

## Thermodynamik 1

Klausur, 3. August 2009

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	14		
3	22		
Zwischensumme			
Bonuspunkte			
Summe			
Bewertung			

### Aufgabe 1 (14 Punkte):

Zur Energiespeicherung wird ein Druckgasbehälter mit einem Volumen von  $300.000 \text{ m}^3$  mit komprimiertem Erdgas (Methan) gefüllt. Dazu wird ein Turbokompressor verwendet, der das Gas kontinuierlich verdichtet und in den Druckgasbehälter fördert. Das zur Befüllung verwendete Gas wird einer Gasleitung entnommen, in der eine Temperatur von  $t_1 = 10 \text{ °C}$  und ein Druck von  $p_1 = 5 \text{ bar}$  herrscht. Zu Beginn des Befüllungsvorgangs ist das Volumen des Druckgasbehälters bereits mit Methan bei Leitungsdruck  $p_1$  und Leitungstemperatur  $t_1$  gefüllt. Nach der Befüllung soll in dem Behälter ein Druck  $p_2 = 100 \text{ bar}$  herrschen. Kompressor und Druckgasbehälter sind wärmeisoliert. Der Befüllungsvorgang soll adiabat und reversibel durchgeführt werden.

Zu berechnen sind:

- a) Die spezifische isochore Wärmekapazität  $c_v$  und der Isentropenexponent  $\kappa$  von Methan. (2 P)
- b) Welche Temperatur  $t_2$  hat das Gas nach der Befüllung? (3 P)
- c) Welche Masse an Erdgas befindet sich nach der Befüllung im Behälter? (2 P)
- d) Welche spezifische Arbeit muss für die Kompression aufgewendet werden? (3 P)
- e) Bestimmen Sie mit der barometrischen Höhenformel für den Temperaturverlauf  $T(z) = T_E + z \cdot 30 \text{ K/km}$  die Druckdifferenz zwischen Erdboden und dem Speicher in 2000 m Tiefe. (4 P)

Methan ist als ideales Gas mit einer Molmasse von  $M = 16 \text{ kg/kmol}$  und einer isobaren Wärmekapazität von  $c_p = 2,22 \text{ kJ/kgK}$  zu betrachten.

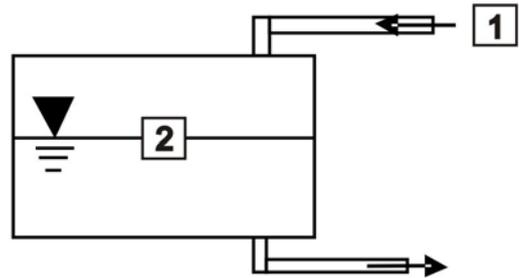
Die universelle Gaskonstante ist  $R_m = 8,3145 \text{ J/(mol K)}$ .

Erdbeschleunigung  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

In den Aufgabenteilen a) bis d) können kinetische und potenzielle Energien vernachlässigt werden.

## Aufgabe 2 (14 Punkte)

In einer chemischen Fabrik dient ein Tank mit dem Volumen  $10 \text{ m}^3$  als Puffer zwischen zwei Produktionsvorgängen. In den Tank strömt von oben ein gesättigter Dampf mit dem Volumenstrom  $\dot{V} = 20 \text{ m}^3/\text{h}$  und der Temperatur  $t_1 = 40^\circ\text{C}$  und wird am Eintritt auf den Druck  $p_2 = 0,056558 \text{ MPa}$  gedrosselt.



