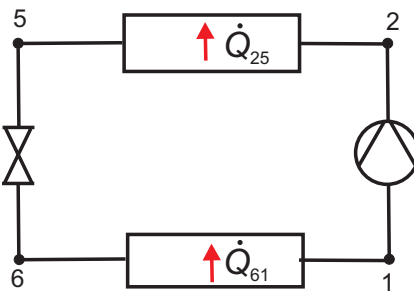


Musterlösung Aufgabe 1: «Kältemaschine»

I. TEILAUFGABE A) ⇒ 2 PUNKTE

- 1 → 2 Kompression des überhitzten Dampfs mit einem isentropen Wirkungsgrad von $\eta_{s,V} = 0.85$
- 2 → 3 isobare Abkühlung des überhitzten Dampfs bis zur Taulinie
- 3 → 4 isobare Kondensation bis zur Siedelinie
- 4 → 5 isobare Unterkühlung
- 5 → 6 adiabate Drosselung bis auf 3.7292 bar
- 6 → 7 isobare Verdampfung bis zur Taulinie
- 7 → 1 isobare Überhitzung um 5 K

II. TEILAUFGABE B) ⇒ 2 PUNKTE



III. TEILAUFGABE C) ⇒ 4 PUNKTE

$$p_6 = p_7 = p_1 = 3.7292 \text{ bar} \Rightarrow t_7 = 5^\circ\text{C}, t_1 = t_7 + 5\text{K} = 10^\circ\text{C}$$

$$h_1 = h(3.7292 \text{ bar}, 10^\circ\text{C}) = 207.84 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right), s_1 = s(3.7292 \text{ bar}, 10^\circ\text{C}) = 0.75652 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\right)$$

$$s_1 = s_{2s} = 0.75652 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\right)$$

$$t_4 = 60^\circ\text{C} \Rightarrow p_5 = p_3 = p_2 = p_4 = p_{2s} = 1.64188 \text{ MPa}$$

$$\text{Zustand 2s: } s_{2s} = 0.75652 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\right), p_{2s} = 1.64188 \text{ MPa}$$

$$\text{Interpolation: } h_{2s} = 232,51 + \frac{235,35 - 232,51}{0.75875 - 0.75025} \cdot (0.75625 - 0.75025) = 234.6049 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\eta_{s,V} = \frac{w_{t,s}}{w_t} = \frac{h_{2,s} - h_1}{h_2 - h_1} \Rightarrow h_2 = \frac{h_{2,s} - h_1}{\eta_{s,V}} + h_1 = \frac{234.6049 - 207.84}{0.85} + 207.84 = 239.3281 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$$

$$\text{Interpolation: } t_2 = 64 + \frac{66 - 64}{240,81 - 238,11} \cdot 239,3281 - 238,11 = 64.90^\circ\text{C}$$

IV. TEILAUFGABE D) ⇒ 4 PUNKTE

$$\dot{Q}_{zu} = \dot{m}_{KM} \cdot (h_1 - h_6)$$

$$\dot{m}_{KM} = \rho_1 \cdot \dot{V}_1$$

$$\rho_1 = \rho(t = 10^\circ\text{C}, p = 3.7292 \text{ bar}) = 20.20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \dot{V}_1 = 200 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\Rightarrow \dot{m}_{KM} = 20.20 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \cdot \frac{200}{3600} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) = 1.1222 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$h_6 = h_6' + x_6 \cdot (h_6'' - h_6') = 43.08 + 0.21 \cdot (203.1 - 43.08) = 76.6842 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{Q}_{zu} = 1.1222 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (207.84 - 76.6842) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 147.183 \text{ kW}$$

$$\varepsilon_{KM} = \frac{\dot{Q}_{zu}}{P_{12}} = \frac{\dot{Q}_{zu}}{\dot{m}_{KM} \cdot (h_2 - h_1)} = \frac{147.183 \text{ kW}}{1.1222 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (239.3281 - 207.84) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 4.1652$$

