Lösung der Klausur im Fach „Höhere Thermodynamik“ am 03.03.2011

Aufgabe	1	2	3	4	5	Σ
mögliche Punkte	13	6	6	7	13,5	45,5

1. Aufgabe

a) $T \cdot \mathrm{d}s = \delta q + \delta w_R \Rightarrow 0 = \delta q + \delta w_R \Rightarrow \delta q \leq 0 \quad \text{wg.} \quad \delta w_R \geq 0$ $\boxed{1{,}0\,\mathrm{P}}$

$\delta w_R + \delta w_V + \delta q = \mathrm{d}u \Rightarrow \delta w_V = \mathrm{d}u \Rightarrow (3)$ $\boxed{1{,}0\,\mathrm{P}}$

b) $\mathrm{d}s = \dfrac{\mathrm{d}h - v \cdot \mathrm{d}p}{T} \Rightarrow T \cdot \int_{/}^{//} \mathrm{d}s = \int_{/}^{//} \mathrm{d}h \quad \text{wg.} \quad T = const. \wedge p = const. \Rightarrow T \cdot \left(s^{//} - s^{/}\right) = h^{//} - h^{/}$ $\boxed{2{,}0\,\mathrm{P}}$

c) $\mathrm{d}p = \left(\dfrac{\partial p}{\partial T}\right)_V \cdot \mathrm{d}T + \left(\dfrac{\partial p}{\partial V}\right)_T \cdot \mathrm{d}V \Rightarrow 0 = \left(\dfrac{\partial p}{\partial T}\right)_V \cdot \left(\dfrac{\partial T}{\partial V}\right)_p + \left(\dfrac{\partial p}{\partial V}\right)_T$ $\boxed{2{,}0\,\mathrm{P}}$

$$\Rightarrow \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_p = -\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_T \Rightarrow p \cdot \gamma \cdot \frac{1}{V} \cdot \frac{1}{\beta} = \frac{1}{V} \cdot \frac{1}{\chi} \Rightarrow \beta = p \cdot \gamma \cdot \chi$$ $\boxed{1{,}0\,\mathrm{P}}$

d) $\mathrm{d}s_{irr} = \dfrac{\delta w_R}{T}$ wird kleiner für größere Temperaturen, also ungünstiger bei 100 K $\boxed{2{,}0\,\mathrm{P}}$

e) $\mathrm{d}e = \mathrm{d}u - T_u \cdot \mathrm{d}s \Rightarrow \mathrm{d}u = \delta q \wedge \mathrm{d}s = \dfrac{\delta q}{T}$

$\left(\mathrm{d}e = \delta q \cdot \left(1 - \dfrac{T_u}{T}\right) \wedge T_u > T\right) \Rightarrow \left(1 - \dfrac{T_u}{T}\right) < 0 \Rightarrow \mathrm{d}e < 0$ $\boxed{1{,}0\,\mathrm{P}}$

$\Rightarrow$ Exergie des Kühlraums verringert sich bei Wärmezufuhr von außen $\boxed{1{,}0\,\mathrm{P}}$

f) $\delta w_R + \delta w_V + \delta q = \mathrm{d}u = c_v \cdot \mathrm{d}T + \left(\dfrac{\partial u}{\partial v}\right)_T \cdot \mathrm{d}v$

Kann man nicht sagen (3), da keine Aussagen bezüglich der Energieströme über die Systemgrenze gemacht wurden. $\boxed{1{,}0\,\mathrm{P}}$

g) Später (2), da sich das siedende Wasser schneller abkühlt als sich das eiskalte Wasser erwärmt und somit nach dem Mischen die Temperatur weniger ansteigt. $\boxed{1{,}0\,\mathrm{P}}$

