

## Thermodynamik 1

Klausur

01. März 2016

Bearbeitungszeit: 150 Minuten

Umfang der Aufgabenstellung: 6 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	21		
2	33		
3	26		
Zwischensumme			
Bonuspunkte			
Summe			
Bewertung			

## Aufgabe 1 (21 Punkte)

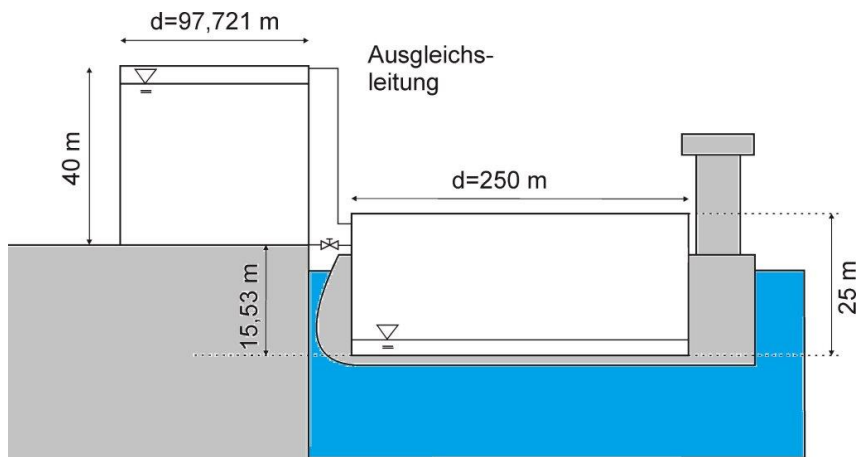
Die „MS Thermoking“, ein Transportschiff für Flüssigerdgas (**L**iquefied **N**atural **G**as), soll in einem LNG-Terminal in Qatar ( $T_a = 25^\circ\text{C}$ ) befüllt werden. Der Einfachheit halber wird angenommen, dass das Gas aus reinem Methan ( $\text{CH}_4$ ) besteht. Von der Gas-Förderstätte bis zum Verflüssiger im Terminal führt eine Pipeline. Um einen ausreichend großen Durchfluss zu gewährleisten befindet sich an der Pipeline eine Verdichterstation.

Im Rahmen dieser Aufgabe verhält sich Methan wie ein ideales Gas.

Stoffdaten:  $R = 8,31446 \text{ J}/(\text{mol K})$ ,  $M_{\text{CH}_4} = 16,04 \text{ kg}/\text{kmol}$ ,  $c_v = 1,7 \text{ kJ}/(\text{kg K})$ .

- a) Berechnen Sie den Isentropenexponenten  $\kappa$ . (2 P)
- b) In der Verdichterstation wird das Gas von  $p_1 = 80 \text{ bar}$  und  $T_1 = 30^\circ\text{C}$  auf  $p_2 = 100 \text{ bar}$  reversibel adiabat verdichtet. Die Leistung des Kompressors beträgt  $500 \text{ kW}$ . Wie groß ist der Massenstrom an Gas? (3 P)
- c) Gibt es bei einer Verdichtung andere Zustandsänderungen die bei gleicher Leistungsaufnahme und gleicher Druckerhöhung eine erhöhte Fördermenge erlauben (im Vergleich zu b)? Welche sind das und was wäre dafür technisch zwingend notwendig? (3 P)
- d) Auf der Strecke von der Verdichterstation bis zum Terminal (2 nach 3) sinkt der Druck um  $10 \%$ , während das spezifische Volumen um  $6 \%$  steigt. Berechnen Sie den Polytropenexponenten. Welche Temperatur  $T_3$  hat das Gas am Terminal? (5 P)
- e) Berechnen sie die spezifische Entropie- und Exergieänderung  $\Delta s_{23}$  und  $\Delta e_{23}$ . Warum sinkt die Entropie in diesem Fall? (4 P)
- f) Erläutern Sie den Unterschied zwischen einer polytropen Expansion mit  $n > \kappa$  und einer polytropen Expansion mit  $n < \kappa$  eindeutig. Zeichnen Sie beide Zustandsänderungen in ein  $p,v$ -Diagramm (ausgehend vom gleichen Zustandspunkt) und ergänzen Sie Ihre Zeichnung um eine isotherme und eine reversibel adiabate Zustandsänderung. (4 P)

## Aufgabe 2 (33 Punkte)



Skizze der Betankung vor dem Öffnen des Ventils (nicht maßstabgerecht).

