

Thermodynamik 1

Klausur

28. Juli 2014

Bearbeitungszeit: 150 Minuten

Umfang der Aufgabenstellung: 6 nummerierte Seiten

Alle Unterlagen zu 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	23		
2	35		
3	22		
Zwischensumme			
Bonuspunkte			
Summe			
Bewertung			

Aufgabe 1 (23 Punkte)

Für die Zubereitung einer Tiefkühlpizza muss ein Backofen auf 200°C vorgeheizt werden. Der Backofen und die enthaltene Luft befinden sich zunächst im Umgebungszustand: 20°C und 1 bar. Der Innenraum des Backofens hat die Maße: $l = 30$ cm, $b = 35$ cm, $h = 40$ cm. Die Zustandsänderungen der Luft während des Aufheizens sind reversibel und die Luft soll als ideales Gas betrachtet werden mit:

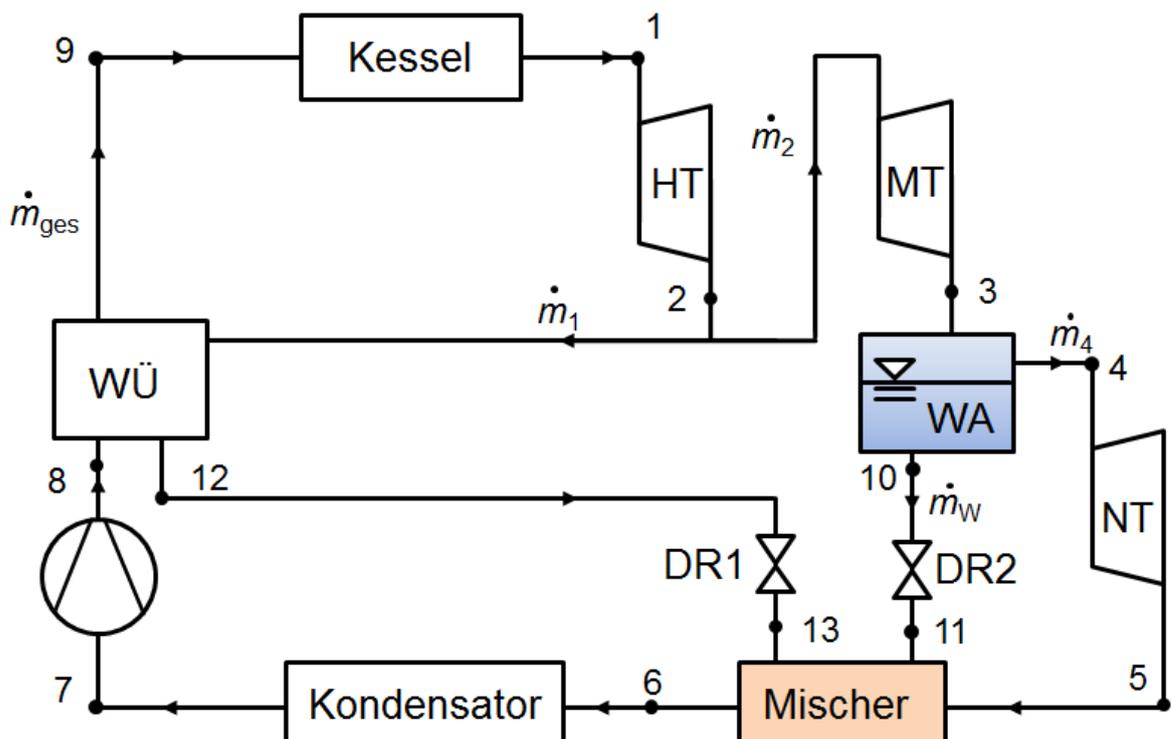
$$c_p = 1.005 \text{ kJ}/(\text{kg K}), R_m = 8.3144621 \text{ J}/(\text{mol K}), M = 28.96 \text{ kg}/\text{kmol}$$

