

Thermodynamik 2

Klausur

21. September 2017

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: _____

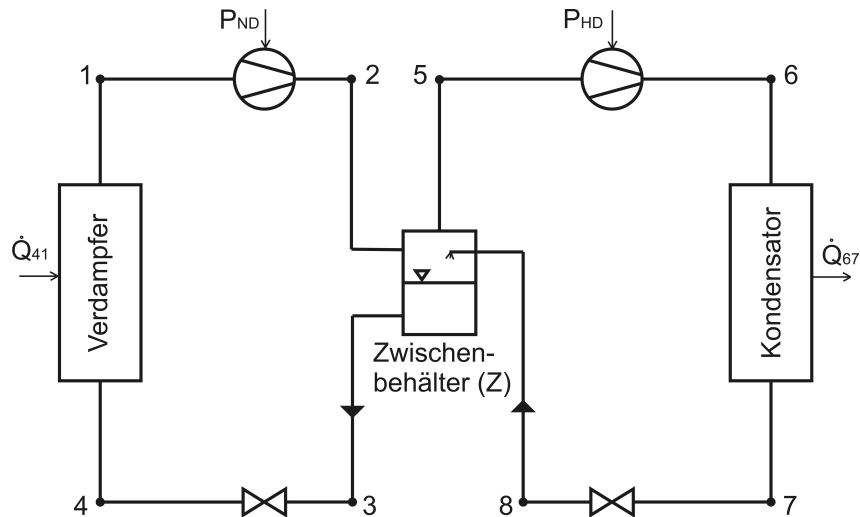
Unterschrift: _____

Angaben zur Korrektur

Aufgabe	Maximale Punktzahl	Erreichte Punkte	Korrektor
1	28		
2	30		
3	22		
Zwischensumme			
Summe			
Bewertung			

Aufgabe 1 (28 Punkte)

In einer zweistufigen Kältemaschine durchläuft das Arbeitsmedium Ammoniak den folgenden Kreisprozess.



Zustandsänderungen

- 1 → 2: Irreversibel adiabate Verdichtung ($P_{ND} = 27,3 \text{ kW}$) vom Zustand 1 (gesättigter Dampf, $p_1 = 1,51 \text{ bar}$) auf $p_2 = 4,2 \text{ bar}$ ($\dot{m}_{ND} = 0,16 \text{ kg/s}$).
- 2/8 → Z: Isobare Vermischung der Massenströme aus dem Hoch- und dem Niederdruckkreislauf in einem adiabaten Behälter (Z). Das Ammoniak im Behälter liegt im Phasengleichgewicht vor.
- 3 → 4: Adiabate Drosselung vom Zustand der siedenden Flüssigkeit auf den Druck $p_4 = p_1$.
- 4 → 1: Isobare Wärmezufuhr im Verdampfer.
- 5 → 6: Irreversibel adiabate Verdichtung vom Zustand 5 (gesättigt) auf $p_6 = 11,67 \text{ bar}$, wobei der isentrope Verdichterwirkungsgrad $\eta_{s,V} = 0,8$ beträgt.
- 6 → 7: Isobare Wärmeabfuhr und Kondensation bis zur Siedelinie.
- 7 → 8: Adiabate Drosselung auf den Druck $p_8 = p_2$.
- a) Stellen Sie den Prozess qualitativ in einem T,s -Diagramm dar. Der Zustand „Z“ muss nicht eingetragen werden. (6 P)
- b) Berechnen Sie den Wärmestrom \dot{Q}_{41} . (2 P)
- c) Berechnen Sie den Massenstrom \dot{m}_{HD} und die Leistung P_{HD} . (9 P)
- d) Berechnen Sie die Leistungszahl und den exergetischen Wirkungsgrad der Kältemaschine. Wie groß ist der Exergieverluststrom in den Drosseln ($t_u = 25^\circ\text{C}$)? (9 P)
- e) Warum wird bei linksläufigen Prozessen üblicherweise mehr technische Arbeit für die Druckerhöhung benötigt als bei rechtsläufigen Prozessen? (2 P)

Zweiphasiger Zustand von Ammoniak:

T	p	h'	h''	s'	s''
K	bar	kJ/kg	kJ/kg	kJ/(kg K)	kJ/(kg K)
247,51	1,47	226,28	1572,90	1,0240	6,4647
247,80	1,49	227,58	1573,30	1,0293	6,4600
248,08	1,51	228,87	1573,70	1,0344	6,4554
248,37	1,53	230,14	1574,10	1,0396	6,4508
248,65	1,55	231,40	1574,50	1,0446	6,4463
272,18	4,14	338,66	1604,30	1,4552	6,1054
272,31	4,16	339,25	1604,50	1,4574	6,1037
272,43	4,18	339,84	1604,60	1,4595	6,1020
272,56	4,20	340,43	1604,80	1,4617	6,1004
272,69	4,22	341,01	1604,90	1,4638	6,0987
272,81	4,24	341,60	1605,00	1,4659	6,0970
303,09	11,65	484,60	1629,30	1,9587	5,7354
303,14	11,67	484,88	1629,30	1,9596	5,7348
303,20	11,69	485,16	1629,30	1,9605	5,7342
303,26	11,71	485,44	1629,40	1,9614	5,7335
303,32	11,73	485,72	1629,40	1,9623	5,7329
303,37	11,75	486,00	1629,40	1,9632	5,7323

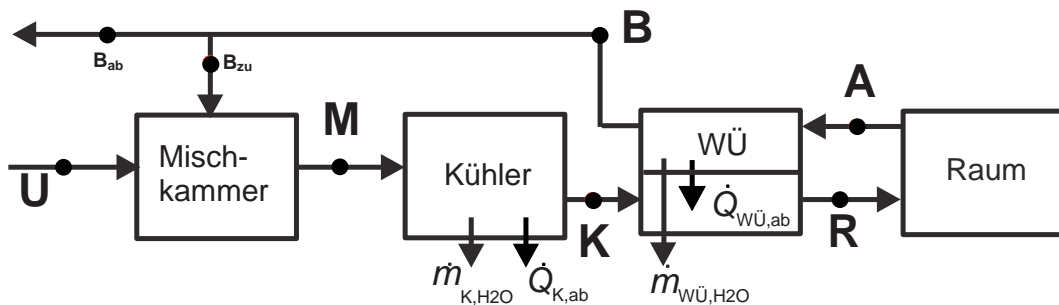
Homogener Zustand von Ammoniak:

T	p	h	s
K	bar	kJ/kg	kJ/(kg K)
323,15	4,2	1728,9	6,5189
328,15	4,2	1740,5	6,5547
333,15	4,2	1752,2	6,5898
338,15	4,2	1763,8	6,6244
343,15	4,2	1775,3	6,6583
338,15	11,67	1730,9	6,0526
343,15	11,67	1744,2	6,0916
348,15	11,67	1757,4	6,1296
353,15	11,67	1770,3	6,1666

Aufgabe 2 (30 Punkte)

Ein Raum soll mit einer Klimaanlage gekühlt werden. Dazu strömt die Raumzuluft mit einer Temperatur $t_R = 20^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchte $\varphi_R = 50\%$ ein. Die Klimaanlage besteht aus einer adiabaten Mischkammer, einem nachgeschalteten Kühler sowie einem inneren Wärmeübertrager. Die Raumabluft mit $t_A = 35^\circ\text{C}$ und $\varphi_A = 70\%$ wird durch den inneren Wärmeübertrager geleitet, um die in den Raum einströmende Luft vorzuwärmen. Diese abgekühlte und entfeuchtete Raumabluft wird in der Mischkammer mit der Umgebungsluft ($t_U = 25^\circ\text{C}$, $\varphi_U = 60\%$) im Verhältnis $\dot{m}_{tr.L,U}/\dot{m}_{tr.L,A} = 1/3$ adiabatisch vermischt. Dazu wird die Umgebungsluft mit $\dot{m}_{tr.L,U} = 0,3 \text{ kg/s}$ angesaugt. Die Mischluft wird im Kühler gekühlt und entfeuchtet. Anschließend wird die gesättigte Luft im inneren Wärmeübertrager (WÜ) auf den gewünschten Luftzustand der einströmenden Raumzuluft erwärmt. Der gesamte Prozess ist nach außen hin adiabatisch und isobar ($p_{ges} = 1,01325 \text{ bar}$). Luft und Wasserdampf können als ideale Gase betrachtet werden.

Verwenden Sie folgende Abkürzungen für die Kennzeichnung der Luftzustände: Raumzuluft (R), Raumabluft (A), Umgebungsluft (U), Luft am Austritt der Mischkammer (M), Mischluft nach der Abkühlung (K), Raumabluft nach Abkühlung (B).