V. TEILAUFGABE E) ⇒ 4 PUNKTE

$$\eta_{ex.} = \frac{|\dot{E}_{\dot{Q}_{zu}}|}{P_{12}} = \frac{\left(1 - \frac{T_a}{T_{m,61}}\right) \cdot \dot{Q}_{zu}}{\dot{m}_{KM} \cdot (h_2 - h_1)}$$

$$T_{m,61} = \frac{\Delta h_{61}}{\Delta s_{61}} = \frac{h_1 - h_6}{s_1 - s_6}$$

$$8.3\text{cm}] s_6 = s_6' + x_6 \cdot (s_6'' - s_6') = 0.16433 + 0.21 \cdot (0.73962 - 0.16433) = 0.28514 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$T_{m,61} = \frac{207.84 - 76.6842}{0.75652 - 0.28514} = 278.2379 \text{ K}$$

$$\eta_{ex.} = \frac{\left(1 - \frac{273.15 + 15}{278.2379}\right) \cdot 147.183 \text{ kW}}{1.1222 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (239.3281 - 207.84) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 14.84 \%$$

VI. TEILAUFGABE F) ⇒ 3 PUNKTE

$$\dot{E}_V = \dot{m}_{KM} \cdot T_a \cdot (s_2 - s_1)$$

$$\text{Interpolation: } s_2 = 0.76697 + \frac{0.77496 - 0.76697}{240.81 - 238.11} \cdot (239.3281 - 238.11) = 0.77057 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

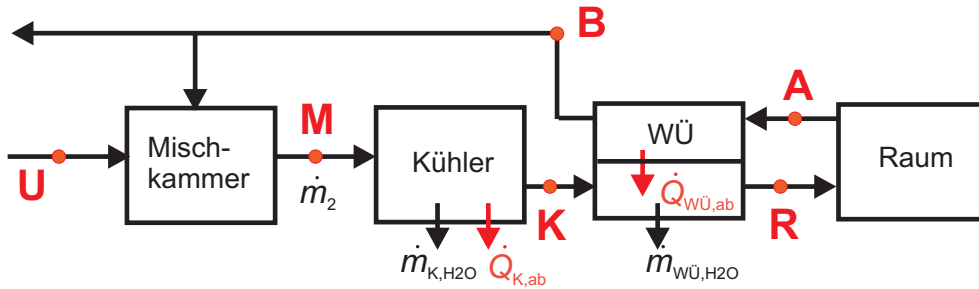
$$\dot{E}_V = 1.1222 \cdot 288.15 \cdot (0.77057 - 0.75652) = 4.5432 \text{ kW}$$

