{ex.} = \frac{|\dot{E}_{\dot{Q}_{zu}}|}{P_{zu}} = \frac{|(1 - \frac{T_a}{T_m}) \cdot q_{23}|}{w_{t,12}}$$

$$T_{m,23} = \frac{\Delta h_{23}}{\Delta s_{23}} = \frac{h_3 - h_2}{s_3 - s_2} = \frac{635.02 - 1940.98}{2.4217 - 6.1796} = 347.52 \text{ K}$$

$$\eta_{ex.} = \frac{|(1 - \frac{293.15}{347.52}) \cdot (-1305.96)|}{334.52} = 0.61$$

V. TEILAUFGABE E) ⇒ 3 PUNKTE

$$\dot{E}_{V,Verdampfer} = \dot{m}_{KM} \cdot T_a \cdot \frac{T_{a*} - T_{m,41}}{T_{a*} \cdot T_{m,41}} \cdot (h_1 - h_4)$$

$$T_{a*} = T_{m,MW} = \frac{\Delta h_{MW}}{\Delta s_{MW}} = \frac{c_{p,MW} \cdot (T_{MW,aus} - T_{MW,ein})}{c_{p,MW} \cdot \ln(\frac{T_{MW,aus}}{T_{MW,ein}})} = \frac{6^\circ C - 11^\circ C}{\ln(\frac{279.15}{284.15})} = 281.64 \text{ K} = 8.4926^\circ C$$

$$\dot{E}_{V,Verdampfer} = 0.515 \frac{kg}{s} \cdot 293.15 \text{ K} \cdot \frac{(8.4926 - 1)K}{281.64 \text{ K} \cdot 274.1 \text{ K}} \cdot (1606.46 - 635.02) \frac{kJ}{kg} = 14.23 \text{ kW}$$

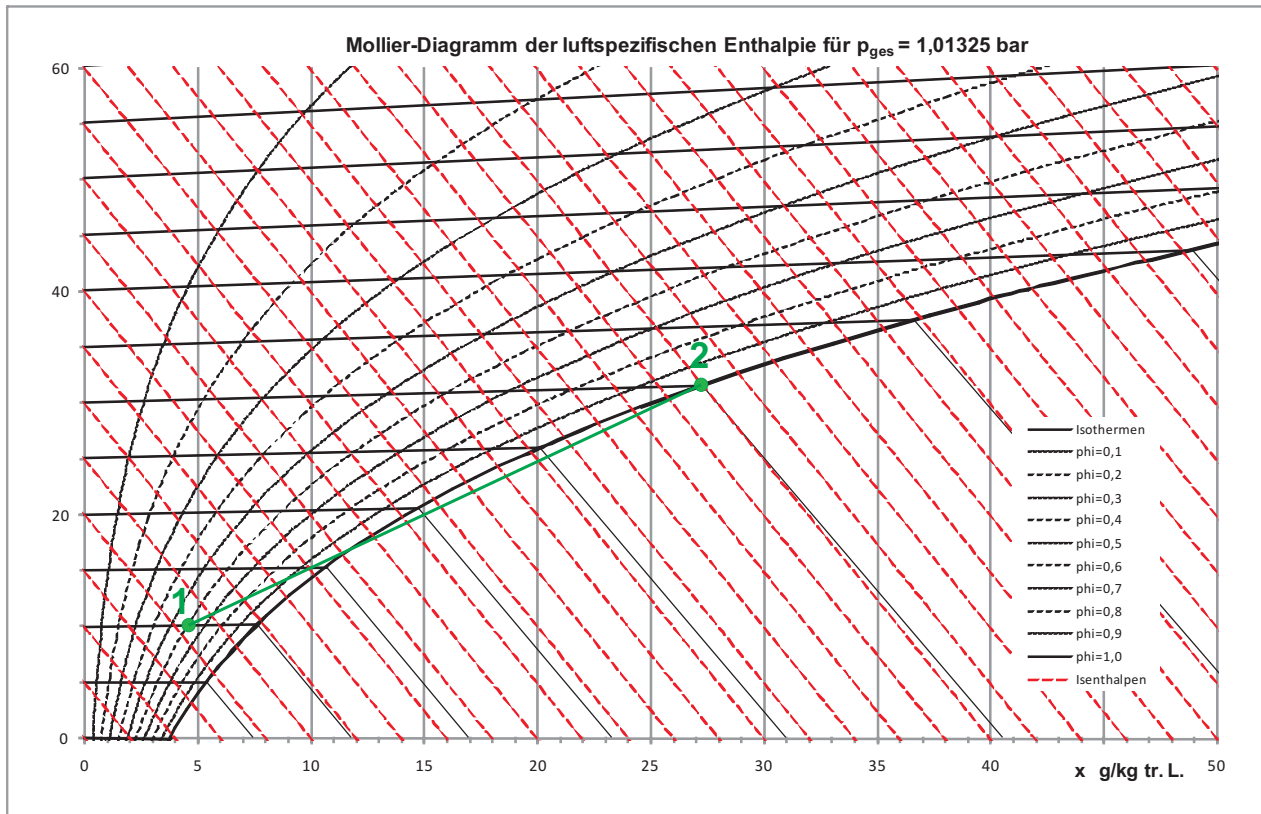
VI. TEILAUFGABE F) ⇒ 2 PUNKTE

$$\dot{Q}_{gesamt} = \dot{m}_{Wasser} \cdot c_{p,Wasser} \cdot \Delta T_{ein,aus} = \frac{77 \cdot 10^3 \text{ kg}}{3600 \text{ s}} \cdot 4.18 \frac{kJ}{kgK} \cdot (60 - 45) K = 1341.08 \frac{kJ}{s}$$

