

Thermodynamik 1

Klausur

2. März 2018

Bearbeitungszeit: 150 Minuten

Umfang der Aufgabenstellung: 8 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	26		
2	27		
3	27		
Zwischensumme			
Bonuspunkte			
Summe			
Bewertung			

Aufgabe 1 (26 Punkte)

Zwei Mitarbeiterinnen des Thermodynamik-Lehrstuhls fahren in die Alpen, um auf die Zugspitze (Höhe: 2964 m ü. N.N.) zu wandern. In dieser Höhe (Zustand 1) herrscht eine Temperatur von $t_1 = 9,2^\circ\text{C}$ und der Luftdruck ist geringer als der Atmosphärendruck auf Meereshöhe.

Erschöpft legen die beiden auf dem Gipfel eine Pause ein und beschließen zur Stärkung einen Tee zu trinken. Dazu füllen sie Wasser aus einer mitgebrachten Kunststoffflasche in einen offenen Kochtopf und erhitzen diesen, bis es kocht. Das Wasser beginnt bereits bei $t_{\text{W,S}} = 90,7^\circ\text{C}$ zu sieden.

- a) Schließen Sie von der Siedetemperatur des Wassers auf den Luftdruck p_1 , der auf dem Gipfel der Zugspitze vorliegt. (2 P)

t_s °C	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99
p_s hPa	701,82	728,90	756,84	785,68	815,41	846,08	877,71	910,30	943,90	978,52

Die nun vollständig von Wasser geleerte Kunststoffflasche wird wieder verschlossen. Diese hat hier ein Volumen von $V_1 = 1,5$ l.

- b) Wie groß ist die Masse an Luft m_L , welche in der Flasche eingeschlossen ist? Wie ist die Dichte ρ_1 der Luft im Zustand 1? (3 P)

Die Kunststoffflasche wird im Folgenden als perfekt elastisch angenommen, so dass das Volumen sich direkt an den außen anliegenden Druck anpasst.

Beim Abstieg ins Tal wird die Flasche im Rucksack verstaut und gelangt so in das auf 719 m gelegene Garmisch-Partenkirchen (Zustand 2). An einer Wetterstation kann hier sowohl die Temperatur $t_2 = 28,7^\circ\text{C}$ als auch der Druck $p_2 = 936,7$ hPa abgelesen werden. Das Volumen der Flasche hat sich durch den zunehmenden Luftdruck verringert.

- c) Wie groß ist das Volumen der Kunststoffflasche in Zustand 2? Welche Größe bleibt bei der Zustandsänderung von 1 nach 2 konstant? Wieso hat sich der Aufstieg kaum auf das Volumen der Flasche ausgewirkt? (3 P)

Beim Packen des Autos wird der Rucksack samt Flasche im Kofferraum eingeklemmt, wodurch das Volumen der Flasche zusammengedrückt wird. Dieses kann als reversibel adiabate Zustandsänderung betrachtet werden (Zustandsänderung 2-3). Das Volumen der Flasche verringert sich hierdurch um 20%.

- d) Welcher Druck und welche Temperatur liegen im Zustand 3 vor? Wie groß sind die übertragene Wärme und die Volumenänderungsarbeit bei dieser Zustandsänderung? (6 P)

