

Musterlösung Aufgabe 1: «Wärmepumpe / Klimaanlage»

Teilaufgabe a) ⇒ 3 Punkte

Wärmeübertrager 2 befindet sich ausserhalb und Wärmeübertrager 1 innerhalb des Hauses. Der WÜ, der Dampf zum Verdichter liefert muss zuvor Wärme aufnehmen. Beim Kühlen ist dementsprechend WÜ 1 der Verdampfer (dieser entnimmt Wärme aus den Wohnräumen) und WÜ 2 der Kondensator (gibt Wärme an die Aussenluft ab).

Teilaufgabe b) ⇒ 5 Punkte

$$h_1 \text{ interpolieren: } h_1 = \left(516,66 + \frac{523,26 - 516,66}{288,15 - 283,15} \cdot (286,15 - 283,15) \right) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 520,62 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_2 \text{ ablesen } h_2 = 559,67 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$s_1 \text{ interpolieren: } s_1 = \left(2,1185 + \frac{2,1416 - 2,1185}{288,15 - 283,15} \cdot (286,15 - 283,15) \right) \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} = 2,1324 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$h_{2s} \text{ interpolieren: } h_{2s} = \left(552,8 + \frac{559,67 - 552,8}{2,147 - 2,127} \cdot (2,1324 - 2,127) \right) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 554,64 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\eta_{s,v} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} = 0,8712$$

Teilaufgabe c) ⇒ 2 Punkte

$$h_3 = h_4 = 279,52 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}; h_1 = 520,62 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{Q}_{41} = 4 \text{ kW} = \dot{m}_{R32} \cdot (h_1 - h_4) \Rightarrow \dot{m}_{R32} = \frac{\dot{Q}_{41}}{h_1 - h_4} = 0,01659 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Teilaufgabe d) ⇒ 5 Punkte

$$\eta_{ex} = \frac{|\dot{E}_{41, \text{Sommer}}|}{P_v}$$

$$x_4 = \frac{h_4 - h'(p_4)}{h''(p_4) - h'(p_4)} = \frac{279,52 - 217,74}{516,66 - 217,74} = 0,2067$$

$$s_4 = (1 - x_4) \cdot s'(p_4) + x_4 \cdot s''(p_4) = 1,281 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$T_{m,41} = \frac{\Delta h_{41}}{\Delta s_{41}} = \frac{(520,62 - 279,52) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{(2,1324 - 1,281) \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}} = 283,18 \text{ K}$$

$$\Delta \dot{E}_{41} = \left(1 - \frac{T_u}{T_{m,41}} \right) \cdot \dot{Q}_{41} = \left(1 - \frac{305,15 \text{ K}}{283,18 \text{ K}} \right) \cdot 4 \text{ kW} = -0,3102 \text{ kW}$$

$$P_v = \dot{m}_{R32} \cdot (h_2 - h_1) = 0,6479 \text{ kW} \Rightarrow \eta_{ex} = 0,4788$$

Teilaufgabe e) ⇒ 2 Punkte

Im Winter, weil die Wärmeaufnahme häufig bei Temperaturen unterhalb von $T = 283,15 \text{ K}$ stattfindet und somit auch p_s niedriger ist.

