

Thermodynamik 2

Klausur

17. September 2014

Bearbeitungszeit: 120 Minuten

Umfang der Aufgabenstellung: 7 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

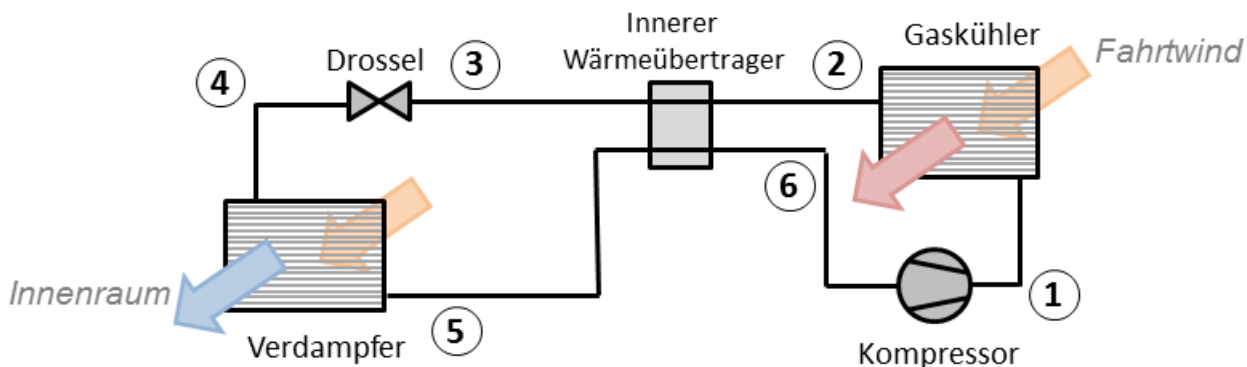
Aufgabe	Maximale Punktzahl	Erreichte Punkte	Korrektor
1	17		
2	20		
3	13		
	Summe		
	Bewertung		

Aufgabe 1 (17 Punkte)

„Seit Januar 2011 verbietet eine EU-Richtlinie fluorierte Treibhausgase mit einem Treibhauspotenzial über 150 in Autoklimaanlagen. Daher muss das bisherige Kältemittel Tetrafluorethan (R134a) ersetzt werden. CO₂ als Kältemittel ist eine Alternative. Ein Dienstfahrzeug des Umweltbundesamts fährt seit 2009 mit einer CO₂-Klimaanlage.“

[Umweltbundesamt, 2013]

Eine PKW-CO₂-Klimaanlage arbeitet nach folgendem Prinzip:



Das überhitzte Kältemittel CO₂ wird vom Kompressor angesaugt und mit einem isentropen Wirkungsgrad von $\eta_{s,v} = 0,7$ auf den **überkritischen** Druck von $p_2 = 10$ MPa verdichtet (6→1). Nach der Verdichtung auf den hohen überkritischen Druck wird das Kältemittel isobar im Gaskühler durch Fahrtwind (1→2) gekühlt, anschließend gibt es in einem inneren Wärmeübertrager (2→3) isobar Wärme an das Niederdruckgas ab. Das gekühlte Hochdruckgas wird in der Drossel (3→4) adiabatisch auf den Verdampferdruck ($p_4 = p_5 = p_6$) entspannt. Anschließend wird das CO₂ vollständig verdampft (4→5). Dabei strömt die von außen kommende warme Frischluft am Verdampfer vorbei, kühlt sich ab und wird durch ein Gebläse in den Innenraum des Autos gefördert. Der Verdampfer nimmt die Wärme der Außenluft auf. Schließlich durchströmt das Kältemittel im Gegenstrom zum Hochdruckgas den inneren Wärmeübertrager und wird dort um 5 K überhitzt.

An einem heißen Sommertag mit einer Außentemperatur von 30°C soll der Innenraum des PKWs auf 20°C gekühlt werden. Im Gaskühler und im Verdampfer wird zwischen Kältemittel und Umgebung eine minimale Temperaturdifferenz von $\Delta T_{\min} = 10$ K benötigt.

