

# PRÜFUNGSKLAUSUR

## Thermodynamik I

14. Februar 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

14. Februar 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 60. 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**

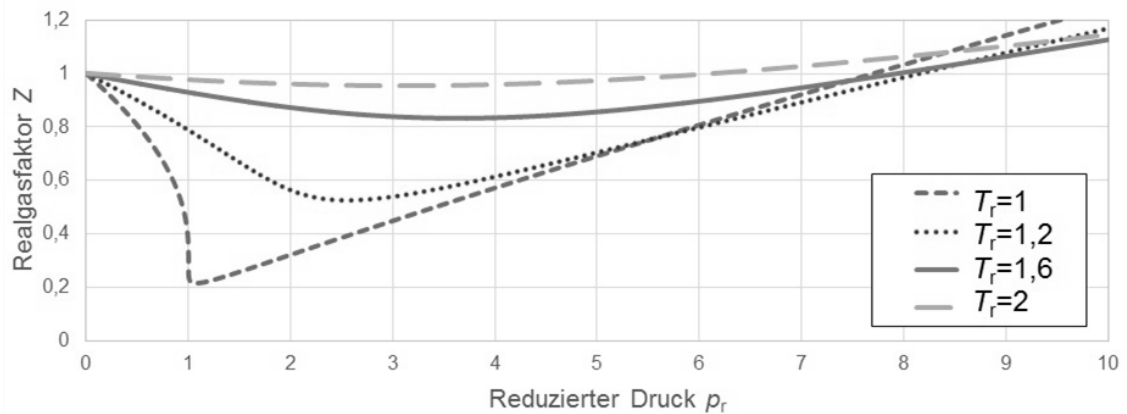
(14 Punkte)

Bearbeiten Sie folgende unabhängige Kurzfragen.

- a) Nennen Sie drei thermische Zustandsgleichungen für den fluiden Bereich eines Reinstoffes. Beschreiben Sie qualitativ den Gültigkeitsbereich der drei genannten Zustandsgleichungen mit Hilfe eines  $p,v$ -Diagramms. Kennzeichnen Sie die relevanten Aggregatzustände in dem Diagramm. (3)

- b) Ein adiabater Verdichter komprimiert kontinuierlich ein ideales Gas mit konstanter Wärmekapazität, wobei sich dessen Temperatur von  $T_{a,\text{ein}} = 300 \text{ K}$  auf  $T_{a,\text{aus}} = 400 \text{ K}$  ändert. Berechnen Sie die Austrittstemperatur  $T_{b,\text{aus}}$  im kontinuierlichen Betrieb, wenn die Leistung des Verdichters bei sonst gleichen Eintrittsgrößen ( $\dot{m}_{b,\text{ein}} = \dot{m}_{a,\text{ein}}$ ,  $T_{b,\text{ein}} = T_{a,\text{ein}}$ , ...) halbiert wird. Stellen Sie dafür geeignete Bilanzen auf. Vernachlässigen Sie kinetische und potentielle Energiedifferenzen. (2)

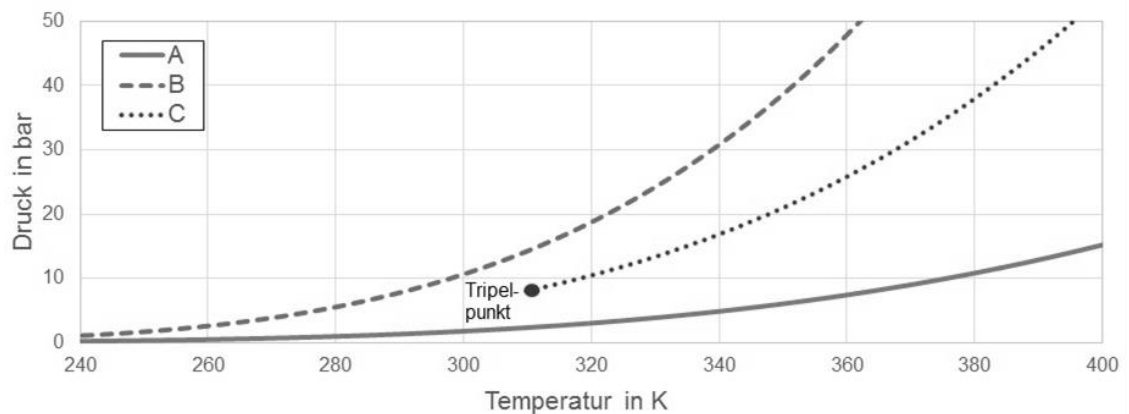
- c) Berechnen Sie das Verhältnis der realen Dichte  $\rho^{\text{real}}$  eines Gases zur Dichte des idealen Gaszustands  $\rho^{\text{iG}}$  bei  $p = 300 \text{ bar}$  und  $T = 240 \text{ K}$ . Verwenden Sie dafür den Realgasfaktor  $Z$ , der unten dargestellt ist. Kritische Stoffwerte für den hier betrachteten Reinstoff:  $p_{\text{krit}} = 50 \text{ bar}$ ,  $T_{\text{krit}} = 200 \text{ K}$ . (3)



