

Thermodynamik 2

Klausur

15. September 2016

Bearbeitungszeit: 150 Minuten

Umfang der Aufgabenstellung: 7 nummerierte Seiten

Alle Unterlagen zur Vorlesung, Übung und Tutorien 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	29		
2	32		
3	19		
Zwischensumme			
Summe			
Bewertung			

Aufgabe 1 (29 Punkte)

Eine Wärmepumpe soll für ein Einfamilienhaus Heizwasser auf einem Temperaturniveau von $35\text{ }^\circ\text{C}$ und Brauchwasser bei $55\text{ }^\circ\text{C}$ zur Verfügung stellen.

Als Arbeitsmedium dient Propen. Das Haus hat einen Wärmeenergiebedarf von 50 kWh am Tag, wobei 20% auf das Brauchwasser entfallen.

Die Wärme wird aus der Umgebungsluft ($t_U = 9\text{ }^\circ\text{C}$) aufgenommen, wobei das Arbeitsmedium verdampft und um 4 K überhitzt wird. Die Luft kühlt sich dabei um 3 K ab. Die minimale Temperaturdifferenz zwischen Luft und Propen im Verdampfer beträgt 5 K . Anschließend wird das Propen in einem ersten Verdichter komprimiert, von dem ein Teilstrom entnommen wird, welcher dann im Heizwasserkondensator bis zur Siedelinie bei $t_s = 40\text{ }^\circ\text{C}$ kondensiert wird. Der verbleibende Massenstrom wird im zweiten Verdichter weiter komprimiert und gibt im zweiten Kondensator bei $t_s = 60\text{ }^\circ\text{C}$ den benötigten Wärmestrom an das Brauchwasser ab. Dabei wird das Arbeitsmedium um 4 K unterkühlt. Hinter beiden Kondensatoren befinden sich adiabate Drosseln, die das Propen auf den Verdampferdruck entspannen. Nach der Drosselung werden die beiden Massenströme wieder zusammengeführt.

Annahmen:

Verdampfung, Kondensation und Vermischung sind isobar, die Verdichter und Drosseln sind adiabat, in beiden Verdichtern tritt Reibung auf.

Verdichter-Wirkungsgrade: Verdichter 1: $\eta_{s,V1} = 0,86$; Verdichter 2: $\eta_{s,V2} = 0,8$

- Stellen Sie den Prozess qualitativ in einem $\log(p),h$ -Diagramm und einem T,s -Diagramm dar. (8 P)
- Bei welcher Temperatur verdampft das Arbeitsmedium? (2 P)
- Wie groß sind die jeweiligen Massenströme des Arbeitsmediums in den Kondensatoren, wenn die Wärmepumpe 13 Stunden am Tag in Betrieb ist? (9 P)
- Welche Gesamtleistungszahl hat die Wärmepumpe? (3 P)
- Wie groß ist der exergetische Wirkungsgrad der Wärmepumpe? (7 P)

Zweiphasiger Zustand von Propen:

t	p	ρ'	ρ''	h'	h''	s'	s''
°C	bar	kg / m ³	kg / m ³	kJ / kg	kJ / kg	kJ / (kg K)	kJ / (kg K)
-4,00	5,174	551,99	10,960	190,26	573,84	0,965	2,390
0,00	5,841	546,13	12,328	200,00	577,59	1,000	2,382
5,00	6,762	538,63	14,227	212,33	582,15	1,044	2,374
20,00	10,170	514,77	21,401	250,55	594,83	1,176	2,350
35,00	14,694	488,24	31,459	290,95	605,45	1,307	2,328
40,00	16,484	478,59	35,663	305,02	608,37	1,351	2,320
55,00	22,819	446,15	51,916	349,61	614,42	1,486	2,293
60,00	25,283	433,73	58,986	365,49	615,18	1,532	2,282
70,00	30,802	404,97	77,063	399,54	613,71	1,629	2,253
90,00	44,675	289,52	170,890	497,56	568,44	1,895	2,090
91,00	45,499	253,73	205,520	517,74	545,91	1,949	2,027

Homogener Zustand von Propen:

t	p	ρ	h	s
°C	bar	kg / m ³	kJ / kg	kJ / (kg K)
0,00	5,174	10,727	580,37	2,414
2,00	5,174	10,616	583,64	2,426
4,00	5,174	10,508	586,91	2,438
4,00	5,841	12,061	584,27	2,407
40,00	14,800	30,612	615,61	2,359
45,63	16,484	34,110	620,81	2,359
51,29	16,484	32,771	632,90	2,397
53,52	16,484	32,290	637,59	2,411
56,36	16,484	31,712	643,49	2,429
56,95	16,484	31,596	644,71	2,433
58,08	16,484	31,376	647,06	2,440
74,36	22,819	43,849	661,71	2,433
78,96	25,283	49,162	664,25	2,425
80,12	25,283	48,739	667,00	2,433
87,72	25,283	46,261	684,57	2,482
58,00	25,283	439,730	358,78	1,512
56,00	25,283	445,380	352,26	1,492

