

Raum E415

PRÜFUNGSKLAUSUR

Thermodynamik I

26. Juli 2017

(Name, Vorname)

(Matrikelnummer)

1. Aufgabe _____

2. Aufgabe _____

3. Aufgabe _____

4. Aufgabe _____

Gegebenenfalls bitte streichen:

Mit der Bekanntgabe meiner Klausurnote durch

Aushang unter meiner Matrikelnummer bin ich

einverstanden.

Summe:

Note:

PRÜFUNGSKLAUSUR

Thermodynamik I

26. Juli 2017

Die Bearbeitungsdauer der folgenden Aufgaben beträgt 20 Minuten für die zunächst ausgegebenen Kurzfragen (Aufgabe 1) und 70 Minuten für die anschließend verteilten Berechnungsaufgaben (Aufgaben 2-4).

Für die Bearbeitung des Kurzfragenteils sind **keine** Hilfsmittel zugelassen. Für die Bearbeitung der Berechnungsaufgaben dürfen nicht-programmierbare Taschenrechner (keine Laptops, Mobiltelefone o.ä.), die Formelsammlung und Skripte des Instituts mit eigenen Bearbeitungsvermerken, Lehrbücher sowie eigene Aufzeichnungen (gebunden oder geheftet) benutzt werden. Die mit Bleistift, rotem und grünem Stift sowie mit Korrekturfolien und –flüssigkeiten bearbeiteten Aufgabenteile werden nicht bewertet.

Bei den einzelnen Aufgaben ist die Zahl der Punkte, z.B. (5) = 5 Punkte, angegeben, mit der die vollständige und richtige Lösung bewertet wird. Die Summe der Punkte aller Aufgaben dieser Klausur beträgt 59. Mit 50 Punkten ist mit Sicherheit eine sehr gute Note erreichbar, d.h. es handelt sich um eine Auswahlklausur. Die Reihenfolge der Aufgaben richtet sich nach den Sachgebieten und nicht nach dem Schwierigkeitsgrad. Es wird empfohlen, mit einfach erscheinenden Aufgaben zu beginnen und die Bearbeitung einer Aufgabe zugunsten der Lösung einer anderen abzubrechen, wenn besondere Schwierigkeiten auftreten. Es wird darauf hingewiesen, dass zur vollständigen Lösung einer Aufgabe sowohl die nachvollziehbare Darstellung des Lösungsweges als auch die numerische Berechnung der gesuchten Größen gehört. Die Angabe des Lösungsweges oder des Endergebnisses allein wird nicht mit der vollen Punktzahl bewertet.

Bitte bearbeiten Sie jede Aufgabe auf jeweils einem neuen Blatt!

Bitte versehen Sie jedes Blatt mit Ihrem Namen und Ihrer Matrikelnummer!

Bitte lassen Sie einen Heft- und Korrekturrand und schreiben Sie leserlich!

Für die Bearbeitung müssen dokumentenechte Stifte verwendet werden!

Das Thermo-Team wünscht Ihnen guten Erfolg!

Aufgabe 1**(14 Punkte)**

Bearbeiten Sie folgende unabhängige Kurzfragen.

- a)** Skizzieren Sie im p,v -Diagramm den Verlauf einer Isothermen, die durch eine kubische Zustandsgleichung ermittelt wird, für den gesamten fluiden Bereich. Kennzeichnen Sie die zugehörigen Aggregatzustände im Diagramm. Benennen Sie zwei vereinfachende Modellfluide und deren zugehörige Berechnungsgleichung. Schraffieren Sie deren jeweiligen Gültigkeitsbereich im Diagramm. (3)

- b)** Zeichnen Sie die Dampfdruckkurve eines Reinstoffes mit ihren Grenzen in ein geeignetes Diagramm ein. Kennzeichnen Sie beispielhaft den Zustand der Verdampfung und der Kondensation eines einfachen Kältekreisprozesses, wenn dieser Reinstoff das Kältemittel des Prozesses ist. Markieren Sie zusätzlich die Umgebungstemperatur im Diagramm. (3)

c) Betrachten Sie ein geschlossenes System, in dem ein stationärer Prozess abläuft. Es wird kontinuierlich ein Wärmestrom \dot{Q}_{ab} bei einer mittleren thermodynamischen Temperatur $T_{m,ab}$ abgeführt und eine Leistung P_{zu} zugeführt. Überprüfen Sie mit Hilfe der allgemeinen Form der thermodynamischen Hauptsätze, ob dieser Prozess möglich ist. (2)

d) In einem adiabaten geschlossenen Kalorimeter befindet sich eine inkompressible Probenflüssigkeit ($m = 200 \text{ g}$, $c = 4 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$), der eine konstante Heizleistung von 100 W zugeführt wird. Nach welcher Zeit hat die Probenflüssigkeit eine Temperaturerhöhung von 20 K erfahren? (2)

