

## Thermodynamik I

Klausur, SoSe 2024

Bearbeitungszeit: 190 Minuten  
Umfang der Aufgabenstellung: 11 nummerierte Seiten

Als Hilfsmittel zugelassen sind neben den üblichen Hilfsmitteln (Stift, Lineal, nicht-programmierbarer Taschenrechner) zwei handbeschriebene Din-A4 Blätter, die als Formelsammlung dienen können.

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.

Runden Sie Ihre Ergebnisse auf vier signifikante Nachkommastellen. Für Zahlenwerte, die **nicht im Zusammenhang mit einem angemessenen Rechenweg** stehen, werden **keine Punkte** vergeben. Falls es Ihnen in einer Teilaufgabe nicht möglich ist, Größen zu berechnen, können Sie in darauffolgenden Teilaufgaben mit sinnvoll angenommenen Werten für diese Größen weiterrechnen.

Vorname: \_\_\_\_\_

Nachname: \_\_\_\_\_

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

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

### Angaben zur Korrektur

Aufgabe	Maximale Punktzahl	Erreichte Punkte	Korrektor
1	20		
2	15		
3	20		
4	25		
5	20		
Summe:	100		
Bewertung:			

## Aufgabe 1: Kurzfragen (20 Punkte)

Beantworten Sie die folgenden Fragen. Pro Frage gibt es einen Punkt. Dieser wird nur bei vollkommen richtiger Antwort vergeben.

Bei Multiple Choice-Fragen können eine oder mehrere Antwortmöglichkeiten richtig sein. Kreuzen Sie Ihre Antwort(en) an.

Beantworten Sie Freitextfragen kurz und stichpunktartig.

Anmerkung: Nachfolgend eine beispielhafte Auswahl an Kurzfragen. In der Klausur wird es 20 Kurzfragen geben.

\_\_\_\_\_

Was ist der mathematische Zusammenhang zwischen innerer Energie  $U$  und Enthalpie  $H$ ?

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Thermodynamische Systemgrenzen sind stets physisch vorhandene Flächen.

☐ Wahr

☐ Falsch

\_\_\_\_\_

Nennen Sie zwei Prozessgrößen.

\_\_\_\_\_

---

Was trifft auf ein ideales Gas zu?

- ☐ Moleküle haben keine räumliche Ausdehnung
- ☐ Moleküle haben alle dieselbe Geschwindigkeit
- ☐ Moleküle wechselwirken nicht untereinander
- ☐ Moleküle wechselwirken mit der Wand nur durch elastischen Stoß

---

und weitere Fragen...

## Aufgabe 2 (15 Punkte)

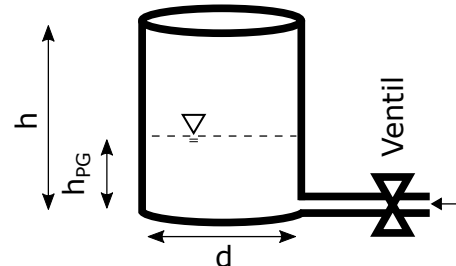
In einem Kolben-Zylinder-Systemen befindet sich  $m = 1$  kg eines idealen Gases bei  $p_1 = 8$  bar,  $T_1 = 600$  K. Nun wird das Gas zunächst reversibel adiabat auf  $v_2 = 2v_1$  expandiert, und anschließend isochor auf Zustand 3 ( $T_3 = 300$  K,  $p_3 = 2$  bar) gebracht.