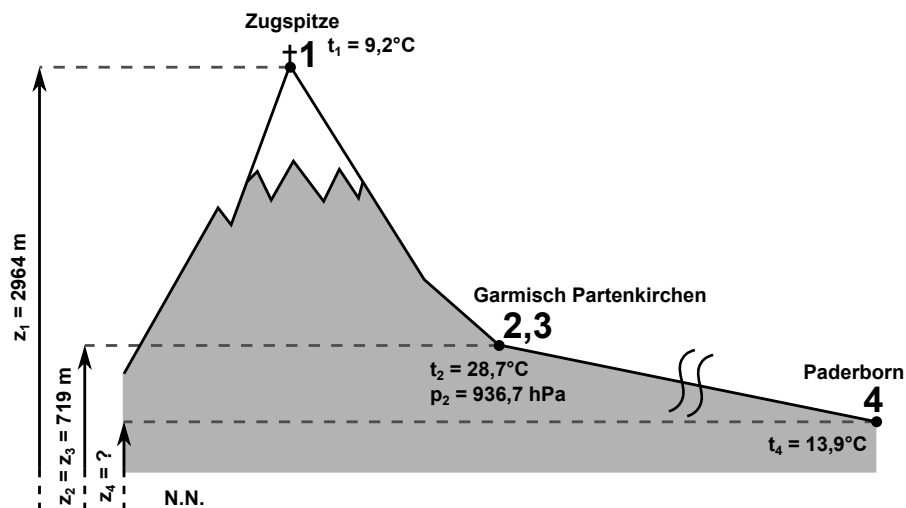
Beim Auspacken in Paderborn (Zustand 4) hat sich das Volumen der Flasche im Vergleich zu Zustand 2 erneut verringert. Um das neue Volumen zu bestimmen, wird die Flasche langsam in einen bis zum Rand mit Wasser gefüllten Eimer getaucht, wobei eine Wassermasse von $m_W = 1,103 \text{ kg}$ über den Rand fließt.

- e) Wie groß ist das Volumen V_4 der Flasche? Auf welcher Höhe z_4 befindet sich Paderborn? Die Umgebungstemperatur in Paderborn beträgt $t_4 = 13,9^\circ\text{C}$. In dem Höhenbereich von Paderborn darf mit der *internationalen Höhenformel* gerechnet werden. (4 P)

$$p(z) = 1013,25 \cdot \left(1 - \frac{0,0065 \frac{\text{K}}{\text{m}} \cdot z}{288,15 \text{ K}}\right)^{5,255} \text{ hPa}$$

Neben der beschriebenen Kunststoffflasche befand sich auch eine Thermoskanne im Reisegepäck, welche ebenfalls auf dem Gipfel geöffnet, von Flüssigkeit geleert und wieder geschlossen wurde. In diesem Zustand gelangt sie nach Paderborn (Umgebungszustand entspricht Zustand 4). Bei der Thermoskanne handelt es sich um einen adiabaten, starren Behälter mit einem Innenvolumen von $V_{\text{TK}} = 1,5 \text{ l}$.

- f) Beim Öffnen der Kanne strömt eine Luftmenge hinein um den Druckunterschied auszugleichen. Anschließend wird die Kanne wieder fest verschlossen. Wieviel Masse an Luft gelangt so zusätzlich in die Thermoskanne und welche Mischungstemperatur liegt in der Kanne vor? (8 P)



Angaben:

Luft kann im vorliegenden Temperatur- und Druckbereich als ideales Gas mit einer mittleren Molmasse $M_L = 28,96 \text{ g/mol}$ betrachtet werden. Die isobare Wärmekapazität beträgt $c_{p,L} = 1,0059 \text{ kJ/(kg K)}$

Allgemeine Gaskonstante: $R_m = 8,31446 \text{ J/(mol K)}$;

