

## Thermodynamik 1

Klausur

14. September 2017

Bearbeitungszeit: 150 Minuten

Umfang der Aufgabenstellung: 7 nummerierte Seiten

Alle Unterlagen zur 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: \_\_\_\_\_

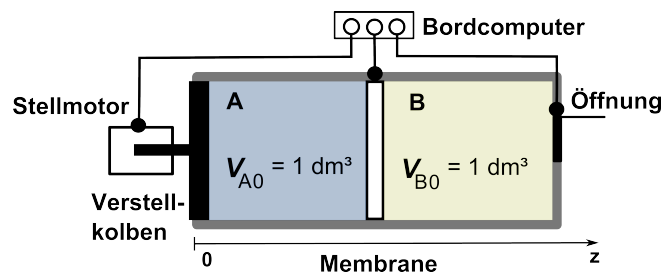
**Unterschrift:** \_\_\_\_\_

### Angaben zur Korrektur

Aufgabe	Maximale Punktzahl	Erreichte Punkte	Korrektor
1	20		
2	35		
3	25		
Zwischensumme			
Bonuspunkte			
Summe			
Bewertung			

### Aufgabe 1 (20 Punkte)

Im Rahmen einer Erkundungsmission des Sonnensystems sollen die Temperatur und der Druck der Atmosphäre des Saturnmonds Titan ermittelt werden. Hierzu wird eine Sonde mit einem Zweikammermesssystem eingesetzt. Zur Durchführung einer Messung kann die Bodenstation über den Bordcomputer der Messsonde einen Verstellkolben, eine Öffnung und eine Membrane steuern. Die Membrane, welche die Kammern A und B trennt, kann für Energie durchlässig gemacht werden, ist aber für Materie stets undurchlässig. Die Membrane ist entweder frei beweglich oder kann an beliebigen Positionen entlang der z-Achse arretiert werden. Der Verstellkolben kann durch den Stellmotor entlang der z-Achse bewegt werden. Die Kammer A wird auf der Erde mit Atmosphärenluft bei  $p_{A0} = 1 \text{ bar}$  und  $t_{A0} = 25 \text{ °C}$  befüllt. Die Kammer B wird zu Beginn mit einer Gasprobe der Titanatmosphäre befüllt, wobei die Arretierung fest ist. Das System ist so konstruiert, dass die Wandung stets als adiabat betrachtet werden kann. Die Luft in Kammer A und die Gasprobe in Kammer B können dabei stets als *ideale Gase* betrachtet werden. Die Bewegung von Verstellkolben und Membrane können als reibungsfrei betrachtet werden.



Stoffdaten der Erdatmosphärenluft in Kammer A: Isentropenexponent  $\kappa = 1,4$

Für das Messprogramm werden dem Bordcomputer folgende Anweisungen übermittelt:

Zustandsänderung	Öffnung	Membrane	Arretierung	Stellmotor
0 → 1	offen	undurchlässig	gelöst	aus
1 → 2	offen	durchlässig	gelöst	aus
2 → 3	geschlossen	undurchlässig	fest	ein
3 → 4	geschlossen	undurchlässig	gelöst	aus

Der Bordcomputer gibt nach Durchführung der Anweisungen folgende Daten zurück, wobei durch einen Übermittlungsfehler die letzten drei Spalten nicht übertragen werden konnten:

Zustandsänderung $i \rightarrow j$	$V_{A,j}/V_{A,i}$	$W$ in J	$V_A$ in $\text{dm}^3$	$p_A$ in bar	$T_A$ in K
$0 \rightarrow 1$	0,7605	–			
$1 \rightarrow 2$	0,2830	–			
$2 \rightarrow 3$	–	15			
$3 \rightarrow 4$	1,4845	–			

Hierbei ist  $W$  die vom Stellkolben verrichtete Volumenänderungsarbeit.

a) Stellen Sie die Zustandsänderungen 0 bis 4 in Kammer A in einem  $p, v$ -Diagramm dar. (5 P)

b) Berechnen Sie die Temperatur und den Druck auf der Titanatmosphäre. (8 P)

