

Musterlösung Aufgabe 1: «Ideales Gas»

I. TEILAUFGABE A)

$$\kappa_L = \frac{c_p}{c_v}$$

$$R_L = \frac{R_m}{M} = \frac{8,31446 \frac{\text{kJ}}{\text{kmolK}}}{28,95 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} = 0,2872 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$c_v = c_p - R = 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} - 0,2872 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} = 0,7178 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$\Rightarrow \kappa = 1,4$$

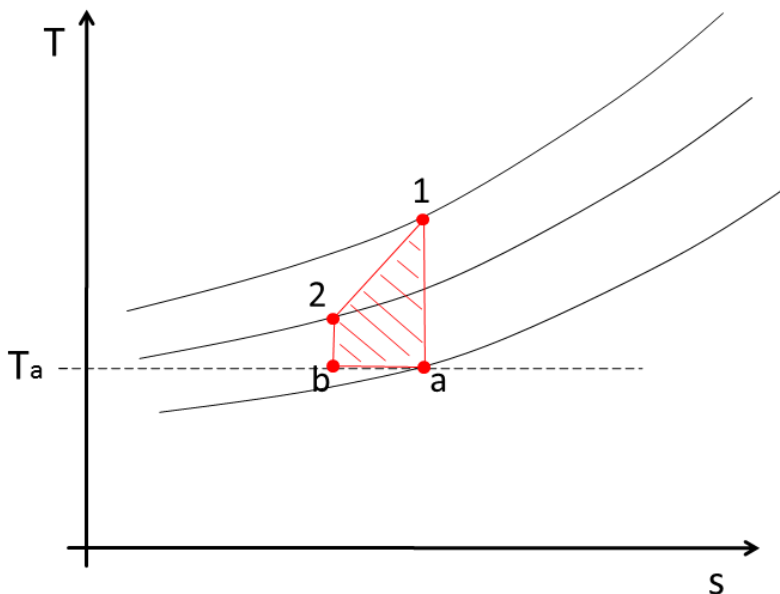
II. TEILAUFGABE B)

$$p_1 V_1 = m R_L T_1 \Leftrightarrow V_1 = \frac{m R_L T_1}{p_1} \quad \text{und:} \quad V_2 = \frac{m R_L T_2}{p_2}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\frac{m R_L T_2}{p_2}}{\frac{m R_L T_1}{p_1}} = \frac{T_2 p_1}{T_1 p_2} = \frac{360 \text{ K} \cdot 4 \text{ bar}}{600 \text{ K} \cdot 2,4 \text{ bar}} = 1$$

III. TEILAUFGABE C)

$$\begin{aligned} \Delta E_{12} &= m \cdot (\Delta u_{12} - T_a \cdot \Delta s_{12} + p_a \Delta v) = m \cdot \left[c_v (T_2 - T_1) - T_a (c_p \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)) + 0 \right] \\ &= 6 \text{ kg} \cdot \left[0,7178 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot (-240 \text{ K}) - 293,15 \text{ K} \cdot \left(1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot \ln\left(\frac{360}{600}\right) - 0,2872 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot \ln\left(\frac{2,4}{4}\right) \right) \right] \\ &= -388,695 \text{ kJ} \end{aligned}$$



IV. TEILAUFGABE D)

Eine ZG besitzt ein vollständiges Differential.

$$dz = \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)_y dx + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)_x dy$$

dz ist vollständiges Differential wenn gilt: $\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 z}{\partial y \partial x}$ (Satz von Schwarz)

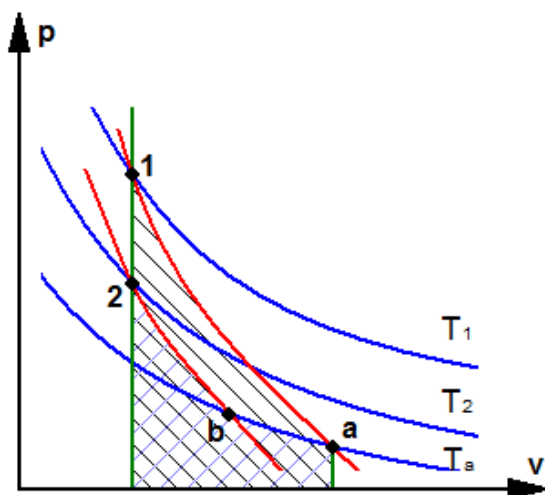
$$e = c_v(T_1 - T_0) - T_a(c_p \cdot \ln\left(\frac{T_1}{T_0}\right) - R \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right)) = c_v T_1 - c_v T_0 - T_a c_p (\ln(T_1) - \ln(T_0)) - RT_a (\ln(p_1) - \ln(p_0))$$