- d) Nach  $100 \text{ s}$  wird in einem adiabaten geschlossenen Kalorimeter mit  $m = 100 \text{ g}$  Probenflüssigkeit und einer konstanten Heizleistung von  $100 \text{ W}$  eine Temperaturerhöhung um  $25 \text{ K}$  gemessen. Berechnen Sie die spezifische Wärmekapazität  $c$  der Probenflüssigkeit. (1)

- e) Nasser Dampf eines Reinstoffes ist in einem Kolben-Zylinder-System so eingefüllt, dass zunächst der Druck  $p_1 = 1$  bar eingestellt ist. Nach einer Zustandsänderung im Nassdampfgebiet wird  $p_2 = 30$  bar und eine Temperaturerhöhung von ungefähr 100 K gemessen.

In der Abbildung sind Ausschnitte der Dampfdruckkurve von drei verschiedenen Fluiden dargestellt. Zeigen Sie, welcher dieser Reinstoffe sich in dem Kolben-Zylinder-System befindet. Begründen Sie Ihre Antwort. (2)



f) Eine einfache Kältemaschine (Kaltdampf-Prozess) wird mit den Temperaturen  $T_0$  im Verdampfer und  $T_U$  im Kondensator betrieben. Zeichnen Sie ein Anlagenschema und zeichnen Sie den Prozess in einem  $T, s$ -Diagramm ein. Die Umgebungstemperatur  $T_U$  im Kondensator ändert sich auf einen neuen höheren Wert  $T_U^*$ . Nennen Sie zwei Voraussetzungen, um den Kälteprozess auch bei  $T_U^*$  betreiben zu können.

(3)







# PRÜFUNGSKLAUSUR

## Thermodynamik I

14. Februar 2017

Teil 2: Berechnungsaufgaben

---

(Name, Vorname)

---

(Matrikelnummer)

## Aufgabe 2

(19 Punkte)

Ein Gastank mit variablem Volumen (stehender Zylinder mit reibungsfreiem Kolben) hat im Umgebungszustand ( $T_U = 300 \text{ K}$ ,  $p_U = 1 \text{ bar}$ ) ein Volumen von  $V_1 = 0,6 \text{ m}^3$  und die Temperatur  $T_1 = 300 \text{ K}$ . Der Kolben hat einen Durchmesser von  $d_K = 0,4 \text{ m}$  und ein Eigengewicht von  $m_K = 20 \text{ kg}$ . Der Tank wird in eine Wassertiefe  $H = 100 \text{ m}$  abgelassen (Zustand 2). Für die Temperatur des Gases soll  $T_2 = T_1$  angenommen werden. Die Dichte des Wassers von  $\rho_W = 980 \text{ kg/m}^3$  ist konstant. Das Gas im Tank hat eine Molmasse  $M = 52 \text{ kg/kmol}$  und kann als ideales Gas mit  $c_p = 1,96 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  betrachtet werden. Die kinetischen und potentiellen Energien des Tanks können vernachlässigt werden.

- a) Welchen Druck hat das Gas in beiden Zuständen? (2)
- b) Welches Volumen  $V_2$  stellt sich ein? (1)
- c) Benennen Sie die Energieformen, die das Gas mit seiner Umgebung tauscht, und berechnen Sie deren integrale Werte. (4)
- d) Berechnen Sie das Volumen  $V_2^*$ , wenn die reale Temperatur des Gases  $T_2^*$  um 20 K niedriger als  $T_2$  ist. (2)
- e) Berechnen Sie  $\Delta U_{12}^*$  des Gases und die Energieformen aus Aufgabenteil c) mit der Temperatur  $T_2^*$  unter der Annahme eines konstanten mittleren Drucks  $p_m^* = (p_1 + p_2^*)/2$ . (5)
- f) Berechnen Sie für beide Fälle die erzeugte Entropie  $S_{\text{irr},12}$  und  $S_{\text{irr},12}^*$ . Nehmen Sie als mittlere Temperatur der Wärmeübertragung jeweils  $T_m = (T_1 + T_2)/2$  bzw.  $T_m^* = (T_1 + T_2^*)/2$  an. (3)
- g) Zeichnen Sie beide Prozesse qualitativ in ein  $p,v$ -Diagramm des Gases ein. (2)