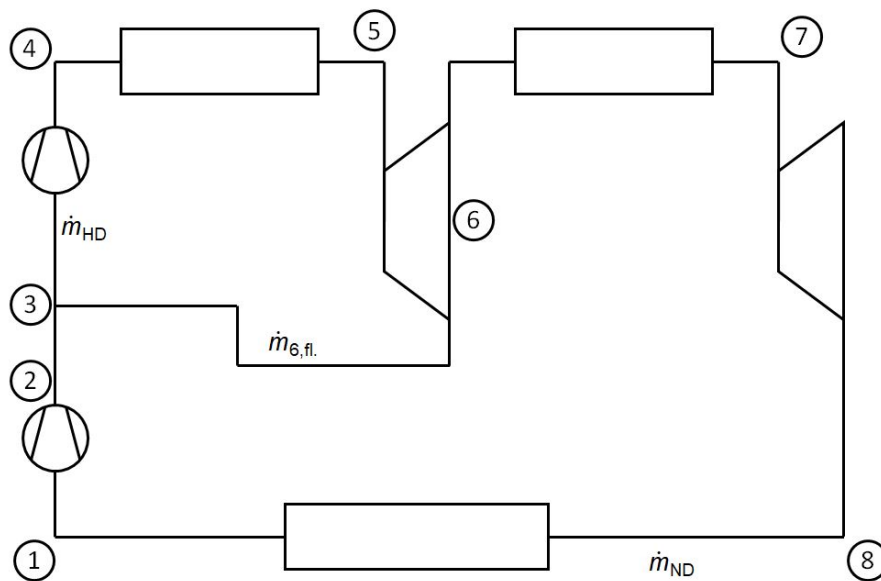
Hinweis: Überlegen Sie zunächst welcher Zustand hierfür betrachtet werden muss.

c) Beschreiben Sie qualitativ, wie sich die Temperaturen in den beiden Kammern während der Zustandsänderungen  $2 \rightarrow 3$  sowie  $3 \rightarrow 4$  jeweils ändern. (4 P)

d) Begründen Sie, ob sich die Position der Membrane verändern würde, wenn diese nach Zustand 4 für Wärme durchlässig gemacht wird. (3 P)

## Aufgabe 2 (35 Punkte)

Es soll ein Dampfkraftwerk mit zwei Turbinen und Zwischenüberhitzung betrachtet werden. Als Arbeitsmedium soll Wasser verwendet werden. Das aus dem Kondensator austretende Wasser liegt um 10 K unterkühlt bei 0,007 MPa vor (1). Es wird von einer ersten reversibel adiabaten Kesselspeisepumpe auf einem Mitteldruck von 1,5 MPa gefördert (2). In diesem Zustand wird es mit dem flüssigen Wasser der ersten Turbinenstufe vermischt (3) und anschließend in einer zweiten reversibel adiabaten Kesselspeisepumpe auf einem Druck von 240 bar gefördert (4). Auf diesem Druckniveau wird das Wasser im ersten Kessel isobar auf 580 °C erwärmt (5). Hierbei wird dem Wasser ein Wärmestrom von 1000 MW zugefügt. Die adiabate Entspannung der ersten Turbinenstufe endet im Nassdampfgebiet (6) mit einem Dampfanteil von  $x_6 = 99\%$ . An dieser Stelle wird das flüssige Wasser abgeschieden und mit dem Massenstrom des unteren Druckniveaus vermischt. Der restliche Massenstrom wird im Zwischenüberhitzer erneut auf 580 °C erwärmt (7) und in der zweiten Turbinenstufe entspannt (8). Die zweite Turbinenstufe hat einen isentropen Wirkungsgrad von 95 %. Die Umgebungstemperatur beträgt 20 °C.



- a) Stellen Sie den Prozess qualitativ richtig in einem  $T, s$ -Diagramm dar. (5 P)
- b) Welche Enthalpie hat das flüssige Wasser, das aus der ersten Turbinenstufe austritt? Wie groß ist der Massenstrom auf der Hochdruckseite der Anlage  $\dot{m}_{HD}$ ? (10 P)

Falls Sie Aufgabenteil b) nicht lösen konnten, rechnen Sie mit  $\dot{m}_{HD} = 290 \text{ kg/s}$  weiter.

- c) Wie groß ist der isentrope Wirkungsgrad der ersten Turbinenstufe? (3 P)
- d) Welchen Aggregatzustand oder Aggregatzustände hat das Wasser beim Verlassen der zweiten Turbinenstufe? Begründen Sie Ihre Antwort rechnerisch. (4 P)
- e) Bestimmen Sie den thermischen und exergetischen Wirkungsgrad des Prozesses. (13 P)

Stoffdaten Wasser:

zweiphasiger Zustand:

$t$	$p$	$\rho'$	$\rho''$	$h'$	$h''$	$s'$	$s''$
°C	MPa	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kJ/kg	kJ/kg	kJ/(kg K)	kJ/(kg K)
39,00	0,007	992,55	0,0487	163,35	2571,7	0,55903	8,2745
198,29	1,5	866,65	7,5924	844,56	2791,0	2,3143	6,4430
373,95	22,064	322,00	322,00	2146,6	2146,6	4,5033	4,5033

homogener Zustand:

$t$	$p$	$\rho$	$h$	$s$
°C	MPa	kg/m <sup>3</sup>	kJ/kg	kJ/(kg K)
29	0,007	995,90	121,56	0,42294
39	0,007	992,55	163,35	0,55903
49	0,007	0,0472	2590,9	8,3349
59	0,007	0,0458	2609,9	8,3932
69	0,007	0,0444	2628,9	8,4495
20	1,5	998,85	85,323	0,29617
30	1,5	996,27	127,10	0,43630
40	1,5	992,83	168,86	0,57182
50	1,5	988,64	210,62	0,70312
60	1,5	983,81	252,42	0,83051
580	1,5	3,8390	3650,1	7,7888
20	24	1008,9	106,26	0,29113
30	24	1006,0	147,44	0,42926
40	24	1002,4	188,66	0,56304
50	24	998,20	229,93	0,69278
60	24	993,37	271,26	0,81873
580	24	70,149	3443,4	6,3221

### Aufgabe 3 (25 Punkte)

Das Volumen einer zylinderförmigen Stahltonne (Durchmesser  $D = 50$  cm, Höhe  $H = 100$  cm) ist zu 10 % mit Wasser im Umgebungszustand ( $t_u = 20$  °C,  $p_u = 1,02$  bar) gefüllt.

Nun wird die Tonne mit dem Wasser erwärmt, bis sie komplett mit siedendem Wasser und Wasserdampf gefüllt ist. Die Tonne ist während dessen auf ihrer oberen Seite geöffnet. Gehen Sie zur Vereinfachung davon aus, dass der Wasserdampf die komplette Luft aus der Tonne verdrängt, jedoch noch kein Wasserdampf austritt.

a) Welcher Massenanteil und Volumenanteil Dampf liegen nach der Erwärmung in der Tonne vor? (4 P)

b) Wieviel Wärme muss dem Wasser hierfür zugeführt werden? (2 P)

Der Tonne soll isotherm ein Volumenstrom Dampf von  $\dot{V} = 30$  dm<sup>3</sup>/s entnommen werden.

c) Welcher Wärmestrom ist dafür erforderlich? (4 P)

d) Wie lange dauert es, bis nur noch ein halber Liter flüssiges Wasser in der Tonne ist? (4 P)

Nun wird die Tonne verschlossen. Es wird weiterhin der in c) berechnete Wärmestrom zugeführt.

e) Wie lange dauert es, bis das Wasser in der Tonne einphasig vorliegt? Welche Temperatur liegt dann vor? (6 P)

Der Wärmestrom wird gestoppt und die verschlossene Tonne kühlt auf Umgebungstemperatur ab. Die Tonne hält einem Unterdruck von  $\Delta p = 0,08$  MPa stand.

f) Wird die Tonne bei dieser Abkühlung implodieren? Begründen Sie Ihre Antwort. (1 P)

g) Skizzieren sie alle Zustandsänderungen in einem  $\log(p), \log(v)$ -Diagramm. (4 P)

Stoffdaten von Wasser befinden sich auf der nächsten Seite.

Kritischer Punkt von Wasser:  $t_c = 373,95^\circ\text{C}$ ;  $p_c = 220,64 \text{ bar}$ ;  $\rho_c = 322,2 \text{ kg/m}^3$

Wasser im Umgebungszustand:  $\rho = 998,21 \text{ kg/m}^3$ ;  $h = 84,008 \text{ kJ/kg}$ ;  $u = 83.906 \text{ kJ/kg}$

Dampf tabel Wasser:

$t$ °C	$p$ bar	$\rho'$ kg/m <sup>3</sup>	$\rho''$ kg/m <sup>3</sup>	$h'$ kJ/kg	$h''$ kJ/kg	$u'$ kJ/kg	$u''$ kJ/kg
20	0,023393	998,16	0,017314	83,914	2537,4	83,912	2402,3
40	0,073849	992,18	0,051242	167,53	2573,5	167,53	2429,4
60	0,19946	983,16	0,13043	251,18	2608,8	251,16	2455,9
80	0,47414	971,77	0,29367	335,01	2643,0	334,96	2481,6
99,606	1,0000	958,63	0,59034	417,50	2674,9	417,40	2505,6
100,0	1,0142	958,35	0,59817	419,17	2675,6	419,06	2506,0
100,16	1,0200	958,23	0,60138	419,84	2675,8	419,73	2506,2
120	1,9867	943,11	1,1221	503,81	2705,9	503,60	2528,9
140	3,6154	926,13	1,9667	589,16	2733,4	588,77	2549,6
160	6,1823	907,45	3,2596	675,47	2757,4	674,79	2567,8
180	10,028	887,00	5,1588	763,05	2777,2	761,92	2582,8
200	15,549	864,66	7,861	852,27	2792,0	850,47	2594,2