

Musterlösung zur Klausur
Thermodynamik I – Sommersemester 2015

1. Aufgabe (2015): Theoriefragen (20 Punkte)

a) (2 Punkte)

- Zustandsgrößen definieren den thermodynamischen Zustand eines Systems. Prozessgrößen hingegen beschreiben einen Prozesses. Es folgt daher, dass die Zustandsgrößen (1,2) in beiden Prozessen jeweils die gleichen sind. Die Prozessgrößen beider Prozesse unterscheiden sich jedoch.

b) (1 Punkte)

- Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik beschreibt das Prinzip der Energieerhaltung. Die extensive Größe Energie kann folglich weder vernichtet noch erzeugt, sondern nur übertragen und gespeichert werden.

c) (2 Punkte)

- $R = \frac{\bar{R}}{M} \rightarrow M = \frac{8,314 \text{ kJ/kmolK}}{0,2598 \text{ kJ/kgK}} \approx 32,00$. ; Entsprechend der molaren Masse M scheint es sich um Sauerstoff zu handeln.

d) (2 Punkte)

- 2. Hauptsatz der Thermodynamik (adiabat): $\frac{dS}{dt} = \dot{S}_{gen}$. Da keine Aussage über die Reversibilität getroffen wird, folgt also nicht, dass jede adiabate Zustandsänderung auch isentrop ist.

e) (2 Punkte)

- $LZ_{KM,max} = \frac{\dot{Q}_{zu}}{\dot{W}_{zu}} = \frac{T_1}{T_0 - T_1}$
- $\varepsilon_{KM,max} = \frac{|\dot{E}_{q,zu}|}{\dot{W}_{zu}} = \left| 1 - \frac{T_0}{T_1} \right| \frac{\dot{Q}_{zu}}{\dot{W}_{zu}} = \left| \frac{T_1 - T_0}{T_1} \right| \frac{T_1}{T_0 - T_1} = 1$

f) (3 Punkte) Siehe Abbildung f)

g) (2 Punkte) Siehe Abbildung g)

h) (3 Punkte)

- $C_5H_{12} + 8 O_2 + 24 N_2 \longrightarrow 5 CO_2 + 6 H_2O + 24 N_2$
- $\alpha = 8; \beta = \varepsilon = 24; \gamma = 5; \delta = 6$

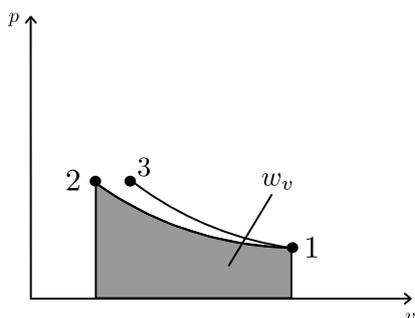
j) (2 Punkte) Die Luftzahl λ ist definiert als:

$$\lambda = \frac{\nu_{O_2,real}}{\nu_{O_2,st\ddot{o}chiometrisch}} = \frac{\dot{n}_{O_2,real}}{\dot{n}_{O_2,st\ddot{o}chiometrisch}}$$

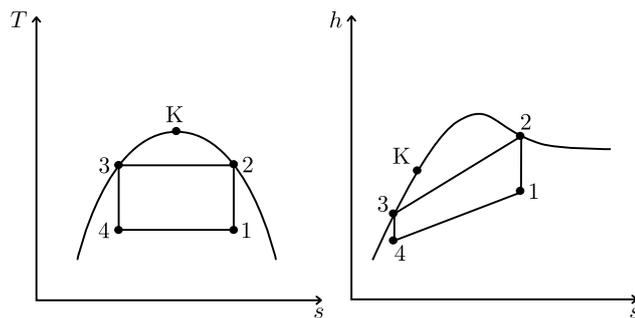
k) (1 Punkt) Da nur das flüssige Wasser abgeschieden wird und der Prozess isotherm abläuft, gilt:

- x wird kleiner; φ bleibt konstant, da sich die Dampfphase nicht ändert

f)

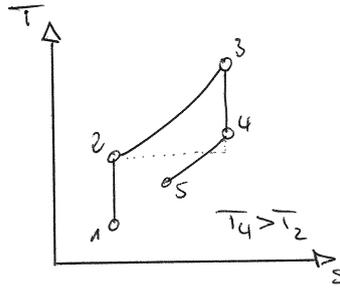


g)



