

Musterlösung zur Klausur  
Thermodynamik I – Sommersemester 2014

# 1. Aufgabe (2014): Theoriefragen (20 Punkte)

a) (1 Punkt)

Intensive Zustandsgrößen bleiben bei Teilung des Systems konstant. Extensive Zustandsgrößen sind von der Systemgröße abhängig. (1 Punkt)

b) (2 Punkte)

Masse (ohne Kernreaktionen, 1 Punkt), Energie (1 Punkt), Impuls (1 Punkt), Elektrische Ladung (1 Punkt)

c) (2 Punkte)

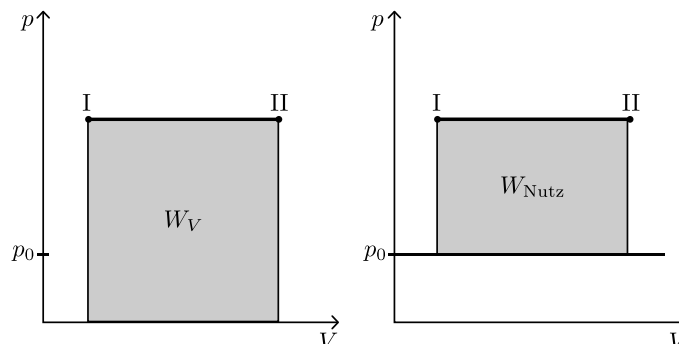
Entropiebilanz:  $0 = \frac{\dot{Q}_{zu}}{T_{zu}} - \frac{\dot{Q}_{ab}}{T_{ab}} + \dot{S}_{gen} \Rightarrow \dot{S}_{gen} = -\frac{1000 \text{ kW}}{1000 \text{ K}} + \frac{200 \text{ kW}}{400 \text{ K}} = -0,5 \text{ kW/K} \leq 0$  (1 Punkt)  
 Entropieerzeugung kann nicht kleiner als null sein. Ein Betrieb ist nicht möglich. (1 Punkt)

d) (2 Punkte)

Leistungszahl:  $LZ_{WP} = \frac{Q_{ab}}{W_{zu}}$  (1 Punkt)

Exergetischer Wirkungsgrad:  $\epsilon_{WP} = \frac{E_{Q,ab}}{W_{zu}}$  (1 Punkt)

e) (2 Punkte) Jeweils 1 Punkt für das Einzeichnen von  $W_V$  und  $W_{Nutz}$



f) (2 Punkte)

Zustandsgleichung ideales Gas:  $v = \frac{\bar{R}T}{Mp} \Rightarrow \frac{\partial v}{\partial T} = \frac{\bar{R}}{Mp}$  (1 Punkt)

Einsetzen in Gleichung bringt:  $dh = c_p(T,p) dT + \left[ v - T \frac{\bar{R}}{Mp} \right] dp = c_p(T,p) dT + [v - v] dp$   
 $dh = c_p dT$  (1 Punkt)

g) (2 Punkte) Jeweils 1 Punkt für Zeichnen des Nassdampfgebiets und die Verdampfungsenthalpie. Verdampfung muss links vom kritischen Punkt beginnen.

h) (2 Punkte) Jeweils 0,5 Punkte pro Zustandsänderung

j) (2 Punkte)

Energiebilanz liefert, dass die Enthalpie konstant ist.  $\Rightarrow \dot{H}_{ein} = \dot{H}_{aus}$  (1 Punkt)

Austrittszustand liegt im Nassdampfgebiet, Temperatur muss demzufolge sinken. (1 Punkt)