Hinweis: Die Aufgabenteile b) bis f) sind rein rechnerisch zu lösen. Aus dem beiliegenden h_{1+x}, x -Diagramm abgelesene Werte dürfen nur zur Überprüfung der Rechenergebnisse genutzt werden. Für niedergeschriebene Zahlenwerte, die nicht im Zusammenhang mit einem angemessenen Rechenweg stehen, werden keine Punkte vergeben.

- a) Tragen Sie alle Zustände und Zustandsänderungen der feuchten Luft in das beiliegende h_{1+x}, x -Diagramm ein. Vervollständigen Sie dieses im Lauf der folgenden Rechnungen. (6 P)
- b) Berechnen Sie den Massenstrom der trockenen Luft im Mischungszustand M. (1 P)
- c) Berechnen Sie den Wassergehalt der Luft im Zustand R und im Zustand U. (4 P)
- d) Berechnen Sie den Wärmestrom im inneren Wärmeübertrager. (6 P)
- e) Berechnen Sie die Temperatur und den Wassergehalt der Luft am Austritt der Mischkammer, wenn die Abluft die Klimaanlage (Zustand B) mit $t_B = 27,7^\circ\text{C}$ und $x_B = 23,7 \text{ g/kg}$ verlässt. Beim Mischvorgang wird kein Wasser auskondensiert. (6 P)
- f) Berechnen Sie die Kühlleistung im Kühler und den anfallenden Kondensatmassenstrom $\dot{m}_{\text{K,H}_2\text{O}}$. (7 P)

Stoffdaten

Spezifische isobare Wärmekapazitäten: Trockene Luft $c_{p,L} = 1,007 \text{ kJ}/(\text{kg K})$

Wasserdampf $c_{p,D} = 1,86 \text{ kJ}/(\text{kg K})$

Flüssiges Wasser $c_{p,W} = 4,19 \text{ kJ}/(\text{kg K})$

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

Molare Massen: Luft $M_L = 28,96 \text{ kg/kmol}$; Wasser $M_W = 18,015 \text{ kg/kmol}$

Allgemeine Gaskonstante: $R_m = 8,314472 \text{ kJ}/(\text{kmol K})$

Dampfdruck von Wasser: $\ln(p/\text{mbar}) = 18,9141 - 4010,823/(t/^\circ\text{C} + 234,4623)$

$p_{ges} = 1,01325 \text{ bar}$

Aufgabe 3 (22 Punkte)

Betrachtet wird der Turbomotor (aufgeladener Ottomotor) eines Formel 1 Rennwagens von 1987, der einen Ladedruck von $p = 4$ bar hat, was zu dieser Zeit noch regelkonform war. Als Kraftstoff soll Oktan C_8H_{18} verwendet werden, der mit Luft stöchiometrisch ($\lambda = 1$) und vollständig verbrannt wird. Die Luft besteht aus 21 mol-% Sauerstoff O_2 und 79 mol-% Stickstoff N_2 .

- a) Geben Sie die Reaktionsgleichung für diese Verbrennungsreaktion an. (2 P)
- b) Berechnen Sie die Zusammensetzung des Kraftstoff-Luft Gemisch und des Abgases, d.h. alle Molenbrüche sowohl auf der Edukt-, als auch auf der Produkteseite. (4 P)
- c) Berechnen Sie die Reaktionsenthalpie bei Standardtemperatur und dem Ladedruck $p = 4$ bar bezogen auf 1 mol Brennstoff. Berechnen Sie dafür zunächst den Partialdruck des Kraftstoffs und des Wassers, unter der Annahme, dass diese Komponenten bei den Bedingungen gasförmig vorliegen. Prüfen Sie diese Annahme (zeichnerisch) mithilfe der gegebenen Dampfdruckkurven (nächste Seite). Geben Sie anschließend den Aggregatzustand des Kraftstoffs und des Wassers an, und berechnen dementsprechend die gesuchte Reaktionsenthalpie.

