

Musterlösung Aufgabe 1: «Flugzeugklimaanlage»

Teilaufgabe a) ⇒ 4 Punkte

Gesucht: T_3

$$(I.) \dot{Q}_{34} = \dot{m}_L \cdot c_{p,l} \cdot (T_4 - T_3)$$

$$= 90 \text{ W} \cdot 220 + 4 \text{ kW} + 4,7 \text{ kW} + 1,5 \text{ kW} = 30 \text{ kW}$$

$$\dot{V}_{L,1} = 4,7 \frac{\text{l}}{\text{s}} \cdot 220 = 4,7 \frac{\text{m}^3}{1000 \text{ s}} \cdot 220 = 1,034 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_{L,1} = \dot{V}_{L,1} \cdot \rho_L = 1,2449 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_L = \dot{m}_5 + \dot{m}_1 = 1,5 \cdot \dot{m}_1 = 1,867 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\text{aus (I.)} \Rightarrow T_3 = \frac{-\dot{Q}_{3,4}}{\dot{m}_L \cdot c_{p,L}} + T_4 = \frac{-30 \text{ kW}}{1,867 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}} + 28^\circ\text{C} = 12,011^\circ\text{C}$$

Teilaufgabe b) ⇒ 6 Punkte

Kondensator: $T_{Umg} + \Delta T = 45^\circ\text{C}$

Verdampfer: $T_3 - \Delta T = 2,011^\circ\text{C}$

Aus Diagramm: $h_1 = 400 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$, $h_{2s} = 425 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$$\eta_{s,v} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \Rightarrow h_2 = \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_{s,v}} + h_1 = \frac{425 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 400 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{0,8} + 400 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 431,25 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

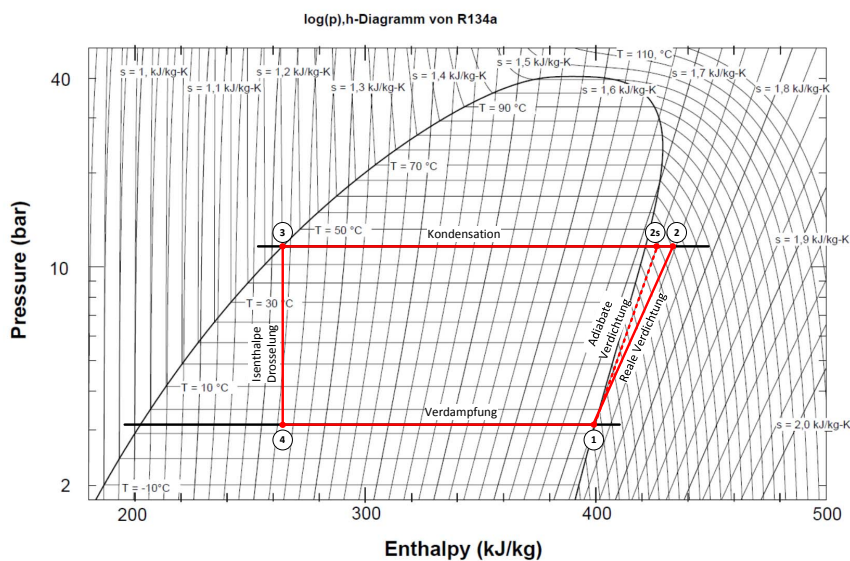


Abbildung 1: R134a log(p),h-Diagramm Lösung zu Aufgabenteil b)

