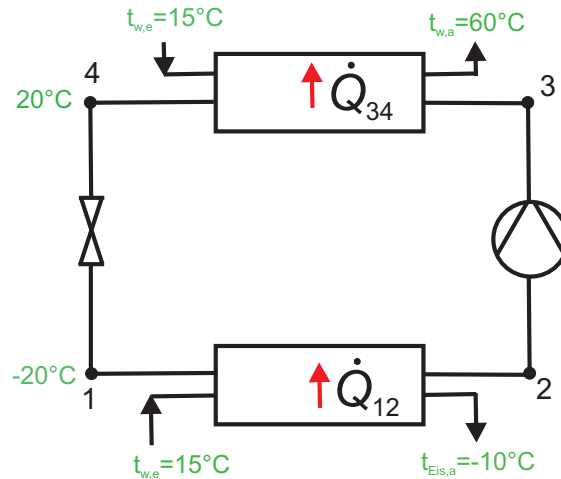
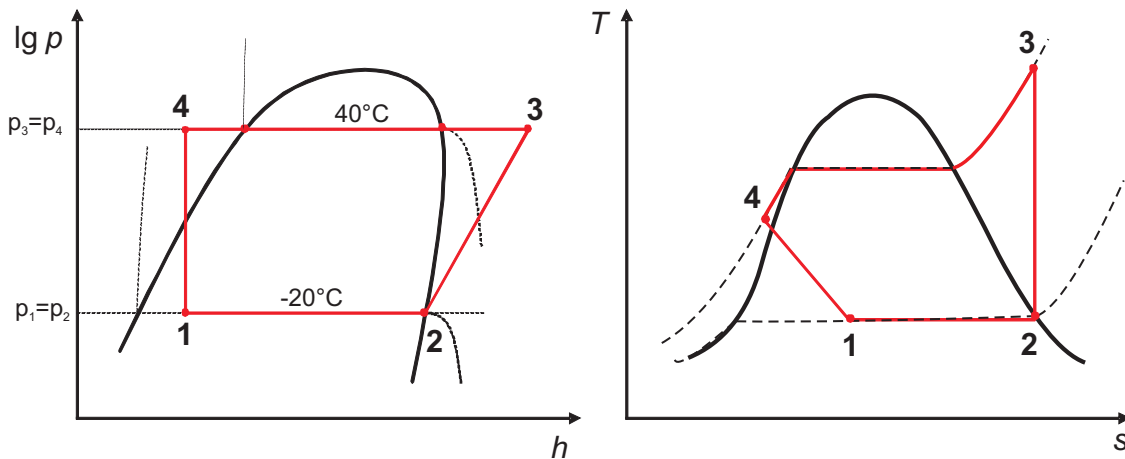


# Musterlösung Aufgabe 1: «Eismaschine»

## I. TEILAUFGABE A) ⇒ 2 PUNKTE



## II. TEILAUFGABE B) ⇒ 4 PUNKTE



## III. TEILAUFGABE C) ⇒ 1 PUNKTE

$$\dot{Q}_{zu, KM} = -\dot{Q}_{ab, Eis} = -\dot{m}_{Eis} \cdot \Delta h_{Eis}$$

$$\Delta h_{Eis} = c_{p,w} \cdot (t_s - t_{w,e}) + \Delta h_{Schmelz.} + c_{p,Eis} \cdot (t_{Eis} - t_s)$$

$$\Delta h_{Eis} = 4.18 \left( \frac{kJ}{kg \cdot K} \right) \cdot (0 - 15)^\circ C + (-333 \left( \frac{kJ}{kg} \right)) + 2.05 \left( \frac{kJ}{kg \cdot K} \right) \cdot (-10 - 0)^\circ C = -416.2 \left( \frac{kJ}{kg} \right)$$

$$\dot{Q}_{ab, Eis} = \frac{300(kg)}{3600(s)} \cdot (-416.2 \left( \frac{kJ}{kg} \right)) = -34.683 (kW)$$

$$h_1 = h_4 = h(\text{Ueberhitzter Zustand bei } 20^\circ\text{C}) = 437.26 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$$

$$\dot{m}_{NH_3} = \frac{\dot{Q}_{zu,KM}}{\Delta h_{12}} = \frac{\dot{Q}_{zu,KM}}{h_2 - h_1} = \frac{34.683 \text{ (kW)}}{(1580.80 - 437.26)\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)} = 0.03 \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)$$

