

Thermodynamik 2

Klausur

12. März 2010

Bearbeitungszeit: 120 Minuten

Umfang der Aufgabenstellung: 5 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: _____

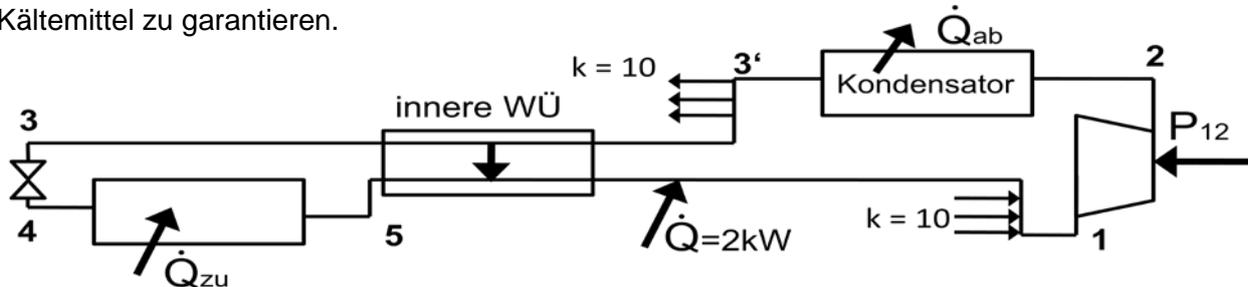
Unterschrift: _____

Angaben zur Korrektur

Aufgabe	Maximale Punktzahl	Erreichte Punkte	Korrektor
1	14		
2	22		
3	14		
Zwischensumme			
Bonuspunkte			
Summe			
Bewertung			

Aufgabe 1 (14 Punkte)

Ausgehend von einer zentralen Kälteanlage (ZKA) wird $\dot{m} = 2,5 \text{ kg/s}$ verflüssigtes Octafluorocyclobutan (C_4F_8) zu $k = 10$ hier als gleichartig angenommenen Verbrauchern transportiert, von denen jeder einen Massenstrom von \dot{m} / k erhält. Die folgenden Schritte eines **Kompressionskälteprozesses** finden in der ZKA statt. Das Kühlgut darf die Temperatur $T_0 = 0 \text{ °C}$ nicht überschreiten. Bei der Kühlung ist eine Temperaturdifferenz $\Delta T \geq 10 \text{ K}$ zwischen Kühlgut und Kältemittel zu garantieren.



1 → 2 Kompression des Dampfs beginnt bei der Temperatur $T_1 = 15 \text{ °C}$ mit einem isentropen Wirkungsgrad von $\eta_s = 75 \%$, wobei die Temperatur T_2 erreicht wird.

2 → 3' Vollständige Kondensation – ohne Unterkühlung – durch isobare Wärmeabgabe an die Umgebung bei einem Druck von $p_2 = p_3(30 \text{ °C})$

Beim Transport von der ZKA zum Verbraucher ist eine Wärmeübertragung zwischen dem kondensierten Kältemittel bei p_3 und dem verdampften Kältemittel bei p_1 zu berücksichtigen. Es liegt mindestens eine Temperaturdifferenz von $\Delta T = 15 \text{ K}$ vor.

Die folgenden Schritte finden beim Verbraucher statt:

3 → 4 Drosselung des flüssigen, unterkühlten Kältemittels auf den Druck p_1 .

4 → 5 Teilweise Verdampfung, wobei die Kälteleistung erbracht wird. (Punkt 5 liegt im ND)

Beim Transport vom Verbraucher zur ZKA ist ebenfalls eine Zustandsänderung des Kältemittels zu berücksichtigen:

5 → 1 Isobare Wärmezufuhr aus der Umgebung. Der Transport stellt eine zusätzliche Wärmelast von 2 kW **pro** Verbraucher dar. Der Druckverlust beim Transport ist zu vernachlässigen.

- Skizzieren Sie den Kälteprozess qualitativ in einem $\log p, h$ - Diagramm. (4 P)
- Welche technische Leistung muss der Kompressor erbringen? Gehen Sie dabei zunächst vom isentropen Fall aus, und berücksichtigen Sie dann den Wirkungsgrad des Kompressors. (5 P)
- Welche Kälteleistung ergibt sich bei **einem** Verbraucher, und welcher Dampfgehalt x_5 wird beim Erbringen der Kälteleistung erreicht? (4 P)
- Welche Leistungszahl ergibt sich für den dargestellten Prozess? (1 P)

Daten und Hinweise:

Die molare Masse von Octafluorocyclobutan beträgt 200 g/mol , damit ist $R = 0,041566 \text{ J/(g*°K)}$.

