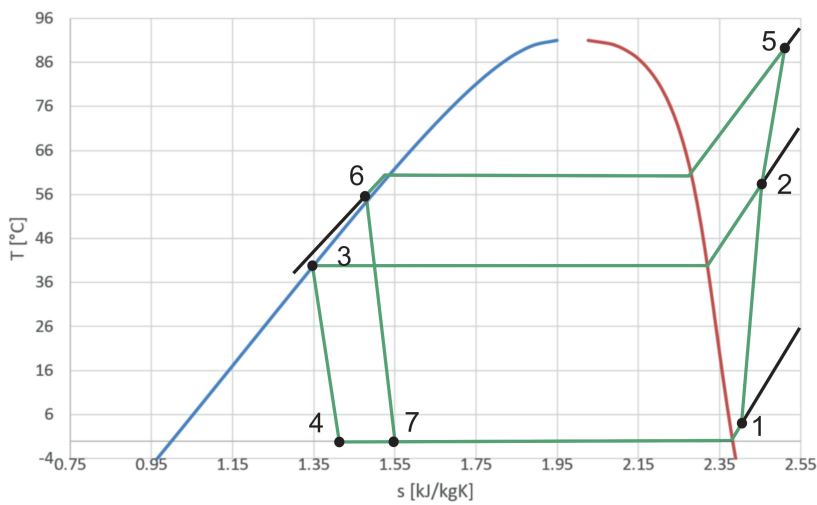
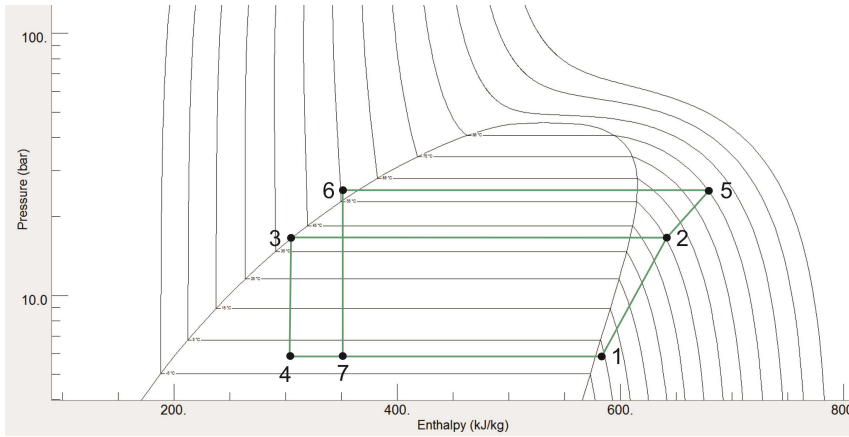
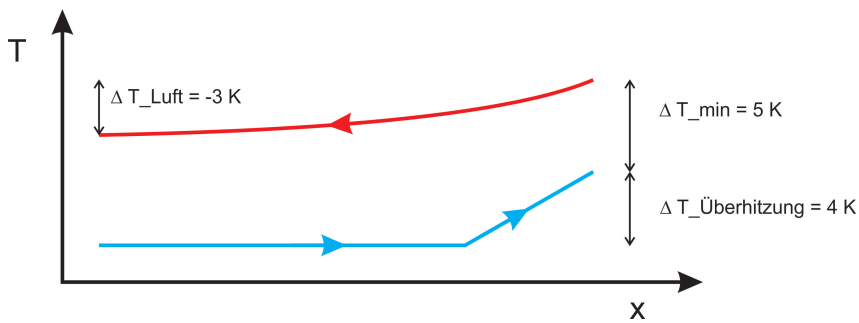


Musterlösung Aufg. 1: «Wärmepumpe: Heiz-, Brauchwasser»

Teilaufgabe a)