**IV. TEILAUFGABE D) ⇒ 3 PUNKTE**

$$P_{23} = \dot{m}_{NH_3} \cdot \Delta h_{23}$$

$$h_2 = h'(\text{bei } -20^\circ\text{C}) = 1580.8 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$$

$$2 \rightarrow 3 \text{ isentrop} \Rightarrow s_3 = s_2 = 6.3757 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right)$$

Interpolation:

$$h_3 = 1886 + \frac{1911.4 - 1886.0}{6.4033 - 6.3409} \cdot (6.3757 - 6.3409) = 1900.17 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$$

$$P_{23} = 0.03 \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) \cdot (1900.17 - 1580.8) \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) = 9.686 \text{ (kW)}$$

**V. TEILAUFGABE E) ⇒ 2 PUNKTE**

$$\dot{Q}_{zu,WW} = -\dot{Q}_{ab,KM/WP} = -0.03 \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) \cdot (437.26 - 1900.17) \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) = 44.37 \text{ (kW)}$$

$$\dot{Q}_{zu,WW} = \dot{m}_{WW} \cdot \Delta h_{WW} = \dot{m}_{WW} \cdot c_{p,WW} \cdot (t_{w,a} - t_{w,e})$$

$$\dot{m}_{WW} = \frac{\dot{Q}_{zu,WW}}{c_{p,WW} \cdot (t_{w,a} - t_{w,e})} = \frac{44.37 \text{ (kW)}}{4.18 \cdot (60 - 15)} = 0.236 \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)$$

**VI. TEILAUFGABE F) ⇒ 2 PUNKTE**

$$\varepsilon_{KM,WP} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\dot{Q}_{zu} + |\dot{Q}_{ab}|}{P_e} = \frac{34.683 + 44.37}{9.686} = 8.162$$

**VII. TEILAUFGABE G) ⇒ 3 PUNKTE**

$$\eta_{ex} = \frac{\Delta \dot{E}_{\text{Nutzen}}}{\Delta \dot{E}_{\text{Aufwand}}}$$

$$\Delta \dot{E}_{WW} = \dot{m}_{WW} \cdot (\Delta h - T_a \cdot \Delta s) = \dot{m}_{WW} \cdot c_p \left[ t_{w,a} - t_{w,e} - T_a \cdot \ln\left(\frac{t_{w,a}}{t_{w,e}}\right) \right]$$

$$\Delta \dot{E}_{WW} = 0.236 \left( \frac{kJ}{kg} \right) \cdot 4.18 \left( \frac{kJ}{kg \cdot K} \right) \left[ 60 - 15 - 288.15 \cdot \ln \left( \frac{60 + 273.15}{15 + 273.15} \right) \right] = 3.142 \text{ (kW)}$$

$$\Delta \dot{E}_{Eis} = \dot{m}_{Eis} \cdot (\Delta h - T_a \cdot \Delta s)$$

$$\begin{aligned} \Delta s_{Eis} &= \Delta s_{15^\circ C \rightarrow 0^\circ C} + \Delta s_{Gefrier.} + \Delta s_{0^\circ C \rightarrow -10^\circ C} \\ &= 4.18 \left( \frac{kJ}{kg \cdot K} \right) \cdot \ln \left( \frac{271.15 K}{288.15 K} \right) - \frac{333 \left( \frac{kJ}{kg} \right)}{273.15 K} + 2.05 \left( \frac{kJ}{kg \cdot K} \right) \cdot \ln \left( \frac{263.15 K}{273.15 K} \right) = -1.519 \left( \frac{kJ}{kg \cdot K} \right) \end{aligned}$$

$$\Delta \dot{E}_{Eis} = \frac{300}{3600} \left( \frac{kJ}{kg} \right) \cdot (-416.2 - 288.15 \cdot (-1.519)) \left( \frac{kJ}{kg} \right) = 1.792 \text{ (kW)}$$

$$\eta_{ex} = \frac{\Delta \dot{E}_{Nutzen}}{\Delta \dot{E}_{Aufwand}} = \frac{3.143 + 1.792}{9.686} = 0.5095$$