$$\frac{\partial e}{\partial T_1} = c_v - T_a c_p \frac{1}{T_1} \quad \text{und} \quad \frac{\partial e}{\partial p_1} = -RT_a \frac{1}{p_1}$$

$$\frac{\partial^2 e}{\partial T_1 \partial p_1} = 0 \quad \text{und} \quad \frac{\partial^2 e}{\partial p_1 \partial T_1} = 0$$

Alternative Erklärung: Die Exergie hängt nur von ZG ab, daher muss sie selbst auch eine sein!

V. TEILAUFGABE E)



- (Netto)Volumenänderungsarbeit = Fläche schwarz (geleistet) - Fläche blau (aufgebracht)
- isentrop von 1 - a (auf Umgebungstemperatur) ; isotherm von a - b ; isentrop von b - 2

VI. TEILAUFGABE F)

$$W_{v,1a} = m \cdot c_v(T_a - T_1) = 6 \text{ kg} \cdot 0,7178 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot (293,15 - 600) \text{ K} = -1321,54 \text{ kJ}$$

$$\text{mit: } \frac{T_a}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_a}\right)^{\kappa-1} \Leftrightarrow v_a = \frac{v_1}{\left(\frac{T_a}{T_1}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}}} = \frac{0,4308}{\left(\frac{293,15}{600}\right)^{\frac{1}{0,4}}} = 2,581$$

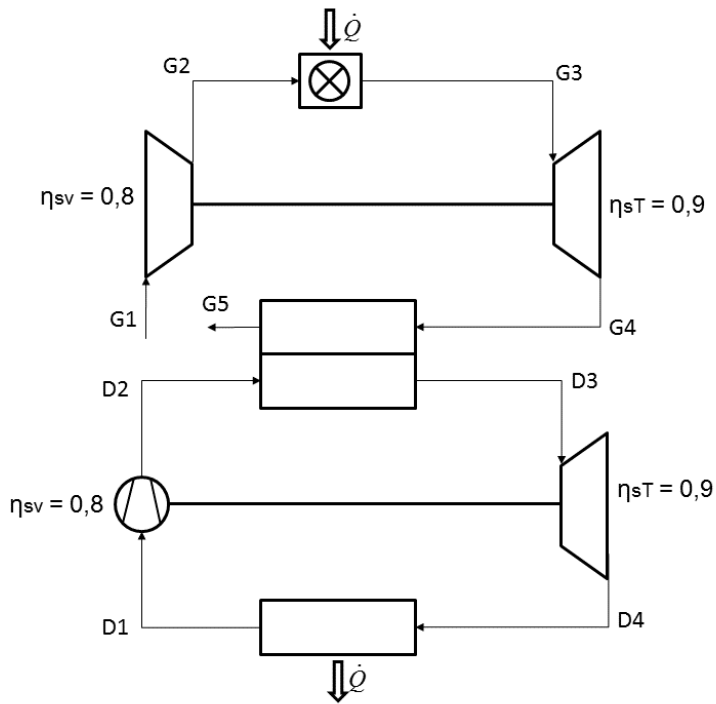
$$\text{mit: } v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287,2 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot 600 \text{ K}}{4 \cdot 10^5} = 0,4308$$

$$W_{v,b2} = m \cdot c_v(T_2 - T_b) = 287,91 \text{ kJ} \quad \text{mit: } T_b = T_a = 293,15 \text{ K}$$