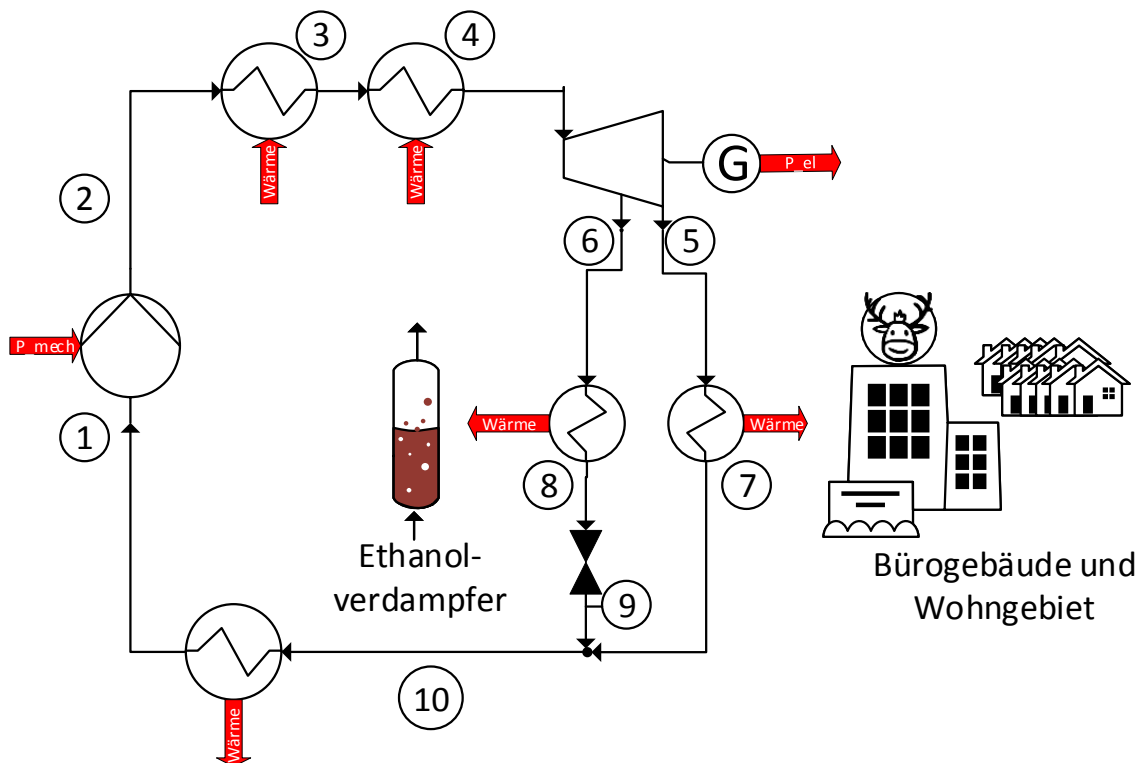
Dichte von flüssigem Wasser: $\rho_W = 997,95 \text{ kg/m}^3$

Aufgabe 2 (27 Punkte)

Eine Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage (KWK) in Wolfenbüttel soll für ein Industriegebiet elektrische Energie, Prozess- und Heizwärme bereitstellen. Die Heizwärme dient angrenzenden Büro- und Wohngebäuden zur Beheizung. Die Prozesswärme soll einem Spirituosen-Hersteller zur Verdampfung von Ethanol bereitgestellt werden. Um die Prozesswärme bei einer höheren Temperatur bereitstellen zu können, besitzt die Turbine einen Seitenabzug, bei dem sogenannter Anzapfdampf abgeführt wird. Mit der Wärme aus diesem Seitenabzug wird in der Destillationskolonne des Unternehmens Ethanol verdampft.

Das Arbeitsmedium der KWK-Anlage ist Wasser. Der Prozess verläuft folgendermaßen:

Um 5 K unterkühltes Wasser vom Zustand 1 wird in einer Kesselspeisepumpe auf Kesseldruck gebracht (2). Die Kesselspeisepumpe arbeitet mit einem isentropen Pumpenwirkungsgrad von 70%. Im Kessel wird das Wasser auf 180 °C erwärmt und bei dieser Temperatur komplett verdampft (3). Hierbei wird im Verdampfer des Kessels eine Wärme von 2007 kW zugeführt. Anschließend wird das Wasser isobar auf 450 °C überhitzt (4). In einer Turbine wird der Dampf mit einem isentropen Turbinenwirkungsgrad von 90% auf 0,1235 bar entspannt (5) und zur Bereitstellung der Heizwärme von 700 kW vollständig kondensiert (7). Über den Seitenabzug der Turbine wird der Teilmassenstrom Anzapfdampf bei 1,0142 bar entnommen (6) und zur Bereitstellung der Prozesswärme ebenfalls isobar vollständig kondensiert (8). Im Anschluss wird der Strom \dot{m}_8 isenthalp auf Druck $p_9 = p_7$ gedrosselt, mit \dot{m}_7 zusammengeführt und im Nachkühler kondensiert sowie unterkühlt (10). Im Anschluss wird der Strom \dot{m}_8 isenthalp auf Druck $p_9 = p_7$ gedrosselt, mit \dot{m}_7 zusammengeführt und im Nachkühler kondensiert sowie unterkühlt (1).



