

Thermodynamik 1

Klausur

03. März 2017

Bearbeitungszeit: 150 Minuten

Umfang der Aufgabenstellung: 6 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	29		
2	27		
3	24		
Zwischensumme			
Bonuspunkte			
Summe			
Bewertung			

Aufgabe 1 (29 Punkte)

Das Arbeitsprinzip eines LKW-Motors kann mit dem Seiliger-Vergleichsprozess beschrieben werden, der die folgenden Zustandsänderungen beinhaltet:

- 1 → 2: isentrope Kompression ausgehend von Luft im Umgebungszustand
- 2 → 3: isochore Wärmezufuhr bis zu einem Druck von $p_3 = 1,2 \cdot p_2$
- 3 → 4: isobare Wärmezufuhr
- 4 → 5: isentrope Expansion bis zum Ausgangsvolumen
- 5 → 1: isochore Wärmeabfuhr bis zum Umgebungszustand (Ladungswechsel)

Der gesamte Prozess ist mit Luft als idealem Gas zu berechnen. Für die Luft wird eine konstante mittlere Wärmekapazität für den gesamten Temperaturbereich angenommen. Insgesamt, d.h. von Zustand 2 bis 4, wird eine spezifische Wärme von $q_{zu} = 1000 \text{ kJ/kg}$ zugeführt. Das Verdichtungsverhältnis des Motors beträgt $V_{max}/V_{min} = 18$.

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

Stoffdaten Luft: $c_p = 1,108 \text{ kJ/(kg K)}$; $M = 28,96 \text{ g/mol}$

Umgebung: $T_u = 300 \text{ K}$; $p_u = 100 \text{ kPa}$

- a) Skizzieren Sie den Prozess qualitativ in einem p, v - und einem T, s -Diagramm. (5 P)
- b) Welcher Zusammenhang besteht zwischen Volumenänderungsarbeit, technischer Arbeit und Wärme im Kreisprozess? Zeichnen Sie diese Größen im p, v -Diagramm ein. (3 P)
- c) Welche spezifische Nutzarbeit gibt der Prozess ab? (12 P)
- d) Wie groß ist der thermische Wirkungsgrad? (3 P)

Der LKW-Motor hat sechs Zylinder, wobei jeder Zylinder beim Ladungswechsel 1,77 l Luft ansaugt. Bei stationärer Fahrt auf der Autobahn mit 80 km/h läuft der Motor mit 1900 Umdrehungen pro Minute, wobei ein Arbeitstakt (d.h. ein Durchlauf des Kreisprozesses) zwei Umdrehungen entspricht.

- e) Welche Gesamtleistung stellt der Motor zur Verfügung? (3 P)
- f) Warum wird der in c) berechnete Wirkungsgrad in einem realen Motor nicht erreicht? Nennen Sie (mindestens) drei Ursachen für Verluste im Motor. (3 P)

Aufgabe 2 (27 Punkte)

Um die im Abgas eines LKW enthaltene Restwärme zu nutzen, soll eine moderne Abgasenergie-Rückgewinnung ausgelegt werden, bestehend aus einem Organic Rankine Cycle (ORC) mit zwei Turbinenstufen. (ORC: Dampfturbinen-Prozess mit organischem Arbeitsmedium)

Die Wärme des Abgasmassenstroms $\dot{m}_a = 0,25 \text{ kg/s}$ liefert die Antriebsenergie für den Kreisprozess. Das Abgas tritt mit einer Temperatur von 350°C in den Dampferzeuger ein und mit 110°C wieder aus. Der zulässige Höchstdruck im gesamten ORC-System ist aus Sicherheitsgründen auf $2,1766 \text{ MPa}$ begrenzt. Als Arbeitsmedium für den Kreisprozess dient Methanol. Dieses verlässt den Dampferzeuger bei einer Temperatur von 260°C . Die erste Turbine hat einen isentropen Wirkungsgrad von 90% und entspannt das Arbeitsmedium bis auf den Mitteldruck von $1,769 \text{ MPa}$. Mit der dabei umgesetzten Leistung wird ein elektrischer Generator für die Bordelektronik des LKW angetrieben. In der zweiten Turbine wird das Methanol weiter entspannt, bis erste Tröpfchen Flüssigkeit entstehen ($x = 0,99$). Die dabei abgegebene Leistung wird dem Antriebsstrang des LKW zur Verfügung gestellt. Das Methanol kondensiert anschließend in einem Wärmeübertrager, welcher mit Umgebungsluft gekühlt wird. Die Kondensationstemperatur des Methanols ist dabei 20 K über Umgebungstemperatur. Die Speisepumpe saugt um 5 K unterkühlte Flüssigkeit an und fördert diese wieder auf den Druck des Dampferzeugers.