$\Rightarrow T = f(p) \Rightarrow p \downarrow$  führt zu  $T \downarrow$

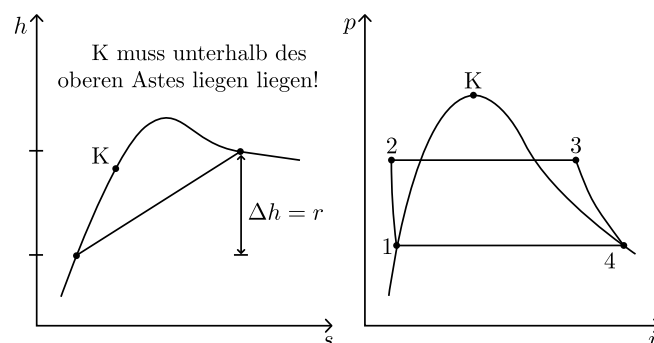
k) (3 Punkte) Grundlage: Kompression erhöht den Gesamtdruck  $p \uparrow$

Partialdruck:  $p_{H_2O} = y_{H_2O} \cdot p$  mit  $y_{H_2O} = \text{konstant}$  folgt  $p_{H_2O} \uparrow$  (1 Punkt)

Sättigungsdampfdruck:  $p_s = f(T)$  mit  $T = \text{konstant}$  folgt  $p_s = \text{konstant}$  (1 Punkt)

Relative Luftfeuchtigkeit:  $\varphi = \frac{p_{H_2O}}{p_s}$  es folgt  $\varphi \uparrow$  (1 Punkt)

Diagramme für g) und h):



## 2. Aufgabe: Ideales Gas – Kompression von CO<sub>2</sub> (17 Punkte)

a) (2 Punkte)

$$\begin{aligned}p_2 \dot{V}_2 &= \dot{m}_{\text{CO}_2} \frac{\bar{R}}{M_{\text{CO}_2}} T_2 \\ \dot{V}_2 &= \dot{m}_{\text{CO}_2} \frac{\bar{R}}{M_{\text{CO}_2}} \frac{T_2}{p_2} \\ \dot{V}_2 &= 10 \cdot \frac{8314}{44} \cdot \frac{530,15}{10 \cdot 10^5} \text{ m}^3/\text{s} \\ \dot{V}_2 &= \underline{1,00 \text{ m}^3/\text{s}}\end{aligned}$$

b) (3 Punkte)

$$\begin{aligned}\frac{dU}{d\tau} &= 0 = \dot{W}_{12} + \dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_2 h_2 \\ dh &= c_p dT \\ h_2 - h_1 &= c_{p,\text{CO}_2} (T_2 - T_1) \\ \dot{W}_{12} &= \dot{m}_{\text{CO}_2} c_{p,\text{CO}_2} (T_2 - T_1) \\ &= 10 \cdot 0,9 \cdot (530,15 - 298,15) \text{ kW} \\ \dot{W}_{12} &= \underline{2088 \text{ kW}}\end{aligned}$$

c) (5 Punkte)

$$\begin{aligned}T_1 p_1^{\frac{1-k}{k}} &= T_{2,s} p_2^{\frac{1-k}{k}} \\ T_{2,s} &= T_1 \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1-k}{k}} \\ &= 298,15 \left( \frac{1}{10} \right)^{\frac{1-1,26}{1,26}} \\ T_{2,s} &= \underline{479,49 \text{ K}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\eta_s &= \frac{\dot{W}_{12,s}}{\dot{W}_{12}} = \frac{w_{12,s}}{w_{12}} = \frac{T_{2,s} - T_1}{T_2 - T_1} \\ &= \frac{1632,10}{2088} = \frac{163,10}{208,8} = \frac{479,49 - 298,15}{530,15 - 298,15} \\ \eta_s &= \underline{0,7816}\end{aligned}$$

alternativer Weg über  $\dot{W}_{12,s}$ :

$$\begin{aligned}\dot{W}_{12,s} &= \dot{m}_{\text{CO}_2} c_{p,\text{CO}_2} (T_{2,s} - T_1) \\ &= 10 \cdot 0,9 \cdot (479,49 - 298,15) \text{ kW} \\ \dot{W}_{12,s} &= \underline{1632,10 \text{ kW}}\end{aligned}$$

d) (3 Punkte)