VII. TEILAUFGABE G) ⇒ 1 PUNKTE

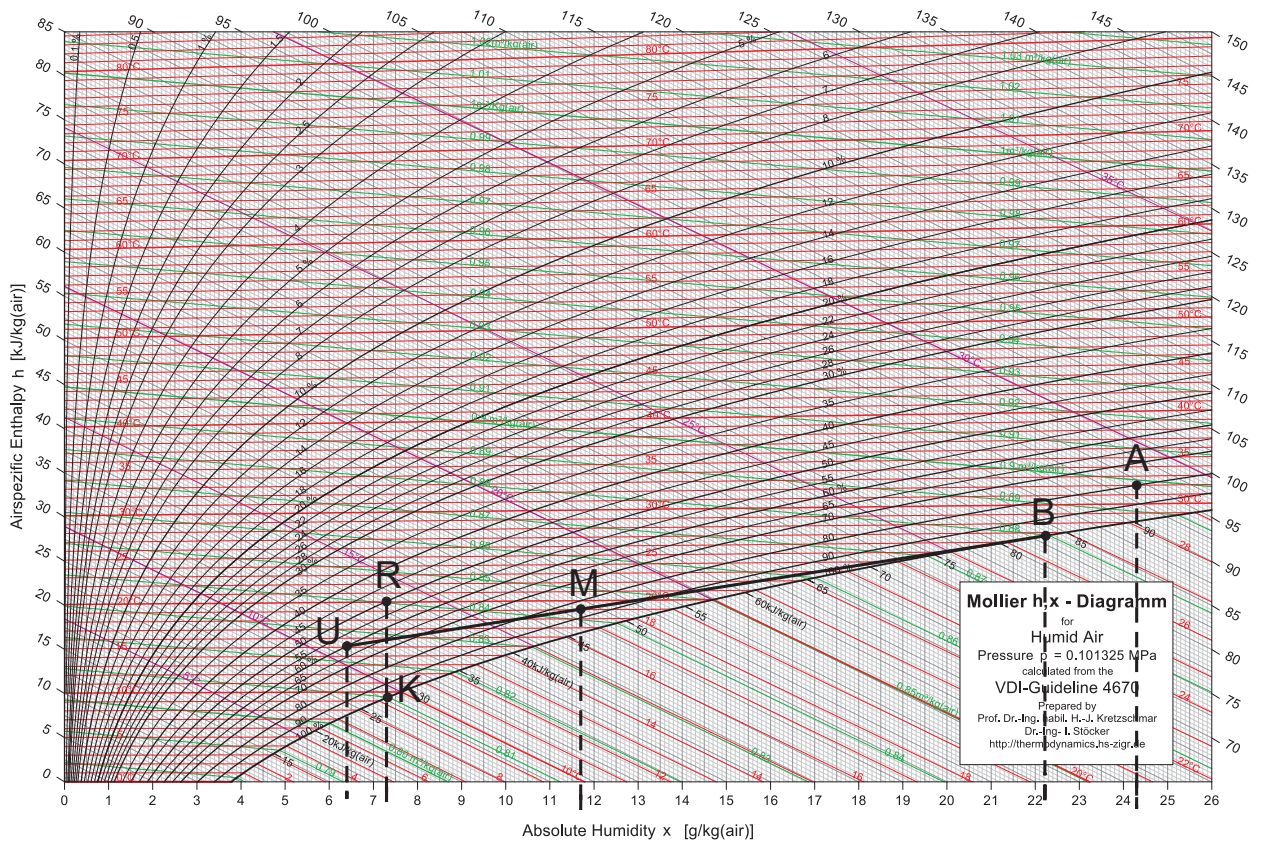
z.B. Kondensation bei niedrigem Druck

Musterlösung Aufgabe 2:

I. TEILAUFGABE A) ⇒ 3 PUNKTE



II. TEILAUFGABE B) ⇒ 3 PUNKTE



III. TEILAUFGABE C) ⇒ 3 PUNKTE

$$\text{Zustand K: } x_K = x_R = 7.25 \frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{kg Luft}}, \varphi_K = 100 \%$$

$$q_{ab,A \rightarrow B} = q_{zu,K \rightarrow R} = h_{1+x,R} - h_{1+x,K}$$

$$h_{1+x,R} = 38.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, h_{1+x,K} = 27.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{ (aus Diagramm!)}$$

$$q_{ab,A \rightarrow B} = q_{zu,K \rightarrow R} = 38.5 - 27.5 = 11 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$q_{ab,A \rightarrow B} = h_{1+x,A} - h_{1+x,B}$$

$$h_{1+x,B} = h_{1+x,A} + h_{\text{H}_2\text{O}} - q_{ab,A \rightarrow B} = 94.5 - 11 = 83.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Das Anteil $h_{\text{H}_2\text{O}}$ ist sehr klein im Vergleich mit $q_{ab,A \rightarrow B}$, deswegen kann hier vernachlässigt werden!

$$\text{Zustand B: } \varphi_B = 100\%, h_{1+x,B} = 83.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \Rightarrow x_B = 22.25 \frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{kg Luft}}$$

Vermischen B und U: Mischungsgerade

$$\text{Zustand U: } x_U = 6.3 \frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{kg Luft}}, \varphi_K = 60 \%$$

$$x_M = x_B + \frac{m_{L,U}}{m_{L,B} + m_{L,U}} \cdot (x_U - x_B)$$

$$\frac{m_{L,B}}{m_{L,U}} = \frac{1}{2} \Rightarrow m_{L,U} = 2 \cdot m_{L,B}$$

$$x_M = x_B + \frac{2 \cdot m_{L,B}}{m_{L,B} + 2 \cdot m_{L,B}} \cdot (x_U - x_B) = x_B + \frac{2}{3} \cdot (x_U - x_B) = 22.25 + \frac{2}{3} \cdot (6.3 - 22.25) = 11.62 \frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{kg Luft}}$$