a) Stellen Sie den Prozess qualitativ richtig in einem T, s -Diagramm dar. (4 P)

b) Berechnen Sie die spezifische Enthalpie h_2 . Das flüssige Wasser kann als inkompressibel mit einer Dichte von $\rho_W = 990,17 \text{ kg/m}^3$ betrachtet werden. (2 P)

c) Berechnen Sie die Massenströme \dot{m}_5 und \dot{m}_6 . (6 P)

Falls Sie diese Aufgabe nicht lösen können, rechnen Sie im Folgenden mit $\dot{m}_5 = 0,5 \text{ kg/s}$ und $\dot{m}_6 = 0,3 \text{ kg/s}$ weiter.

d) Wieviel Ethanol kann pro Stunde beim Spirituosenhersteller verdampft werden? Die Verdampfungsenthalpie vom Ethanol ist $\Delta h_{V,\text{Eth}} = h'' - h' = 828,0 \text{ kJ/kg}$. (5 P)

e) Bestimmen Sie die Exergieverluste $\dot{E}_{V,10,1}$ im Nachkühler. Es herrscht eine Umgebungstemperatur von $t_u = 20^\circ\text{C}$. (5 P)

f) Bestimmen Sie die Nutzleistung der Turbine und den Wirkungsgrad des Prozesses unter Berücksichtigung, dass Prozess- und Heizwärme genutzt werden. (5 P)

Stoffdaten Wasser:

Kritische Daten von Wasser: $t_c = 373,95^\circ\text{C}$; $p_c = 220,64 \text{ bar}$; $\rho_c = 322 \text{ kg/m}^3$

Zweiphasiger Zustand:

t	p	h'	h''	s'	s''
$^\circ\text{C}$	bar	kJ/kg	kJ/kg	kJ/(kg K)	kJ/(kg K)
15	0,0171	62,981	2528,3	0,2245	8,7803
20	0,0234	83,914	2537,4	0,2965	8,6660
25	0,0317	104,83	2546,5	0,3672	8,5566
45	0,0960	188,43	2582,4	0,6386	8,1633
50	0,1235	209,34	2591,3	0,7038	8,0748
55	0,1576	230,26	2600,1	0,7680	7,9898
95	0,8461	398,09	2667,6	1,2504	7,4151
100	1,0142	419,17	2675,6	1,3072	7,3541
105	1,2090	440,27	2683,4	1,3633	7,2952
175	8,9260	741,02	2772,7	2,0906	6,6241
180	10,028	763,05	2777,2	2,1392	6,5840
185	11,235	785,19	2781,4	2,1875	6,5447
354,67	175,00	1710,8	2529,3	3,8394	5,1431
356,99	180,00	1732,1	2509,8	3,8718	5,1061
359,26	185,00	1754,1	2488,8	3,9053	5,0670

Homogener Zustand:

t	p	h	s
°C	bar	kJ/kg	kJ/(kg K)
15	0,1235	62,992	0,2245
20	0,1235	83,924	0,2965
25	0,1235	104,84	0,3672
45	0,1235	188,44	0,6386
50	1,2352	209,44	0,7038
55	12,352	231,29	0,7674
145	1,0142	2766,6	7,5844
150	1,0142	2776,5	7,6081
155	1,0142	2786,4	7,6314
445	10,028	3360,5	7,6038
450	10,028	3371,3	7,6187
455	10,028	3382,0	7,6335

Aufgabe 3 (27 Punkte)

