

PRÜFUNGSKLAUSUR

Thermodynamik I

16. Februar 2016

(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

16. Februar 2016

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.

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 62. 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 abubrechen, 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!

Aufgabe 1

(15 Punkte)

Bearbeiten Sie folgende unabhängige Kurzfragen.

- a) Die allgemeine Bilanzgleichung einer extensiven (mengenartigen) Zustandsgröße Z lautet:

$$\frac{dZ}{dt} = \sum \dot{Z}_{ein} - \sum \dot{Z}_{aus} + \dot{Z}_{Quelle} - \dot{Z}_{Senke}$$

Wie lauten die einzelnen Terme im Fall der allgemeinen Energie- und Entropiebilanz? (5,5)

Energiebilanz	Entropiebilanz
$dZ/dt =$	$dZ/dt =$
$\sum \dot{Z}_{ein} - \sum \dot{Z}_{aus} =$	$\sum \dot{Z}_{ein} - \sum \dot{Z}_{aus} =$
$\dot{Z}_{Quelle} =$	$\dot{Z}_{Quelle} =$
$\dot{Z}_{Senke} =$	$\dot{Z}_{Senke} =$

- b) Was versteht man unter dem thermischen Gleichgewicht? (1)

- c) Betrachtet werden zwei offene Behälter der Höhe $z = 1,5$ m. Der erste wird mit Wasser ($\rho_W = 1000 \text{ kg/m}^3$), der zweite mit Ethanol ($\rho_E = 800 \text{ kg/m}^3$) jeweils bis zum Rand gefüllt. In welchem Fall ist der Druck auf dem Boden des Behälters größer? Antworten Sie, indem Sie die jeweiligen Drücke am Behälterboden berechnen.

Hinweis: $g = 10 \text{ m/s}^2$, $p_U = 1 \text{ bar}$ (2)

- d) Zeigen Sie anhand der allgemeinen kalorischen Zustandsgleichung:

$$u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_v dT + \int_{v_1}^{v_2} \left[T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - p \right] dv,$$

dass die innere Energie eines idealen Gases unabhängig vom spezifischen Volumen v ist. (2)

- e) Die Zahl der Ameisen auf der Welt wird mit $6 \cdot 10^{15}$ abgeschätzt. Betrachten Sie eine Ameise als ein Teilchen und berechnen Sie diese Zahl (gerundet) in mol. Wie groß ist die molare Masse einer Ameise, wenn ihr durchschnittliches Gewicht 5 mg beträgt? (2,5)

- f) Was versteht man unter dem Begriff „kritische Opaleszenz“? Zeichnen Sie eine Zustandsänderung in ein p,v -Diagramm ein, bei der dieses Phänomen zu beobachten ist. Nennen Sie den physikalischen Grund für dieses Phänomen. (2)

--	--	--

PRÜFUNGSKLAUSUR

Thermodynamik I

16. Februar 2016

Teil 2: Berechnungsaufgaben

(Name, Vorname)

(Matrikelnummer)

Aufgabe 2

(16 Punkte)

Gegeben sind die Zustandspunkte A bis D in Tabelle 1, die jeweils auf der Dampfdruckkurve eines Reinstoffs ($R_i = 56 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$) liegen. Ferner sind der Tripel- und der kritische Punkt sowie weitere Stoffdaten dieses Reinstoffes bei 260 K und 280 K (Tabelle 2 und 3) angegeben.

- a) Zeichnen Sie den durch $p_1 = 20 \text{ bar}$ und $T_1 = 260 \text{ K}$ gekennzeichneten Zustand ① in ein maßstäbliches p,T -Diagramm des Reinstoffes ein. Nutzen Sie dafür das p,T -Diagramm auf Seite 4. In welchem Aggregatzustand befindet sich der Reinstoff im Zustand ①? (2)
- b) Skizzieren Sie im p,T -Diagramm qualitativ die Schmelzdrucklinie des Reinstoffes, welcher keine Anomalie aufweist. Tragen Sie eine Zustandsänderung ① \rightarrow ③ in das p,T -Diagramm ein, die von Zustand ① in einen festen Aggregatzustand ③ führt. Wie realisieren Sie eine derartige Zustandsänderung? Welche Energieformen müssen Sie dem Stoff hierzu zuführen bzw. abführen? (2)
- c) Schraffieren Sie in dem p,T -Diagramm den Bereich, in welchem sich der Stoff in guter Näherung wie ein ideales Gas verhält. Begründen Sie, warum es zulässig ist, in diesem Bereich mit dem idealen Gasgesetz zu rechnen. (2,5)
- d) Es wird eine isotherme Zustandsänderung, ausgehend von Zustand ①, auf den Druck $p_2 = 10 \text{ Pa}$ betrachtet. Tragen Sie die Zustandsänderung ① \rightarrow ② in das p,T -Diagramm ein. Wie realisieren Sie eine solche Zustandsänderung für ein geschlossenes System? (1,5)