- Skizzieren Sie den Prozess in einem $\lg(p)$ - h - und einem T - s -Diagramm. (6 P)
- Welche Temperatur und welcher Druck herrschen im Verdampfer? Bis zu welcher Temperatur kann das CO₂ im Gaskühler abgekühlt werden, sodass die erforderliche Temperaturdifferenz eingehalten wird? (2 P)

Hinweis: Verdampfer und Gaskühler sind Gegenstrom-Wärmeübertrager.

- c) Welche Temperatur erreicht das CO₂ auf der Hochdruckseite nach dem inneren Wärmeübertrager? (2 P)

Falls Sie Aufgabenteil c) nicht lösen konnten, nehmen Sie am Punkt 3 eine Temperatur von 305,15 K an.

- d) Wie groß ist der Massenstrom des Kältemittels, wenn eine Kälteleistung von 1 kW benötigt wird? (2 P)
- e) Wie groß ist die Antriebsleistung des Kompressors? (3 P)
- f) Welche Vorteile bringt der innere Wärmeübertrager in diesem Prozess? (2 P)

Zweiphasiger Zustand CO₂

T	p	h'	h''	s'	s''
K	MPa	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$
273,15	3,4851	200,000	430,893	1,0000	1,8453
278,15	3,9695	212,502	427,485	1,0434	1,8163
283,15	4,5022	225,730	422,884	1,0884	1,7847
288,15	5,0871	239,989	416,636	1,1359	1,7489
293,15	5,7291	255,869	407,865	1,1877	1,7062
303,15	7,2137	304,553	365,129	1,3435	1,5433
303,65	7,2967	310,808	357,567	1,3636	1,5176

Kritischer Punkt CO₂

$T_c =$	304,12	K
$p_c =$	7,38	MPa

Einphasiger Zustand CO₂

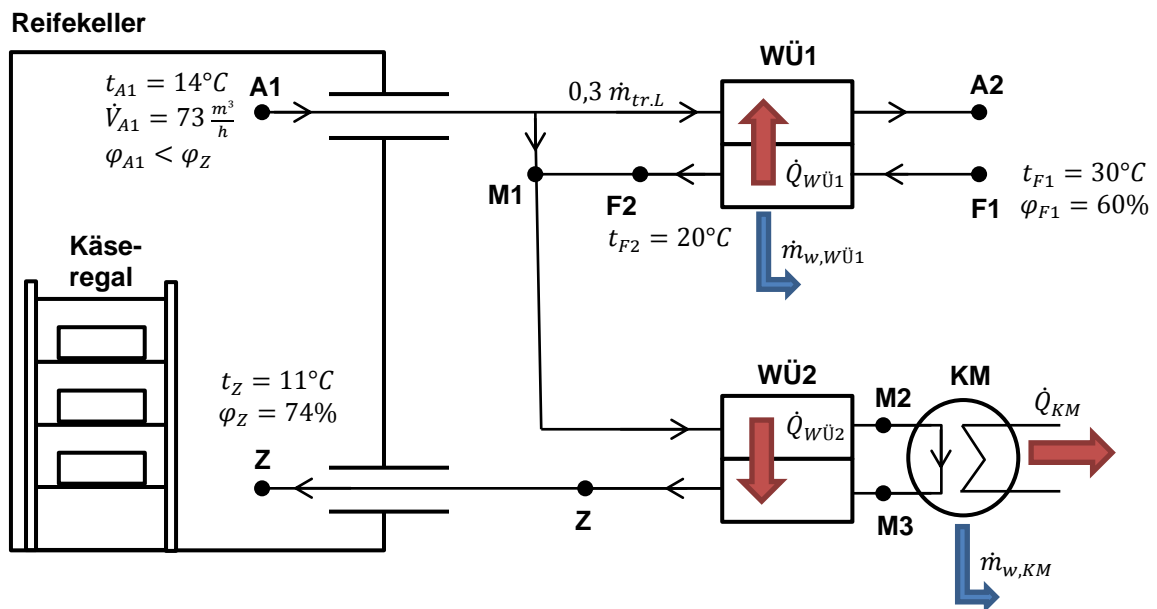
T	p	h	s
K	MPa	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$
283,15	3,9695	437,262	1,8512
288,15	4,5022	434,164	1,8810
293,15	5,0871	430,132	1,9076
298,15	5,7291	424,958	1,9320
303,15	10,000	271,617	1,2220
308,15	10,000	289,518	1,2806
313,15	10,000	313,042	1,3563
318,15	10,000	348,250	1,4677
323,15	10,000	384,070	1,5795
328,15	10,000	407,839	1,6525
333,15	10,000	425,017	1,7045
338,15	10,000	438,823	1,7456
343,15	10,000	450,653	1,7804
348,15	10,000	461,199	1,8109
353,15	10,000	470,848	1,8384
358,15	10,000	479,834	1,8637
363,15	10,000	488,312	1,8872

