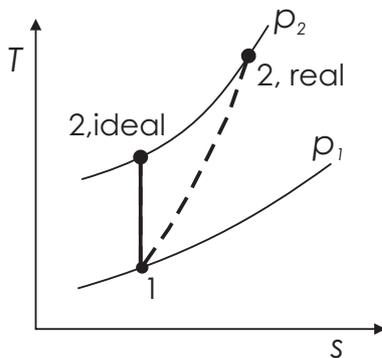


Lösung zur Thermoklausur 2012

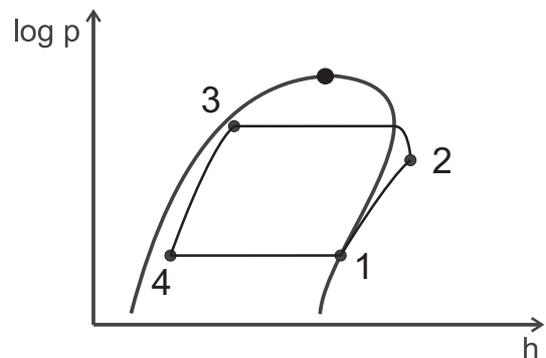
1. Aufgabe (2012): Theoretische Fragen (20 Punkte)

- a) (1 Punkt) Wenn sich für einen (beliebig) festgelegten Ortspunkt alle Zustandsgrößen *nicht* mit der Zeit ändern, spricht man von einem stationären Prozess.
- b) (1 Punkt) Bei einem geschlossenen Kreisprozess führt die letzte Zustandsänderung zum ersten Zustandspunkt.
- c) (2 Punkte) $\eta_{max} = (1 - \frac{100K}{300K}) = 66,66\%$; $\varepsilon_{max} = 1$
- d) s. Abb. unten
- e) (2 Punkte) $LZ_{WP} = \frac{|\dot{Q}_{ab}|}{\dot{W}_{zu}}$. Mit $|\dot{Q}_{ab}| = \dot{W}_{zu} + \dot{Q}_{zu}$ (Energiebilanz) wird deutlich, dass die Leistungszahl für $\dot{Q}_{zu} = 0$ genau 1 beträgt und für $\dot{Q}_{zu} > 0$ größer als 1 ist.
- f) (2 Punkte) Für $p = \text{konstant}$ folgt aus der Fundamentalgleichung $(\frac{\partial h}{\partial s})_p = T$. Im Nassdampfgebiet ist eine isobare Zustandsänderung gleichzeitig isotherm, woraus folgt: $(\frac{\partial h}{\partial s})_p = T = \text{konstant}$.
- g) (2 Punkte) $1 C_3H_8 + \underbrace{3}_{\lambda} \cdot 5 O_2 \rightarrow 3 CO_2 + 4 H_2O + \underbrace{2}_{\lambda-1} \cdot 5 O_2$
- h) (1 Punkt) Ein Fluid ist überkritisch, wenn $T > T_{krit}$ und $p > p_{krit}$.
- i) (2 Punkte) Ja, wenn eine Wärmesenke bei $T < T_0$ vorhanden ist.
- j) (2 Punkte) Dampfförmig und fest (Eis). Wenn h_{1+x} negativ ist, muss die Temperatur unterhalb von $0^\circ C$ liegen, vgl. h_{1+x}, x -Diagramm oder die Formeln für h_{1+x} . Sofern $x > 0$, existiert eine Dampfphase von Wasser und für $x > x_s$ auch eine weitere Phase, die bei $t < 0^\circ C$ fest ist. (Im Grenzfall kann h_{1+x} auch bei $0^\circ C$ negativ werden, wenn viel Eis vorliegt. In dem Fall kann zusätzlich auch eine flüssige Phase existieren \rightarrow Tripelpunkt für Wasser.)

d) (2 Punkte)

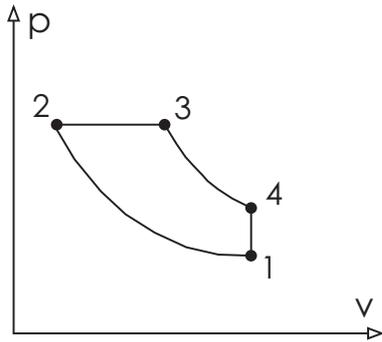


k) (3 Punkte)



2. Aufgabe (2012): Wärmekraftmaschine (18 Punkte)

a) (2 Punkte)



b) (3 Punkte)

$$p_{\max, \text{zulaessig}} \geq p_{\max} = p_2 = p_3 ?$$

$$p_3 = \frac{R T_3}{v_3} = \frac{0,287 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} 1200 \text{ K}}{0,08 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} = 43,05 \text{ bar}$$

c) (5 Punkte)