2. Aufgabe: Gasturbine mit Dampferzeugung (21 Punkte)

a) (2 Punkte)



b) (5 Punkte)

$$\dot{V}_1 p_1 = \dot{m} \frac{\bar{R}}{M_{\text{Luft}}} T_1$$

$$\dot{V}_1 = \frac{50 \text{ kg/s} \cdot 8314 \text{ J/(kmolK)} \cdot 298 \text{ K}}{100000 \text{ Pa} \cdot 28,96 \text{ kg/kmol}} = \underline{42,78 \text{ m}^3/\text{s}}$$

$$T_1 p_1^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} = T_2 p_2^{\frac{1-\kappa}{\kappa}}$$

$$p_2 = p_1 \cdot \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{\kappa}{1-\kappa}}$$

$$p_2 = 1 \text{ bar} \cdot \left(\frac{298 \text{ K}}{600 \text{ K}} \right)^{\frac{1,4}{1-1,4}} = \underline{11,58 \text{ bar}}$$

$$p_3 = p_2 = \underline{11,58 \text{ bar}}$$

c) (5 Punkte)

$$\begin{aligned} \dot{W}_{12} &= \dot{m}_{\text{Luft}} (h_2 - h_1) \\ &= \dot{m}_{\text{Luft}} \cdot c_{p,\text{Luft}} (T_2 - T_1) \\ &= 50 \text{ kg/s} \cdot 1 \text{ kJ/(kg K)} (600 \text{ K} - 298 \text{ K}) = \underline{15100 \text{ kW}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{23} &= \dot{m}_{\text{Luft}} \cdot c_{p,\text{Luft}} (T_3 - T_2) \\ &= 50 \text{ kg/s} \cdot 1 \text{ kJ/(kg K)} (1500 \text{ K} - 600 \text{ K}) = \underline{45000 \text{ kW}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{W}_{34} &= \dot{m}_{\text{Luft}} \cdot c_{p,\text{Luft}} (T_4 - T_3) \\ &= 50 \text{ kg/s} \cdot 1 \text{ kJ/(kg K)} (1500 \text{ K} - 745 \text{ K}) = \underline{-37750 \text{ kW}} \end{aligned}$$

d) (4 Punkte)

$$\begin{aligned} \dot{W}_{\text{net}} &= \dot{W}_{12} + \dot{W}_{34} \\ \dot{W}_{\text{net}} &= 15100 \text{ kW} - 37750 \text{ kW} = \underline{-22650 \text{ kW}} \end{aligned}$$

$$\eta_{\text{GT}} = \frac{|\dot{W}_{\text{netto}}|}{\dot{Q}_{23}}$$

$$\eta_{\text{GT}} = \frac{22650 \text{ kW}}{45000 \text{ kW}} = \underline{50,33 \%}$$

e) (5 Punkte)

$$T_6 = T_7 = T_s (p_6 = 3 \text{ bar}) = \underline{406,69 \text{ K}} \quad \text{aus Wasserdampf tabel}$$

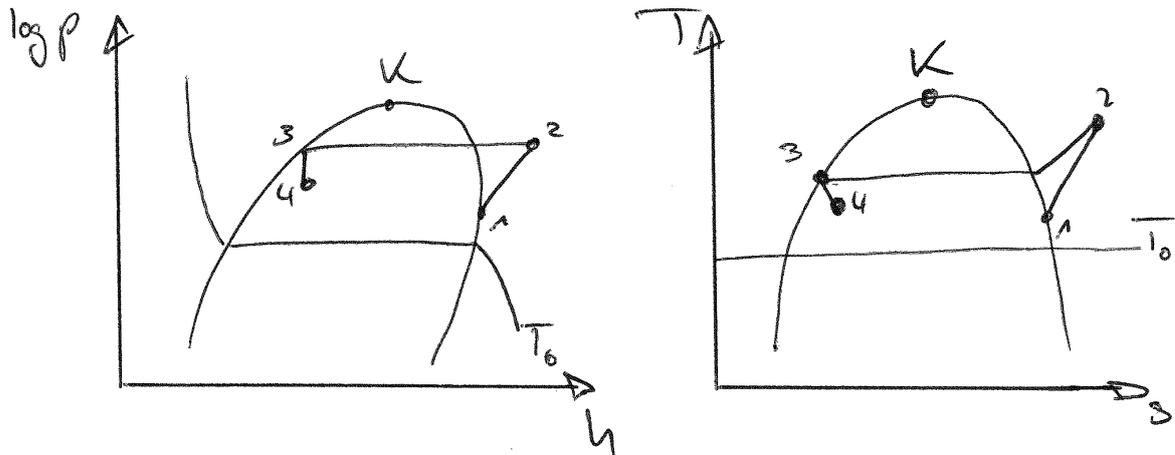
$$0 = \dot{m}_{\text{Luft}} (h_4 - h_5) + \dot{m}_{\text{Wasser}} (h_6 - h_7)$$

$$\dot{m}_{\text{Wasser}} = \dot{m}_{\text{Luft}} \cdot \frac{c_{p,\text{Luft}} (T_4 - T_5)}{h''(p_{6/7}) - h'(p_{6/7})}$$

$$\dot{m}_{\text{Wasser}} = 50 \text{ kg/s} \cdot \frac{1 \text{ kJ}/(\text{kgK}) (745 \text{ K} - 450 \text{ K})}{2723,2 \text{ kJ/kg} - 561,2 \text{ kJ/kg}} = \underline{6,82 \text{ kg/s}}$$

