

Thermodynamik 2

Klausur

17. März 2016

Bearbeitungszeit: 120 Minuten

Umfang der Aufgabenstellung: 6 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	18		
2	20		
3	12		
Zwischensumme			
Summe			
Bewertung			

Aufgabe 1 (18 Punkte)

Bei einer Feier wird ein kleiner Getränkeanhänger zur Kühlung des Biers eingesetzt. In diesem ist eine einfache Kompressionskälteanlage mit Propan als Kältemittel eingebaut. Der Kühlraum des Anhängers ist quaderförmig und hat die Abmessungen $3\text{ m} \times 1,5\text{ m} \times 2,11\text{ m}$. Er ist mit PU-geschäumten Isolierelementen ausgestattet, um den aus der Umgebung einfallenden Wärmestrom möglichst gering halten. Der Wärmedurchgangskoeffizient durch die Wände beträgt $k = 0,3\text{ W}/(\text{m}^2\text{ K})$.

Der Kompressor saugt Kältemittel an (Zustand 1) und verdichtet es mit dem isentropen Wirkungsgrad $\eta_{\text{SK}} = 0,65$ auf den Zustand 2. Anschließend wird das Kältemittel isobar bis zur Siedelinie kondensiert (Zustand 3) und danach in einer Drossel adiabat auf den Verdampferdruck (Zustand 4) entspannt. Im isobaren Verdampfer wird mit dem aufgenommenen $\dot{Q}_{\text{Kühl}}$ das Propan zuerst vollständig verdampft und danach um 4 K überhitzt bis zum Zustand 1.

Der Kompressor wird von einem Elektromotor mit dem Wirkungsgrad $\eta_E = 0,86$ angetrieben.

Vor Beginn der Veranstaltung wird die Temperatur im Hänger auf $6\text{ }^\circ\text{C}$ eingestellt und der Innenraum auf diese abgekühlt. Die Außentemperatur beträgt $30\text{ }^\circ\text{C}$.

Die *kleinste* Temperaturdifferenz im Wärmeübertrager auf der Verdampferseite beträgt 4 K und auf der Kondensatorseite 10 K .

a) Zeichnen Sie den Prozess qualitativ richtig in ein T,s -Diagramm ein. Zeichnen Sie dazu auch die Isobaren ein und beschriften Sie die Zustandspunkte. (3 P)

Fünf Stunden vor Beginn der Veranstaltung werden 20 Bierkästen mit kleinen Flaschen und somit jeweils 8 kg Bier zur Kühlung in den Kühlwagen gestellt. Das Bier hat Außentemperatur und muss nun abgekühlt werden. Dazu sollen hier nur die Glasflaschen und das Bier selbst betrachtet werden. Die Glasflaschen eines Bierkastens haben zusammen eine Masse von $7,5\text{ kg}$.

Die spezifische Wärmekapazität von Glas beträgt im betrachteten Temperaturbereich $c_{v,\text{Glas}} = 0,7\text{ kJ}/(\text{kg K})$, die von Bier $c_{v,\text{Bier}} = 3,9\text{ kJ}/(\text{kg K})$. Innerhalb der fünf Stunden kühlen die Bierflaschen auf die Innentemperatur ab. Während der gesamten Zeit hält die Kühlanlage die Temperatur im Kühlwagen auf konstant $6\text{ }^\circ\text{C}$, dazu läuft der Kompressor insgesamt 180 min .

b) Welche Kühlleistung $\dot{Q}_{\text{Kühl}}$ hat die beschriebene Kälteanlage? (5 P)

c) Wie groß ist der Massenstrom \dot{m}_{Propan} bei eingeschaltetem Kompressor? (3 P)

Hinweise:

Innen- und Außentemperatur sollen in der gesamten Aufgabe als konstant angenommen werden. Der Wärmedurchgang durch eine Wand mit der Fläche A und der Temperaturdifferenz ΔT zwischen Innen- und Außenseite kann berechnet werden mit $\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T$

Der Preis pro kWh Strom beträgt 28,69 Cent.