Teilaufgabe c) ⇒ 5 Punktegesucht: \dot{m}_{KM} , P_{Verd}

$$\dot{Q}_{41(KM)} = -\dot{Q}_{32(L)} = -\dot{m}_L \cdot c_{p,L} (T_3 - T_2) = 12,381 \text{ kW}$$

$$T_2 = \frac{\dot{m}_1 \cdot T_1 \cdot c_{p,L} + 0,5 \cdot \dot{m}_1 \cdot T_5 \cdot c_{p,L}}{1,5 \cdot \dot{m}_1 \cdot c_{p,L}} = \frac{T_1 + 0,5 \cdot T_5}{1,5}$$

$$= \frac{14^\circ\text{C} + 0,5 \cdot 28^\circ\text{C}}{1,5} = 18,6667^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q}_{41} = \dot{m}_{KM} \cdot (h_1 - h_4) \Rightarrow \dot{m}_{KM} = \frac{\dot{Q}_{KM}}{h_1 - h_4} = \frac{12,381 \text{ kW}}{400 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 264 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0,091 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$P_{12} = \dot{m}_{KM} \cdot (h_2 - h_1) = 0,091 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (431,25 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 400 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}) = 2,845 \text{ kW}$$

Teilaufgabe d) ⇒ 3 Punktegesucht: $\Delta \dot{E}_{V(12)}$ Verdichter, $\Delta \dot{E}_{V(23)}$ Kondensator**Verdichter:**aus Diagramm: $s_1 = 1,725 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$, $s_2 = 1,735 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$

$$\Delta \dot{E}_{V(12)} = \dot{m}_{KM} \cdot T_{Umg} \cdot \Delta s_{12}$$

$$= 0,091 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (35 + 273,15 \text{ K}) \cdot (1,735 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} - 1,725 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}) = 0,280 \text{ kW}$$

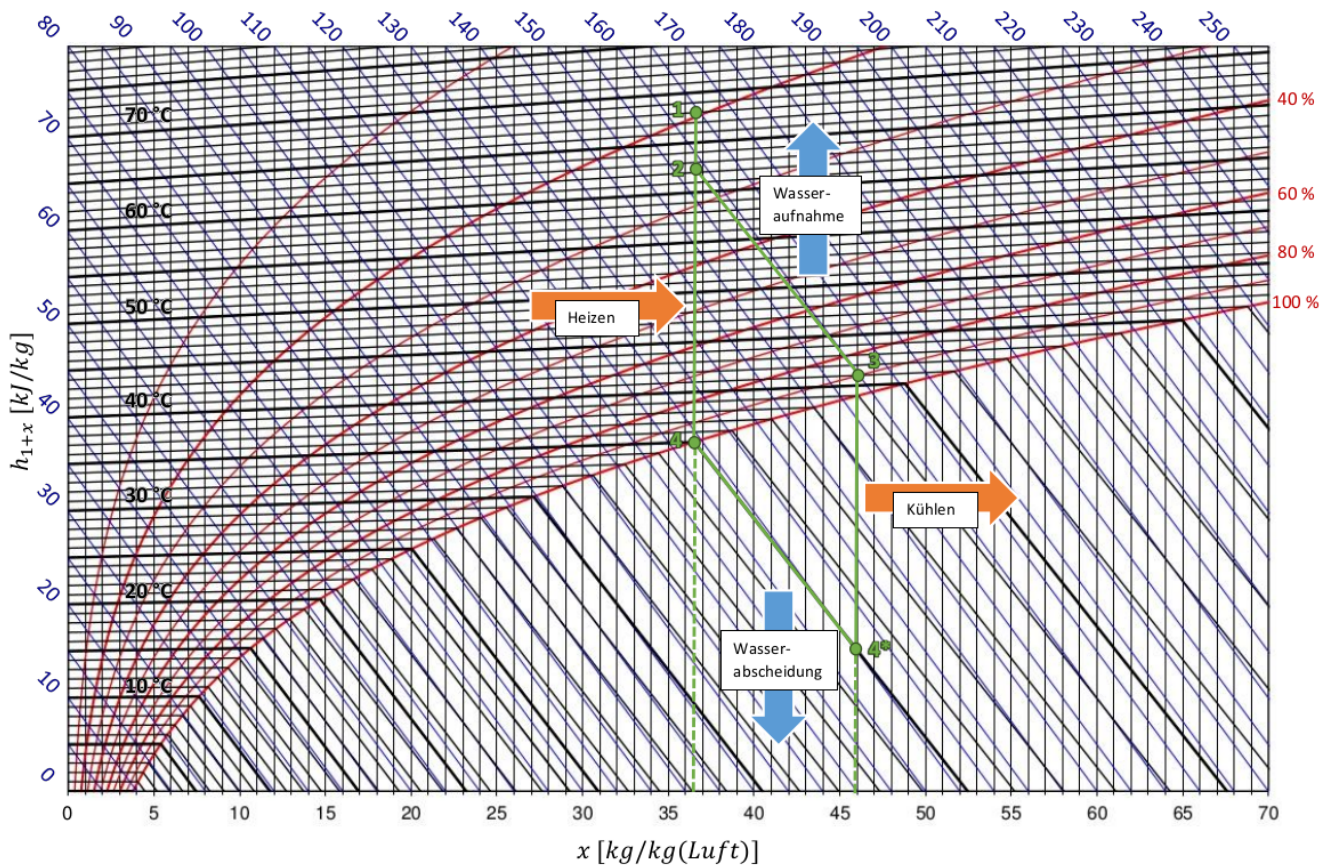
Kondensator:aus Diagramm: $h_3 = 264 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$, $s_3 = 1,215 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$