- e) Am Eintritt einer perfekt isolierten Rohrleitung strömt stationär gesättigter Wasserdampf ein.
- A) Kennzeichnen Sie in einem T,s -Diagramm die Austrittszustände, die von diesem Eintrittszustand aus möglich sind. Begründen Sie ihre Darstellung mit einer Entropiebilanz.
 - B) In welchen Zuständen (flüssig, gasförmig, zweiphasig) kann das Fluid aus der Rohrleitung austreten?
 - C) Stellen Sie die Energiebilanz für das System „Rohrleitung“ auf. (4)

PRÜFUNGSKLAUSUR

Thermodynamik I

26. Juli 2017

Teil 2: Berechnungsaufgaben

(Name, Vorname)

(Matrikelnummer)

Aufgabe 2

(15 Punkte)

In einem geschlossenen Kolben-Zylinder-Behälter (variables Volumen bei konstantem Druck) befinden sich $m = 5 \text{ kg}$ eines reinen Fluids. Im Anfangszustand befindet sich das Fluid als trocken gesättigter Dampf (Taulinie) bei $T_1 = T^S = 300 \text{ K}$. Kinetische und potentielle Energien können vernachlässigt werden.

- a) Es wird dem Fluid eine Wärmeenergie von $Q_{12} = 30 \text{ kJ}$ zugeführt. In welchem Zustand (T_2, p_2 , Aggregatzustand) befindet sich das Fluid nach der Wärmezufuhr? (4)
- b) Es wird dem Fluid, vom Ausgangszustand 1 aus, eine Wärmeenergie $Q_{13} = -300 \text{ kJ}$ entzogen. In welchem Zustand (T_3, p_3 , Dampfgehalt x_3) befindet sich das Fluid jetzt? (4)
- c) Bestimmen Sie die erzeugte Entropie $S_{\text{irr},13}$, wenn Q_{13} bei der Siedetemperatur T^S abgeführt wird. (3)
- d) Zeichnen Sie die Zustandsänderungen 1-2 und 1-3 in ein T, s -Diagramm, ein p, v -Diagramm und ein p, T -Diagramm des Fluids ein. Schraffieren Sie für die beiden Zustandsänderungen jeweils die Summe aus spezifischer dissipierter Energie und spezifischer Wärmeenergien im T, s -Diagramm. (4)

Stoffdaten des reinen Fluids:

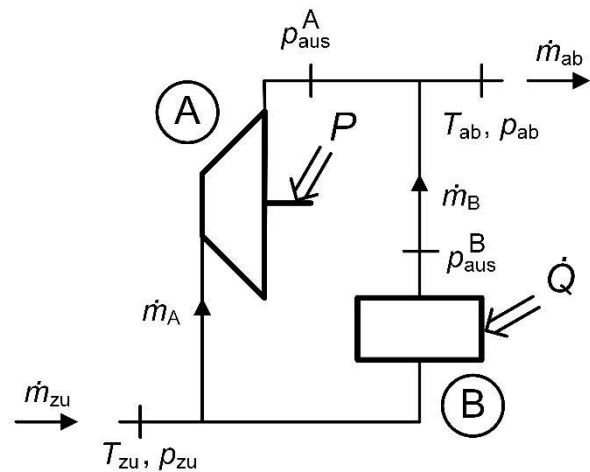
T in K	p in MPa	ρ in kg/m^3	h in kJ/kg	s in $\text{kJ}/(\text{kg K})$
310	0,703	32,24	423,50	1,749

T in K	p in MPa	ρ' in kg/m^3	ρ'' in kg/m^3	h' in kJ/kg	h'' in kJ/kg	s' in $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	s'' in $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
300	0,703	1199,70	34,19	237,19	413,27	1,129	1,716

Aufgabe 3

(14 Punkte)