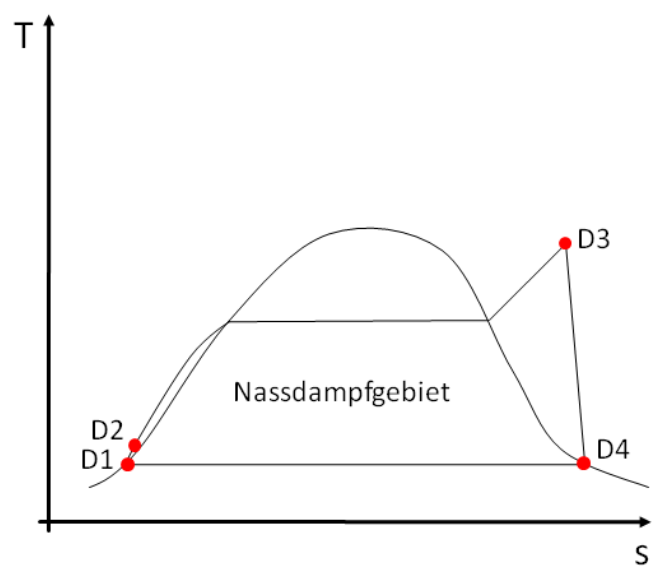
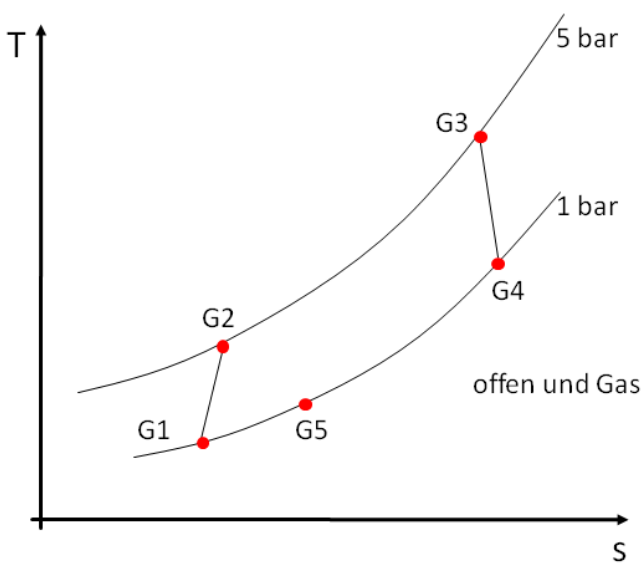
$$W_{v,ab} = -m \cdot R \cdot T_a \cdot \ln\left(\frac{v_b}{v_a}\right) = 644,923 \text{ kJ} \quad \text{mit: } v_b = v_2 \cdot \left(\frac{T_2}{T_b}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}} = 0,72$$

Musterlösung Aufgabe 2: «GuD-Kraftwerk»

I. TEILAUFGABE A)



II. TEILAUFGABE B)



III. TEILAUFGABE C)

$$h_{G1} = 419,41 \frac{kJ}{kg}$$

$$\eta_{sv} = \frac{h_{G2s} - h_{G1}}{h_{G2} - h_{G1}} \Rightarrow h_{G2} = \frac{h_{G2s} - h_{G1}}{\eta_{sv}} + h_{G1} = 634,26 \frac{kJ}{kg}$$

$$\text{mit: } s_{G2s} = s_{G1} = 3,8673 \frac{kJ}{kgK} \quad \text{und} \quad h_{G2s} = 591,29 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{Q}_B = \dot{m}_G \cdot (h_{G3} - h_{G2}) \Rightarrow h_{G3} = \frac{\dot{Q}_B}{\dot{m}_G} + h_{G2} = 1419,974 \frac{kJ}{kg}$$

$$\eta_{sT} = 0,9 = \frac{h_{G4} - h_{G3}}{h_{G4s} - h_{G3}} \Rightarrow h_{G4} = 0,9 \cdot (h_{G4s} - h_{G3}) + h_{G3} = 1003,4225 \frac{kJ}{kg}$$

$$\text{mit: } s_{G4s} = s_{G3} = 4,918 \frac{kJ}{kgK} \quad \text{und} \quad h_{G4s} = 957,139 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{Q}_{G45p} = \dot{m}_G \cdot (h_{G5p} - h_{G4}) = -410,0705 \text{ MW}$$

$$\text{mit: } T_{D3p}(8 \text{ MPa}) = 295,01^\circ\text{C} \Rightarrow T_{G5p} = 305,01^\circ\text{C}$$

$$h_{G5p} = 710,515 \frac{kJ}{kg}$$

IV. TEILAUFGABE D)

$$h_{D1} = 504,70 \frac{kJ}{kg} \quad s_{D1} = 1,5302 \frac{kJ}{kgK}$$

$$\eta_{sp} = 0,8 = \frac{h_{D2s} - h_{D1}}{h_{D2} - h_{D1}} \Rightarrow h_{D2} = \frac{h_{D2s} - h_{D1}}{0,8} + h_{D1} = 510,4625 \frac{kJ}{kg}$$