e) Berechnen Sie die Änderung der spezifischen inneren Energie des Reinstoffes bei einer Zustandsänderung ① → ②. Der gasförmige Aggregatzustand darf hierbei als ideales Gas angenähert werden. (3)

f) Berechnen Sie die für die Zustandsänderung ① → ② notwendige massenspezifische Wärme q_{12} und massenspezifische Arbeit w_{12}^V für ein geschlossenes System, wenn diese Zustandsänderung reversibel verläuft. (5)

Tabelle 1: Zustandspunkte A bis D, Tripelpunkt und kritischer Punkt

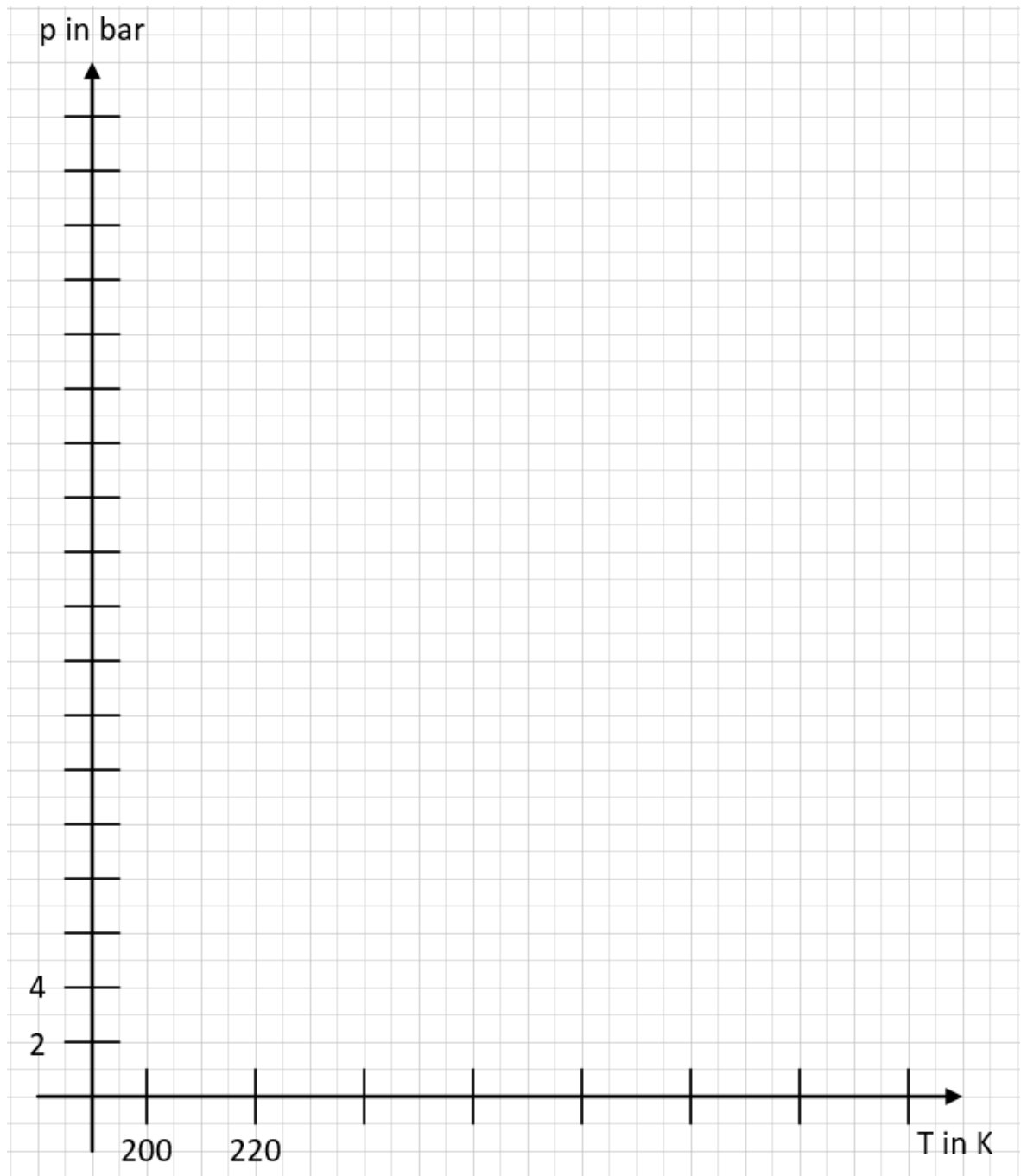
	Tripelpunkt	A	B	C	D	krit. Punkt
T^S in K	220	240	260	280	300	320
p^S in bar	2,3	4,4	8,5	15	25	35
v' in dm ³ /kg		5,6	6,0	6,6	7,5	1,36
v'' in dm ³ /kg		27,6	17,1	7,7	4,1	
h' in kJ/kg		168	187	207	230	
h'' in kJ/kg		270	280	286	289	
s' in J/(kg · K)		880	950	1020	1100	
s'' in J/(kg · K)		1310	1308	1306	1300	