Hinweise:

- Sämtliche Enthalpieänderungen aufgrund des höheren Drucks ($p > p_\Theta$) sind zu vernachlässigen.
- Bei idealen Gasen gilt, dass der Gesamtdruck gleich der Summe der Partialdrücke aller Komponenten ist: $p = \sum_{i=1}^k p_i$

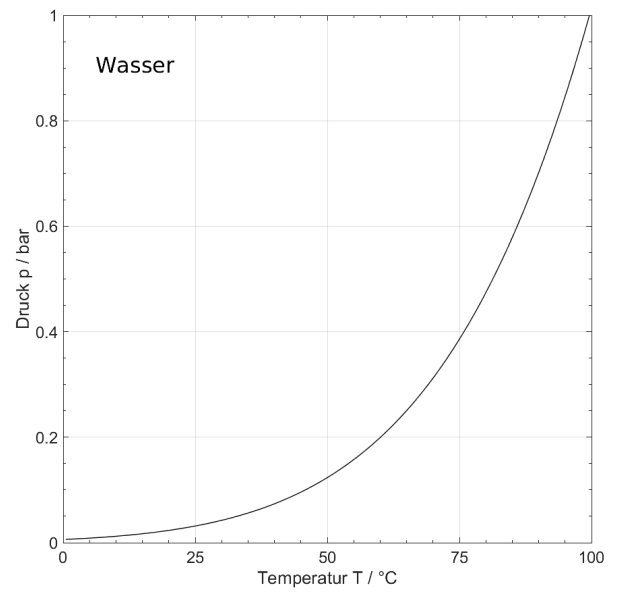
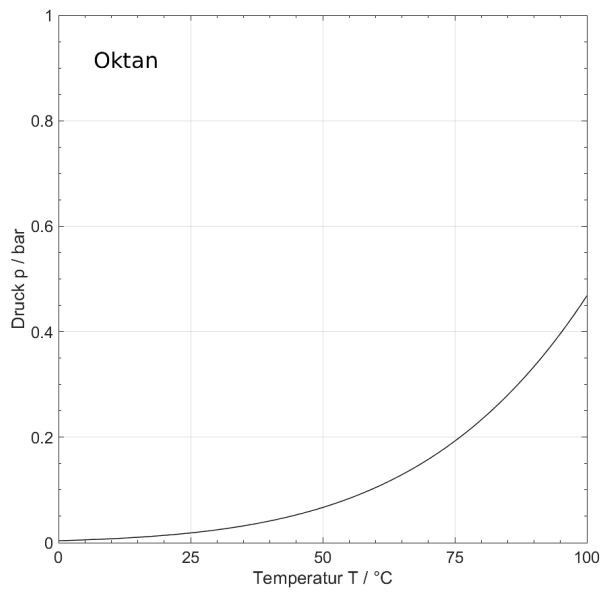
(5 P)

- d) Die Verbrennungsreaktion läuft bei 600 K ab. Berechnen Sie die Verbrennungsenthalpie bei Reaktionstemperatur bezogen auf 1 mol Brennstoff.

Hinweis: Berücksichtigen Sie dabei mögliche Phasenübergänge. (7 P)

- e) Berechnen Sie den Kraftstoffverbrauch (Stoffstrom \dot{n}) in mol/s, wenn der Rennwagen im Mittel 70 Liter flüssigen Kraftstoffs, mit einer Dichte von $\rho_{fl.K} = 698,27$ kg/m³ auf einer Strecke von 100 km, bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 200 km/h verbraucht. Welche Leistung gibt der Motor dabei ab, wenn angenommen wird, dass unter Berücksichtigung sämtlicher Verluste nur 30% des vom Motor durch Verbrennung erzeugten Wärmestroms in nutzbare Wellenleistung umgesetzt werden können? Die molare Masse von Oktan beträgt $M_{C_8H_{18}} = 114,23$ g/mol. (2 P)

- f) Beschreiben Sie was sich an der Reaktionsgleichung ändert, wenn mit Luftüberschuss ($\lambda > 1$) verbrannt wird. Was hat das für Auswirkungen auf die Abgastemperatur unter sonst gleichen Bedingungen? (2 P)



Stoffdaten:

Stoff	$\Delta^B h_\Theta$	c_p
	kJ/mol	kJ/(mol K)
Oktan C_8H_{18} (l)	-250,3	0,256
Oktan C_8H_{18} (g)	-208,7	0,263
Sauerstoff O_2 (g)	0	0,0306
Stickstoff N_2 (g)	0	0,0301
Kohlenstoffdioxid CO_2 (g)	-393,6	0,0433
Wasser H_2O (l)	-286	0,0755
Wasser H_2O (g)	-242,1	0,0347

Eine Komponente vollzieht einen Phasenwechsel, wenn die Siedetemperatur bei vorliegendem Partialdruck der Komponente überschritten wird. Diese ist zusammen mit der zugehörigen Verdampfungsenthalpie nachfolgend angegeben:

Stoff	T_s	$\Delta^V h$
	K	kJ/mol
Oktan C_8H_{18}	322,88	39,97
Wasser H_2O	357,42	41,38