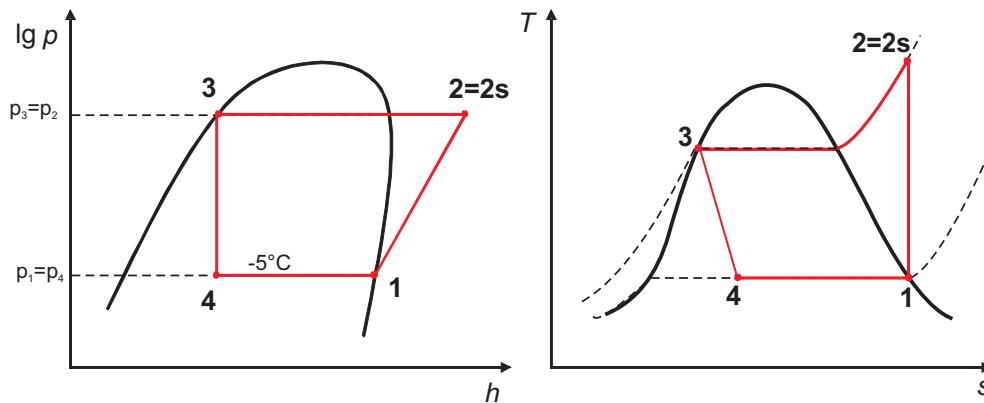


Musterlösung Aufgabe 1: «Kompressionskältemaschine»

I. TEILAUFGABE A) ⇒ 4 PUNKTE



II. TEILAUFGABE B) ⇒ 1 PUNKTE

$$p_1 = 2.43 \text{ bar} (-5^\circ\text{C}), \quad h_1 = h''(-5^\circ\text{C}) = 395.659 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right), \quad s_1 = 1.73 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right)$$

$$s_1 = s_2 \text{ (reversibel adiabat)} \Rightarrow t_2 = 50.7^\circ\text{C}, \quad p_2 = 11.6 \text{ bar}$$

III. TEILAUFGABE C) ⇒ 3 PUNKTE

$$\varepsilon_{KM} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\dot{Q}_{zu}}{P_{Antr.}} = \frac{q_{zu}}{w_{t,12}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

$$h_2 = 428.16 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$$

$$h_4 = h_3 = h'(11.6 \text{ bar}) = 263.943 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$$

$$\varepsilon_{KM} = \frac{395.659 - 263.943}{428.16 - 395.659} = 4.05$$

IV. TEILAUFGABE D) ⇒ 2 PUNKTE

ohne Exergieverluste $\Rightarrow \eta_{ex} = 1$

$$\varepsilon_{KM} = \frac{T_{zu}}{T_{ab} - T_{zu}} = \frac{273.15 - 5}{45 + 5} = 5.363$$

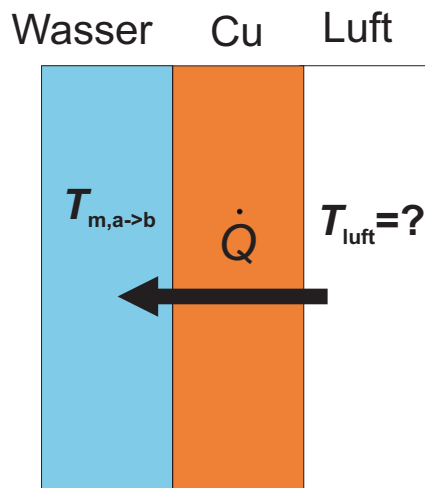
V. TEILAUFGABE E) ⇒ 2 PUNKTE

$$\eta_{ex} = 0.52$$

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}_{Q^{*zu}}}{P_{Antr.}} = \frac{\left(1 - \frac{T_a}{T_m}\right) \cdot \dot{Q}_{zu}^*}{P_{Antr.}}$$

$$\dot{Q}_{zu}^* = \frac{\eta_{ex} \cdot P_{Antr.}}{\left(1 - \frac{T_a}{T_m}\right)} = \frac{\eta_{ex} \cdot \dot{m}_{R134} \cdot (h_2 - h_1)}{\left(1 - \frac{T_a}{T_m}\right)} = \frac{0.52 \cdot 2.5 \cdot 10^{-3} \cdot (428.16 - 395.659 - h_1)}{\left(1 - \frac{273.15 + 35}{273.15 - 5}\right)} = 283.24 \left(\frac{J}{s}\right)$$