Teilaufgabe b)



$$T_s = 0^\circ\text{C}$$

Teilaufgabe c)

$$E = 50 \text{ kWh} \Rightarrow \dot{Q}_{ges} = \dot{Q}_{23} + \dot{Q}_{56} = \frac{-E}{t} = \frac{-50 \text{ kWh}}{13 \text{ h}} = -3,846 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{23} = 0,8 \cdot \dot{Q}_{ges} = -3,077 \text{ kW} \quad ; \quad \dot{Q}_{56} = -0,769 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{23} = \dot{m}_{KM,HW} \cdot (h_3 - h_2) \Rightarrow \dot{m}_{KM,HW} = \frac{\dot{Q}_{23}}{h_3 - h_2}$$

$$h_3 = 305,02 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad ; \quad s_1 = 2,407 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} = s_{2s}$$

$$\eta_{s,V1} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \Rightarrow h_2 = \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_{s,V1}} + h_1$$

$$h_{2s} \text{ interpolieren: } h_{2s} = (632,9 + \frac{2,407 - 2,397}{2,411 - 2,397} \cdot (637,59 - 632,9)) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 636,25 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_2 = (\frac{636,25 - 584,27}{0,86} + 584,27) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 644,71 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{m}_{KM,HW} = \frac{-3,077 \text{ kW}}{(305,02 - 644,71) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0,0091 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$s_2 = s_{5s} = 2,433 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \Rightarrow h_{5s} = 667,00 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_5 = \frac{h_{5s} - h_2}{\eta_{s,V2}} + h_2 = (\frac{667,00 - 644,71}{0,8} + 644,71) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 672,57 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{m}_{KM,BW} = \frac{-0,769 \text{ kW}}{(352,26 - 672,57) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0,0024 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Teilaufgabe d)

$$\epsilon_{WP} = \frac{|\dot{Q}_{ges}|}{P_{zu}} \Rightarrow \epsilon_{WP} = \frac{|-3,846| \text{ kW}}{0,762 \text{ kW}} = 5,048$$

$$P_{zu} = (\dot{m}_{KM,HW} + \dot{m}_{KM,BW}) \cdot (h_2 - h_1) + \dot{m}_{KM,BW} \cdot (h_5 - h_2)$$

$$= (0,0091 + 0,0024) \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (644,71 - 584,27) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0,0024 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (672,57 - 644,71) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 0,762 \text{ kW}$$

Teilaufgabe e)

$$\eta_{ex} = \frac{|\dot{E}_{ab}|}{P_{zu}}$$

$$\dot{E}_{ab} = \Delta \dot{E}_{23} + \Delta \dot{E}_{56}$$

$$\Delta \dot{E}_{23} = (1 - \frac{T_u}{T_{m,23}}) \cdot \dot{Q}_{23}$$

$$T_{m,23} = \frac{\Delta h_{23}}{\Delta s_{23}} = \frac{(305,02 - 644,71) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{(1,351 - 2,433) \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}} = 313,95 \text{ K}$$

$$\Delta \dot{E}_{23} = (1 - \frac{282,15 \text{ K}}{313,95 \text{ K}}) \cdot (-3,077) \text{ kW} = -0,3117 \text{ kW}$$

$$\Delta \dot{E}_{56} = (1 - \frac{T_u}{T_{m,56}}) \cdot \dot{Q}_{56}$$

$$T_{m,56} = \frac{\Delta h_{56}}{\Delta s_{56}} = \frac{(352,57 - 672,57) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{(1,492 - 2,449) \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}} = 334,70 \text{ K}$$

$$s_5 \text{ interpolieren: } s_5 = (2,433 + \frac{672,57 - 667,00}{684,57 - 667,00} \cdot (2,482 - 2,433)) \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} = 2,449 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$\Delta \dot{E}_{56} = (1 - \frac{282,15 \text{ K}}{334,70 \text{ K}}) \cdot (-0,769) \text{ kW} = -0,1207 \text{ kW}$$

$$\eta_{ex} = \frac{|-0,3117 + (-0,1207)| \text{ kW}}{0,7619 \text{ kW}} = 0,5675$$

Musterlösung Aufgabe 2: «Feuchte Luft im Wassertank»