Es wird eine adiabate Turbine A und ein reversibler Gaskühler B betrachtet, die in einem Rohrleitungssystem gemäß nebenstehender Skizze eingebunden sind. Im stationären Betrieb wird der Anlage der gasförmige Massenstrom $\dot{m}_{zu} = 2,5 \text{ t/h}$ bei $p_{zu} = 4 \text{ bar}$ und $T_{zu} = 800 \text{ K}$ zugeführt. Der Gasstrom verlässt die Anlage bei $p_{ab} = 1 \text{ bar}$ und $s_{ab} = 7,1 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$. Alle Rohrleitungen



sind adiabat und reibungsfrei. Im stationären Betrieb beträgt der Wärmestrom des Gaskühlers $\dot{Q} = -210 \text{ kW}$ und wird bei einer mittleren Temperatur von $T_m = 700 \text{ K}$ übertragen. Für den Austrittsdruck aus der Turbine und dem Gaskühler gilt: $p_{aus}^A = p_{aus}^B = p_{ab}$. Das Teilmassenstromverhältnis beträgt $\dot{m}_A/\dot{m}_{zu} = 0,3$. Kinetische und potentielle Energien können vernachlässigt werden.

- Berechnen Sie die Temperatur T_{ab} am Austritt. (1)
- Berechnen Sie die Austrittstemperatur aus Turbine T_{aus}^A und Gaskühler T_{aus}^B . (6)
- Berechnen Sie die Entropieproduktionsrate der Turbine $\dot{S}_{irr,A}$ und interpretieren Sie das Ergebnis. (3)
- Berechnen Sie die Wellenleistung der Turbine P^{iG} mit den gegebenen Werten unter der Annahme, dass es sich um ein ideales Gas ($R_{Gas} = 296,8 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ und $c_p^{iG} = konst.$) handelt. (4)

Stoffdaten des Gases:

p in bar	T in K	s in $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
4	800	7,478
1	300	6,846
1	400	7,146
1	500	7,380
1	600	7,574
1	700	7,741
1	800	7,890

Aufgabe 4

(16 Punkte)

Für eine reine Substanz ($M = 46,07 \text{ kg/kmol}$) sind einige Werte aus der Dampftafel unten angegeben. Die Substanz liegt derzeit in einem gasförmigen Zustand bei $\vartheta = 110^\circ\text{C}$ und $p = 3 \text{ bar}$ vor.

- Berechnen Sie den zweiten Virialkoeffizienten dieser Substanz im gegebenen Zustand. (3)
- Berechnen Sie in erster Näherung die spezifische isobare Wärmekapazität dieses Gases in diesem Temperatur- und Druckbereich. (2)
- Zeichnen Sie den gasförmigen Zustand und die gegebenen Punkte der Dampfdruckkurve in ein p, T -Diagramm ein. Nennen Sie drei Zustandsänderungen, die diese Substanz in einen flüssigen Zustand überführen können. (4)
- Berechnen Sie anhand der Tabellenwerte die Verdampfungsenthalpie der Substanz bei dem Druck des gegebenen gasförmigen Zustands. (3)
- Die Substanz erfährt eine isentrope Temperaturerhöhung um $\Delta T_{12} = 10 \text{ K}$ aus dem gegebenen Gaszustand heraus.
 - Berechnen Sie für diese Zustandsänderung mit der Annahme ideales Gas das arithmetisch gemittelte spezifische Volumen $\bar{v} = (v_1 + v_2)/2$.
Hinweis: Verwenden Sie die entropische Zustandsgleichung und das in Aufgabenteil b) berechnete Ergebnis.
 - Berechnen Sie anhand der Fundamentalgleichung $dh = Tds + vdp$ die Druckänderung Δp mit dem gemittelten spezifischen Volumen \bar{v} . (4)

Ausschnitt aus der Dampftafel für die Substanz:

	ϑ in $^\circ\text{C}$	p in bar	ρ in kg/m^3	h in kJ/kg	s in $\text{kJ}/(\text{kg K})$
A	110	2	3,02	897,52	2,429
B	110	3	4,64	889,73	2,339
C	120	2	2,93	916,24	2,477
D	120	3	4,48	909,32	2,390

	ϑ in $^\circ\text{C}$	p in bar	ρ' in kg/m^3	ρ'' in kg/m^3	h' in kJ/kg	h'' in kJ/kg	s' in $\text{kJ}/(\text{kg K})$	s'' in $\text{kJ}/(\text{kg K})$
E	100	2,24	714,02	3,52	65,90	876,83	0,181	2,355
F	110	3,13	702,75	4,85	98,30	888,72	0,267	2,330
G	242	62,68	273,19	273,19	758,74	758,74	1,680	1,680

Aufgabe 1

(14 Punkte)