3. Aufgabe: Offener Wärmepumpenprozess (17 Punkte)

a) (7 Punkte)



b) (3 Punkte)

Zustand	T [K]	p [bar]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	x [-]
1	372,78	1,0	2673,80	7,3544	1
2	613,15	6,0	3143,80	7,5104	
3	431,99	6,0	670,10		0
4		4,0			

c) (2 Punkte)

$$\begin{aligned}
 LZ_{WP} &= \frac{|\dot{Q}_{23}|}{\dot{W}_{12}} = \frac{|q_{23}|}{w_{12}} \\
 &= \frac{|h_3 - h_2|}{h_2 - h_1} \\
 LZ_{WP} &= \frac{3143,80 - 670,10 \text{ kJ/kg}}{3143,80 - 2673,80 \text{ kJ/kg}} = \underline{5,26}
 \end{aligned}$$

d) (3 Punkte)

$$\begin{aligned}
 \eta_s &= \frac{\dot{W}_{12,s}}{\dot{W}_{12}} = \frac{w_{12,s}}{w_{12}} \\
 &= \frac{h_{2,s} - h_1}{h_2 - h_1}
 \end{aligned}$$

$$h_{12,s} = 3050,0 \text{ kJ/kg (mit Diagramm)}$$

$$h_{12,s} = 3051,7 \text{ kJ/kg (mit Interpolation aus WDT)}$$

$$\eta_s = \frac{3050,0 - 2673,8}{3143,8 - 2673,8} = \underline{0,800}$$

$$\eta_s = \frac{3051,7 - 2673,8}{3143,8 - 2673,8} = \underline{0,804}$$

e) (2 Punkte)

$$0 = \dot{S}_1 - \dot{S}_2 + \dot{S}_{gen,12}$$

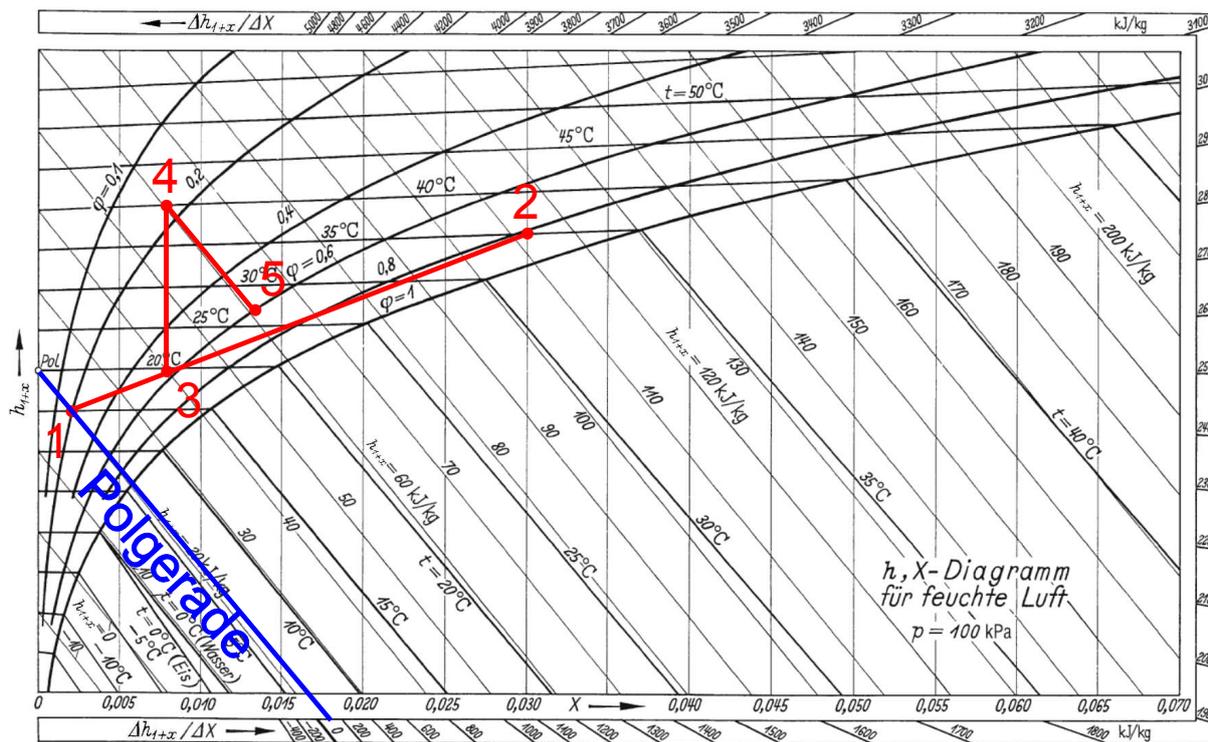
$$\Delta s_{gen,12} = (s_2 - s_1)$$

$$= (7,5104 \text{ kJ/kgK} - 7,3544 \text{ kJ/kgK})$$

$$\Delta s_{gen,12} = \underline{0,156 \text{ kJ/kgK}}$$

4. Aufgabe: Feuchte Luft (22 Punkte)

a) (4 Punkte)