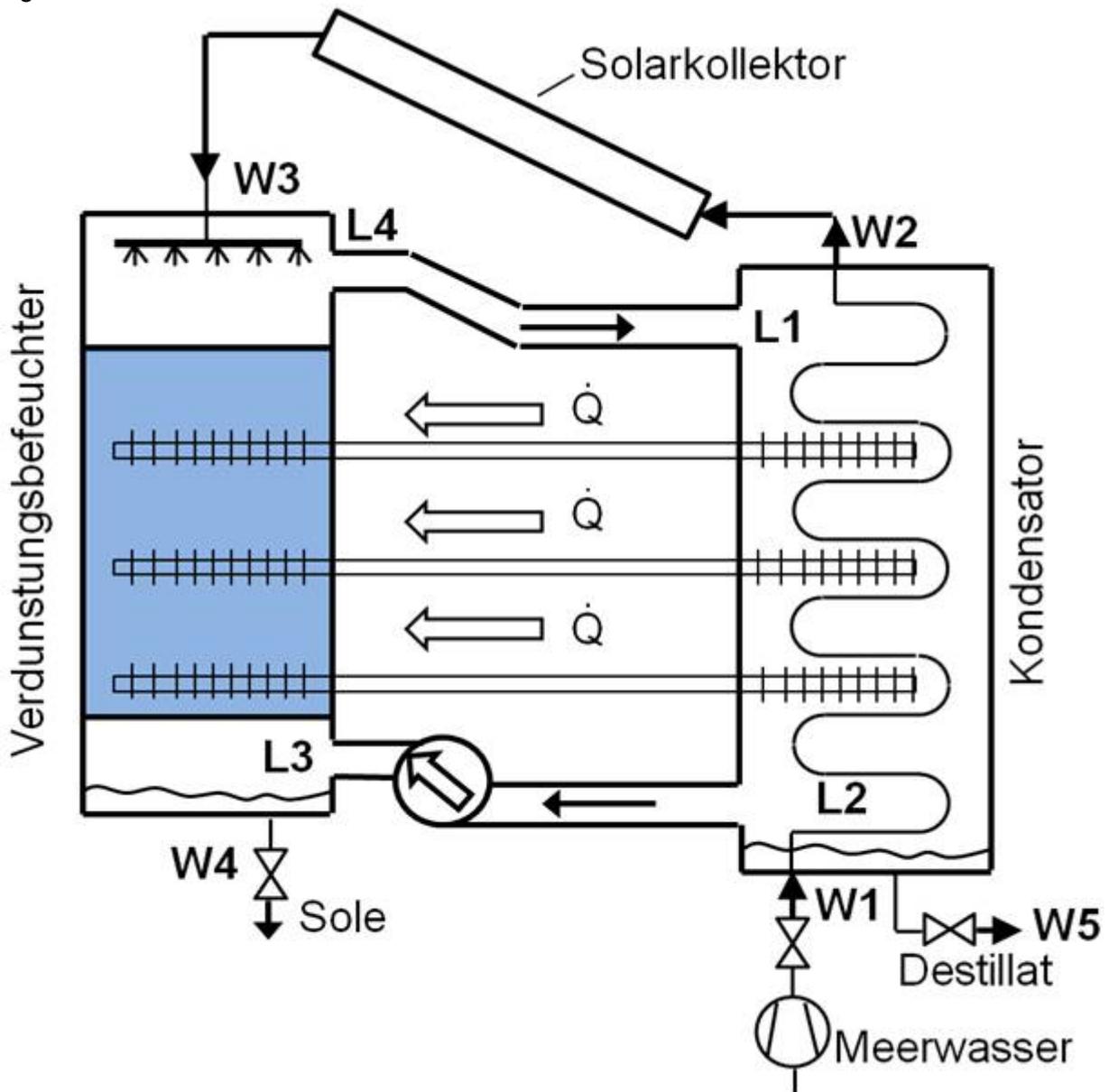
T	p_s	ρ'	ρ''	h'	h''	s'	s''	c_p'	c_p''
°C	kPa	kg/m ³	kg/m ³	kJ/kg	kJ/kg	J/(g*°K)	J/(g*°K)	J/(g*°K)	J/(g*°K)
-10	85,51	1629	8,131	189,6	307,8	0,9612	1,411	1,032	0,7360
+10	187,8	1557	17,14	210,7	320,7	1,038	1,429	1,077	0,7823
+30	365,6	1478	32,70	232,7	332,4	1,113	1,449	1,127	0,8363
+50	648,1	1390	58,29	255,8	347,7	1,186	1,470	1,186	0,9057
+70	1069	1286	100,1	280,2	359,7	1,259	1,490	1,273	1,0120
+90	1668	1152	172,7	306,6	369,6	1,332	1,505	1,457	1,2490

' siedende Flüssigkeit '' gesättigter Dampf

Das Gas kann als ideales Gas betrachtet werden.

