

Thermodynamik 2

Klausur

15. September 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: _____

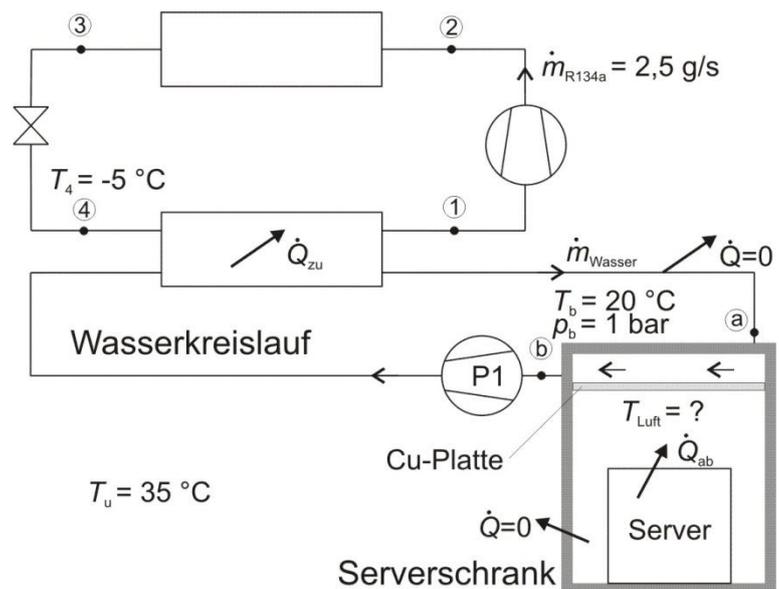
Unterschrift: _____

Angaben zur Korrektur

Aufgabe	Maximale Punktzahl	Erreichte Punkte	Korrektor
1	18		
2	17		
3	15		
Zwischensumme			
Bonuspunkte			
Summe			
Bewertung			

Aufgabe 1 (18 Punkte)

Für die Kühlung eines Computer-Serverschranks soll eine Kompressionskältemaschine mit dem Kältemittel R134a eingesetzt werden, in der (zunächst) folgende Zustandsänderungen durchlaufen werden:



1 → 2: Reversibel, adiabate Kompression ($\eta_{SV} = 1$)

2 → 3: Isobare Wärmeabfuhr an die Umgebung bis zur Siedelinie

3 → 4: Adiabate Drosselung auf unteres Druckniveau

4 → 1: Isobare Wärmeaufnahme bei -5 °C bis zur Taulinie

In der gesamten Aufgabe ist die minimale Temperaturdifferenz bei der Wärmeübertragung $\Delta T = 10$ K.

- Skizzieren Sie den Prozess in einem $\lg(p)$ - h - und einem T - s -Diagramm (4 P)
- Wie groß ist der Druck p_2 nach der Kompression? (1 P)
- Wie groß ist die Leistungszahl des Prozesses? (3 P)
- Wie groß wäre die Leistungszahl, wenn der Prozess ohne jegliche Exergieverluste arbeiten würde? (2 P)

Nun soll derselbe Prozess, jedoch mit einem realen Kompressor ($\eta_{SV} < 1$) und einem exergetischen Wirkungsgrad (bezogen auf die Exergieänderung des Kältemittels bei der Verdampfung) von $\eta_{ex} = 0,52$ betrachtet werden. Die Antriebsleistung bleibt gleich.

- Wie groß ist jetzt der Wärmestrom \dot{Q}^*_{zu} der im Verdampfer aufgenommen wird? (2 P)

Der Wärmestrom \dot{Q}^*_{zu} wird einem Wasserkreislauf entnommen, welcher mit Hilfe der Pumpe P1 (zugeführte Leistung kann vernachlässigt werden) durch einen Hohlraum an der Decke des Serverschranks geleitet wird. Hierdurch soll die Lufttemperatur im Inneren des Schrankes auf $T_{Luft} = 30$ °C gehalten werden. Der Wasserkreislauf und die

Luft sind durch eine 2 mm starke Kupferplatte voneinander getrennt. Die Pumpe saugt das Wasser bei einem Druck $p_b = 1$ bar an.