Stoffdaten:  $R = 0.28$  kJ/(kg K),  $c_v = 0.56$  kJ/(kg K),  $\kappa = 1.5$

- a) Geben Sie das spezifische Volumen in allen drei Zuständen an. [1 P]
- b) Berechnen Sie die Temperatur und den Druck in Zustand 2. [2 P]
- c) Zeichnen Sie die Prozessführungen qualitativ richtig in einem  $p$ - $v$ -Diagramm. Zeichnen Sie dabei auch die vom System verrichtete spezifische Volumenänderungsarbeit ein. [2.5 P]
- d) Berechnen Sie für beide Prozessschritte jeweils die Volumenänderungsarbeit. [4.5 P]  
Wie viel Wärme nimmt das System in den beiden Prozessschritten auf?
- e) Die Expansion von  $v_1$  auf  $v_2$  könnte auch isotherm oder isobar realisiert werden. Welche Prozessführung (reversibel adiabat→isochor, isotherm→isochor, oder isobar→isochor) sollte gewählt werden, um möglichst viel Arbeit zu gewinnen? Welche Variante wäre die schlechteste? [2 P]  
Begründen Sie!
- f) Wie groß ist die Änderung der Entropie im System ( $\Delta S_{12}$  und  $\Delta S_{23}$ ) in den beiden Prozessschritten? [2 P]
- g) Bei welcher der Prozessführungen aus (e) wäre die Gesamtänderung der Entropie im System für den Gesamtprozess ( $\Delta S_{13}$ ) am kleinsten? Begründen Sie! [1 P]

### Aufgabe 3 (20 Punkte)

Ein zylindrischer Tank im Außenbereich einer chemischen Anlage enthält Propan in einem zweiphasigen Zustand. Der Tank hat einen Durchmesser von  $d = 2.3 \text{ m}$  und eine Höhe von  $h = 4 \text{ m}$ , siehe nebenstehende Skizze. Der Tank ist über ein Ventil, das zunächst geschlossen ist, mit der Anlage verbunden. Das Propan im Tank befindet sich in Zustand 1 im thermischen Gleichgewicht mit der Umgebung ( $T_1 = 25 \text{ °C}$ ) und hat eine Gesamtmasse von  $m_1 = 2500 \text{ kg}$ .



- a) Bestimmen Sie den Druck  $p_1$  in Zustand 1 im Tank. [0.5 P]
- b) Berechnen Sie die Gesamtdichte des Propans  $\rho_1$ , das sich in Zustand 1 im Tank befindet. [2.0 P]
- c) Auf welcher Höhe  $h_{PG,1}$  befindet sich dabei die Phasengrenze? [3.5 P]

An einem kalten Wintertag kann sich der Tank und das sich darin befindliche Propan auf eine Temperatur  $T_2 = 0 \text{ °C}$  abkühlen (Zustand 2). Die Gesamtmasse des Propans und das Volumen des Tanks ändern sich bei der Zustandsänderung  $1 \rightarrow 2$  nicht.

- d) Welcher Druck  $p_2$  herrscht dann in Zustand 2 im Tank? [0.5 P]
- e) Wie viel Wärme  $Q_{12}$  wurde bei der Zustandsänderung  $1 \rightarrow 2$  zwischen Propan und Umgebung übertragen? [7 P]

Ausgehend von Zustand 1 wird nun isotherm genau so viel flüssiges Propan entnommen, bis sich nur noch gerade gesättigter Dampf im Tank befindet (Zustand 3).

- f) Berechnen Sie die in Zustand 3 im Tank verbleibende Masse Propan  $m_3$ . [1 P]
- g) Welches Volumen  $\Delta V'_{13}$  hat das flüssige Propan, welches bei der Zustandsänderung  $1 \rightarrow 3$  entnommen wurde? [1.5 P]
- h) Zeichnen Sie die Zustandsänderungen  $1 \rightarrow 2$  und  $1 \rightarrow 3$  qualitativ in ein  $T, \rho$ -Diagramm ein. Zeichnen Sie auch die Siede- und Taulinie qualitativ ein. [4 P]

Hinweise:

- Abkürzung: PG (Phasengrenze)
- Stoffdaten sind der folgenden Tabelle zu entnehmen. Wenn nötig, interpolieren Sie linear. Verwenden Sie keine Stoffdaten aus anderen Aufgaben.
- Das Volumen der Leitung zum Ventil, das sich am untersten Punkt des Tanks befindet, ist zu vernachlässigen.