Aufgabe 2 (32 Punkte)

Ein Wassertank mit einem Volumen $V_{ges} = 1500$ l wird zu einem Teil mit flüssigem Wasser befüllt, das ein Volumen $V_{W,1} = 1250$ l im Tank einnimmt. Der verbleibende Raum wird von der Umgebungsluft mit einer Temperatur $t_U = 20^\circ\text{C}$ und relativen Feuchte $\varphi_U = 60\%$ eingenommen (Zustand Z1: $t_1 = t_U$, $\varphi_1 = \varphi_U$). Der Tank wird nach der Befüllung geschlossen. Durch Sonneneinstrahlung wärmt sich der Tankinhalt (flüssiges Wasser + feuchte Luft) auf eine Temperatur $t_2 = 30^\circ\text{C}$ auf. Durch den Kontakt der Luft mit dem Wasser im Inneren des Tanks, reichert sich diese mit gasförmigem Wasser auf eine relative Feuchte von $\varphi_2 = 90\%$ an (Zustand Z2).

Hinweis: Die folgenden Aufgabenteile a) bis g) sind rein rechnerisch zu lösen. Aus dem beliebigen h_{1+x}, x -Diagramm abgelesene Werte dürfen nur zur Überprüfung von Rechenergebnissen genutzt werden. Für niedergeschriebene Zahlenwerte, die nicht im Zusammenhang mit einem angemessenen Rechenweg stehen, werden keine Punkte gegeben.

- a) Berechnen Sie die Masse der trockenen Luft $m_{tr,L,1}$, die sich nach dem Füllvorgang im Tank befindet (Zustand Z1). (4 P)
- b) Welcher Druck p_2 stellt sich im Tank durch die Erwärmung des Tankinhalts ein? Nehmen Sie zur Vereinfachung an, dass der Luft in Zustand Z2 das gleiche Volumen wie in Zustand Z1 zur Verfügung steht, d.h. $V_{L,2} = V_{L,1}$. (5 P)

Nun wird der Tank geöffnet. Dabei entweicht aufgrund des Überdrucks ein Teil der Luft aus dem Tank, bis das mechanische Gleichgewicht wieder hergestellt ist ($p_3 = p_U$). Die Expansion der Luft verläuft isotherm ($t_3 = t_2$), die dafür nötige Wärme liefern die von der Sonne aufgeheizten Metallwände des Tanks.

- c) Wieviel Liter Luft $\Delta V_{L,23}$ entweicht durch den Druckausgleich aus dem Tank? (2 P)
- Hinweis: Falls Aufgabenteil b) nicht gelöst werden konnte, setzen Sie für den Druck in Zustand Z2 den Wert $p_2 = 1,1$ bar ein.

Dem Tank wird nun eine Wassermenge von $\Delta V_W = 500$ l entnommen, wobei der Tank geöffnet bleibt. Gehen Sie zur Vereinfachung davon aus, dass sich vor der Entnahme noch die ursprüngliche Wassermenge $V_{W,3} = V_{W,1} = 1250$ l im Tank befindet. Die Luft im Volumen $V_{L,3} = 250$ l mit einer Temperatur $t_3 = t_2 = 30^\circ\text{C}$ und relativen Feuchte $\varphi_3 = 85\%$ wird aufgrund von Konvektion zu 45 Vol.-% durch Umgebungsluft ersetzt. Das durch die Wasserentnahme frei werdende Volumen ΔV_W wird ebenfalls von einströmender Umgebungsluft eingenommen. Die Vermischung der Luft der beiden Zustände (U und Z3) ergibt den Zustandspunkt M1. Der Tank wird nach der Wasserentnahme wieder geschlossen.

d) Tragen Sie die Zustandspunkte U und Z3 in das beiliegende h_{1+x},x -Diagramm ein und stellen Sie die Vermischung der Luft durch eine Mischungsgerade dar. Berechnen Sie den Wassergehalt x_{M1} des Mischungspunkts M1. Tragen Sie anschließend auch den Punkt M1 in das h_{1+x},x -Diagramm ein. (8 P)

e) Welche Temperatur t_{M1} und relative Feuchte φ_{M1} stellt sich in der Luft am Mischungspunkt M1 ein? (6 P)

Durch Verdunstung von flüssigem Wasser reichert sich die Luft wieder weiter mit gasförmigem Wasser an. Dadurch steigt der Wassergehalt der Luft um $\Delta x = 0,75$ g/kg. Dieser Vorgang kann als Zumischung von flüssigem Wasser bei der Temperatur $t_{W,M1} = 30^\circ\text{C}$ betrachtet werden. Die Druckänderung durch die Kühlung der Luft ist in den nachfolgenden Aufgabenteilen f) und g) zu vernachlässigen.