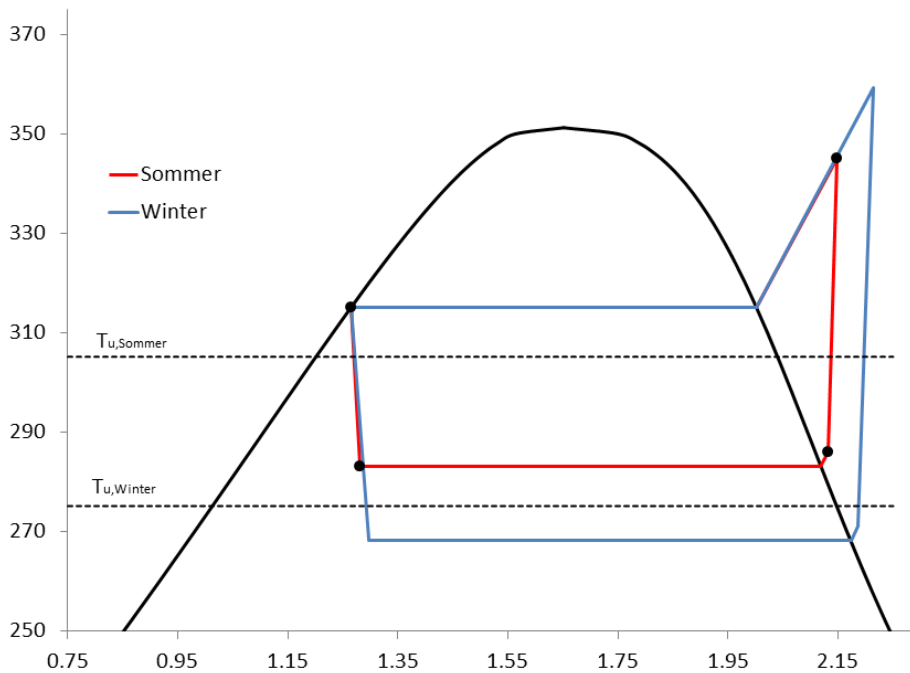
$$\left(\frac{p_{\text{Kond}}}{p_{\text{Verd}}}\right)_{\text{Winter}} > \left(\frac{p_{\text{Kond}}}{p_{\text{Verd}}}\right)_{\text{Sommer}}$$

Teilaufgabe f) ⇒ 2 Punkte

$$\dot{Q}_{23} = 5 \text{ kW}; P_v = 1 \text{ kW}$$

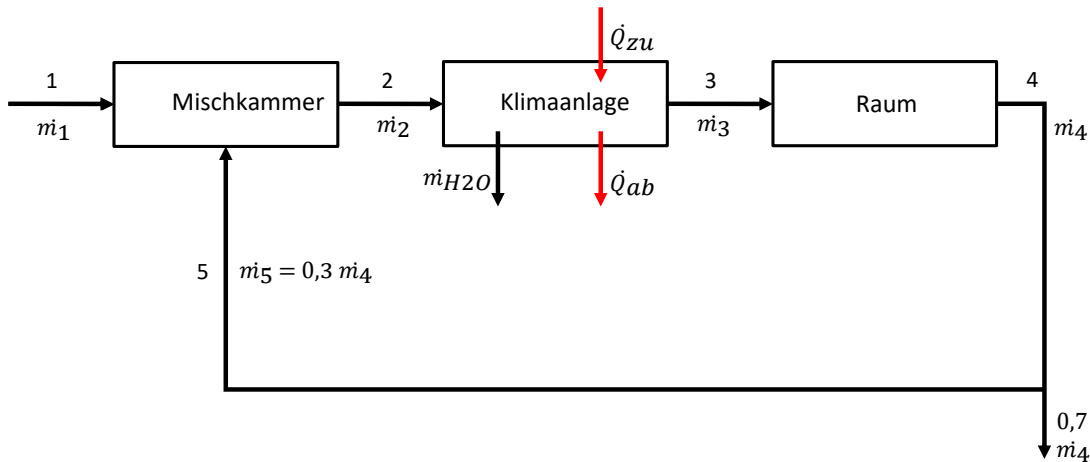
$$\dot{Q}_{41} = \dot{Q}_{23} - P_v = 4 \text{ kW}$$

Teilaufgabe g) ⇒ 7 Punkte



Musterlösung Aufgabe 2: «Feuchte Luft»

Teilaufgabe a) ⇒ 3 Punkte



Teilaufgabe b) ⇒ 4 Punkte

Wassergehalt:

$$x = 0,6222 \cdot \frac{p_D}{p_{ges} - p_D} = 0,6222 \cdot \frac{\varphi \cdot p_{D,s}}{p_{ges} - \varphi \cdot p_{D,s}} ; \text{ mit } \varphi = \frac{p_D}{p_{D,s}}$$

