

Thermodynamik 1

Klausur

09. Oktober 2015

Bearbeitungszeit: 150 Minuten

Umfang der Aufgabenstellung: 7 nummerierte Seiten

Alle Unterlagen zur 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	18		
2	36		
3	26		
Zwischensumme			
Bonuspunkte			
Summe			
Bewertung			

Aufgabe 1 (18 Punkte)

6 kg eines idealen Gases sollen von Zustand 1 mit einer Temperatur von $T_1 = 600$ K und einem Druck von $p_1 = 4$ bar auf den Zustand 2 ($T_2 = 360$ K und $p_2 = 2,4$ bar) gebracht werden. Die Umgebungstemperatur ist $T_A = 20^\circ\text{C}$.

- a) Berechnen Sie κ_L und R_L unter der Annahme, dass es sich bei dem idealen Gas um Luft handelt ($R = 8,31446$ J/(mol K), $M_L = 28,95$ kg/kmol, $c_v = 0,7178$ kJ/(kg K)). (2 P)
- b) Berechnen Sie das Volumenverhältnis V_2/V_1 . (2 P)
- c) Wie groß ist die Exergieänderung von Zustand 1 nach Zustand 2? Zeichnen Sie die Exergiedifferenz qualitativ in ein T,s -Diagramm. (4 P)
- d) Ist die Exergie eine Zustandsgröße? Begründen Sie Ihre Antwort. (1 P)
- e) Wie würden Sie einen Prozess auslegen, der von Zustand 1 nach Zustand 2 eine maximale Volumenänderungsarbeit bei minimalen übertragenen Wärmemengen leistet? Zeichnen Sie die Prozessschritte in ein p,V -Diagramm und markieren Sie die Volumenänderungsarbeit, die geleistet und aufgebracht werden muss. Benennen Sie alle Prozessschritte. (Hinweis: Die Umgebungstemperatur darf bei dem Prozess nicht unterschritten werden.) (4 P)
- f) Berechnen Sie die Volumenänderungsarbeit für die einzelnen Prozessschritte. (5 P)

Aufgabe 2 (36 Punkte)

In Berlin–Mitte werden zur Erzeugung von elektrischer Energie und Fernwärme Gas-und-Dampf-Kombikraftwerke (GuD-Kraftwerke) eingesetzt. Durch die Verwendung von Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) erreichen diese modernen Kraftwerke sehr hohe Wirkungsgrade.

Der Gasprozess dieser Anlagen kann nach folgendem Prinzip vereinfacht dargestellt werden:

G1 → G2 Umgebungsluft ($p_{G1} = 1 \text{ bar}$, $t_{G1} = 20^\circ\text{C}$) wird mit einem Massenstrom $\dot{m}_L = 1400 \text{ kg/s}$ angesaugt und mittels eines Verdichters ($\eta_{sV} = 0,8$) adiabatisch auf 5 bar komprimiert. Der Verdichter wird direkt von der Gasturbine angetrieben.

G2 → G3 Das Gemisch wird in der Brennkammer verbrannt, was hier idealisiert durch eine isobare Wärmezufuhr von $\dot{Q}_B = 1100 \text{ MW}$ dargestellt werden soll.

G3 → G4 Die Abgase werden in der Gasturbine mit einem isentropen Wirkungsgrad von $\eta_{sT} = 0,9$ auf Umgebungsdruck entspannt.

G4 → G5 Die Abgaswärme wird in dem Abhitzeessel dazu verwendet, Wasserdampf für den Dampfkraftprozess zu erzeugen. Diese Zustandsänderung erfolgt isobar.

G5 → Die noch warmen Abgase werden an die Umgebung abgegeben.

Das Arbeitsmedium des Gasprozesses soll idealisiert über den gesamten Prozess als trockene Luft betrachtet werden.

Der Dampfkraftprozess, mit dem Massenstrom $\dot{m}_W = 190 \text{ kg/s}$ wird vereinfacht durch folgenden Ablauf dargestellt:

D1 → D2 Wasser wird von $p_{D1} = 2 \text{ bar}$ in einer adiabaten Pumpe mit isentropem Wirkungsgrad $\eta_{sP} = 0,8$ auf 80 bar komprimiert. Hier kann vereinfachend angenommen werden, dass die Pumpe direkt von der Dampfturbine angetrieben wird.

