

Thermodynamik 2

Klausur

11. September 2015

Bearbeitungszeit: 120 Minuten
 Umfang der Aufgabenstellung: 7 nummerierte Seiten
 1 Diagramm

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	18		
2	22		
3	10		
Summe			
Bewertung			

Aufgabe 1 (18 Punkte)

Mit einer Wärmepumpe soll ein Haus im Winter ($t_a = 0^\circ\text{C}$) beheizt werden. Das Haus hat über seine Oberfläche einen Wärmeverlust von $11,3 \text{ W/m}^2$ (Oberfläche: 600 m^2). Durch Lüften entweichen weitere $2,1 \text{ kW}$. Durch die Sonneneinstrahlung über die Fensterfläche (55 m^2) tritt eine Wärmestromdichte von 40 W/m^2 in das Haus ein und durch elektrische Geräte werden 800 W im Gebäude erzeugt.

Für die Wärmepumpe soll R134a als Arbeitsmedium verwendet werden. Über einen Verdichter mit einem isotropen Wirkungsgrad von 90% wird das Kältemittel auf ein hohes Druckniveau gebracht. Auf diesem Druckniveau kondensiert es und wird um 5 K unterkühlt. Der Wärmestrom wird über einen Gegenstromwärmeübertrager an das Heizungswasser abgegeben. Das Kältemittel wird anschließend adiabat auf das untere Druckniveau gedrosselt und nach der Verdampfung um 5 K überhitzt. Dazu wird die Wärme in einen Gegenstromwärmeübertrager aus der Umgebungsluft bereitgestellt.

Das Kältemittel kondensiert 10 K über der Vorlauftemperatur des Heizwassers von 35°C . Die Verdampfung erfolgt 10 K unter der Umgebungstemperatur.

- Bestimmen Sie den benötigten Heizwärmestrom. (1 P)
- Skizzieren Sie den Prozess qualitativ in einem $\log(p)$ - h -Diagramm und tragen sie hier alle bekannten Temperaturen und Druckniveaus ein. (2 P)
- Stellen Sie die Temperaturverläufe in beiden Wärmeübertragern in jeweils einem Diagramm für die Temperatur über der Lauflänge dar (für Kältemittel und Heizungswasser bzw. Kältemittel und Luft). (2 P)
- Bestimmen Sie die Leistungszahl und den exergetischen Wirkungsgrad der Wärmepumpe. (8 P)
- Bis auf welche Temperatur kühlt die angesaugte Umgebungsluft bei der Wärmeübertragung im Verdampfer ab, wenn $4,5 \text{ kg/s}$ Luft von den Lüftern angesaugt werden? (2 P)
- Beschreiben Sie kurz welche Gefahr am Verdampfer beim Ansaugen feuchter Luft besteht. (1 P)
- Wieso sollte das Kältemittel im Verdampfer überhitzt und im Kondensator unterkühlt werden? (2 P)

Die Luft kann als ideales Gas betrachtet werden mit: $c_{p,L} = 1,004 \text{ kJ}/(\text{kg K})$

Die Wärmekapazität des Kältemittels im flüssigen Zustand beträgt $c_{KM} = 1,496 \text{ kJ}/(\text{kg K})$.

Kritischer Punkt R134a: $t_c = 374,21 \text{ K}$; $p_c = 40,593 \text{ bar}$

Zweiphasiger Zustand R134a

T	p	h'	h''	s'	s''
°C	MPa	kJ/kg	kJ/kg	kJ/(kg K)	kJ/(kg K)
-15	0,1639	180,14	389,63	0,9256	1,7371
-10	0,2006	186,70	392,66	0,9507	1,7334
-5	0,2433	193,32	395,66	0,9754	1,7300
0	0,2928	200,00	398,60	1,0000	1,7271
5	0,3497	206,75	401,49	1,0243	1,7245
40	1,0166	256,41	419,43	1,1905	1,7111
45	1,1599	263,94	421,52	1,2139	1,7092
50	1,3179	271,62	423,44	1,2375	1,7072
55	1,4915	279,47	425,15	1,2611	1,7050