Dampfdruckkurve Wasser:

$$\ln(p_{D,s}/\text{mbar}) = 18,9141 - \frac{4010,823}{(t/^\circ\text{C} + 234,4623)}$$

Zustand 1:

$$\ln(p_{D,s,1}/\text{mbar}) = 18,9141 - \frac{4010,823}{(t_1/^\circ\text{C} + 234,4623)} = 18,9141 - \frac{4010,823}{(37 + 234,4623)} = 4,1392$$

$$\Rightarrow p_{D,s,1} = e^{4,1392} \text{ mbar} = 62,75 \text{ mbar}$$

$$\begin{aligned} x_1 &= 0,6222 \cdot \frac{p_{D,1}}{p_{ges} - p_{D,1}} = 0,6222 \cdot \frac{\varphi_1 \cdot p_{D,s,1}}{p_{ges} - \varphi_1 \cdot p_{D,s,1}} \\ &= 0,6222 \cdot \frac{0,9 \cdot 62,75 \text{ mbar}}{1013,25 \text{ mbar} - 0,9 \cdot 62,75 \text{ mbar}} = 36,7 \text{ (g/kg)} \end{aligned}$$

Zustand 3:

$$\ln(p_{D,s,3}/\text{mbar}) = 18,9141 - \frac{4010,823}{(t_3/^\circ\text{C} + 234,4623)} = 18,9141 - \frac{4010,823}{(22 + 234,4623)} = 3,2751$$

$$\Rightarrow p_{D,s,3} = e^{3,2751} \text{ mbar} = 26,44 \text{ mbar}$$

$$x_3 = 0,6222 \cdot \frac{p_{D,3}}{p_{ges} - p_{D,3}} = 0,6222 \cdot \frac{\varphi_3 \cdot p_{D,s,3}}{p_{ges} - \varphi_3 \cdot p_{D,s,3}}$$

$$= 0,6222 \cdot \frac{0,6 \cdot 26,44 \text{ mbar}}{1013,25 \text{ mbar} - 0,6 \cdot 26,44 \text{ mbar}} = 9,9 \text{ (g/kg)}$$

Teilaufgabe c) \Rightarrow 6 Punkte

Massenerhaltung trockene Luft:

$$\dot{m}_{tr.L,2} = \dot{m}_{tr.L,1} + \dot{m}_{tr.L,5} = \dot{m}_{tr.L,1} + 0,3 \cdot \dot{m}_{tr.L,4}; \text{ mit } \dot{m}_{tr.L,4} = \dot{m}_{tr.L,2}$$

$$\Rightarrow \dot{m}_{tr.L,2} = \dot{m}_{tr.L,1} + 0,3 \cdot \dot{m}_{tr.L,2}$$

$$\Rightarrow \dot{m}_{tr.L,2} = \frac{\dot{m}_{tr.L,1}}{0,7} = \frac{0,5 \text{ kg/s}}{0,7} = 0,7143 \text{ kg/s}$$

Massenerhaltung Wasser:

$$x_2 \cdot \dot{m}_{tr.L,2} = x_1 \cdot \dot{m}_{tr.L,1} + x_5 \cdot \dot{m}_{tr.L,5} = x_1 \cdot \dot{m}_{tr.L,1} + x_4 \cdot 0,3 \cdot \dot{m}_{tr.L,4};$$

$$\text{mit } \dot{m}_{tr.L,4} = \dot{m}_{tr.L,2} \text{ und } \frac{\dot{m}_{tr.L,1}}{\dot{m}_{tr.L,2}} = 0,7$$

$$\Rightarrow x_2 = 0,7 \cdot x_1 + 0,3 \cdot x_4 = 0,7 \cdot 36,7 \text{ (g/kg)} + 0,3 \cdot 16 \text{ (g/kg)} = 30,49 \text{ (g/kg)}$$