$$\Delta \dot{E}_{V(23)} = |\dot{m}_{KM} \cdot (\Delta h_{23} - T_{Umg} \cdot \Delta s_{23})|$$

$$= |0,091 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot ((264 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 431,25 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}) - 308,15 \text{ K} \cdot (1,215 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} - 1,735 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}))| = 0,638 \text{ kW}$$

Musterlösung Aufgabe 2: «Wärmepumpen-Wäschetrockner»

I. TEILAUFGABE A) ⇒ 3 PUNKTE



II. TEILAUFGABE B) ⇒ 7 PUNKT

$$m_{tr.Wäsche} = \frac{m_{f.Wäsche}}{1 + x_W} = \frac{m_{f.Wäsche,1}}{1 + x_{W,1}} = \frac{8.5 \text{ kg}}{1 + 0.7} = 5 \text{ kg}$$

$$m_{Wasser,1} = x_{W,1} \cdot m_{tr.Wäsche} = 0.70 \cdot 5 \text{ kg} = 3.5 \text{ kg}$$

$$m_{Wasser,2} = x_{W,2} \cdot m_{tr.Wäsche} = 0.08 \cdot 5 \text{ kg} = 0.4 \text{ kg}$$

$$\Delta m_{Wasser,12} = m_{Wasser,2} - m_{Wasser,1} = 3.5 \text{ kg} - 0.4 \text{ kg} = 3.1 \text{ kg}$$

Während des Trocknungsprozesses werden der Wäsche 3,1 kg Wasser entzogen.

$$\dot{m}_{tr.Luft} = ?$$

$$x_s(t) = 0.622 \frac{p_{s,H_2O}(t)}{p_{ges} - p_{s,H_2O}(t)}, \quad \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) = 12.40682 - \frac{4222.037 \text{ K}}{T - 31.95 \text{ K}}$$

$$x_4 = x_s(t = 35^\circ C)$$

$$p_{s,H_2O}(35^\circ C) = \exp\left(12.40682 - \frac{4222.037}{308.15 - 31.95 K}\right) 1000 \text{ mbar} = 56.172 \text{ mbar}$$

$$x_4 = 0.622 \cdot \frac{56.172}{1013.25 - 56.172} = 0.036506 \frac{\text{kg(Wasser)}}{\text{kg(Luft)}} = 36.506 \frac{\text{g(Wasser)}}{\text{kg(Luft)}}$$

$$x(t) = 0.622 \frac{\phi \cdot p_{s,H_2O}(t)}{p_{ges} - \phi \cdot p_{s,H_2O}(t)}$$