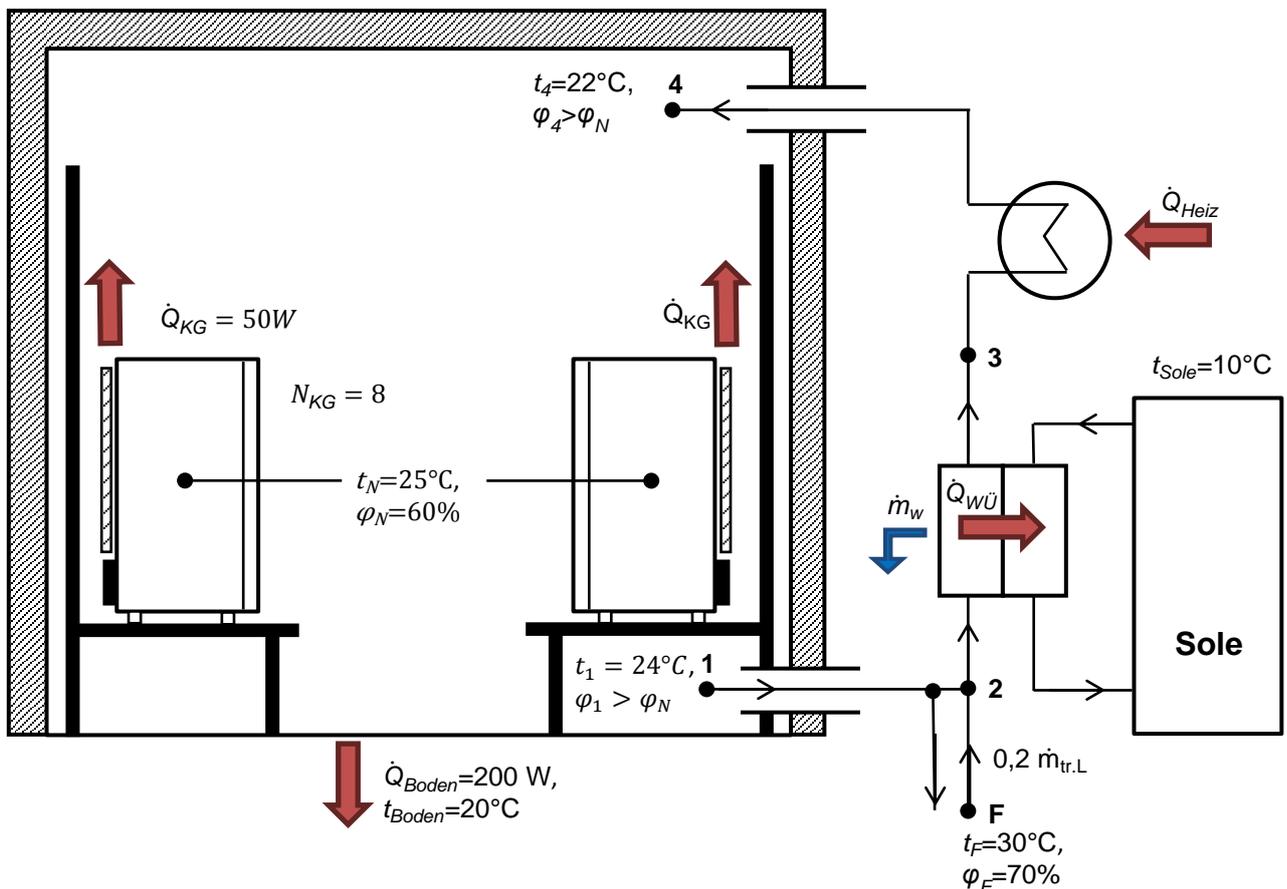
Homogener Zustand R134a

T	p	h	s
°C	MPa	kJ/kg	kJ/(kg K)
-5	0,2006	396,93	1,7494
-5	0,2433	395,66	1,7300
-10	0,2006	392,67	1,7334
-10	0,2433	186,71	0,9506
0	0,1639	402,14	1,7842
45	1,1599	421,52	1,7092
50	1,1599	427,36	1,7275
55	1,1599	433,03	1,7448
60	1,1599	438,57	1,7616
65	1,1599	444,03	1,7779

Aufgabe 2 (22 Punkte)