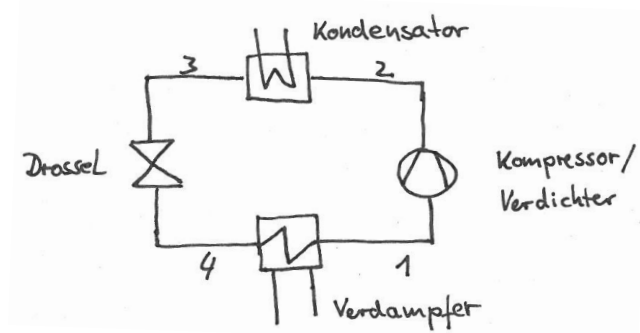
$$\begin{aligned}\frac{dU}{d\tau} = 0 &= \dot{Q} + \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_3 h_3 \\ \dot{m}_2 &= \dot{m}_3 = \dot{m}_{\text{CO}_2} \\ dh &= c_p dT \\ h_3 - h_2 &= c_{p,\text{CO}_2} (T_3 - T_2) \\ \dot{Q} &= \dot{m}_{\text{CO}_2} c_{p,\text{CO}_2} (T_3 - T_2) \\ &= 10 \cdot 0,9 \cdot (373,15 - 530,15) \text{ kW} \\ \dot{Q} &= \underline{-1413 \text{ kW}} \quad )\end{aligned}$$

e) (4 Punkte)

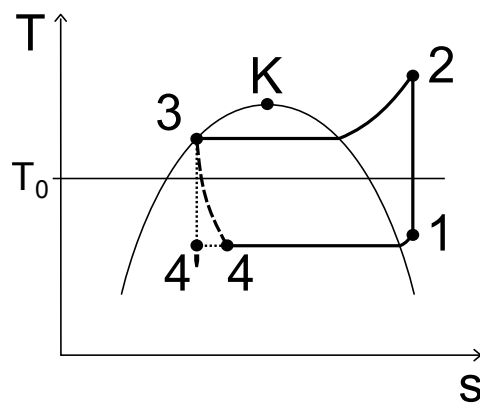
$$\begin{aligned}\frac{dS}{d\tau} = 0 &= \dot{m}_1 s_1 - \dot{m}_3 s_3 + \dot{m}_4 s_4 - \dot{m}_5 s_5 + \dot{S}_{gen} \\ \dot{S}_{gen} &= \dot{m}_3 s_3 - \dot{m}_1 s_1 + \dot{m}_5 s_5 - \dot{m}_4 s_4 \\ &= \dot{m}_{\text{CO}_2} (s_3 - s_1) + \dot{m}_{\text{Luft}} (s_5 - s_4) \\ ds &= c_p \frac{dT}{T} - \frac{\bar{R}}{M} \frac{dp}{p} \\ s_3 - s_1 &= c_{p,\text{CO}_2} \ln \left( \frac{T_3}{T_1} \right) - \frac{\bar{R}}{M_{\text{CO}_2}} \ln \left( \frac{p_3}{p_1} \right) \\ \dot{S}_{gen} &= 10 \cdot (-0,2331) \frac{\text{kW}}{\text{K}} + 282,6 \cdot (6,8787 - 6,8620) \frac{\text{kW}}{\text{K}} \\ \dot{S}_{gen} &= \underline{2,3884 \text{ kW/K}}\end{aligned}$$

### 3. Aufgabe: Kompressionskältemaschine (19 Punkte)

a) (2 Punkte)