VI. TEILAUFGABE F) ⇒ 6 PUNKTE



$$\dot{Q}_{ab} = \dot{Q}_{zu} = 283.24 \left(\frac{J}{s}\right)$$

$$T_{m,a \rightarrow b} = \frac{\Delta h}{\Delta s} = \frac{84.006 - 21.119}{0.2965 - 0.0763} = 285.6 \text{ K} = 12.44^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q} = A \cdot K \cdot (T - T_{m,a \rightarrow b})$$

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} = \frac{1}{500} + \frac{0.002}{400} + \frac{1}{20} = 0.052 \Rightarrow K = 19.23 \left(\frac{m^2 \cdot K}{W}\right)$$

$$T = T_{m,a \rightarrow b} + \frac{\dot{Q}}{A \cdot K} = 12.44^\circ\text{C} + \frac{283.24 \left(\frac{J}{s}\right)}{0.8 \cdot 0.8 (m^2) \cdot 19.23 \left(\frac{m^2 \cdot K}{W}\right)} = 35.45^\circ\text{C}$$

Musterlösung Aufgabe 2: «Schneeerzeugung in Skihalle»

I. TEILAUFGABE A) ⇒ 2 PUNKTE

Punkt 1: $t_1 = -4^\circ\text{C}$, $\psi_1 = 40\% \Rightarrow x_1 = 1.1 \left(\frac{\text{g}}{\text{kg}}\right)$, $h_{1+x,1} = -1.2 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$ (abgelesen)

Punkt 2: $t_2 = -6^\circ\text{C}$, $h_{1+x,2} = h_{1+x,1} = -1.2 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$

da die Enthalpie von Wasser bei $0^\circ\text{C} = 0$! $\Rightarrow x_2 = 5.5 \left(\frac{\text{g}}{\text{kg}}\right)$ (abgelesen)

Masse Schnee pro angesaugter trockener Luft:

$$\Delta x_{\text{Schnee}} = \frac{m_{\text{Schnee}}}{m_{\text{tr.L.}}} = x_2 - x_s(\text{bei } -6^\circ\text{C}) = (5.5 - 2.3) \left(\frac{\text{g}}{\text{kg}}\right) = 3.2 \left(\frac{\text{g}}{\text{kg}}\right)$$

II. TEILAUFGABE B) ⇒ 1 PUNKTE

Masse des zugeführten Wassers:

$$\Delta x_{\text{Wasser}} = \frac{m_{\text{Wasser}}}{m_{\text{tr.L.}}} = x_2 - x_1 = (5.5 - 1.1) \left(\frac{\text{g}}{\text{kg}}\right) = 4.4 \left(\frac{\text{g}}{\text{kg}}\right)$$

III. TEILAUFGABE C) ⇒ 2 PUNKTE

Temperatur des Schnees bei gleichbleibenden Verhältnis von Wassermassen- zu Luftmassenstrom:

$$x_3 = x_2, h_{1+x,3} = 5.8 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) \Rightarrow t_3 = -1.8^\circ\text{C} \text{ (abgelesen)}$$

IV. TEILAUFGABE D) ⇒ 2 PUNKTE

Masse Schnee pro angesaugter trockener Luft:

$$\Delta x_{\text{Schnee}}^* = \frac{m_{\text{Schnee}}}{m_{\text{tr.L.}}} = x_3 - x_s(\text{bei } -1.8^\circ\text{C}) = (5.5 - 3.4) \left(\frac{\text{g}}{\text{kg}}\right) = 2.1 \left(\frac{\text{g}}{\text{kg}}\right)$$

V. TEILAUFGABE E) ⇒ 3 PUNKTE

$$\dot{Q} = \frac{\dot{m}_{\text{Schnee}}}{\Delta x_{\text{Schnee}}} \cdot \Delta h_{1+x,1 \rightarrow 1^*} \quad \text{mit: } \dot{m}_{\text{Schnee}} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{min}}$$

$$\Delta h_{1+x,1 \rightarrow 1^*} = h_{1+x,1^*} - h_{1+x,1} = 5.8 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg tr.L.}}\right) - (-1.2) \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg tr.L.}}\right) = 7 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg tr.L.}}\right) \Rightarrow$$

$$\dot{Q} = \frac{7 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{g tr.L.}}\right)}{3.2 \left(\frac{\text{kg Schnee}}{\text{kg tr.L.}}\right)} = 2187.5 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg Schnee}}\right) = 2187.5 \left(\frac{\text{kW} \cdot \text{s}}{\text{kg Schnee}}\right) = 36.46 \left(\frac{\text{kW} \cdot \text{min}}{\text{kg Schnee}}\right)$$