- f) Kann mit dem beschriebenen Aufbau die gewünschte Lufttemperatur von $T_{\text{Luft}} = 30^\circ\text{C}$ im Inneren des Serverschranks erreicht werden?

(Für die Berechnung wird vereinfacht angenommen, dass die Temperatur des Wassers zwischen den Punkten a und b gleich der thermodynamischen

Mitteltemperatur $T_{m,a-b}$ ist.)

(6 P)

Stoffdaten für R134a:

Zweiphasiger Zustand:

T °C	p bar	h' kJ/kg	h'' kJ/kg	s' kJ/(kg*K)	s'' kJ/(kg*K)
-10	2,01	186,697	392,665	0,9506	1,7334
-5	2,43	193,316	395,659	0,9754	1,7300
0	2,93	200,000	398,603	1,0000	1,7271
5	3,50	206,752	401,492	1,0243	1,7245
15	4,88	220,480	407,073	1,0724	1,7200
25	6,65	234,546	412,334	1,1199	1,7162
35	8,87	249,007	417,189	1,1670	1,7128
45	11,60	263,943	421,519	1,2139	1,7092
55	14,92	279,469	425,153	1,2611	1,7050

Einphasiger Zustand:

T °C	p bar	h kJ/kg	s kJ/(kg*K)
46	11,60	422,710	1,7130
49	11,60	426,210	1,7239
50,7	11,60	428,160	1,7300
52,4	11,60	430,100	1,7359
55,9	11,60	434,030	1,7479
60,7	11,60	439,340	1,7639

Stoffdaten für Wasser:

T °C	p bar	h kJ/kg	s kJ/(kg*K)
5	1	21,119	0,0763
10	1	42,118	0,1511
15	1	63,076	0,2244
20	1	84,006	0,2965
25	1	104,919	0,3672
30	1	125,821	0,4367
35	1	146,719	0,5051
40	1	167,615	0,5724

Weitere Angaben:

Umgebungstemperatur: $T_U = 35^\circ\text{C}$

Der Serverschrank und alle Verbindungsleitungen sind ideal isoliert (adiabat)

Abmaße des Serverschranks: B / H / T: 0,8 m / 2 m / 0,8 m

Das Wasser strömt ohne Druckverlust durch den Serverschrank

Stoffdaten für die Wärmeübertragung:

Wasser: $\alpha_W = 500 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$

Luft: $\alpha_L = 20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$

Kupfer: $\lambda_{Cu} = 400 \text{ W}/(\text{m K})$

Aufgabe 2 (17 Punkte):

Für eine Skihalle soll Kunstschnee erzeugt werden. Der Prozess zur Erzeugung von Kunstschnee kann durch folgende Schritte vereinfacht dargestellt werden:

Zunächst saugt ein Gebläse Umgebungsluft an. Anschließend wird in diesen Luftstrom flüssiges Wasser mit einer Temperatur von 0 °C eingesprüht. Der dabei entstehende Schnee wird mit dem Luftstrom ausgeblasen. Die Temperatur der angesaugten Umgebungsluft beträgt -4 °C, ihre relative Feuchte ist 40%. Der zu erzeugende Schnee soll eine Temperatur von -6 °C haben.

- a) Wie viel Schnee pro kg angesaugter trockener Luft kann unter diesen Bedingungen erzeugt werden? (2 P)
- b) Wie viel Wasser muss hierbei pro kg trockener Luft eingesprüht werden? (1 P)

Durch Sonnenstrahlung steigt die Lufttemperatur bei gleichbleibendem Wassergehalt auf +3 °C an.

- c) Welche Temperatur hat in diesem Fall der entstehende Schnee, wenn das Verhältnis von Wassermassenstrom zu Luftmassenstrom genau so groß ist wie im Teilaufgabe a). (2 P)
- d) Wie viel Schnee pro kg trockener Luft entsteht jetzt? (1 P)
- e) Welche Kälteleistung pro kg Schnee pro Minute wäre erforderlich, wenn die Luft vor Eintritt in die Schneekanone auf -4 °C abgekühlt werden soll? (2 P)
- f) Bestimmen Sie **rechnerisch** die Beladung und die spezifische Enthalpie der angesaugten Luft aus Teilaufgabe a). (5 P)
- g) Bestimmen Sie zur Kontrolle **rechnerisch** die spezifische Enthalpie des Luftzustands mit dem Schnee nach der Zugabe des Wassers. (Der Wassergehalt x in diesem Zustand kann dem h_{1+x} -Diagramm entnommen werden) (4 P)

Die Teilaufgaben a) bis e) können mit Hilfe des beigelegten h_{1+x} -Diagramms gelöst werden.