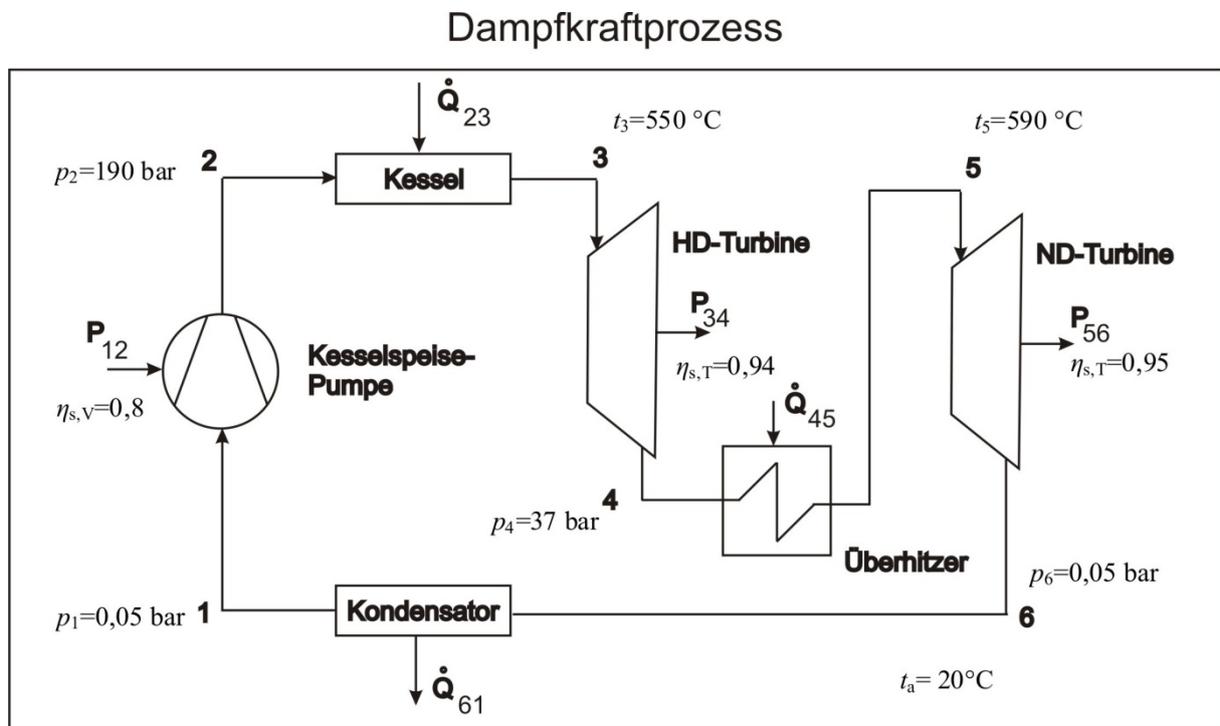
- a) Welcher Volumenstrom kann am unteren Ende bei stationären Verhältnissen als Flüssigkeit entnommen werden und welcher Wärmestrom ist dabei zu übertragen? (4 P)
- b) Bei einer Betriebsstörung im vorgeschalteten Produktionsschritt stoppt der Dampfstrom. Wie lange dauert es, bis der Füllstand von 60% des Volumens auf 10% gefallen ist, wenn der Entnahmestrom gleichbleibend ist? (4 P)
- c) Nachdem der Füllstand von 10% erreicht ist, wird der nachgeschaltete Produktionsschritt ebenfalls gestoppt. Durch Wärmeeinfall aus der Umgebung (Sonneneinstrahlung) ist der Druck auf  $p_3 = 0,15925 \text{ MPa}$  gestiegen. Welcher Füllstand liegt dann vor? Wie viel Wärme ist zugeführt worden? (4 P)
- d) Im Winter kühlt der Tank auf  $t_4 = -10^\circ\text{C}$  ab. Um eine Implosionsgefahr für den Tank zu vermeiden, muss die Druckdifferenz zum Umgebungsdruck bestimmt werden. Wie groß ist der Innendruck bei  $t_4$  und welche Masse kann der Tank dann maximal (Füllstand 100%) fassen? (2 P)

Auszug aus der Dampftafel des betrachteten Fluids:

$t$	$p$	$\rho'$	$\rho''$	$h'$	$h''$	$u'$	$u''$
$^\circ\text{C}$	MPa	$\text{kg}/\text{m}^3$	$\text{kg}/\text{m}^3$	$\text{kJ}/\text{kg}$	$\text{kJ}/\text{kg}$	$\text{kJ}/\text{kg}$	$\text{kJ}/\text{kg}$
-20	0,0090283	663,44	0,31190	-125,980	272,89	-125,990	243,94
-10	0,0151910	654,22	0,50672	-104,420	287,48	-104,440	257,50
0	0,0244480	644,87	0,78942	-82,497	302,31	-82,535	271,34
10	0,0378350	635,37	1,18570	-60,188	317,37	-60,247	285,46
20	0,0565580	625,70	1,72490	-37,459	332,65	-37,550	299,86
30	0,0819930	615,82	2,44020	-14,283	348,12	-14,416	314,52
40	0,1156700	605,70	3,36900	9,369	363,75	9,178	329,42
50	0,1592500	595,30	4,55310	33,525	379,54	33,257	344,56

### Aufgabe 3 (22 Punkte):

In einem Dampfkraftwerk durchläuft das Arbeitsmedium Wasser den folgenden Kreislauf:



Die Zustandsänderungen, denen das Arbeitsmedium Wasser unterworfen wird, sind dabei:

- 1 → 2 adiabate Druckerhöhung in der Kesselspeisepumpe mit einem Wirkungsgrad von  $\eta_{s,v} = 0,8$  vom Zustand 1 bei  $p_1 = 0,05$  bar auf den Druck  $p_2 = 190$  bar,
- 2 → 3 isobare Wärmezufuhr bis zur Temperatur  $t_3 = 550$  °C,
- 3 → 4 Entspannung in der Hochdruckturbine (HD-Turbine) mit einem Wirkungsgrad von  $\eta_{s,T} = 0,94$  auf den Druck  $p_4 = 37$  bar,
- 4 → 5 isobare Zwischenüberhitzung auf  $t_5 = 590$  °C,
- 5 → 6 Entspannung in der Niederdruckturbine (ND-Turbine) mit einem Wirkungsgrad von  $\eta_{s,T} = 0,95$  auf den Druck  $p_6 = 0,05$  bar,
- 6 → 1 isobare Wärmeabfuhr bis zur siedenden Flüssigkeit.

- a) Stellen Sie den Prozess qualitativ in einem  $T,s$ -Diagramm dar. (4 P)
- b) Wie groß ist die Leistung der ND-Turbine  $P_{56}$  für einen umlaufenden Massenstrom des Wassers von  $\dot{m}_w = 60$  kg/s? (4 P)
- c) Berechnen Sie den zugeführten Wärmestrom und den thermischen Wirkungsgrad des Kraftwerks. (6 P)
- d) Berechnen Sie den Exergieverlust im ersten Kessel 2 → 3. Die Wärme wird von den Abgasen mit  $t_{\text{Gas,ein}} = 600$  °C bereitgestellt. Beachten Sie eine minimale Temperaturdifferenz von  $\Delta T = 20$  K am Beginn der Verdampfung. ( $t_a = 20$  °C) (8 P)

Stoffdaten des Wassers:

<b>Sättigungszustände</b>					
$p$	$t_s$	$h'$	$h''$	$s'$	$s''$
bar	°C	kJ/kg	kJ/kg	kJ/(kg K)	kJ/(kg K)
0,05	32,875	137,77	2560,77	0,4763	8,3939
37,00	245,776	1065,23	2802,15	2,7548	6,1019
190,00	361,471	1776,89	2465,41	3,9396	5,0246
<b>Homogenes Fluid</b>					
$p$	$t$	$h$	$s$		
bar	°C	kJ/kg	kJ/(kg K)		
37,000	245,78	2802,15 "	6,1019 "		
37,000	250,00	2818,11	6,1326		
37,000	270,00	2884,96	6,2580		
37,000	290,00	2944,01	6,3648		
37,000	310,00	2998,68	6,4602		
37,000	590,00	3654,35	7,3821		
190,000	32,88	154,84	0,4699		
190,000	33,00	155,35	0,4716		
190,000	34,00	159,49	0,4851		
190,000	35,00	163,62	0,4985		
190,000	361,47	1776,89 '	3,9396 '		
190,000	361,47	2465,41 "	5,0246 "		
190,000	550,00	3407,31	6,3732		
' = siedende Flüssigkeit " = gesättigter Dampf					

Stoffdaten des Abgases: spezifische isobare Wärmekapazität  $c_p = 1,15 \text{ kJ}/(\text{kg K})$