$$N = \frac{\dot{Q}_{gesamt}}{|\dot{Q}_{23}|} = \frac{1341.08 \frac{kJ}{s}}{1305.96 \frac{kJ}{kg} \cdot 0.515 \frac{kg}{s}} \approx 2$$

Musterlösung Aufgabe 2: «Külturm»

I. TEILAUFGABE A) ⇒ 2 PUNKTE



$$x_1 = 4,6 \frac{\text{g}}{\text{kg}}, \quad x_2 = 27,2 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \text{ (abgelesen)}$$

II. TEILAUFGABE B) ⇒ 3 PUNKTE

$$\Delta \dot{m}_w = \dot{m}_{Fluss}$$

$$\dot{m}_{tr.L} = \frac{\Delta \dot{m}_w}{(x_2 - x_1)}$$

$$\dot{m}_{tr.L} = \frac{741,46 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{(27,2 - 4,6) \frac{\text{g}}{\text{kg}}} = 32807,9646 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

III. TEILAUFGABE C) ⇒ 3 PUNKTE

$$\dot{V}_1 = \dot{m}_{tr.L} \cdot v_{1+x,1}$$

$$v_{1+x,1} = \left(\frac{1}{M_L} + \frac{x_1}{M_W} \right) \cdot \frac{T_1 \cdot R_m}{p} = \left(\frac{1}{0,02896} + \frac{0,0046}{0,018015} \right) \cdot \frac{283,15 \cdot 8,314472}{1,01325 \cdot 10^5} = 0,8082 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\dot{V}_1 = 32807,9646 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 0.8082 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = 26515,397 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

IV. TEILAUFGABE D) ⇒ 4 PUNKTE

Energiebilanz

$$\dot{H}_1 + \dot{H}_3 = \dot{H}_2 + \dot{H}_4 \Rightarrow$$

$$\dot{m}_{tr,L} \cdot h_{1+x,1} + \dot{m}_w \cdot c_{p,w} \cdot t_3 = \dot{m}_{tr,L} \cdot h_{1+x,2} + (\dot{m}_w - \dot{m}_{Fluss}) \cdot c_{p,w} \cdot t_4$$

$$\Rightarrow t_4 = \frac{\dot{m}_{tr,L} \cdot (h_{1+x,1} - h_{1+x,2}) + \dot{m}_w \cdot c_{p,w} \cdot t_3}{(\dot{m}_w - \dot{m}_{Fluss}) \cdot c_{p,w}}$$

$$h_{1+x,1} = c_{p,L} \cdot t_1 + x_1 \cdot (r_0 + c_{p,D} \cdot t_1) = 1.007 \cdot 10 + 0.0046 \cdot (2500 + 1.86 \cdot 10) = 21.6556 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$h_{1+x,2} = c_{p,L} \cdot t_2 + x_2 \cdot (r_0 + c_{p,D} \cdot t_2) = 1.007 \cdot 30 + 0.0272 \cdot (2500 + 1.86 \cdot 30) = 99.7278 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$t_4 = \frac{32807,9646 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (21.6556 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 99.7278 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}) + 30000 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot 40^\circ\text{C}}{(30000 \frac{\text{kg}}{\text{s}} - 741,46 \frac{\text{kg}}{\text{s}}) \cdot 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}} = 20,1203^\circ\text{C}$$

V. TEILAUFGABE E) ⇒ 5 PUNKTE

$$x_1 = \frac{p_{D,s} \cdot \varphi_1}{p_{ges.} - p_{D,s} \cdot \varphi_1} \cdot \frac{M_D}{M_L}$$

$$p_{D,s}(10^\circ\text{C}) = \exp\left(18.9141 - \frac{4010.823}{(10^\circ\text{C} + 234.4623)}\right) = 12.2728 \text{ (mbar)}$$

$$p_{D,s}(30^\circ\text{C}) = \exp\left(18.9141 - \frac{4010.823}{(30^\circ\text{C} + 234.4623)}\right) = 42.4423 \text{ (mbar)}$$

$$\Rightarrow x_1 = \frac{12.2728 \cdot 10^{-3} \cdot 0.6}{1.01325 - 12.2728 \cdot 10^{-3} \cdot 0.6} \cdot \frac{18.015}{28.96} = 0.004554 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

$$x_2 = \frac{42.4423 \cdot 10^{-3}}{1.01325 - 42.4423 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{18.015}{28.96} = 0.0272 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

VI. TEILAUFGABE F) ⇒ 2 PUNKTE

Die Luft (Zustand 2) ist gesättigt und vermischt sich mit Umgebungsluft (Zustand 1), dabei durchquert die Mischungsgerade (s. Diagramm) das Nebelgebiet. Zuerst tritt also Nebel auf, der sich bei weiteren Vermischung wieder auflöst.

