Abschlussklausur im Fach „Technische Thermodynamik" WS, 05. 02. 2009
Lösung, TF1, WI

Name: Vorname: Matrikelnummer:

Aufgabe	1	2	3	4	Summe
Mögliche Punkte	10	16	13	10	49
Erreichte Punkte					

Aufgabe 1.
Bitte beantworten Sie die Fragen und kreuzen Sie die richtige Antwort auf jede Frage an. Falsch gesetzte Kreuze werden mit einem halben Punkt Abzug bewertet (die Summe aller Punkte für diese Aufgabe bleibt jedoch immer ≥0). Mehrere Antworten sind möglich.

a) Wenn man einem System Wärme entzieht, so sinkt die Systemtemperatur.
- ☐ Richtig
- ☐ Falsch
- ☐ Keine Aussage möglich. (0,5P)

b) Wenn eine Zustandsänderung isentrop und reibungsfrei verläuft, so ist sie auch
- ☐ adiabat (0,5P)
- ☐ instationär
- ☐ isobar
- ☐ keine Aussage möglich.

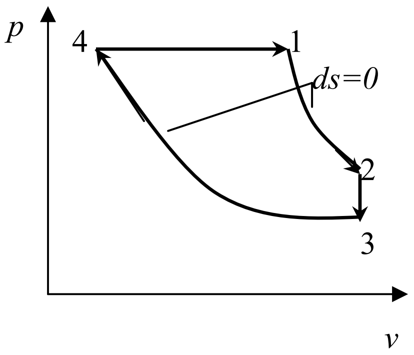
c) Leiten Sie für eine polytrope Zustandsänderung idealen Gases folgende Beziehung her: (2P)

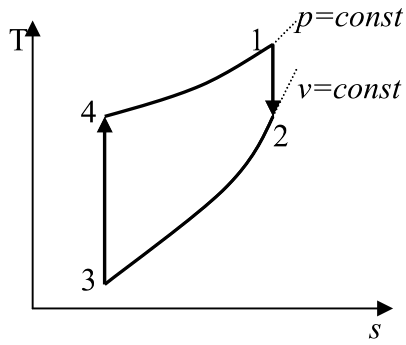
$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{1-n}.$$

$$pv^n = const,\ pv = RT \quad \rightarrow \quad RT_1 v_1^{\ n-1} = RT_2 v_2^{\ n-1} \rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{1-n}.$$

d) Eine isobare Zustandsänderung im Nassdampfgebiet ist auch
- ☐ isochor
- ☐ isotherm (0,5P)
- ☐ isentrop
- ☐ keine Aussage möglich.

e) Im p-v-Diagramm ist ein Diesel-Prozess (s. Bild) dargestellt. Skizzieren Sie den dazu gehörigen Prozess im T-s-Diagramm! (2P)





f) Eine Wärmepumpe soll einen Wärmestrom von 30 kW bei 75°C zur Verfügung stellen, als Wärmequelle steht Grundwasser bei 6°C zur Verfügung. Die Leistungszahl liegt bei 40% des theoretisch möglichen Wertes. Welche elektrische Leistung wird benötigt? Wie hoch ist die relative Einsparung elektrischer Energie im Vergleich zu einer Elektroheizung? (3P)

Leistungszahl des entsprechenden Carnot-Prozesses $\varepsilon_C = \frac{T_{\max}}{T_{\max} - T_{\min}} = \frac{348}{69} \approx 5.$

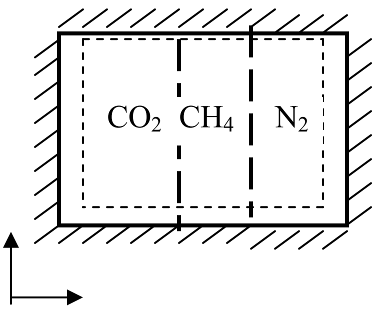
Praktische Leistungszahl beträgt $\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{P} = 0{,}4 \cdot \varepsilon_C = 2.$ Dann benötigte elektrische Leistung $P = \frac{\dot{Q}}{\varepsilon} = \frac{30kW}{2} = 15kW,$ die relative Einsparung beträgt $\frac{\dot{Q} - P}{\dot{Q}} \cdot 100\% = 50\%.$

g) In den Niagara-Fällen fällt das Wasser mit einem Volumenstrom von $\dot{V}_W = 5400\,\text{m}^3/\text{s}$ ca. 100m tief. Wie viele Auto-Motoren mit einer Leistung von jeweils $P_{t,mot}$=100kW würden benötigt, um das Wasser in einem stationären Prozess verlustfrei wieder auf die ursprüngliche Höhe zu pumpen? (1,5P)

$\rho \dot{V}_w \cdot g \cdot h = n \cdot P_{t,mot},$ dann

$$n = \frac{1000kg/m^3 \cdot 5400m^3/s \cdot 9{,}8m/s^2 \cdot 100m}{100000kg \cdot m^2/s^3} = 52920 \text{ Auto-Motoren.}$$

Aufgabe 2.