Teilaufgabe a) \Rightarrow 4 Punkte

$$m_{tr,L,1} = V_{L,1}/v_{1+x,1} \quad ; \quad v_{1+x,1} = (R_L + x_1 R_W) \frac{T_1}{p_1}$$

$$R = R_m/M \Rightarrow R_L = R_m/M_L, R_W = R_m/M_W$$

$$R_L = 8,314472 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol K}} / 28,96 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} = 0,28710 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \quad ; \quad R_W = 8,314472 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol K}} / 18,015 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} = 0,46153 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$x_1 = x_U = \frac{R_L}{R_W} \cdot \frac{\varphi_U p_s(t_U)}{p_U - \varphi_U p_s(t_U)} \quad ; \quad t_u = 20 \text{ }^\circ\text{C} = 293,15 \text{ K}, \varphi_U = 0,60$$

$$p_s(t_U) = \exp\left(12,40682 - \frac{4222,037}{293,15 - 31,95}\right) \text{ bar} = 0,023349 \text{ bar}$$

$$x_1 = x_U = 0,622 \cdot \frac{0,6 \cdot 0,023349}{1,01325 - 0,6 \cdot 0,023349} = 0,00872 \frac{\text{kg}}{\text{kg(Luft)}} = 8,72 \frac{\text{g}}{\text{kg(Luft)}}$$

mit $p_1 = p_U = 1,01325 \text{ bar} = 101,325 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$ folgt:

$$v_{1+x,1} = (0,28710 + 0,00872 \cdot 0,46153) \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \frac{293,15 \text{ K}}{101,325 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}} = 0,84228 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

mit $V_{L,1} = 250 \text{ l} = 0,25 \text{ m}^3$ folgt: $m_{tr,L,1} = 0,25 \text{ m}^3 / 0,84228 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = 0,297 \text{ kg}$

Teilaufgabe b) \Rightarrow 5 Punkte

$$p_2 = p_{W,2} + p_{L,2} = \varphi_2 \cdot p_s(t_2) + \frac{R_L T_2}{v_{1+x,2}} \quad (\text{Summe der Partialdrücke von Wasserdampf und Luft})$$

Alternative:

$$1) \quad x_2 = \frac{R_L}{R_W} \cdot \frac{\varphi_2 p_s(t_2)}{p_2 - \varphi_2 p_s(t_2)} \quad ; \quad 2) \quad v_{1+x,2} = (R_L + x_2 R_W) \frac{T_2}{p_2}$$

1) \rightarrow 2) einsetzen \Rightarrow führt zur selben Gleichung wie oben.

$$V_{L,2} = V_{L,1} \quad ; \quad m_{tr,L,2} = m_{tr,L,1} \Rightarrow v_{1+x,2} = v_{1+x,1} = 0,84228 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$p_s(t_2) = \exp\left(12,40682 - \frac{4222,037}{303,15 - 31,95}\right) \text{ bar} = 0,042376 \text{ bar}$$

$$\Rightarrow p_{W,2} = 0,9 \cdot 0,042376 \text{ bar} = 0,038139 \text{ bar} \quad ; \quad p_{L,2} = \frac{0,28710 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot 303,15 \text{ K}}{0,84228 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} = 103,333 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$$

$$\Rightarrow p_{L,2} = 1,013333 \text{ bar} \quad ; \quad p_2 = (0,038139 + 1,013333) \text{ bar} = 1,07147 \text{ bar}$$

Teilaufgabe c) \Rightarrow 2 Punkte

$$\text{Zustandsänderung: isotherm } (t_3 = t_2) \Rightarrow p_3 V_{L,3} = p_2 V_{L,2} \Leftrightarrow V_{L,3} = \frac{p_2}{p_3} V_{L,2}$$

$$\Delta V_{L,23} = V_{L,3} - V_{L,2} \Rightarrow \Delta V_{L,23} = V_{L,2} \left(\frac{p_2}{p_3} - 1 \right)$$

$$V_{L,2} = V_{L,1} = 0,25 \text{ m}^3, p_3 = p_U = 1,01325 \text{ bar}$$

$$\Rightarrow \Delta V_{L,23} = 0,25 \text{ m}^3 \left(\frac{1,07147}{1,01325} - 1 \right) = 0,01436 \text{ m}^3 = 14,36 \text{ l}$$