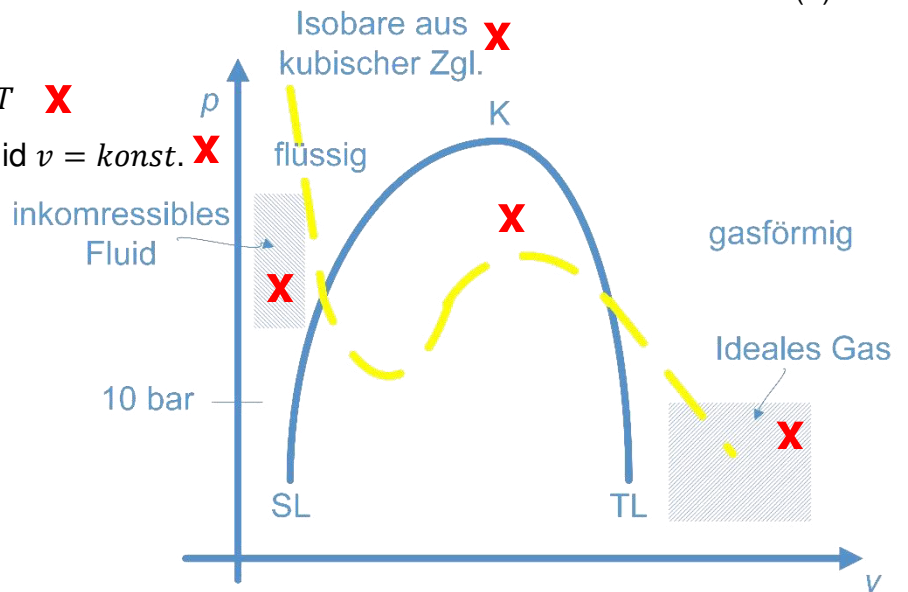
Bearbeiten Sie folgende unabhängige Kurzfragen.

a) (3)

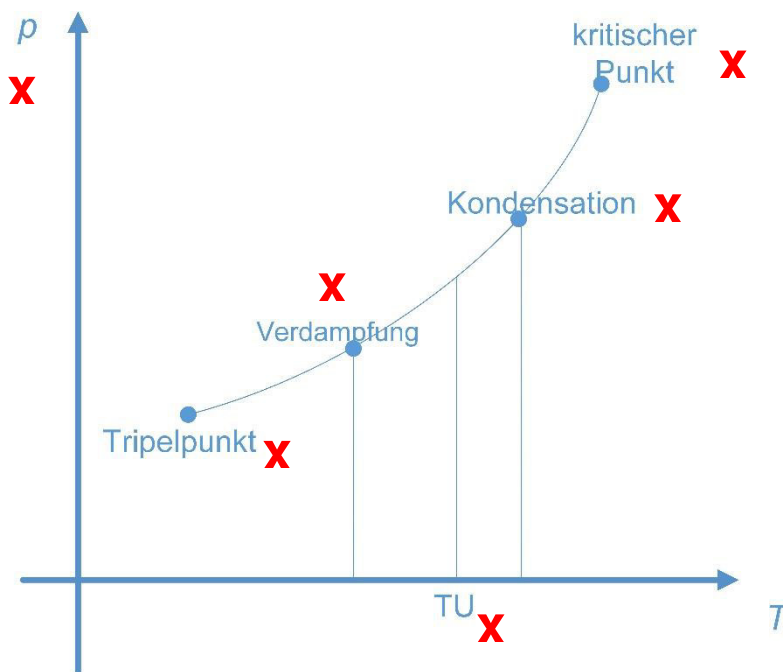
Modellfluide:

Ideales Gas $pv = RT$ **X**

Inkompressibles Fluid $v = konst.$ **X**



b) (3)



c)

(2)

1. HS: $\frac{dE}{dt} = \dot{Q}_{ab} + P_{zu} \stackrel{\text{X}}{=} 0$, ist OK, da $\dot{Q}_{ab} < 0$ und $P_{zu} > 0$ **X**

2. HS: $\frac{dS}{dt} = \frac{\dot{Q}_{ab}}{T_{m,ab}} + \dot{S}_{irr} \stackrel{\text{X}}{=} 0$, ist OK, da $\frac{\dot{Q}_{ab}}{T_{m,ab}} < 0$ und $\dot{S}_{irr} > 0$ **X**

d)

(2)

Zeit: $\Delta t = \frac{c \cdot m \cdot \Delta T}{P} \stackrel{\text{X X}}{=} \frac{4000 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 0,2 \text{ kg} \cdot 20 \text{ K}}{100 \text{ W}} = 160 \text{ s}$ **X X**