2. Aufgabe

$$\Delta S_{12} = \underbrace{S_2}_{=s_u \cdot m_{12}} - \underbrace{S_1}_{=0,\text{ da leer}} = s_u \cdot m_2 + S_{irr_{12}} + \frac{Q_{12}}{T_u} \;\Rightarrow\; S_{irr_{12}} = -\frac{Q_{12}}{T_u} \qquad \boxed{2{,}0\,\mathrm{P}}$$

$$Q_{12} + h_u \cdot m_2 = \Delta U_{12} = \underbrace{U_2}_{=u_u \cdot m_{12}} - \underbrace{U_1}_{=0} \;\Rightarrow\; Q_{12} + \left(h_u - u_u\right) \cdot m_2 = 0 \qquad \boxed{2{,}0\,\mathrm{P}}$$

$$\left(h_u - u_u = p_u \cdot v_u \;\wedge\; p_u \cdot v_u = R_L \cdot T_u\right) \;\Rightarrow\; Q_{12} = -m_2 \cdot R_L \cdot T_u \qquad \boxed{1{,}0\,\mathrm{P}}$$

$$\Rightarrow\; S_{irr_{12}} = m_2 \cdot R_L \quad \text{mit} \quad m_2 = \frac{p_u \cdot V}{R_L \cdot T_u} \;\Rightarrow\; S_{irr_{12}} = \frac{p_u \cdot V}{T_u} = \frac{100000\ \mathrm{Pa} \cdot 1\,\mathrm{m}^3}{293{,}15\,\mathrm{K}} = 341\,\tfrac{\mathrm{J}}{\mathrm{K}} \qquad \boxed{1{,}0\,\mathrm{P}}$$

3. Aufgabe

Die maximal gewinnbare Energie aus der Abluft entspricht der Exergie der Abluft.

$$e_{1u} = \underbrace{u_1 - u_u + p_u \cdot \left(v_1 - v_u\right)}_{=h_1 - h_u} - T_u \cdot \left(s_1 - s_u\right) = h_1 - h_u - T_u \cdot \left(s_1 - s_u\right) \qquad \boxed{1{,}0\,\mathrm{P}}$$

$$P_{max} = \dot{m}_L \cdot e_{1u} \quad \text{und} \quad h_1 - h_u = c_p \cdot \left(T_1 - T_u\right) \quad \text{und} \quad s_1 - s_u = c_p \cdot \ln\left(\frac{T_1}{T_u}\right) - R \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_u}\right) \qquad \boxed{2{,}0\,\mathrm{P}}$$

$$\Rightarrow P_{max} = \dot{m}_L \cdot \left[c_p \cdot \left(T_1 - T_u\right) - T_u \cdot \left(c_p \cdot \ln\left(\frac{T_1}{T_u}\right) - R \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_u}\right)\right)\right] \qquad \boxed{1{,}0\,\mathrm{P}}$$

$$c_p = c_v + R \quad \text{und} \quad \kappa = \frac{c_p}{c_v} \;\Rightarrow\; c_p = \frac{R}{1 - \frac{1}{\kappa}} = 1004{,}5\,\tfrac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg \cdot K}} \qquad \boxed{1{,}0\,\mathrm{P}}$$

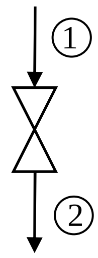
$$P_{\max} = 0{,}001\,\tfrac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}} \cdot \left[\begin{array}{l} 1004{,}5\,\tfrac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg \cdot K}} \cdot \left(303\,\mathrm{K} - 293\,\mathrm{K}\right) - \\ 293\,\mathrm{K} \cdot \left(1004{,}5\,\tfrac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg \cdot K}} \cdot \ln\left(\frac{303\,\mathrm{K}}{293\,\mathrm{K}}\right) - 287\,\tfrac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg \cdot K}} \cdot \ln\left(\frac{1{,}2\,\mathrm{bar}}{1\,\mathrm{bar}}\right)\right) \end{array}\right]$$

$$P_{\max} = 4{,}59\ \mathrm{W} \qquad \boxed{1{,}0\,\mathrm{P}}$$

4. Aufgabe

Da bei Kandidat A der Frischdampfmassenstrom geregelt wird, gibt es keine Änderung der Entropie, weshalb durch diese Regelung auch keine irreversible Entropie erzeugt wird.

$$e_v = 0 \;\Rightarrow\; \frac{e_v}{e_{1u}} = 0 \mathrel{\hat{=}} 0\,\% \quad \boxed{1{,}0\,\mathrm{P}}$$



Kandidat B regelt mittels adiabater Drosselung.

