

Thermodynamik 1

Klausur

02. März 2011

Bearbeitungszeit: 120 Minuten

Umfang der Aufgabenstellung: 6 nummerierte Seiten

Alle Unterlagen zu Vorlesung und Übung sowie Lehrbücher und Taschenrechner sind als Hilfsmittel zugelassen.

Geben Sie diese Aufgabenstellung bitte zusammen mit Ihren Lösungsblättern ab. Füllen Sie die Angaben zu Ihrer Person aus und versehen Sie jedes Lösungsblatt mit Ihrem Namen.

Name: _____

Vorname: _____

Matrikelnummer: _____

Unterschrift: _____

Angaben zur Korrektur

Aufgabe	Maximale Punktzahl	Erreichte Punkte	Korrektor
1	14		
2	21		
3	15		
Zwischensumme			
Bonuspunkte			
Summe			
Bewertung			

Aufgabe 1 (14 Punkte)

An einem Otto-Motor werden folgende Drücke und Temperaturen gemessen:

Nach dem Ansaugen: $p_1 = 1 \text{ bar}$, $T_1 = 25 \text{ °C}$

Nach der isentropen Verdichtung: $p_2 = 15 \text{ bar}$, $T_2 = 400 \text{ °C}$

Nach der isochoren Verbrennung: $p_3 = 60 \text{ bar}$, $T_3 = 2419,45 \text{ °C}$

Die Verbrennung entspricht einer Wärmezufuhr von 1380 kJ/kg .

Es wird angenommen, dass der Gesamtprozess mit Luft konstanter Zusammensetzung verläuft. Für die Berechnungen soll Luft als ideales Gas angenommen werden.

Die universelle Gaskonstante ist $R_m = 8,314472 \text{ J/(mol K)}$.

- a) Skizzieren Sie den Prozess in einem p, v - und T, s - Diagramm. (4 P)
- b) Berechnen Sie den Isentropenexponenten κ . (2 P)
- c) Berechnen Sie die Stoffeigenschaften von Luft (M , c_p und c_v). (2 P)
- d) Wie groß sind der Druck p_4 und die Temperatur T_4 nach der isentropen Expansion? (3 P)
- e) Berechnen Sie die spezifische Volumenänderungsarbeit bei der isentropen Expansion 3→4. (1 P)
- f) Berechnen Sie den thermischen Wirkungsgrad des Otto-Motors. (2 P)

Aufgabe 2 (21 Punkte):

In einem offenen Gasturbinenprozess (GT-Prozess) wird Luft $\dot{m}_L = 100 \text{ kg/s}$ bei $T_1 = 25^\circ\text{C}$ und $p_1 = 1 \text{ bar}$ vom Verdichter angesaugt. In dem Prozess finden folgende Zustandsänderungen statt:

- 1 \rightarrow 2: Adiabate Kompression der Luft mit einem Druckverhältnis von $\Pi = p_2/p_1 = 12$ und einem isentropen Wirkungsgrad von $\eta_{s,v} = 0,95$.
- 2 \rightarrow 3: Isobare Wärmezufuhr von $\dot{Q}_{\text{GT,ZU}} = 103,4 \text{ MW}$ in einer Brennkammer durch Verbrennung des Brennstoff-Luft-Gemisches. Der Brennstoffmassenstrom $\dot{m}_{\text{BS}} = 2,058 \text{ kg/s}$, der auf T_2 vorgewärmt ist, wird vor der Verbrennung (Wärmezufuhr) isotherm mit dem Luftmassenstrom vermischt.
- 3 \rightarrow 4: Entspannung des Verbrennungsabgases in einer Turbine auf $p_4 = 1 \text{ bar}$. Die Turbine hat einen isentropen Wirkungsgrad von $\eta_{s,T} = 0,95$.
- 4 \rightarrow 5: Der Wärmestrom \dot{Q}_{45} wird isobar abgegeben. Das Verbrennungsabgas kühlt sich dabei auf $T_5 = 180,74^\circ\text{C}$ ab.