$$x_3 = x_s(t = 41^\circ C, \phi = 0.9)$$

$$p_{s,H_2O}(41^\circ C) = \exp\left(12.40682 - \frac{4222.037}{314.15 - 31.95 K}\right) 1000 \text{ mbar} = 77.744 \text{ mbar}$$

$$x_3 = 0.622 \cdot \frac{0.9 \cdot 77.744}{1013.25 - 0.9 \cdot 77.744} = 0.046138 \frac{\text{kg(Wasser)}}{\text{kg(Luft)}} = 46.138 \frac{\text{g(Wasser)}}{\text{kg(Luft)}}$$

$$|\Delta x_{34}| = |x_4 - x_3| = |36.506 - 46.138| \frac{\text{g(Wasser)}}{\text{kg(Luft)}} = 9.6323 \frac{\text{g(Wasser)}}{\text{kg(Luft)}} = 0.0096323 \frac{\text{kg(Wasser)}}{\text{kg(Luft)}}$$

Pro Kilogramm Luft kondensieren 9,63 Gramm Wasser aus.

$$\Delta t = 2 \text{ h} = 7200 \text{ s}, \quad \dot{m}_{tr.Luft} = \frac{\Delta m_{Wasser,12}}{\Delta t \cdot |\Delta x_{34}|}$$

$$\dot{m}_{tr.Luft} = \frac{3.1 \text{ kg}}{7200 \text{ s} \cdot 0.0096323 \frac{\text{kg(Wasser)}}{\text{kg(Luft)}}} = 0.044699 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

III. TEILAUFGABE C) ⇒ 4 PUNKTE

$$\dot{Q}_{Ab} = ?$$

$$h_{1+x,3} = c_{p,L} \cdot t_3 + x_3 \cdot (\Delta h^v + c_{p,Wd} \cdot t_3)$$

$$h_{1+x,3} = 1.004 \cdot 41 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0.046138 \cdot (2500 + 1.86 \cdot 41) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 160.028 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{1+x,4^*} = c_{p,L} \cdot t_{4^*} + x_4 \cdot (\Delta h^v + c_{p,Wd} \cdot t_{4^*}) + |\Delta x_{34}| \cdot c_{p,W} \cdot t_4 \quad \text{mit: } x_{4^*} = x_3, t_{4^*} = t_4$$

$$h_{1+x,4^*} = 1.004 \cdot 35 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0.036506 \cdot (2500 + 1.86 \cdot 35) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0.0096323 \cdot 4.186 \cdot 35 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 130.193 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\Delta h_{1+x,34^*} = (130.193 - 160.028) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -29.835 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{Q}_{Ab} = \dot{m}_{tr.Luft} \cdot \Delta h_{1+x,34^*} = 0.044699 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (-29.835) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -1.33359 \text{ kW}$$

IV. TEILAUFGABE D) ⇒ 4 PUNKTE

$$\dot{Q}_{Zu} = ?$$

$$h_{1+x,4} = c_{p,L} \cdot t_4 + x_4 \cdot (\Delta h^v + c_{p,Wd} \cdot t_4)$$

$$h_{1+x,4} = 1.004 \cdot 35 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0.036506 \cdot (2500 + 1.86 \cdot 35) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 128.781 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{1+x,1} = c_{p,L} \cdot t_1 + x_1 \cdot (\Delta h^v + c_{p,Wd} \cdot t_1) \quad \text{mit: } x_1 = x_4$$

$$h_{1+x,1} = 1.004 \cdot 68 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0.036506 \cdot (2500 + 1.86 \cdot 68) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 164.154 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\Delta h_{1+x,41} = (164.154 - 128.781) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 35.373 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{Q}_{Ab} = \dot{m}_{tr.Luft} \cdot \Delta h_{1+x,41} = 0.044699 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 35.373 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 1.58114 \text{ kW}$$