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^{\kappa-1}$$

$$\Rightarrow T_4 = T_3 \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^{\kappa-1} = T_3 \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^{\kappa-1} = 1200 \text{ K} \left(\frac{0,08 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}}{0,8 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} \right)^{1,4-1} = 477,73 \text{ K}$$

$$q_{41} = u_1 - u_4 = c_v (T_1 - T_4) = 0,72 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} (300 \text{ K} - 477,73 \text{ K}) = -127,965 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

d) (5 Punkte)

$$\int_1^2 ds = \int_1^2 \frac{c_v dT}{T} + \int_1^2 R \frac{dv}{v} = \int_1^2 R \frac{dv}{v}$$

$$\Rightarrow \Delta s_{12} = R \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right) = 0,287 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \ln \left(\frac{0,02 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}}{0,8 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} \right) = -1,059 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$\Delta s_{12} = \frac{q_{12}}{T_{12}}$$

$$\Rightarrow q_{12} = \Delta s_{12} T_{12} = -1,059 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot 300 \text{ K} = -317,613 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

alternativer Lösungsweg:

$$s_2 - s_1 = \frac{q_{12}}{T_{12}}$$

$$u_2 - u_1 = c_v(T_2 - T_1) = 0 = w_{12} + q_{12}$$

$$\begin{aligned} q_{12} = -w_{12} &= \int_1^2 p \, dv = RT \int_1^2 \frac{1}{v} \, dv = RT \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \\ &= 0,287 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot 300 \text{ K} \cdot \ln \left(\frac{0,02 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}}{0,8 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} \right) = -317,613 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

$$s_2 - s_1 = \frac{q_{12}}{T_{12}} = \frac{-317,613 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{300 \text{ K}} = -1,059 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

e) (3 Punkte)

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{|\text{Nutzen}|}{\text{Aufwand}} = \frac{|w_{\text{netto}}|}{q_{\text{zu}}} = \frac{|w_{\text{netto}}|}{-w_{\text{netto}} - q_{12} - q_{41}} \\ &= \frac{|-460,723 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}|}{460,723 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 317,613 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 127,965 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 50,84\% \quad (\text{mit Hinweis : } 47,96\%) \end{aligned}$$

3. Aufgabe (2012): Dampfturbine (19 Punkte)

a) (2 Punkte)

$$t_3 = t(h_3, p_3) \approx 600^\circ C \quad (\text{aus } h, s\text{-Diagramm})$$

$$t_4 = t_s(p_4) \approx 100^\circ C \quad (\text{aus } h, s\text{-Diagramm oder Wasserdampf tabel})$$

b) (7 Punkte)

$$\dot{W}_{34} = \dot{m}_{3/4}(h_4 - h_3)$$

$$h_4 \approx 2540 \frac{kJ}{kg} \quad (\text{aus } h, s\text{-Diagramm})$$

$$\dot{W}_{34} = 100 \frac{kg}{s} (2540 - 3540) \frac{kJ}{kg} = -100 MW$$

$$\dot{S}_{gen,34} = \dot{m}_{3/4}(s_4 - s_3)$$

$$s_3 = s(h_3, p_3) \approx 6,5 kJ/kg K \quad (\text{aus } h, s\text{-Diagramm})$$

$$s_4 = s(p_4, x_4) \approx 7 kJ/kg K \quad (\text{aus } h, s\text{-Diagramm})$$

$$\dot{E}_{D,34} = 300 K \cdot 100 \frac{kg}{s} (7 - 6,5) \frac{kJ}{kg K} = 15 MW$$

c) (3 Punkte)

$$\eta_{S,T} = \frac{h_4 - h_3}{h_{4,s} - h_3}$$

$$h_{4,s} = h(s_3, p_4) \approx 2355 \frac{kJ}{kg} \quad (\text{aus } h, s\text{-Diagramm})$$

$$\eta_{S,T} = \frac{2540 - 3540}{2355 - 3540} = 0,844$$

d) (3 Punkte)

Zustand 1, 2 und 3 liegen auf der selben Isobaren (200 bar), Zustand 1 ist überhitzt und Zustand 2 unterkühlt. Zustand 4 liegt auf einer Isobaren eines kleineren Druckes und befindet sich im Nassdampfgebiet rechts unterhalb des Punktes 3.

e) (4 Punkte)