Tabelle 2: Stoffdaten bei 260 K

p in bar	10	15	20
u in kJ/kg	183	184	185
h in kJ/kg	188	189	190
s in J/(kg · K)	952	950	948

Tabelle 3: Stoffdaten bei 280 K

p in bar	20	25	30
u in kJ/kg	193	195	197
h in kJ/kg	207	210	212
s in J/(kg · K)	1024	1021	1019



p, T -Diagramm

Aufgabe 3

(14 Punkte)

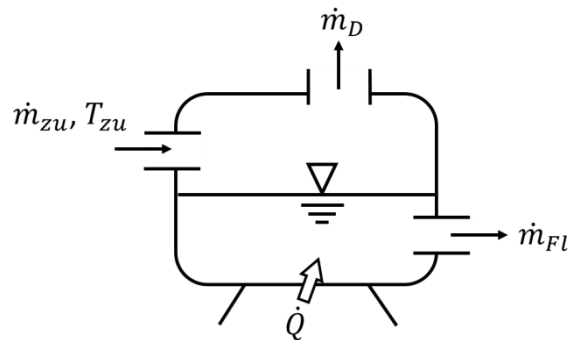
Es wird eine gekühlte Drosselstelle betrachtet. Durch diese strömt stationär ein Gas ($R_i = 200 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$) mit einem Massenstrom $\dot{m} = 0,1 \text{ kg/s}$. Der Eintrittszustand ist durch $p_1 = 6,2 \text{ bar}$; $T_1 = 1000 \text{ °C}$ gekennzeichnet. Die Kühlung erfolgt mit einem Wärmestrom $\dot{Q} = -300 \text{ kW}$. Das Gas kann als ideal mit $c_p = 5,4 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) = \text{konst.}$ angenähert werden. Kinetische und potentielle Energien sind zu vernachlässigen.

- a) Berechnen Sie die Austrittstemperatur T_2 . (2)
- b) Berechnen Sie den Austrittsdruck p_2 , wenn sich die Dichte nach der Drosselstelle halbiert hat ($\rho_2 = \rho_1/2$). (2)
- c) Zeichnen Sie die Zustände vor und nach der Drosselstelle qualitativ in ein p,v -Diagramm für das Gas ein. Zeichnen Sie beide Isothermen für T_1 und T_2 sowie die Zustandsänderung ein. (1,5)
- d) Zeigen Sie mithilfe der Hauptsätze der Thermodynamik, dass die Zustandsänderung ① \rightarrow ② reversibel verläuft, wenn die Wärmeübertragung bei der thermodynamischen Mitteltemperatur $T_{m,12}$ erfolgt. Wie groß ist in diesem Fall die Temperatur $T_{m,12}$? (4,5)
- e) Betrachten Sie eine adiabate Turbine im stationären Betrieb. Welche Leistung könnte die Turbine bereitstellen, wenn Gas im Zustand ① zuströmt und die Turbine im Zustand ② verlässt? (1)
- f) Berechnen Sie den Austrittszustand T_3 ; p_3 , wenn die Drossel nicht gekühlt (also adiabatisch) wäre und wenn sich die Dichte nach der Drosselstelle ebenfalls halbiert hat. Zeichnen Sie die Zustandsänderung in das p,v -Diagramm aus Aufgabenteil c) ein. (3)