MB:
- System abgeschlossen, adiabat, isobar, isochor
- Gasgemisch – ideales Gas

(0,5P)

Gegeben:

n_{CO2}=15 kmol, $\vartheta_{CO2,1}$=160^{0}C (0,5P)

M_{CO2}=44 kg/kmol, $c_{p\,CO2}$=0,89 $\frac{kJ}{kg \cdot K}$

n_{CH4}=28 kmol, $\vartheta_{CH4,1}$=70^{0}C

M_{CH4}=16 kg/kmol, $c_{p\,CH4}$=2,227 $\frac{kJ}{kg \cdot K}$

n_{N2}=10 kmol, $\vartheta_{N2,1}$=30^{0}C

M_{N2}=28 kg/kmol, $c_{p\,N2}$=1,04 $\frac{kJ}{kg \cdot K}$

$p_{CO2,1}= p_{CH4,1}= p_{N2,1}$=20 bar=3·10^6 Pa

Gesucht:

a) m_{CO2}, m_{CH4}, m_{N2} - ?

b) M, R - ?

c) p_{CO2}, p_{CH4}, p_{N2} - ?

d) T_2 - ?

e) ΔS_{irr} - ?

Lösung:

a) $m_i=M_i \cdot n_i$;

$m_{CO2}=M_{CO2} \cdot n_{CO2}=44$ kg/kmol·15 kmol=660 kg; (1,5P)

$m_{CH4}=M_{CH4} \cdot n_{CH4}=16$ kg/kmol·28 kmol=448 kg;

$m_{N2}=M_{N2} \cdot n_{N2}=28$ kg/kmol·10 kmol=280 kg.

b) $\psi_i = \frac{n_i}{n}$, n =15+28+10=53 kmol, (1,5P)

$\psi_{CO2} = 0{,}283,\ \psi_{CH4} = 0{,}528,\ \psi_{N2} = 0{,}189,\ \Sigma\psi_i = 1$ W.A.

$M = \sum_i \psi_i M_i$ = 0,283·44 kg/kmol+0,528·16 kg/kmol +

0,189·28 kg/kmol=26,192 kg/kmol oder über ξ_i, $M = \frac{1}{\sum_i \frac{\xi_i}{M_i}}$ (1,0P)

$$R = \frac{R_m}{M} = \frac{8{,}314\frac{kJ}{kmol \cdot K}}{26{,}192\frac{kg}{kmol}} = 0{,}317\frac{kJ}{kg \cdot K}.$$ (1,0P)

d) $p_{2i} = \psi_i \cdot p_2$, $p_{2CO2} = \underline{5{,}66\text{ bar}}$, $p_{2CH4} = \underline{10{,}56\text{ bar}}$, $p_{2N2} = \underline{3{,}78\text{ bar}}$, $\sum p_{2i} = 20$ bar (1,5P)

b) 1. Hauptsatz

$$\cancel{W_{R12}} + \int_1^2 \cancel{Vdp} + \cancel{Q_{12}} = \Delta H_{12} + \cancel{\Delta E_a},$$ (1,0P)

$$\Delta H_{12} = m_{CO2} \cdot c_{p,CO2} \cdot (T_2 - T_{CO2,1}) + m_{CH4} \cdot c_{p,CH4} \cdot (T_2 - T_{CH4,1}) + m_{N2} \cdot c_{p,N2} \cdot (T_2 - T_{N2,1}) = 0,$$ (1,0P)

$$T_2 = \frac{m_{CO2} \cdot c_{p\,CO2} \cdot T_{CO2,1} + m_{CH4} \cdot c_{p\,CH4} \cdot T_{CH4,1} + m_{N2} \cdot c_{p\,N2} \cdot T_{N2,1}}{m_{CO2} \cdot c_{p\,CO2} + m_{CH4} \cdot c_{p\,CH4} + m_{N2} \cdot c_{p\,N2}} = 365\text{ K},\ \vartheta_2 = 92^0\text{C}.$$ (1,5P)

e) $\frac{\cancel{\delta Q}}{T} + \delta S_{irr} = dS = \sum_i dS_i$, $S_{irr} = \sum_i \Delta S_i$, $\Delta S_i = m_i \left[c_p \cdot \ln\frac{T_2}{T_{1,i}} - R \cdot \ln\frac{p_{2,i}}{p_{1,i}} \right]$. (1,0P)