Das Methan wird vor der Betankung der „MS Thermoking“ in einem zylindrischen Gasspeicher mit einem Volumen von  $3 \cdot 10^5 \text{ m}^3$  an Land zwischengelagert und liegt hier bei  $p_u = 1 \text{ bar}$  vor. Das Volumen des Speichers ist zu 95 % mit flüssigem Methan gefüllt. Der Tank des Schiffs ist quaderförmig und fasst  $2,5 \cdot 10^5 \text{ m}^3$ . Von der vorherigen Methanladung befinden sich noch Reste im Tank, die bei einem Dampfmassegehalt von  $x = 0,5$  und ebenfalls bei  $p_u = 1 \text{ bar}$  vorliegen. Die Betankung findet über eine Leitung mit einem Ventil statt, deren Volumen vernachlässigt werden kann. Die Leitung verläuft auf Bodenhöhe.

Durch das Öffnen des Ventils strömt das Methan in den Schiffstank. Der verdrängte Dampf wird über eine Ausgleichsleitung zum Gasspeicher abgeführt. Mit Hilfe von Ballasttanks wird stets ein konstanter Tiefgang eingestellt. Nach einiger Zeit strömt kein Methan mehr über und das Ventil wird geschlossen.

Weitere Maße der Tanks entnehmen Sie bitte der Skizze.

- Welche Temperatur liegt in den Tanks vor? (1 P)
- Welcher Volumenanteil liegt nach der Betankung flüssig im Schiffstank vor und welche Masse wurde eingefüllt? (16 P)

Hinweis: Nach Öffnen des Ventils bilden die beiden Behälter ein neues gemeinsames System.

Falls Sie Aufgabenteil b) nicht lösen konnten, rechnen Sie im Folgenden mit einem Dampfvolumenteil im Schiffstank von  $\omega = 0,11$  weiter.

Die „MS Thermoking“ legt nun ab. Trotz der guten Isolierung wird dem Methan ein Wärmestrom aus der Umgebung zugeführt. Um den Umgebungsdruck zu halten wird dauerhaft dampfförmiges Methan entnommen und im Kessel des Dampfturbinenprozesses verbrannt.

- c) Welche spezifische Wärme ist notwendig um das flüssige Methan in den dampfförmigen Zustand zu überführen? (2 P)

Die Fahrt bis zum Zielhafen dauert 50 Tage. Der Dampfturbinenprozess benötigt sechs Tonnen Methan pro Stunde.

- d) Um wie viel Meter sinkt der Flüssigkeitsspiegel im Tanker? (5 P)

Im Zielhafen wird der Dampfturbinenprozess abgeschaltet und kein Methan mehr entnommen. Da dem Tankinhalt weiterhin ein Wärmestrom zugeführt wird, steigt der Druck an. Ab einem Druck von 4 bar lösen Sicherheitsventile aus und das Gas wird durch Notfackeln verbrannt.

- e) Welcher Aggregatzustand liegt bei Auslösen der Sicherheitsventile vor und welche Wärme wurde bei dieser isochoren Zustandsänderung zugeführt? (9 P)

Rechnen Sie mit folgenden Stoffdaten:

Zweiphasiger Zustand von Methan

$t$	$p$	$\rho'$	$\rho''$	$h'$	$h''$
°C	bar	kg / m <sup>3</sup>	kg / m <sup>3</sup>	kJ / kg	kJ / kg
-169,41	0,50	433,69	0,9508	-27,465	497,05
-161,64	1,00	422,59	1,7946	-0,5573	510,56
-141,71	4,00	391,66	6,4792	70,931	539,40
-124,01	10,00	359,62	15,698	139,16	554,81
-95,88	30,00	286,93	53,878	269,74	539,93
-82,59	45,99	162,66	162,66	415,59	415,59

Homogener Zustand von Methan

$t$	$p$	$\rho$	$h$
°C	bar	kg / m <sup>3</sup>	kJ / kg
-166,77	1,00	430,00	-18,32
-141,91	4,00	392,00	70,20
-160,00	4,00	420,46	5,60
-150,00	4,00	405,22	40,90
-180,00	4,00	448,46	-62,91