d) Wie hoch sind die Stromkosten für den fünfstündigen Betrieb vor der Feier? (4 P)

e) Wie groß ist der Exergieverluststrom $\dot{E}_{V,K}$ im Kondensator? (3 P)

Zweiphasiger Zustand von Propan

T	p	h'	h''	s'	s''
°C	bar	kJ / kg	kJ / kg	kJ / (kg K)	kJ / (kg K)
-4	4,1909	190,05	570,42	0,96371	2,3769
-2	4,4613	195,01	572,65	0,98187	2,3746
0	4,7446	200,00	574,87	1,0000	2,3724
2	5,0410	205,02	577,06	1,0181	2,3703
4	5,3510	210,06	579,24	1,0362	2,3682
30	10,790	278,83	605,54	1,2695	2,3471
40	13,694	307,15	614,21	1,3594	2,3399
50	17,133	336,80	621,66	1,4502	2,3317

Homogener Zustand von Propan

T	p	h	s
°C	bar	kJ / kg	kJ / (kg K)
0	4,1909	577,25	2,4021
2	4,4613	579,55	2,3998
4	4,7446	581,83	2,3977
6	5,0410	584,10	2,3956
8	5,3510	586,35	2,3937
50	10,790	646,65	2,4785
60	10,790	667,06	2,5407
70	10,790	687,56	2,6013
50	13,694	636,41	2,4097
60	13,694	658,08	2,4757
70	13,694	679,54	2,5392
50	17,133	621,66	2,3317
60	17,133	645,80	2,4053
70	17,133	668,92	2,4737

Aufgabe 2 (20 Punkte)

Eine Autoheizung saugt Umgebungsluft bei $t_1 = t_a = 0^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchte von $\varphi_a = 80\%$ an. Die Luft wird erwärmt und ein Gebläse fördert sie in den Fahrgastraum, der angesaugte Massenstrom trockener Luft entspricht $\dot{m}_{tr.L} = 40\text{ kg/h}$. Die von den Passagieren ausgeatmete Luft hat eine Temperatur von $t_{Atem} = 30^\circ\text{C}$ und eine relative Feuchte von $\varphi_{Atem} = 100\%$. In einem voll besetzten Auto geben die Passagiere mit der Atemluft pro Stunde insgesamt 400 g Wasserdampf an die Luft im Fahrgastraum ab. Die von den Fahrgästen abgegebene Wärme ist zu vernachlässigen. Der Fahrgastraum kann näherungsweise als nach außen hin adiabat betrachtet werden.

Lösen Sie die Aufgabenteile a), b) und c) mit Hilfe des beigefügten h_{1+x},x -Diagramms. Kennzeichnen Sie dabei alle relevanten Zustände eindeutig.

a) Welchen Wassergehalt x erreicht die Luft im Auto im Mittel durch die Wasserdampfzugabe aus der Atemluft und welche Taupunkttemperatur (Temperatur im Sättigungszustand) ergibt sich daraus? (2 P)

b) Auf welche Temperatur t_2 muss die Luft vorgeheizt werden, damit die relative Feuchte im Auto nach der Wasserdampfzugabe $\varphi_3 = 60\%$ nicht überschreitet?
Wie groß ist der dafür benötigte Wärmestrom \dot{Q}_{12} ? (3 P)

Um für die Fahrgäste ein angenehmes Klima zu gewährleisten, soll die Temperatur im Fahrgastraum nicht über $t_4 = 22^\circ\text{C}$ ansteigen.

c) Wie groß muss der angesaugte Massenstrom trockener Luft sein, damit auch bei $t_4 = 22^\circ\text{C}$ die relative Feuchte im Innenraum $\varphi_{max} = 60\%$ nicht übersteigt? (2 P)

d) Durch welche Maßnahmen kann die für die Aufheizung der Luft benötigte Energie teilweise eingespart werden? (1 P)

e) Beantworten Sie nun den Aufgabenteil b) rein rechnerisch, ohne Daten aus dem h_{1+x},x -Diagramm zu verwenden.

(Hinweis: 42% der angesaugten trockenen Luft werden durch die Atmung der Passagiere erwärmt und befeuchtet auf t_{Atem} und φ_{Atem}). (12 P)

Luft und Wasserdampf können als ideale Gase betrachtet werden.