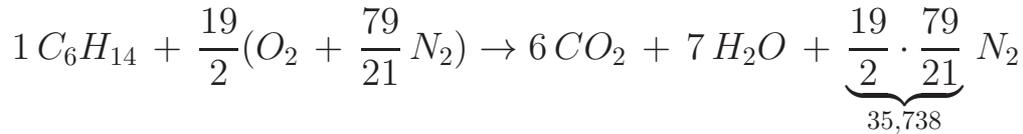
$$\dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_1 + \dot{m}_2$$

$$\Rightarrow \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} = \frac{h_2 - h_3}{h_3 - h_1} = \frac{400 - 3540}{3540 - 3600} = 52,3$$

4. Aufgabe (2012): Verbrennung (13 Punkte)

a) (4 Punkte)



b) (4 Punkte)

$$\frac{\dot{n}_{Abgas}}{\dot{n}_{C_6H_{14}}} = \frac{\dot{n}_{CO_2}}{\dot{n}_{C_6H_{14}}} + \frac{\dot{n}_{H_2O}}{\dot{n}_{C_6H_{14}}} + \frac{\dot{n}_{N_2}}{\dot{n}_{C_6H_{14}}} = 6 + 7 + 35,738 = 48,738$$
$$\dot{n}_{Abgas} = \dot{n}_{C_6H_{14}} \cdot 48,738 = 0,02 \frac{mol}{s} \cdot 48,738 = 0,975 \frac{mol}{s}$$

$$y_{CO_2} = \frac{6}{48,738} = 0,1231$$

$$y_{H_2O} = \frac{7}{48,738} = 0,1436$$

$$y_{N_2} = \frac{35,738}{48,738} = 0,7333$$

c) (3 Punkte)

$$p_{H_2O,S}(t_{Abgas}) = p_{H_2O}^{Gasphase} = y_{H_2O}^{Gasphase} \cdot p_{Abgas} = 0,025 \cdot 0,936 \text{ bar} = 0,0234 \text{ bar}$$

$\rightarrow t_{Abgas} = 20^\circ C$ (Wasserdampftafel)

d) (2 Punkte)

$$M_{Abgas} = \sum_i M_i y_i = 44 \frac{g}{mol} 0,1231 + 18 \frac{g}{mol} 0,1436 + 28 \frac{g}{mol} 0,7333 = 28,528 \frac{g}{mol}$$

$$\dot{m}_{Abgas} = M_{Abgas} \dot{n}_{Abgas} = 28,528 \frac{g}{mol} 0,975 \frac{mol}{s} = 27,815 \frac{g}{s}$$

5. Aufgabe (2012): Feuchte Luft (10 Punkte)

a) (2 Punkte)

$$x_2 = \frac{M_W}{M_L} \cdot \frac{p_{W,s}(T)}{(p/\varphi_2) - p_{W,s}(T)} \quad \text{mit } p_{W,s}(60^\circ\text{C}) = 0,1992 \text{ bar}$$
$$= \frac{18}{29} \cdot \frac{0,1992 \text{ bar}}{(2 \text{ bar}/1) - 0,1992 \text{ bar}} = 0,06866$$

b) (3 Punkte)

$$\dot{m}_{W,2} = \dot{m}_{W,1} + \dot{m}_{Wasser}$$

$$0 = \dot{m}_{L,1} - \dot{m}_{L,2} \quad \Rightarrow \dot{m}_{L,1} = \dot{m}_{L,2} = \dot{m}_L$$

$$x = \frac{\dot{m}_W}{\dot{m}_L}$$

$$\Rightarrow \dot{m}_{Wasser} = \dot{m}_L(x_2 - x_1) = 50 \frac{\text{kg}}{\text{s}}(0,06866 - 0,01) = 2,933 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

c) (5 Punkte)

$$0 = \dot{Q} + \dot{m}_L h_{1+x,1} + \dot{m}_{Wasser} h_{Wasser} - \dot{m}_L h_{1+x,2}$$

$$h_{Wasser} = c_{p,W,fl} t_{Wasser} = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} 100^\circ\text{C} = 419 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{1+x,2} = c_{p,L} t_2 + x_2(r_0 + c_{p,Wd} t_2)$$

$$= 1,004 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} 60^\circ\text{C} + 0,06866(2500 + 1,86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} 60^\circ\text{C}) = 239,55 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{1+x,1} = c_{p,L} t_1 + x_1(r_0 + c_{p,Wd} t_1) = 0,01 \cdot 2500 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} = 25 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\Rightarrow \dot{Q} = \dot{m}_L (h_{1+x,2} - h_{1+x,1}) - \dot{m}_{Wasser} h_{Wasser}$$
$$= 50 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (239,55 - 25) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2,933 \frac{\text{kg}}{\text{s}} 419 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$
$$= 9\,498,6 \text{ kW}$$