Aufgabe 4

(17 Punkte)

Einem Druckbehälter wird stationär Ammoniak-Nassdampf bei $T_{zu} = 90\text{ °C}$ zugeführt (vgl. Bild rechts). Abgeführt wird siedende Flüssigkeit (Index Fl) und trocken gesättigter Dampf (Index D). Der zugehende Massenstrom ist



$\dot{m}_{zu} = 2,6\text{ kg/s}$ und seine spezifische Enthalpie beträgt $h_{zu} = 1010\text{ kJ/kg}$. Gegeben ist der untenstehende Auszug der Dampftafel für Ammoniak. Kinetische und potentielle Energien sind zu vernachlässigen.

- Der Behälter wird adiabatisch und isobar bei $p = p_{zu}$ betrieben. Bestimmen Sie den Dampfgehalt x_{zu} des zuströmenden Dampfes. (4)
- Der Behälter wird mit $\dot{Q} = 250\text{ kW}$ beheizt. Der Druck und der Zufluss bleiben unverändert. Berechnen Sie die Massenströme des ausströmenden Dampfes \dot{m}_D und der ausströmenden Flüssigkeit \dot{m}_{Fl} . (2)
- Der Ammoniak-Nassdampf strömt unverändert in den Behälter, der nun adiabatisch und bei einem Druck $p = 38,6\text{ bar}$ betrieben wird. Berechnen Sie den Dampfgehalt in dem Behälter. (1)
- Berechnen Sie die Entropieerzeugungsrate im Behälter unter den Bedingungen von Aufgabenteil c). Wenn Sie keinen Wert bei Aufgabenteil a) erhalten haben, rechnen Sie mit $x_{zu}^* = 0,15$. (5)
- Zeichnen Sie qualitativ die Zustandsänderungen aus den Aufgabenteilen b) und c) in ein p,v -Diagramm und ein T,s -Diagramm für Ammoniak ein. Kennzeichnen Sie dabei die Zustände der zu- und ausströmenden Massenströme und des Nassdampfes im Behälter. Für

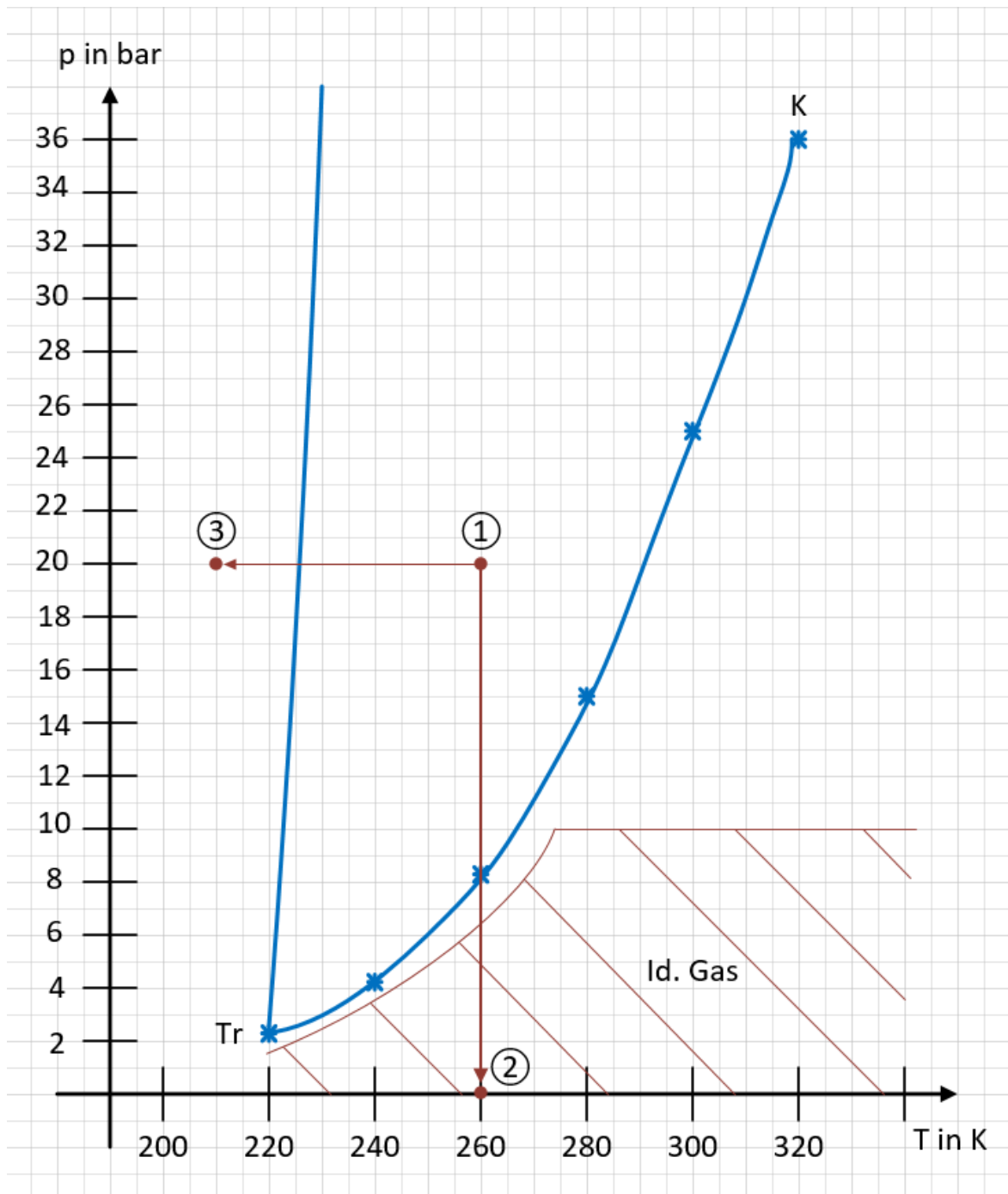
eine eindeutige Darstellung der Zustandsänderungen zeichnen Sie die relevanten Isothermen in das p,v -Diagramm und Isobaren in das T,s -Diagramm ein. (5)