Ein neues Feuerzeug ist mit $m_1 = 4,9$ g Butan gefüllt, welches zweiphasig vorliegt und im thermischen Gleichgewicht mit der Umgebung ist ($t_U = 20^\circ\text{C}$). Der Dampfmassegehalt beträgt $x_1 = 5,268 \cdot 10^{-4}$.

a) Welches Volumen hat der Gastank des Feuerzeugs? (3 P)

Ein Auto, welches in der Sonne geparkt wird, heizt sich schnell auf Temperaturen von bis zu 70°C auf.

b) Ab welcher Temperatur läge das Butan einphasig im Feuerzeug vor, wenn das neue Feuerzeug im Auto vergessen würde? Um welchen Aggregatzustand handelt es sich? Begründen Sie Ihre Antwort. (3 P)

c) Beurteilen und begründen Sie anhand der Stoffdaten, ob das Feuerzeug einer Temperatur von 70°C standhält, wenn der Berstdruck bei $1,5$ N/mm² liegt. (4 P)

Das Feuerzeug wird nun ständig in der Hosentasche mitgeführt und hat bei jeder Zündung eine Temperatur von $t_2 = 30^\circ\text{C}$. Eine durchschnittliche Zündung dauert drei Sekunden und die Wärmeleistung der Flamme beträgt 40 W. Bei der Verbrennung von einem Gramm Butan werden 12,722 Wh Wärme frei. Das Feuerzeug kann gerade solange benutzt werden, bis nur noch gasförmiges Butan im Tank vorliegt (Zustandspunkt 3).

d) Stellen Sie die Zustandspunkte 1 bis 3 qualitativ in einem $\log(p),h$ -Diagramm dar. Zeichnen Sie auch die Isothermen und Isochoren ein, auf welchen die Zustandspunkte liegen. (4 P)

e) Wie viele Zündungen sind möglich und welcher Massenstrom an Butan strömt im Betrieb aus dem Feuerzeug? (7 P)

Das Gas wird durch eine adiabate Düse aus dem Feuerzeug entnommen und auf $p_U = 1,013$ bar entspannt, wobei es sich um 5 K abkühlt.

f) Mit welcher Geschwindigkeit tritt das Gas aus der Düse aus? (Hinweise: In einer Düse wird keine technische Arbeit verrichtet. Die Gasgeschwindigkeit am Düseneintritt sei 0 m/s.) (3 P)

g) Welchen Durchmesser hat die kreisförmige Düsenöffnung am Ausgang? (3 P)

Rechnen Sie mit folgenden Stoffdaten:

Kritische Daten von Butan: $t_c = 151,98^\circ\text{C}$; $p_c = 37,96 \text{ bar}$; $\rho_c = 228,0 \text{ kg/m}^3$

Zweiphasiger Zustand von Butan

t	p	ρ'	ρ''	u'	u''	h'	h''
$^\circ\text{C}$	bar	kg/m^3	kg/m^3	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg
20	2,076	578,591	5,313	246,944	574,717	247,303	613,804
30	2,834	566,976	7,137	271,263	588,350	271,762	628,063
40	3,785	554,917	9,418	296,135	602,065	296,817	642,254
50	4,958	542,339	12,241	321,600	615,818	322,514	656,319
60	6,382	529,147	15,709	347,702	629,558	348,908	670,187
70	8,091	515,220	19,951	374,493	643,215	376,064	683,768
80	10,116	500,401	25,136	402,039	656,697	404,060	696,940
90	12,493	484,472	31,494	430,422	669,862	433,001	709,530

Homogener Zustand von Butan

t	p	ρ	h
$^\circ\text{C}$	bar	kg/m^3	kJ/kg
20	1,013	2,495	618,920
25	1,013	2,458	628,051
30	1,013	2,404	636,238
40	20,00	558,249	297,714
46	20,00	550,901	312,903
50	20,00	545,886	323,158
55	20,00	539,471	336,127
56	20,00	538,167	338,742