

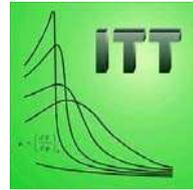
**Lehrstuhl und Institut für Technische Thermodynamik**  
Fakultät für Maschinenbau  
Universität Karlsruhe (TH)

Prof. Dr. rer. nat. habil. U. Maas (Ordinarius)

**Klausursammlung**  
**zu Klausur**  
**„Technische Thermodynamik I/II“**

**Zeitraum: 2005 – 2010**

**Aufgabenstellung**



**1. Ideales und perfektes Gas:**

**a. Ideales Gas**

Zustandsgleichung:  $p \cdot v = R \cdot T$ ,  $R = \frac{\bar{R}}{M}$ ,  $\bar{R} = 8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$ .

$$R = c_p - c_v ; \kappa \equiv \frac{c_p}{c_v} ; c_v = \frac{f}{2} \cdot R ; c_p = \frac{f+2}{2} \cdot R$$

$$u = u(T) ; \frac{du}{dT} = c_v(T) ; h = h(T) ; \frac{dh}{dT} = c_p(T)$$

**b. Perfektes Gas: (Ideales Gas mit  $c_p = \text{konst.}$  und  $c_v = \text{konst.}$ )**

$$\Delta s_{12} = c_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} + R \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} - R \cdot \ln \frac{p_2}{p_1} = c_p \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} + c_v \cdot \ln \frac{p_2}{p_1}$$

Isentrope Zustandsänderung eines perfekten Gases (oder polytrope Zustandsänderung, mit n statt  $\kappa$ )

$$p \cdot v^\kappa = \text{konst.} ; p^{1-\kappa} \cdot T^\kappa = \text{konst.} ; T \cdot v^{\kappa-1} = \text{konst.}$$

$$-\int_{v_1}^{v_2} p \cdot dV = \frac{m \cdot R \cdot T_1}{\kappa - 1} \cdot \left[ \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\kappa-1} - 1 \right], \quad \int_{p_1}^{p_2} V \cdot dp = \frac{\kappa}{\kappa - 1} m \cdot R \cdot T_1 \cdot \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right]$$

(wenn für polytrope Zustandsänderung n statt  $\kappa$ :  $n \neq 1$ )

Teilchengeschwindigkeit:  $\bar{w} = \sqrt{\frac{8}{\pi} \cdot \frac{k \cdot T}{\mu}} ; \sqrt{w^2} = \sqrt{3 \cdot \frac{k \cdot T}{\mu}}$

**2. "Inkompressible" Flüssigkeit:**

$$v = \text{konst.}; c_p = c_v = (c); \Delta u = c \cdot \Delta T ; \Delta h = c \cdot \Delta T + v \cdot \Delta p; \Delta s = c \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}.$$

**3. Exergie und Exergieverlust: (massenbezogen)**

Exergie:  $\varepsilon = u - u_u - T_u \cdot (s - s_u)$ ; technische Exergie:  $\varepsilon_t = h - h_u - T_u \cdot (s - s_u)$

Exergieverlust:  $\varepsilon = T_u \cdot s_{erz}$

**4. Reale Stoffe:**

**a.** Dampfanteil  $x = \frac{m_D}{m_{ges}}$

**b.** Dgl. einer Phasengrenzkurve (Clausius-Clapeyron-Gl.):  $\frac{dp}{dT} = \frac{\Delta s}{\Delta v} = \frac{\Delta h}{T \cdot \Delta v}$



c. van-der-Waals-Gas :  $\left(p + \frac{a}{v^2}\right) \cdot (v - b) = c \cdot T$

Vollständige Anpassung an den kritischen Punkt

$$a = 3 \cdot p_k \cdot v_k^2; \quad b = \frac{1}{3} \cdot v_k; \quad c = \frac{8}{3} \cdot p_k \cdot \frac{v_k}{T_k}$$

Anpassung an den kritischen Punkt mit  $c = R$

$$v_k^* = \frac{3}{8} \cdot \frac{R \cdot T_k}{p_k} (\neq v_k); \quad a = 3 \cdot p_k \cdot v_k^{*2}; \quad b = \frac{v_k^*}{3}$$

d. Allgemeine thermodynamische Zusammenhänge

$$\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T = T \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v - p; \quad \left(\frac{\partial c_v}{\partial v}\right)_T = T \cdot \left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2}\right)_v$$

$$\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T = v - T \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p; \quad \left(\frac{\partial c_p}{\partial p}\right)_T = -T \cdot \left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2}\right)_p$$

### 5. Gemische idealer Gase

Massenanteil  $\xi_i = \frac{m_i}{m_M}$ ; Molanteil  $\gamma_i = \frac{n_i}{n_M}$

$$\frac{p_a}{p_b} = \frac{\gamma_a}{\gamma_b} = \frac{\xi_a}{\xi_b} \cdot \frac{R_a}{R_b}; \quad R_M = \sum_i \xi_i \cdot R_i; \quad c_{pM} = \sum_i \xi_i \cdot c_{pi}; \quad c_{vM} = \sum_i \xi_i \cdot c_{vi}$$

### 6. Feuchte Luft

Feuchtegrad  $x = \frac{m_W}{m_{Ltr.}}$ ; Feuchteanteil  $y = \frac{m_W}{m_M}$ ;  $x = \frac{y}{1 - y}$

Relative Feuchte  $\varphi \equiv \frac{p_D}{p_S(T)}$ ;  $p_D = \frac{p_M}{1 + \frac{1}{x} \cdot \frac{R_L}{R_D}}$

### 7. Chemische Thermodynamik idealer Gase

Standardzustand (Kennzeichnung durch  $\theta$ ):  $t^\theta = 25^\circ\text{C}$ ,  $p^\theta = 1 \text{ atm}$

$$\frac{d\Delta_R U}{dT} = \sum_i \nu_i \cdot \bar{c}_{vi}; \quad \frac{d\Delta_R H}{dT} = \sum_i \nu_i \cdot \bar{c}_{pi}$$

Gleichgewichtskonstanten: mit  $\nu_i = \nu_i^* \cdot \text{mol}$  und  $\bar{R} = \bar{R}' \cdot \frac{1}{\text{mol}}$

$$K_p = \prod_i p_i^{\nu_i^*}; \quad K_\gamma = \prod_i \gamma_i^{\nu_i^*}; \quad K_\gamma = K_p \cdot p_{ges}^{-\Delta \nu^*}; \quad \bar{K}_p = \prod_i p_i^{\nu_i^*} \cdot (p^\theta)^{-\Delta \nu^*};$$

$$\bar{K}_p = K_p \cdot (p^\theta)^{-\Delta \nu^*}; \quad \frac{d \ln \bar{K}_p}{dT} = \frac{\Delta_R H}{\bar{R}' \cdot T^2}$$

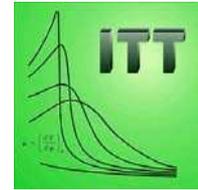
Arbeit bei isothermer isobarer Reaktion (Ausgangs- und Endstoffe bei  $p^\theta$ , bei

kinetischer und potentieller Energie vernachl.):  $W_{rev} = -\bar{R}' \cdot T \cdot \ln \bar{K}_p$  pro Formelumsatz

freie innere Energie:  $F = U - T \cdot S$ ; freie Enthalpie:  $G = H - T \cdot S$

# Diplomvorpüfung in Thermodynamik I und II

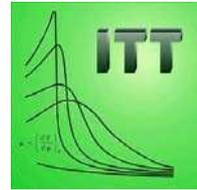
## 24. März 2005 - Teil I



1. In einer Gasturbinenanlage wird Luft vom Umgebungszustand ( $t_u = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p_u = 1 \text{ bar}$ ) in zwei hintereinander geschalteten Verdichtern komprimiert. Nach der ersten Kompression wird die Luft isobar auf Umgebungstemperatur rückgekühlt. Im zweiten Verdichter wird auf den Enddruck 16 bar komprimiert. In der Brennkammer wird die Luft isobar auf  $927 \text{ }^\circ\text{C}$  aufgeheizt. Anschließend wird die Luft in einer ersten Turbine auf einen Zwischendruck expandiert und dann isobar wieder auf die Temperatur  $927 \text{ }^\circ\text{C}$  aufgeheizt. In der zweiten Turbine erfolgt die Expansion der Luft auf den Umgebungsdruck.  
Das Druckverhältnis ist in beiden Verdichtern gleich groß.
  - a. Skizzieren Sie den Prozess in einem T,s-Diagramm.
  - b. Wie groß ist die Arbeit pro Gramm Luft für die beiden Verdichter?
  - c. Wie groß wäre die Mehrarbeit pro Gramm Luft, wenn die Verdichtung auf den Enddruck ohne Zwischenkühlung erfolgte?
  - d. Auf welchen Druck muss die Luft in der ersten Turbine entspannt werden, wenn diese die Antriebsleistung der beiden Verdichter liefern soll?
  - e. Wie groß ist der thermische Wirkungsgrad dieses Gasturbinenprozesses?Luft soll als perfektes Gas betrachtet werden mit  $c_p = 1,0 \text{ J/K}^{-1}\text{g}^{-1}$  und  $R = 0,29 \text{ J/K}^{-1}\text{g}^{-1}$ .  
Es soll angenommen werden, dass die Kompressionen und die Expansionen isen-trop erfolgen.  
Änderungen kinetischer und potentieller Energie und Stoffumwandlungen in der Brennkammer sollen vernachlässigt werden.
  
2. Ein Stahlblock der Masse 1,5 kg soll von der Temperatur 300 K auf die Temperatur 500 K erwärmt werden. Die Erwärmung soll durch direkten Kontakt mit einem Thermostatenbad erfolgen, das durch eine geregelte Heizung auf der konstanten Temperatur von 500 K gehalten wird.
  - a. Wie viel Wärme gibt das Thermostatenbad an den Stahlblock ab?
  - b. Um wie viel ändert sich die Entropie des Stahlblocks?
  - c. Wie viel Arbeit könnte eine reversibel arbeitende Maschine abgeben, wenn sie aus dem Thermostatenbad bei konstanter Temperatur Wärme aufnähme und einen Teil dieser Wärme an den Stahlblock abgäbe, der dadurch von 300 K auf 500 K erwärmt würde?Der Stahlblock soll als starr betrachtet werden.  
Die spezifische Wärmekapazität von Stahl beträgt  $c = 0,48 \text{ J/K}^{-1}\text{g}^{-1}$ .
  
3. Wasser wird in einem Zylinder, ausgehend vom Zustand trockengesättigten Dampfes und 60 bar expandiert. Die Zustandsänderung soll durch eine Polytrope beschrieben werden. Dabei soll durch entsprechende Wärmezufuhr gewährleistet sein, dass die Expansion ins Gebiet überhitzten Dampfes führt.
  - a. Skizzieren Sie ein p,T-Diagramm für Wasser mit den Phasengrenzkurven. Kennzeichnen Sie die Phasengebiete und tragen Sie den Expansionsvorgang ein.
  - b. Bestimmen Sie die Steigung der Dampfdruckkurve bei 60 bar.
  - c. Wie hoch darf der Polytropenexponent bei 60 bar maximal sein, damit die Expansion dort vom Nassdampfgebiet wegführt.

# Diplomvorpüfung in Thermodynamik I und II

## 24. März 2005 - Teil I



Die Verdampfungsenthalpie bei 60 bar beträgt  $\Delta h_v = 1571 \text{ J/g}$ . Im interessierenden Zustandsbereich soll das spezifische Volumen der siedenden Flüssigkeit gegenüber dem Volumen des trockengesättigten Dampfes vernachlässigt werden. Wasserdampf soll als perfektes Gas mit  $R = 0,46 \text{ J/K} \cdot \text{g}^{-1}$  betrachtet werden. Die Siedetemperatur von Wasser beträgt bei 60 bar:  $t_s = 276 \text{ }^\circ\text{C}$ .

4. Ein wärmeisolierter starrer Behälter des Volumens  $V = 1,4 \text{ m}^3$  enthält Wasser-Nassdampf (Dampfanteil  $x = 0,85$ ) bei einem Druck von 14 bar. Zur Absenkung des Druckes wird in den Behälter flüssiges Wasser der Temperatur  $t = 15 \text{ }^\circ\text{C}$  und des Druckes  $p = 15 \text{ bar}$  eingesprüht. Wie lange dauert es bis der Druck im Behälter auf 7 bar gesunken ist, wenn pro Sekunde 100 Gramm flüssigen Wassers eingesprüht werden? Auszug aus der Dampftafel von Wasser:

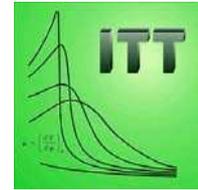
p/bar	$u'/\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$	$u''/\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$	$v'/\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$	$v''/\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$
7	696	2573	$1,11\cdot 10^{-3}$	0,2728
14	828	2593	$1,15\cdot 10^{-3}$	0,1408

Enthalpie des flüssigen Wassers bei 15 bar und  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ :  $h_w = 64 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ . Die kinetische und potentielle Energie des zugeführten Wassers soll vernachlässigt werden.

5. Durch ein adiabatisch isoliertes, waagrecht liegendes Rohrstück veränderlichen Querschnitts strömt Luft. An einem Ende des Rohrstücks strömt die Luft bei einem Druck von 1,5 bar und einer Temperatur von 300 K mit einer Geschwindigkeit von 10 m/s. An dem anderen Ende strömt die Luft bei einem Druck von 1 bar mit der Geschwindigkeit von 200 m/s. Entscheiden Sie rechnerisch, ob es sich bei dem Rohrstück veränderlichen Querschnitts um eine Düse oder um einen Diffusor handelt. Die Luft soll als perfektes Gas mit  $c_p = 1,0 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$  und  $R = 0,29 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$  betrachtet werden.

# Diplomvorpüfung in Thermodynamik I und II

## 24. März 2005 - Teil II



- Luft wird für die Pressluftversorgung eines Labors vom Umgebungszustand ( $p_U = 1 \text{ bar}$ ,  $t_U = 20 \text{ °C}$ ,  $\varphi_U = 0,8$ ) in einem gekühlten Verdichter auf 10 bar komprimiert.
  - Wie hoch muss die Temperatur am Ende der Kompression mindestens sein, damit im Verdichter kein flüssiges Wasser entsteht?
  - Vom Verdichter strömt die Luft in einen Druckbehälter und kühlt sich dort wieder auf Umgebungstemperatur ab. Wie viel Gramm flüssigen Wassers pro Kilogramm trockener Luft kondensieren aus (und werden abgeschieden)?  
Die Luft strömt aus dem Behälter durch das Verteilsystem und wird dabei isotherm auf 6 bar gedrosselt.
  - Wie groß ist der Sättigungsfeuchtegrad der Luft bei 20 °C und 6 bar?
  - Wie groß ist die relative Feuchte der Luft nach der Drosselung?
  - Ausgehend vom Ruhezustand bei 20 °C und 6 bar wird die Luft in einer wärmeisolierten Düse beschleunigt. In der Austrittsöffnung der Düse hat der Strahl Umgebungsdruck.  
Berechnen Sie auf welche Geschwindigkeit die Luft beschleunigt werden könnte, ohne dass Kondensation eintritt.

Änderungen der potentiellen Energie sollen vernachlässigt werden.

Luft und Wasserdampf sollen als perfekte Gase betrachtet werden:

$$\begin{aligned}R_L &= 0,29 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}; & R_D &= 0,46 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \\c_{pL} &= 1,0 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}; & c_{pD} &= 1,9 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}\end{aligned}$$

Für den Sättigungsdampfdruck des Wassers soll gelten:  $p_s(T) = a \cdot \exp\left(c - \frac{b}{T}\right)$

mit:  $a = 0,0233 \text{ bar}$ ,  $b = 6793,6 \text{ K}$ ,  $c = 23,2$

- Skizzieren Sie das Potential der Wechselwirkungskräfte zwischen zwei Teilchen als Funktion des Teilchenabstandes für
  - die Modellgase: Starrkugelgas, Massenpunktgas mit anziehender Wechselwirkung, van-der-Waals-Gas und
  - ein reales Gas. Kennzeichnen Sie darin den Teilchenabstand in dem sich die Abstoßungs- und Anziehungskräfte aufheben.
- Ein Gemisch aus Luft und Kohlendioxid soll 10 Massenprozent Kohlendioxid enthalten. Das Gemisch liegt bei einem Druck von 1 bar und bei einer Temperatur von 300 K vor.  
Wie viel Arbeit ist mindestens erforderlich, um aus diesem Gemisch isotherm ein Kilogramm Kohlendioxid abzutrennen?  
Nach der Abtrennung sollen Luft und Kohlendioxid bei einem Druck von 1 bar vorliegen.  
Luft und Kohlendioxid sollen als perfekte Gase betrachtet werden.  
Luft ist als ein Gemisch aus 80 mol-% Stickstoff und 20 mol-% Sauerstoff zu behandeln.  
Die Molmassen betragen:  
Kohlendioxid:  $M_{\text{CO}_2} = 44 \text{ g/mol}$ ;  
Stickstoff:  $M_{\text{N}_2} = 28 \text{ g/mol}$ ;  
Sauerstoff:  $M_{\text{O}_2} = 32 \text{ g/mol}$ .