D2 → D3 Die vom Gasprozess im Abhitzeessel bereitgestellte Wärme wird dazu verwendet, das Wasser isobar zu verdampfen. Dieser Vorgang soll idealisiert als Wärmeübertragung in einem Gegenstromwärmeübertrager betrachtet werden. Dabei wird das Wasser zuerst bis zum Punkt D3* auf der Siedelinie erhitzt. An diesem Punkt D3* tritt die kleinste Temperaturdifferenz zwischen dem Wasser und dem Abgas des Gasprozesses auf ($\Delta T_{\min} = 10 \text{ K}$). Ausgehend von D3* wird das Wasser daraufhin verdampft.

D3 → D4 Der Wasserdampf wird in der Dampfturbine ($\eta_{sT} = 0,9$) auf den Druck $p_{D4} = p_{D1}$ entspannt.

D4 → D1 Die Restwärme des Dampfs wird in einem Wärmeübertrager an das Fernwärmenetz abgegeben. Dabei kondensiert der Dampf isobar bis zur Siedelinie.

- a) Skizzieren Sie das vollständige Anlagenschema. (6 P)
- b) Zeichnen Sie sowohl den Gasturbinen- als auch den Dampfkraftprozess qualitativ richtig in jeweils ein eigenes T,s -Diagramm ein. Skizzieren Sie auch die relevanten Isobaren. (6 P)
- c) Welcher Wärmestrom wird vom Abgas vom Zustand G4 bis zum Punkt mit der kleinsten Temperaturdifferenz im Wärmeübertrager abgegeben? (10 P)
- d) Welcher Wärmestrom wird insgesamt vom Dampfkraftprozess im Abhitzekessel aufgenommen? (4 P)
- e) Wieviel mechanische Leistung und welcher Fernwärmestrom wird von der gesamten Anlage zur Verfügung gestellt? (4 P)
- f) Wie groß ist der energetische Gesamtwirkungsgrad des Heizkraftwerks? (2 P)
- g) Wie groß ist der exergetische Prozesswirkungsgrad des Heizkraftwerks? (4 P)

Zweiphasiger Zustand von Wasser

T	p	h'	h''	s'	s''
°C	MPa	kJ / kg	kJ / kg	kJ / (kg K)	kJ / (kg K)
99,606	0,1	417,50	2674,9	1,3028	7,3588
119,34	0,2	504,70	2706,2	1,5302	7,1269
133,52	0,3	561,43	2724,9	1,6717	6,9916
143,61	0,4	604,65	2738,1	1,7765	6,8955
151,83	0,5	640,09	2748,1	1,8604	6,8207
170,41	0,8	720,86	2768,3	2,0457	6,6616
295,01	8,0	1317,3	2758,7	3,2081	5,7450

Weitere Stoffdaten zur Lösung der Aufgabe befinden sich in den zwei Tabellen auf der nächsten Seite.

Homogener Zustand von Wasser

T	p	h	s
°C	MPa	kJ / kg	kJ / (kg K)
130	0,2	2727,3	7,1797
140	0,2	2748,3	7,2313
150	0,2	2769,1	7,2810
115	0,8	483,04	1,4731
120	0,8	504,23	1,5274
125	0,8	525,47	1,5810
130	0,8	546,74	1,6341
130	2	547,55	1,6330
140	2	590,22	1,7375
150	2	633,12	1,8401
115	8	488,21	1,4669
120	8	509,31	1,5302
125	8	530,45	1,5743
130	8	551,63	1,6272
500	8	3399,5	6,7266
525	8	3461,0	6,8049
550	8	3521,8	6,8799
115	80	540,91	1,4108
120	80	561,31	1,4630
125	80	581,73	1,5147
130	80	602,18	1,5657