Der Gesamtdruck in der Umgebung und im Fahrgastraum beträgt $p_{ges} = 1,01325\text{ bar}$.

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

mit T in K, $p_0 = 1\text{ bar}$

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

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

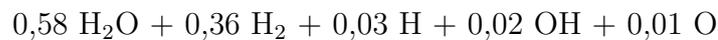
Wasserdampf $c_{p,D} = 1,860\text{ kJ}/(\text{kg K})$

Spezifische Gaskonstanten: $R_{Luft} = 0,2871\text{ kJ}/(\text{kg K})$, $R_{Wasser} = 0,4615\text{ kJ}/(\text{kg K})$

Aufgabe 3 (12 Punkte)

Zur Schubgewinnung leistungsstarker Raketentriebwerke wird als Kraftstoff flüssiger Wasserstoff (LH₂) und als zugehöriger Oxidator flüssiger Sauerstoff (LO₂) verwendet. Beide Komponenten werden der Brennkammer gasförmig bei $T = 350 \text{ K}$ und $p = 12 \text{ bar}$ zugefügt.

Bei Testläufen im stationären Betrieb wurde ein Massenstromverhältnis LO₂ / LH₂ von 5,017 eingestellt. Bei stöchiometrischer Verbrennung werden Brennkammertemperaturen von $t_{max} = 5000 \text{ °C}$ erreicht. Da bei so hohen Temperaturen Wasserdampf dissoziiert, kann diese Temperatur tatsächlich nicht erreicht werden. Die Zusammensetzung des Abgasstrahls konnte messtechnisch bestimmt werden zu:



- a) Geben Sie die gesuchte Reaktionsgleichung an. (3 P)
- b) Berechnen Sie die adiabate Verbrennungstemperatur unter diesen Realbedingungen bei einem Brennkammerdruck von $p = 12 \text{ bar}$. (7 P)

Über ein regeneratives Kühlsystem wird der Wasserstoff um die Schubdüse geleitet, um diese vor einer zu hohen thermischen Belastung zu schützen. Der Wasserstoff nimmt dabei eine spezifische Wärme von 1238,59 kJ/kg auf. Falls Aufgabenteil b) nicht gelöst wurde kann eine Brennkammertemperatur von $T = 4500 \text{ K}$ angenommen werden.

- c) Welche Austrittsgeschwindigkeit v_a wird erreicht unter den Annahmen, dass das Gemisch in der Brennkammer keine Geschwindigkeit hat, der Abgasstrahl eine effektive Wärmekapazität von $c_p = 8,264 \text{ kJ}/(\text{kg K})$ besitzt und die Abgastemperatur $T = 3500 \text{ K}$ beträgt? (2 P)

Stoffdaten:

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

Stoff	$\Delta^B h_\Theta / \text{kJ/mol}$	c_p	$M / \text{kg/kmol}$
Molekularer Wasserstoff H ₂ (g)	0	$4,040 \cdot R_m$	
Molekularer Sauerstoff O ₂ (g)	0	$4,446 \cdot R_m$	
Wasser H ₂ O (l)	-285,83	$9,144 \cdot R_m$	
Wasser H ₂ O (g)	-241,83	$5,953 \cdot R_m$	
Hydroxyl OH (g)	41,25	$4,077 \cdot R_m$	
Atomarer Sauerstoff O (g)	248,33	$2,520 \cdot R_m$	15,999
Atomarer Wasserstoff H (g)	217,92	$2,500 \cdot R_m$	1,008

(Weitere Angaben finden Sie auf der nächsten Seite.)

Hinweise:

Nur Wasser kann gegebenenfalls im flüssigen Zustand vorliegen.

Die Enthalpieänderung des Wassers von Standard- zu Systemdruck kann vernachlässigt werden.

Für Wasser mit vorliegendem Partialdruck gilt im Standard- und im Systemzustand:

p / bar	T_S / K	$\Delta^v h(T_S)$ / kJ/mol
1	358,21	41,348
12	429,78	37,703