## Diplomvorpüfung in Thermodynamik I und II

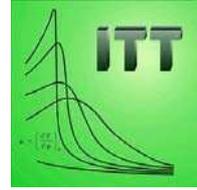
### 24. März 2005 - Teil II



4. Für Äthan soll die thermische Zustandsgleichung  $(p + a \cdot T^{-1} \cdot v^{-2}) \cdot v = R \cdot T$  gelten mit  $a = 1,2 \text{ kJ} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-2}$ .
- Leiten Sie einen analytischen Ausdruck für die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen  $c_v(T, v)$  her.
  - Ein starrer wärmeisolierter Behälter des Volumens  $V = 1 \text{ l}$  wird von einer Membran in zwei gleich große Kammern geteilt. Die eine Kammer enthält 300 Gramm Äthan der Temperatur  $T = 300 \text{ K}$ , die andere Kammer ist evakuiert. Nach dem Zerreißen der Membran expandiert das Äthan auf das Gesamtvolumen, und es stellt sich ein neuer Gleichgewichtszustand ein. Berechnen Sie die Temperatur des Äthans nach der Expansion.  
Der Idealanteil der spezifischen Wärmekapazität bei konstantem Volumen soll als konstant betrachtet werden und  $c_v^\infty = 1,72 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$  betragen.
5. Einem Reaktor werden Äthylen und Wasserdampf zugeführt. Im Reaktor wird bei der Temperatur  $500 \text{ K}$  entsprechend der Gleichung  $\text{C}_2\text{H}_4 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  Äthanol gebildet. Bei der Temperatur  $500 \text{ K}$  beträgt die Gleichgewichts-konstante  $\bar{K}_p = 1,26 \cdot 10^{-2}$ .
- Berechnen Sie den Anteil des Äthans in dem den Reaktor im Gleichgewicht verlassenden Gemisch, wenn dem Reaktor zweimal soviel Äthylen zugeführt wird wie der stöchiometrischen Menge entspricht und die Reaktion bei Standarddruck abläuft.
  - Berechnen Sie den Anteil des Äthans in dem den Reaktor im Gleichgewicht verlassenden Gemisch, wenn dem Reaktor ein stöchiometrisches Einsatzgemisch zugeführt wird und die Reaktion bei einem Gesamtdruck abläuft, der doppelt so hoch ist wie der Standarddruck.  
Die an der Reaktion beteiligten Stoffe sollen als perfekte Gase betrachtet werden.

# Diplomvorpüfung in Thermodynamik I und II

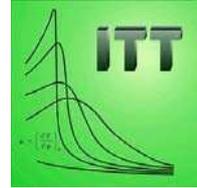
## 29. September 2005 - Teil I



1. Zur Luftverflüssigung wird eine Gaskältemaschine eingesetzt. Der darin ablaufende Kreisprozess soll durch folgenden reversiblen Vergleichsprozess beschrieben werden (Stirling-Prozess):
- 1→2 isotherme Kompression bei 310 K auf  $2/3$  des Anfangsvolumens
  - 2→3 isochore Abkühlung auf 70 K
  - 3→4 isotherme Expansion auf das Anfangsvolumen
  - 4→1 isochore Erwärmung auf die Anfangstemperatur.
- Die bei den Schritten 2→3 und 4→1 übertragenen Wärmen sollen in „innerer Wärmeübertragung“ übertragen werden und nach außen nicht in Erscheinung treten. Als Arbeitsmittel werden 2 Gramm Helium verwendet. Helium soll als perfektes Gas betrachtet werden mit  $R = 2,1 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ . Die Drehzahl der Maschine beträgt 1450 pro Minute.
- a. Tragen Sie den reversiblen Vergleichsprozess in ein T,s-Diagramm und in ein p,v-Diagramm ein.
  - b. Berechnen Sie die Kälteleistung des reversiblen Vergleichsprozesses und kennzeichnen Sie im T,s-Diagramm und im p,v-Diagramm die Flächen, die ein Maß für die Kälteleistung sind.
  - c. Wie viel Kilogramm Luft kann eine reale Gaskältemaschine pro Sekunde isobar verflüssigen, wenn sie Luft aus der Umgebung ( $T_u = 300 \text{ K}$ ,  $p_u = 1 \text{ bar}$ ) ansaugt und 30 % der Kälteleistung der idealen Maschine erzeugt.
- Stoffwerte von Luft bei 1 bar:
- |                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| Mittlere spezifische Wärmekapazität | $\bar{c}_p = 1,0 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ |
| Verdampfungswärme                   | $\Delta h_v = 200 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ ,                  |
| Siedetemperatur                     | $T_s \approx 80 \text{ K}$ .  |
2. Eine Wärmepumpe entzieht der Umgebung bei der Temperatur  $t_U = 5 \text{ }^\circ\text{C}$  Wärme und heizt pro Sekunde 40 Gramm Wasser isobar von  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  auf  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  auf.
- a. Welche Antriebsleistung wäre erforderlich, wenn die Wärmepumpe reversibel arbeitete?
  - b. Welche Antriebsleistung ist für die gleiche Heizleistung erforderlich, wenn bei dem Vorgang ein Entropiestrom von  $4,6 \text{ W/K}$  erzeugt wird?
- Flüssiges Wasser soll als inkompressibel betrachtet werden.  
Spezifische Wärmekapazität von flüssigem Wasser:  $c_W = 4,2 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ .  
Änderungen kinetischer und potentieller Energie sollen vernachlässigt werden.
3. In einem starren Behälter mit dem Volumen  $V = 0,1 \text{ m}^3$  befinden sich flüssiges und dampfförmiges Wasser bei  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  im Gleichgewicht. Durch Wärmezufuhr wird das Wasser in den kritischen Zustand überführt.
- a. Zeichnen Sie ein p,v-Diagramm von Wasser. Kennzeichnen Sie darin die Gebiete der verschiedenen Aggregatzustände und die Zweiphasengebiete und tragen Sie darin den Aufheizvorgang ein.
  - b. Bestimmen Sie die Masse des Behälterinhalts.
  - c. Wie groß ist der Dampfanteil am Anfang?

# Diplomvorpüfung in Thermodynamik I und II

## 29. September 2005 - Teil I



- d.** Reicht eine Heizleistung von 10 kW aus, um den Behälterinhalt innerhalb von 45 Minuten bis zum kritischen Zustand aufzuheizen?

Auszug aus der Dampftafel von Wasser:

t/ °C	p/bar	v'/dm <sup>3</sup> ·kg <sup>-1</sup>	v''/m <sup>3</sup> ·kg <sup>-1</sup>	h'/J·g <sup>-1</sup>	h''/J·g <sup>-1</sup>
90	0,701	1,036	2,361	376,94	2660,1
374,15	221,2	3,17	0,00317	2107,4	2107,4

- 4.** Ein starrer, wärmeisolierter Behälter ( $V = 10 \text{ l}$ ) enthält Luft vom Umgebungszustand ( $T_u = 300 \text{ K}$ ,  $p_u = 1 \text{ bar}$ ). Er wird von einem gekühlten Kompressor, der Umgebungsluft einsaugt, bis zu einem Druck von 200 bar aufgefüllt. Während des Füllvorgangs gibt der Kompressor eine Wärme von 822 kJ ab. Nach dem Füllvorgang beträgt die Temperatur der Luft im Behälter 350 K.

**a.** Wie viel Kilogramm Luft werden in den Behälter gefördert?

**b.** Wie groß ist die erforderliche Kompressionsarbeit?

Die Wärmekapazität des Behälters und des Kompressors und die in den Leitungen verbleibende Luft sollen vernachlässigt werden.

Luft soll als perfektes Gas betrachtet werden mit:  $R = 0,29 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$  und  $c_p = 1,0 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ .

Kinetische und potentielle Energien sollen vernachlässigt werden.

- 5.** Luft des Zustandes 10 bar und 500 K wird einer Turbine zugeführt und darin adiabatisch entspannt.
- a.** Wie groß ist die spezifische technische Exergie der Luft im Eintrittszustand in die Turbine?
- b.** Stellen Sie die spezifische technische Exergie der Luft im Eintrittszustand in die Turbine als Fläche in einem T,s-Diagramm dar.
- c.** Wie groß ist die Arbeit pro Kilogramm Luft, die bei reversibler Expansion auf Umgebungsdruck gewonnen werden kann?
- d.** Stellen Sie den Teil der technischen Exergie der Luft im Eintrittszustand in die Turbine als Fläche im T,s-Diagramm dar, der bei der reversiblen Expansion auf Umgebungsdruck nicht als Arbeit gewonnen werden kann.

Die Luft soll als perfektes Gas betrachtet werden mit

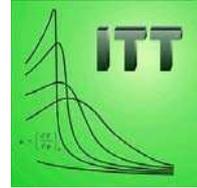
$$c_p = 1,0 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \text{ und } R = 0,29 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}.$$

Umgebungszustand:  $T_u = 300 \text{ K}$ ;  $p_u = 1 \text{ bar}$ .

Änderungen kinetischer und potentieller Energie sollen vernachlässigt werden.

# Diplomvorpüfung in Thermodynamik I und II

## 29. September 2005 - Teil II



1. Ein starrer, nach außen wärmeisolierter Behälter wird durch einen reibungsfrei gleitenden, wärmeisolierenden Kolben in zwei gleich große Kammern geteilt. In beiden Kammern, die ein Volumen von jeweils 1 l haben, befindet sich bei einem Druck von 1 bar ein Gemisch aus 30 mol-% Stickstoff und 70 mol-% Argon der Temperatur 300 K.

Durch eine Heizung, die in einer Kammer eingebaut ist, wird das Gemisch in dieser Kammer so lange aufgeheizt, bis das Gemisch in der anderen Kammer durch den Kolben auf die Hälfte seines ursprünglichen Volumens komprimiert ist.

- Wie groß sind die Temperaturen in beiden Kammern nach dem Aufheizen?
- Wie viel Wärme muss durch die Heizung dem Gemisch in der einen Kammer zugeführt werden?
- Skizzieren Sie die Zustandsänderungen der Gemische in beiden Kammern in einem p,V-Diagramm und machen Sie darin kenntlich welche Flächen gleich groß sind.

Stickstoff und Argon sollen als perfekte Gase betrachtet werden mit:

$$\bar{C}_{p_{N_2}} = 30 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \quad \text{und} \quad \bar{C}_{p_{Ar}} = 21 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

2. Zur katalytischen Hydrierung von Kohlenmonoxid zu Methanol bei 300 °C und 1 atm nach der Gleichung  $\text{CO} + 2\text{H}_2 \leftrightarrow \text{CH}_3\text{OH}$  werden einem Reaktor pro Sekunde 1 mol Kohlenmonoxid und 2 mol Wasserstoff im Standardzustand zugeführt.

Wie groß muss der zu übertragende Wärmestrom sein, wenn das den Reaktor verlassende Gemisch bei 300 °C 60 mol-% Methanol enthält?

Kohlenmonoxid, Wasserstoff und Methanol sollen als perfekte Gase betrachtet werden.

Änderungen kinetischer und potentieller Energie sollen vernachlässigt werden.

Werte der molaren Standardenthalpie und der molaren Wärmekapazität:

	$\bar{H}^\circ / (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$\bar{C}_p / (\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1})$
CH <sub>3</sub> OH	-201,2	44
CO	-110,5	29
H <sub>2</sub>	0	29

3. Durch eine adiabatisch isolierte Anlage strömt stationär ein Kohlendioxidstrom. Am Eintritt in die Anlage hat das Kohlendioxid bei einem Druck von 19,6 bar Umgebungstemperatur (280 K). Beim Verlassen der Anlage beträgt der Druck des Kohlendioxids 1 bar. Bei diesem Vorgang ergibt sich ein Exergieverlust von 151J pro Gramm Kohlendioxid.

- Wie groß ist die Temperatur des Kohlendioxids am Ausgang der Anlage?
- Entscheiden Sie rechnerisch, ob die Anlage eine Turbine oder eine Drossel ist.

# Diplomvorpüfung in Thermodynamik I und II

## 29. September 2005 - Teil II



Änderungen kinetischer und potentieller Energie sollen vernachlässigt werden.

Im interessierenden Zustandsbereich soll für Kohlendioxid die folgende Zustandsgleichung gelten:

$$p \cdot v = R \cdot T + B(T) \cdot p \quad \text{mit: } B(T) = a + b \cdot T \quad \text{und } R = 0,19 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}; \quad a = -9,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1},$$

$$b = 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Die mittlere spezifische Wärmekapazität von Kohlendioxid beträgt bei 1 bar im interessierenden Temperaturbereich:  $\bar{c}_p = 0,9 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ .

4. Skizzieren Sie das p,h-Diagramm eines realen Stoffes. Tragen Sie darin das Nassdampf-Gebiet, die kritische Isotherme, eine unterkritische und eine überkritische Isotherme ein. Skizzieren Sie in dem Diagramm die Inversionskurve des differentiellen Joule-Thomson-Effektes und für die Drosselung auf den Druck  $p = 0$  die Inversionskurve des integralen Joule-Thomson-Effektes, und nennen Sie die Bedingungen aus denen sich die beiden Inversionskurven ergeben.
  
5. In einem Hallenbad wird zur kombinierten Wärmerückgewinnung und Luftentfeuchtung eine Wärmepumpenanlage eingesetzt. Hallenluft ( $t_H = 28 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\varphi_H = 60 \text{ } \%$ ) wird angesaugt und am Verdampfer der Wärmepumpenanlage isobar auf  $12 \text{ }^\circ\text{C}$  abgekühlt. Das entstehende Kondensat wird kontinuierlich abgeschieden. Ein Drittel (bezogen auf Masse trockener Luft) der abgekühlten Luft wird abgeführt und dadurch ersetzt, dass die gleiche Menge Umgebungsluft ( $t_u = -10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\varphi_u = 80 \text{ } \%$ ), die auf  $+2 \text{ }^\circ\text{C}$  mit einer Ölfeuerung isobar vorgewärmt wurde, adiabatisch zugemischt wird. Das entstehende Gemisch wird am Kondensator der Wärmepumpenanlage isobar auf  $48 \text{ }^\circ\text{C}$  erwärmt.
  - a. Tragen Sie den gesamten Prozess in das beigefügte  $h_{1+x},x$ -Diagramm ein.
  - b. Wie viel Gramm flüssigen Wassers werden pro Kilogramm trockener Luft abgeschieden?
  - c. Wie viel Wärme wird pro Kilogramm trockener Luft am Verdampfer übertragen?
  - d. Wie viel Wärme wird pro Kilogramm trockener Luft am Kondensator übertragen?Die Enthalpie des abgeschiedenen flüssigen Wassers und Änderungen kinetischer und potentieller Energie sollen vernachlässigt werden.  
Der Gesamtdruck beträgt 1 bar.  
Lösen Sie die Aufgabe mit Hilfe des beigefügten  $h_{1+x},x$ -Diagramms.



1. Ein starrer, wärmeisolierter Druckbehälter mit einem Volumen von 2 l enthält Luft bei einer Temperatur von 373 K und einem Druck von 5 bar. Er wird von einem starren, wärmeisolierten Sicherheitsbehälter mit einem Volumen von 9 l umgeben, in dem sich Luft bei einer Temperatur von 300 K und einem Druck von 1 bar befindet. Durch ein Leck des Druckbehälters strömt Luft bis zum Druckausgleich aus dem Druckbehälter in den Sicherheitsbehälter.
- Wie viel Gramm Luft enthalten der Druckbehälter und der Sicherheitsbehälter vor dem Ausströmen?
  - Wie groß ist der Druck nach dem Druckausgleich?
  - Wie groß ist die Temperatur im Druckbehälter unmittelbar nach Erreichen des Druckausgleichs?
  - Wie viel Gramm Luft strömen bis zum Druckausgleich aus dem Druckbehälter?
  - Wie groß ist die Temperatur der Luft im Sicherheitsbehälter unmittelbar nach dem Druckausgleich?

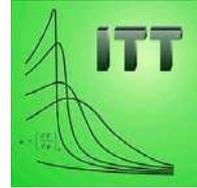
Luft soll als perfektes Gas betrachtet werden mit  $c_p = 1,0 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$  und  $R = 0,29 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ .

Die Expansion des im Druckbehälter verbleibenden Gases soll als reversibel betrachtet werden. Die Volumina und die Wärmekapazitäten der Behälterwände und der Wärmeisolierungen sollen vernachlässigt werden.

2. In einem Zylinder, der durch einen Kolben verschlossen ist, wird trockengesättigter Wasserdampf vom Zustand  $p_1 = 5 \text{ bar}$  und  $t_1 = 152^\circ\text{C}$  auf den Druck  $p_2 = 0,5 \text{ bar}$  expandiert. Während der Expansion wird dem Wasserdampf so viel Wärme zugeführt, dass der Wasserdampf immer Trockengesättigt ist.
- Zeichnen Sie ein p,T- und ein p,v-Diagramm von Wasser. Kennzeichnen Sie in diesen Diagrammen die verschiedene Aggregatzustände und die Expansion.
  - Wie viel Arbeit wird pro Gramm Wasserdampf während der Expansion abgegeben? Im interessierenden Temperaturbereich soll die Verdampfungsenthalpie konstant sein und  $\Delta h_v = 2250 \text{ J/g}$  betragen. Das Volumen des siedenden Wassers soll gegenüber dem Volumen des trockengesättigten Wasserdampfes vernachlässigt werden. Trockengesättigter Wasserdampf soll als perfektes Gas betrachtet werden mit  $c_p = 1,9 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$  und  $R = 0,46 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ .

# Diplomvorpüfung in Thermodynamik I und II

## 30. März 2006 - Teil I



3. Ein senkrecht stehender, wärmeisolierter Zylinder ist unten mit einem wärmeisolierenden, reibungsfrei gleitenden Kolben verschlossen. Die Masse des Kolbens beträgt 10 Kilogramm, die Kolbenfläche 80 cm<sup>2</sup>. Der Zylinder ist zunächst mit 1 Liter Luft der Temperatur 300 K gefüllt. Am oberen Ende des Zylinders befindet sich ein Ventil, das mit einem großen Kessel verbunden ist. Das Ventil wird so lange geöffnet, bis aus dem Kessel zwei Gramm Luft in den Zylinder eingeströmt sind. Anfangs strömt die Luft mit einer Geschwindigkeit von 250 m/s und einer Temperatur von 290 K in den Zylinder ein.
- Wie groß ist der Druck der Luft im Zylinder vor dem Einströmen?
  - Wie viel Gramm Luft befinden sich vor dem Einströmen im Zylinder?
  - Wie groß ist die Temperatur der Luft im Zylinder nach dem Einströmen?

Luft soll als perfektes Gas betrachtet werden mit  $c_p = 1,0 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$  und  $R = 0,29 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ .

Der Zustand der Luft im Kessel soll während des Einströmens in den Zylinder konstant sein. Der Umgebungsdruck beträgt 1 bar, die Erdbeschleunigung 9,81 m/s<sup>2</sup>. Die potentielle Energie der Luft soll vernachlässigt werden.

4. In einem Kraftwerk werden ein Gasturbinen- und ein Dampfturbinen-Prozess miteinander kombiniert.
- In der Gasturbinenanlage werden pro Sekunde 204 Kilogramm Luft vom Umgebungszustand  $p_u = 1 \text{ bar}$ ,  $t_u = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  auf  $p_2 = 6,4 \text{ bar}$  adiabatisch komprimiert.
- Anschließend wird die Luft isobar auf 820 °C erhitzt und in der Turbine adiabatisch auf Umgebungsdruck entspannt. Am Austritt der Turbine hat die Luft eine Temperatur von 400 °C. Bei der Kompression soll soviel Entropie erzeugt werden wie bei der Expansion.
- In der Dampfturbinenanlage werden pro Sekunde 150 Kilogramm Wasser vom Siedezustand bei 25 °C auf 200 bar adiabatisch komprimiert und anschließend isobar erwärmt, verdampft und auf 540 °C überhitzt. Nach der adiabatischen Expansion auf 10 bar im Hochdruckteil der Turbine wird der trockengesättigte Dampf isobar auf 540 °C zwischenüberhitzt und dann im Niederdruckteil der Turbine adiabatisch auf 0,03 bar entspannt. Der Dampf verlässt den Niederdruckteil der Turbine trockengesättigt.
- Stellen Sie den Gasturbinenprozess und den Dampfturbinenprozess in je einem T,s-Diagramm dar.
  - Wie groß ist die Temperatur der Luft nach der Kompression?
  - Wie groß ist der thermische Wirkungsgrad des Gasturbinenprozesses?
  - Wie groß ist der thermische Wirkungsgrad der Gesamtanlage, wenn 90 % der Abwärme des Gasturbinenprozesses im Dampfturbinenprozess genutzt werden?

Die Luft soll als perfektes Gas betrachtet werden mit  $c_p = 1,0 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$  und  $R = 0,29 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ .

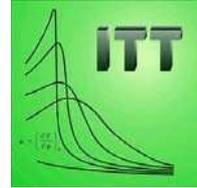
Auszug aus der Dampftafel von Wasser und Mittelwerte der spezifischen Wärmekapazität:

t / °C	p / bar	h' / J · g <sup>-1</sup>	h'' / J · g <sup>-1</sup>	$\bar{c}_p$ / J · g <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup>
25	0,03	104,7	2547,3	---
180	10	---	2776,3	2,17
366	200	---	2414,1	3,0

Die Antriebsleistung der Kesselspeisepumpe und Änderungen kinetischer und potentieller Energie sollen vernachlässigt werden.

# Diplomvorpüfung in Thermodynamik I und II

## 30. März 2006 - Teil II



1. In einem Turbokompressor wird ein Gasstrom vor Druck 1 bar und der Temperatur 300 K auf den Druck 5 bar und auf die Temperatur 450 K adiabatisch komprimiert. Nach der Kompression wird der Gasstrom in einem Wärmeübertrager isobar auf 300 K rückgekühlt.
- Wie viel Arbeit und wie viel Wärme muss pro Gramm Gas übertragen werden, wenn das Gas als ideales Gas mit  $c_p^0 = c_p(T)$  betrachtet wird?
  - Um wie viel Prozent ändern sich die pro Gramm Gas zu übertragende Arbeit und Wärme, wenn das Gas als reales Gas betrachtet wird, für das die Zustandsgleichung  $v = \frac{R \cdot T}{p} - \frac{d}{T^2}$  mit  $d = 1,836 \text{ m}^3 \cdot \text{K}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  gelten soll,  
Spezifische Wärmekapazität beim Druck  $p = 0$ :  
 $c_p^0 = a + b \cdot T$  mit  $a = 0,974 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$  und  $b = 1,05 \cdot 10^{-4} \text{ J} \cdot \text{K}^{-2} \cdot \text{g}^{-1}$   
Änderungen kinetischer und potentieller Energie sollen vernachlässigt werden.

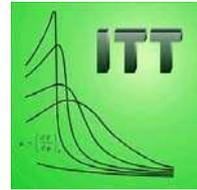
2. Zur Herstellung von Kohlenmonoxid nach der Gleichung  $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$  werden einem Reaktor 1 mol Kohlendioxid und 1 mol Wasserstoff zugeführt.
- Bei welcher Minimaltemperatur könnte diese Reaktion im Prinzip von allein, d. h. ohne Arbeitszufuhr ablaufen?
  - Wie wäre bei dieser Temperatur die Zusammensetzung des im Gleichgewicht befindlichen Reaktionsgemisches?
- Werte der Standardenthalpie, Standardentropie und der molaren Wärmekapazität:

	$\bar{H}^0 / \text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	$\bar{S}^0 / \text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}$	$\bar{C}_p / \text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}$
CO <sub>2</sub>	-393,5	213,6	37,1
H <sub>2</sub>	0	130,6	29,2
CO	-110,5	197,4	29,2
H <sub>2</sub> O	-241,8	188,6	37,1

Die an der Reaktion beteiligten Stoffe sollen als perfekte Gase betrachtet werden.

## Diplomvorpüfung in Thermodynamik I und II

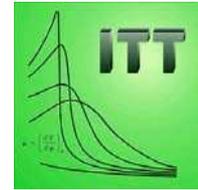
### 30. März 2006 - Teil II



3. In eine adiabatische Mischkammer strömen pro Sekunde 2 mol Helium mit der Temperatur 400 K und dem Druck 1 bar und 1 mol Propan mit der Temperatur 300 K und dem Druck 1 bar. Das ausströmende Gemisch hat einen Druck von 1 bar.
- Wie groß ist die Temperatur des Gemischs?
  - Wie groß sind die Partialdrücke von Helium und Propan im Gemisch?
  - Wie viel Entropie wird pro Sekunde bei dem Vermischungsvorgang erzeugt?  
Helium und Propan sollen als perfekte Gase betrachtet werden.  
Die Rotationsfreiheitsgrade von Propan sollen voll angeregt sein. Von den Schwingungsfreiheitsgraden sollen im Mittel vier angeregt sein.  
Änderungen kinetischer und potentieller Energie sollen vernachlässigt werden.
4. Skizzieren Sie ein  $p$ - $v$ , $p$ -Diagramm eines realen Gases und tragen Sie darin ein: das Nassdampfgebiet, die kritische Isotherme, eine unter- und eine überkritische Isotherme. Kennzeichnen Sie in diesem Diagramm den Bereich in dem die anziehenden Wechselwirkungskräfte überwiegen, und zeichnen Sie die Isotherme ein, oberhalb der für alle Drücke die abstoßenden Wechselwirkungskräfte überwiegen.
5. Zur Klimatisierung eines Raumes wird Luft der Temperatur 20 °C und der relativen Feuchte 50% benötigt. Dazu wäre folgendes Verfahren möglich: Umgebungsluft wird in eine Anlage eingesaugt und darin in zwei Teilströme aufgeteilt. Der Teilstrom 1 wird in einem Kühler isobar abgekühlt und entfeuchtet. Das entstehende Kondensat wird kontinuierlich abgeschieden. Danach wird dieser Teilstrom mit dem Teilstrom 2 adiabatisch vermischt.
- Geben Sie durch Schraffur im  $h_{1+x}$ , $x$ -Diagramm den Bereich an, in dem der Zustand der Umgebungsluft liegen muss, damit mit dem beschriebenen Verfahren der gewünschte Zustand der Raumluft (20 °C,  $\phi = 50\%$ ) erreicht werden kann.
  - Bestimmen Sie, wie viel Wärme im Kühler pro Kilogramm der durchströmenden trockenen Luft maximal abgeführt werden muss und in welchem maximalen Verhältnis die trockenen Luftströme der Teilströme 1 und 2 gemischt werden müssen, wenn die Umgebungstemperatur 40 °C nicht überschreitet.  
Der Gesamtdruck beträgt 1 bar.  
Änderungen kinetischer und potentieller Energie sollen vernachlässigt werden.  
Die Aufgabe ist mit Hilfe des beigefügten  $h_{1+x}$ , $x$ -Diagramms zu lösen.

# Diplomvorpüfung in Thermodynamik I und II

## 5. Oktober 2006 - Teil I



1. Wassernassdampf mit einem Dampfgehalt von 0,7 soll dadurch erzeugt werden, dass in einer wärmeisolierten Mischkammer trockengesättigter Wasserdampf von 10 bar auf 1,01 bar adiabatisch gedrosselt und mit flüssigem Wasser von 20 °C beim Druck 1,01 bar vermischt wird.
  - a. Stellen Sie die Zustandsänderungen des Dampfes und des flüssigen Wassers in einem h,s-Diagramm und in einem T,s-Diagramm dar.
  - b. Wie viel Kilogramm Wasserdampf müssen pro Sekunde zugeführt werden, wenn ein Kilogramm Wassernassdampf pro Sekunde erzeugt werden soll?
  - c. Berechnen Sie den bei der Drosselung des Dampfes erzeugten Entropiestrom.
  - d. Berechnen Sie den Exergieverluststrom, der sich beim gesamten Vorgang bei einer Umgebungstemperatur von 300 K ergibt.
 Änderungen kinetischer und potentieller Energie sollen vernachlässigt werden.  
 Auszug aus der Dampftafel von Wasser:

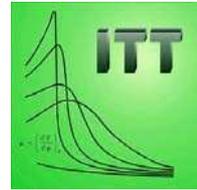
p bar	t °C	h' J · g <sup>-1</sup>	h'' J · g <sup>-1</sup>	s' J · K <sup>-1</sup> g <sup>-1</sup>	s'' J · K <sup>-1</sup> g <sup>-1</sup>
1,01	100	419	2674	1,30	7,36
10	180	763	2778	2,13	6,59

Mittlere spezifische Wärmekapazitäten bei einem Druck von 1,01 bar:  
 flüssiges Wasser  $\bar{c} = 4,2 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \text{g}^{-1}$ , Wasserdampf  $\bar{c}_p = 2,1 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \text{g}^{-1}$ .

2. Berechnen Sie die Sublimationsenthalpie und die Sublimationsentropie von Kampfer bei 20 °C. Die Sublimationsdruckkurve von Kampfer soll im interessierenden Temperaturbereich durch die Gleichung  $\ln(p/\text{bar}) = A - B/T$  mit  $B = 6440 \text{ K}$  beschrieben werden. Das spezifische Volumen des festen Kampfers soll gegenüber dem spezifischen Volumen des Dampfes vernachlässigt werden. Kampferdampf von 20 °C soll als ideales Gas mit  $R = 0,06 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \text{g}^{-1}$  betrachtet werden.
3. Eine Gasturbinenanlage soll nach folgendem Vergleichsprozess arbeiten:
  - 1→2 reversibel adiabatische Kompression der Luft von 300 K und  $p_1=1 \text{ bar}$  auf 10 bar
  - 2→3 isobare Aufheizung mit  $q_{zu} = 700 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$
  - 3→4 adiabatische Expansion in der Turbine auf  $p_4=p_1$  und  $T_4=730 \text{ K}$
  - 4→1 isobare Abkühlung auf den Anfangszustand.
  - a. Skizzieren Sie den Prozess im T,s-Diagramm.
  - b. Berechnen Sie den thermischen Wirkungsgrad der Anlage.
  - c. Berechnen Sie den spezifischen Arbeitsverlust in der Turbine gegenüber einer reversiblen adiabatischen Expansion auf den gleichen Enddruck, und stellen Sie diesen Arbeitsverlust im T,s-Diagramm dar.
  - d. Berechnen Sie den spezifischen Exergieverlust in der Turbine, und stellen Sie ihn im T,s-Diagramm dar.
  - e. Kennzeichnen Sie im T,s-Diagramm den Anteil des Arbeitsverlustes, den man mit einer reversibel arbeitenden Wärmekraftmaschine, die Wärme nur bei Umgebungstemperatur abgibt, noch als Arbeit gewinnen könnte.
 Luft soll als perfektes Gas betrachtet werden mit:  $c_p = 1,0 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \text{g}^{-1}$  und  $R = 0,29 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \text{g}^{-1}$ .  
 Umgebungstemperatur:  $T_u = 300 \text{ K}$ .  
 Änderungen kinetischer und potentieller Energie sollen vernachlässigt werden.

## Diplomvorpüfung in Thermodynamik I und II

### 5. Oktober 2006 - Teil I



4. Ein senkrecht stehender, wärmeisolierter Zylinder ist oben mit einem wärmeisolierenden, reibungsfrei gleitenden Kolben verschlossen. Die Masse des Kolbens beträgt 10 Kilogramm, die Kolbenfläche 80 cm<sup>2</sup>. Der Zylinder ist zunächst mit 1 Liter Luft der Temperatur 300 K gefüllt. Am unteren Ende des Zylinders befindet sich ein Ventil, das mit einem großen Kessel verbunden ist. Das Ventil wird so lange geöffnet, bis aus dem Kessel zwei Gramm Luft in den Zylinder eingeströmt sind. Anfangs strömt die Luft mit einer Geschwindigkeit von 250 m/s und einer Temperatur von 290 K in den Zylinder ein.
- Wie groß ist der Druck der Luft im Zylinder vor dem Einströmen?
  - Wie viel Gramm Luft befinden sich vor dem Einströmen im Zylinder?
  - Wie groß ist die Temperatur der Luft im Zylinder nach dem Einströmen?
- Luft soll als perfektes Gas betrachtet werden mit  $c_p = 1,0 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \text{g}^{-1}$  und  $R = 0,29 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \text{g}^{-1}$ .  
Der Zustand der Luft im Kessel soll während des Einströmens in den Zylinder konstant sein. Der Umgebungsdruck beträgt 1 bar, die Erdbeschleunigung 9,81 m/s<sup>2</sup>.  
Die potentielle Energie der Luft soll vernachlässigt werden.

5. In einem nach außen wärmeisolierten Wärmeübertrager wird trockengesättigter Kältemitteldampf bei der Temperatur 60 °C kondensiert. Dabei erwärmt sich ein Kühlwasserstrom von 0,5 kg/s von 8 °C auf 20 °C.
- Wie groß ist der im Wärmeübertrager erzeugte Entropiestrom?  
Es soll angenommen werden, dass die Drücke im Wärmeübertrager konstant sind. Änderungen kinetischer und potentieller Energie sollen vernachlässigt werden.  
Die spezifische Wärmekapazität von flüssigem Wasser beträgt  $c_w = 4,2 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \text{g}^{-1}$ .

# Diplomvorpüfung in Thermodynamik I und II

## 5. Oktober 2006 - Teil II



1. Wasser soll nach der Gleichung  $2 \text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow \text{H}_2 + 2 \text{OH}$  dissoziieren.  
Kann bei 3200 K und 1 atm der Molenbruch der OH-Gruppe 0,25 betragen, wenn bei 3200 K und 10 atm 12,4 Mol-% des eingesetzten Wassers zerfallen sind?  
Wasser und die Zerfallsprodukte sollen als ideale Gase betrachtet werden.
  