Teilaufgabe d) \Rightarrow 8 Punkte

$$x_{M1} = x_U + \frac{m_{tr.L,M1,3}}{m_{tr.L,M1,U} + m_{tr.L,M1,3}} (x_3 - x_U)$$

$$x_3 = \frac{R_L}{R_W} \cdot \frac{\varphi_3 p_s(t_3)}{p_3 - \varphi_3 p_s(t_3)} = x_2 = \frac{R_L}{R_W} \cdot \frac{\varphi_2 p_s(t_2)}{p_2 - \varphi_2 p_s(t_2)} \quad ; \quad p_s(t_3) = p_s(t_2) = 0,042376 \text{ bar}$$

$$\Rightarrow x_3 = 0,622 \cdot \frac{0,85 \cdot 0,042376}{1,01325 - 0,85 \cdot 0,042376} = 0,02293 \frac{\text{kg}}{\text{kg(Luft)}} = 22,93 \frac{\text{g}}{\text{kg(Luft)}}$$

$$m_{tr.L,M1,U} = \frac{V_{L,M1,U}}{v_{1+x,U}} \quad ; \quad m_{tr.L,M1,3} = \frac{V_{L,M1,3}}{v_{1+x,3}}$$

$$V_{L,M1,U} = \Delta V_W + 0,45 \cdot V_{L,3} = (500 + 0,45 \cdot 250) \text{ l} = 612,5 \text{ l} = 0,6125 \text{ m}^3$$

$$V_{L,M1,3} = (1 - 0,45) \cdot V_{L,3} = 0,55 \cdot 250 \text{ l} = 137,5 \text{ l} = 0,1375 \text{ m}^3$$

$$v_{1+x,3} = (R_L + x_3 R_W) \frac{T_3}{p_3} \Rightarrow v_{1+x,3} = (0,28710 + 0,02293 \cdot 0,46153) \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot \frac{303,15 \text{ K}}{101,325 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}} = 0,89063 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$m_{tr.L,M1,U} = \frac{0,6125 \text{ m}^3}{0,84228 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} = 0,72719 \text{ kg} \quad ; \quad m_{tr.L,M1,3} = \frac{0,1375 \text{ m}^3}{0,89063 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} = 0,15439 \text{ kg}$$

$$\Rightarrow m_{tr.L,M1} = m_{tr.L,M1,U} + m_{tr.L,M1,3} = (0,72719 + 0,15439) \text{ kg} = 0,88158 \text{ kg}$$

$$x_{M1} = 0,00872 \frac{\text{kg}}{\text{kg(Luft)}} + \frac{0,15439}{0,88158} (0,02293 - 0,00872) \frac{\text{kg}}{\text{kg(Luft)}} = 0,01121 \frac{\text{kg}}{\text{kg(Luft)}} = 11,21 \frac{\text{g}}{\text{kg(Luft)}}$$

Teilaufgabe e) \Rightarrow 6 Punkte

$$t_{M1} = \frac{h_{1+x,M1} - x_{M1} \Delta h_v}{c_{p,L} - x_{M1} c_{p,D}} \quad ; \quad h_{1+x,M1} = h_{1+x,U} + \frac{m_{tr.L,M1,3}}{m_{tr.L,M1,U} + m_{tr.L,M1,3}} (h_{1+x,3} - h_{1+x,U})$$

$$h_{1+x,U} = c_{p,L} \cdot t_U + x_U (\Delta h_v + c_{p,D} \cdot t_U) \quad ; \quad h_{1+x,3} = c_{p,L} \cdot t_3 + x_3 (\Delta h_v + c_{p,D} \cdot t_3)$$