Musterlösung Aufgabe 3: «Verbrennung» ⇒ 13 Punkte

5 kg Propan/Butan, 50/50 massen-%

I. TEILAUFGABE A) ⇒ 2 PUNKTE

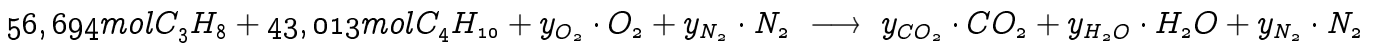
$$2500 \text{ gPropan} = \frac{2500(\text{g})}{44,096\left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right)} = 56,694 \text{ mol}$$

$$2500 \text{ gButan} = \frac{2500(\text{g})}{58,122\left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right)} = 43,013 \text{ mol}$$

$$56,694 \text{ mol} + 43,013 \text{ mol} = 99,707 \text{ mol}$$

$$\Rightarrow \psi_{\text{Propan}} = 56,861 \text{ mol}\% , \psi_{\text{Butan}} = 43,139 \text{ mol}\%$$

II. TEILAUFGABE B) ⇒ 5 PUNKTE



$$y_{CO_2} = 3 \cdot 56,694 \text{ mol} + 4 \cdot 43,013 \text{ mol} = 342,135 \text{ mol} \Rightarrow m_{CO_2} = 342,135 \text{ mol} \cdot 44,018 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right) = 15057,4(\text{g})$$

$$y_{H_2O} = 4 \cdot 56,694 \text{ mol} + 5 \cdot 43,013 \text{ mol} = 441,843 \text{ mol} \Rightarrow m_{H_2O} = 441,843 \text{ mol} \cdot 18,015 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right) = 7959,8(\text{g})$$

$$y_{O_2} = y_{CO_2} + \frac{1}{2} \cdot y_{H_2O} = 342,135 \text{ mol} + \frac{1}{2} \cdot 441,843 \text{ mol} = 563,057 \text{ mol}$$

$$y_{N_2} = y_{O_2} \cdot \frac{\psi_{N_2}}{\psi_{O_2}} = 563,057 \text{ mol} \cdot \frac{0,79}{0,21} = 2118,166 \text{ mol}$$

III. TEILAUFGABE C) ⇒ 2 PUNKTE

$$\Delta t = \frac{Q_{\text{Verbrennung}}}{\dot{Q}_{\text{Heizleistung}}}$$

$$Q_{\text{Verbrennung}} = - \sum y_i \cdot h_i^B = - \sum y_i \cdot [\Delta h_{\theta,i}^B + c_{p,i} \cdot (T_i - T_\theta)]$$

$$h_{C_3H_8}^B = -104,68 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}\right) + 0,07291 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{mol} \cdot \text{K}}\right) \cdot (10 - 25) \text{ K} = -105,774 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}\right)$$

$$h_{C_4H_{10}}^B = -125,79 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}\right) + 0,09899 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{mol} \cdot \text{K}}\right) \cdot (10 - 25) \text{ K} = -127,275 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}\right)$$

$$h_{O_2}^B = 0 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}\right) + 0,03921 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{mol} \cdot \text{K}}\right) \cdot (10 - 25) \text{ K} = -0,588 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}\right)$$

$$h_{N_2,Ed.}^B = 0\left(\frac{kJ}{mol}\right) + 0,02917\left(\frac{kJ}{mol \cdot K}\right) \cdot (10 - 25)K = -0,438\left(\frac{kJ}{mol}\right)$$

$$h_{CO_2}^B = -393,51\left(\frac{kJ}{mol}\right) + 0,03897\left(\frac{kJ}{mol \cdot K}\right) \cdot (100 - 25)K = -390,587\left(\frac{kJ}{mol}\right)$$

$$h_{H_2O}^B = -241,81\left(\frac{kJ}{mol}\right) + 0,03387\left(\frac{kJ}{mol \cdot K}\right) \cdot (100 - 25)K = -239,270\left(\frac{kJ}{mol}\right)$$

$$h_{N_2,Prod.}^B = 0\left(\frac{kJ}{mol}\right) + 0,02919\left(\frac{kJ}{mol \cdot K}\right) \cdot (100 - 25)K = +2,189\left(\frac{kJ}{mol}\right)$$

$$\Rightarrow Q_{Verbrennung} = -[342,135 \cdot (-390,587) + 441,843 \cdot (-239,270) + 2118,166 \cdot (2,189) - 56,694 \cdot (-105,774) - 43,013 \cdot (-127,275) - 563,057 \cdot (-0,588) - 2118,166 \cdot (-0,438)]\left(mol \cdot \frac{kJ}{mol}\right) = 221986,9(kJ)$$

$$\Rightarrow \Delta t = \frac{221986,9(kJ)}{2,7(kW)} = 82217,37s = 22h 50min 17sec$$