(1P) (1P)

$$\Delta S_{CO2} = 660kg \cdot \left[0{,}89\frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot \ln\frac{365K}{433K} - \frac{8{,}314\frac{kJ}{kmol \cdot K}}{44\frac{kg}{kmol}} \cdot \ln\frac{5{,}66bar}{20bar} \right] = 57{,}07\frac{kJ}{K},$$

$$\Delta S_{CH4} = 448kg \cdot \left[2{,}227 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot \ln \frac{365K}{343K} - \frac{8{,}314 \frac{kJ}{kmol \cdot K}}{16 \frac{kg}{kmol}} \cdot \ln \frac{10{,}57bar}{20bar} \right] = 208{,}60 \frac{kJ}{K},$$

$$\Delta S_{N2} = 280kg \cdot \left[1{,}04 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot \ln \frac{365K}{303K} - \frac{8{,}314 \frac{kJ}{kmol \cdot K}}{28 \frac{kg}{kmol}} \cdot \ln \frac{3{,}78bar}{20bar} \right] = 192{,}72 \frac{kJ}{K},$$

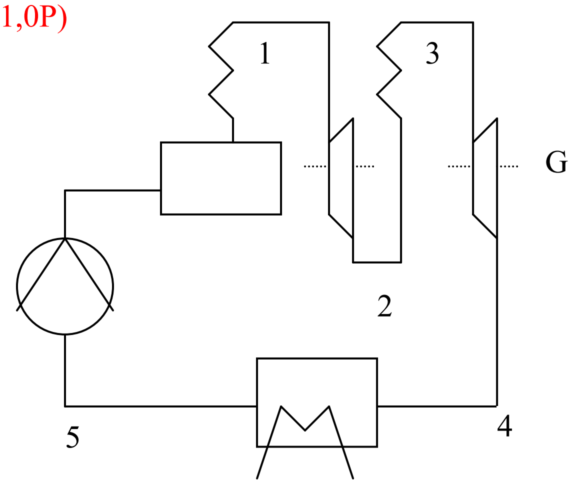
$$S_{irr} = 458{,}4 \frac{kJ}{K}.$$

(2P)

Gas	M_i, $\frac{kJ}{kmol}$	n_i, kmol	c_{pi}, $\frac{kJ}{kg \cdot K}$	R_i, $\frac{kJ}{kg \cdot K}$	m_i, kg	ψ_i	T_i, K	p_{2i}, bar	ΔS_i, kJ/K
CO_2	44	15	0,890	0,189	660	0,283	433	5,66	57,07
CH_4	16	28	2,227	0,520	448	0,528	343	10,56	208,6
N_2	28	10	1,040	0,297	280	0,189	303	3,78	192,7
Mischung	26,192	53		0,317	1388	1,000	366,2	20,00	458,4

Aufgabe 3.

(1,0P)



MB: Wasserdampfprozess

1-2, 3-4- adiabat, reibfrei

$\Delta e_k = \Delta e_p = 0$ (0,5P)

$w_{t,Pumpe} = 0$

Gegeben: $p_1 = 120$ bar, $\vartheta_1 = 400°C$ (0,5P)

$p_2 = 6$ bar,

$p_4 = 0{,}04$ bar

$\vartheta_3 = \vartheta_1$

Gesucht: a) h,s-Diagramm

b) w_t -?

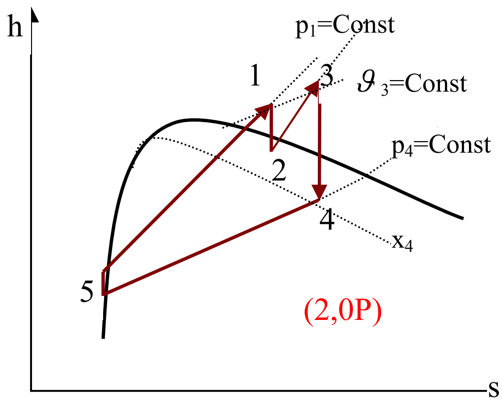
c) x_4-?

d) η_{th} - ?

e) $\dot{m}_D$ - ?

Lösung:

a)



(2,0P)

b) 1. Hauptsatz für stationäre Fließprozesse

$$w_t + q + h_\alpha - h_\beta + \cancel{\frac{c_\alpha^2}{2}} - \cancel{\frac{c_\beta^2}{2}} + \cancel{g(z_\alpha - z_\beta)} = 0,$$ (1,0P)

Prozess 1-2 ($q_{12}=0$): $w_{t12}=h_2-h_1$

Prozess 3-4 ($q_{34}=0$): $w_{t34}=h_4-h_3$ (1,0P)

$w_{t12}=h_2-h_1=-586$ kJ/kg $w_{t34}=h_4-h_3=-942{,}4$ kJ/kg

$w_t= w_{Turb}+\cancel{w_{Pumpe}}=w_{t12}+w_{t34}=-1528{,}4$ kJ/kg (1,5P)

c)

$$x_4 = \frac{s_4 - s'}{s'' - s'},$$

$$x_4 = 0{,}907$$

(1,0P)

d)