Enthalpiebilanz:

$$\dot{m}_{tr.L,2} \cdot h_{1+x,2} = \dot{m}_{tr.L,1} \cdot h_{1+x,1} + \dot{m}_{tr.L,5} \cdot h_{1+x,5};$$

$$\text{mit } h_{1+x,5} = h_{1+x,4}, \dot{m}_{tr.L,5} = 0,3 \cdot \dot{m}_{tr.L,4} \text{ und } \dot{m}_{tr.L,4} = \dot{m}_{tr.L,2}$$

$$\Rightarrow h_{1+x,2} = \frac{\dot{m}_{tr.L,1}}{\dot{m}_{tr.L,2}} \cdot h_{1+x,1} + 0,3 \cdot h_{1+x,4}$$

- Punkte 1, 2 und 3 liegen im ungesättigten Bereich (sh. Diagramm)

$$h_{1+x,1} = c_{p,L} \cdot t_1 + x_1 \cdot (\Delta h_v + c_{p,D} \cdot t_1) = (1,007 \cdot 37 + 0,0367 \cdot (2500 + 1,86 \cdot 37)) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 131,53 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{1+x,4} = c_{p,L} \cdot t_4 + x_4 \cdot (\Delta h_v + c_{p,D} \cdot t_4) = (1,007 \cdot 26 + 0,016 \cdot (2500 + 1,86 \cdot 26)) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 66,96 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{1+x,2} = \frac{\dot{m}_{tr.L,1}}{\dot{m}_{tr.L,2}} \cdot h_{1+x,1} + 0,3 \cdot h_{1+x,4} = \frac{0,5}{0,7143} \cdot 131,53 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0,3 \cdot 66,96 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 112,16 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{1+x,2} = c_{p,L} \cdot t_2 + x_2 \cdot (\Delta h_v + c_{p,D} \cdot t_2)$$

$$\Rightarrow t_2 = \frac{h_{1+x,2} - x_2 \cdot \Delta h_v}{c_{p,L} + x_2 \cdot c_{p,D}} = \frac{112,16 - 0,03049 \cdot 2500}{1,007 + 0,03049 \cdot 1,86} \text{ } ^\circ\text{C} = 33,78^\circ\text{C}$$

Teilaufgabe d) \Rightarrow 3 Punkte

$$\varphi = 1$$

$$\Rightarrow x_s = x_2 = 0,6222 \cdot \frac{p_{D,s}}{p_{ges} - p_{D,s}}$$

$$\Rightarrow p_{D,s} = \frac{x_2 \cdot p_{ges}}{x_2 + 0,6222} = \frac{0,03049 \cdot 1,01325 \text{ bar}}{0,03049 + 0,6222} = 0,0473 \text{ bar}$$

Dampfdruckkurve:

$$\ln(p_{D,s}/\text{mbar}) = 18,9141 - \frac{4010,823}{(t_s/^\circ\text{C} + 234,4623)}$$

$$\Rightarrow \frac{t_s}{^\circ\text{C}} = \frac{4010,823}{18,9141 - \ln(p_{D,s}/\text{mbar})} - 234,4623$$

$$\Rightarrow t_s = \left(\frac{4010,823}{18,9141 - \ln(47,3 \text{ mbar}/\text{mbar})} - 234,4623 \right) ^\circ\text{C} = 31,90^\circ\text{C}$$

Teilaufgabe e) \Rightarrow 7 Punkte

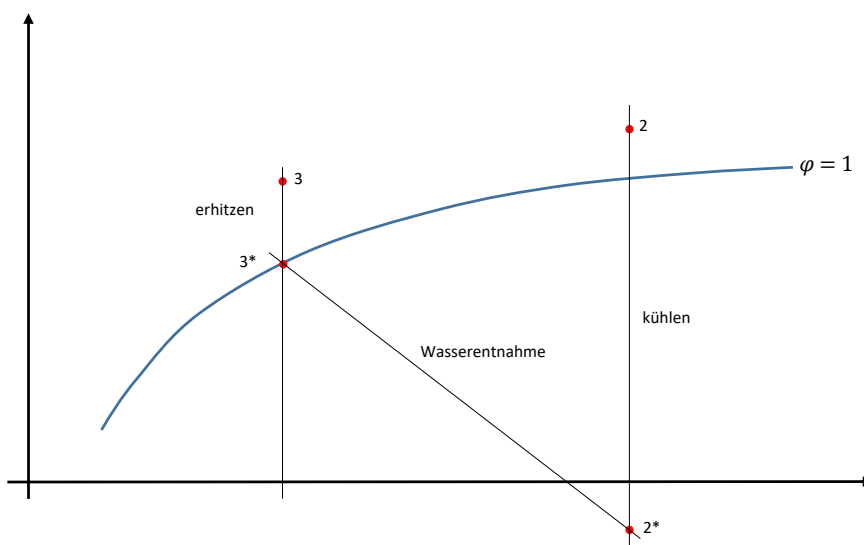
Wasserentnahme:

Massenbilanz Wasser:

$$\dot{m}_{tr.L,2} \cdot x_2 = \dot{m}_{tr.L,3} \cdot x_3 + \dot{m}_{H_2O} ; \text{ mit } \dot{m}_{tr.L,2} = \dot{m}_{tr.L,3}$$

$$\Rightarrow \dot{m}_{H_2O} = (x_2 - x_3) \cdot \dot{m}_{tr.L,2} = (30,49 \frac{\text{gW}}{\text{kgL}} - 9,9 \frac{\text{gW}}{\text{kgL}}) \cdot 0,7143 \frac{\text{kgL}}{\text{s}} = 14,71 \frac{\text{gW}}{\text{s}}$$

Kühl- und Heizleistung:



$$t_{2*} = t_{3*}$$

$$x_{2*} = x_2$$

$$x_{3*} = x_3 = 0,6222 \cdot \frac{p_{D,3*}}{p_{ges} - p_{D,3*}} = 0,6222 \cdot \frac{p_{D,s,3*}}{p_{ges} - p_{D,s,3*}} ; \text{ mit } \varphi_{3*} = 1$$

$$\Rightarrow p_{D,s,3*} = \frac{p_{ges}}{\frac{x_{3*}}{0,6222} + 1} = \frac{1,01325 \text{ bar}}{\frac{0,6222}{0,0099} + 1} = 0,01587 \text{ bar}$$

- Umstellen der Dampfdruckkurve:

$$\Rightarrow \frac{t_{3*}}{^{\circ}\text{C}} = \frac{4010,823}{18,9141 - \ln(p_{D,s,3*}/\text{mbar})} - 234,4623$$

$$\Rightarrow t_{3*} = \left(\frac{4010,823}{18,9141 - \ln(15,87 \text{ mbar}/\text{mbar})} - 234,4623 \right)^{\circ}\text{C} = 13,89^{\circ}\text{C}$$

$$h_{1+x,3*} = c_{p,L} \cdot t_{3*} + x_{3*} \cdot (\Delta h_v + c_{p,D} \cdot t_{3*}) = (1,007 \cdot 13,89 + 0,0099 \cdot (2500 + 1,86 \cdot 13,89)) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 38,99 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{1+x,3} = c_{p,L} \cdot t_3 + x_3 \cdot (\Delta h_v + c_{p,D} \cdot t_3) = (1,007 \cdot 22 + 0,0099 \cdot (2500 + 1,86 \cdot 22)) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 47,31 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