Aus Diagramm: $t_M = 19^\circ\text{C}$, $\varphi_M = 85 \%$

IV. TEILAUFGABE D) ⇒ 2 PUNKTE

$$\frac{q_{M \rightarrow K}}{q_{A \rightarrow B}} = \frac{\Delta h_{1+x,M \rightarrow K}}{\Delta h_{1+x,A \rightarrow B}} = \frac{48.5 - 27.5}{11} = 1.91$$

V. TEILAUFGABE E) ⇒ 3 PUNKTE

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = m_L \cdot \Delta x = \left(\text{mit } m_L = \frac{V}{v_{1+x}} \right) = \frac{V}{v_{1+x}} \cdot \Delta x$$

$$\frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{V_R} = \frac{\Delta x}{v_{1+x,R}} = \frac{\Delta x}{\frac{T}{p} \cdot R_m \cdot \left(\frac{1}{M_L} + \frac{x}{M_D} \right)}$$

Aus Diagramm: $v_{1+x,R} = 0.84 \frac{\text{m}^3}{\text{kg Luft}}$

$$\frac{m_{\text{H}_2\text{O},M \rightarrow K}}{V_R} = \frac{\Delta x_{M \rightarrow K}}{v_{1+x,R}} = \frac{11.62 - 7.25}{0.84} = 5.2 \frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{m}^3}$$

$$\frac{m_{\text{H}_2\text{O},A \rightarrow B}}{V_R} = \frac{\Delta x_{A \rightarrow B}}{v_{1+x,R}} = \frac{24.3 - 22.25}{0.84} = 2.14 \frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{m}^3}$$

Musterlösung Aufgabe 3:

I. TEILAUFGABE A) ⇒ 4 PUNKTE

$$c = \frac{m_C}{M_C} = \frac{510 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{12 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 42,5 \frac{\text{mol C}}{\text{kg tr. Holz}}$$

$$h = \frac{m_{\text{H}_2}}{M_{\text{H}_2}} = \frac{65 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{2 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 32,5 \frac{\text{mol H}_2}{\text{kg tr. Holz}}$$

$$o = \frac{m_{\text{O}_2}}{M_{\text{O}_2}} = \frac{420 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{32 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 13,125 \frac{\text{mol O}_2}{\text{kg tr. Holz}}$$

$$k = \frac{m_K}{M_K} = \frac{5 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{39,098 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 0,1279 \frac{\text{mol K}}{\text{kg tr. Holz}}$$

$$\Rightarrow y_{\text{ges}} = c + h + o + k = 88,2529 \frac{\text{mol}}{\text{kg tr. Holz}}$$

$$\psi_C = \frac{c}{y_{\text{ges}}} = \frac{42,5}{88,2529} = 48,157 \%$$

$$\psi_{\text{H}_2} = \frac{h}{y_{\text{ges}}} = \frac{32,5}{88,2529} = 36,826 \%$$

$$\psi_{\text{O}_2} = \frac{o}{y_{\text{ges}}} = \frac{13,125}{88,2529} = 14,872 \%$$

$$\psi_K = \frac{k}{y_{\text{ges}}} = \frac{0,1279}{88,2529} = 0,145 \%$$

$$\Delta h^u = 5,2 \frac{\text{kWh}}{\text{kg tr. Holz}} = \frac{5,2 \cdot 3600 \text{ kJ}}{88,2529 \text{ mol}} = 212,118 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

II. TEILAUFGABE B) ⇒ 3 PUNKTE

1 kg tr. Holz + 0,15 kg Wasser = 1,15 kg feuchtes Holz

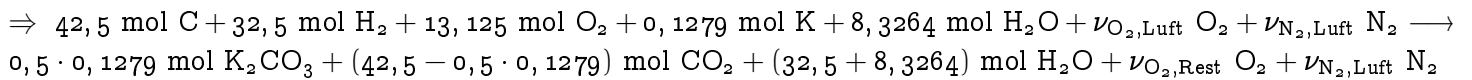
$$\Delta h_{\text{neu}}^u = \underbrace{\frac{5,2 \text{ kWh}}{\text{kg tr. Holz}} \cdot \frac{1 \text{ kg tr. Holz}}{1,15 \text{ kg f. Holz}}}_{\text{verminderter Heizwert}} - \underbrace{\frac{0,15 \text{ kg Wasser}}{1,15 \text{ kg f. Holz}} \cdot \Delta h_{\text{v,Wasser}}}_{\text{Verdampfungswärme}}$$