### Aufgabe 3

(14 Punkte)

In einer langen, horizontal verlaufenden Fernwärmeleitung strömt Wasser stationär mit einem Massenstrom  $\dot{m}_W = 31 \text{ kg/s}$ , dessen Zustand am Eintritt in die Leitung mit  $p_1 = 35 \text{ bar}$ ;  $T_1 = 350 \text{ K}$  gegeben ist. Beim Durchströmen der Leitung erfährt das Wasser einen Wärmeverlust  $\dot{Q}_{\text{Verl.}} = -300 \text{ kW}$  und einen Druckverlust  $\Delta p = p_1 - p_2 = 10 \text{ bar}$ . Kinetische und potentielle Energien der Stoffströme können vernachlässigt werden.

- a) Stellen Sie die Energiebilanz für das Wasser in der Rohrleitung auf. (1)
- b) Berechnen Sie die Temperatur des Wassers am Austritt aus der Leitung mit Hilfe der Tabellenwerte. (2)
- c) Berechnen Sie die Temperatur am Austritt unter der Annahme, dass das Wasser ein inkompressibles Fluid mit  $v^{iF} = 0,00103 \text{ m}^3/\text{kg}$  und konstanter spezifischer Wärmekapazität  $c^{iF} = 4,2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  ist. (2)
- d) Berechnen Sie die Entropieerzeugungsrate des Strömungsprozesses für das inkompressible Fluid. Die Bilanzgrenze soll so gelegt werden, dass der Wärmestrom bei der Umgebungstemperatur  $T_U = 295 \text{ K}$  abgegeben wird. (3)
- e) Ein adiabater irreversibler Verdichter (Pumpe) ist der Leitung vorgeschaltet, um das inkompressible Fluid von  $p_U = 1 \text{ bar}$ ,  $T_U = 295 \text{ K}$  auf den Eintrittszustand  $p_1$ ,  $T_1$  zu bringen. Berechnen Sie die notwendige Leistung  $P$  des Verdichters im stationären Betrieb. (2)
- f) Zeichnen Sie die zuvor diskutierten Zustandsänderungen (Aufgabenteile c) bis e)) qualitativ in ein  $T, s$ -Diagramm für Wasser ein. (2)
- g) Berechnen Sie die Austrittstemperatur  $T^*$  und die Leistung  $P^*$ , wenn der Verdichter isentrop arbeiten würde. (2)

Stoffdaten von Wasser:

$T$ in K	$p$ in bar	$h$ in kJ/kg
345	25	302,83
350	25	323,76
350	35	324,57

#### Aufgabe 4

(13 Punkte)

Es wird eine Werkzeugmaschine betrachtet, in der Rohschrauben (RS) mit Plastik (P) überzogen werden. Es werden Massenströme  $\dot{m}_{RS} = 200 \text{ kg/h}$  Rohschrauben bei einer Temperatur  $\vartheta_{RS} = 180^\circ\text{C}$  und  $\dot{m}_P = 100 \text{ kg/h}$  Plastik bei  $\vartheta_P = 140^\circ\text{C}$  zugeführt, sowie eine elektrische Leistung  $P = 63 \text{ kW}$ . Die nach außen adiabate Maschine wird durch Wasser gekühlt ( $\dot{m}_W = 0,1 \text{ kg/s}$ ;  $c_W = 4,2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) = \text{konst.}$ ;  $\vartheta_{W,\text{ein}} = 15^\circ\text{C}$ ). Die Edukte werden vollständig in das Produkt Schrauben (S) mit der Ausgangstemperatur  $\vartheta_S = 120^\circ\text{C}$  umgesetzt. Kinetische und potentielle Energien der Stoffströme können vernachlässigt werden. Die Wärmekapazitäten des Plastiks  $c_P = 1,6 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  und der Rohschrauben  $c_{RS} = 0,8 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  sind konstant. Der Druck beträgt  $p = p_U = 1 \text{ bar}$ , die Maschine läuft stationär. Die festen und flüssigen Stoffströme seien inkompressibel.