### VIII. TEILAUFGABE H) ⇒ 2 PUNKTE

neuer Enthalpiewert vor Drosselung:

$$h_{4*} = h_{1*} = 509.28 \left( \frac{kJ}{kg} \right)$$

Massenstrom Ammoniak bleibt gleich, da Wärmeabgabe verringert ⇒

$$\dot{Q}_{zu*,WW} = -0.03 \left( \frac{kg}{s} \right) \cdot (509.29 - 1900.17) \left( \frac{kJ}{kg} \right) = 42.186 \text{ (kW)}$$

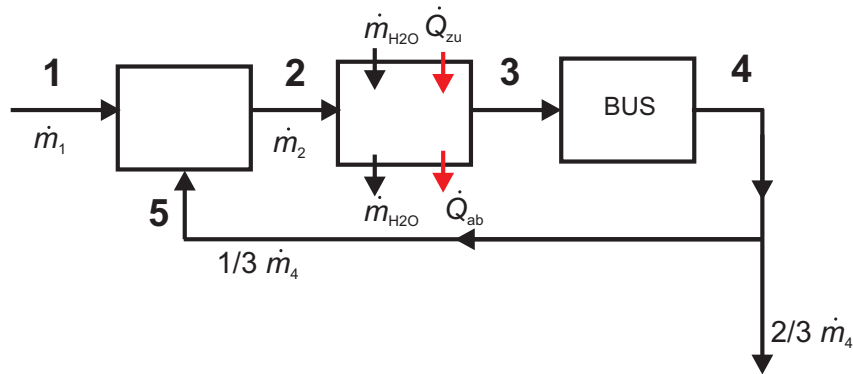
$$\dot{Q}_{zu*,KM} = \dot{Q}_{zu*,WW} - P_{23} = 42.186 \text{ (kW)} - 9.686 \text{ (kW)} = 32.5 \text{ (kW)}$$

$$\Rightarrow \dot{m}_{Eis} = \frac{-\dot{Q}_{zu*,KM}}{\Delta h_{Eis}} = \frac{-32.5 \text{ (kW)}}{-416.2 \left( \frac{kJ}{kg} \right)} = 0.0781 \left( \frac{kg}{s} \right)$$

$$\frac{\dot{m}_{Eis*}}{\dot{m}_{Eis}} = \frac{0.0781}{0.0833} = 0.938 = 93.8\% \quad \text{d.h. die erzeugte Eismenge vermindert sich um 6.2\%}$$

# Musterlösung Aufgabe 2: «Klimaanlage»

## I. TEILAUFGABE A) ⇒ 2 PUNKTE



## II. TEILAUFGABE B) ⇒ 1 PUNKTE

$$t_3 = 24^\circ\text{C}, \varphi_3 = 0.6 \Rightarrow x_3 = 11.2 \left(\frac{\text{g}}{\text{kg}}\right) \text{ (abgelesen)}$$

## III. TEILAUFGABE C) ⇒ 3 PUNKTE

Zustand 2: Mischung

$$\dot{m}_{L,2} = \dot{m}_{L,1} + \dot{m}_{L,5} = \dot{m}_{L,1} + \frac{1}{3}\dot{m}_{L,4} = (\dot{m}_{L,4} = \dot{m}_{L,2}) = \dot{m}_{L,1} + \frac{1}{3}\dot{m}_{L,2}$$

$$\Rightarrow \dot{m}_{L,2} = \frac{3}{2}\dot{m}_{L,1} = \frac{3}{2} \cdot 0.2 \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) = 0.3 \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)$$