Im Kühltischlabor eines Prüfinstituts wird eine Klimakammer betrieben, in der Energieverbrauchsmessungen an Kühlgeräten durchgeführt werden. Um bei einer sogenannten Normenergieverbrauchsmessung die dafür geforderten Bedingungen einzuhalten, muss in der Höhe neben den Geräten eine Temperatur von $t_N = 25^\circ\text{C}$ und eine relative Feuchte von $\varphi_F = 60\%$ konstant gehalten werden (siehe Skizze). Die Klimakammer sei perfekt isoliert, bis auf den Boden, über den ein konstanter Wärmestrom $\dot{Q}_{\text{Boden}} = 200\text{ W}$ entweicht, da sich die Klimakammer im Untergeschoss befindet und der Boden eine Temperatur von $t_{\text{Boden}} = 20^\circ\text{C}$ hat. Bei einer laufenden Messung befinden sich $N_{\text{KG}} = 8$ Kühlgeräte in der Kammer, die im Mittel jeweils einen Wärmestrom von $\dot{Q}_{\text{KG}} = 50\text{ W}$ an die Kammerluft abgeben. Die Klimaanlage der Kammer saugt die zu klimatisierende Luft in Bodennähe an, die sich aufgrund des Wärmeverlusts über den Kammerboden auf eine Temperatur von $t_1 = 24^\circ\text{C}$ abgekühlt hat. Vom angesaugten Luftmassenstrom werden 20 % durch Frischluft ersetzt, die an einem Sommertag eine Temperatur von $t_F = 30^\circ\text{C}$ und eine relative Feuchte von $\varphi_F = 70\%$ hat. Anschließend wird die Mischluft in einem Wärmeübertrager durch eine temperierte Sole, mit einer Temperatur von $t_{\text{Sole}} = 10^\circ\text{C}$, abgekühlt. Das bei der Kühlung aus der Luft auskondensierte Wasser wird abgeschieden. Eine nachgeschaltete Heizung bringt die Luft nach der Entfeuchtung durch Zufuhr des Heizwärmestroms \dot{Q}_{Heiz} schließlich auf die geforderte Eintrittstemperatur von $t_4 = 22^\circ\text{C}$.

Klimakammer



- a) Zeichnen Sie den gesamten Prozess mit allen Zuständen in das beigefügte h_{1+x}, x -Diagramm ein. (4 P)

Lösen Sie folgende Aufgabenteile **rein rechnerisch**. Aus dem beigefügten Diagramm abgelesene Werte dürfen nicht verwendet werden.

- b) Berechnen Sie den Massenstrom trockener Luft $\dot{m}_{tr.Luft}$, sodass sich konstante Temperaturverhältnisse in der Klimakammer ergeben. (Hinweis: Enthalpiebilanz der Klimakammer) (5 P)
- c) Berechnen Sie welche Temperatur t_2 und relative Feuchte φ_2 sich nach der Vermischung der Luftströme einstellen. (5 P)
- d) Berechnen Sie auf welche Temperatur die Luft zur Entfeuchtung abgekühlt werden muss. (2 P)
- e) Berechnen Sie den Wärmestrom $\dot{Q}_{WÜ}$, der im Wärmeübertrager von der Sole aufgenommen wird, um die Luft auf die Entfeuchtungstemperatur t_3 herunterzukühlen. Welcher Massenstrom \dot{m}_W muss bei der Entfeuchtung der Luft abgeschieden werden? (3 P)
- f) Berechnen Sie den Wärmestrom der Heizung \dot{Q}_{Heiz} , durch den die Luft nach der Entfeuchtung auf die Eintrittstemperatur $t_4 = 22^\circ\text{C}$ gebracht wird. (1 P)
- g) An welcher Stelle könnte im dargestellten Kreislauf der Klimaanlage ein Wärmeübertrager eingesetzt werden, um elektrische Energie einzusparen?
Wodurch wird das Einsparpotential des Wärmeübertragers an dieser Stelle limitiert? (2 P)

Stoffdaten:

Alle Zustandsänderungen der feuchten Luft werden bei $p = 1,01325$ bar durchgeführt.