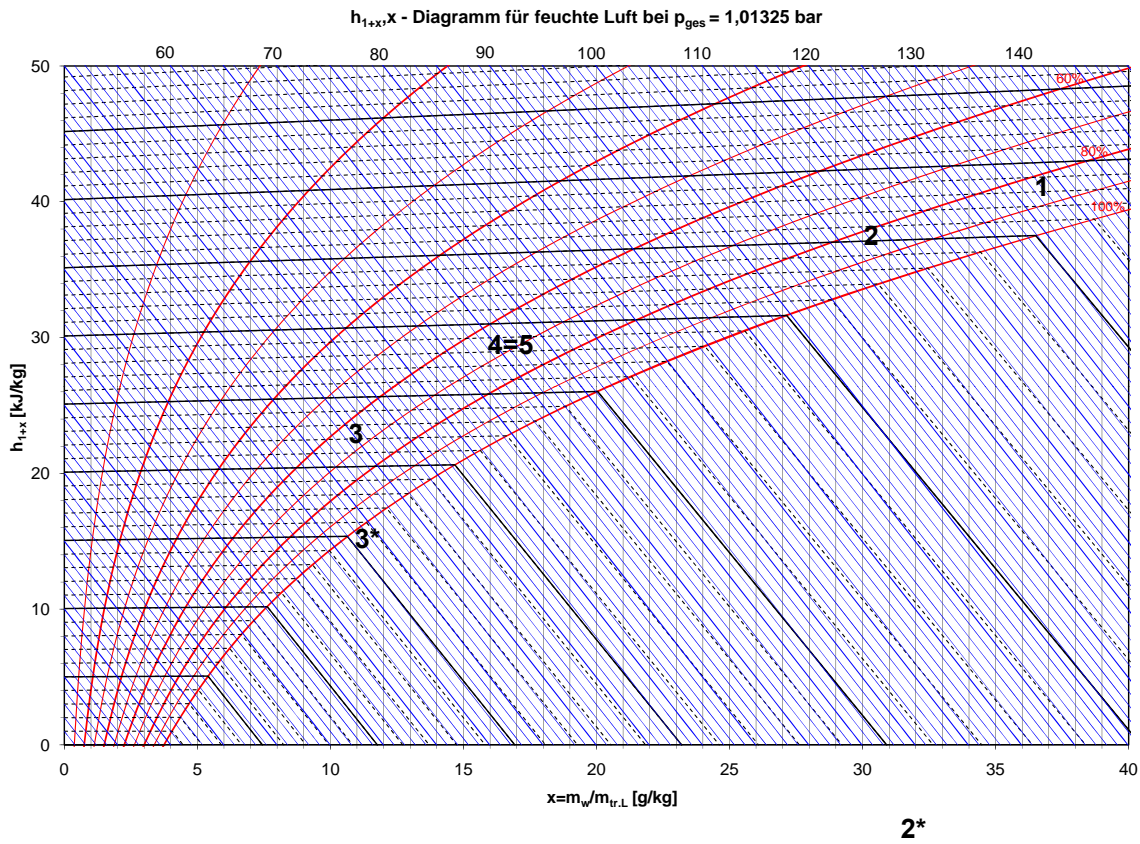
$$h_{1+x,2*} = c_{p,L} \cdot t_{2*} + x_3 \cdot (\Delta h_v + c_{p,D} \cdot t_{2*}) + (x_2 - x_3) \cdot c_{p,W} \cdot t_{2*}$$

$$= (1,007 \cdot 13,89 + 0,0099 \cdot (2500 + 1,86 \cdot 13,89)) + (0,03049 - 0,0099) \cdot 4,19 \cdot 13,89 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 40,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{Q}_{ab} = \dot{m}_{tr,L,2} \cdot (h_{1+x,2*} - h_{1+x,2}) = 0,7143 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (40,19 - 112,16) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -51,41 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{zu} = \dot{m}_{tr,L,2} \cdot (h_{1+x,3} - h_{1+x,3*}) = 0,7143 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (47,31 - 38,99) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 5,94 \text{ kW}$$

Teilaufgabe f) ⇒ 4 Punkte



Teilaufgabe g) ⇒ 1 Punkte

- innere Wärmeübertragung von Z2 nach Z3
- Mischungspunkt Z2 ändern, sodass etwas weniger gekühlt werden muss (Luftqualität beachten)
- Absorptionskältemaschine, da es sehr warm in Taiwan ist

Musterlösung Aufgabe 3: «Brennkammer»

