

## Thermodynamik 1

Klausur

06. März 2015

Bearbeitungszeit: 150 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: \_\_\_\_\_

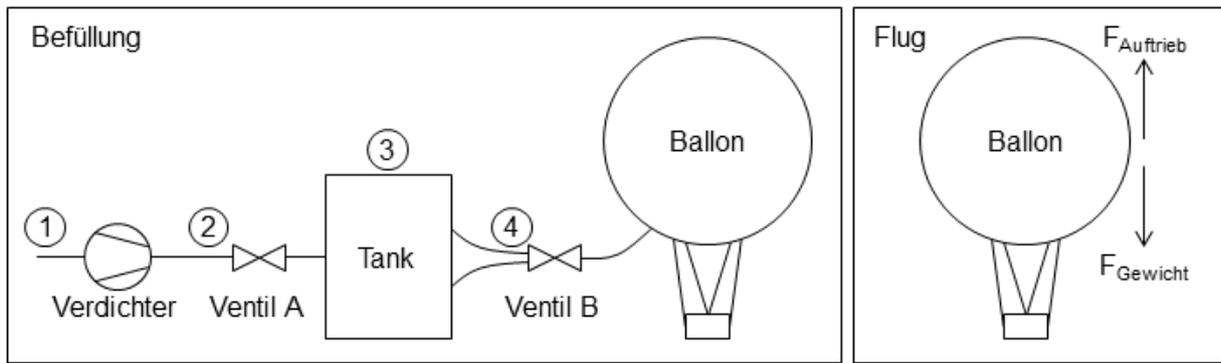
Matrikelnummer: \_\_\_\_\_

**Unterschrift:** \_\_\_\_\_

### Angaben zur Korrektur

Aufgabe	Maximale Punktzahl	Erreichte Punkte	Korrektor
1	23		
2	31		
3	26		
	Zwischensumme		
	Bonuspunkte		
	Summe		
	Bewertung		

## Aufgabe 1 (23 Punkte)



Ein mit Helium gefüllter Forschungsballon soll dafür genutzt werden, Messinstrumente in eine Höhe von 10 bis 20 km zu heben. Für den Befüllungsprozess wird die oben gezeigte Anlage genutzt. Helium wird von Zustand 1 ( $T_1 = 20^\circ\text{C}$ ,  $p_1 = 5 \text{ bar}$ ) adiabatisch auf  $p_2 = 50 \text{ bar}$  verdichtet und in einen Tank geleitet, wobei Ventil B zunächst geschlossen ist. Im betrachteten Zeitraum kann der Massenstrom zwischen Zustand 1 und 3 als konstant mit  $\dot{m}_H = 90 \text{ g/s}$  angenommen werden. Innerhalb von 1273 s ist der Tank gefüllt ( $p_{\text{Tank}} = p_2$ ) und Ventil A wird geschlossen.

Helium kann für alle Aufgabenteile, außer c), als einatomiges ideales Gas betrachtet werden, wobei:  $R_m = 8,314472 \text{ J}/(\text{mol K})$ ;  $M_{\text{Helium}} = 4,003 \text{ g/mol}$

- Berechnen Sie die isobare Wärmekapazität  $c_p$  und den Isentropenexponenten  $\kappa$  vom Helium. (4 P)
- Welchen Wert hat der Polytropenexponent  $n$  wenn  $T_2$  nach dem Verdichter 50 K unter der isentropen Temperatur liegt? (4 P)
- Weicht das Verhalten von Helium im Tank ( $V_{\text{Tank}} = 37,7 \text{ m}^3$ , Ventil A geschlossen) stark vom idealen Gas ab? Berechnen Sie den Realgasfaktor und bewerten Sie das Ergebnis. (4 P)

Nach dem Verschließen von Ventil A wird gewartet bis das Helium auf  $T_3 = T_1 = 20^\circ\text{C}$  abgekühlt ist. Daraufhin wird Ventil B geöffnet und das Helium strömt gleichmäßig durch eine Querschnittsverengung (Punkt 4) in den Ballon. Zu einem bestimmten Zeitpunkt während der Befüllung liegt im Tank ein Druck von  $p_3 = 15 \text{ bar}$  und in Punkt 4 ein Druck von  $p_4 = 7,3 \text{ bar}$  vor. Die Temperatur im Tank soll bei der Befüllung als konstant angenommen werden. Die Strömung ist reversibel adiabatisch.