Der Wärmestrom \dot{Q}_{45} wird dem Verdampfer eines nachgeschalteten Dampfturbinenprozess (DT-Prozess) zugeführt, um das Wasser ($\dot{m}_W = 12,16 \text{ kg/s}$) in diesem Prozess bei einem Druck von 40 bar vorzuheizen, zu verdampfen und zu überhitzen.

In dem DT-Prozess finden folgende Zustandsänderungen statt:

- 6 \rightarrow 7: Der überhitzte Dampf (Zustand 6) wird in einer Turbine mit dem isentropen Wirkungsgrad von $\eta_{s,T} = 0,95$ auf den Kondensatordruck $p_7 = 0,1 \text{ bar}$ entspannt. Die Entspannung endet im Naßdampfgebiet.
- 7 \rightarrow 8: Vollständige Kondensation des Wasserdampfs.
- 8 \rightarrow 9: Die Kesselspeisepumpe fördert die gesättigte Flüssigkeit auf den Verdampferdruck. Der Wirkungsgrad der Kesselspeisepumpe beträgt $\eta_{s,v} = 0,85$.
- 9 \rightarrow 6: Isobare Aufnahme des vom GT-Prozess abgegebenen Wärmestroms.

- a) Skizzieren Sie den Gesamtprozess (GT- und DT-Prozess) als Schaubild und tragen Sie alle gegebenen Daten ein. (4 P)
- b) Skizzieren Sie den GT- und den DT-Prozess in jeweils einem T,s -Diagramm. (4 P)
- c) Welche Temperatur T_4 hat das Verbrennungsabgas im GT-Prozess

nach der Entspannung in der Turbine? Für die Verbrennung kann hier angenommen werden: $\dot{m}_L c_{p,L} + \dot{m}_{BS} c_{p,BS} = \dot{m}_{Abg} c_{p,Abg}$ (5 P)

d) Welcher Wärmestrom \dot{Q}_{45} wird vom GT-Prozess abgegeben? (1 P)

e) Wie groß ist die Turbineneintrittstemperatur T_6 im DT-Prozess? (4 P)

f) Wie hoch ist die Temperaturdifferenz zwischen dem Abgas der Gasturbine und dem Wasser im DT-Prozess zu Beginn des Siedens? (3 P)

Die Umgebungstemperatur beträgt: $T_u = 25^\circ\text{C}$

Stoffdaten der Luft: $R = 0,287 \text{ kJ}/(\text{kg K})$, $c_{p,L} = 1,004 \text{ kJ}/(\text{kg K})$, $\kappa_L = 1,401$

Stoffdaten des Brennstoffs: $c_{p,BS} = 1,469 \text{ kJ}/(\text{kg K})$

Stoffdaten des Abgases: $c_{p,Abg} = 1,013 \text{ kJ}/(\text{kg K})$, $\kappa_{Abg} = 1,395$

Die Luft, der Brennstoff und das Abgas können als ideales Gas betrachtet werden.

Stoffdaten Wasser:

Das flüssige Wasser kann als inkompressibel ($v = 1,0088 \text{ dm}^3/\text{kg}$) betrachtet werden.

Zweiphasengebiet:

T °C	p bar	ρ' kg/m ³	ρ'' kg/m ³	h' kJ/kg	h'' kJ/kg	s' kJ/(kg K)	s'' kJ/(kg K)
250.350	40	798.37	20.09	1087.5	2800.8	2.797	6.070
233.850	30	821.90	15.00	1008.3	2803.2	2.646	6.186
212.380	20	849.80	10.04	908.5	2798.3	2.447	6.339
179.880	10	887.13	5.15	762.5	2777.1	2.138	6.585
99.606	1	958.63	0.59	417.5	2674.9	1.303	7.359
45.806	0.1	989.83	0.07	191.8	2583.9	0.649	8.149

Kritische Daten: $T_c = 373,95^\circ\text{C}$, $p_c = 220,64 \text{ bar}$

Wasserdampf:

T °C	p bar	ρ kg/m ³	h kJ/kg	s kJ/(kg K)
600	40	10.12	3674.9	7.371
550	40	10.79	3560.3	7.236
530	40	11.09	3514.6	7.179
500	40	11.57	3446.0	7.092
445	40	12.60	3319.6	6.923

Aufgabe 3 (15 Punkte):

Der Wirt einer Kneipe kauft für seine Bierzapfanlage eine neue Flasche mit CO₂. Die Masse des CO₂ in der Flasche beträgt 10 kg und hat während der Lagerung einen Druck von 57 bar bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C. Der Wirt bringt die Flasche in seinen Kühlkeller, der eine - für den Trinkgenuss optimale - Temperatur von 8 °C aufweist. Über Nacht kann sich der Inhalt der Flasche auf die Temperatur des Kühlkellers abkühlen und wird dabei einer isochoren Zustandsänderung (1→2) ausgesetzt.

- a) Wieviel Wärme wird dabei vom CO₂ an den Kühlkeller abgegeben? (Die von der Metallhülle der Flasche abgegebene Wärme soll hier nicht betrachtet werden.) (3 P)

Am nächsten Tag klemmt der Wirt die neue Flasche an die Zapfanlage an. Viele gezapfte Biere später wurde der Flasche 4 kg CO₂ entnommen (Zustandsänderung 2→3).

- b) Wie hoch steht das flüssige CO₂ nun in der Flasche, wenn diese stehend gelagert wird. (3 P)

Da ein rauchender und unvorsichtiger Gast die Kneipe leider in Brand steckt, wird die Flasche einer gefährlich hohen Wärmezufuhr von $\dot{Q} = 10 \text{ kW}$ ausgesetzt.

- c) Nach welcher Zeit t_{34} liegt der gesamte Inhalt der Flasche gasförmig vor? (3 P)

Die Flasche hat einen Nenndruck von 250 bar und wurde auf eine Sicherheit von $S = 2,5$ ausgelegt. Somit liegt der Maximaldruck der Flasche bei 625 bar.

- d) Die Flasche explodiert sofort, als der Inhalt den Maximaldruck erreicht. Wie groß ist die Änderung der Entropie ΔS_{45} von dem Zeitpunkt an dem das gesamte CO₂ gasförmig vorliegt bis zur Explosion? (2 P)

- e) Skizzieren Sie die Zustandsänderungen in einem T,s -Diagramm und kennzeichnen Sie besonders den Explosionspunkt (↗). (4 P)

Das befüllbare Volumen der Gasflasche beträgt 13,5 l und kann als Zylinder mit einem Radius von 10 cm angenommen werden. Die Gasflasche soll als starr angesehen werden.

Stoffdaten: s. nächste Seite

Zweiphasengebiet CO2:

T °C	p MPa	ρ' kg/m ³	ρ'' kg/m ³	u' kJ/kg	u'' kJ/kg	h' kJ/kg	h'' kJ/kg	s' kJ/(kgK)	s'' kJ/(kgK)
32	7.3762	493.37	444.44	311.41	321.33	326.36	337.93	1.4143	1.4523
26	6.5837	694.46	255.86	269.78	364.98	279.26	390.71	1.2627	1.6353
20	5.700	775.69	192.52	247.79	378.71	255.13	408.32	1.1854	1.7083
14	4.9658	829.70	155.11	231.05	386.03	237.03	418.05	1.1261	1.7565
8	4.2831	875.58	126.44	215.44	391.02	220.34	424.89	1.0702	1.7977
2	3.6733	915.23	104.07	200.91	394.36	204.93	429.65	1.0172	1.8340

Homogener Bereich CO2:

T °C	p MPa	ρ kg/m ³	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kgK)
320	62.5	495.76	582.25	708.32	2.0451
340	62.5	476.34	605.01	736.22	2.0913
360	62.5	458.56	627.53	763.83	2.1356
380	62.5	442.23	649.86	791.19	2.1782
400	62.5	427.19	672.04	818.34	2.2191
420	62.5	413.29	694.10	845.33	2.2586