$$\text{mit: } h_{D2s} = 509,31 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{Q}_{G45p} = -\dot{Q}_{D3p3} = \dot{m}_w \cdot (h_{D3} - h_{D3p}) \Rightarrow h_{D3} = \frac{-\dot{Q}_{G45p}}{\dot{m}_w} + h_{D3p} = 3475,566 \frac{kJ}{kg}$$

$$\text{mit: } h_{D3p} = 1317,3 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{Q}_{D23} = \dot{m}_w \cdot (h_{D3} - h_{D2}) = 563369,665 \text{ kW}$$

V. TEILAUFGABE E)

$$P_m = P_{G12} + P_{G34} + P_{D12} + P_{D34} = \dot{m}_L(h_{G2} - h_{G1} + h_{G4} - h_{G3}) + \dot{m}_w(h_{D2} - h_{D1} + h_{D4} - h_{D3})$$

$$\eta_{sT} = 0,9 = \frac{h_{D4} - h_{D3}}{h_{D4s} - h_{D3}} \Rightarrow h_{D4} = 0,9 \cdot (h_{D4s} - h_{D3}) + h_{D3} = 2675,4786 \frac{kJ}{kg}$$

$$\text{mit: } s_{D4s} = s_{D3} = 6,8228 \frac{kJ}{kgK} \quad \text{und} \quad h_{D4s} = 2586,58 \frac{kJ}{kg}$$

$$\Rightarrow P_m = -282382,1 \text{ kW} - 150921,731 \text{ kW} = -433,303831 \text{ MW}$$

$$\dot{Q}_{D41} = \dot{m}_w \cdot (h_{D1} - h_{D4}) = -412447,334 \text{ kW}$$

VI. TEILAUFGABE F)

$$\eta_{th} = \frac{P_m + \dot{Q}_{D41}}{\dot{Q}_B} = 0,769$$

VII. TEILAUFGABE G)

$$\eta_{ex} = \frac{P_m + \dot{Q}_{D41} \cdot \left(1 - \frac{T_a}{T_m}\right)}{\dot{E}_{G23}} = \frac{P_m + \dot{Q}_{D41} \cdot \left(1 - \frac{T_a}{T_m}\right)}{\dot{m}_L \cdot (h_{G3} - h_{G2} - T_a \cdot (s_{G3} - s_{G2}))}$$

$$T_a = 293,15 \text{ K} \quad \text{und} \quad T_m = 392,49 \text{ K}$$

$$s_{G2} = 3,9549 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$\Rightarrow \eta_{ex} = \frac{|-433,304 \text{ MW} - 412,448 \text{ MW} \cdot \left(1 - \frac{T_a}{T_m}\right)|}{704,734 \text{ MW}} = 0,763$$

Musterlösung Aufgabe 3: «Gaskocher»

I. TEILAUFGABE A)

$$\rho_{Kart} = \frac{m}{V} = \frac{0,28 \text{ kg}}{0,00272 \text{ m}^3} = 102,95 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$V = \frac{\pi d^2 h}{4} = 0,0027196 \text{ m}^3$$

$$p = p_s(300 \text{ K}) = 0,2576 \text{ MPa}$$

II. TEILAUFGABE B)

$$Q = m_w c_{pw} \Delta T + m_T c_{pT} \Delta T$$

$$= 1 \text{ kg} \cdot 4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot (100 - 26,85) \text{ K} + 0,3 \text{ kg} \cdot 0,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot (100 - 26,85) \text{ K} = 318,2 \text{ kJ}$$

$$\Delta m_{Butan} = \frac{Q}{45,8 \frac{\text{kJ}}{\text{g}} \cdot 0,5} = 13,895 \text{ g}$$

$$m_{neu} = m_{alt} - m_{Butan} = 0,2661 \text{ kg} \quad \rho_{neu} = \frac{m_{neu}}{V} = 97,8456 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$p_2 = p_1 = 0,2576 \text{ MPa} \quad T_2 = T_1 = 300 \text{ K}$$