Punkt 2 liegt auf der Mischungsgeraden zwischen 1 und 4 ⇒

$$x_1 = 30 \left(\frac{\text{g}}{\text{kg}}\right), x_4 = x_5 = 15 \left(\frac{\text{g}}{\text{kg}}\right) \Rightarrow x_2 = \frac{2}{3}x_1 + \frac{1}{3}x_4 = \frac{2}{3} \cdot 30 + \frac{1}{3} \cdot 15 = 25 \left(\frac{\text{g}}{\text{kg}}\right)$$

$$\Delta \dot{m}_{w,23} = \dot{m}_{L,2} \cdot (x_3 - x_2) = 0.3 \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) \cdot (11.2 - 25) \left(\frac{\text{g}}{\text{kg}}\right) = -4.14 \left(\frac{\text{g}}{\text{s}}\right)$$

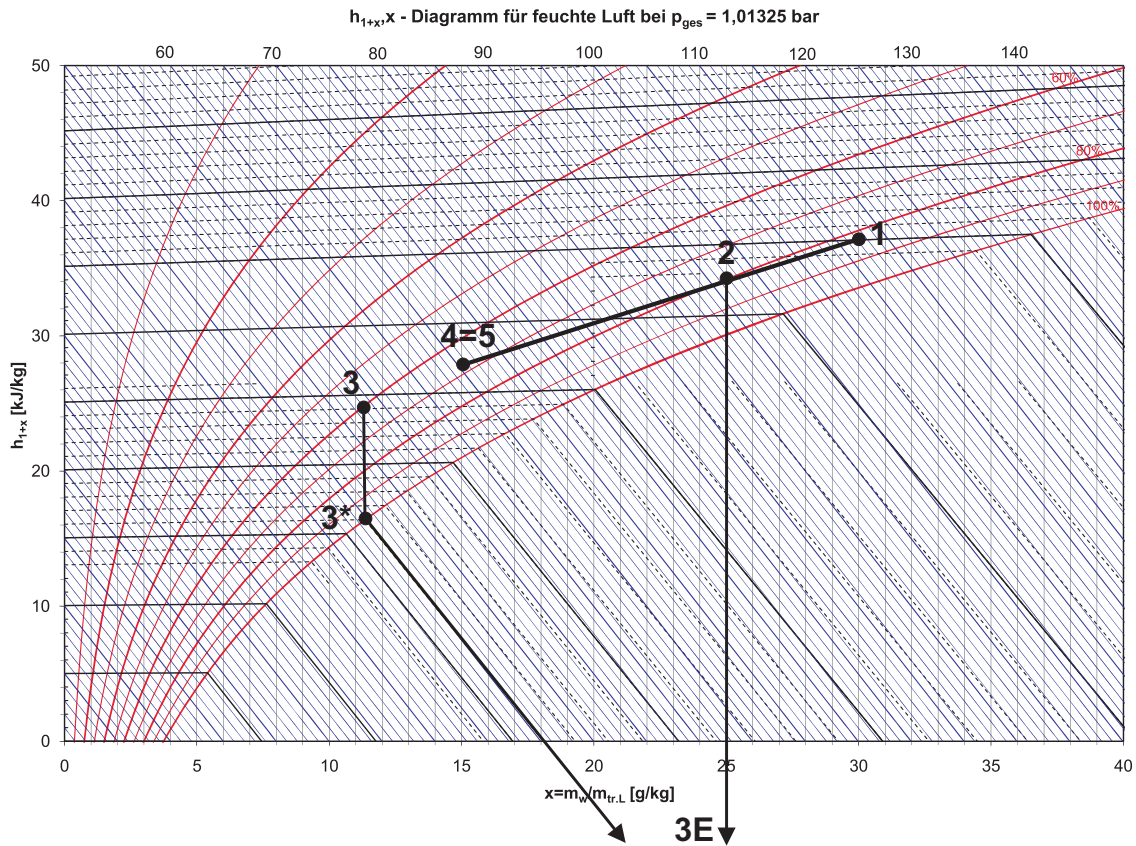
$$\text{Entfeuchtung auf } t_s(x_3) = 15.9^\circ\text{C} \Rightarrow h_{1+x,3E} = 45 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) \text{ (abgelesen)}$$