VI. TEILAUFGABE F) ⇒ 5 PUNKTE

$$x_1 = \frac{p_D}{p_{ges.} - p_D} \cdot \frac{M_D}{M_L}$$

$$p_D = p_{D,s} \cdot \varphi_1 = \exp\left(23.6861 - \frac{5803.138}{(-4^\circ\text{C} + 265.2717)}\right) \cdot 0.4 = 1.748 \text{ (mbar)} \Rightarrow$$

$$x_1 = \frac{1.748}{1000 - 1.748} \cdot \frac{18.015}{28.96} = 0.00109 \left(\frac{\text{kg Wasser}}{\text{kg tr.L}}\right) = 1.09 \left(\frac{\text{g Wasser}}{\text{kg tr.L}}\right)$$

$$h_{1+x,1} = c_{p,L} \cdot t_1 + x_1 \cdot (\Delta h_v + c_{p,D} \cdot t_1)$$

$$h_{1+x,1} = 1.007 \cdot (-4) + 0.00109 \cdot (2500 + 1.86 \cdot (-4)) = -1.31 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$$

VII. TEILAUFGABE G) ⇒ 4 PUNKTE

$$x_2 = 5.5 \left(\frac{\text{g}}{\text{kg}}\right) \text{ (abgelesen)}$$

$$h_{1+x,2} = c_{p,L} \cdot t_2 + x_{s,2} \cdot (\Delta h_v + c_{p,D} \cdot t_2) + (x - x_s) \cdot [\Delta h_{schmelz} + c_{p,Eis} \cdot t_2]$$

$$x_s = \frac{p_D}{p_{ges.} - p_D} \cdot \frac{M_D}{M_L}$$

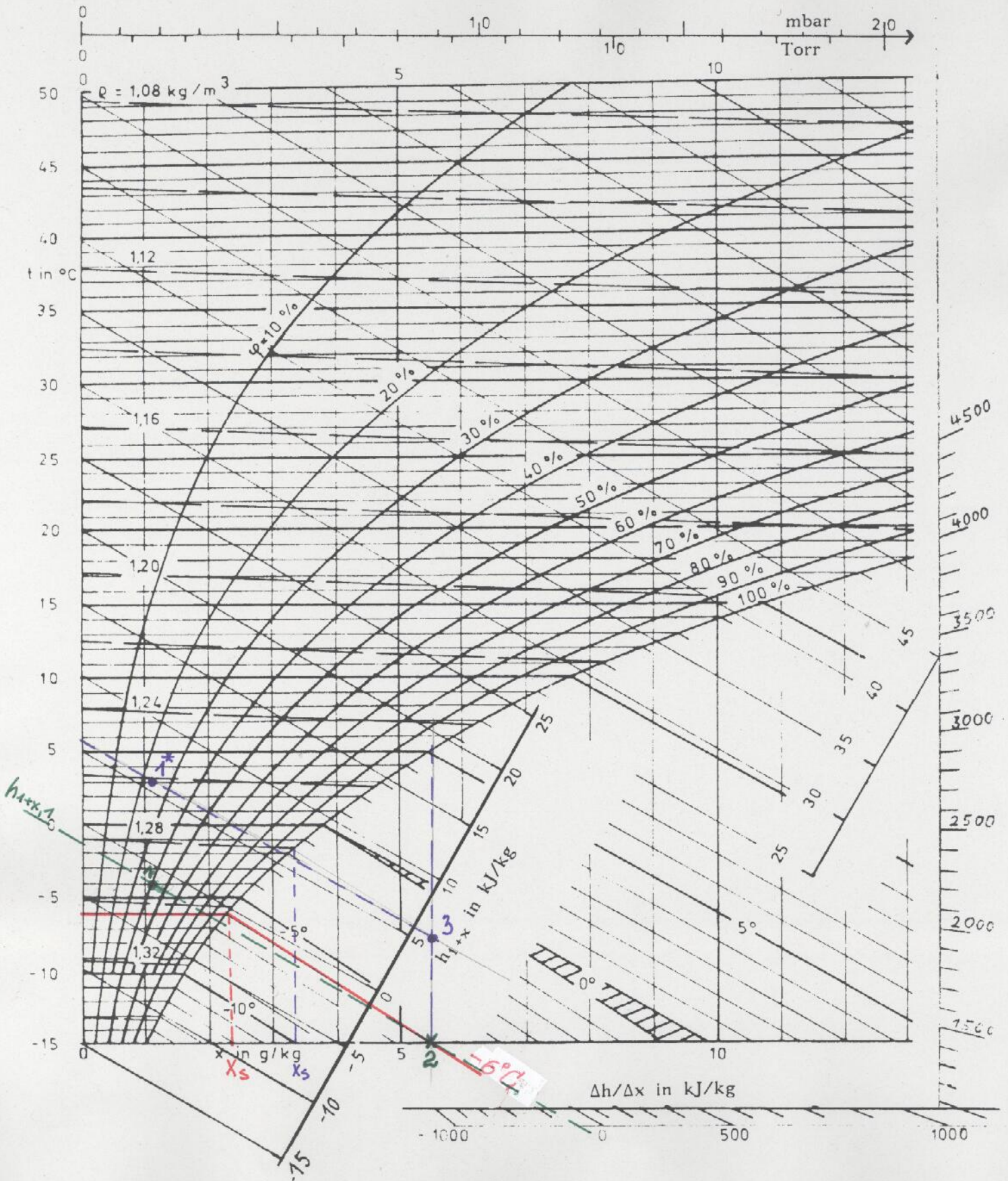
$$p_D = p_{D,s} \cdot \varphi_1 = \exp\left(23.6861 - \frac{5803.138}{(-6^\circ\text{C} + 265.2717)}\right) \cdot 1 = 3.682 \text{ (mbar)} \Rightarrow$$