Aufgabe 2 (20 Punkte)

Im Reifekeller einer Käserei lagern Emmentaler-Laibe bei einer Temperatur $t_Z=11^\circ\text{C}$ und einer relativen Feuchte $\varphi_Z=74\%$. Damit ein optimaler Reifeprozess gewährleistet werden kann, wird eine Klimaanlage eingesetzt, um die geforderten Umgebungsbedingungen aufrechtzuerhalten. Die Klimaanlage saugt kontinuierlich einen Volumenstrom $\dot{V}_{A1}=73\text{ m}^3/\text{h}$ Luft vom Zustand A1 an, die sich aufgrund von Wärmeeintrag in den Reifekeller auf eine Temperatur von $t_{A1}=14^\circ\text{C}$ erwärmt, und führt diese bei den geforderten Bedingungen (t_Z, φ_Z) wieder zu.

Von der angesaugten Abluft (A1) werden 30%, bezogen auf den Massenstrom trockener Luft $\dot{m}_{tr,L}$, durch Frischluft ersetzt. Die Frischluft hat eine Temperatur $t_{F1}=30^\circ\text{C}$ und eine relative Feuchte $\varphi_{F1}=60\%$. Um Energie einzusparen wird die Frischluft in einem Wärmeübertrager (WÜ1) durch die Abluft auf 20°C vorgekühlt.

Als weitere Energiesparmaßnahme wird vor der Kältemaschine (KM) ein weiterer Wärmeübertrager (WÜ2) eingesetzt, der an die in den Reifekeller eintretenden Zuluft (Z) genau den Wärmestrom überträgt, der notwendig ist, um die Luft nach der Kühlung und Entfeuchtung auf die gewünschte Temperatur t_Z aufzuheizen.



Hinweis:

Aufgabenteile a) bis d) sind mithilfe des beigefügten h_{1+x},x -Diagramms zu lösen.

- a) Tragen Sie die gegebenen Zustände (A1, F1, Z) in das beigefügte h_{1+x},x -Diagramm ein. (2 P)
- b) Berechnen Sie den Massenstrom trockener Luft $\dot{m}_{tr,L}$, der von der Klimaanlage angesaugt wird. (1 P)
- c) Berechnen Sie den im Wärmeübertrager WÜ1 übertragenen Wärmestrom, wenn die Frischluft auf eine Temperatur $t_{F2} = 20^\circ\text{C}$ abgekühlt werden kann. Berechnen Sie außerdem den Massenstrom Wasser $\dot{m}_{w,WÜ1}$, der beim Abkühlen der Frischluft anfällt. (3 P)
- d) Bestimmen Sie zeichnerisch den Mischungspunkt M1. Welcher Wassergehalt x_{M1} und welche Temperatur t_{M1} stellen sich nach der Vermischung ein? (2 P)

Die Aufgabenteile e) und g) sind rein rechnerisch zu lösen, d.h. in den bisherigen Aufgabenteilen durch Ablesen bestimmte Werte dürfen hier nicht weiter verwendet werden.