Wärmezufuhr 5-3($w_{t51}= w_{t23}=0$):

$q_{zu}=h_3-h_2+h_1-h_5=3735{,}2$ kJ/kg

(1,5P)

$\eta_{th}=|w_t|/|q_{zu}|=0{,}409$ oder 40,9%

(1,5P)

$h_1=$ 3051,6 kJ/kg (aus der Tafel für ϑ_1, p_1)

$h_2=$ 2465,6kJ/kg (aus h-s-Diagramme oder der Tafel für p_2, $s_1=s_2=6{,}086$kJ/(kgK), $x_2=0{,}861$)

$h_3=$ 3270,6 kJ/kg (aus der Tafel für $\vartheta_3 = \vartheta_1$, p_2)

$h_4=$ 2328,2 kJ/kg (aus h-s-Diagramme für $s_4=s_3=7{,}7291$ kJ/(kgK), p_4 oder der Tafel für p_4, $x_4=0{,}907$)

$h_5=$ 121,41 kJ/kg (aus der Tafel h' für p_4)

d)

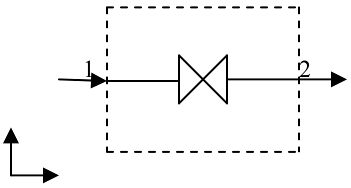
$$\dot{m}_D = \frac{\dot{W}_t}{|w_t|} = \frac{3000\ \frac{kJ}{s}}{1528{,}4\ \frac{kJ}{kg}} = 1{,}96\ \frac{kg}{s}.$$ (1,5P)

Aufgabe 4.

Luft (ideales Gas, c_p=1,004kJ/(kgK), R=0,287kJ/(kgK)) strömt stationär durch ein horizontalen Rohr konstanten Querschnitts. In das Rohr ist eine Drosselstelle eingebaut (z.B. Blende zur Durchflussmengenmessung). Das Rohr soll auf der gesamten Länge adiabat sein, die Geschwindigkeit des Gases ändert sich nicht.

a) Zeigen Sie, dass dieser Prozess nur von selbst abläuft, wenn der Druck am Rohrende kleiner ist, als am Rohranfang.

b) Berechnen Sie die Entropieänderung von 1kg Luft, das im Rohr von p_1=50bar bis p_2=5bar adiabat gedrosselt wird.



MB: (0,5P)

- Stat. Fließprozess,
- $w_t=0$
- $c_1=c_2$
- adiabat
- Ideales Gas
- $\Delta e_a = 0$

Gegeben: p_1 = 50bar, (0,5P)
p_2 = 5bar
R=0,287kJ/(kgK)
c_p=1,004kJ/(kgK)
m=1kg

Gesucht: a) $p_2<p_1$ -?
b) ΔS_{12} -?
c) c_2 -?

Lösung:

a) 1. Hauptsatz für stationäre Fließprozesse

$$\cancel{w_t} + \cancel{q} + h_\alpha - h_\beta + \cancel{\frac{c_\alpha^2}{2}} - \cancel{\frac{c_\beta^2}{2}} + g(\cancel{z_\alpha - z_\beta}) = 0, \quad (1{,}0P)$$

$\Delta h = c_p(T_2 - T_1) = 0,$ (1,0P)

dann $T_1 = T_2,$ (0,5P)

aus Formelsammlung $\Delta s = c_p \ln(\cancel{T_2/T_1}) - R\ln(p_2/p_1) > 0,$ (1,0P)

dann $\ln(p_2/p_1) < 0, \Rightarrow p_2 < p_1$. (1,0P)

b) $\Delta S_{12} = -m \cdot R \cdot \ln(p_2/p_1),$ (1,0P)

$\Delta S_{12} = 1kg \cdot 0{,}287 kJ/(kg \cdot K) \ln(50bar/5bar) = 0{,}661 kJ/K.$ (0,5P)

c) c_2 → 1. HS stat. FP $\quad \cancel{w_t} + \cancel{q} + h_\alpha - h_\beta + \frac{c_\alpha^2}{2} - \frac{c_\beta^2}{2} + g(\cancel{z_\alpha - z_\beta}) = 0,$ (1,0P)

→ $h_1 - h_2 = \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} = c_p(T_1 - T_2) = c_p(\vartheta_1 - \vartheta_2) \rightarrow c_2 = \sqrt{2 \cdot c_p \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) + c_1^2}$ (1,5P)

→ $c_2 = \sqrt{2 \cdot 1{,}004 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot (80 - 75)K + \left(10\frac{m}{s}\right)^2} = 10{,}49 \frac{m}{s}.$ (0,5P)