$$h_{1+x,U} = 1,004 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot 20 \text{ K} + 0,00872 (2500 + 1,86 \cdot 20) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 42,208 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{1+x,3} = 1,004 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot 30 \text{ K} + 0,02293 (2500 + 1,86 \cdot 30) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 88,722 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{1+x,M1} = 42,208 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + \frac{0,15439}{0,88158} (88,722 - 42,208) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 50,354 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$t_{M1} = \frac{(50,354 - 0,01121 \cdot 2500) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{(1,004 - 0,01121 \cdot 1,86) \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}} = 21,79 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\varphi_{M1} = \frac{p_U}{p_s(t_{M1})} \cdot \frac{1}{1 + R_L/(x_{M1} R_W)} \quad ; \quad p_s(t_{M1}) = \exp \left(12,40682 - \frac{4222,037}{294,94 - 31,95} \right) \text{ bar} = 0,026063 \text{ bar}$$

$$\varphi_{M1} = \frac{1,01325}{0,026063} \cdot \frac{1}{1 + 0,28710/(0,01121 \cdot 0,46153)} = 0,6882 = 68,82\%$$

Teilaufgabe f) ⇒ 3 Punkte

$$t_{M_2} = \frac{h_{1+x,M_2} - x_{M_2} \Delta h_v}{c_{p,L} - x_{M_2} c_{p,D}} \quad ; \quad h_{1+x,M_2} = h_{1+x,M_1} + \Delta x c_{p,W} t_W \quad \text{mit } t_W = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$h_{1+x,M_2} = 50,354 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0,00075 \cdot 4,186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot 30 \text{ K} = 50,448 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$x_{M_2} = x_{M_1} + \Delta x = (0,01121 + 0,00075) \frac{\text{kg}}{\text{kg(Luft)}} = 0,01196 \frac{\text{kg}}{\text{kg(Luft)}}$$

$$t_{M_2} = \frac{(50,448 - 0,01196 \cdot 2500) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{(1,004 - 0,01196 \cdot 1,86) \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}} = 20,02 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Teilaufgabe g) ⇒ 4 Punkte

$$Q_K = \Delta h_{1+x,M_2 M_3} m_{tr,L,M_1} = (h_{1+x,M_3} - h_{1+x,M_2}) m_{tr,L,M_1}$$

$$h_{1+x,M_3} = c_{p,L} \cdot t_{M_3} + x_{s,M_3} (\Delta h_v + c_{p,D} \cdot t_{M_3}) + (x_{M_3} - x_{s,M_3}) c_{p,W} t_{M_3} \quad \text{mit } t_{M_3} = t_K$$