Stoffdaten Propan

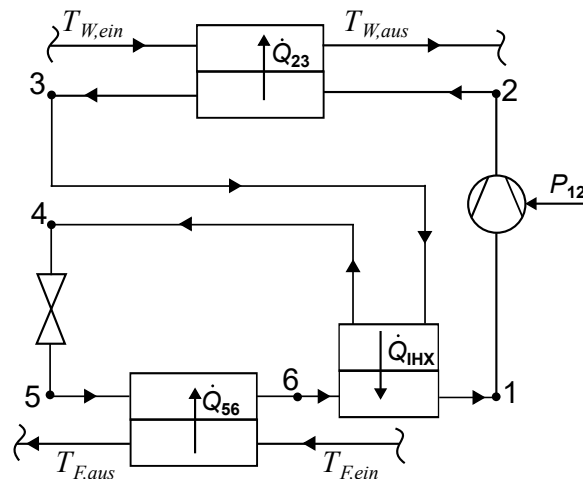
Kritische Daten Propan:  $T_{\text{crit}} = 96.7 \text{ °C}$ ;  $\rho_{\text{crit}} = 220.5 \text{ kg/m}^3$ ;  $p_{\text{crit}} = 42.5 \text{ bar}$

Zustandsgrößen auf Siede- und Taulinie

$T$ °C	$p$ bar	$\rho'$ kg/m <sup>3</sup>	$\rho''$ kg/m <sup>3</sup>	$h'$ kJ/kg	$h''$ kJ/kg	$s'$ kJ/(kg K)	$s''$ kJ/(kg K)
0	4.74	528.6	10.35	200.0	574.9	1.000	2.372
5	5.51	521.8	11.97	212.6	580.3	1.045	2.367
10	6.37	514.7	13.78	225.4	585.7	1.090	2.363
15	7.32	507.5	15.81	238.4	590.9	1.135	2.358
20	8.36	500.1	18.08	251.6	596.0	1.180	2.354
25	9.52	492.4	20.62	265.1	600.8	1.225	2.351
30	10.79	484.4	23.45	278.8	605.5	1.270	2.347
35	12.18	476.1	26.62	292.8	610.0	1.314	2.344
40	13.69	467.5	30.17	307.2	614.2	1.359	2.340

## Aufgabe 4 (25 Punkte)

Für das Fernwärmenetz Berlins soll eine neue Großwärmepumpe in Betrieb genommen werden. Pro Stunde werden 85 000 Liter Heizwasser von  $T_{W, \text{ein}} = 60^\circ\text{C}$  auf  $T_{W, \text{aus}} = 90^\circ\text{C}$  im Kondensator erwärmt. Als Wärmequelle der Wärmepumpe dient dabei das Flusswasser der Spree mit einer Temperatur von  $T_{F, \text{ein}} = 18^\circ\text{C}$ . Das Anlagenschema ist in der folgenden Skizze dargestellt:



Die Zustandsänderungen, die das Kältemittel R1234ze(Z) dabei durchläuft, sind:

- 1 → 2 Irreversible adiabate Kompression mit einem isentropen Wirkungsgrad des Verdichters von  $\eta_{SV} = 0.7$
- 2 → 3 Isobare Wärmeübertragung bis zur Siedelinie im Kondensator. Das Kältemittel kondensiert bei einer Temperatur von  $95^\circ\text{C}$
- 3 → 4 Zusätzliche isobare Unterkühlung im internen Wärmeübertrager (IHX)
- 4 → 5 Adiabate Expansion ins Nassdampfgebiet
- 5 → 6 Isobare Wärmeübertragung im Verdampfer bis zur Taulinie. Das Kältemittel verdampft bei einer Temperatur von  $10^\circ\text{C}$
- 6 → 1 Zusätzliche isobare Überhitzung um 5 K im internen Wärmeübertrager (IHX)