- a) Unter welchen Bedingungen kann ein Fluid als ideales Gas betrachtet werden? Welche Annahmen werden beim idealen Gas getroffen? (2 P)
- b) Welche Masse an Luft befindet sich im Ausgangszustand im Backofen? (2 P)
- c) Wie groß ist der Innendruck im Backofen am Ende der Aufwärmung, wenn keine Luft aus dem Backofen entweicht? (2 P)
- d) Wieviel Luft (Masse) entweicht beim Aufwärmen aus dem Backofen, wenn der Herd nicht luftdicht ist? (3 P)
- e) Stellen Sie die Zustandsänderungen aus den Teilaufgaben c) und d) in einem p, v - und einem T, s -Diagramm dar. (4 P)
- f) Berechnen Sie für beide Fälle die spezifische Wärme. Warum ist die eine größer als die andere? Beantworten Sie die Frage mit Hilfe des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik. (3 P)
- g) Berechnen Sie die Änderung der spezifischen Entropie für beide Fälle. Warum ändert sich die Entropie, obwohl reversible Prozesse betrachtet werden? (3 P)
- h) Wie ändert sich in beiden Fällen die spezifische innere Energie der Luft im Backofen? Für diese Berechnung ist die spezifische isobare Wärmekapazität nicht mehr als konstant zu betrachten, sondern als linear temperaturabhängig:
 $c_p(T) = 989 \text{ J}/(\text{kg K}) + 0.005 \text{ J}/(\text{kg K}^2) \cdot T$ (4 P)

Aufgabe 2 (35 Punkte)

Eine Dampfturbinenanlage arbeitet nach folgendem Prinzip:

Wasserdampf vom Zustand 1 ($t_1 = 495^\circ\text{C}$, $p_1 = 75 \text{ bar}$) wird in einer adiabaten Hochdruckturbine (HT) ($\eta_{s,T,HT} = 0.92$) auf den Druck 30 bar entspannt. Der Gesamtmassenstrom $\dot{m}_{\text{ges}} = 140 \text{ kg/s}$ wird nach der Hochdruckturbine in die Teilmassenströme \dot{m}_1 und \dot{m}_2 aufgeteilt. Der Teilmassenstrom \dot{m}_1 wird zur Speisewasservorwärmung dem Wärmeübertrager (WÜ) zugeführt und dort auf die Temperatur $t_{12} = 220^\circ\text{C}$ abgekühlt. Dabei wird im Wärmeübertrager (WÜ) ein Wärmestrom von 44 MW übertragen. Nach der adiabaten Drosselung in der Drossel (DR1) auf den Zustand 13 mit $p_{13} = 0.1 \text{ bar}$ wird der Teilmassenstrom \dot{m}_1 in dem adiabaten Mischer mit den anderen Teilmassenströmen gemischt ($p_{13} = p_{11} = p_5 = p_6 = 0.1 \text{ bar}$). Der Druck nimmt in der Drossel durch Verwirbelungs- und Reibungsvorgänge ab (es wird keine Arbeit geleistet). Der Teilmassenstrom \dot{m}_2 wird in der reversibel adiabaten Mitteldruckturbine (MT) auf den Druck $p_3 = 5 \text{ bar}$ entspannt. Im adiabaten Wasserabscheider (WA) werden die beiden Phasen getrennt, wobei das flüssige Wasser (Massenstrom \dot{m}_W) abgezogen und in der adiabaten Drossel (DR2) auf den Kondensatordruck gedrosselt wird. Der Dampfmassenstrom \dot{m}_4 wird in der adiabaten Niederdruckturbine (NT) mit der Leistung $P_{\text{ND}} = -56 \text{ MW}$ auf den Zustand 5 entspannt. Das Fluid wird im Kondensator vollständig verflüssigt (Zustand 7). In der reversibel adiabaten Speisepumpe wird das Arbeitsmedium wieder auf 75 bar gebracht und tritt hinter dem WÜ im Zustand 9 in den Kessel ein.