- 1 \rightarrow 2: reversibel adiabate Druckerhöhung in einer Pumpe
- 2 \rightarrow 3: isobare Vorheizung, Verdampfung und Überhitzung
- 3 \rightarrow 4: irreversibel adiabate Expansion in einer Turbine 1 bis zum Druck $p_4 = 1,769 \text{ MPa}$
- 4 \rightarrow 5: irreversibel adiabate Expansion in einer Turbine 2 bis zum Ausgangsdruck und einem Dampfgehalt von $x = 0,99$
- 5 \rightarrow 1: isobare Kondensation mit Unterkühlung

Das Abgas kann als ideales Gas betrachtet werden mit einer isobaren Wärmekapazität von $c_p = 1,066 \text{ kJ}/(\text{kg K})$. Die Umgebungstemperatur beträgt $t_u = 20^\circ\text{C}$.

- a) Zeichnen Sie das Anlagenschema und stellen Sie den Prozess qualitativ richtig in einem T, s -Diagramm dar. (10 P)
- b) Bestimmen Sie den Massenstrom \dot{m}_{orc} vom umlaufenden Methanol im ORC-Prozesses, wenn die Enthalpie $h_2 = -77,14 \text{ kJ/kg}$ beträgt. (3 P)
- c) Bestimmen Sie Nutzleistung und den thermischen Wirkungsgrad des ORC-Prozesses. (8 P)

Um die Leistung von Turbine 2 unabhängig regeln zu können, wird diese mit einem parallel geschalteten Bypass ausgestattet (Zustandsänderung 4 → 5b). In diesem Bypass werden 50 % des umlaufenden Massenstroms \dot{m}_{orc} über eine isenthalpe Drosselung ($h = \text{konstant}$) auf Kondensatordruck entspannt, bevor das Methanol dem Wärmeübertrager (gemeinsam mit dem Rest aus der Turbine) an Punkt 5 zugeführt wird.

d) Zeichnen Sie die Zustandsänderung der Drossel in das T, s -Diagramm aus Aufgabenteil a) ein. (1 P)

e) Bestimmen Sie den exergetischen Wirkungsgrad des Kreisprozesses, wenn 50 % des Massenstroms über den Bypass gedrosselt werden ($\dot{m}_{bypass}/\dot{m}_{orc} = 0,5$). (5 P)

Stoffdaten Methanol:

Kritischer Punkt: $t_c = 239,45^\circ\text{C}$, $p_c = 8,1035 \text{ MPa}$

t	p	ρ	h	s
$^\circ\text{C}$	MPa	kg/m^3	kJ/kg	$\text{kJ}/(\text{kg K})$
30,00	0,028021	781,55	-92,813	-0,28942
35,00	0,028021	0,36128	1073,3	3,4953
40,00	0,028021	0,35231	1089,2	3,5463
30,00	0,035518	781,56	-92,807	-0,28943
35,00	0,035518	776,84	-79,893	-0,24718
40,00	0,035518	0,45211	1078,2	3,4515
240,0	1,7690	14,367	1390,4	3,2522
250,0	1,7690	13,991	1413,8	3,2972
260,0	1,7690	13,645	1436,8	3,3409
240,0	2,1766	18,069	1378,7	3,1801
250,0	2,1766	17,554	1403,4	3,2276
260,0	2,1766	17,085	1427,6	3,2735

t	p	ρ'	ρ''	h'	h''	s'	s''
$^\circ\text{C}$	MPa	kg/m^3	kg/m^3	kJ/kg	kJ/kg	$\text{kJ}/(\text{kg K})$	$\text{kJ}/(\text{kg K})$
35,00	0,028021	776,83	0,36129	-79,900	1073,3	-0,24717	3,4953
40,00	0,035518	772,10	0,45211	-66,811	1078,2	-0,20506	3,4515
45,00	0,044649	767,33	0,56139	-53,544	1083,0	-0,16307	3,4094
160,24	1,7690	630,03	20,648	320,74	1137,4	0,82411	2,7085
169,56	2,1766	614,02	25,921	358,98	1133,0	0,90992	2,6583