2. In einer Kapillaren wird ein Kohlendioxidstrom ausgehend von der Temperatur 280 K und dem Druck 20 bar adiabatisch auf 1 bar gedrosselt.
  - a. Berechnen Sie die Temperatur des Kohlendioxids nach der Drosselung.
  - b. Berechnen Sie die bei der Drosselung pro Gramm Kohlendioxid erzeugte Entropie.Im interessierenden Zustandsbereich soll für Kohlendioxid die folgende Zustandsgleichung gelten:
$$p \cdot v = R \cdot T + B(T) \cdot p$$
mit:  $B(T) = a + b \cdot T$  und  $R = 0,19 \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \text{g}^{-1}$ ,  $a = -9,7 \cdot 10^{-3} \text{m}^3 / \text{kg}$ ,  $b = 2,3 \cdot 10^{-5} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$   
Die mittlere spezifische Wärmekapazität von Kohlendioxid beträgt bei 1 bar im interessierenden Temperaturbereich:  $\bar{c}_p = 0,9 \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \text{g}^{-1}$ .  
Änderungen kinetischer und potentieller Energie sollen vernachlässigt werden.
  
3. Ein senkrecht stehender, nach außen wärmeisolierter Zylinder ist am oberen Ende durch einen wärmeisolierenden Kolben verschlossen. Der Zylinder enthält ein Gemisch aus Helium (He) und Stickstoff (N<sub>2</sub>). Im Gemisch ist 1 mol Helium vorhanden. Das Gemisch wird durch eine im Zylinder eingebaute Heizung aufgeheizt und dehnt sich dabei isobar aus.
  - a. Wie viel mol Stickstoff muss das Gemisch enthalten, wenn die dem Helium zugeführte Wärme so groß sein soll, wie die dem Stickstoff zugeführte Wärme?
  - b. Welcher Anteil der Expansionsarbeit wird vom Helium abgegeben?Helium und Stickstoff sollen als perfekte Gase betrachtet werden.  
Schwingungsfreiheitsgrade sollen als nicht angeregt betrachtet werden.

## Diplomvorpüfung in Thermodynamik I und II

### 5. Oktober 2006 - Teil II



4. Ein starrer Behälter des Volumens 1 Liter enthält 350 Gramm eines Gases. Dem Gas wird eine Wärme von 105 kJ zugeführt. Dadurch erhöht sich die Temperatur des Gases um 320 K.

Bestimmen Sie aus diesen Angaben für den vorliegenden Temperaturbereich den Mittelwert des Idealanteils der spezifischen Wärmekapazität bei konstantem Volumen.

Im interessierenden Zustandsbereich soll für das Gas die folgende Zustandsgleichung gelten:

$$z = \frac{p \cdot v}{R \cdot T} = 1 + \frac{B(T)}{v} \quad \text{mit: } B(T) = a + \frac{b}{T} + c \cdot \ln(T/K), \quad c = -2,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}, \quad R = 0,19 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$$

5. In einem Hybridkühlturm wird das Kühlwasser in einem Trockenteil und in einem Nassteil gekühlt. Dazu wird ein Drittel des gesamten Kühlwassermassenstroms zunächst in den Wärmeübertragern des Trockenteils abgekühlt und anschließend mit dem restlichen Kühlwassermassenstrom adiabatisch vermischt. Der gesamte Kühlwassermassenstrom wird dann im Nassteil versprüht und im offenen Kontakt mit der Luft abgekühlt. Im Trockenteil nimmt die durchströmende Luft Wärme auf; im Nassteil werden auf die Luft Wärme und Wasserdampf übertragen. Die Abkühlung des Kühlwassers im Trockenteil beträgt 5 K. Die Temperaturdifferenz des gesamten Kühlwassermassenstroms zwischen Ein- und Austritt des Kühlturms beträgt 14 K. Die Ströme trockener Luft durch den Nassteil und durch den Trockenteil sind gleich groß.

Bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C und einer relativen Feuchte von 50 % verlässt die Luft den Nassteil mit einer Temperatur von 38 °C und einer Übersättigung von 1 Gramm flüssigen Wassers pro Kilogramm trockener Luft. Die Schwadenströme aus Trocken- und Nassteil werden im Kühlturm adiabatisch vermischt. Der so entstehende Mischschwaden verlässt den Kühlturm.

Wie groß sind bei den angegebenen Bedingungen:

- das Verhältnis des vom Trockenteil abgeführten Wärmestroms zu dem vom Nassteil abgeführten Wärmestrom,
- die Temperatur und die relative Feuchte der Luft nach dem Trockenteil und
- die Temperatur und der Feuchtegrad des Mischschwadens?

Die Teile b. und c. sind mit Hilfe des beigefügten  $h_{1+x}, x$ -Diagramms zu lösen.

Änderungen kinetischer und potentieller Energie sollen vernachlässigt werden. Der verdunstende Wassermassenstrom soll gegenüber dem gesamten Kühlwassermassenstrom vernachlässigt werden.

# Diplomvorpüfung in Thermodynamik I und II

## 6. März 2007 - Teil I



1. Eine Kompressions-Kältemaschine soll mit dem Kältemittel R134a arbeiten und in zwei Verdampfern Wärme bei verschiedenen Temperaturen aufnehmen. Dazu wird der, den Kondensator im Siedezustand bei 10,2 bar verlassende Kältemittelstrom in zwei Teilströme aufgeteilt.

Der eine Teilstrom wird adiabatisch auf einen Druck von 3,5 bar gedrosselt und im ersten Verdampfer isobar verdampft. Der Teilstrom verlässt den Verdampfer trockengesättigt.

Der andere Teilstrom wird adiabatisch auf einen Druck von 1 bar gedrosselt und im zweiten Verdampfer isobar verdampft. Er verlässt den Verdampfer ebenfalls trockengesättigt.

Der erste Teilstrom wird nach dem Verdampfer adiabatisch von 3,5 bar auf 1 bar gedrosselt und anschließend mit dem zweiten Teilstrom adiabatisch bei 1 bar vermischt.

Nach der Vermischung wird der gesamte Kältemittelstrom adiabatisch auf Kondensatordruck komprimiert. Die Temperatur des komprimierten Kältemitteldampfes beträgt 85 °C. Im Kondensator wird das Kältemittel isobar abgekühlt und kondensiert.

- Zeichnen Sie ein Schema der Anlage.
- Stellen Sie den Prozess in einem p,h-Diagramm und einem T,s-Diagramm dar.
- Wie groß müssen die Massenströme durch die Verdampfer sein, wenn die Kälteleistung in jedem Verdampfer 500 W betragen soll?
- Berechnen Sie die Antriebsleistung des Kompressors.
- Wie viel Entropie wird bei der Kompression pro Sekunde erzeugt?

Änderungen kinetischer und potentieller Energie sollen vernachlässigt werden.

Auszug aus der Dampftafel von R134a:

p bar	t °C	h' J · g <sup>-1</sup>	h'' J · g <sup>-1</sup>	s' J · K <sup>-1</sup> · g <sup>-1</sup>	s'' J · K <sup>-1</sup> · g <sup>-1</sup>
10,2	40	256,1	418,3	1,190	1,708
3,5	5	206,7	400,4	1,024	1,721
1,0	-25	167,6	382,3	0,876	1,742

Mittelwerte der spezifischen Wärmekapazität des überhitzten Kältemitteldampfes für die interessierenden Temperaturbereiche

bei 10,2 bar:  $\bar{c}_p = 1,05 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$  und bei 1,0 bar:  $\bar{c}_p = 0,905 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$

2. Der Dampfdruck von n-Butan kann durch die folgende Gleichung beschrieben werden:

$$p = p_0 \left[ \frac{T}{T_0} \right]^A \cdot \exp \left[ B \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) \right] \text{ mit: } p_0 = 0,8 \text{ bar; } T_0 = 266,5 \text{ K; } A = -5,8; B = 16$$

Wie groß sind die Verdampfungsenthalpie und die Verdampfungsentropie pro Gramm n-Butan bei 10 °C, wenn der n-Butan-Dampf als ideales Gas betrachtet werden kann?

Die Dichte von flüssigem n-Butan beträgt bei 10 °C 590 kg/m<sup>3</sup>.

Molmasse von n-Butan: M = 58 g/mol.



3. Eine Stahlflasche mit einem Volumen von 25 l enthält Luft beim Umgebungszustand ( $p_U = 1 \text{ bar}$ ,  $t_U = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Sie ist über ein Ventil mit einem großen Pressluftbehälter verbunden, der Luft mit dem Druck 4 bar und mit der Temperatur  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  enthält. Nach Öffnen des Ventils strömt Luft bis zum Druckausgleich in die Stahlflasche ein.
- Wie groß sind nach dem Druckausgleich die Temperatur und die eingefüllte Masse, wenn der Auffüllvorgang als adiabatisch betrachtet werden kann?
  - Wie viel Entropie wird bei diesem Auffüllvorgang insgesamt erzeugt?
  - Wie groß sind schließlich die eingefüllte Masse und die abgeführte Wärme, wenn die Luft in der Stahlflasche nach dem Auffüllvorgang bei noch offenem Ventil wieder Umgebungstemperatur hat?
- Der Zustand der Luft im Pressluftbehälter soll während des Auffüllvorgangs als konstant angenommen werden.  
Die potentielle Energie soll vernachlässigt werden.  
Luft soll als perfektes Gas betrachtet werden mit:  $c_p = 1,0 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$  und  $R = 0,29 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ .
4. Luft strömt mit der konstanten Temperatur 300 K durch eine waagrechte Leitung veränderlichen Querschnitts. Die dabei der Luft zugeführte Wärme beträgt 10 Joule pro Gramm.
- Am Eintritt in die Leitung hat die Luft Umgebungsdruck ( $p_u = 1 \text{ bar}$ ).
- Berechnen Sie die spezifische technische Exergie der Luft am Eintritt der Leitung, und stellen Sie diese als Fläche im T,s-Diagramm dar.
  - Stellen Sie die Zustandsänderung der Luft in einem T,s-Diagramm dar, und kennzeichnen Sie in diesem Diagramm die Fläche, die ein Maß für die übertragene Wärme ist.
  - Wie groß ist der Druck am Austritt der Leitung?
  - Wie groß muss das Verhältnis der Austritts- zu der Eintrittsfläche sein, wenn die Austrittsgeschwindigkeit 10 mal so groß wie die Eintrittsgeschwindigkeit sein soll?
- Umgebungstemperatur: 280 K  
Die Luft soll reibungsfrei strömen und als perfektes Gas betrachtet werden mit:  
 $c_p = 1,0 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$  und  $R = 0,29 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ .

# Diplomvorpüfung in Thermodynamik I und II

## 6. März 2007 - Teil II



1. Das thermische Verhalten von Kohlendioxid soll durch folgende Zustandsgleichung beschrieben werden:  $p \cdot v = R \cdot T (1 + a \cdot p/T - b \cdot p/T^3 + c \cdot p^2/T^4)$  mit
- $$a = 2,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{K} \cdot \text{J}^{-1}, \quad b = 1,567 \text{ m}^3 \cdot \text{K}^3 \cdot \text{J}^{-1},$$
- $$c = 4,4 \cdot 10^{-6} \cdot \text{m}^6 \cdot \text{K}^4 \cdot \text{J}^{-2}, \quad R = 0,189 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}.$$
- Bestimmen Sie den zweiten Virialkoeffizienten für die Temperatur 400 K.
  - Oberhalb welcher Temperatur überwiegen unabhängig vom Druck die abstoßenden Wechselwirkungskräfte und oberhalb welchen Druckes überwiegen bei der Temperatur 400 K ebenfalls die abstoßenden Wechselwirkungskräfte?
2. Zur katalytischen Hydrierung von Kohlenmonoxid zu Methanol nach der Gleichung  $\text{CO} + 2\text{H}_2 \leftrightarrow \text{CH}_3\text{OH}$  werden einem Reaktor 1 mol Kohlenmonoxid und 2 mol Wasserstoff zugeführt.  
Bei einem Druck von 100 atm und der Temperatur 300 °C haben 20 % des eingesetzten Wasserstoffs reagiert.
- Bestimmen Sie die Zusammensetzung des den Reaktor verlassenden Gemischs.
  - Prüfen Sie rechnerisch nach, ob unter den oben genannten Bedingungen chemisches Gleichgewicht erreicht ist.
- Kohlenmonoxid, Wasserstoff und Methanol sollen als perfekte Gase betrachtet werden.  
Werte der molaren Standardenthalpie, der molaren Standardentropie und der molaren Wärmekapazität:

	$\bar{H}^\theta / (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$\bar{S}^\theta / (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \text{K}^{-1})$	$\bar{C}_p / (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \text{K}^{-1})$
$\text{CH}_3\text{OH}$	-201,2	239,7	44
$\text{CO}$	-110,5	197,4	29
$\text{H}_2$	0	130,6	29

3. Ein senkrecht stehender, nach außen wärmeisolierter Zylinder ist am oberen Ende durch einen wärmeisolierenden Kolben verschlossen. Der Zylinder enthält ein Gemisch aus Helium (He) und Stickstoff ( $\text{N}_2$ ). Im Gemisch ist 1 mol Helium vorhanden. Das Gemisch wird durch eine im Zylinder eingebaute Heizung aufgeheizt und dehnt sich dabei isobar aus.
- Wie viel mol Stickstoff muss das Gemisch enthalten, wenn die dem Helium zugeführte Wärme so groß sein soll, wie die dem Stickstoff zugeführte Wärme?
  - Welcher Anteil der Expansionsarbeit wird vom Helium abgegeben?
- Helium und Stickstoff sollen als perfekte Gase betrachtet werden.  
Schwingungsfreiheitsgrade sollen als nicht angeregt betrachtet werden.

# Diplomvorpüfung in Thermodynamik I und II

## 6. März 2007 - Teil II



4. Übersättigte feuchte Luft der Temperatur  $40\text{ °C}$  wird beim Umgebungsdruck  $p_u = 1\text{ bar}$  von einer Versuchsanlage angesaugt. Die Luft wird in dieser Anlage in einem nach außen wärmeisolierten Wärmeübertrager auf  $4\text{ °C}$  abgekühlt und danach durch einen wärmeisolierten Kondensatabscheider geleitet. Darin werden pro Sekunde bei einem Druck von  $0,7\text{ bar}$   $0,12\text{ g}$  flüssigen Wassers abgeschieden. Anschließend strömt die Luft durch eine Pumpe und einen Gaszähler. Im Gaszähler wird bei Umgebungsdruck und einer Temperatur von  $15\text{ °C}$  ein Volumenstrom von  $2\text{ l/s}$  gemessen.
- Wie viel Gramm flüssigen Wassers pro kg trockener Luft enthält die Luft am Eintritt in die Versuchsanlage?
  - Wie viel Wärme muss der Luft im Wärmeübertrager pro Sekunde entzogen werden? Änderungen kinetischer und potentieller Energie sollen vernachlässigt werden. Luft und Wasserdampf sollen als perfekte Gase betrachtet werden.

Stoffdaten:

Wasserdampf	Luft	flüssiges Wasser
$R_D = 0,46\text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$	$R_L = 0,29\text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$	$c_w = 4,2\text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$
$c_{pD} = 1,9\text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$	$c_{pL} = 1,0\text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$	

Verdampfungsenthalpie des Wassers bei  $0\text{ °C}$ :  $\Delta h_v = 2500\text{ J/g}$

Im interessierenden Bereich soll für den Dampfdruck des Wassers folgende Gleichung gelten:

$$p_s(T) = a \cdot \exp(-b/T + c); \quad a = 0,017\text{ bar} \quad b = 5310\text{ K} \quad \text{und} \quad c = 18,43$$

- 5.
- Skizzieren Sie das  $p,h$ -Diagramm eines realen Stoffes. Tragen Sie darin das Nassdampfgebiet, die Inversionskurve des differentiellen Joule-Thomson-Effektes und die Inversionskurve des integralen Joule-Thomson-Effektes für die Drosselung auf den Druck  $p = 0$  ein, und nennen Sie die Bedingungen aus denen sich die beiden Inversionskurven ergeben.
  - Leiten Sie für ein reales Gas einen analytischen Ausdruck für die spezifische Enthalpiedifferenz ( $h(p,T) - h(p_1,T_1)$ ) her, und bestimmen Sie die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck als Funktion von Druck und Temperatur.

Das thermische Zustandsverhalten des Gases soll durch die Gleichung

$p \cdot v = R \cdot T + B(T) \cdot p$  beschrieben werden. Für die spezifische Wärmekapazität beim Druck  $p = 0$  soll  $c_p^0(T) = d + c \cdot T$  gelten.

Mit:  $B(T) = a + \frac{b}{T}$



## Diplomvorpüfung in Thermodynamik I und II

1. Oktober 2007 - Teil I

1. Eine Kühl-Gefrier-Kombination soll mit dem Kältemittel Propan arbeiten und in zwei Verdampfern Wärme bei verschiedenen Temperaturen aufnehmen. Dazu wird der den Kondensator im Siedezustand bei 10,8 bar verlassende Kältemittelstrom in zwei Teilströme geteilt.

Der eine Teilstrom wird adiabatisch auf einen Druck von 4,7 bar gedrosselt und im Kühlfachverdampfer isobar verdampft. Er verlässt den Kühlfachverdampfer trockengesättigt. Der andere Teilstrom wird adiabatisch auf 2,4 bar gedrosselt und im Gefrierfachverdampfer isobar verdampft. Er verlässt den Gefrierfachverdampfer mit einer Überhitzung von 2 K.