Aufgabe 2 (22 Punkte):

Das Bild zeigt ein Verfahren der Meerwasserentsalzung mit indirekter Übertragung der Kondensationswärme. Da Verdunstungsbefeuchter und Kondensator keine Einheit mit direktem thermischem Kontakt darstellen, sind viele konstruktive Möglichkeiten zur Gestaltung der beiden Anlagenelemente möglich. Der Befeuchter wird z.B. mit Holzlamellen versehen, an denen die Sole herunter rieselt. Die Luft (L1) wird im Kondensator gekühlt, wobei der enthaltene Wasserdampf teilweise auskondensiert (W5). Dabei wird das Meerwasser (W1→W2) aufgeheizt. Im Solarkollektor wird das Meerwasser weiter erhitzt (W3) und dann im Verdunstungsbefeuchter über Dornbüsche versprüht. Während es herunter rinnt verdunstet ein Teil des Wassers, das übrige Wasser erwärmt die im Gegenstrom aufsteigende Luft (L3→L4). Um den Wasserstrom (W1→W3) zu verringern, wird ein Teil (75%) der Wärme durch zahlreiche Wärmeröhre der feuchten Luft im Kondensator (rechts) entzogen und der trockenen Luft im Befeuchter (links) zugeführt. Zur erneuten Wasserdampfaufnahme muss die Luft (L3) erwärmt werden. Das geschieht durch die über die Wärmeröhre zugeführte Wärme und das im Solarkollektor aufgeheizte Wasser.



Annahmen für die Rechnung:

Die Luft kann im Kondensator von $t_{L1} = 80^\circ\text{C}$, $\varphi_{L1} = 0,95$ auf $t_{L2} = 35^\circ\text{C}$ abgekühlt werden. Im Zustand L3 ist sie mit Wasserdampf gesättigt. Das auskondensierte Wasser (W5) verläßt den Kondensator mit $t_{\text{kond}} = 35^\circ\text{C}$. Das Meerwasser (W1) wird von $t_{W1} = 25^\circ\text{C}$ auf $t_{W2} = 70^\circ\text{C}$ aufgeheizt.

Die Fragen a) bis e) sind mit dem h_{1+x},x -Diagramm zu lösen, die Frage f) ohne Informationen aus dem Diagramm.

- a) Tragen Sie die Zustandspunkte der Luft in dem h_{1+x},x -Diagramm ein. Berücksichtigen Sie die zahlreichen Zwischenaufheizungen durch die Wärmerohre. Im Effekt ist die Summe der zahlreichen Aufheizungen und Befeuchtungen eine Zustandsänderung nahe an der Sättigungslinie. (4 P)
- b) Bestimmen Sie die spezifischen Enthalpien h_{1+x} der Luftzustände L1 und L2. Beachten Sie die Übersättigung der Luft im Zustand L2. (3 P)
- c) Wie viel Meerwasser kann pro m^3 Luft (Zustand L3) aufgewärmt werden? Wie viel Kondensat fällt pro m^3 Luft aus? (3P)
- d) Stellen Sie die Massen- und Enthalpiebilanz für den Befeuchter auf, unter der Annahme, dass die Luft unten mit $t_{L3} = 35^\circ\text{C}$ eintritt und oben mit $t_{L4} = 80^\circ\text{C}$, $\varphi_{L4} = 0,95$ austritt und die Sole (W4) mit $t_S = 45^\circ\text{C}$ unten abläuft. Beachten Sie, dass 75% der der Luft entnommenen Wärme über die Wärmerohre übertragen wird. Wie hoch muss die Eintrittstemperatur des Meerwassers sein? (4 P)
- e) Das Meerwasser steht im Solarkollektor unter einem Druck von 1,2 bar. Welche Wärmemenge ist erforderlich für die Aufheizung des Meerwassers im Solarkollektor? Wie viel ist das pro kg Destillat? (2 P)
- f) Berechnen Sie die spezifischen Enthalpien der Luftzustände L1 und L2 ohne Informationen aus dem Diagramm. (6 P)

Stoffdaten:

Luft und Wasserdampf können als ideale Gase betrachtet werden.

$$\text{Dampfdruck von Wasser: } \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) = 11,93255 - \frac{3970,148 \text{ K}}{T - 40,052 \text{ K}} \quad \text{mit } T < 390 \text{ K in K, } p_0 = 1 \text{ bar}$$

Der Gesamtdruck beträgt 101325 Pa.