Feuchte Luft ist als Mischung idealer Gase zu behandeln. Gesamtdruck: 1000 mbar

Stoffdaten:

Spezifische Wärmekapazität: $c_{p,\text{Luft}} = 1,007 \text{ kJ}/(\text{kg K})$

$c_{p,\text{Wasserdampf}} = 1,86 \text{ kJ}/(\text{kg K})$ $c_{p,\text{Eis}} = 2,05 \text{ kJ}/(\text{kg K})$

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

Schmelzenthalpie des Wassers: $\Delta h_{\text{Schm}} = 333 \text{ kJ}/\text{kg}$

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

Dampfdruckkurve von Wasserdampf über Eis:

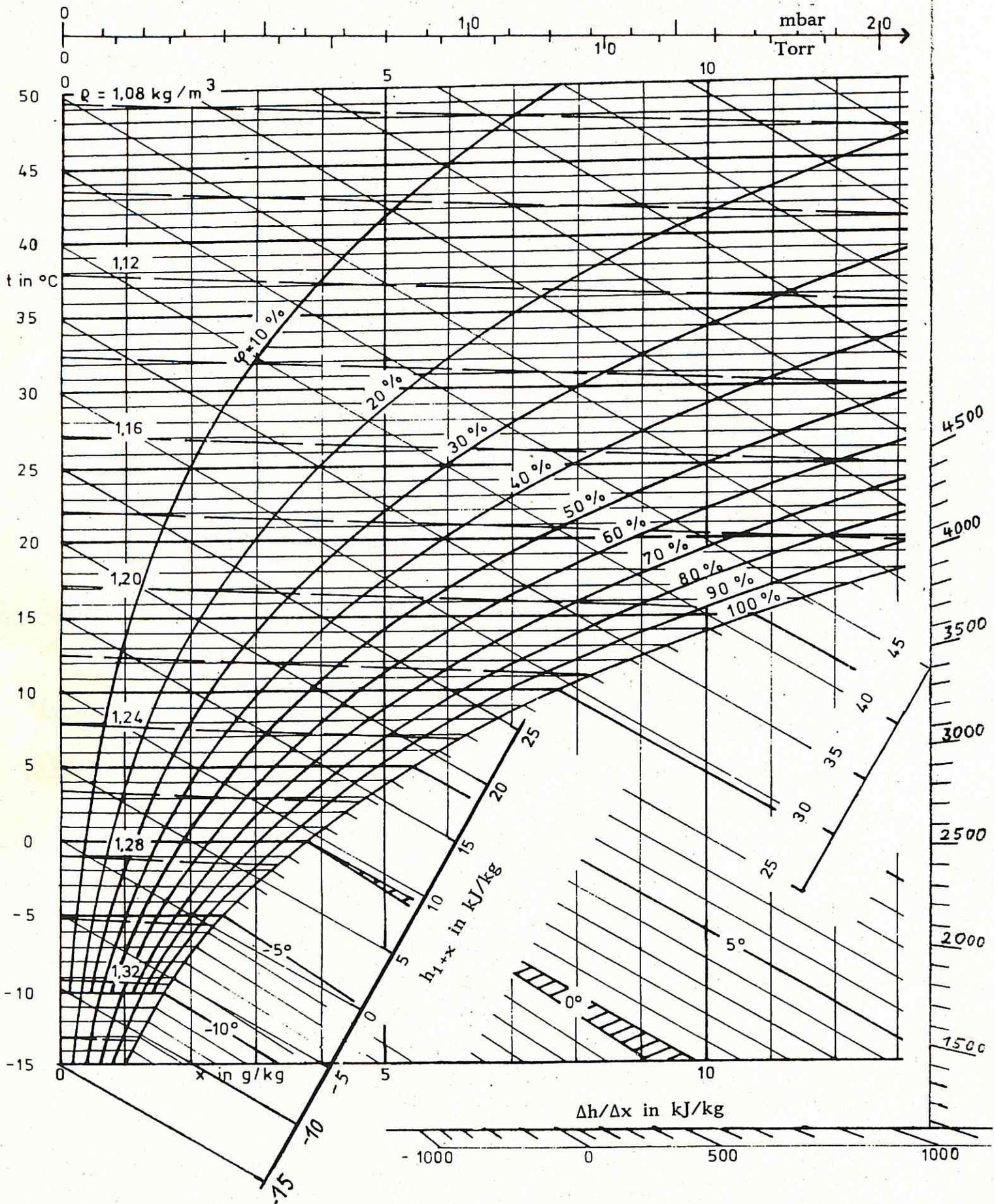
$$\ln(p) = 23,6861 - 5803,138/(T+265,2717) \quad T \text{ in } ^\circ\text{C}, p \text{ in mbar}$$