- a) Stellen Sie den Prozess qualitativ richtig in einem  $\log(p)$ - $h$ -Diagramm dar. Kennzeichnen Sie außerdem alle relevanten Isobaren. **[4 P]**
- b) Wie groß ist die spezifische Arbeit des Verdichters  $w_{t,12}$ ? **[7.5 P]**
- c) Bestimmen Sie die Heizleistung  $\dot{Q}_{23}$  der Wärmepumpe, sowie den Massenstrom des Kältemittels. **[5 P]**
- d) Wie groß ist der Wärmestrom  $\dot{Q}_{56}$  im Verdampfer? **[4 P]**

- e) Berechnen Sie, wie viel Wasser mindestens aus der Spree entnommen werden muss, wenn sich das Flusswasser um maximal 8 °C abkühlen soll. [2 P]
- f) Wie groß ist die Leistungszahl der Wärmepumpe? [1.5 P]
- g) Nennen Sie einen Ansatz, mit dem sich die Leistungszahl verbessern lassen könnte. [1 P]

Hinweise:

- Das Heiz- und Flusswasser kann als inkompressible Flüssigkeit mit konstanter isobarer Wärmekapazität ( $c_p = 4.2 \text{ kJ}/(\text{kg K})$ ) und konstanter Dichte ( $\rho = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ ) angenommen werden.
- Stoffdaten sind den beiden folgenden Tabellen zu entnehmen. Wenn nötig, interpolieren Sie linear.

Stoffdaten R1234ze(Z)

Kritische Daten R1234ze(Z):  $T_{\text{crit}} = 150.12 \text{ °C}$ ;  $p_{\text{crit}} = 35.306 \text{ bar}$

<b>Zweiphasiger Zustand</b>					
$T_s / \text{°C}$	$p / \text{bar}$	$h' / \text{kJ/kg}$	$h'' / \text{kJ/kg}$	$s' / \text{kJ}/(\text{kg K})$	$s'' / \text{kJ}/(\text{kg K})$
5	0.840	206.07	423.80	1.022	1.805
10	1.024	212.21	427.18	1.044	1.803
15	1.239	218.42	430.56	1.066	1.802
20	1.488	224.69	433.92	1.087	1.801
85	9.665	313.72	474.04	1.358	1.806
90	10.836	321.29	476.60	1.379	1.807
95	12.112	329.00	479.03	1.400	1.807
100	13.498	336.86	481.30	1.421	1.808



---

---

**Homogener Zustand**

---

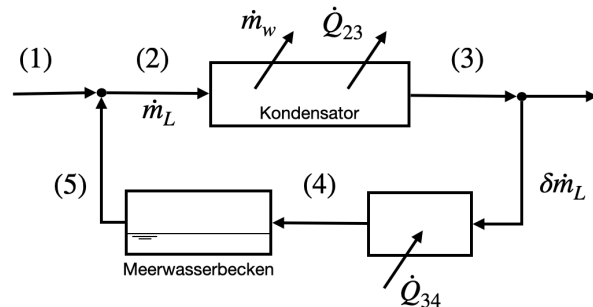
$T / ^\circ\text{C}$	$p / \text{bar}$	$h / \text{kJ/kg}$	$s / \text{kJ/(kg K)}$
15	0.840	432.12	1.834
20	0.840	436.33	1.849
25	0.840	440.58	1.863
85	0.840	494.53	2.028
90	0.840	499.28	2.041
<hr/>			
15	1.024	431.41	1.818
20	1.024	435.66	1.833
25	1.024	439.95	1.847
85	1.024	494.18	2.012
90	1.024	498.95	2.026
<hr/>			
15	10.836	218.73	1.064
20	10.836	224.98	1.085
25	10.836	231.3	1.107
90	10.836	476.6	1.807
95	10.836	482.71	1.823
<hr/>			
15	12.112	218.78	1.064
20	12.112	225.02	1.085
25	12.112	231.34	1.107
85	12.112	313.65	1.358
90	12.112	321.23	1.379
95	12.112	479.03	1.807
100	12.112	485.35	1.824