$$\Delta h_{\text{v,Wasser}} = \frac{h(g) - h(fl)}{M_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{(-241,83 - (-285,83)) \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}}{18,015 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 2442,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg Wasser}} = 0,6784 \frac{\text{kWh}}{\text{kg Wasser}}$$

$$\Rightarrow \Delta h_{\text{neu}}^u = 4,433 \frac{\text{kWh}}{\text{kg f. Holz}}$$

III. TEILAUFGABE C) ⇒ 6 PUNKTE

feuchtes Holz: 0,51 kg C + 0,065 kg H₂ + 0,42 kg O₂ + 0,005 kg K + 0,15 kg H₂O



$$\nu_{\text{O}_2,\text{Luft,stöchiometrisch}} = \left(\frac{3 \cdot 0,1279}{2 \cdot 2} + (42,5 - 0,5 \cdot 0,1279) + 0,5 \cdot 32,5 - 13,125 \right) \frac{\text{mol O}_2}{1,15 \text{ kg f. Holz}} = 45,657 \frac{\text{mol O}_2}{1,15 \text{ kg f. Holz}}$$

$$\lambda = 1,1 \Rightarrow \nu_{\text{O}_2,\text{Luft}} = 1,1 \cdot \nu_{\text{O}_2,\text{Luft,stöchiometrisch}} = 50,223 \frac{\text{mol O}_2}{1,15 \text{ kg f. Holz}}$$

$$\nu_{\text{N}_2,\text{Luft}} = \nu_{\text{O}_2,\text{Luft}} \cdot \frac{\psi_{\text{N}_2}}{\psi_{\text{O}_2}} = 50,223 \cdot \frac{79}{21} = 188,933 \frac{\text{mol N}_2}{1,15 \text{ kg f. Holz}}$$

$$\sum_{\text{P,gas}} \nu_i = \nu_{\text{CO}_2} + \nu_{\text{H}_2\text{O}} + \nu_{\text{O}_2,\text{Rest}} + \nu_{\text{N}_2} = 42,436 + 40,8264 + 4,5657 + 188,933 = 276,761 \text{ mol}$$

$$\psi_{\text{CO}_2} = \frac{42,436}{276,761} = 15,33 \%; \quad \psi_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{40,826}{276,761} = 14,75 \%; \quad \psi_{\text{O}_2} = \frac{4,5657}{276,761} = 1,65 \%; \quad \psi_{\text{N}_2} = \frac{188,933}{276,761} = 68,27 \%$$

IV. TEILAUFGABE D) ⇒ 3 PUNKTE

Bei Abkühlung auf $T = 40^\circ\text{C}$ ist der Partialdruck des Wasserdampfes $p_d = \psi_d \cdot p_{\text{ges}}$. Er kann auch nicht grösser sein als der Sättigungsdampfdruck

$$p_s(T = 40^\circ\text{C}) = e^{\left[11,93255 - \frac{3970,148}{(273,15740 - 40,052)} \right]} = 0,07391 \text{ bar}$$

$$\psi_d \leq \frac{p_{d,s}}{p_{\text{ges}}} = \frac{0,07391}{1,01325} = 0,072944 = \frac{n_d}{n_d + n_{\text{Rest}}}$$

$$\Rightarrow \psi_d \cdot (n_d + n_{\text{Rest}}) = n_d \Rightarrow n_d = n_{\text{Rest}} \cdot \frac{\psi_d}{1 - \psi_d} = 235,9346 \cdot 0,07868367 = 18,5642 \text{ mol H}_2\text{O-Dampf}$$

$$n_{\text{Kond}} = n_{\text{H}_2\text{O,vor Abkühlung}} - n_{\text{H}_2\text{O,nach Abkühlung}} = (40,8264 - 18,5642) \text{ mol} = 22,262 \text{ mol}$$

$$\Delta h_{\text{Kond}} \cdot \Delta n = 44 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \cdot 22,262 \text{ mol} = 979,5 \text{ kJ} = 0,272 \text{ kWh}$$