- e) Überprüfen Sie die in Aufgabenteil d) bestimmten Werte (x_{M1} , t_{M1}) rechnerisch. (6 P)
- f) Tragen Sie die Zustände und Zustandsänderungen im zweiten Wärmeübertrager (WÜ2) und in der Kältemaschine (KM) in das h_{1+x},x -Diagramm ein. (2 P)
- g) Berechnen Sie den im Wärmeübertrager (WÜ 2) übertragenen Wärmestrom. (4 P)

Stoffdaten:

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

Spezifische isobare Wärmekapazitäten:

$$c_{p,Luft} = 1,007 \text{ kJ}/(\text{kg K}), c_{p,Wasserdampf} = 1,86 \text{ kJ}/(\text{kg K}), c_{p,Wasser} = 4,19 \text{ kJ}/(\text{kg K})$$

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

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

$$\text{Dampfdruckkurve von Wasser: } \ln(p / \text{mbar}) = 18,8314 - 3964,8072 / (t / ^\circ\text{C} + 232,8977)$$

Aufgabe 3 (13 Punkte)

Im Folgenden soll ein stark vereinfachtes Modell der Lambdaeegelung eines Ottomotors betrachtet werden (siehe Schaltbild auf der nächsten Seite). Eine Lambdasonde (1) misst den Restsauerstoffgehalt im Abgas und gibt diese Information an die Motorsteuerungseinheit (2) weiter. Diese regelt dann den Stoffmengenstrom des Sauerstoffs (3) und des Kraftstoffs (4), um den Vorgabewert zu erreichen. Als Kraftstoff soll Isooctan (C_8H_{18}) verwendet werden, welches mit reinem Sauerstoff vollständig verbrannt wird. Der gesamte Prozess verläuft isobar bei Standarddruck. Aus den Daten der Lambdasonde ermittelt die Steuerungseinheit den Wert für das Luftverhältnis zu $\lambda = 1$.

- Geben Sie die Reaktionsgleichung für die gesuchte Verbrennungsreaktion an. (1 P)
- Berechnen Sie zunächst die Reaktionsenthalpie im Standardzustand bezogen auf 1 mol Brennstoff. Verläuft die Reaktion unter diesen Bedingungen exotherm oder endotherm? (3 P)
- Die Verbrennungsreaktion läuft bei 600 K ab. Berechnen Sie die Verbrennungsenthalpie bei Reaktionstemperatur bezogen auf 1 mol Brennstoff. (4 P)
Hinweis: Beachten Sie mögliche Phasenübergänge.
- Bei moderater Fahrt regelt die Steuereinheit den Stoffmengenstrom des Kraftstoffs auf $\dot{n} = 0.01$ mol/s. Berechnen Sie die vom Antriebsstrang aufgenommene Leistung unter der Annahme, dass 32% der vom Verbrennungsmotor erzeugten Wärmeleistung nutzbar sind, wenn in der Kraftstoffzuführung (5) eine Temperatur von 18°C, in der Sauerstoffzuführung (6) eine Temperatur von 20°C und in der Abgasabführung (7) eine Temperatur von 540 K festgestellt wird. (5 P)

Stoffdaten:

Stoff	$\Delta^B h_\theta$ [kJ/mol]	c_p [kJ/(mol K)]
Isooctan C_8H_{18} (l)	-259,3	0,257
Isooctan C_8H_{18} (g)	-224,1	0,280
Sauerstoff (g)	0	0,0306
Kohlenstoffdioxid (g)	-393,6	0,0433
Wasser (l)	-286	0,0755
Wasser (g)	-242,1	0,0347

Bei vorliegendem Partialdruck der Komponenten gilt:

	T_s [K]	$\Delta^V h$ [kJ/mol]
Isooctan	300,9	34,98
Wasser	356,21	41,44

Schaltbild zur Lambdaregelung