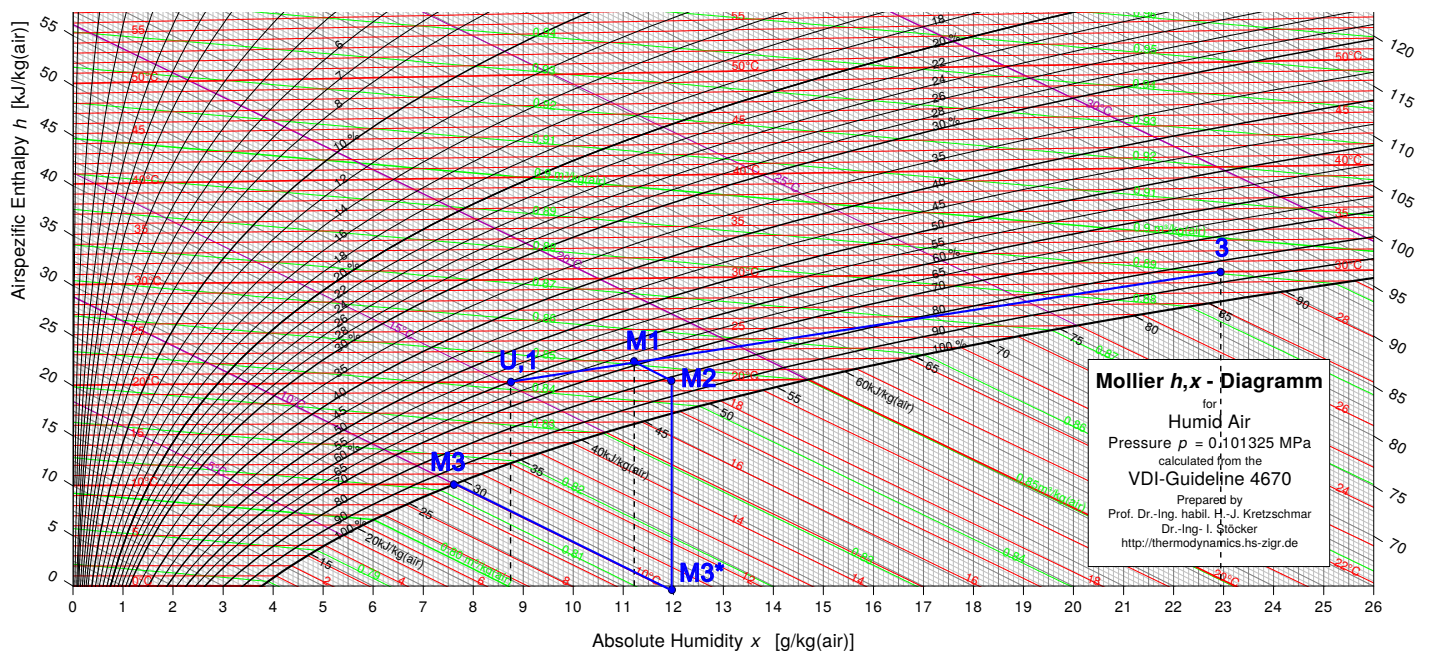
$$x_{s,M_3} = \frac{R_L}{R_W} \cdot \frac{p_s(t_{M_3})}{p_U - p_s(t_{M_3})} \quad ; \quad p_s(t_{M_3}) = \exp\left(12,40682 - \frac{4222,037}{283,15 - 31,95}\right) \text{ bar} = 0,012269 \text{ bar}$$

$$\Rightarrow x_{s,M_3} = 0,007625 \frac{\text{kg}}{\text{kg(Luft)}} = 7,625 \frac{\text{g}}{\text{kg(Luft)}}$$

$$h_{1+x,M_3} = 1,004 \cdot 10 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0,007625 (2500 + 1,86 \cdot 10) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + (0,01196 - 0,007625) 4,186 \cdot 10 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 29,425 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_K = (29,425 - 50,448) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 0,88158 \text{ kg} = -18,53 \text{ kJ}$$

Teilaufgabe d,f,g) ⇒ Eintragungen ins h_{1+x}, x -Diagramm



Musterlösung Aufgabe 3: «Calciumcarbid Lampe»

Teilaufgabe a) ⇒ 2 Punkte

$$m_{CaC_2} = 1 \text{ kg} \quad \text{mit} \quad M_{CaC_2} = 62,43 \text{ g/mol} \quad \Rightarrow \quad n_{CaC_2} = \frac{m}{M} = 15,6 \text{ mol}$$

$$\text{Im Normzustand: } v_m = \frac{R_m T}{p} = \frac{8,3145 \frac{\text{J}}{\text{molK}} \cdot 273,151 \text{ K}}{101325 \text{ Pa}} = 22,414 \frac{\text{dm}^3}{\text{mol}}$$

$$\text{Pro mol CaC}_2 \text{ entsteht 1 mol Ethin: } 15,6 \text{ mol CaC}_2 \cdot 22,414 \frac{\text{dm}^3}{\text{mol}} = 349,67 \text{ dm}^3$$