Der Kältemittelstrom, der den Gefrierfachverdampfer verlässt, wird durch einen ersten Kompressor adiabatisch auf den Druck des Kühlfachverdampfers komprimiert und danach adiabatisch mit dem Kältemittelstrom aus dem Kühlfachverdampfer beim Druck 4,7 bar vermischt. Der gesamte Kältemittelstrom wird anschließend in einem zweiten Kompressor adiabatisch auf Kondensatordruck komprimiert.

a. Zeichnen Sie ein Schema der Anlage und stellen Sie den Prozess in einem p,h-Diagramm dar.

b. Wie groß müssen die Kältemittelströme sein, wenn die Kälteleistung des Kühlfachverdampfers 250 W und die Kälteleistung des Gefrierfachverdampfers 150 W betragen sollen?

c. Berechnen Sie die Antriebsleistungen der beiden Kompressoren.

Die Kompression in den beiden Kompressoren soll als reversibel betrachtet werden.

Dampfförmiges Propan soll als perfektes Gas betrachtet werden mit:  $R = 0,19 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$

und  $c_p = 1,55 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$

Änderungen kinetischer und potentieller Energie sollen vernachlässigt werden.

Auszug aus der Dampftafel von Propan:

t	°C	-20	0	30
p	bar	2,4	4,7	10,8
h'	J/g	50,7	97,4	172,1
h''	J/g	454,0	476,0	503,0

2. Wie viel Arbeit kann eine Wärmekraftmaschine maximal abgeben, wenn sie einem ersten Reservoir mit der Wärmekapazität  $C_1 = 1000 \text{ kJ/K}$  Wärme entzieht und an ein zweites Reservoir mit der Wärmekapazität  $C_2 = 2000 \text{ kJ/K}$  Wärme abgibt?

Am Anfang betragen die Temperaturen der beiden Reservoirs  $t_1 = 456 \text{ °C}$  und  $t_2 = 70 \text{ °C}$ .

Die Volumina der beiden Reservoirs sollen als konstant betrachtet werden.

# Diplomvorpüfung in Thermodynamik I und II

## 1. Oktober 2007 - Teil I



3. Die Dampfdruckkurve von flüssigem Ammoniak und die Dampfdruckkurve von festem Ammoniak sollen die Form  $\ln(p/\text{bar}) = a - b/T$  haben. Bestimmen Sie daraus die Schmelzenthalpie. Es soll angenommen werden, dass die Schmelzenthalpie, das spezifische Volumen des festen Ammoniaks und das spezifische Volumen des flüssigen Ammoniaks konstant sind. Das gasförmige Ammoniak soll als ideales Gas mit  $R = 0,488 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$  betrachtet werden.

Für flüssiges Ammoniak gilt:  $a_D = 12,665$ ,  $b_D = 3023 \text{ K}$ ,  $v_{fl} = 1,3 \text{ l/kg}$ .

Für festes Ammoniak gilt:  $a_S = 16,407$ ,  $b_S = 3754 \text{ K}$ ,  $v_f = 1,2 \text{ l/kg}$ .

4. In einem Zylinder sollen 0,1 g Wasser ausgehend vom Volumen 4 l und von der Temperatur 20 °C auf 100 bar komprimiert werden.
- Stellen Sie für den Fall, dass die Kompression reversibel adiabatisch erfolgt, die Kompression in einem T,s-Diagramm dar, und berechnen Sie die dabei zu übertragende Arbeit.
  - Stellen Sie für den Fall, dass die Kompression isotherm erfolgt, die Kompression in einem p,v-Diagramm dar, und berechnen Sie, wie viel Arbeit und wie viel Wärme übertragen werden. Für die Rechnung soll flüssiges Wasser als inkompressibel betrachtet werden.

Auszug aus der Dampf tafel von Wasser:

$t$ °C	$p$ bar	$v'$ $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	$v''$ $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	$h'$ $\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$	$h''$ $\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$	$s'$ $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$	$s''$ $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$
20	0,023	0,001	57,72	83,9	2538	0,296	8,688
310	100	0,0015	0,02	1408	2727	3,360	5,620

Bei 100 bar soll für dampfförmiges Wasser gelten:  $p \cdot v = R \cdot T + a \cdot p$

mit:  $a = -2,45 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $R = 0,461 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$  und  $\bar{c}_p = 2,45 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ .

5. Zum Antrieb eines Notstromaggregates soll eine Druckluftturbine benutzt werden. Die Druckluft soll einem starren Behälter entnommen und in der Turbine auf den Druck 1 bar entspannt werden. Die Luft im Behälter hat zu Anfang einen Druck von 20 bar und eine Temperatur von 300 K. Bis zu einem Restdruck von 1,5 bar kann dem Behälter Druckluft entnommen werden. Nach den Angaben des Herstellers soll die Turbine bei einem Behältervolumen von 250 l über einen Zeitraum von 10 Minuten eine mittlere Leistung von einem Kilowatt abgeben können. Prüfen Sie rechnerisch nach, ob das Behältervolumen von 250 l für die angegebene Leistung ausreichend sein kann. Die Zustandsänderungen der Luft im Behälter und in der Turbine sollen als adiabatisch betrachtet werden. Luft soll als perfektes Gas mit  $c_p = 1,0 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$  und  $c_v = 0,71 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$  betrachtet werden. Kinetische und potentielle Energien sollen vernachlässigt werden. Die Massen der vor und nach dem Ausströmen in den Leitungen und in der Turbine enthaltenen Luft sollen ebenfalls vernachlässigt werden.



# Diplomvorpüfung in Thermodynamik I und II

## 1. Oktober 2007 - Teil II

1. Stickstoff wird in einem mit einem Kolben verschlossenen Zylinder ausgehend von 100 bar und 300 K auf 400 K isobar aufgeheizt.

In welchem Verhältnis steht dabei die dem Stickstoff zugeführte Wärme zu der vom Stickstoff abgegebenen Expansionsarbeit, wenn der Stickstoff

- als perfektes Gas betrachtet wird, dessen Schwingungsfreiheitsgrade nicht angeregt sein sollen?
- als reales Gas betrachtet wird, dessen Verhalten im interessierenden Zustandsbereich durch die Gleichung

$$p \cdot v = R \cdot T + B(T) \cdot p \quad \text{mit} \quad R = 0,30 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \quad \text{und} \quad B(T) = a + b \cdot T^{1/2}$$

$$a = -0,27 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1} \quad b = 0,016 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1} \cdot \text{K}^{-1/2}$$

beschrieben werden soll und für dessen mittlere spezifische Wärmekapazität im interessierenden Temperaturbereich beim Druck  $p = 0$   $\bar{c}_p^0 = 1,1 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$  gilt.

2. Zur Erzeugung flüssiger Luft wird in einer stationär nach dem Linde-Verfahren arbeitenden Anlage Luft ausgehend von 1 bar und 288 K isotherm auf 200 bar komprimiert, in einem nach außen wärmeisolierten Gegenstromwärmeübertrager isobar abgekühlt und auf 1 bar gedrosselt. Die dabei entstehende flüssige Luft wird abgeschieden. Der nicht verflüssigte Anteil dient im Gegenstromwärmeübertrager zur Kühlung der einströmenden Luft. Er verlässt den Gegenstromwärmeübertrager mit einer Temperatur von 280 K.

- Zeichnen Sie ein Anlagenschema und skizzieren Sie den Prozess in einem p,h-Diagramm.
- Um wie viel Prozent nimmt die Ausbeute an flüssiger Luft ab, wenn – bei sonst unveränderten Bedingungen - aus der Umgebung eine Wärme von 1 Joule pro Gramm komprimierter Luft an den Gegenstromwärmeübertrager abgegeben wird?

Änderungen kinetischer und potentieller Energie sollen vernachlässigt werden.  
Eigenschaften von Luft:

p/bar	h / J · g <sup>-1</sup>		h' / J · g <sup>-1</sup>
	T=280 K	T=288 K	
1	280		-127
200		250	

3. In einem Reaktor wird Ammoniak bei 500 °C und 300 atm nach der Gleichung  $\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{NH}_3$  synthetisiert.

Bei welchem Gesamtdruck würde sich dieselbe Gleichgewichtszusammensetzung einstellen, wenn die Reaktionstemperatur um 50 K höher wäre?

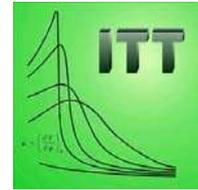
Stickstoff, Wasserstoff und Ammoniak sollen als perfekte Gase betrachtet werden.

Werte der molaren Standardenthalpie, der molaren Standardentropie und der molaren Wärmekapazität:

	$\bar{H}^0 / \text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	$\bar{S}^0 / \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$	$\bar{C}_p / \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$
$\text{N}_2$	0	191,5	29
$\text{H}_2$	0	130,6	29
$\text{NH}_3$	-46,19	192,5	36

# Diplomvorpüfung in Thermodynamik I und II

## 1. Oktober 2007 - Teil II



4. In einer wärmeisolierten Düse wird ein Gemisch aus Helium und Kohlendioxid vom Zustand  $p_1 = 2 \text{ bar}$ ,  $T_1 = 300 \text{ K}$  auf den Druck  $p_2 = 1 \text{ bar}$  entspannt.

Wie viel mol-% Kohlendioxid darf das Gemisch maximal enthalten, wenn die Temperatur am Austritt aus der Düse nicht größer als  $240 \text{ K}$  sein soll?

Helium und Kohlendioxid sollen als perfekte Gase betrachtet werden mit:

$$\bar{C}_{p\text{He}} = 20,8 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ und } \bar{C}_{p\text{CO}_2} = 45,75 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}.$$

5. Eine Klimaanlage soll aus einer adiabatischen Mischkammer, einem nach außen wärmeisolierten Kühler mit Wasserabscheider und einem nach außen wärmeisolierten Lufterhitzer bestehen. Sie soll einen Raum mit Luft der Temperatur  $t = 22 \text{ }^\circ\text{C}$  und der relativen Feuchte  $\phi = 50 \%$  versorgen.

Ein Teil der Raumabluft des Zustandes  $t_A = 32 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $\phi_A = 80 \%$  wird zurückgeführt. Dieser Teil der Raumabluft wird in der Mischkammer adiabatisch mit Umgebungsluft ( $t_U = 14 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\phi_U = 60 \%$ ) vermischt. Danach wird der gesamte Luftstrom abgekühlt und so weit kontinuierlich entfeuchtet, dass durch anschließendes Aufheizen der gewünschte Luftzustand ( $t = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\phi = 50 \%$ ) erreicht wird.

- Skizzieren Sie ein Schema der Klimaanlage.
- Bestimmen Sie den Zustand der Luft am Austritt der Mischkammer.
- Wie groß ist das Verhältnis des im Kühler übertragenen Wärmestroms zu dem im Lufterhitzer übertragenen Wärmestrom?
- Wie groß ist dieses Verhältnis, wenn bei sonst gleichen Bedingungen die Luftführung in der Klimaanlage so verändert wird, dass die zurückgeführte Raumabluft erst den Kühler mit kontinuierlicher Wasserabscheidung durchströmt und dann der Mischkammer zugeführt wird.

Der gesamte Vorgang soll bei einem Druck von  $1 \text{ bar}$  ablaufen.

Der Massenstrom trockener Luft der zurückgeführten Raumabluft ist  $1,5$ -mal so groß wie der Massenstrom trockener Luft der zugemischten Umgebungsluft.

Die Enthalpie des abgeschiedenen Wassers und Änderungen kinetischer und potentieller Energie sollen vernachlässigt werden.

Die Aufgabe soll mit Hilfe des beigefügten  $h_{1+x},x$ -Diagramms gelöst werden.

## Frühjahr 2008, 11. März 2008, Thermodynamik I

1. In einem Dampfkraftwerk werden pro Sekunde 147 kg Wasser aus dem Kondensator (Druck: 0,07 bar) in den Kessel (Druck: 190 bar) gefördert. Im Kessel wird das Wasser auf Siedetemperatur erwärmt, verdampft und auf 535 °C überhitzt. Anschließend wird der Dampf in der zweiteiligen Turbine adiabatisch auf den Kondensatordruck entspannt.

Im Hochdruckteil der Turbine wird der Dampf auf 43 bar und 331 °C entspannt. Anschließend wird er auf 535 °C zwischenüberhitzt, um danach im Niederdruckteil auf den Kondensatordruck expandiert zu werden. Nach dieser Expansion beträgt der Dampfanteil 0,95.

- a) Stellen Sie den Prozess in einem T,s-Diagramm und in einem p,v-Diagramm dar.
- b) Berechnen Sie die Leistungen von Hochdruck- und Niederdruckteil der Turbine und den thermischen Wirkungsgrad des Kraftwerkes.

Zur Erhöhung des Wirkungsgrades werden bei einem Zwischendruck aus dem Niederdruckteil der Turbine 10 kg/s Dampf ( $h = 3305 \text{ J/g}$ ) entnommen und vor der Kesselspeisepumpe dem flüssigen Speisewasser in einem Mischvorwärmer zugemischt. Die Eintrittstemperatur des flüssigen Speisewassers in den Mischvorwärmer ist gleich der Kondensationstemperatur.

- c) Berechnen Sie den thermischen Wirkungsgrad für den modifizierten Prozess.

Die Vermischung im Mischvorwärmer soll als isobar betrachtet werden.

Die Antriebsleistung der Kesselspeisepumpe und Änderungen kinetischer und potentieller Energie sollen vernachlässigt werden. Die Kesselspeisepumpe und der Mischvorwärmer sollen wärmeisoliert sein.

Auszug aus der Dampftafel von Wasser:

p / bar	t / °C	h' / J · g <sup>-1</sup>	h'' / J · g <sup>-1</sup>
0,07	39,0	164	2573
43	254,7	1109	2799
190	361,4	1779	2461

Für die jeweilige mittlere spezifische Wärmekapazität von überhitztem Wasserdampf soll im interessierenden Temperaturbereich gelten:

$$p = 43 \text{ bar} : \bar{c}_p = 2,58 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} ; p = 190 \text{ bar} : \bar{c}_p = 5,18 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} .$$

2. Ein senkrecht stehender, nach außen wärmeisolierter Zylinder des Volumens 2 l, der durch einen wärmeundurchlässigen Kolben verschlossen ist, enthält 100 g Wassernassdampf der Temperatur 180 °C. Durch eine im Zylinder eingebaute Heizung kann der Flüssiganteil des Wassernassdampfes verdampft werden. Die Verdampfung kann bei festgehaltenem oder bei reibungsfrei gleitendem Kolben erfolgen.

- a) Zeichnen Sie ein T,s-Diagramm von Wasser mit allen Zweiphasengebieten und tragen Sie darin den Vorgang der Verdampfung bei festgehaltenem und bei reibungsfrei gleitendem Kolben ein.
- b) Kennzeichnen Sie die Fläche im T,s-Diagramm, die ein Maß für die beim jeweiligen Verdampfungsvorgang übertragene Wärme ist.
- c) Entscheiden Sie rechnerisch ob bei der vollständigen Verdampfung bei festgehaltenem Kolben mehr oder weniger Wärme übertragen werden muss als bei reibungsfrei gleitendem Kolben.

Im interessierenden Zustandsbereich soll die folgende Dampfdruckgleichung gelten:

$$p = a + b \cdot T + c \cdot T^2 \text{ mit } a = 551 \text{ bar}, b = -2,62 \text{ bar/K und } c = 3,15 \cdot 10^{-3} \text{ bar/K}^2 .$$

Trockengesättigter Wasserdampf soll als perfektes Gas betrachtet werden mit  $c_p = 2,98 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$

$$\text{und } R = 0,46 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} .$$

3. Ein Wasserstrom der Temperatur 20 °C wird in zwei Teilströme geteilt. Eine Wärmepumpe kühlt den einen Teilstrom isobar auf 3 °C ab und erwärmt den anderen Teilstrom isobar auf 34 °C. Der Wärmepumpe werden 5 kW elektrischer Leistung zugeführt.

- Wie viel Kilogramm Wasser können pro Sekunde maximal abgekühlt werden?
- Skizzieren Sie in ein T,s-Diagramm den Abkühl- und den Aufwärmvorgang und kennzeichnen Sie in diesem Diagramm die Flächen, die den Änderungen der spezifischen Enthalpie der Wasserströme entsprechen und machen Sie deutlich, welche Fläche größer ist.

Änderungen kinetischer und potentieller Energie sollen vernachlässigt werden. Wasser soll als inkompressibel betrachtet werden mit  $c_w = 4,2 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ . Die Wärmepumpe steht nur mit den beiden Wasserströmen in thermischem Kontakt.

4. Ein starrer Behälter des Volumens 10 l enthält Luft im Umgebungszustand. Er wird durch einen Kompressor, der Umgebungsluft einsaugt, bis zu einem Druck von 10 bar aufgefüllt. Durch Kühlung wird erreicht, dass die Kompression und der Füllvorgang isotherm erfolgen.

- Wie viel Wärme wird insgesamt von der Luft im Behälter und im Kompressor abgegeben?
- In welchem Verhältnis stehen die im Behälter und im Kompressor übertragenen Wärmen?