$$\text{Aus Diagramm: } h_{1+x,3*} = 44.5 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) ; h_{1+x,2} = 97 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) ; h_{1+x,3} = 52.5 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$$

$$\dot{Q}_{ab} = \dot{m}_{L,2} \cdot (h_{1+x,3E} - h_{1+x,2}) = 0.3 \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) \cdot (45 - 97) \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) = -15.6 \text{ (kW)}$$

$$\dot{Q}_{zu} = \dot{m}_{L,2} \cdot (h_{1+x,3} - h_{1+x,3*}) = 0.3 \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) \cdot (52.5 - 44.5) \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) = +2.4 \text{ (kW)}$$

IV. TEILAUFGABE D) ⇒ 3 PUNKTE



V. TEILAUFGABE E) ⇒ 2 PUNKTE

$$\Delta \dot{m}_D = N \cdot \Delta \dot{m}_{P,D} = \dot{m}_{L,2} \cdot \Delta x_{34} = 0.3 \left( \frac{kg}{s} \right) \cdot (15 - 11.2) \left( \frac{g}{kg} \right) = 1.14 \left( \frac{g}{s} \right)$$

$$N = \frac{\Delta \dot{m}_D}{\Delta \dot{m}_{P,D}} = \frac{1.14 \left( \frac{g}{s} \right)}{1.5/60 \left( \frac{g}{s} \right)} = 46 \text{ Personen}$$

VI. TEILAUFGABE F) ⇒ 5 PUNKTE

$$x_3 = \frac{p_{D,3}}{p_{ges.} - p_{D,3}} \cdot \frac{M_W}{M_L}$$

$$p_{D,3} = p_{D,s,3} \cdot \varphi_3 = \exp\left(18.9141 - \frac{4010.823}{(24^\circ C + 234.4623)}\right) \cdot 0.6 = 17.9081 \text{ (mbar)}$$

$$\Rightarrow x_3 = \frac{17.9081}{1013.25 - 17.9081} \cdot \frac{18.015}{28.96} = 11.1921 \left( \frac{g}{kg} \right)$$

$$\Rightarrow \Delta \dot{m}_{w,23} = \dot{m}_{L,2} \cdot (x_3 - x_2) = 0.3 \left( \frac{kg}{s} \right) \cdot (11.1921 - 25) \left( \frac{g}{kg} \right) = -4.1424 \left( \frac{g}{s} \right)$$

$$\dot{Q}_{ab} = \dot{m}_{L,2} \cdot (h_{1+x,3E} - h_{1+x,2})$$

$$\dot{Q}_{zu} = \dot{m}_{L,2} \cdot (h_{1+x,3} - h_{1+x,3*})$$

$$h_{1+x,3*} = c_{p,L} \cdot t_{3*} + x_{3*} \cdot (\Delta h_v + c_{p,D} \cdot t_{3*})$$

$$x_{3*} = 11.1921 \left(\frac{g}{kg}\right), p_{D,s,3*} = 17.908 \text{ mbar} \Rightarrow t_{3*} = 15.763^\circ C$$

$$h_{1+x,3*} = 1.007 \cdot 15.763 + 0.0111921 \cdot (2500 + 1.86 \cdot 15.763) = 44,1817 \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

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

$$h_{1+x,3} = 1.007 \cdot 24 + 0.0111921 \cdot (2500 + 1.86 \cdot 24) = 52,6479 \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

$$h_{1+x,3E} = c_{p,L} \cdot t_{3E} + x_{S,3E} \cdot (\Delta h_v + c_{p,D} \cdot t_{3E}) + (x_{3E} - x_{S,3E}) \cdot (c_{p,W} \cdot t_{3E})$$

$$t_{3E} = 15.763^\circ C, x_{3E} = 25 \left(\frac{g}{kg}\right), x_{S,3E} = 11.1921 \left(\frac{g}{kg}\right)$$

$$\begin{aligned} h_{1+x,3E} &= 1.007 \cdot 15,763 + 0.0111921 \cdot (2500 + 1.86 \cdot 15,763) + (0,025 - 0,0111921) \cdot (4,19 \cdot 15,763) \\ &= 45,0937 \left(\frac{kJ}{kg}\right) \end{aligned}$$