Dampfdruckkurve von Wasserdampf über Wasser:

$$\ln(p) = 18,9141 - 4010,823/(T+234,4623) \quad T \text{ in } ^\circ\text{C}, p \text{ in mbar}$$

h_{1+x}, x -Diagramm im gesetzlichen Einheitensystem

$p = 1 \text{ bar} = 750 \text{ Torr}$



Aufgabe 3 (15 Punkte):

In einem Wohngebäude soll eine Erdgasheizung mit einer Heizleistung von 20 kW eingebaut werden. Das von den Stadtwerken angelieferte Erdgas besteht aus 94 mol-% Methan, 0,75 mol-% Ethan, 2,75 mol-% Kohlendioxid und 2,5 mol-% Stickstoff.

Erdgas und Luft erreichen die Heizung mit einer Temperatur von 25 °C. Die Luft hat einen Wassergehalt von 0,5 mol-%. Die Verbrennung erfolgt mit einem Luftüberschuss von $\lambda = 1,2$. Die Verbrennungsgase verlassen den Kessel mit einer Temperatur von 100 °C.

Vereinfacht ist die Zusammensetzung der trockenen Luft: 79 mol-% N₂, 21 mol-% O₂.

Luft und Erdgas können als ideales Gas betrachtet werden.

- a) Wie viel mol Rauchgas entsteht pro mol Brennstoff? (6 P)
- b) Berechnen Sie den Brennwert H^p und den Heizwert H^u (Bezugspunkt 25 °C, 1 bar) von 1 mol Erdgas (3 P)
- c) Welche Wärme Q_W wird im Heizkessel auf den Wärmeträger Wasser bei der Verbrennung von 1 kg Erdgas übertragen, wenn die Erdgas- und die Lufttemperatur 25 °C betragen? (2 P)
- d) Wie viel Kubikmeter Erdgas wird pro Stunde verbraucht? (2 P)
- e) Wie viele Tonnen Kohlendioxid entstehen pro Heizperiode von 6 Monate? (2 P)

Stoffdaten:

Verbindung	O ₂	N ₂	CO ₂	H ₂ O (g)	H ₂ O (l)	CH ₄	C ₂ H ₆
$\Delta^B h_\Theta$ [kJ/mol]	-	-	-393,5	-241,8	-285,8	-74,8	-84,7
M [g/mol]	32,00	28,01	44,01	18,02	18,02	16,04	30,07

Feuchtes Rauchgas: $c_{p,RG} = 30 \text{ J}/(\text{mol K})$

Trockenes Rauchgas: $c_{p,tr.RG} = 1 \text{ kJ}/(\text{kg K})$

Flüssiges Wasser: $c_{p,W} = 4,19 \text{ kJ}/(\text{kg K})$ bei 0 bis 100 °C

Wasserdampf: $c_{p,WD} = 1,85 \text{ kJ}/(\text{kg K})$ bei 0 bis 100 °C

$\Delta h^v_{\text{Wasser}} = 2441,5 \text{ kJ}/\text{kg}$

$M_{\text{Wasser}} = 18,02 \text{ g}/\text{mol}$

$M_{tr, \text{Luft}} = 28,848 \text{ g}/\text{mol}$

$R_m = 8,314472 \text{ J}/(\text{mol K})$