- Wie schnell strömt das Helium in der Querschnittsverengung? (5 P)

Nachdem der Ballon gefüllt ist, soll nun der Ballonflug betrachtet werden.

Das Gesamtgewicht des Ballons beträgt 600 kg.

Nach der barometrischen Höhenformel kann der Luftdruck in Abhängigkeit von der Höhe berechnet werden mit:

$$p(z) = 0,2676 \text{ bar} \cdot \exp\left(\frac{10 \text{ km} - z}{6,38216 \text{ km}}\right) \quad (\text{für } z > 10 \text{ km})$$

Die Temperatur in der betrachteten Höhe ist konstant  $T_L = -55^\circ\text{C}$ .

- e) Bestimmen Sie die maximale Flughöhe des Ballons wenn sein Volumen in dieser Höhe  $V_{\text{Ballon}} = 4000 \text{ m}^3$  beträgt. (6 P)

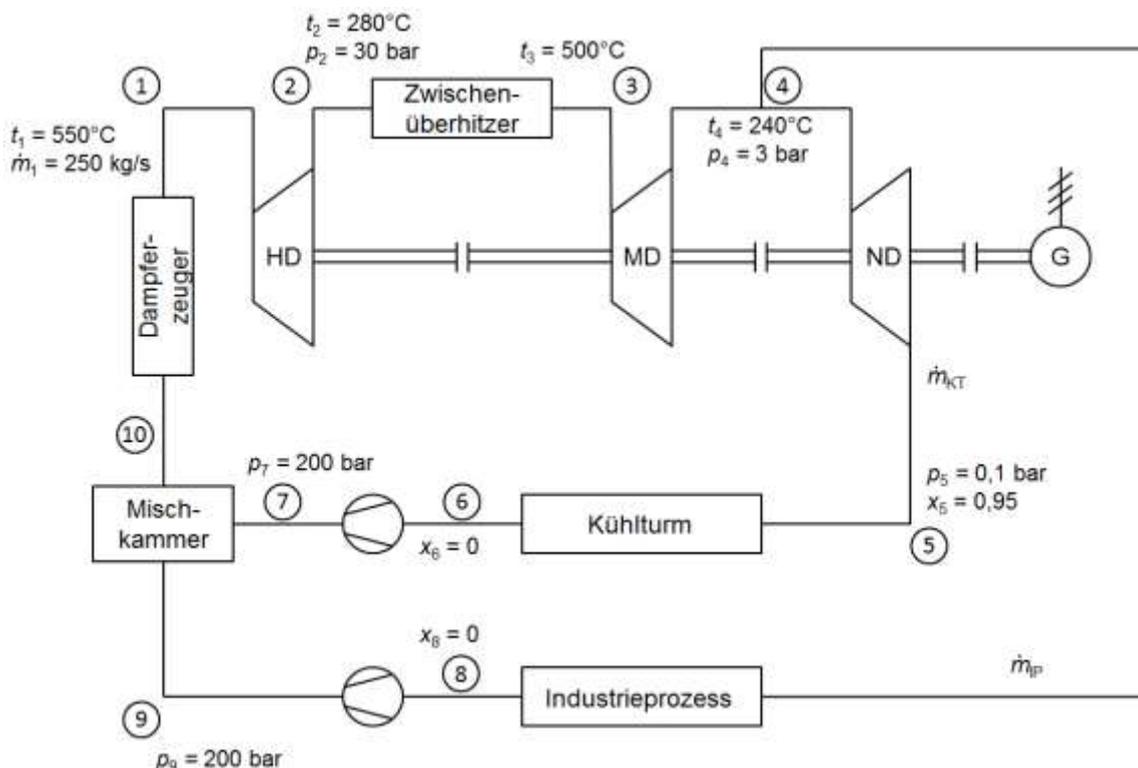
Luft kann als ideales Gas betrachtet werden:  $M_{\text{Luft}} = 28,96 \text{ g/mol}$

Die Auftriebskraft wird berechnet durch:

$$F_A = (\rho_{\text{Luft}} - \rho_{\text{Helium}}) \cdot g \cdot V_{\text{Ballon}} \quad \text{mit: } g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