- a) Skizzieren Sie den Prozess (Zustände 1 bis 10) in einem T,s -Diagramm. (9 P)
- b) Berechnen Sie die Leistung der Hochdruckturbine. (4 P)
- c) Berechnen Sie den Teilmassenstrom \dot{m}_1 . (2 P)
- Falls Sie Teilaufgabe c) nicht gelöst haben, rechnen Sie mit $\dot{m}_1 = 20 \text{ kg/s}$ weiter.
- d) Wie groß sind die Dampf- und Wassermassenströme \dot{m}_4 und \dot{m}_W am Ausgang aus dem Wasserabscheider? (5 P)
- e) Berechnen Sie die Leistung der Mitteldruckturbine. (2 P)
- f) Wie groß ist der im Kondensator übertragene Wärmestrom \dot{Q}_{67} ? (6 P)
- g) Wie groß ist der thermische Wirkungsgrad der gesamten Anlage? (5 P)
- h) Wie ändert sich die Temperatur bei der adiabaten Drosselung eines idealen Gases? Beantworten Sie die Frage mit Hilfe des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik. (2 P)

Kritische Daten von Wasser: $t_c = 373.95^\circ\text{C}$, $p_c = 22.064 \text{ MPa}$, $\rho_c = 322 \text{ kg/m}^3$

Zweiphasiger Zustand Wasser

T °C	p bar	ρ' kg / m ³	ρ'' kg / m ³	h' kJ / kg	h'' kJ / kg	s' kJ / (kg K)	s'' kJ / (kg K)
290.54	75	730.88	39.479	1292.9	2765.9	3.17	5.78
233.85	30	821.90	15.001	1008.3	2803.2	2.65	6.19
151.83	5	915.29	2.668	640.1	2748.1	1.86	6.82
45.81	0.1	989.83	0.068	191.8	2583.9	0.65	8.15

Homogener Zustand Wasser

T °C	p bar	ρ kg / m ³	h kJ / kg	s kJ / (kg K)
46.055	75	992.97	199.36	0.65
485	75	22.91	3368.5	6.71
495	75	22.53	3393.2	6.75
505	75	22.17	3417.7	6.78
515	75	21.81	3442.1	6.81
525	75	21.48	3466.4	6.84
200	30	865.76	852.86	2.33
210	30	853.61	898.01	2.42
220	30	840.82	943.76	2.52
230	30	827.32	990.23	2.61
340	30	11.27	3092.4	6.71
345	30	11.16	3104.3	6.73
350	30	11.04	3116.1	6.74
355	30	10.93	3127.8	6.76
360	30	10.83	3139.5	6.78
365	30	10.72	3151.2	6.80

Aufgabe 3 (22 Punkte)

Ein Mitarbeiter am Thermodynamik-Lehrstuhl möchte seinen 26. Geburtstag feiern und hat somit zu einer rauschenden Party geladen. Damit diese tatsächlich auch möglichst berauschend wird, möchte er Bier mithilfe seiner alten, treuen Zapfanlage ausschenken. Damit dies gelingt, stellt er zuvor natürlich einige Überlegungen an. Er kauft fünf 30 l-Fässer Bier. Als Treibgas möchte er den Restinhalt einer angebrochenen CO₂-Flasche nutzen, die im Neuzustand 10 kg CO₂ enthielt. Mithilfe einer Waage kann er die Masse des jetzt noch darin enthaltenen Kohlenstoffdioxids auf 4 kg bestimmen.

- a) Auf welcher Höhe befindet sich in der Flasche die Grenzfläche zwischen der flüssigen und der gasförmigen Phase, wenn die Flasche stehend gelagert wird? Die Flasche kann idealisiert als Zylinder mit einem Innendurchmesser von 160 mm und einer Höhe von 700 mm dargestellt werden. Die Umgebungstemperatur beträgt 15°C (Zustand 1). (5 P)

Bevor die Feier losgeht, sinkt die Umgebungstemperatur auf 11°C (Zustand 2).