Teilaufgabe a) ⇒ 4 Punkte

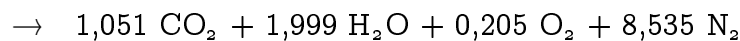
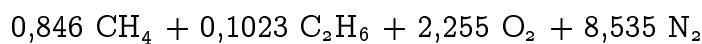
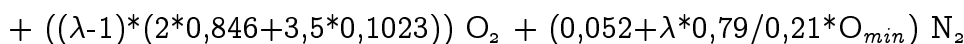
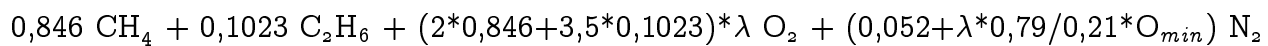
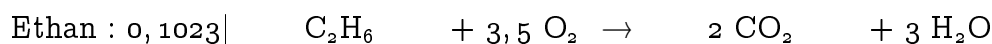
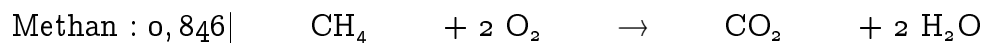
$$\psi_i = \frac{\frac{\xi_i}{M_i}}{\sum \frac{\xi_i}{M_i}}$$

$$\text{mit: } \sum \frac{\xi_i}{M_i} = \frac{\xi_{Methan}}{M_{Methan}} + \frac{\xi_{Ethan}}{M_{Ethan}} + \frac{\xi_{Stickstoff}}{M_{Stickstoff}}$$

$$\text{mit: } \sum \frac{\xi_i}{M_i} = \frac{0,75}{16,04} + \frac{0,17}{30,07} + \frac{0,08}{28,01} = 0,0468 + 0,0057 + 0,0029 = 0,0553$$

$$\psi_{Methan} = 84,60\% \quad ; \quad \psi_{Ethan} = 10,23\% \quad ; \quad \psi_{Stickstoff} = 5,17\%$$

Teilaufgabe b) ⇒ 5 Punkte



Teilaufgabe c) ⇒ 7 Punkte

$$\frac{\dot{Q}_{12}}{\dot{n}_{BS}} = \sum_{\text{Edukte}} y_i \cdot c_{p,i} \cdot (T_1 - T_\Theta) + \sum y_i \cdot \Delta^B h_\Theta + \sum_{\text{Produkte}} y_i \cdot c_{p,i} \cdot (T_2 - T_\Theta)$$

$$\frac{\dot{Q}_{12}}{\dot{n}_{BS}} = A + B + C$$

$$A = \sum_{\text{Edukte}} y_i \cdot c_{p,i} \cdot (T_1 - T_\Theta)$$

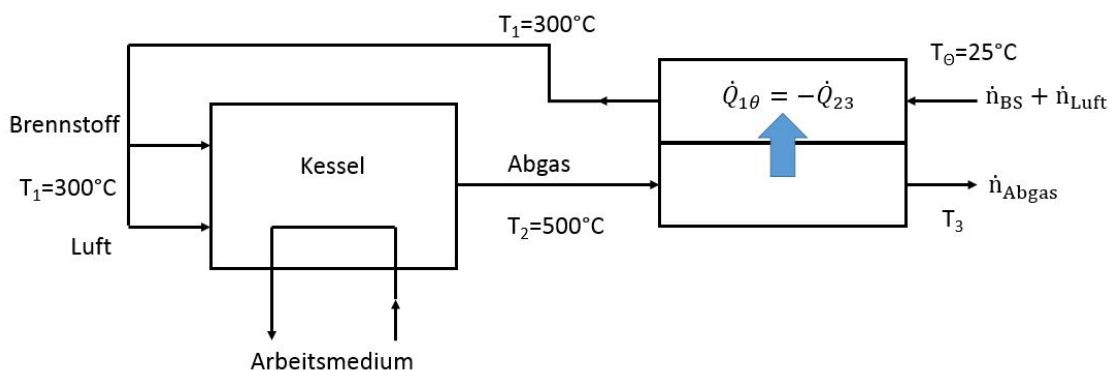
$$= -(0,846 \cdot 42,78 + 0,1023 \cdot 69,59 + 8,535 \cdot 29,43 + 2,255 \cdot 30,50) \cdot (300 - 25) = -99,9 \text{ kJ}$$

$$B = \sum y_i \cdot \Delta^B h_{\theta} = -(0,846 \cdot -74,52 + 0,1023 \cdot -83,82 + 8,535 \cdot 0 + 2,255 \cdot 0) \\ + 1,051 \cdot -393,6 + 1,999 \cdot -242,1 + 8,535 \cdot 0 + 0,255 \cdot 0 = -825,844 \text{ kJ}$$