Der Umgebungsdruck beträgt 1 bar. Luft soll als perfektes Gas betrachtet werden. Kinetische Energie und potentielle Energie und die in der Leitung zwischen Kompressor und Behälter verbleibende Luft sollen vernachlässigt werden. Wärme soll nur im Behälter und im Kompressor übertragen werden.

## Frühjahr 2008, 11. März 2008, Thermodynamik II

1. In einem wärmeisolierten Ventil wird Wasserdampf ausgehend vom Zustand 100 bar und 800 K auf den Druck 1 bar gedrosselt.

- Welche Temperatur stellt sich nach der Drosselung ein?
- Wie groß ist der bei der Drosselung pro Gramm Wasserdampf entstehende Exergieverlust (Umgebungstemperatur 300 K)?

Das thermische Zustandsverhalten des Wasserdampfes soll im interessierenden Zustandsbereich durch die folgende Zustandsgleichung beschrieben werden:

$$p \cdot v = R \cdot T + B(T) \cdot p \quad \text{Mit: } B(T) = a + b \cdot \left(\frac{100}{T}\right)^2, \quad a = 0,0056 \text{ m}^3/\text{kg}, \quad b = -0,524 \text{ m}^3 \cdot \text{K}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \quad \text{und } R = 0,462 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$$

Beim Druck 1 bar soll im interessierenden Temperaturbereich für die mittlere spezifische Wärmekapazität gelten:

$$\bar{c}_p (1 \text{ bar}) = 2,1 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$$

Änderungen kinetischer und potentieller Energie sollen vernachlässigt werden.

2. Ein Aspirationspsychrometer zeigt im Beharrungszustand am feuchten Thermometer eine Temperatur von 8 °C und am trockenen Thermometer von 12 °C an.

- Skizzieren Sie in einem  $h_{1+x}, x$ -Diagramm für feuchte Luft, das Linien konstanter relativer Feuchte und die 0 °C-Isotherme enthält, wie der Feuchtegrad der Luft aus den beiden Temperaturen zeichnerisch bestimmt werden kann.
- Berechnen Sie den Feuchtegrad und die relative Feuchte der Luft.

Trockene Luft und Wasserdampf sollen als perfekte Gase betrachtet werden.

Stoffdaten:

Luft:  $c_{pL} = 1,0 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$   $R_L = 0,29 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$

Wasserdampf:  $c_{pD} = 1,86 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$   $R_D = 0,46 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$

flüssiges Wasser:

spezifische Wärmekapazität  $c_w = 4,19 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$

Verdampfungsenthalpie bei 0 °C  $\Delta h_v = 2500 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$

Sättigungsdampfdruck bei 8 °C  $p_s = 10,72 \text{ mbar}$  , bei 12 °C  $p_s = 14,01 \text{ mbar}$

Der Gesamtdruck beträgt 1 bar.

Die Luft am feuchten Thermometer soll gesättigt sein. Luft und Wasser sollen adiabatisch vermischt werden. Änderungen kinetischer und potentieller Energie sollen vernachlässigt werden.

3. Helium und Stickstoff werden ausgehend vom Druck  $p_1 = 1 \text{ bar}$  und der Temperatur  $T_1 = 300 \text{ K}$  auf  $p_2 = 5 \text{ bar}$  reversibel adiabatisch komprimiert und anschließend in einer Mischkammer adiabatisch vermischt. Der Druck des Gemisches beträgt 5 bar. Die Molenströme von Helium und Stickstoff verhalten sich wie 4:1.

- Wie groß sind die Temperaturen der beiden Gase nach der Kompression und nach der Vermischung?
- Wie viel Entropie wird beim gesamten Prozess pro Mol Gemisch erzeugt?

Helium und Stickstoff sollen als perfekte Gase betrachtet werden.

Molare Wärmekapazitäten:  $\bar{C}_{pHe} = 21 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$   $\bar{C}_{pN_2} = 30 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

Änderungen kinetischer und potentieller Energie sollen vernachlässigt werden.

4. Die Ammoniaksynthese wird bei einer Temperatur von 500 °C und einem Druck von 200 atm durchgeführt.

Bestimmen Sie die Gleichgewichtszusammensetzung des Reaktionsgemisches, wenn von stöchiometrischem Einsatzgemisch ausgegangen wird.

Die an der Reaktion beteiligten Stoffe sollen als perfekte Gase betrachtet werden.

Molare Wärmekapazitäten:

	NH <sub>3</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
$\bar{C}_p / \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$	36	29	29

Für den Standardzustand gilt:  $\ln \bar{K}_p = 13,34$   $\Delta_R H^\ominus = -92,24 \text{ kJ}$

- Skizzieren Sie ein  $p \cdot v, p$ -Diagramm eines realen Gases und tragen Sie darin ein, das Nassdampfgebiet, die kritische Isotherme, eine unterkritische und eine überkritische Isotherme, die Boyle-Temperatur, die Boyle-Kurve und die klassische Idealkurve. Geben Sie dabei die Bedingungen an, die auf der Boyle-Kurve und auf der klassischen Idealkurve gelten.
- Erläutern Sie weiterhin, wie man mit Hilfe des  $p \cdot v, p$ -Diagramms für eine Temperatur ( $T_1$ ) graphisch den zweiten Virialkoeffizienten  $B(T_1)$  bestimmt und warum die Boyle-Temperatur eine Art Grenzkurve ist.

## Herbst 2008, 7. Oktober 2008, Thermodynamik I

1. Eine Kombination aus Rankineprozess und Kaltdampfmaschinenprozess in Verbindung mit einem Sonnenkollektor wird als Kühlanlage für sonnenreiche Gegenden vorgeschlagen. Ein Teilstrom des Arbeitsstoffes Ammoniak wird ausgehend vom Siedezustand bei 12 bar durch eine Pumpe adiabatisch auf 42 bar gefördert, in einem Sonnenkollektor isobar erwärmt und vollständig verdampft. Anschließend wird dieser Teilstrom in einer Turbine adiabatisch auf 12 bar entspannt. Der andere Teilstrom wird ebenfalls ausgehend vom Siedezustand bei 12 bar in einer Drossel adiabatisch auf 3 bar gedrosselt, in einem Verdampfer vollständig isobar verdampft und anschließend in einem Verdichter adiabatisch auf 12 bar komprimiert. Die Temperatur des Ammoniakdampfes beträgt nach dem Verdichten 95 °C. Der den Verdichter verlassende Teilstrom und der die Turbine verlassende Teilstrom werden in einem Mischer isobar vermischt und anschließend in einem gemeinsamen Kondensator isobar vollständig kondensiert.

- Zeichnen Sie ein Schema der Anlage und tragen Sie die Teilprozesse in ein T,s-Diagramm ein.
- Bestimmen Sie das Massenstromverhältnis der beiden Teilströme.
- Welchen Wärmestrom muss der Sonnenkollektor aufnehmen, wenn die Kälteleistung der Anlage 500 kW betragen soll?

Die Entspannung in der Turbine soll als reversibel betrachtet werden. Die Turbinenleistung wird ausschließlich zum Antrieb des Verdichters benutzt (und reicht hierfür aus). Die Antriebsleistung der Pumpe und Änderungen kinetischer und potentieller Energie sollen vernachlässigt werden.

Auszug aus der Dampftafel von Ammoniak (gerundete Werte):

p bar	t °C	h' J · g <sup>-1</sup>	h'' J · g <sup>-1</sup>	s' J · K <sup>-1</sup> · g <sup>-1</sup>	s'' J · K <sup>-1</sup> · g <sup>-1</sup>
3	-10	372,8	1669	4,02	8,94
12	30	560,4	1706	4,68	8,45
42	80	819,5	1696	5,45	7,93

Die mittlere spezifische Wärmekapazität von Ammoniakdampf beträgt bei 12 bar im interessierenden Temperaturbereich:  $\bar{c}_p = 2,6 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ .

- Ein wärmeisolierter, starrer Behälter ist durch einen wärmedurchlässigen, verriegelten Kolben in zwei Kammern mit je einem Volumen von 1 l geteilt. Der Behälter enthält Luft von Umgebungstemperatur ( $T_u = 300 \text{ K}$ ). Die Luft in der linken Kammer hat einen Druck von 1 bar. In der rechten Kammer beträgt der Druck der Luft 20 bar. Der Kolben wird entriegelt. Es stellt sich nach einiger Zeit Druck- und Temperaturgleichgewicht zwischen den beiden Kammern ein.
  - Wie groß sind Temperatur und Druck nach dem Ausgleichsvorgang?
  - Wie viel Entropie wird bei dem Ausgleichsvorgang erzeugt?
  - Wie groß ist die Exergieänderung des Gesamtsystems?

Der Kolben soll reibungsfrei gleiten. Luft soll als perfektes Gas betrachtet werden mit:

$$c_p = 1,0 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}, \quad R = 0,29 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$$

3. In einem Zylinder des Volumens 10 l, der mit einem zu Beginn arretierten Kolben verschlossen ist, befindet sich Wassernassdampf der Temperatur 50 °C. Nach Entfernen der Arretierung wird der Wassernassdampf bis zum Druckausgleich mit der Umgebung (1 bar) komprimiert.
- Zeichnen Sie ein p,T-Diagramm und ein p,v-Diagramm für Wasser und kennzeichnen Sie darin die verschiedenen Phasen.
  - Wie viel Gramm Wasser darf der Zylinder maximal enthalten, damit nach der Kompression der Zylinder vollständig mit flüssigem Wasser im Siedezustand gefüllt ist? Zeichnen Sie diesen Kompressionsvorgang in die beiden Diagramme ein.

Die Kompression soll als reversibel adiabatisch betrachtet werden. Die spezifische Wärmekapazität und die Dichte von flüssigem Wasser im Siedezustand sollen als konstant betrachtet werden.

$$c_w = 4,18 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}, \quad \rho_w = 970 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Bei der Temperatur 50 °C beträgt die Steigung der Dampfdruckkurve:  $6,28 \text{ mbar} \cdot \text{K}^{-1}$ .

4. Zwei Behälter enthalten jeweils 1000 Kilogramm Wasser bei Umgebungsdruck. Die Temperatur des Wassers im Behälter 1 beträgt zunächst 90 °C. Das Wasser im Behälter 2 hat anfangs Umgebungstemperatur ( $t_U = 20 \text{ °C}$ ).
- Wie groß ist die technische Exergie des Wassers im Behälter 1 bei der Anfangstemperatur?
  - Stellen Sie die spezifische technische Exergie des Wassers im Behälter 1 bei der Anfangstemperatur als Fläche im T,s-Diagramm dar.
  - Wie viel Arbeit könnte eine reversibel arbeitende Wärmekraftmaschine maximal abgeben, wenn sie dem Wasser des Behälters 1 Wärme entzieht und es dadurch isobar abkühlt und an das Wasser im Behälter 2 Wärme abgibt und es damit isobar erwärmt.
  - Stellen Sie diese Arbeit als Fläche im T,s-Diagramm dar.

Außer den Wärmen, die auf das Wasser der Behälter 1 und 2 übertragen werden, treten keine Wärmen auf. Die Wärmekapazitäten der Behälter und Änderungen des Energieinhaltes der Wärmekraftmaschine sollen vernachlässigt werden.

Wasser soll als inkompressibel betrachtet werden mit:  $c = 4,18 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ .

5. Ein starrer, außen wärmeisolierter, wieder befüllbarer Behälter des Innenvolumens 15 l hat die Temperatur 300 K und enthält Luft der gleichen Temperatur. Der Behälter wird durch Pressluft, die mit der Temperatur 300 K einströmt, auf 200 bar wieder aufgefüllt.

Wie groß muss bei der Temperatur 300 K der im Behälter verbliebene Restdruck mindestens sein, wenn die Temperatur des Behälters und der darin enthaltenen Luft nicht höher als 371 K sein soll?

Luft soll als perfektes Gas betrachtet werden mit:  $c_p = 1,0 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$  und  $R = 0,29 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ .

Die Wärmekapazität des Behälters beträgt  $C = 1,4 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1}$ .

Kinetische und potentielle Energien der einströmenden Luft sollen vernachlässigt werden.

## Herbst 2008, 7. Oktober 2008, Thermodynamik II

1. In einem Nasskühlturm wird das Kühlwasser im offenen Kontakt mit der durch den Kühlturm strömenden Luft gekühlt, indem es in den Einbauten des Kühlturms Wärme an die Luft und an das in die Luft verdunstende Wasser abgibt. Die in den Kühlturm hineinströmende Luft hat eine Temperatur von 10 °C und eine relative Feuchte von 70 %. Die Luft verlässt die Einbauten des Kühlturms mit einer Temperatur von 30 °C und einer Übersättigung von einem Gramm Wasser pro Kilogramm trockener Luft. Das Verhältnis des Massenstroms trockener Luft zu dem Kühlwassermassenstrom beträgt 0,8.

- a) Wie groß ist der Feuchtegrad, der in den Kühlturm einströmenden Luft?  
 b) Wie groß ist die Temperaturdifferenz um die das Kühlwasser gekühlt wird?

Außer der Wärme, die vom Kühlwasser an die Luft abgegeben wird, werden keine weiteren Wärmen übertragen. Der Massenstrom verdunstenden Kühlwassers soll gegenüber dem Kühlwassermassenstrom vernachlässigt werden. Luft und Wasserdampf sollen als perfekte Gase betrachtet werden. Flüssiges Wasser soll als inkompressibel betrachtet werden. Änderungen kinetischer und potentieller Energie sollen vernachlässigt werden. Der Gesamtdruck beträgt 1 bar.

Stoffwerte für Wasser und Luft:

Flüssiges Wasser:  $c_w = 4,2 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$   $\Delta h_v(0^\circ\text{C}) = 2500 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$

Wasserdampf:  $c_{pD} = 1,9 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$   $R_D = 0,46 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ ;  $p_s(10^\circ\text{C}) = 12,3 \text{ mbar}$   $p_s(30^\circ\text{C}) = 42,4 \text{ mbar}$

Luft:  $c_{pL} = 1,0 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$   $R_L = 0,29 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$

2. In einer Anlage wird ein Gas ausgehend von  $T_1 = 300 \text{ K}$  und  $v_1 = 0,057 \text{ m}^3/\text{kg}$  adiabatisch auf  $v_2 = v_1/20$  komprimiert und anschließend isochor aufgeheizt. Die pro Gramm Gas zugeführte Wärme beträgt 300 J/g.
- a) Berechnen Sie die spezifische Wärmekapazität  $c_v$  beim spezifischen Volumen  $v_2$ .  
 b) Wie groß ist die Temperatur nach der Kompression?  
 c) Wie groß ist die Temperatur nach der Aufheizung?

Die Kompression soll reversibel erfolgen. Im interessierenden Zustandsbereich soll für das Gas die folgende Zustandsgleichung gelten:

$$Z = \frac{p \cdot v}{R \cdot T} = 1 + \frac{B(T)}{v} \quad \text{mit: } B(T) = a + \frac{b}{T} + c \cdot \ln(T/K) \quad \text{und}$$

$$a = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad c = -2,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad R = 0,19 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$$

Der Idealanteil ( $v \rightarrow \infty$ ) der spezifischen Wärmekapazität bei konstantem Volumen soll im interessierenden Temperaturbereich konstant sein und  $c_v^\infty = 0,8 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$  betragen.

3. Zwei Gramm Helium der Temperatur 400 K werden pro Sekunde mit einem Gramm Stickstoff der Temperatur 300 K adiabatisch vermischt. Anschließend wird das Gemisch in einer Turbine adiabatisch auf Umgebungsdruck ( $p_u = 1 \text{ bar}$ ) entspannt. Die Drücke vor und nach der Vermischung betragen 3 bar. Der bei dem gesamten Vorgang erzeugte Entropiestrom beträgt 1,5 W/K.
- a) Berechnen Sie die Temperatur und die Partialdrücke nach der Vermischung.  
 b) Berechnen Sie die Leistung der Turbine.

Änderungen kinetischer und potentieller Energie sollen vernachlässigt werden. Helium und Stickstoff sollen als perfekte Gase betrachtet werden:

$$R_{\text{He}} = 2,1 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \quad R_{\text{N}_2} = 0,3 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$$

$$c_{p\text{He}} = 5,3 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \quad c_{p\text{N}_2} = 1,0 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$$



4. In einer horizontalen Düse wird ein Gas der Temperatur 350 K vom Ruhezustand auf 1 bar entspannt. In der Düse wird pro Gramm Gas eine Wärme von 65 J/g zugeführt. Am Austritt der Düse beträgt bei einer Temperatur von 300 K die Geschwindigkeit 455 m/s.

- a) Wie groß ist der Massenstrom durch die Düse, wenn der Austrittsquerschnitt 10 cm<sup>2</sup> beträgt?  
b) Berechnen Sie den Druck  $p_1$  im Ruhezustand.