Auszug aus der Dampftafel für Ammoniak

T^S in K	340	350	360	370	380	390
p^S in bar	30,8	38,6	47,9	58,7	71,4	86,0
v' in dm^3/kg	1,87	1,95	2,03	2,14	2,29	2,50
v'' in dm^3/kg	40,99	31,91	24,88	19,33	14,84	11,08
h' in kJ/kg	671	725	783	844	910	986
h'' in kJ/kg	1629	1621	1608	1588	1558	1513
s' in $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	528	682	838	999	1168	1355
s'' in $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	3346	3240	3129	3010	2874	2707

Aufgabe 2

p-T-Diagramm



- Der Aggregatzustand von Punkt 1 ist flüssig.
- (Isobare) Abkühlung bis zur Temperatur $T \leq T_{\text{schmelz}}$
Energieform: Wärme muss abgeführt werden.

- c) Die molekularen Wechselwirkungen können bei $p < 10$ bar vernachlässigt werden. Nah an der Taulinie sind diese wiederum stark, daher muss eine Lücke zwischen diesem Bereich und der Dampfdruckkurve gezeichnet werden.
- d) Die isotherme Entspannung kann durch Volumenvergrößerung mit zusätzlicher Beheizung realisiert werden.

e) $u_2 - u_1 = 80,44 \text{ kJ/kg}$

f) 1.HS: $U_2 - U_1 = Q_{12} + W_{12}^v$

2.HS: $S_2 - S_1 = \frac{Q_{12}}{T}$

$\rightarrow q_{12} = 258,86 \text{ kJ/kg}$

$w_{12}^v = u_2 - u_1 - q_{12} = -178,42 \text{ kJ/kg}$

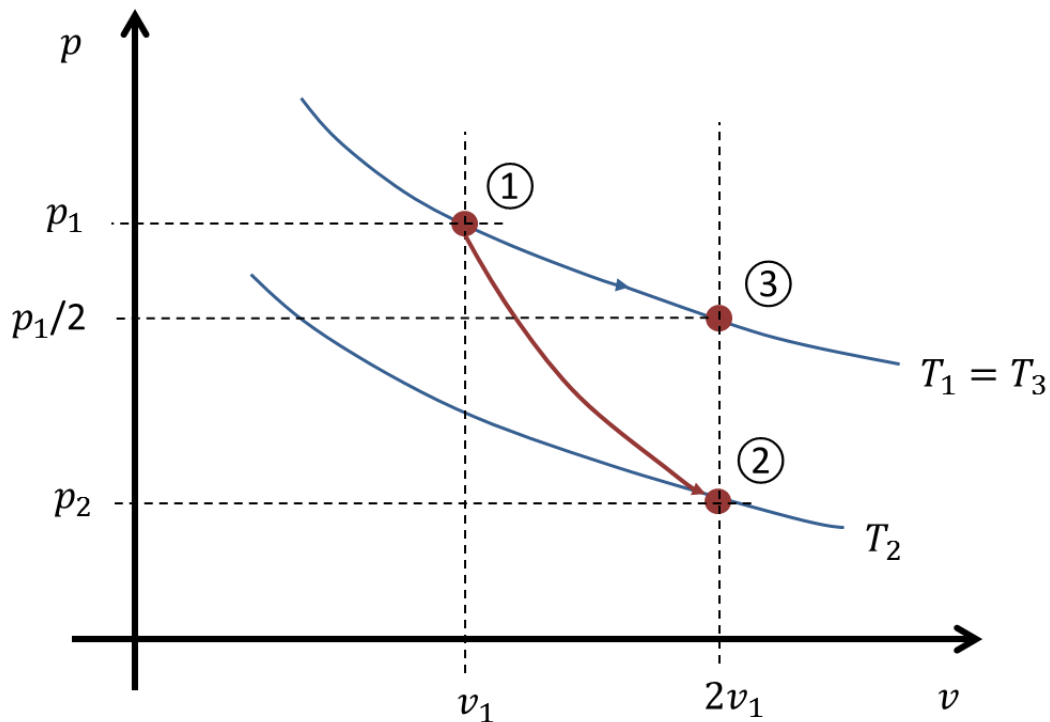
Aufgabe 3

a) 1.HS: $0 = \dot{m}(h_1 - h_2) + \dot{Q} \rightarrow h_2 - h_1 = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}}$

$T_2 = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}c_p} + T_1 = 717,59 \text{ K}$