$$C = \sum_{\text{Produkte}} y_i \cdot c_{p,i} \cdot (T_2 - T_{\theta}) \\ = (1,051 \cdot 45,10 + 1,999 \cdot 37,15 + 8,535 \cdot 29,91 + 0,205 \cdot 31,44) \cdot (500 - 25) = 182,122 \text{ kJ}$$

$$\dot{n}_{BS} = \frac{\dot{Q}_{12}}{A + B + C} = \frac{300 \text{ MW}}{-99,9 \text{ kJ} - 825,844 \text{ kJ} + 182,122 \text{ kJ}} = 403,431 \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

Teilaufgabe d) ⇒ 8 Punkte



Lösungsweg 1:

$$\dot{Q}_{\theta 1} = -\dot{Q}_{23}$$

$$\dot{Q}_{\theta 1} = \dot{n}_{BS} \cdot \sum y_{i,E} \cdot c_{p,i,E} (T_1 - T_{\theta})$$

$$= 403,431 \frac{\text{mol}}{\text{s}} \cdot (0,846 \cdot 42,78 + 0,1023 \cdot 69,59 + 8,535 \cdot 29,43 + 2,255 \cdot 30,50) \left[\frac{\text{J}}{\text{mol K}} \right] \cdot (300 - 25) \text{ K} \\ = 40,28 \text{ MW}$$

$$\dot{Q}_{23} = \dot{n}_{BS} \cdot \sum y_{i,P} \cdot c_{p,i,P} (T_3 - T_2) = -40,28 \text{ MW}$$

$$T_3 = \frac{\dot{Q}_{23}}{\dot{n}_{BS} \cdot \sum y_{i,P} \cdot c_{p,i,P}} + T_2$$

$$\Rightarrow T_3 = \frac{-40,28 \text{ MW}}{403,431 \frac{\text{mol}}{\text{s}} \cdot (1,051 \cdot 45,10 + 1,999 \cdot 36,67 + 8,535 \cdot 29,91 + 0,205 \cdot 31,44) \left[\frac{\text{J}}{\text{mol K}} \right]} + 500^{\circ}\text{C} \\ = 238,76^{\circ}\text{C}$$

Lösungsweg 2:

$$c_{p,Abgas} = \frac{\sum c_{p,i,P} \cdot y_{i,P}}{\sum y_{i,P}} = \frac{1,051 \cdot 45,10 + 1,999 \cdot 36,67 + 8,535 \cdot 29,91 + 0,205 \cdot 31,44}{11,79} = 32,52 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}$$

$$\dot{Q}_{\Theta_1} = \dot{n}_{BS} \cdot -A = 403,431 \frac{\text{mol}}{\text{s}} \cdot 99,9 \text{ kJ} = 40,28 \text{ MW}$$

$$\dot{n}_{Abgas} = \dot{n}_{BS} \cdot \sum y_{i,P} = 403,431 \frac{\text{mol}}{\text{s}} \cdot 11,79 = 4756,315 \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

$$\dot{Q}_{\Theta_1} = -\dot{Q}_{23}$$

$$T_3 = \frac{\dot{Q}_{23}}{\dot{n}_{Abgas} \cdot c_{p,Abgas}} + T_2$$

$$\Rightarrow T_3 = \frac{-40,28 \text{ MW}}{4756,315 \frac{\text{mol}}{\text{s}} \cdot 32,52 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}} + 500^\circ\text{C} = 238,76^\circ\text{C}$$

Teilaufgabe e) \Rightarrow 2 Punkte

Stoffmengenstrom \Rightarrow nein; $y_E = 11,739 \neq y_P = 11,79$

Volumenstrom \Rightarrow nein; in erster Näherung: ideale Gasgesetz $p v = RT \rightarrow v_2 = v_1 \cdot \frac{T_2}{T_1}$

Massenstrom \Rightarrow ja; Massenerhaltung