Das thermische Zustandsverhalten des Gases soll durch die Gleichung  $p \cdot v = R \cdot T + B(T) \cdot p$  beschrieben werden.

$$\text{Mit } B(T) = a + \frac{b}{T}; \quad a = 0,015 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}, \quad b = -6 \text{ m}^3 \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}, \quad R = 0,19 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$$

Für den Idealanteil ( $p \rightarrow 0$ ) der spezifischen Wärmekapazität bei konstantem Druck soll gelten:

$$c_p^0(T) = c + d \cdot T; \quad \text{mit } c = 0,97 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}; \quad d = 10^{-4} \text{ J} \cdot \text{K}^{-2} \cdot \text{g}^{-1}$$

5. Einem Reaktor werden Äthylen und Wasserdampf zugeführt. Im Reaktor wird bei der Temperatur 500 K entsprechend der Gleichung  $\text{C}_2\text{H}_4 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  Äthanol gebildet. Bei der Temperatur 500 K beträgt die Gleichgewichtskonstante  $\bar{K}_p = 1,26 \cdot 10^{-2}$ . Der Anteil des Äthanol in dem den Reaktor im Gleichgewicht verlassenden Gemisch soll erhöht werden.

Entscheiden Sie rechnerisch welche der beiden folgenden Maßnahmen zum größeren Äthanolanteil führt.

Maßnahme A: Beim Standarddruck wird doppelt so viel Äthylen dem Reaktor zugeführt wie stöchiometrisch notwendig ist.

Maßnahme B: Bei stöchiometrischem Einsatzgemisch wird der Gesamtdruck bei dem die Reaktion abläuft auf das Doppelte des Standarddrucks erhöht.

Die an der Reaktion beteiligten Stoffe sollen als perfekte Gase betrachtet werden.

**Frühjahr 2009, 31. März 2009, Thermodynamik I**

1. Der in einer Gaskältemaschine ablaufende Kreisprozess soll durch folgenden reversiblen Vergleichsprozess beschrieben werden (Stirling-Prozess):

- 1→2 isotherme Kompression bei  $T_1 = 310 \text{ K}$  auf  $2/3$  des Anfangsvolumens
- 2→3 isochore Abkühlung auf  $70 \text{ K}$
- 3→4 isotherme Expansion auf das Anfangsvolumen
- 4→1 isochore Erwärmung auf die Anfangstemperatur.

Die bei den isochoren Zustandsänderungen übertragenen Wärmen sollen in „innerer Wärmeübertragung“ übertragen werden. (Sie treten nach außen nicht in Erscheinung.)

- a) Tragen Sie den Prozess in ein T,s-Diagramm und in ein p,v-Diagramm ein, und kennzeichnen Sie sowohl im T,s- als auch im p,v-Diagramm die Flächen, die ein Maß für die Kälteleistung sind.
- b) Berechnen Sie die Kälteleistung, wenn pro Sekunde 5 Gramm Helium den Prozess durchlaufen.
- c) Wie groß ist die Leistungsziffer des Prozesses?

Helium soll als perfektes Gas mit  $R = 2,1 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$  betrachtet werden.

2. In einem starren, geschlossenen Behälter mit dem Volumen  $V = 0,1 \text{ m}^3$  befindet sich flüssiges und dampfförmiges Wasser bei  $90 \text{ °C}$  im Gleichgewicht. Durch Wärmezufuhr wird das Wasser in den kritischen Zustand überführt.

- a) Zeichnen Sie ein p,v-Diagramm von Wasser. Kennzeichnen Sie darin die Gebiete der verschiedenen Aggregatzustände und die Zweiphasengebiete und tragen Sie darin den Aufheizvorgang ein.
- b) Bestimmen Sie die Masse des Behälterinhalts.
- c) Wie groß ist der Dampfanteil vor der Wärmezufuhr?
- d) Wie viel Wärme muss bis zum Erreichen des kritischen Zustandes zugeführt werden?

Auszug aus der Dampftafel von Wasser:

t / °C	p <sub>s</sub> / bar	v' / dm <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup>	v'' / m <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup>	h' / J · g <sup>-1</sup>	h'' / J · g <sup>-1</sup>
90	0,701	1,036	2,361	376,94	2660,1
374,15	221,2	3,17	0,00317	2107,4	2107,4

3. In einem nach dem Rankine-Prozess arbeitenden Dampfkraftwerk wird Wasser aus dem Kondensator in den Kessel gepumpt und im Kessel erwärmt, verdampft und auf 530 °C überhitzt. Der Kondensatordruck beträgt 0,05 bar, der Kesseldruck 70 bar. Nach der Expansion in der Turbine liegt Nassdampf mit einem Dampfgehalt von  $x = 0,95$  vor.
- Tragen Sie den Prozess in ein h,s-Diagramm ein.
  - Berechnen Sie den thermischen Wirkungsgrad des Prozesses unter der Annahme, dass die Temperatur am Austritt aus der Kesselspeisepumpe 40 °C beträgt.
  - Berechnen Sie die Verdampfungsenthalpie des Wassers bei Kondensatordruck mit der Clausius-Clapeyron-Gleichung.

Eigenschaften des Wassers bei 70 bar:

Spezifische Wärmekapazität des flüssigen Wassers:  $\bar{c}_{pf} = 4,2 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ ,

Verdampfungsenthalpie:  $h'' - h' = 1515 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ ; Siedetemperatur:  $t_s = 285,8 \text{ °C}$

Spezifische Wärmekapazität des Dampfes:  $\bar{c}_{pD} = 3,30 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$

Eigenschaften des Wassers bei 0,05 bar:

Verdampfungsenthalpie:  $h'' - h' = 2325 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$

Spezifisches Volumen des trockengesättigten Dampfes:  $v'' = 31,5 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

Änderungen kinetischer und potentieller Energien sollen vernachlässigt werden. Die Prozesse sollen als reversibel betrachtet werden. Für den Dampfdruck des Wassers zwischen 0,01 bar und 0,1 bar soll gelten:

$$\ln p/\text{bar} = -5,25 + 0,253 \cdot \left(\frac{t}{\text{°C}}\right)^{0,631}$$

Das spezifische Volumen der siedenden Flüssigkeit soll gegenüber dem spezifischen Volumen des trockengesättigten Dampfes vernachlässigt werden.

4. Ein luftgekühlter Kompressor saugt Luft vom Umgebungszustand ( $p_u = 1 \text{ bar}$ ,  $T_u = 300 \text{ K}$ ) an und füllt eine Pressluftflasche von 10 Liter Innenvolumen bis zum Enddruck von 200 bar. Zu Beginn des Füllvorgangs befindet sich Luft mit Umgebungszustand in der Pressluftflasche. Der Kompressor wird mit einer Leistung von 2 kW angetrieben. Die Fülldauer beträgt 30 Minuten.

Wie viel Wärme muss insgesamt von Flasche und Kompressor abgeführt werden, wenn die Endtemperatur der Luft in der Flasche 330 K betragen soll?

Die Wärmekapazitäten von Kompressor und Flasche, kinetische und potentielle Energien sowie die nach dem Füllvorgang im Kompressor und in der Leitung verbleibende Luft sollen vernachlässigt werden. Luft soll als perfektes Gas betrachtet werden mit:  $R = 0,29 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ ,  $c_p = 1,0 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ .

## Frühjahr 2009, 31. März 2009, Thermodynamik II

1. In eine adiabatische Mischkammer strömen pro Sekunde 2 mol Wasserstoff mit der Temperatur 400 K und dem Druck 1 bar und 1 mol Sauerstoff mit der Temperatur 300 K und dem Druck 1 bar. Das ausströmende Gemisch hat einen Druck von 1 bar.
  - a) Wie groß ist die Temperatur des Gemisches?
  - b) Wie groß sind die Partialdrücke von Sauerstoff und Wasserstoff im Gemisch?
  - c) Wie viel Entropie wird pro Sekunde bei der Vermischung erzeugt?

Sauerstoff ( $O_2$ ) und Wasserstoff ( $H_2$ ) sollen als perfekte Gase betrachtet werden, deren Schwingungsfreiheitsgrade nicht angeregt sind. Änderungen kinetischer und potentieller Energien sollen vernachlässigt werden.

2. In einem wärmeisolierten, mit einem reibungsfrei gleitenden Kolben abgeschlossenen Zylinder mit dem Volumen 1 Liter wird Kohlendioxid vom Anfangszustand  $p_1 = 1$  bar,  $T_1 = 300$  K auf  $p_2 = 20$  bar komprimiert.
  - a) Wie viel Gramm Kohlendioxid befinden sich im Zylinder?
  - b) Wie groß sind die Temperatur und das Volumen nach der Kompression?
  - c) Wie viel Arbeit muss zur Kompression aufgewendet werden?

Die Kompression soll reversibel erfolgen. Für Kohlendioxid soll im interessierenden Bereich die folgende Zustandsgleichung gelten:  $p \cdot v = R \cdot T + B(T) \cdot p$  mit:

$$R = 0,189 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}; B(T) = a + b \cdot T; a = -6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}; b = 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}.$$

Beim Druck 1 bar soll im interessierenden Temperaturbereich für die mittlere spezifische Wärmekapazität gelten:  $\bar{c}_p = 0,95 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ .

3. Phosphorpentachlorid ( $PCl_5$ ) steht bei einem Druck von 2 atm und einer Temperatur von 250 °C mit äquimolaren Mengen von Phosphortrichlorid ( $PCl_3$ ) und Chlor ( $Cl_2$ ) im chemischen Gleichgewicht. Das im chemischen Gleichgewicht befindliche Gemisch enthält 40 Mol-% Chlor.
  - a) Wie groß sind die Partialdrücke der Stoffe im Gemisch?
  - b) Wie groß ist die Gleichgewichtskonstante  $\bar{K}_p$  bei 250 °C?
  - c) Wie viel Mol-% des Phosphorpentachlorids wären bei der Temperatur 250 °C und dem Druck 0,2 atm zerfallen?

Es soll sich um ein Gemisch idealer Gase handeln.

4. Zur Klimatisierung eines Flugzeuges wird ein Luftstrom von 3 kg/s vom Umgebungszustand  $p_u = 0,3$  bar,  $t_u = -30$  °C auf 1 bar verdichtet, in einem Wärmeübertrager isobar auf +40 °C abgekühlt und in einer adiabatischen Mischkammer durch Einspritzen flüssigen Wassers von 20 °C isobar befeuchtet. Die Luft verlässt die Mischkammer mit einer Temperatur von 22 °C.
  - a) Welcher Wärmestrom wird im Wärmeübertrager übertragen?
  - b) Wie viel Kilogramm flüssigen Wassers werden in der Mischkammer stündlich eingespritzt?
  - c) Wie hoch ist die relative Feuchte der Luft beim Austritt aus der Mischkammer?

Man benutze zur Lösung der Aufgabe das beigefügte  $h_{1+x,x}$ -Diagramm.

Luft soll als perfektes Gas betrachtet werden mit:  $c_{pL} = 1,0 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ ;  $R_L = 0,29 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ .

Spezifische Wärmekapazität von flüssigem Wasser:  $c_{pW} = 4,2 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ .

Die Kompression soll als isentrop betrachtet werden. Der in der angesaugten Umgebungsluft enthaltene Wasserdampf soll vernachlässigt werden. Änderungen kinetischer und potentieller Energien sollen vernachlässigt werden.



5. In einer stationär arbeitenden Anlage zur Erzeugung flüssiger Luft wird Druckluft von 200 bar und 300 K in einem nach außen wärmeisolierten Gegenstrom-Wärmeübertrager isobar abgekühlt und anschließend adiabatisch auf 1 bar gedrosselt. Die dabei entstehende flüssige Luft wird abgeschieden. Der nicht verflüssigte Anteil wird im Gegenstrom zur einströmenden Luft isobar erwärmt. Er verlässt den Gegenstrom wärmeübertrager mit einer Temperatur von 290 K.
- Stellen Sie den Prozess in einem p,h-Diagramm dar.
  - Welcher Anteil der einströmenden Luft wird als Flüssigkeit abgeschieden?
  - Wie groß ist die Temperatur der Luft vor dem Drosselventil?
  - Welchen Anteil der einströmenden Luft könnte man, bei sonst gleichen Bedingungen, verflüssigen, wenn die Druckluft nicht gedrosselt würde, sondern in einer adiabatischen Expansionsmaschine unter der Abgabe einer spezifischen Arbeit von 20 J/g entspannt würde?

Änderungen kinetischer und potentieller Energien sollen vernachlässigt werden. Mittlere spezifische Wärmekapazität von Luft bei 200 bar:  $\bar{c}_p = 1,6 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ .

Eigenschaften von Luft:

p/bar	h/J·g <sup>-1</sup> bei		h'/J·g <sup>-1</sup>	h''/J·g <sup>-1</sup>
	300 K	290 K		
1	300	290	-127	78
200	260	-	-	-



## Herbst 2009, 2. Oktober 2009, Thermodynamik I

1. In einer geschlossenen Gasturbinenanlage werden pro Sekunde 50 Kilogramm Luft im Kompressor vom Zustand  $p_1 = 1 \text{ bar}$ ,  $t_1 = 15 \text{ °C}$  adiabatisch auf 9,5 bar verdichtet, in der Brennkammer isobar auf 980 °C aufgeheizt, in der Turbine adiabatisch auf  $p_1$  entspannt und im Kühler isobar auf  $t_1$  abgekühlt.
  - a) Stellen Sie den Prozess in einem  $p,v$ -Diagramm und einem  $T,s$ -Diagramm dar. Kennzeichnen Sie in jedem dieser Diagramme die Fläche, die ein Maß für die gewonnene Arbeit ist.
  - b) Wie groß sind die Leistung und der thermische Wirkungsgrad der Gasturbinenanlage?
  - c) Um den Wirkungsgrad der Gasturbinenanlage zu verbessern, werden 20 % der abzuführender Wärme in innerer Wärmeübertragung an die verdichtete Luft abgegeben. Wie groß ist dann der thermische Wirkungsgrad der Gasturbinenanlage?
  - d) Auf welchen Druck darf bei unveränderter Turbineneintrittstemperatur die Luft maximal verdichtet werden, damit innere Wärmeübertragung noch möglich ist?

Kompression und Expansion der Luft sollen als reversibel betrachtet werden.

Die Luft soll als perfektes Gas betrachtet werden mit:

$$c_p = 1,0 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \text{ und } R = 0,29 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}.$$

Änderungen kinetischer und potentieller Energie sollen vernachlässigt werden.

2. Durch eine adiabatisch arbeitende Maschine strömt Luft. An einem Ende der Maschine hat die Luft eine Temperatur von 70 °C und einen Druck von 1 bar. Am anderen Ende der Maschine herrscht bei einer Temperatur von 230 °C ein Druck von 6 bar.

Entscheiden Sie rechnerisch, ob es sich bei der Maschine um einen Kompressor oder um eine Turbine handelt.

Luft soll als perfektes Gas betrachtet werden mit:

$$c_p = 1,0 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \text{ und } R = 0,29 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}.$$



3. Ein starrer, nach außen wärmeisolierter Behälter des Volumens  $V = 2 \text{ l}$  enthält 87 g Wassernassdampf der Temperatur  $T_1 = 453 \text{ K}$ . Der Dampfgehalt beträgt 10 %.
- Durch eine im Behälter eingebaute Heizung wird Wärme zugeführt, bis der Flüssigkeitsanteil des Wassernassdampfes gerade verdampft ist.
- Zeichnen Sie ein p,T-Diagramm von Wasser und tragen Sie darin die Zustandsänderung des Wassers ein.
  - Wie groß ist die Temperatur des trockengesättigten Wasserdampfes nach der Wärmezufuhr?
  - Wie groß sind die Drücke im Behälter vor und nach der Wärmezufuhr?
  - Wie viel Wärme muss zugeführt werden, bis der Flüssigkeitsanteil des Wasserdampfes verdampft ist?

Im interessierenden Zustandsbereich soll die folgende Dampfdruckgleichung gelten:

$$p = a + b \cdot T + c \cdot T^2 \text{ mit } a = 559 \text{ bar}, b = -2,64 \text{ bar / K} \text{ und } c = 3,15 \cdot 10^{-3} \text{ bar / K}^2.$$

Trockengesättigter Wasserdampf soll als ideales Gas betrachtet werden mit:

$$R = 0,46 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}, c_v = 2,52 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}.$$

Die spezifische Verdampfungsenthalpie von Wasser bei 453 K beträgt  $2014 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ .

4. Ein Einfamilienhaus wird mit einer Wärmepumpe beheizt, die bei der Temperatur  $t_0 = 5 \text{ }^\circ\text{C}$  Wärme aus der Umgebung aufnimmt und bei  $t_1 = 55 \text{ }^\circ\text{C}$  eine Heizleistung von 16 kW abgibt.
- Welche Leistungsziffer könnte eine Wärmepumpe bei den angegebenen Temperaturen maximal erreichen?
  - In der verwendeten Wärmepumpe werden 10,45 W/K Entropie erzeugt. Wie groß ist die Leistungsziffer dieser Wärmepumpe?

5. Ein starrer, wärmeisolierter Behälter des Innenvolumens 15 l hat die Temperatur 300 K und enthält Luft der gleichen Temperatur bei einem Druck von 1 bar. Der Behälter wird durch Pressluft, die mit der Temperatur 300 K einströmt, auf 200 bar aufgefüllt.

Wie groß ist nach dem Auffüllen die Temperatur des Behälters und der darin enthaltenen Luft, wenn Gleichgewicht herrscht?

Die kinetische Energie und die potentielle Energie der einströmenden Luft sollen vernachlässigt werden.