f) Auf welche Temperatur t_{M2} kühlt sich die Luft im Tank durch die Verdunstung ab? Tragen Sie die Zustandsänderung (M1→M2) in das h_{1+x},x -Diagramm ein. (3 P)

Ein Kühlaggregat kühlt den Tankinhalt nun auf eine Temperatur $t_K = 10^\circ\text{C}$ ab.

g) Berechnen Sie die Wärmemenge Q_K , die der Luft bei der Kühlung entzogen wird. Stellen Sie die Kühlung der Luft (M2 → M3*) und das Auskondensieren des Wassers (M3* → M3) im h_{1+x},x -Diagramm dar. (4 P)

Luft und Wasserdampf können als ideale Gase betrachtet werden.

Der Gesamtdruck in der Umgebung beträgt $p_U = 1,01325$ bar.

Dampfdruck von Wasser: $\ln(p/p_0) = 12,40682 - 4222,037 \text{ K}/(T - 31,95 \text{ K})$

mit T in K, $p_0 = 1$ bar

Verdampfungsenthalpie von Wasser bei 0°C : $\Delta h_v = 2500$ kJ/kg

Spezifische isobare Wärmekapazitäten: trockene Luft $c_{p,L} = 1,004$ kJ/(kg K)

Wasserdampf $c_{p,D} = 1,860$ kJ/(kg K)

flüssiges Wasser $c_{p,W} = 4,186$ kJ/(kg K)

Molare Massen: Luft $M_L = 28,96$ kg/kmol

Wasser $M_W = 18,015$ kg/kmol

Allgemeine Gaskonstante: $R_m = 8,314472$ kJ/(kmol K)

Aufgabe 3 (19 Punkte)

In Höhlen werden seit langem Carbidlampen eingesetzt. Dabei wird Calciumkarbid CaC_2 mit Wasser beträufelt. Es entstehen Calciumhydroxid und Ethin, wobei das Ethin der Lampe als Brennstoff dient.



- a) Wieviel m^3 (Normvolumen) Ethin entsteht aus 1 kg Calciumkarbid? (2 P)
- b) Welche Masse an Wasser wird dafür benötigt? (1 P)
- c) Wie groß ist die Standard-Reaktionsenthalpie? (2 P)
- d) Warum bleibt diese Reaktion nicht bei Calciumoxid (CaO) stehen, mit der Hälfte des Wasserbedarfs, sondern reagiert weiter zu Calciumhydroxid (Ca(OH)_2)? (2 P)

Das entstandene Ethin verbrennt mit Luft (21 mol-% O_2 , 79 mol-% N_2) in einer kleinen Flamme mit sehr hoher Temperatur, was eine große Lichtausbeute ergibt.

- e) Stellen Sie die Reaktionsgleichung für die stöchiometrische Verbrennung auf. (1 P)
- f) Wie groß ist die adiabate Reaktionstemperatur der Verbrennung?
Die Edukte liegen bei Standard-Temperatur vor. (4 P)
- g) Warum wird diese Temperatur real nicht erreicht? (1 P)
- h) Wie hoch ist die Temperatur, wenn in der Flamme 20 mol-% des Kohlenstoffs zu CO_2 und 80 % zu CO oxidiert wird und die Wasserstoffatome zu 20 mol-% atomar (H), 10 mol-% molekular (H_2), 20 mol-% als OH und 50 mol-% als H_2O vorliegen? (6 P)
Gehen Sie hierbei ebenfalls von einer stöchiometrischen Verbrennung aus.

Stoff	$\Delta^B h_\Theta$	\bar{c}_p	M
	kJ/mol	J/(mol K)	g/mol
Calciumkarbid CaC_2	-59,8	62,43	64,10
Calciumoxid CaO	-634,9	42,05	56,08
Calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$	-986,1	93,26	74,09
Ethin C_2H_2	227,5	74,85	26,04
Wasser H_2O (l)	-285,83	87,96	18,015
Wasser H_2O (g)	-241,82	46,98	18,015
Hydroxyl OH	41,25	33,90	17,008
Molekularer Wasserstoff H_2	0	32,31	2,016
Atomarer Wasserstoff H	217,92	20,79	1,008
Kohlenstoffdioxid CO_2	-393,5	57,98	44,01
Kohlenstoffmonoxid CO	-110,5	35,01	28,01
Molekularer Sauerstoff O_2	0	36,48	31,998
Atomarer Sauerstoff O	248,33	20,95	15,999
Stickstoff N_2	0	30,11	34,68

$$R_m = 8,3145 \text{ J}/(\text{mol K})$$