Hinweise: Der Enthalpiestrom der Schrauben  $\dot{H}_S(T_S)$  kann additiv aus den Enthalpieströmen  $\dot{H}_{RS}(T_S)$  und  $\dot{H}_P(T_S)$  zusammengesetzt werden. Unten ist ein Ausschnitt aus der Dampftafel von Wasser angegeben.

- a) Zeichnen Sie eine Skizze der Werkzeugmaschine und tragen Sie die genannten Energie- und Stoffströme ein. (2)
- b) Stellen Sie die Energiebilanz für die Werkzeugmaschine auf. (2)
- c) Prüfen Sie, in welchem Aggregatzustand das Wasser die Maschine verlässt. (4)
- d) Berechnen Sie die spezifische Entropie des Wassers  $s_{W,\text{aus}}$  im Austrittszustand. (3)
- e) Welchen Massenstrom  $\dot{m}_W^*$  müsste das Wasser haben, damit es am Austritt gerade siedet? (2)

Ausschnitt aus der Dampftafel von Wasser:

$T$ in K	$p$ in bar	$h'$ in kJ/kg	$h''$ in kJ/kg	$s'$ in kJ/(kg · K)	$s''$ in kJ/(kg · K)
373,15	1	417,5	2674,9	1,3028	7,3588

**Kurzlösung zur Klausur Thermodynamik I für Maschinenbau vom 14.02.2017**

**Aufgabe 2**

a)  $p_1 = p_K + p_U = 1,02 \text{ bar}$  und  $p_2 = p_K + p_U + p_W = 1.062.941 \text{ Pa} = 10,63 \text{ bar}$

b)  $V_2 = 0,05733 \text{ m}^3$

c) Energieformen: Volumenänderungsarbeit, Wärmeenergie

$$W_{12}^V = - \int p \, dV = p_1 \cdot V_1 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right) = 143.087 \text{ J}$$

$$Q_{12} = \int T \, dS = -W_{12}^V = -143.087 \text{ J}$$

d)  $m_{1,2} = 1,271 \text{ kg}$

$T_2^* = 280 \text{ K}$  und  $V_2^* = 0,0535 \text{ m}^3$

e)  $c_v = 1,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

$p_m^* = 5,82 \text{ bar}$

$$\Delta U_{12}^* = m_{1,2} \cdot \int_{T_1}^{T_2^*} c_v \, dT = 45.756 \text{ J}$$

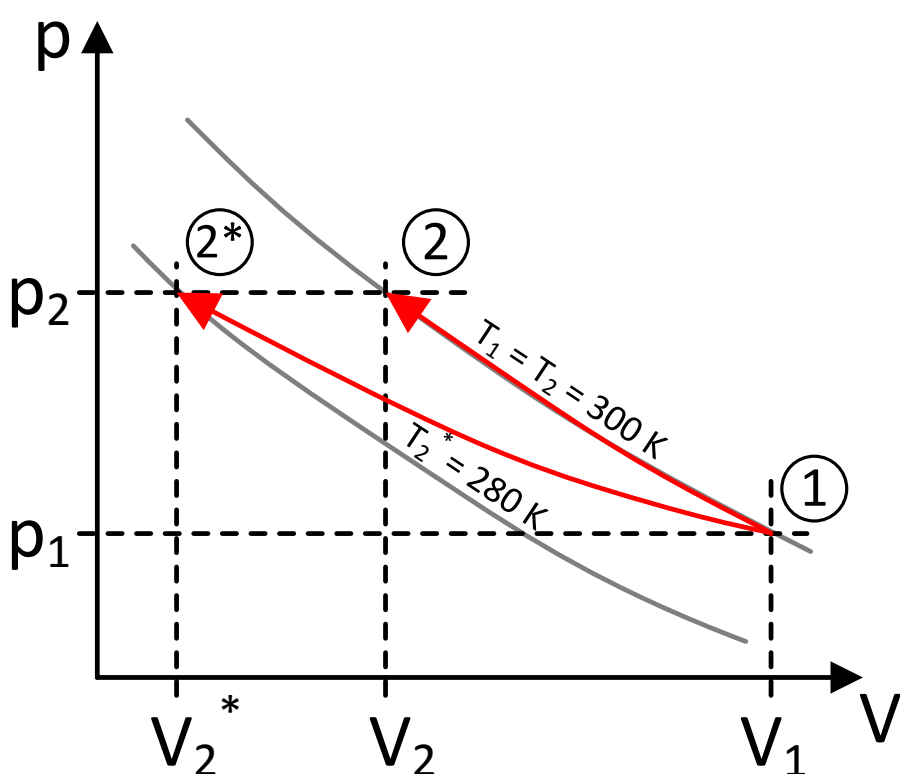
$$W_{12}^{V*} = - \int_{V_1}^{V_2^*} p_m^* \, dV = -p_m^* \cdot (V_2^* - V_1) = 318.200 \text{ J}$$