---

---

## Aufgabe 5 (20 Punkte)

Bei dem skizzierten Verfahren soll Frischwasser ( $\dot{m}_w = 100 \text{ kg/h}$ ) aus feuchter Luft durch Kondensation gewonnen werden. Dazu wird Umgebungsluft im Zustand (1) bei  $t_1 = 30 \text{ °C}$  und  $\varphi_1 = 60\%$  angesaugt und mit einem Teilmassenstrom  $\delta\dot{m}_L$  von 60% aus Zustand (5) zu dem Massenstrom  $\dot{m}_L$  im Zustand (2) vermischt. Dieser fließt dann in einen Kondensator, in dem der Wärmestrom  $\dot{Q}_{23}$  entzogen wird. Der resultierende Kondensat-Wasser-Massenstrom  $\dot{m}_w$  wird bei einer konstanten Temperatur  $t_w = t_3 = 10 \text{ °C}$  abgeschieden. Nach dem Kondensator (3) wird ein Teilmassenstrom  $\delta\dot{m}_L$  in das System zurückgeführt. Ihm wird zunächst durch Sonneneinstrahlung Wärme  $\dot{Q}_{34}$  zugeführt, so dass im Zustand (4) die Temperatur  $t_4 = 35 \text{ °C}$  erreicht wird. Der Teilmassenstrom wird dann über ein Meerwasserbecken geleitet und erreicht seine Kühlgrenztemperatur (5).



### Hinweise:

- $\dot{m}_L$  bezeichnet stets den Massenstrom trockener Luft.
- Bei der Vermischung fällt kein flüssiges Wasser aus.
- Luft und Wasserdampf können als ideale Gase betrachtet werden.
- Aufgabenteil a) ist rein rechnerisch zu lösen. Niedergeschriebene Zahlen, die nicht aus einem angemessenen Rechenweg resultieren, werden bei der Punktevergabe nicht berücksichtigt. Aus dem beiliegenden  $h_{1+x}, x$ -Diagramm abgelesene Werte dürfen nur zur Überprüfung von Rechenergebnissen genutzt werden.

- a) Berechnen Sie die Temperatur und relative Feuchtigkeit in den Zustands- [13 P]  
punkten (2)-(5).
- b) Berechnen Sie den Wärmestrom  $\dot{Q}_{23}$ , der im Kondensator abgeführt wird. [4 P]
- c) Tragen Sie alle Zustandsänderungen der feuchten Luft in das beiliegende [3 P]  
 $h_{1+x}, x$ -Diagramm ein.

### Stoffdaten

Allgemeine Gaskonstante:  $R_m = 8.314\,462\text{ J}/(\text{mol K})$

Molmassen

- Luft:  $M_L = 28.96\text{ g/mol}$
- Wasser:  $M_W = 18.02\text{ g/mol}$

Spezifische isobare Wärmekapazitäten

- Trockene Luft:  $c_{p,L} = 1.007\text{ kJ}/(\text{kg K})$
- Wasserdampf:  $c_{p,D} = 1.86\text{ kJ}/(\text{kg K})$
- Flüssiges Wasser:  $c_{p,W} = 4.19\text{ kJ}/(\text{kg K})$

Verdampfungsenthalpie von Wasser bei 0 °C:  $\Delta h_v = 2500\text{ kJ/kg}$

Dampfdruck von Wasser:  $\ln(p/\text{mbar}) = 18.9141 - 4010.823/(t/^\circ\text{C} + 234.4623)$

Gesamtdruck in der Umgebung:  $p = 1.013\,25\text{ bar}$

Kühlgrenztemperatur  $t_{kgr}/^\circ\text{C}$  eines Luftstroms mit Temperatur  $t$  und relativer Feuchte  $\varphi$ :

$$t_{kgr}(t, \varphi) = t/^\circ\text{C} + 20^\circ\text{C} \cdot (\varphi - 1)$$