$$e_{1u} = \underbrace{u_1 - u_u + p_u \cdot (v_1 - v_u)}_{=h_1-h_u} - T_u \cdot (s_1 - s_u) = h_1 - h_u - T_u \cdot (s_1 - s_u) \quad \boxed{1{,}0\,\mathrm{P}}$$

$$e_{1u} = 3387{,}8\,\tfrac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}} - 63{,}1\,\tfrac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}} - 288{,}15\,\mathrm{K} \cdot \left(6{,}3722\,\tfrac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg\cdot K}} - 0{,}2237\,\tfrac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg\cdot K}}\right) = 1553{,}0\,\tfrac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}} \quad \boxed{1{,}0\,\mathrm{P}}$$

$$e_v = e_{1u} - e_{2u} = \underbrace{u_1 - u_2 + p_u \cdot (v_1 - v_2)}_{=h_1-h_2=0,\ \text{da isenthalp}} - T_u \cdot (s_1 - s_2) = -T_u \cdot (s_1 - s_2) \quad \boxed{1{,}0\,\mathrm{P}}$$

$$s_2 = 6{,}3993\,\tfrac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg\cdot K}} + (6{,}4341 - 6{,}3993)\,\tfrac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg\cdot K}} \cdot \frac{3387{,}8\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}} - 3360{,}7\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}}}{3388{,}5\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}} - 3360{,}7\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}}} = 6{,}4332\,\tfrac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg\cdot K}} \quad \boxed{1{,}0\,\mathrm{P}}$$

$$e_v = -288{,}15\,\mathrm{K} \cdot \left(6{,}3772\,\tfrac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg\cdot K}} - 6{,}4332\,\tfrac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg\cdot K}}\right) = 17{,}584\,\tfrac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}} \quad \boxed{1{,}0\,\mathrm{P}}$$

$$\frac{e_v}{e_{1u}} = \frac{17{,}584\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}}}{1553{,}0\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}}} = 0{,}0113 \mathrel{\hat{=}} 1{,}13\,\% \quad \boxed{1{,}0\,\mathrm{P}}$$

5**. Aufgabe**

$$p_I = 1\,\text{bar} \qquad \vartheta_I = 25\,°\text{C} \qquad \dot{m}_{C_8H_{18}} = 0{,}72\cdot 10^{-3}\,\tfrac{\text{kg}}{\text{s}}$$

geg.:

$$p_{II} = 1\,\text{bar} \qquad \vartheta_{II} = 227\,°\text{C} \qquad \vartheta_R = 25\,°\text{C}$$

$$\text{T}_u = 290\,\text{K}$$

isobare vollständige Verbrennung mit $\lambda = 1{,}5$

Kessel und Wasserleitungen sind adiabat

Leistungen der Pumpe und der Gebläse sowie äußere Energien sind vernachlässigbar

$$c_W = 4{,}18\,\tfrac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \qquad M_C = 12\,\tfrac{\text{kg}}{\text{kmol}} \qquad M_{H_2} = 2\,\tfrac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

Luft besteht aus $79\ \text{Mol}-\%\,N_2$ und $21\text{Mol-}\%\,O_2$

a) $\dot{n}$ von allen Brennstoff- und Abgaskomponenten

$$C_8H_{18} + 12{,}5\cdot\lambda\cdot O_2 + 12{,}5\cdot\lambda\cdot\tfrac{0{,}79}{0{,}21}\cdot N_2 \longrightarrow 8\cdot CO_2 + 9\cdot H_2O + 12{,}5\cdot(\lambda-1)\cdot O_2 + 12{,}5\cdot\lambda\cdot\tfrac{0{,}79}{0{,}21}\cdot N_2 \qquad \boxed{2{,}0\,\text{P}}$$

$$\dot{n}_{C_8H_{18},I} = \frac{\dot{m}_{C_8H_{18}}}{M_{C_8H_{18}}} = 6{,}316\cdot 10^{-6}\,\tfrac{\text{kmol}}{\text{s}} \qquad \boxed{0{,}5\,\text{P}}$$

$$\dot{n}_{O_2,I} = 12{,}5\cdot\lambda\cdot\dot{n}_{C_8H_{18},I} = 0{,}118\cdot 10^{-3}\,\tfrac{\text{kmol}}{\text{s}} \qquad \boxed{0{,}5\,\text{P}}$$