Aufgabe 3 (24 Punkte)

Die Universität Paderborn wird regelmäßig von einem LKW mit flüssigem Stickstoff (N_2) beliefert, der in den Laboren benötigt wird. Auf dem LKW befindet sich dafür ein Tank mit einem Volumen von $V_T = 36,5 \text{ m}^3$, welcher vor der Auslieferung aufgefüllt werden muss. Nach der Befüllung befindet sich ausschließlich Stickstoff im Phasengleichgewicht bei Umgebungsdruck $p_u = 1,013 \text{ bar}$ im Tank, wobei 92% des Tankvolumens mit Flüssigkeit gefüllt sind. Anschließend wird der Tank verschlossen und dem Stickstoff wird trotz der guten Isolierung ein Wärmestrom von 25 kW aus der Umgebung zugeführt. Zum Schutz vor Überdruck ist ein Sicherheitsventil angebracht, welches bei 230 kN/m^2 auslöst und dampfförmigen Stickstoff an die Umgebung entlässt.

- Welche Temperatur hat der Stickstoff während des Befüllvorgangs (T_1) und bei Auslösen des Sicherheitsventils (T_2)? (2 P)
- Welche Masse an Stickstoff befindet sich nach der Befüllung im Tank des LKW? (4 P)
- Wohin verschiebt sich die Phasengrenze im Tank während der Wärmezufuhr? Skizzieren Sie die Zustandsänderung im T, ρ -Diagramm und begründen Sie kurz. (5 P)
- Wie lange dauert es bis das Sicherheitsventil auslöst? (7 P)

Der Stickstoffbehälter der Universität, mit einem Gesamtvolumen von $V_B = 7 \text{ m}^3$, soll nun befüllt werden. Vor dem Befüllen befindet sich noch Stickstoff im Phasengleichgewicht bei T_2 im Behälter, wobei 500 l des Stickstoffs flüssig sind. Nun wird so lange Stickstoff aus dem LKW-Tank eingefüllt, bis nur noch $0,75 \text{ m}^3$ im Behälter dampfförmig verbleiben. Aus dem LKW-Tank wird ausschließlich flüssiger Stickstoff in den Vorratsbehälter gepumpt. Die Temperatur in beiden Tanks bleibt während des Umfüllens identisch (T_2).

- Wie viele Liter Stickstoff fließen durch die Befüllleitung? (6 P)

Stoffdaten für Stickstoff finden Sie auf der nächsten Seite.

Kritische Daten von Stickstoff: $T_c = 126,19 \text{ K}$; $p_c = 3,396 \text{ MPa}$; $\rho_c = 313,3 \text{ kg/m}^3$

Zweiphasiger Zustand von Stickstoff:

T	p	ρ'	ρ''	u'	u''	h'	h''
K	MPa	kg/m ³	kg/m ³	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg
74,89	0,0750	817,16	3,50	-127,15	53,77	-127,05	75,23
77,35	0,1013	806,09	4,61	-122,15	55,19	-122,02	77,16
77,66	0,1050	804,70	4,77	-121,53	55,36	-121,40	77,39
79,88	0,1350	794,52	6,01	-117,01	56,56	-116,84	79,01
81,74	0,1650	785,77	7,24	-113,17	57,51	-112,96	80,30
83,37	0,1950	778,01	8,46	-109,82	58,31	-109,57	81,36
84,82	0,2250	770,99	9,67	-106,82	58,98	-106,53	82,25
85,05	0,2300	769,88	9,87	-106,35	59,08	-106,05	82,38
86,14	0,2550	764,55	10,87	-104,09	59,55	-103,76	83,01
87,34	0,2850	758,56	12,07	-101,59	60,06	-101,21	83,66
87,91	0,30	755,71	12,67	-100,40	60,28	-100,00	83,96
100,40	0,80	686,93	32,86	-73,45	63,45	-72,28	87,80
107,96	1,30	636,77	54,73	-55,86	63,00	-53,82	86,75
113,65	1,80	591,16	79,67	-41,42	60,66	-38,38	83,25
118,27	2,30	544,60	109,84	-28,20	56,53	-23,98	77,47
122,20	2,80	490,63	150,28	-14,74	49,76	-9,03	68,40