$$x_s = \frac{3.682}{1000 - 3.682} \cdot \frac{18.015}{28.96} = 0.0023 \left(\frac{\text{kg Wasser}}{\text{kg tr.L}}\right) = 2.3 \left(\frac{\text{g Wasser}}{\text{kg tr.L}}\right)$$

$$h_{1+x,2} = 1.007 \cdot (-6) + 0.0023 \cdot (2500 + 1.86 \cdot (-6)) + (0.0055 - 0.0023) \cdot [(-333) + 2.05 \cdot (-6)] = -1.42 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$$

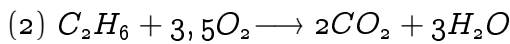
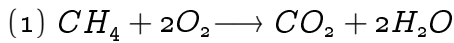
h_{1+x}, x -Diagramm im gesetzlichen Einheitensystem

$p = 1 \text{ bar} = 750 \text{ Torr}$

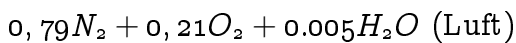
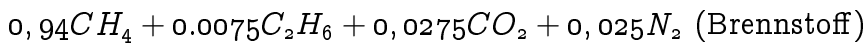


Musterlösung Aufgabe 3: «Verbrennung»

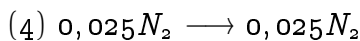
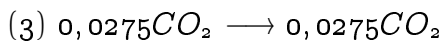
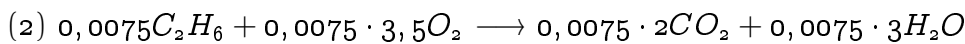
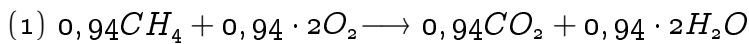
a) Verbrennungsgleichungen:



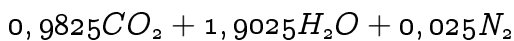
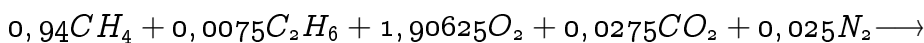
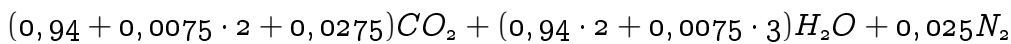
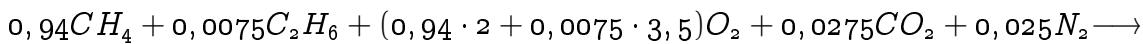
Zusammensetzungen:



Verbrennung von 1 mol BS mit O_2 :



Summe:



Verbrennung mit Luftüberschuss: $\lambda = 1,2$

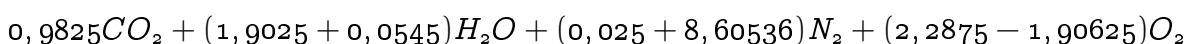
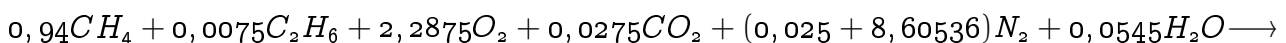
$$\nu_{O_2} = \lambda \cdot \nu_{O_2, \min} = 1,2 \cdot 1,90625 = 2,2875 \text{ (mol } O_2)$$