V. TEILAUFGABE E) ⇒ 4 PUNKTE

$$h_{1+x,1} = 164.154 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{1+x,2} = h_{1+x,3} - |\Delta x_{34}| \cdot c_{p,W} \cdot t_W$$

$$h_{1+x,2} = 160.028 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 0.0096323 \cdot 4.186 \cdot 40 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 158.415 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\Delta h_{1+x,12} = (158.415 - 164.154) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -5.739 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{Q}_{Trommel} = \dot{m}_{tr.Luft} \cdot \Delta h_{1+x,12} = 0.044699 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (-5.739) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -0.25652 \text{ kW} = -256.52 \text{ W}$$

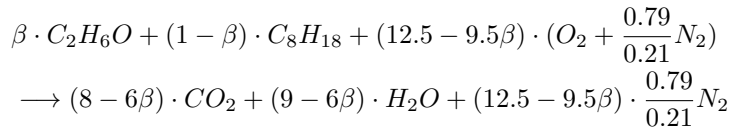
$$h_{1+x,2} = c_{p,L} \cdot t_2 + x_2 \cdot (\Delta h^v + c_{p,Wd} \cdot t_2) \quad \Rightarrow t_2 = \frac{h_{1+x,2} - x_2 \cdot \Delta h^v}{c_{p,L} + x_2 \cdot c_{p,Wd}}$$

mit $x_2 = x_1$ folgt

$$t_2 = \frac{158.415 - 0.036506 \cdot 2500}{1.004 + 0.036506 \cdot 1.86} \text{ } ^\circ\text{C} = 62.65 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Aufgabe 3

a) Geben Sie die Reaktionsgleichung, in Abhängigkeit von β , für die gesuchte Verbrennungsreaktion an bezogen auf 1 mol Kraftstoff an



mit den Stöchiometrikoeffizienten

$$\nu'_{C_2H_6O} = -\beta \quad , \quad \nu'_{C_8H_{18}} = \beta - 1 \quad , \quad \nu'_{O_2} = 9.5\beta - 12.5 \quad , \quad \nu'_{N_2} = (9.5\beta - 12.5) \cdot \frac{0.79}{0.21} \\ \nu''_{CO_2} = 8 - 6\beta \quad , \quad \nu''_{H_2O} = 9 - 6\beta \quad , \quad \nu''_{N_2} = (12.5 - 9.5\beta) \cdot \frac{0.79}{0.21}$$

b) Berechnen Sie die Zusammensetzung β des Kraftstoffs, welche die gesuchte Energiemenge von 1600 kJ freisetzt?

Zur Lösung der Aufgabe nutzt man das Prinzip der Wegunabhängigkeit der Enthalpie aus. Aus K4,F27 und Übungsaufgabe 17 folgt

$$\int_{T_\theta}^{T_R} dT (\nu''_{CO_2} \cdot c_{pCO_2}) + \int_{T_\theta}^{T_R} dT (\nu''_{H_2O} \cdot c_{pH_2O}) + \int_{T_\theta}^{T_R} dT (\nu''_{N_2} c_{pN_2}) + \Delta^R h_\theta \\ = \int_{T_\theta}^{T_R} dT (|\nu'_{C_2H_6O}| \cdot c_{pC_2H_6O}) + \int_{T_\theta}^{T_R} dT (|\nu'_{C_8H_{18}}| \cdot c_{pC_8H_{18}}) + \int_{T_\theta}^{T_R} dT (|\nu'_{O_2}| \cdot c_{pO_2}) \\ + \int_{T_\theta}^{T_R} dT (|\nu'_{N_2}| c_{pN_2}) + \Delta^R h(T_R) ,$$

Die bei dieser Reaktion freiwerdende Wärme ergibt sich aus der Erwärmung der Edukte auf Reaktionstemperatur und anschließender Rekombination der Edukte zu Produkten. Aus K4,F32 folgt

$$\frac{Q}{1 \text{ mol}} = \int_{T_\theta}^{T_R} dT (|\nu'_{C_2H_6O}| \cdot c_{pC_2H_6O}) + \int_{T_\theta}^{T_R} dT (|\nu'_{C_8H_{18}}| \cdot c_{pC_8H_{18}}) + \int_{T_\theta}^{T_R} dT (|\nu'_{O_2}| \cdot c_{pO_2}) \\ + \int_{T_\theta}^{T_R} dT (|\nu'_{N_2}| c_{pN_2}) + \Delta^R h(T_R)$$