$$Q_{12}^* = U_{12}^* - W_{12}^{V*} = 45 \text{ kJ} - 318 \text{ kJ} = -273 \text{ kJ}$$

f)  $T_m = 300 \text{ K}$  und  $S_{irr,12} = S_2 - S_1 - \int_1^2 \frac{Q(t)}{T(t)} \, dt = 0$  (reversibel)

$T_m^* = 290 \text{ K}$  und  $S_{irr,12}^* = S_2^* - S_1 - \int_1^{2^*} \frac{Q(t)}{T(t)} \, dt = 601,53 \frac{\text{J}}{\text{K}}$

g)



### Aufgabe 3

$$a) \frac{dE}{dt} = 0 = \dot{Q}_{Verl.} + \dot{m}_W \cdot (h_1 - h_2)$$

$$b) h_2 = \frac{\dot{Q}_{Verl.}}{\dot{m}_W} + h_1 = 314,89 \frac{kJ}{kg}$$

Interpolation  $T_2 = 347,88 K$

$$c) \dot{Q}_{Verl.} = \dot{m}_W \cdot (h_2 - h_1)$$

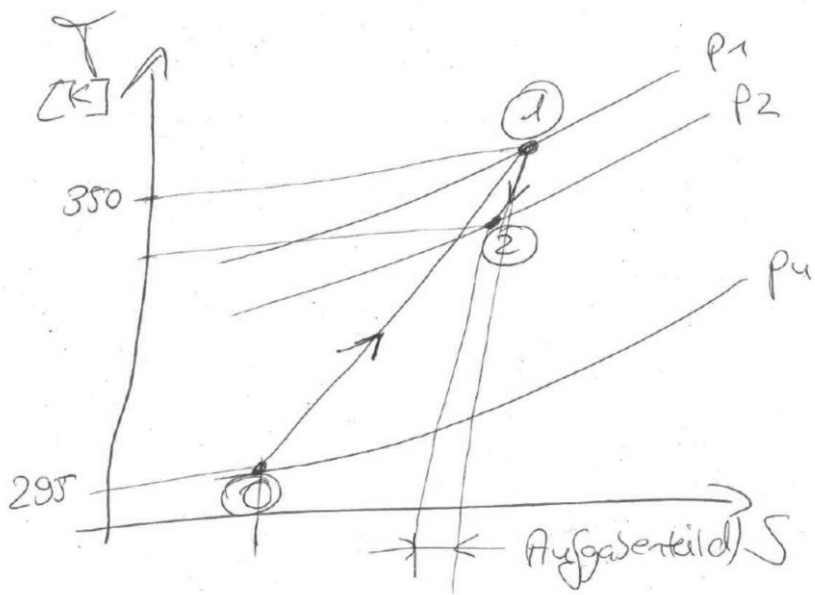
$$T_2 = \frac{\left[ \frac{\dot{Q}_{Verl.}}{\dot{m}_W} - v^{iF} (p_2 - p_1) \right]}{c^{iF}} + T_1 = 347,94 K$$

$$d) \frac{dS}{dt} = \frac{\dot{Q}_{Verl.}}{T_U} + \dot{m}_W \cdot (s_1 - s_2) + \dot{S}_{irr} = 0$$

$$\dot{S}_{irr} = -\frac{\dot{Q}_{Verl.}}{T_U} + \dot{m}_W \cdot (s_2 - s_1) = 248,37 \frac{W}{K}$$

$$e) P_{Verd.} = \dot{m}_W \cdot (h_1 - h_U) = \dot{m}_W \cdot \left( \int_{T_U}^{T_1} c^{iF} dT + v^{iF} (p_1 - p_U) \right) = 31 \frac{kg}{s} \cdot \left( 4200 \frac{J}{kgK} (350 K - 295 K) + 0,00103 \frac{m^3}{kg} (35 - 1) \cdot 10^5 Pa \right) = 7269562 W$$

f)



g)