$$\nu_{N_2, Luft} = \frac{0,79 \left(\frac{\text{mol}, N_2}{\text{molLuft}} \right)}{0,21 \left(\frac{\text{mol}O_2}{\text{molLuft}} \right)} \cdot 2,2875 \left(\frac{\text{mol}O_2}{\text{molBS}} \right) = 8,60536 \left(\frac{\text{mol}N_2}{\text{molBS}} \right)$$

$$\nu_{Luft} = \nu_{O_2} + \nu_{N_2, Luft} = 2,2875 + 8,60536 = 10,89286 \left(\frac{\text{molLuft}}{\text{molBS}} \right)$$

$$\nu_{H_2O, Luft} = 0,005 \cdot 10,89286 = 0,0545 \left(\frac{\text{mol}H_2O}{\text{molBS}} \right)$$

Mit Luftberücksichtigung:



Rauchgas:

$$\nu_{CO_2} = 0,9825 \left(\frac{\text{mol}CO_2}{\text{mol}BS} \right)$$

$$\nu_{H_2O} = 1,957 \left(\frac{\text{mol}H_2O}{\text{mol}BS} \right)$$

$$\nu_{N_2} = 8,603036 \left(\frac{\text{mol}N_2}{\text{mol}BS} \right)$$

$$\nu_{O_2} = 0,38125 \left(\frac{\text{mol}O_2}{\text{mol}BS} \right)$$

$$\text{Summe: } 11,9238 \left(\frac{\text{mol}Rauchgas}{\text{mol}BS} \right)$$

$$\begin{aligned} \text{b) } \Delta^R h &= -(0,94 \cdot \Delta^B h_{CH_4} + 0,0075 \cdot \Delta^B h_{C_2H_6}) + 0,955 \cdot \Delta^B h_{CO_2} + 1,9025 \cdot \Delta^B h_{H_2O} \\ &= -[0,94 \cdot (-74,8) + 0,0075 \cdot (-84,7)] + 0,955 \cdot (-393,5) + 1,9025 \cdot (-241,8) = -764,87 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right) \end{aligned}$$

$$H^u = -\Delta^R h = 764,87 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{mol}Erdgas} \right)$$

$$\begin{aligned} H^o &= H^u + \Delta^v h_{H_2O} \cdot \nu_{H_2O} \\ &= 764,87 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{mol}Erdgas} \right) + 2441,5 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \cdot 18 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\text{kg}}{\text{mol}} \right) \cdot 1,9025 \left(\frac{\text{mol}H_2O}{\text{mol}Erdgas} \right) = 848,48 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{mol}Erdgas} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{c) } \Delta H(100^\circ C) &= H^u - \sum c_{pi} \cdot \nu_i \cdot (T_2 - T_1) \\ &= 764,87 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{mol}BS} \right) - 0,030 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{mol}K} \right) \cdot 11,9238 \left(\frac{\text{mol}Rauchgas}{\text{mol}BS} \right) \cdot (100 - 25)K = 738,04 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{mol}BS} \right) \end{aligned}$$

$$M_{BS} = 0,94 \cdot 16,04 + 0,0075 \cdot 30,07 + 0,0275 \cdot 44,01 + 0,025 \cdot 28,01 = 17,21365 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)$$

$$\Rightarrow \Delta H(100^\circ C) = \frac{738,04 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{mol}BS} \right)}{17,21365 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\text{kg}}{\text{mol}} \right)} = 42875,4 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$\text{d) } p \cdot \dot{V} = \dot{n} \cdot R_m \cdot T$$

$$\Rightarrow \dot{V} = \frac{\dot{n} \cdot R_m \cdot T}{p}$$

$$\dot{n} = \frac{\dot{Q}}{\Delta H(100^\circ C)} = \frac{20(\text{kW})}{738,04 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{mol}BS} \right)} = 0,0271 \left(\frac{\text{mol}Erdgas}{s} \right) = 97,56 \left(\frac{\text{mol}Erdgas}{h} \right)$$

$$\dot{V} = \frac{97,56 \left(\frac{\text{mol}Erdgas}{h} \right) \cdot 8,314472 \left(\frac{\text{J}}{\text{mol}K} \right) \cdot 298,15(K)}{1(\text{bar})} = 2,4185 \left(\frac{\text{m}^3}{h} \right)$$

e) 6 Monate = 182 Tage = 4368 Stunden

$$4368(h) \cdot 97,56 \left(\frac{\text{mol}Erdgas}{h} \right) \cdot 0,9825 \left(\frac{\text{mol}CO_2}{\text{mol}Erdgas} \right) \cdot 44,01 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right) = 18426,309 \text{ kg } CO_2$$