Setzt man diese beiden Gleichungen ineinander ein, so erhält man das Ergebnis aus K4,F34

$$\frac{Q}{1 \text{ mol}} = \int_{T_\theta}^{T_R} dT (\nu''_{CO_2} \cdot c_{pCO_2}) + \int_{T_\theta}^{T_R} dT (\nu''_{H_2O} \cdot c_{pH_2O}) + \int_{T_\theta}^{T_R} dT (\nu''_{N_2} c_{pN_2}) + \Delta^R h_\theta$$

$$\Delta^R h_\theta = \nu'_{C_2H_6O} \Delta^B h_{\theta C_2H_6O} + \nu'_{C_8H_{18}} \Delta^B h_{\theta C_8H_{18}} + \nu''_{CO_2} \Delta^B h_{\theta CO_2} + \nu''_{H_2O} \Delta^B h_{\theta H_2O}$$

Die Reaktionsenthalpie im Standardzustand ergibt sich aus der Differenz der Bildungsenthalpien der Edukte und Produkte (K4,F25). Setzt man die Stöchiometrikoeffizienten in die obige Gleichung ein, so erhält man eine Bestimmungsgleichung für β

$$\frac{-1600 \text{ kJ}}{1 \text{ mol}} = (8 - 6\beta) c_{pCO_2} (T_R - T_\theta) + (9 - 6\beta) c_{pH_2O} (T_R - T_\theta) + (12.5 - 9.5\beta) \frac{0.79}{0.21} c_{pN_2} (T_R - T_\theta) \\ - \beta \Delta^B h_{\theta C_2H_6O} + (\beta - 1) \Delta^B h_{\theta C_8H_{18}} + (8 - 6\beta) \Delta^B h_{\theta CO_2} + (9 - 6\beta) \Delta^B h_{\theta H_2O} \\ \frac{-1600 \text{ kJ}}{1 \text{ mol}} = (8 - 6\beta) \cdot 0.0433 \frac{\text{kJ}}{\text{mol K}} \cdot 301.85 \text{ K} + (9 - 6\beta) \cdot 0.0347 \frac{\text{kJ}}{\text{mol K}} \cdot 301.85 \text{ K} \\ + (12.5 - 9.5\beta) \frac{0.79}{0.21} 0.0230 \frac{\text{kJ}}{\text{mol K}} \cdot 301.85 \text{ K} - \beta \cdot (-236 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}) + (\beta - 1) \cdot (-224.1 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}) \\ + (8 - 6\beta) \cdot (-393.6 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}) + (9 - 6\beta) \cdot (-242.1 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}})$$

Somit ergibt sich für β

$$\beta = 0.88 .$$

c) Welcher Stoffmenge, bezogen auf 1 mol Kraftstoff, an Zuluft wird benötigt?

Das Problem lässt sich über einen einfachen Dreisatz lösen. Die Stoffmenge von 1 mol Zuluft setzt sich, gemäß Aufgabenstellung wie folgt zusammen

$$\begin{aligned} 1 \text{ mol}_{ZL} &= 0.21 \text{ mol } O_2 + 0.79 \text{ mol } N_2 \\ \left(\frac{12.5 - 9.5\beta}{0.21} \right) \text{ mol}_{ZL} &= (12.5 - 9.5\beta) \text{ mol } O_2 + (12.5 - 9.5\beta) \frac{0.79}{0.21} \text{ mol } N_2 \end{aligned}$$

Um 1 mol Kraftstoff stöchiometrisch zu verbrennen wird demnach Zuluft von 19.714 mol benötigt.