Homogener Zustand von trockener Luft

T	p	h	s
°C	MPa	kJ / kg	kJ / (kg K)
20	0,01	419,62	4,5288
20	0,1	419,41	3,8673
300	0,1	705,27	4,5503
310	0,1	715,74	4,5684
320	0,1	726,22	4,5863
500	0,1	918,99	4,8698
525	0,1	946,37	4,9047
550	0,1	973,90	4,9387
20	1	417,29	3,2000
500	1	919,25	4,2083
525	1	946,67	4,2432
550	1	974,23	4,2772
180	0,5	581,04	3,8448
190	0,5	591,29	3,8673
200	0,5	601,55	3,8891
250	0,5	653,13	3,9928
900	0,5	1373,0	4,8796
925	0,5	1402,3	4,9043
950	0,5	1431,7	4,9286
180	5	577,98	3,1732
190	5	588,48	3,2000
200	5	598,98	3,2185
250	5	651,59	3,3242
900	5	1376,2	4,2178
925	5	1405,6	4,2426
950	5	1435,0	4,2669

Aufgabe 3 (26 Punkte)

Ein Camping-Gaskocher wird mit Butan ($R_B = 0,1434 \text{ kJ}/(\text{kg K})$) betrieben. In der neuen Kartusche befinden sich 280 g Butan. Die zylinderförmige Kartusche hat einen Durchmesser von 13,5 cm und eine Höhe von 19 cm.



- a) Welche Gesamtdichte und welchen Druck hat das Butan in der Kartusche bei einer Umgebungstemperatur von $26,85^\circ\text{C}$? (2 P)

Zum Frühstück soll 1 Liter Wasser aufgeköcht werden ($p_u = 1,013 \text{ bar}$, $\rho_{\text{wasser}} = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$, $c_{p,\text{wasser}} = 4,2 \text{ kJ}/(\text{kg K})$). Das Wasser befindet sich in einem Stahltopf ($m = 0,3 \text{ kg}$, $c_{p,\text{stahl}} = 0,5 \text{ kJ}/(\text{kg K})$). Beim Verbrennen von einem Gramm Butan wird $45,8 \text{ kJ}$ Wärme frei, wobei nur 50% der freigesetzten Wärme genutzt werden können.

- b) Wieviel Butan wird zum Wasserkochen verbraucht? Welcher neue Zustand stellt sich in der Kartusche ein (Dichte, Temperatur, Druck)? (Kartusche und Umgebung stehen stets im thermischen Gleichgewicht.) (4 P)
- c) Berechnen Sie die Änderung des Flüssigkeitsspiegels. (4 P)
- d) Wieviel Wärme wird dabei dem Butan aus der Umgebung zu- oder abgeführt? (6 P)

Nach dem Frühstück wird der Campingkocher in der Sonne stehen gelassen und erwärmt sich auf $46,85^\circ\text{C}$.

- e) Berechnen Sie den Dampfgehalt in der Kartusche nach der Erwärmung. (3 P)

Nun wird der Kocher dauerhaft in Betrieb genommen.

- f) Bis zu welchem Zustand strömt das Butan aus der Kartusche? Schätzen Sie ab, welche Masse Butan in der Kartusche verbleibt, wenn nichts mehr ausströmt. (3 P)
- g) Zeichnen Sie alle vier Zustände qualitativ in ein p, v -Diagramm ein. (3 P)
- h) Strömt das Butan sehr schnell aus, kann es zu Eisbildung außen an der Kartusche kommen. Woran liegt das? (1 P)

Stoffdaten Butan

$$T_c = 425,13 \text{ K} , p_c = 3,796 \text{ MPa} , \rho_c = 228 \text{ kg/m}^3$$

T	p	ρ'	ρ''	h'	h''	s'	s''
K	MPa	kg / m ³	kg / m ³	kJ / kg	kJ / kg	kJ / (kg K)	kJ / (kg K)
270	0,0915	604,11	2,463	192,73	580,79	0,973	2,411
280	0,1328	593,29	3,489	215,97	595,03	1,058	2,411
290	0,1873	582,17	4,821	239,71	609,31	1,141	2,415
300	0,2576	570,68	6,516	264,00	623,58	1,223	2,421
310	0,3463	558,77	8,645	288,86	637,79	1,303	2,429
320	0,4562	546,36	11,287	314,35	651,91	1,384	2,439
330	0,5905	533,38	14,540	340,52	665,84	1,464	2,449