Die Verdampfungsenthalpie von Wasser bei 0°C beträgt $\Delta h_{v0} = r_0 = 2500 \text{ kJ/kg}$.

Die Enthalpie ist 0 kJ/kg für trockene Luft und flüssiges Wasser bei 0°C .

Die spezifische isobare Wärmekapazität

der trockenen Luft: $c_{pL} = 1,004 \text{ kJ/(kg K)}$

des Wasserdampfs: $c_{p,H_2O,g} = 1,860 \text{ kJ/(kg K)}$

des flüssigen Wassers: $c_{p,H_2O,fl} = 4,192 \text{ kJ/(kg K)}$

Molmassen: Luft: 28,96 g/mol Wasser: 18,015 g/mol $R_m = 8,314472 \text{ J/(mol K)}$

Aufgabe 3 (14 Punkte):

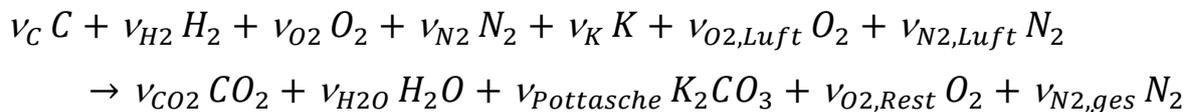
In naher Zukunft wird Heizöl knapp und teuer werden. Erdgas wird dann ebenfalls teurer. Deshalb werden heute wieder nachwachsende Rohstoffe wie Holzpellets aus gepressten Holzabfällen als Heizmaterial genutzt. Holzpellets haben einen Energieinhalt = unterer Heizwert = 5 kWh/kg.

Die Zusammensetzung des trockenen Holzes in Massenanteilen (kg/kg):

$$\zeta_C = 0,50 \text{ kg/kg}; \zeta_{H_2} = 0,06 \text{ kg/kg}; \zeta_{O_2} = 0,42 \text{ kg/kg}; \zeta_{N_2} = 0,01 \text{ kg/kg}, \zeta_K = 0,01 \text{ kg/kg}.$$

Das 0,01 kg/kg sind verschiedene Mineralstoffe, die hier vereinfachend als Kalium angenommen werden sollen.

- a) Bestimmen Sie die molare Zusammensetzung des trockenen Holzes und den unteren Heizwert pro mol. (4 P)
- b) Bestimmen Sie in der Reaktionsgleichung die stöchiometrischen Faktoren und die zugeführte Sauerstoffmenge wenn Luft mit $\lambda=1,2$ zugeführt wird.



Die Pottasche = Kaliumcarbonat (K_2CO_3) bleibt als Asche zurück. Beachten Sie den Bedarf an C und O in der Pottasche. (4 P)

Wie ist die Zusammensetzung des Abgases? (2 P)

- c) Welche maximale Temperatur stellt sich in der Flamme ein, bevor Wärme an die Wände der Brennkammer abgegeben wird? Luft und Holz werden mit $T = T_\Theta = 25^\circ C$ zugeführt. Vernachlässigen Sie die Enthalpie der Asche. (2 P)
- d) Welche Wärme lässt sich pro kg Holzpellets gewinnen, wenn die Abgase mit $110^\circ C$ den Ofen verlassen? (2 P)

$$\lambda = \frac{\psi_{O_2, Edukte}}{\psi_{O_2, Stöchiometrisch Edukte}}$$

Stoffdaten:

Stoff	$\frac{M}{\text{g/mol}}$	$\frac{\Delta^B h_\Theta}{\text{kJ/mol}}$	$\frac{c_p^o _{T_\Theta}^{T_{\max}}}{\text{J/(molK)}}$	$\frac{c_p^o _{T_\Theta}^{110^\circ C}}{\text{J/(molK)}}$
C	12,000	0		
H ₂	2,007	0		
N ₂	28,01	0	33,28	30,11
O ₂	32,00	0	35,17	31,75
CO ₂	44,00	-393,51	54,44	45,85
H ₂ O (l)	18,015	-285,83		
H ₂ O (g)	18,015	-241,83	43,97	36,15
K	39,098	0		

Molare Zusammensetzung der trockenen Luft: $\nu_{N_2} = 0,79 \text{ mol/mol}$; $\nu_{O_2} = 0,21 \text{ mol/mol}$.

Mollier-Diagramm der luftspezifischen Enthalpie für $p_{ges} = 1,01325 \text{ bar}$