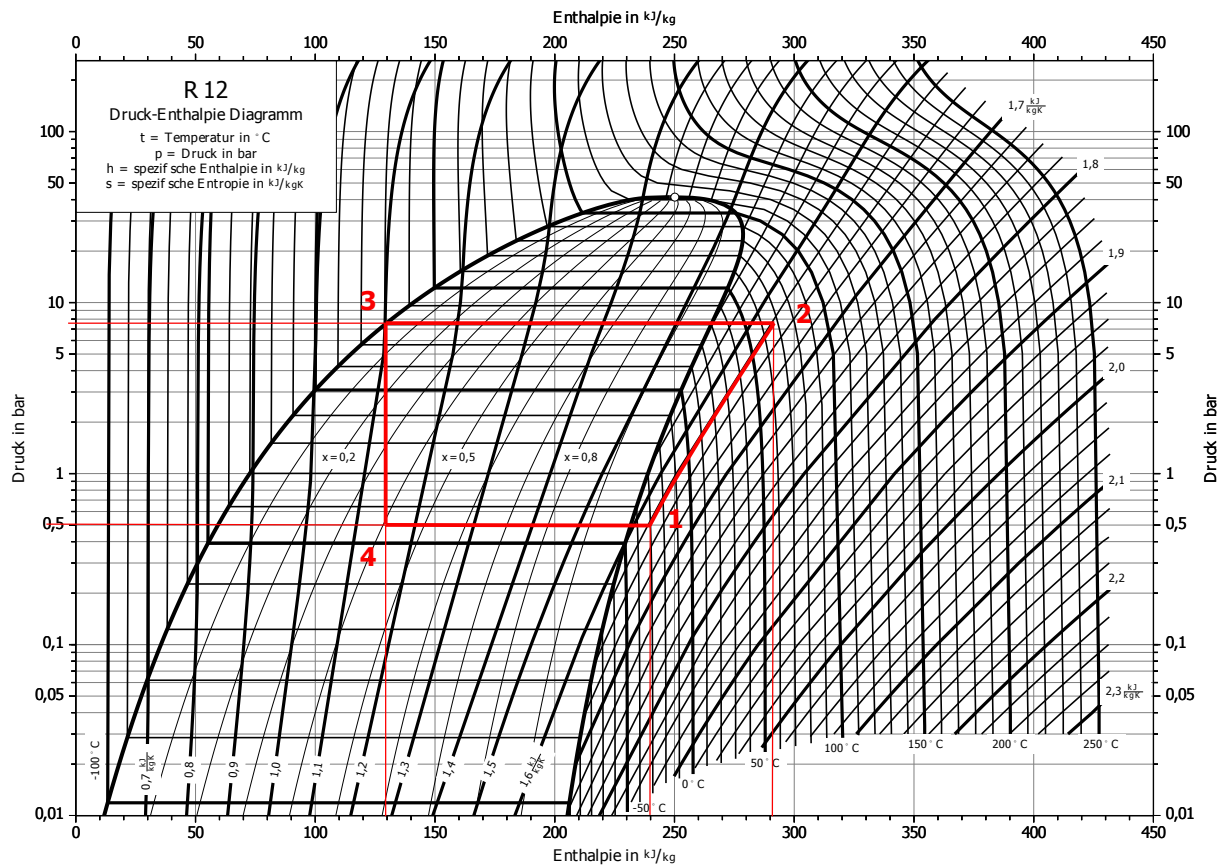


b) (3 Punkte)



c) (6 Punkte)

Zustand	$T$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$p$ [bar]	$h$ [kJ/kg]	$s$ [kJ/kgK]	$x$ [-]
1	-30		240		
2	65, $61 < T_2 < 69$		290	1,626, $1,625 \leq s_2 \leq 1,64$	
3	30	7,2, $7 < P_3 < 7,9$	130		
4		0,5	130		0,41, $0,4 < x_4 < 0,43$



d) (2 Punkte)

$$\frac{dU}{d\tau} = 0 = \dot{Q}_{12} + \dot{m}(h_4 - h_1)$$

$$\dot{m} = \frac{2}{110} = 0,018 \text{ kg/s}$$

Mit Zwischenergebnis:

$$\dot{m} = \frac{2}{120} = 0,0167 \text{ kg/s}$$

e) (6 Punkte)

$$\begin{aligned} LZ &= \frac{\dot{Q}_{41}}{\dot{W}_{12}} \\ &= \frac{q_{41}}{w_{12}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \\ &= \frac{110}{50} = 2,2 \end{aligned}$$

Mit Zwischenergebnis:

$$LZ = \frac{120}{40} = 3$$

mit Turbine statt Drossel:

Arbeit im Diagramm: Einzeichnen von 4' (0,5 Punkte); richtiges Ablesen (0,5 Punkte)

$$\begin{aligned} LZ &= \frac{\dot{Q}_{4'1}}{\dot{W}_{12} + \dot{W}_{34}} \\ &= \frac{q_{4'1}}{w_{12} + w_{34'}} = \frac{h_1 - h_4'}{(h_2 - h_1) + (h_{4'} - h_3)} \\ &= \frac{120}{50 - 10} = 3 \end{aligned}$$

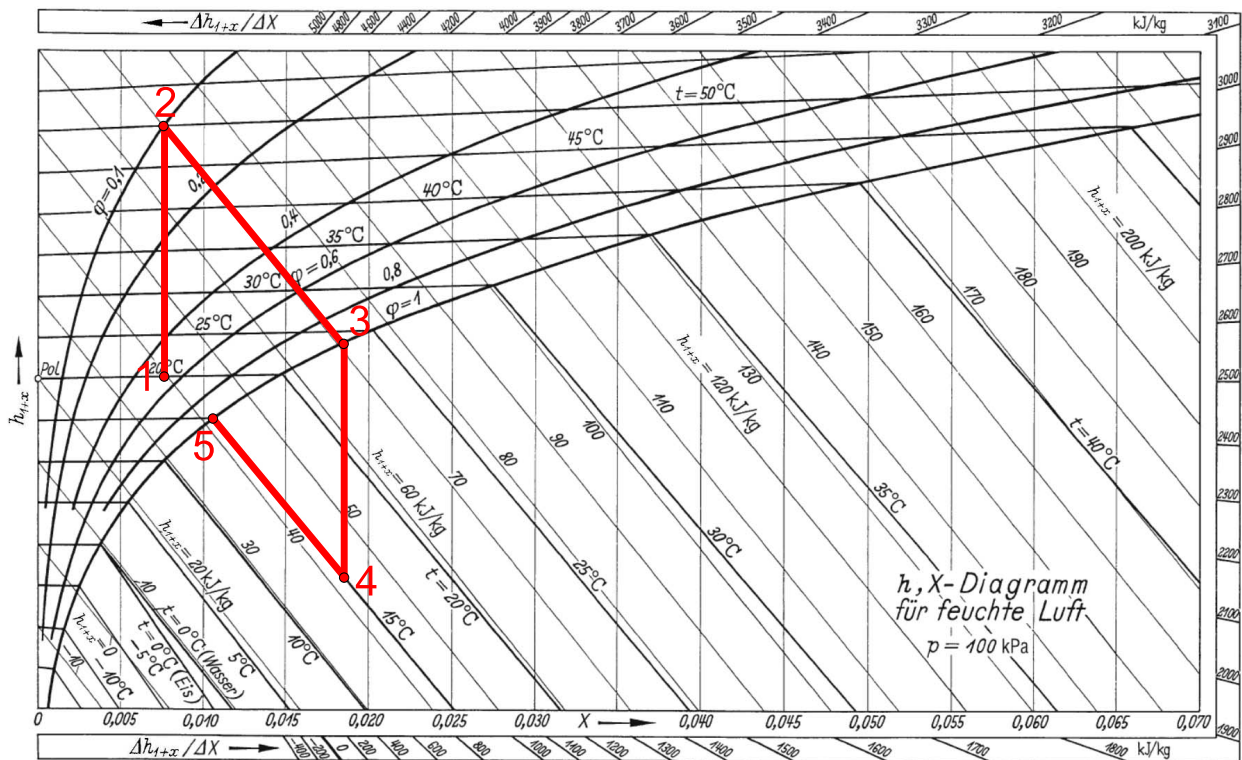
Mit Zwischenergebnis:

$$LZ = \frac{130}{40 - 10} = 4,33$$

## 4. Aufgabe: Feuchte Luft (12 Punkte)

a) (6 Punkte)