III. TEILAUFGABE C)

$$\Delta Z = \frac{\Delta V_{Fl}}{A} = \Delta w_{fl} \cdot h = \frac{(w_1 - w_2) \cdot V_{ges}}{\frac{\pi d^2}{4}} \cdot h_{ges} = 0,00172 \text{ m} = 0,172 \text{ cm}$$

$$w_{fl1} = \frac{V_{fl1}}{V_{ges}} = \frac{\rho_1 - \rho''}{\rho' - \rho''} = 0,1709 \quad w_{fl2} = \frac{V_{fl2}}{V_{ges}} = \frac{\rho_2 - \rho''}{\rho' - \rho''} = 0,16188$$

Alternative: Berechnung über Dampfspiegel

$$\Delta Z = \Delta w_{d12} \cdot H_{ges}$$

$$w_{d1} = \frac{V_{d1}}{V_{ges}} = \frac{\rho_1 - \rho'}{\rho'' - \rho'} \quad w_{d2} = \frac{V_{d2}}{V_{ges}} = \frac{\rho_2 - \rho'}{\rho'' - \rho'}$$

IV. TEILAUFGABE D)

$$Q = \Delta m_{fl} \cdot \Delta h_v = \Delta m_{fl} \cdot (h'' - h') = 0,014 \text{ kg} \cdot (623,58 - 264) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 5,054 \text{ kJ}$$

$$\Delta m_{fl} = \Delta V_{fl} \cdot \rho'$$

$$\Delta V_{fl} = \Delta w_{fl} \cdot V_{ges} = 2,463 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \quad \Delta m_{fl} = 0,014055 \text{ kg}$$

V. TEILAUFGABE E)

$$T_3 = 320K \quad \rho_3 = \rho_2 = 94,8456 \frac{kg}{m^3}$$

$$\rho' = 546,36 \frac{kg}{m^3} \quad \rho'' = 11,288 \frac{kg}{m^3}$$

$$x_3 = \frac{1/\rho_3 - 1/\rho'}{1/\rho'' - 1/\rho'} = 0,09669 \frac{m_D}{m_{ges}}$$

VI. TEILAUFGABE F)

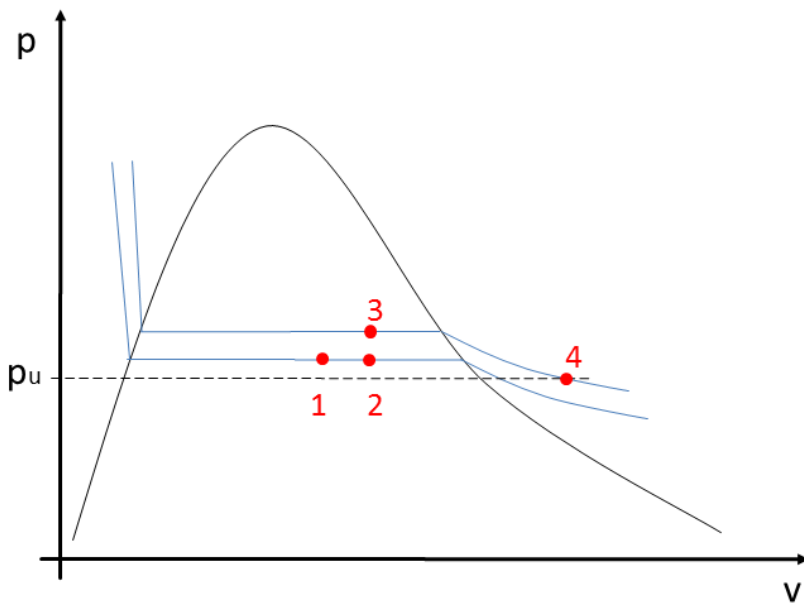
Bis $p_{Kart} = p_{Umgebung}$

ideales Gas: $p \frac{V}{m} = RT \Rightarrow m = \frac{pV}{RT} = \frac{0,1013 \cdot 10^{-6} Pa \cdot 0,00272 m^3}{0,1434 \frac{kJ}{kgK} \cdot 320 K} = 0,00602 kg$

oder: $\rho \approx \rho''(0,1013 MPa)$ (\rightarrow Interpolieren)

$$m = 0,00272 m^3 \cdot 2.7067 \frac{kg}{m^3} = 0,00736 kg$$

VII. TEILAUFGABE G)



VIII. TEILAUFGABE H)

Für den Phasenübergang Flüssig-Gas des Butans in der Kartusche wird sehr schnell viel Wärme aus der Umgebung abgezogen. Wasser aus der Umgebungsluft kondensiert und gefriert.