Teilaufgabe b) ⇒ 1 Punkte

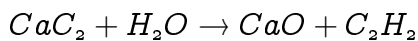
$$\frac{2 \text{ mol H}_2\text{O}}{1 \text{ mol CaC}_2} \Rightarrow 2 \cdot 15,6 \text{ mol H}_2\text{O} \cdot 18,015 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 562,07 \frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{kg CaC}_2}$$

Teilaufgabe c) ⇒ 2 Punkte

$$\Delta^R h_\Theta = \sum \nu_i \Delta^B h_{\Theta,i} = (-(-59,8 - 2 \cdot 285,83) - 986,1 + 227,5) \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} = -127,14 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

→ exotherm

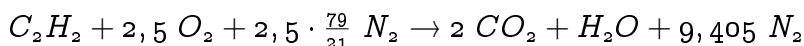
Teilaufgabe d) ⇒ 2 Punkte



$$\Delta^R h_\Theta = (-634,9 + 227,5 - (-59,8 - 285,83)) \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} = -61,77 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

Diese Reaktion ist weniger stark exotherm. D.h. bei der weiteren Reaktion zu $Ca(OH)_2$ wird weitere Energie frei, sodass sie von alleine abläuft.

Teilaufgabe e) ⇒ 1 Punkte



Teilaufgabe f) ⇒ 4 Punkte

$$\frac{Q}{n_{BS}} = 0 = \sum_{Edukte} \nu_i c_{p,i} (T_i - T_\Theta) + \Delta^R h_\Theta + \sum_{Produkte} \nu_i c_{p,i} (T_{ad} - T_\Theta)$$

$$\Rightarrow T_{ad} = T_\Theta - \frac{\Delta^R h_\Theta + \sum_{Edukte} \nu_i c_{p,i} (T_i - T_\Theta)}{\sum_{Produkte} \nu_i c_{p,i}}$$

$$\Delta^R h_{\Theta} = (-227,5 - 2 \cdot 393,5 - 241,82) \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} = -1256,32 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$\sum_{\text{Edukte}} \nu_i c_{p,i} (T_i - T_{\Theta}) = 0$$

$$\sum_{\text{Produkte}} \nu_i c_{p,i} = (2 \cdot 57,98 + 1 \cdot 46,98 + 9,405 \cdot 30,11) \frac{\text{J}}{\text{molK}} = 0,446 \frac{\text{kJ}}{\text{molK}}$$

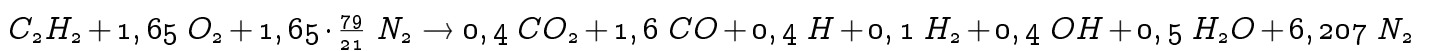
$$\Rightarrow T_{ad} = 25^{\circ}\text{C} - \frac{-1256,32 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}}{0,446 \frac{\text{kJ}}{\text{molK}}} = 2841,07^{\circ}\text{C}$$

Teilaufgabe g) \Rightarrow 1 Punkte

Bei sehr hohen Temperaturen dissoziieren die Produkte.

CO_2 zerfällt in CO und O, H_2O in OH und H.

Teilaufgabe h) \Rightarrow 6 Punkte



$$\Delta^R h_{\Theta} = (-227,5 - 0,4 \cdot 393,5 - 1,6 \cdot 110,5 + 0,4 \cdot 217,92 + 0 + 0,4 \cdot 41,25 - 0,5 \cdot 241,82) \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} = -578,94 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$\sum_{\text{Produkte}} \nu_i c_{p,i} = (0,4 \cdot 57,98 + 1,6 \cdot 35,01 + 0,4 \cdot 20,79 + 0,1 \cdot 32,31 + 0,4 \cdot 33,9 + 0,5 \cdot 46,98 + 6,207 \cdot 30,11) \frac{\text{J}}{\text{molK}} = 0,3147 \frac{\text{kJ}}{\text{molK}}$$

$$\Rightarrow T_{ad} = T_{\Theta} - \frac{\Delta^R h_{\Theta}}{\sum_{\text{Produkte}} \nu_i c_{p,i}} = 1864,65^{\circ}\text{C}$$