## Aufgabe 2 (31 Punkte)

In einem Heizkraftwerk wird Wasser als Arbeitsmedium genutzt. Durch Verbrennung von Steinkohle wird ein Gesamtwärmestrom von 900 MW erzeugt und in einem Dampferzeuger und Zwischenüberhitzer isobar vom Arbeitsmedium aufgenommen. Der überhitzte Dampf (Zustand 1) wird in einer adiabaten Hochdruck-Turbine (HD) auf den Zustand 2 entspannt. Nach der Zwischenüberhitzung auf Zustand 3 erfolgt eine weitere Entspannung in der Mitteldruck-Turbine (MD) auf Zustand 4. Von Zustand 4 wird ein Teilmassenstrom ( $\dot{m}_{IP}$ ) als Fernwärme für einen Industrieprozess bereitgestellt. Das übrige Arbeitsmedium ( $\dot{m}_{KT}$ ) wird in der Niederdruck-Turbine (ND) weiter entspannt und liegt im Zustand 5 mit einem Dampfmassenanteil von  $x_5 = 0,95$  vor. Anschließend wird das Arbeitsmedium im Kühlturm soweit abgekühlt, dass im Zustand 6 nur noch siedende Flüssigkeit vorliegt. Mit der nachfolgenden adiabaten Pumpe ( $w_{t,67} = 20,11$  kJ/kg) wird reversibel Zustand 7 erreicht. Der aus dem Zustand 4 bereitgestellte Massenstrom für den Industrieprozess wird in einem Wärmeübertrager vollständig kondensiert (Zustand 8). Mit der reversibel adiabaten Kondensatpumpe ( $w_{t,89} = 21,04$  kJ/kg) wird der Zustand 9 erreicht. Die beiden Massenströme werden in einer Mischkammer isobar wieder zusammengeführt (Zustand 10).



- a) Skizzieren Sie den Prozess mit allen Zustandspunkten in einem  $T,s$ -Diagramm. Tragen Sie alle benötigten Isobaren in das Diagramm ein. (7 P)

b) Berechnen Sie die Enthalpie im Zustand 10. (4 P)

Wenn Sie Aufgabenteil b) nicht lösen konnten, rechnen Sie weiter mit  $h_{10} = 360 \text{ kJ/kg}$ .

c) Berechnen Sie die Teilmassenströme  $\dot{m}_{KT}$  und  $\dot{m}_{IP}$ . (3 P)

d) Berechnen Sie die technische Gesamtleistung der Turbinen und den im Industrieprozess abgegebenen Wärmestrom. (6 P)

e) Wie groß ist der isentrope Wirkungsgrad der HD-Turbine? (3 P)

f) Berechnen Sie den elektrischen Wirkungsgrad des Kraftwerks  $\eta_{el} = P_{Nutz} / \dot{Q}_{Aufwand}$  und den energetischen Gesamtwirkungsgrad des Prozesses. (5 P)

g) Berechnen Sie den für den Industrieprozess bereitgestellten Exergiestrom. (3 P)

Umgebungstemperatur:  $T_u = 20^\circ\text{C}$

Zweiphasiger Zustand Wasser:

$T$	$p$	$h'$	$h''$	$s'$	$s''$
$^\circ\text{C}$	MPa	kJ/kg	kJ/kg	kJ/(kg K)	kJ/(kg K)
45,81	0,01	191,81	2573,5	0,64920	8,1488
69,10	0,03	289,27	2582,4	0,94407	7,7675
99,61	0,10	417,50	2591,3	1,3028	7,3588
133,52	0,30	561,43	2600,1	1,6717	6,9916
233,85	3,00	1008,30	2608,8	2,6455	6,1856
365,75	20,0	1827,20	2617,5	4,0156	4,9314

Homogener Zustand Wasser:

$T$	$p$	$h$	$s$
$^\circ\text{C}$	MPa	kJ/kg	kJ/(kg K)
240	0,3	2947,5	7,4788
250	0,3	2967,9	7,5180
260	0,3	2988,2	7,5565
270	0,3	3008,5	7,5943
280	0,3	3028,8	7,6314
240	3	2824,5	6,2274
250	3	2856,5	6,2893
260	3	2886,4	6,3459
270	3	2914,9	6,3987
280	3	2942,2	6,4486
500	3	3457,2	7,2359
510	3	3479,7	7,2647
520	3	3502,2	7,2933
530	3	3524,7	7,3214
540	3	3547,2	7,3493
550	3	3569,7	7,3768
500	20	3241,2	6,1446
510	20	3273,6	6,1862
520	20	3305,2	6,2263
530	20	3336,1	6,2650
540	20	3366,4	6,3025
550	20	3396,1	6,3389

Kritische Daten von Wasser:

$T_c = 373,95^\circ\text{C}$  ;  $p_c = 22,064 \text{ MPa}$

### Aufgabe 3 (26 Punkte)

Ein Auto soll mit Propan als Kraftstoff angetrieben werden. Der Tank befindet sich in der Reserveradmulde und hat ein Volumen von  $80 \text{ dm}^3$ . In Zustandspunkt 1 ist der Tank so leer, dass gerade gesättigter Dampf vorliegt. Anschließend wird eine isotherme Betankung bei  $t_1 = t_2 = 10^\circ\text{C}$  bis zu einem Dampfmassengehalt von  $3,543 \%$  durchgeführt (Zustandspunkt 2).

- a) Welcher Druck liegt im Zustandspunkt 1 vor? (1 P)
- b) Welche mittlere Dichte liegt nach der Betankung vor? (3 P)
- c) Welche Masse wurde eingefüllt und auf welcher Höhe befindet sich die Phasengrenze im Tank? (5 P)

An einem warmen Sommertag heizt sich das Propan vom Zustandspunkt 2 auf eine Temperatur von  $t_3 = 30^\circ\text{C}$  auf.

- d) Wie wird sich die Lage der Phasengrenze durch die Erwärmung verändern? Beschreiben Sie in einem Satz. (2 P)
- e) Wie groß ist die Reichweite an diesem Sommertag, wenn das Auto  $5,5 \text{ kg}$  Propan pro  $100 \text{ km}$  verbraucht und der Tank isobar so weit entleert werden darf, bis der Inhalt gerade vollständig gasförmig vorliegt (Zustandspunkt 4)? (3 P)

Nach dem Betanken (Zustandspunkt 2) gerät das Auto in Brand und der Tank samt Inhalt heizt sich schnell auf. Der Tank berstet bei einem Druck von  $2000 \text{ N/cm}^2$  und ist zum Schutz mit einem Überdruckventil ausgestattet, welches bei  $80\%$  des Berstdrucks auslöst und Propan ablässt (Zustandspunkt 3\*).

- f) Bei welcher Temperatur löst das Überdruckventil aus und wie viel Wärme wird dem Propan bis dahin zugeführt? (7 P)
- g) Stellen Sie alle Zustandsänderungen qualitativ in einem  $T, \rho$  - Diagramm dar. Kennzeichnen Sie dabei die Siede- und Taulinie sowie den kritischen Punkt. (5 P)

Anmerkungen:

Der Tank kann als starrer Zylinder mit einem Durchmesser von  $63,83 \text{ cm}$  angenommen werden.

Stoffdaten für Propan:

Zweiphasiger Zustand

$T$	$p$	$\rho'$	$\rho''$	$h'$	$h''$
°C	bar	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kJ/kg	kJ/kg
0,00	4,745	528,590	10,351	200,000	574,870
5,00	5,511	521,750	11,969	212,600	580,330
10,00	6,366	514,730	13,783	225,400	585,670
15,00	7,315	507,500	15,813	238,400	590,890
30,00	10,790	484,390	23,451	278,830	605,540
50,00	17,133	448,870	38,630	336,800	621,660
70,00	25,868	403,620	63,916	401,750	630,370
90,00	37,641	328,830	119,000	483,710	616,470
96,74	42,512	220,480	220,480	555,240	555,240

Einphasiger Zustand

$T$	$p$	$\rho$	$h$
°C	bar	kg/m <sup>3</sup>	kJ/kg
200,00	91,5	150,0	870,3
200,00	131,4	230,0	822,7
232,02	159,3	230,0	912,3
234,26	161,3	230,0	918,7
255,78	180,0	230,0	980,9
286,88	200,0	223,7	1076,2
236,63	159,3	225,0	927,9
238,95	161,3	225,0	934,6