$$\dot{n}_{N_2,I} = 12{,}5\cdot\lambda\cdot\tfrac{0{,}79}{0{,}21}\cdot\dot{n}_{C_8H_{18},I} = 0{,}446\cdot 10^{-3}\,\tfrac{\text{kmol}}{\text{s}} \qquad \boxed{0{,}5\,\text{P}}$$

$$\dot{n}_{CO_2,II} = 8\cdot\dot{n}_{C_8H_{18},I} = 0{,}0505\cdot 10^{-3}\,\tfrac{\text{kmol}}{\text{s}} \qquad \boxed{0{,}5\,\text{P}}$$

$$\dot{n}_{H_2O,II} = 9\cdot\dot{n}_{C_8H_{18},I} = 0{,}0568\cdot 10^{-3}\,\tfrac{\text{kmol}}{\text{s}} \qquad \boxed{0{,}5\,\text{P}}$$

$$\dot{n}_{O_2,II} = 12{,}5\cdot(\lambda-1)\cdot\dot{n}_{C_8H_{18},I} = 0{,}0395\cdot 10^{-3}\,\tfrac{\text{kmol}}{\text{s}} \qquad \boxed{0{,}5\,\text{P}}$$

$$\dot{n}_{N_2,II} = \dot{n}_{N_2,I} = 0{,}446\cdot 10^{-3}\,\tfrac{\text{kmol}}{\text{s}} \qquad \boxed{0{,}5\,\text{P}}$$

b) $\dot{V}_L$

$$\dot{V}_L = \dot{n}_L\cdot V_m \quad \text{mit} \quad p\cdot V_m = R_m\cdot T \;\Rightarrow\; \dot{V}_L = \left(\dot{n}_{O_2,I} + \dot{n}_{N_2,I}\right)\cdot\frac{R_m\cdot T_I}{p_I} = 13{,}974\cdot 10^{-3}\,\tfrac{\text{m}^3}{\text{s}} \qquad \boxed{2{,}0\,\text{P}}$$

c) $\dot{Q}_W$

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{I,II} = \dot{H}_{II} - \dot{H}_I = {} & \dot{n}_{CO_2,II}\cdot h_{m_{CO_2}}(T_{II}) + \dot{n}_{H_2O,II}\cdot h_{m_{H_2O}}(T_{II}) \\ & + \dot{n}_{O_2,II}\cdot h_{m_{O_2}}(T_{II}) + \dot{n}_{N_2,II}\cdot h_{m_{N_2}}(T_{II}) \\ & - \dot{n}_{C_8H_{18}}\cdot h_{m_{C_8H_{18}}}(T_I) - \dot{n}_{O_2,I}\cdot h_{m_{O_2}}(T_I) - \dot{n}_{N_2,I}\cdot h_{m_{N_2}}(T_I)\end{aligned} \qquad \boxed{2{,}0\,\text{P}}$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_W = -\dot{Q}_{I,II} = 28{,}5\cdot 10^{-3}\ \text{MW} = 28{,}5\,\text{kW}$$

d) $\vartheta_2\left(\dot{m}_W = 0,4\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}},\ \vartheta_1 = 66\,°\mathrm{C}\right)$

$$\dot{Q}_W = \dot{m}_W \cdot c_W \cdot \left(\vartheta_2 - \vartheta_1\right)$$

$$\Rightarrow \vartheta_2 = \vartheta_1 + \frac{\dot{Q}_W}{\dot{m}_W \cdot c_W} = 83\,°\mathrm{C} \qquad \boxed{2,0\,\mathrm{P}}$$

e) $\dot{E}_{V_{21}}$

$$\dot{E}_{V_{21}} = T_u \cdot \dot{S}_{irr_{21}}$$

$$\dot{S}_{irr_{21}} = \Delta\dot{S}_{21} - \dot{S}_{Q_{21}} = \dot{m}_W \cdot c_W \cdot \ln\left(\frac{T_1}{T_2}\right) - \frac{\dot{Q}_{21}}{T_R} \qquad \boxed{2,0\,\mathrm{P}}$$

$$\dot{Q}_{21} = -\dot{Q}_W \quad \Rightarrow \quad \dot{S}_{irr_{21}} = 0,0183\,\frac{\mathrm{kW}}{\mathrm{K}} \quad \Rightarrow \quad \dot{E}_{V_{21}} = 4,01\,\mathrm{kW}$$