### Aufgabe 3 (26 Punkte)

Der Antrieb des LNG-Tankers „MS Thermoking“ erfolgt über einen Dampfturbinenprozess mit dem Arbeitsmedium Wasser. Die Turbine treibt die Schiffsschraube, die Kesselspeisepumpe und einen Generator für die Bordelektrik an. Für den benötigten Wärmestrom wird das dampfförmige Methan aus den Tanks zusammen mit Schweröl in einer Brennkammer verbrannt. Der Massenstrom der Abgase beträgt  $\dot{m}_{Abgas} = 190 \text{ kg/s}$ , ihre Wärmekapazität kann vereinfacht mit  $c_{p,Abgas} = 1,31 \text{ kJ/(kg K)}$  als konstant angenommen werden. In einem nachgeschalteten Schiffskessel werden die Abgase genutzt um das Wasser mit einem Druck von 100 bar isobar zu erwärmen, verdampfen und überhitzen. Die Abgase haben eine Eingangstemperatur von 797 K und werden im Schiffskessel abgekühlt. Das Wasser tritt mit einer Temperatur von 310 K in den Schiffskessel ein und verlässt diesen mit einer Temperatur von 780 K. In der irreversiblen adiabaten Turbine ( $\eta_{s,T} = 90 \%$ ) wird das Wasser auf einen Kondensatordruck von 0,06 bar entspannt. Die Kesselspeisepumpe fördert siedendes Wasser auf den Druck von 10 MPa. Hierzu wird eine spezifische technische Arbeit von 11 kJ/kg zugeführt. Die Luft- und Wassertemperatur am Persischen Golf beträgt 25°C.

- a) Zeichnen Sie das Anlagenschema des Dampfturbinenprozesses. (2 P)
- b) Stellen Sie den Prozess in einem  $T,s$ -Diagramm und einem  $p,h$ -Diagramm dar. Kennzeichnen sie in den Diagrammen den kritischen Punkt, die Tau- und Siedelinie. (6 P)
- c) Wie groß ist der Massenstrom Dampf, der erzeugt werden kann, wenn im Schiffskessel die minimale Temperaturdifferenz zwischen Abgas und Wasser  $T_{min} = 10 \text{ K}$  betragen soll? Hinweis: Es handelt sich um einen Gegenstromwärmeübertrager. Die minimale Temperaturdifferenz tritt an dem Punkt auf, an dem das Wasser die Siedelinie erreicht.) (5 P)
- d) Bis auf welche Temperatur können die Abgase im Schiffskessel abgekühlt werden? (3 P)
- e) Wie groß ist die Nutzleistung des Dampfturbinenprozesses? (4 P)
- f) Berechnen Sie den thermischen Wirkungsgrad und den exegetischen Wirkungsgrad des Dampfturbinenprozesses. (4 P)
- g) Zeichnen sie die Temperaturverläufe beider Medien im Schiffskessel. (2 P)

Kritischer Punkt von Wasser:  $T_c = 647,1 \text{ K}$  ;  $p_c = 220,64 \text{ bar}$

$T$	$p$	$\rho'$	$\rho''$	$h'$	$h''$	$s'$	$s''$
K	MPa	kg / m <sup>3</sup>	kg / m <sup>3</sup>	kJ / kg	kJ / kg	kJ / (kg K)	kJ / (kg K)
309,31	0,006	993,59	0,042135	151,48	2566,6	0,52082	8,3290
359,08	0,06	967,99	0,36607	359,91	2652,9	1,1454	7,5311
431,98	0,6	908,59	3,1687	670,38	2756,1	1,9308	6,7592
453,03	1,0	887,13	5,1450	762,52	2777,1	2,1381	6,5850
548,73	6,0	758,00	30,818	1213,9	2784,6	3,0278	5,8901
584,15	10,0	688,42	55,463	1408,1	2725,5	3,3606	5,6160

$T$	$p$	$\rho$	$h$	$s$
K	bar	kg / m <sup>3</sup>	kJ / kg	kJ / (kg K)
280	0,06	999,86	28,801	0,10412
290	0,06	998,76	70,733	0,25126
300	0,06	996,51	112,57	0,39309
310	0,06	0,042039	2568,0	8,3333
320	0,06	0,040708	2587,1	8,3940
330	0,06	0,039461	2606,1	8,4525
340	0,06	0,038291	2625,1	8,5092
350	0,06	0,037189	2644,0	8,5641
360	0,06	0,036151	2663,0	8,6176
370	0,06	0,035169	2682,0	8,6696
380	0,06	0,034239	2701,0	8,7202
390	0,06	0,033358	2720,0	8,7696
400	0,06	0,032522	2739,0	8,8179
290	100	1003,3	80,193	0,24946
300	100	1001,0	121,73	0,39029
310	100	997,70	163,28	0,52650
580	100	699,05	1383,1	3,3177
590	100	53,019	2764,1	5,6817
760	100	31,215	3341,0	6,5549
770	100	30,650	3367,0	6,5889
780	100	30,112	3392,8	6,6222
790	100	29,598	3418,3	6,6548
800	100	29,107	3443,7	6,6867