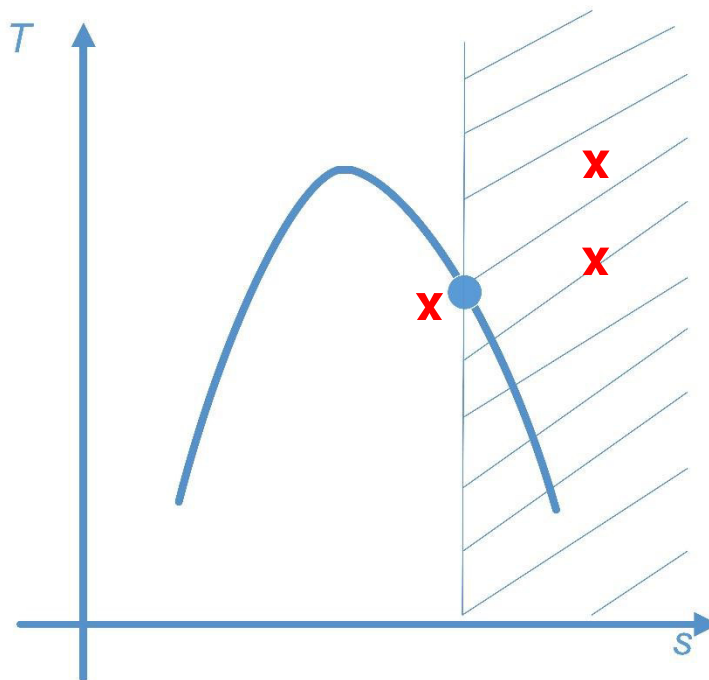
e)

(4)

A) 2.HS: $\dot{S}_{irr} = s_2 - s_1 > 0$ **X**

B) gasförmig und zweiphasig **X X**

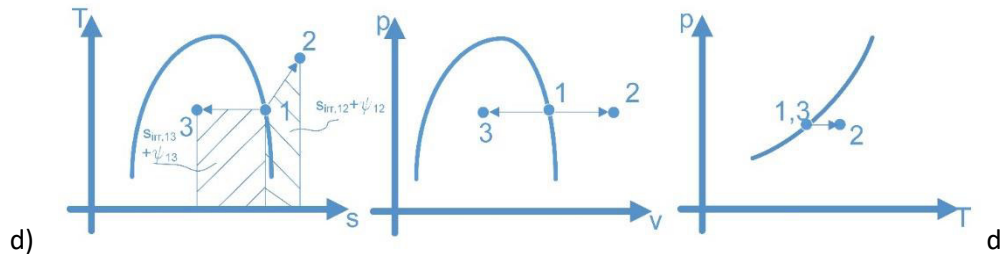
C) $\frac{dE}{dt} = 0 = \dot{m}_e \left(h_e + \frac{w_e^2}{2} + gz_e \right) - \dot{m}_a \left(h_a + \frac{w_a^2}{2} + gz_a \right)$ **X X**



Kurzlösung:

A2

- $T_2 = 305,87 \text{ K}, p_2 = 0,7028 \text{ MPa}$, gasförmig
- $T_3 = 300 \text{ K}, p_3 = 0,7028 \text{ MPa}, x_3 = 0,659$
- $S_{irr,13} = 0 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$

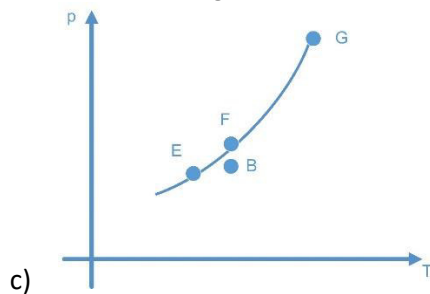


A3

- $T_{ab} = 384,67 \text{ K}$
- $T_{aus}^A = 650,30 \text{ K}, T_{aus}^B = 305,00 \text{ K}$
- $\dot{S}_{irr,A} = 37,5 \frac{\text{W}}{\text{K}} > 0 \rightarrow$ Turbine arbeitet nicht reversibel!
- $P^{iG} = -34,84 \text{ kW}$

A4

- $B = -6,4548 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{mol}}$
- $c_p = 1,959 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$



- isenthalpe Kompression, isobare Kühlung / Temperatur senken, isotherme Kompression / Druck erhöhen
- $\Delta h_V = 793,41 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
- $\bar{v} = 0,1913 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$
 - $\Delta p = 0,102 \text{ bar}$