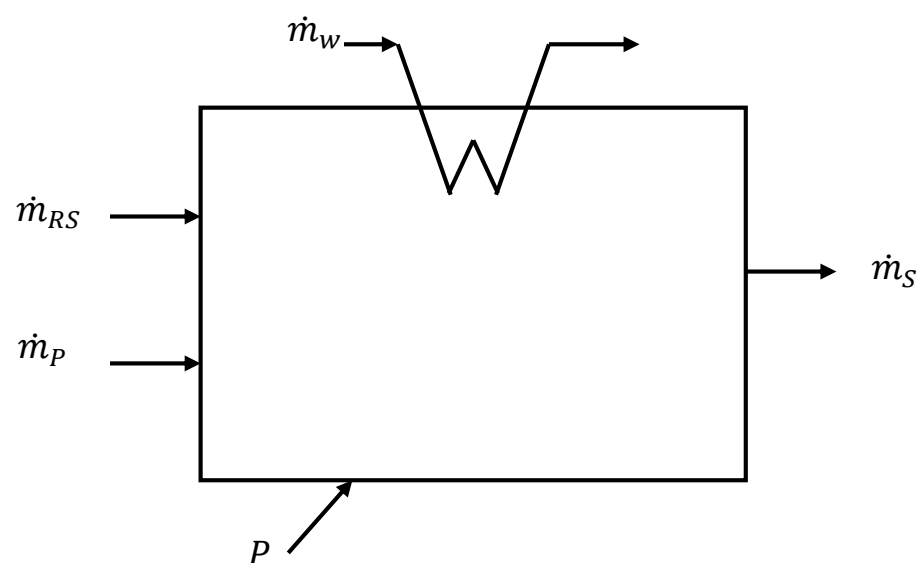
$$s^* - s_U = 0 = c^{iF} \cdot \ln \left( \frac{T^*}{T_U} \right)$$

$$T^* = T_U = 295 K$$

$$P_{Verd.}^* = \dot{m}_W \cdot v^{iF} (p_1 - p_U) = 108562 W$$

#### Aufgabe 4

a)



$$b) \frac{dE}{dt} = 0 = P + \dot{m}_{RS} \cdot h_{RS,ein} + \dot{m}_P \cdot h_{P,ein} - \dot{m}_S \cdot h_S + \dot{m}_w \cdot (h_{w,ein} - h_{w,aus})$$

$$c) \dot{m}_S \cdot h_S = \dot{H}_S = \dot{H}_{RS} + \dot{H}_P$$

Für RS und P gilt:

$$h_{aus} - h_{ein} = \int_{T_{ein}}^{T_{aus}} c^{iF} dT + v^{iF} (p_{aus} - p_{ein}) \text{ mit: } p_{aus} - p_{ein} = 0$$

$$h_{w,aus} - h_{w,ein} = 665,6 \frac{kJ}{kg}$$

Für das Wasser in flüssiger Phase gilt:

$$h'_w - h_{w,ein} = 357 \frac{kJ}{kg}$$

$$(h_{w,aus} - h_{w,ein}) - (h'_w - h_{w,ein}) = h_{w,aus} - h'_w > 0$$

Das Wasser liegt als nasser Dampf vor

$$d) (h_{w,aus} - h_{w,ein}) - (h'_w - h_{w,ein}) = h_{w,aus} - h'_w = (665,6 - 357) \frac{kJ}{kg} = 308,6 \frac{kJ}{kg} > 0$$

$$x_{w,aus} = \frac{h_{w,aus} - h'_w}{h''_w - h'_w} = \frac{308,6 \frac{kJ}{kg}}{(2674,9 - 417,5) \frac{kJ}{kg}} = 0,137$$

$$s_{w,aus} = s''_w \cdot x_{w,aus} + (1 - x_{w,aus}) \cdot s'_w = 2,1325 \frac{kJ}{kgK}$$

$$e) \dot{m}_w^* \cdot \Delta h_w^* = \dot{m}_w \cdot \Delta h_w$$

$$\dot{m}_w^* = \frac{(h_{w,aus} - h_{w,ein}) \cdot \dot{m}_w}{(h'_w - h_{w,ein})} = 0,186 \frac{kg}{s}$$