- b) Um welchen Wert Δx_{12} verändert sich der Dampfgehalt in der CO₂-Flasche? (2 P)
- c) Wie viele 0,3 l-Gläser Bier können gezapft werden, bevor nur noch Gas und keine Flüssigkeit mehr in der CO₂-Flasche vorliegt (Zustand 3)? Für 1 Liter gezapftes Bier werden 6 g CO₂ benötigt. Ist zuerst dieser Zustand 3 erreicht oder das Bier aufgebraucht? (4 P)
- d) Zeichnen Sie die Zustände 1 bis 3 und alle Hilfslinien qualitativ richtig in ein p, v - und ein T, s - Diagramm ein und beschriften Sie diese. (5 P)

Nachdem das erste Bierfass exakt halb leer gezapft wurde (und somit 15 Liter Fassvolumen mit CO₂ gefüllt sind) bemerkt der Gastgeber plötzlich, dass der Druckminderer nicht richtig funktioniert und somit kein konstanter Druck im Bierfass eingestellt werden kann. Mittlerweile herrscht in diesem nur noch ein Überdruck von 0.5 bar. Er versucht nun den Druck manuell durch kurzzeitiges Öffnen des Ventils auf die gewünschten 1.5 bar Überdruck zu bringen. Aus jahrelanger Zapferfahrung weiß er, dass beim Öffnen des Ventils das CO₂ mit einem konstanten Massenstrom von 10 g/s in das Bierfass strömt.

Das Bierfass selbst wird nicht gekühlt und die Temperatur des Inhalts soll hierbei idealisiert als konstant und bei 11°C angenommen werden. Ebenso wird das Bier für die folgende Rechnung in erster Näherung als nicht kompressibel und nicht mischbar mit CO₂ betrachtet. Der Umgebungsdruck beträgt 1 bar.

- e) Wie lange muss das Ventil geöffnet bleiben um einen Überdruck von 1.5 bar in dem Bierfass zu erreichen?

(6 P)

Kritische Daten von CO₂: $t_c = 30.978^\circ\text{C}$, $p_c = 73.773 \text{ bar}$, $\rho_c = 467.6 \text{ kg/m}^3$

Zweiphasiger Zustand CO₂

T °C	p bar	ρ' kg / m ³	ρ'' kg / m ³	h' kJ / kg	h'' kJ / kg	s' kJ / (kg K)	s'' kJ / (kg K)
10.0	45.022	861.12	135.16	225.73	422.88	1.0884	1.7847
11.0	46.149	853.60	139.80	228.49	421.79	1.0976	1.7779
12.0	47.297	845.87	144.67	231.29	420.62	1.1070	1.7710
13.0	48.466	837.91	149.76	234.13	419.37	1.1165	1.7638
14.0	49.658	829.70	155.11	237.03	418.05	1.1261	1.7565
15.0	50.871	821.21	160.73	239.99	416.64	1.1359	1.7489

Homogener Zustand CO₂

T °C	p bar	ρ kg / m ³	h kJ / kg	s kJ / (kg K)
11.0	0.5	0.9341	494.55	2.8310
11.0	0.7	1.3093	494.35	2.7669
11.0	0.9	1.6854	494.14	2.7189
11.0	1.1	2.0623	493.93	2.6805
11.0	1.3	2.4402	493.73	2.6484
11.0	1.5	2.8189	493.52	2.6209
11.0	1.7	3.1986	493.31	2.5967
11.0	1.9	3.5792	493.10	2.5752
11.0	2.1	3.9607	492.89	2.5557
11.0	2.3	4.3431	492.68	2.5380
11.0	2.5	4.7264	492.47	2.5218