$$x_1 = \underline{0,002}$$

$$\varphi_2 = \underline{0,81}$$

$$t_3 = \underline{19,5 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$\varphi_3 = \underline{0,56}$$

b) (4 Punkte)

$$0 = \dot{m}_{W,1} + \dot{m}_{W,2} - \dot{m}_{W,3}$$

$$0 = \dot{m}_{L,1} + \dot{m}_{L,2} - \dot{m}_{L,3}$$

$$x_i = \frac{\dot{m}_{W,i}}{\dot{m}_{L,i}}$$

$$\frac{\dot{m}_{L,1}}{\dot{m}_{L,2}} = \frac{x_2 - x_3}{x_3 - x_1} = \frac{0,03 - 0,008}{0,008 - 0,002} = \underline{3,67}$$

Alternative Lösung über das Gesetz der abgewandten Hebelarme (Strahlensatz):

$$\frac{\dot{m}_{L,1}}{\dot{m}_{L,2}} = \frac{\overline{23}}{\overline{13}}$$

$$\approx \frac{7,5 \text{ cm}}{2,1 \text{ cm}}$$

$$= 3,6$$

c) (5 Punkte)

$$x_4 = \underline{0,008}$$

$$\varphi_4 = \underline{0,17}$$

$$0 = \dot{Q}_{34} + \dot{H}_3 - \dot{H}_4$$

$$\dot{H}_i = \dot{m}_{L,i} h_{1+x}$$

$$h_{1+x,3} = 40 \text{ kJ/kg}_L$$

$$h_{1+x,4} = 60 \text{ kJ/kg}_L$$

$$q_{34} = \frac{\dot{Q}_{34}}{\dot{m}_L} = h_{1+x,4} - h_{1+x,3} = \underline{20 \text{ kJ/kg}_L}$$

d) (5 Punkte)

$$h_{W,5} = c_{p,W} \cdot t_5$$

$$h_{W,5} = 4,19 \text{ kJ/kgK} \cdot 20 \text{ °C} = \underline{83,8 \text{ kJ/kg}}$$

$$x_6 = 0,014$$

$$0 = \dot{m}_{W,4} + \dot{m}_{W,5} - \dot{m}_{W,6}$$

$$x_i = \frac{\dot{m}_{W,i}}{\dot{m}_{L,i}}$$

$$\frac{\dot{m}_{W,5}}{\dot{m}_{L,4}} = x_6 - x_4$$

$$\frac{\dot{m}_{W,5}}{\dot{m}_{L,4}} = 0,014 - 0,008 = \underline{0,006}$$

e) (4 Punkte)

$$p_{W,2} = y_{W,2} \cdot p_{\text{ges}}$$

$$y_{W,2} = \frac{n_{W,2}}{n_{L,2} + n_{W,2}}$$

$$\dot{n}_i = \frac{\dot{m}_i}{M_i}$$

$$x_i = \frac{\dot{m}_{W,i}}{\dot{m}_{L,i}}$$

$$p_{W,2} = p_{\text{ges}} \cdot \frac{x_2/M_W}{1/M_{\text{Luft}} + x_2/M_W}$$

$$p_{W,2} = 100 \text{ kPa} \cdot \frac{0,03/18,01 \text{ kg/kmol}}{1/28,96 \text{ kg/kmol} + 0,03/18,01 \text{ kg/kmol}} = \underline{4,60 \text{ kPa}}$$

Alternativer Lösungsweg über die Wasserdampf tabel oder h,s -Diagramm:

$$p_{W,2} = \varphi_2 \cdot p_s$$

$$p_s(20 \text{ °C}) = 0,0234 \text{ bar}$$

$$p_s(40 \text{ °C}) = 0,0737 \text{ bar}$$

$$p_s(35 \text{ °C}) = \left(\frac{0,0737 - 0,0234}{40 - 20} (35 - 20) + 0,0234 \right) \text{ bar}$$

$$p_s(35\text{ }^\circ\text{C}) = 0,061125\text{ bar}$$

$$p_{w,2} = 0,8 \cdot 0,061125\text{ bar} = \underline{4,89\text{ kPa}}$$