$$h_{1+x,2} = \frac{1}{3} h_{1+x,4} + \frac{2}{3} h_{1+x,1} = 96.6128 \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

$$h_{1+x,4} = 1.007 \cdot 27 + 0.015 \cdot (2500 + 1.86 \cdot 27) = 65.4423 \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

$$h_{1+x,1} = 1.007 \cdot 35 + 0.030 \cdot (2500 + 1.86 \cdot 35) = 112.198 \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

$$\dot{Q}_{ab} = 0.3 \left(\frac{kg}{s}\right) \cdot (45,0937 - 96.6128) \left(\frac{kJ}{kg}\right) = -15.7293 \text{ (kW)}$$

$$\dot{Q}_{zu} = 0.3 \left(\frac{kg}{s}\right) \cdot (52,6479 - 44,1817) \left(\frac{kJ}{kg}\right) = 2,5399 \text{ (kW)}$$

# Musterlösung Aufgabe 3: «Verbrennung»

## I. TEILAUFGABE A) ⇒ 2 PUNKTE

$$\dot{Q} = -1200 \text{ MW} = -\dot{m}_{R.oel} \cdot [\Delta^v h_u - c_{p,Abgas} \cdot (T_{Aus} - T_\theta) + \sum_E (c_{p,i} \cdot \nu_i) \cdot (T_{Ein} - T_\theta)]$$

$$\dot{m}_{R.oel} = \frac{-1200 \text{ MW}}{[-37600(\frac{kJ}{kg}) + 1.2(\frac{kJ}{kg \cdot K}) \cdot (80 - 25) + 0]} = 31.971 \left(\frac{kg}{s}\right)$$

## II. TEILAUFGABE B) ⇒ 6 PUNKTE

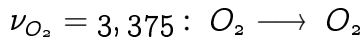
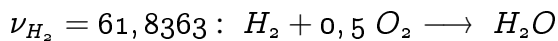
$$\nu_i = \frac{\dot{n}_i}{\dot{m}_{Oel}} \quad | \quad \dot{n}_i = \frac{\dot{m}_i}{M_i} \quad \Rightarrow \quad \nu_i = \frac{\frac{\dot{m}_i}{M_i}}{\dot{m}_{Oel}} \quad | \quad \dot{m}_i = \xi_i \cdot \dot{m}_{Oel} \quad \Rightarrow \quad \nu_i = \frac{\xi_i \cdot \dot{m}_{Oel}}{M_i} = \frac{\xi_i}{M_i}$$

$$\Rightarrow \nu_C = \frac{\xi_C}{M_C} = \frac{0,7674 \frac{kg_C}{kg_{Oel}}}{12,01 \frac{g_C}{mol_C}} = 63,8968 \frac{mol_C}{kg_{Oel}}$$

$$\Rightarrow \nu_H = 123,6725 \frac{mol_H}{kg_{Oel}} \quad \Rightarrow \nu_{H_2} = 0,5 \cdot \nu_H = 61,8363 \frac{mol_{H_2}}{kg_{Oel}}$$

$$\Rightarrow \nu_O = 6,75 \frac{mol_O}{kg_{Oel}} \quad \Rightarrow \nu_{O_2} = 0,5 \cdot \nu_O = 3,375 \frac{mol_{O_2}}{kg_{Oel}}$$

Vollständige Verbrennung der einzelnen Komponenten des Rapsöls:



Es verbrennen  $C$  und  $H_2$ . Hierfür wird  $O_2$  benötigt:

$$\Rightarrow O_{2,V} = (63,8968 + 61,8363 \cdot 0,5) O_2 = 94,815 O_2$$

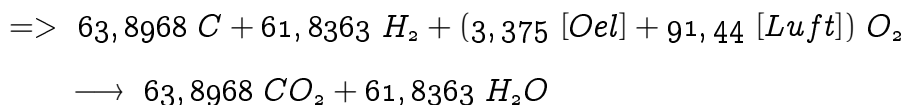
In dem Rapsöl befindet sich bereits  $O_2$ :

$$\Rightarrow O_{2,Oel} = 3,375 O_2$$

Das fehlende  $O_2$  wird durch  $O_{2,L}$  aus der Umgebung geliefert:

$$\Rightarrow O_{2,V} = O_{2,Oel} + O_{2,L}$$

$$\Leftrightarrow O_{2,L} = O_{2,V} - O_{2,Oel} = 91,44 O_2$$



$\lambda = 1, 1 :$

$$\Rightarrow 63,8968 C + 61,8363 H_2 + (3,375 [Oel] + 1,1 \cdot 91,44 [Luft]) O_2$$

$$\longrightarrow 63,8968 CO_2 + 61,8363 H_2O + ((1,1 - 1) \cdot 91,44) O_2$$

$$N_{2,L} = 1,1 \cdot 91,44 \frac{mol_{O_2}}{kg_{Oel}} \cdot \frac{0,79 \frac{mol_{N_2}}{mol_L}}{0,21 \frac{mol_{O_2}}{mol_L}} = 378,3874 \frac{mol_{N_2}}{kg_{Oel}}$$

$$\Rightarrow 63,8968 C + 61,8363 H_2 + (3,375[Oel] + 100,584[Luft]) O_2 + 378,3874 N_2$$

$$\longrightarrow 63,8968 CO_2 + 61,8363 H_2O + 9,144 O_2 + 378,3874 N_2$$

$$\sum_{Abgas} \nu = 63,8968 + 61,8363 + 9,144 + 378,3874 = 513,2645 \left( \frac{mol \text{ Abgas}}{kg \text{ Oel}} \right)$$

$$\psi_{CO_2} = 0.1245, \psi_{H_2O} = 0.1205, \psi_{O_2} = 0.0178, \psi_{N_2} = 0.7372$$

### III. TEILAUFGABE C) $\Rightarrow$ 2 PUNKTE

$$\dot{m}_{Luft} = \dot{m}_{Oel} \cdot (\nu_{O_2,Luft} \cdot M_{O_2} + \nu_{N_2,Luft} \cdot M_{N_2}) = \dot{m}_{Oel} \cdot \frac{\nu_{O_2,Luft}}{\psi_{O_2}} \cdot M_{Luft}$$

$$\dot{m}_{Luft} = 31.971 \cdot \frac{100.584}{0.21} \cdot 28.96 \cdot 10^{-3} = 443.4701 \left( \frac{kg \text{ Luft}}{s} \right)$$

### IV. TEILAUFGABE D) $\Rightarrow$ 3 PUNKTE

$$\psi_s(80^\circ C) = \frac{p_{D,s}}{p_{ges.}} = \frac{0.57867 \text{ bar}}{1 \text{ bar}} = 0.57867 > \psi_{H_2O} = 0.1205$$

Sättigung wird nicht erreicht  $\Rightarrow$  keine Kondensation

### V. TEILAUFGABE E) $\Rightarrow$ 2 PUNKTE

gesucht:  $\frac{V_{AG,CO_2}}{V_{AG}}$

Annahme: ideales Gas

$$p \cdot v = R \cdot T \quad | \quad v = \frac{V}{m} \quad \Rightarrow \quad p \cdot \frac{V}{m} = R \cdot T \quad | \quad R = \frac{R_m}{M} \quad | \quad m = M \cdot n$$

$$\Leftrightarrow p \cdot \frac{V}{M \cdot n} = \frac{R_m}{M} \cdot T \quad \Leftrightarrow V = \frac{R_m \cdot T \cdot n}{p}$$

$$\Rightarrow \frac{V_{AG,CO_2}}{V_{AG}} = \frac{\frac{R_m \cdot T \cdot n_{AG,CO_2}}{p}}{\frac{R_m \cdot T \cdot n_{AG}}{p}} = \frac{n_{AG,CO_2}}{n_{AG}} = \psi_{AG,CO_2} = 0,1245 \frac{m^3_{CO_2}}{m^3_{AG}}$$