Spezifische isobare Wärmekapazitäten:

$$c_{p,Luft} = 1,004 \text{ kJ}/(\text{kg K}), c_{p,Wasserdampf} = 1,86 \text{ kJ}/(\text{kg K}), c_{p,Wasser} = 4,186 \text{ kJ}/(\text{kg K})$$

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

$$\text{Verdampfungsenthalpie von Wasser bei } 0^\circ\text{C: } \Delta h^V = 2500 \text{ kJ/kg}$$

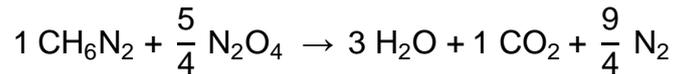
$$\text{Dampfdruckkurve von Wasser: } \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) = 12,40682 - 4222,037 \text{ K} / (T - 31,95 \text{ K})$$

mit T in K und $p_0 = 1$ bar

Aufgabe 3 (10 Punkte)

Raumfahrttransportsysteme (ATV) zur Versorgung der internationalen Raumstation besitzen zur Lagerregelung einer Reihe von Steurdüsen. Die zur Schuberzeugung notwendige Energie wird aus dem hypergolen Zweistoffsystem Monomethylhydrazin (MMH) (CH_6N_2) und Distickstofftetroxid (NTO) (N_2O_4) gewonnen. Die beiden Komponenten liegen in flüssiger Form bei $T_{\text{MMH}} = 221,15 \text{ K}$, $T_{\text{NTO}} = 265,15 \text{ K}$ vor.

Unter Standardbedingungen ergibt sich die stöchiometrische Reaktionsgleichung zu



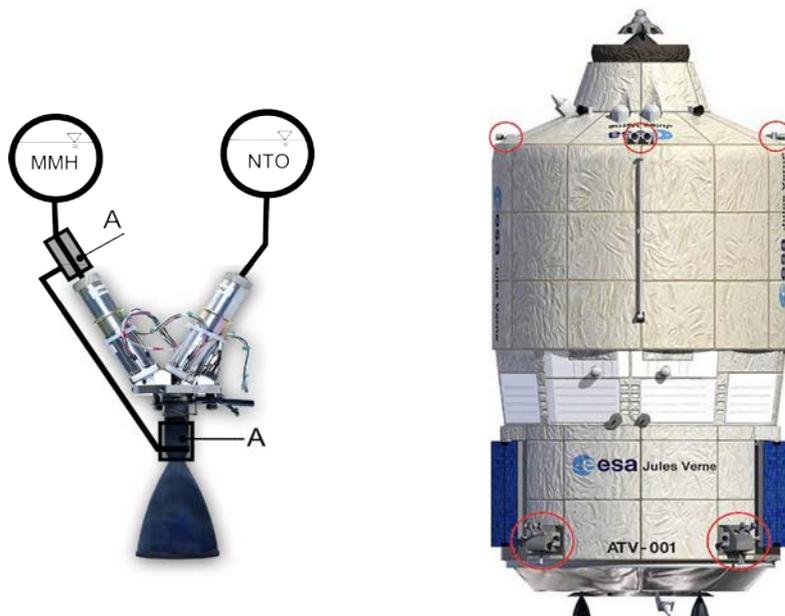
- a) Welche maximal mögliche Temperatur kann in der Brennkammer auftreten? (5 P)

Um das System vor zu hoher thermischer Belastung zu schützen wird die Reaktionstemperatur auf 2500 K begrenzt.

- b) Welche Wärmemenge, bezogen auf 1 mol Monomethylhydrazin, muss bei dieser Reaktionstemperatur abgeführt werden? (3 P)

Über ein innovatives, regeneratives Kühlungssystem (**A**) wird das Monomethylhydrazin um die Schubdüse geleitet und dabei erwärmt bevor es in die Brennkammer geleitet wird.

- c) Auf welche Temperatur lässt sich das Monomethylhydrazin erwärmen, wenn man annimmt, dass 15% der abgegebenen Wärmemenge aus b) durch das Kühlungssystem aufgenommen werden können? (Falls Aufgabenteil b) nicht gelöst wurde, kann ein Wert von 515 kJ/mol angenommen werden.) (2 P)



Stoffdaten:

	$\Delta^B h_\theta$	c_p
Stoff:	kJ/mol	kJ/(mol K)
Monomethylhydrazin (l)	54,200	0,1349
Monomethylhydrazin (g)	94,700	0,0711
Distickstofftetroxid (l)	-19,560	0,1612
Distickstofftetroxid (g)	9,080	0,1104
Stickstoff (g)	0	0,0347
Kohlenstoffdioxid (g)	-393,474	0,0577
Wasser (l)	-285,825	0,0755
Wasser (g)	-241,725	0,0486

Bei vorliegendem Systemdruck gilt:

	T_s	$\Delta^V h$
Stoff:	K	kJ/mol
Monomethylhydrazin	360,10	40,50
Distickstofftetroxid	294,25	28,64
Wasser	358,10	41,35