Zustand	$T$ [°C]	$\varphi$ [-]	$x$ [kg <sub>W</sub> /kg <sub>L</sub> ]	$h_{1+x}$ [kJ/kg]
1	20	0,5	0,0075	40
2	50	0,1		70
3	24	1,0	0,019	71
4	15			
5	15	1,0	0,010	



b) (2 Punkte)

$$\frac{dU}{d\tau} = 0 = \dot{Q}_{12} + \dot{m}_{L,1}h_{1+x,1} - \dot{m}_{L,2}h_{1+x,2}$$

$$q_{12} = \frac{\dot{Q}_{12}}{\dot{m}_L} = h_{1+x,2} - h_{1+x,1} = \underline{30 \text{ kJ/kg}}$$

c) (3 Punkte)

$$0 = \dot{m}_{W,2} - \dot{m}_{W,3} + \dot{m}_{W,zu,23}$$

$$x_i = \dot{m}_{W,i} / \dot{m}_L$$

$$\frac{\dot{m}_{W,zu,23}}{\dot{m}_L} = x_3 - x_2 = 0,0115 \text{ kg}_W/\text{kg}_L$$

d) (1 Punkt)



## 5. Aufgabe (2014): Verbrennung (12 Punkte)

a) (3 Punkte)

$$a_{\text{stöch}} = 5 \Rightarrow \lambda \cdot a_{\text{stöch}} = 15$$

$$\lambda = \frac{\dot{n}_{\text{O}_2}}{\dot{n}_{\text{O}_2, \text{stöch}}} = \frac{\lambda \cdot a_{\text{stöch}}}{a_{\text{stöch}}} = 3$$

b) (3 Punkte)

$$\begin{aligned} \dot{n}_{\text{Abgas}} &= \dot{n}_{\text{CO}_2} + \dot{n}_{\text{H}_2\text{O}} + \dot{n}_{\text{O}_2} \\ &= 3 \dot{n}_{\text{C}_3\text{H}_8} + 4 \dot{n}_{\text{C}_3\text{H}_8} + 10 \dot{n}_{\text{C}_3\text{H}_8} \\ &= 17 \dot{n}_{\text{C}_3\text{H}_8} = 34 \text{ mol/s} \end{aligned}$$

c) (3 Punkte)

$$\begin{aligned} 0 &= \overbrace{\dot{Q}}^{=0} + \overbrace{\dot{W}_{CV}}^{=0} + \dot{H}_{\text{C}_3\text{H}_8} + \dot{H}_{\text{O}_2} - \dot{H}_{\text{Abgas}} \\ \Rightarrow \dot{H}_{\text{Abgas}} &= \dot{H}_{\text{C}_3\text{H}_8} + \dot{H}_{\text{O}_2} = \dot{n}_{\text{C}_3\text{H}_8} \bar{h}_{\text{C}_3\text{H}_8} + \dot{n}_{\text{O}_2} \bar{h}_{\text{O}_2} \\ &= \dot{n}_{\text{C}_3\text{H}_8} \bar{h}_{\text{ref}, \text{C}_3\text{H}_8} + \dot{n}_{\text{O}_2} \bar{h}_{\text{ref}, \text{O}_2} \\ &= 2 \text{ mol/s} \cdot (-103,850 \text{ kJ/mol}) + \dot{n}_{\text{O}_2} \cdot 0 \\ &= -207,7 \text{ kW} \end{aligned}$$

d) (3 Punkte)

$$\begin{aligned} \bar{h}_{\text{Abgas}} &= \frac{\dot{H}_{\text{Abgas}}}{\dot{n}_{\text{Abgas}}} = -6,108 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \\ T_{\text{Abgas}} &= 3750 \text{ K} + \frac{4000 \text{ K} - 3750 \text{ K}}{(-3,549) - (-28,460)} \left[ (-6,108) - (-28,460) \right] \frac{\text{kJ/mol}}{\text{kJ/mol}} \\ &= 3974,3 \text{ K} \quad (\text{mit Hinweis : } 3955,3 \text{ K}) \end{aligned}$$