b) $p_2 = \frac{R_i \cdot T_2}{v_2} = \frac{R_i \cdot T_2 \cdot p_1}{2 \cdot R_i \cdot T_1} = 1,74 \text{ bar}$

c)



$$d) T_{m,12} = \frac{h_2 - h_1}{s_2 - s_1}$$

$$\underline{2.HS}: 0 = \dot{m}(s_1 - s_2) + \frac{\dot{Q}}{T_{m,12}} + \dot{S}_{irr}$$

$$\underline{1.HS}: 0 = \dot{m}(h_1 - h_2) + \dot{Q} \rightarrow \dot{Q} = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

$$T_{m,12} = \frac{h_2 - h_1}{s_2 - s_1} = 1055,31 \text{ K}$$

e) Aufgrund der Energieerhaltung gilt hier: $P = \dot{Q} = -300 \text{ kW}$

$$f) \underline{1.HS} \quad 0 = \dot{m}(h_1 - h_3)$$

Kal. Zustandsgleichung:

$$h_3 - h_1 = c_p(T_3 - T_1) = 0 \rightarrow T_3 = T_1$$

$$p_3 = 3,1 \text{ bar}$$

Aufgabe 4

$$a) \underline{1.HS}: 0 = \dot{m}_{zu} \cdot h_{zu} - \dot{m}_D \cdot h'' - h' \cdot \dot{m}_{Fl}$$

$$x_{zu} = \frac{(1010 - 802,215) \text{ kJ/kg}}{(1601,7 - 802,215) \text{ kJ/kg}} = 0,26$$

b) 1.HS: $0 = \dot{m}_{zu} \cdot h_{zu} - \dot{m}_D \cdot h'' - h' \cdot \dot{m}_{Fl} + \dot{Q}$

$\dot{m}_{Fl} = (1 - x) \cdot \dot{m}_{zu} = (1 - 0,38) \cdot 2,6 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 1,61 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$

c) $x = 0,32$

d) 2.HS: $0 = \dot{m}_{zu} \cdot s_{zu} - \dot{m}_D \cdot s'' - \dot{m}_{Fl} \cdot s' + \dot{S}_{irr}$

$s''(363,15 \text{ K}) = 3091,51 \text{ J/kgK}$ und $s' = 888,71 \text{ J/kgK}$

$\dot{S}_{irr} = 89,52 \text{ W/K}$

e)