Die Wärmekapazität des Behälters beträgt  $C = 1,4 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1}$

Luft soll als perfektes Gas mit  $c_p = 1,0 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$  und  $R = 0,29 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$  betrachtet werden.



## Herbst 2009, 2. Oktober 2009, Thermodynamik II

1. Einer adiabatischen Mischkammer werden pro Sekunde ein Mol Helium der Temperatur 400 K und des Druckes 2 bar und ein Mol Argon der Temperatur 300 K und des Druckes 10 bar mit jeweils der Geschwindigkeit 200 m/s zugeführt und bei 1 bar vermischt. Das Gemisch verlässt die Mischkammer mit einer Geschwindigkeit von 100 m/s und wird anschließend in einem wärmeisolierten Diffusor auf eine vernachlässigbar kleine Geschwindigkeit abgebremst.
  - a) Wie hoch ist die Temperatur des Gemisches am Austritt aus der Mischkammer?
  - b) Wie viel Entropie wird pro Sekunde bei der Vermischung erzeugt?
  - c) Kann das Gemisch am Austritt des Diffusors einen Druck von 2 bar haben?

Helium und Argon sollen als perfekte Gase mit den Molmassen

$4 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$  und  $40 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$  betrachtet werden.

Änderungen potentieller Energie sollen vernachlässigt werden.

2. Ein Strom feuchter Luft des Zustandes  $t = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\varphi = 60 \%$  wird in zwei gleichgroße Teilströme geteilt. Der eine Teilstrom wird isobar auf  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  abgekühlt; das dabei entstehende Kondensat wird kontinuierlich abgeschieden. Der andere Teilstrom wird über ein Trocknungsmittel geleitet, das dem Luftstrom Wasser entzieht. Anschließend beträgt die relative Feuchte dieses Luftstromes  $\varphi = 30 \%$ . Danach werden die beiden Luftströme adiabatisch vermischt.
  - a) Welchen Zustand hat die Luft nach der Vermischung der beiden Teilströme?
  - b) Wie viel Kilogramm Trocknungsmittel werden pro Kilogramm der so getrockneten Luft benötigt, wenn ein Kilogramm Trocknungsmittel 2 Gramm Wasser aufnehmen kann?

Die Aufgabe ist mit Hilfe des beigefügten  $h_{1+x}, x$ -Diagramms zu lösen.

Der Vorgang der Wasseraufnahme durch das Trocknungsmittel soll als isobare, adiabatische Entnahme von flüssigem Wasser ausgehend von der Temperatur  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  aus der feuchten Luft betrachtet werden.

Die spezifische Wärmekapazität von flüssigem Wasser beträgt  $c_W = 4,2 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ .

Der Gesamtdruck beträgt 1 bar.

Änderungen kinetischer und potentieller Energie sollen vernachlässigt werden.



3. In eine wärmeisolierte, horizontale Düse strömt ein Gas beim Druck  $p_1 = 20 \text{ bar}$  und der Temperatur  $T_1 = 500 \text{ K}$  mit der Geschwindigkeit  $c_1 = 100 \text{ m/s}$ . Es wird darin reversibel auf den Umgebungsdruck  $p_2 = 1 \text{ bar}$  entspannt.
- Welche Temperatur stellt sich im Austrittsquerschnitt ein?
  - Welche Geschwindigkeit herrscht am Düsenaustritt?
  - Wie groß ist das Flächenverhältnis vom Austritts- und Eintrittsquerschnitt der Düse?

Für das Gas soll die thermische Zustandsgleichung  $p \cdot v = R \cdot T + B \cdot p$  gelten mit:  $R = 0,463 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$  und  $B = a - b/T$ ;  $a = 26 \text{ cm}^3 / \text{g}$ ,  $b = 15600 \text{ cm}^3 \cdot \text{K} / \text{g}$ . Die mittlere spezifische Wärmekapazität des Gases im interessierenden Temperaturbereich beträgt bei  $p_2 = 1 \text{ bar}$ :  $\bar{c}_p = 2,0 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ .

Beachte:  $s$  ist eine Zustandsgröße.

$$\text{Es gilt: } ds = c_p \cdot \frac{dT}{T} - \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \cdot dp.$$

4. Kohlenmonoxid wird katalytisch nach der Gleichung  $\text{CO} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$  zu Methanol hydriert. Dazu wird bei  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  einem Reaktor ein stöchiometrisches Gemisch zugeführt.
- Wie groß sind die Reaktionsenthalpie und -entropie bei  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $1 \text{ atm}$ ?
  - Wie groß ist die Gleichgewichtskonstante  $\bar{K}_p$  bei  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ?
  - Man entscheide mit Hilfe des Le Chatelier-Braun'schen Prinzips zu welcher Seite das Gleichgewicht durch eine Druckerhöhung verschoben wird.
  - Wie hoch muss bei  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  der Druck im Reaktor sein, damit das den Reaktor verlassende Gemisch  $1 \text{ mol-\%}$  Methanol enthält?

Werte für die molaren Enthalpien und Entropien im Standardzustand und die molaren spezifischen Wärmen:

	$\bar{H}^\circ / (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$\bar{S}^\circ / (\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1})$	$\bar{C}_p / (\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1})$
$\text{H}_2$	–	130,6	28,83
$\text{CO}$	-110,5	197,4	29,15
$\text{CH}_3\text{OH}$	-201,2	239,7	43,9

Die an der Reaktion beteiligten Stoffe sollen als perfekte Gase betrachtet werden.



## Frühjahr 2010, 6. März 2010, Thermodynamik I

1. Ein starrer Behälter des Volumens  $V = 3 \text{ m}^3$  enthält Wasser mit einem Dampfgehalt von  $x = 0,1$  bei dem Druck  $p = 35 \text{ bar}$ . Aus dem Behälter strömt solange flüssiges Wasser im Siedezustand bis die Hälfte des im Behälter enthaltenen Wassers ausgeströmt ist. Dem Behälter wird während des Ausströmens so viel Wärme zugeführt, dass der Druck im Behälter konstant bleibt.
- Wie viel Kilogramm Wasser enthält der Behälter vor dem Ausströmen?
  - Wie groß ist der Dampfgehalt im Behälter nach dem Ausströmen?
  - Wie viel Wärme muss dem Behälter während des Ausströmens zugeführt werden?

Potentielle Energien, die kinetische Energie des ausströmenden flüssigen Wassers und die Wärmekapazität des Behälters sollen vernachlässigt werden.

Auszug aus der Dampftafel von Wasser:

$p / \text{bar}$	$v' / \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	$v'' / \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	$h' / \text{J} \cdot \text{g}^{-1}$	$h'' / \text{J} \cdot \text{g}^{-1}$
35	$1,23 \cdot 10^{-3}$	0,0570	1050	2802

2. In einem Zylinder, der durch einen Kolben verschlossen ist, wird trockengesättigter Wasserdampf vom Zustand  $p_1 = 5 \text{ bar}$ ,  $t_1 = 152 \text{ }^\circ\text{C}$  auf  $p_2 = 0,5 \text{ bar}$  reversibel entspannt. Durch Wärmezufuhr wird die Expansion so geführt, dass der Wasserdampf immer trockengesättigt ist.
- Skizzieren Sie ein p,T-Diagramm für Wasser mit den Phasengrenzkurven und tragen Sie darin die Gebiete der verschiedenen Aggregatzustände, die Zustandspunkte und die Expansion ein.
  - Welche Temperatur hat der Wasserdampf nach der Expansion?
  - Wie groß ist die Änderung der spezifischen Entropie des Wasserdampfes?

Im interessierenden Temperaturbereich soll die Verdampfungsenthalpie des Wassers konstant sein und  $h'' - h' = 2250 \text{ J/g}$  betragen. Das Volumen des siedenden Wassers soll gegenüber dem Volumen des trockengesättigten Wasserdampfes vernachlässigt werden. Trockengesättigter Wasserdampf soll als perfektes Gas betrachtet werden mit:  $c_p = 1,9 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$  und  $R = 0,46 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ .



3. Ein Dieselmotor wird mit Hilfe eines Turbokompressors aufgeladen, der von einer Abgasturbine angetrieben wird. Der dabei abgelaufene Prozess soll wie folgt beschrieben werden.
- Der Turbokompressor saugt Luft aus der Umgebung ( $p_1 = 1 \text{ bar}$ ,  $T_1 = 300 \text{ K}$ ) an und verdichtet sie isentrop auf  $p_2 = 2 \text{ bar}$ . In einem Zwischenkühler wird die komprimierte Luft isobar auf  $T_3 = 320 \text{ K}$  abgekühlt. Anschließend erfolgt die adiabatische Kompression der Luft im Motor auf  $p_4 = 80 \text{ bar}$  und  $T_4 = 920 \text{ K}$ . Die Verbrennung entspricht einer isobaren Wärmezufuhr. Die Endtemperatur beträgt  $T_5 = 1200 \text{ K}$ . Danach wird die Luft im Motor adiabatisch auf  $p_6 = 3,3 \text{ bar}$  und  $T_6 = 487 \text{ K}$  expandiert und strömt dann zur Abgasturbine. In der Abgasturbine wird die Luft adiabatisch auf Umgebungsdruck und die Temperatur  $T_7 = 420 \text{ K}$  entspannt.
- Stellen Sie den Prozess in einem p,v-Diagramm und in einem T,s-Diagramm dar.
  - Wie groß ist der thermische Wirkungsgrad des Gesamtprozesses?
  - Wie groß sind bei den angegebenen Drücken der in der Abgasturbine entstehende spezifische Arbeitsverlust und der spezifische Exergieverlust?
  - Kennzeichnen Sie im T,s-Diagramm die Flächen, die ein Maß für den spezifischen Arbeitsverlust und den spezifischen Exergieverlust sind.

Der Anteil der Verbrennungsprodukte soll vernachlässigt werden.

Luft soll als perfektes Gas betrachtet werden mit:

$$c_p = 1,0 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \text{ und } R = 0,29 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}.$$

Änderungen kinetischer und potentieller Energie sollen vernachlässigt werden.

4. Für eine Niedertemperaturheizung werden 600 Kilogramm Wasser pro Stunde von  $40^\circ \text{C}$  auf  $55^\circ \text{C}$  erwärmt.
- Dazu werden die im Kondensator einer Wärmepumpe abgegebene Wärme und 80 % der Abwärme eines Gasmotors genutzt. Der Gasmotor dient zum direkten Antrieb der Wärmepumpe. Die Wärmepumpe nimmt im Verdampfer aus der Umgebungsluft Wärme auf. Die Temperatur der Umgebungsluft beträgt  $-6^\circ \text{C}$ .
- Die Leistungsziffer der Wärmepumpe soll bei den interessierenden Temperaturen 2,8 betragen. Der Motor soll 30 % der eingesetzten Primärenergie als Antriebsenergie an die Wärmepumpe abgeben.
- Wie groß ist die zum Antrieb der Wärmepumpe notwendige Leistung?
  - Wie groß ist die Temperatur der Luft am Austritt des Verdampfers, wenn dieser von einem Kilogramm Luft pro Sekunde durchströmt wird?
  - Wie groß ist das Verhältnis von Heizenergie zu eingesetzter Primärenergie?

Die Luft soll als perfektes Gas mit  $c_p = 1,0 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$  betrachtet werden.

Die spezifische Wärmekapazität von flüssigem Wasser beträgt  $c = 4,2 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ .

Änderungen kinetischer und potentieller Energie sollen vernachlässigt werden.



## Frühjahr 2010, 6. März 2010, Thermodynamik II

1. Ein Zylinder des Volumens  $V=10\text{ l}$  ist auf der rechten Seite durch einen zunächst arretierten Kolben verschlossen. Eine nur für Wasserstoff durchlässige Membran teilt den Zylinder in zwei gleich große Kammern. In die linke Kammer werden  $0,4\text{ Gramm}$  Wasserstoff, in die rechte Kammer  $5,6\text{ Gramm}$  Stickstoff gefüllt.

- a) Wie groß sind bei einer Temperatur von  $300\text{ K}$  die Drücke in den beiden Kammern?

Die Arretierung des Kolben wird entfernt und der Zylinderinhalt um  $25\%$  des ursprünglichen Volumens isotherm komprimiert. Anschließend wird die Membran entfernt. Wasserstoff und Stickstoff vermischen sich vollständig.

- b) Wie groß ist die Kompressionsarbeit?  
c) Wie groß ist die Entropieänderung bei der Vermischung?

Wasserstoff und Stickstoff sollen als perfekte Gase betrachtet werden.  
Die Molmassen betragen für Wasserstoff  $2\text{ g/mol}$  und für Stickstoff  $28\text{ g/mol}$ .

2. Feuchte Luft der Temperatur  $t_1 = 40^\circ\text{C}$  und der relativen Feuchte  $\varphi = 30\%$  expandiert, ohne dass Kondensation auftritt, in einer horizontalen wärmeisolierten Düse ausgehend vom Ruhedruck  $p_1 = 1,2\text{ bar}$  auf Umgebungsdruck  $p_u = 1\text{ bar}$ .

- a) Wie groß sind Temperatur und relative Luftfeuchte nach der Expansion?  
b) Wie groß ist die Geschwindigkeit der Luft im Austritt der Düse?

Die Expansion in der Düse soll als reversibel betrachtet werden.  
Luft und Wasserdampf sollen als perfekte Gase betrachtet werden.

Luft:  $R_{Ltr} = 0,29\text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ ;

Wasserdampf:  $R_D = 0,46\text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ ,  $c_{pLtr} = 1,0\text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ ;  $c_{pD} = 1,9\text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$

Für den Sättigungsdampfdruck des Wassers soll gelten:

$$p_s(T) = a \cdot \exp(-b/T + c) \text{ mit } a = 0,0233\text{ bar}, b = 6793,6\text{ K}, c = 23,2$$

3. Skizzieren Sie das  $p,h$ -Diagramm eines realen Stoffes. Tragen Sie darin das Nassdampfgebiet, die kritische Isotherme, eine unterkritische und eine überkritische Isotherme ein.

Skizzieren Sie in dem Diagramm die Inversionskurve des differentiellen Joule-Thomson-Effektes und für die Drosselung auf den Druck  $p = 0$  die Inversionskurve des integralen Joule-Thomson-Effektes, und nennen Sie die Bedingungen aus denen sich die beiden Inversionskurven ergeben.



4. Zur Erzeugung flüssiger Luft nach dem Linde-Verfahren wird in einer stationär arbeitenden Anlage Luft vom Umgebungszustand (1 bar und 300 K) isotherm auf 200 bar komprimiert, anschließend in einem nach außen wärmeisolierten Gegenstrom-Wärmeübertrager isobar abgekühlt und adiabatisch auf 1 bar gedrosselt. Die dabei entstehende flüssige Luft wird abgeschieden. Der nicht verflüssigte Anteil dient im Gegenstrom-Wärmeübertrager zur Kühlung der einströmenden Luft. Er verlässt den Gegenstrom-Wärmeübertrager mit einer Temperatur von 290 K.
- Zeichnen Sie ein Schema der Anlage und stellen Sie den Prozess in einem p,h-Diagramm dar.
  - Berechnen Sie die spezifische Enthalpie der Luft nach der Kompression.
  - Welcher Anteil der komprimierten Luft wird verflüssigt?
  - Wie viel Arbeit pro Gramm verflüssigter Luft muss zur Kompression aufgewendet werden?

Änderungen kinetischer und potentieller Energie sollen vernachlässigt werden.  
 Eigenschaften von Luft bei 1 bar:

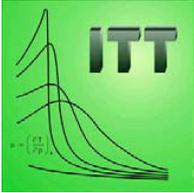
$h / J \cdot g^{-1}$		$h' / J \cdot g^{-1}$
300 K	290 K	
300	290	- 127

Das Verhalten von Luft soll bei 300 K zwischen 1 bar und 200 bar durch folgende Zustandsgleichung beschrieben werden können:

$$p \cdot v = R \cdot T + b \cdot p; \quad R = 0,29 J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}; \quad b = -1,76 dm^3 / kg.$$

5. Einem Reaktor werden zwei Mol Äthylen und ein Mol Wasserdampf zugeführt. Im Reaktor wird entsprechend der Reaktionsgleichung  $C_2H_4 + H_2O \rightleftharpoons C_2H_5OH$  Äthanol gebildet. Bei der Temperatur von 500 K beträgt die Gleichgewichts-konstante  $\bar{K}_p = 1,256 \cdot 10^{-2}$ .
- Bestimmen Sie die Gleichgewichtszusammensetzung des den Reaktor verlassenden Gemischs, wenn die Reaktion bei der Temperatur 500 K und dem Druck 1 atm abläuft.
  - Wie groß muss bei der Temperatur 500 K der Druck sein, damit das den Reaktor verlassende Gemisch im Gleichgewicht 10 mol-% Äthanol enthält?

Die an der Reaktion beteiligten Stoffe sollen als ideale Gase betrachtet werden.



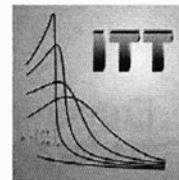
**Lehrstuhl und Institut für Technische Thermodynamik**  
Fakultät für Maschinenbau  
Universität Karlsruhe (TH)

Prof. Dr. rer. nat. habil. U. Maas (Ordinarius)

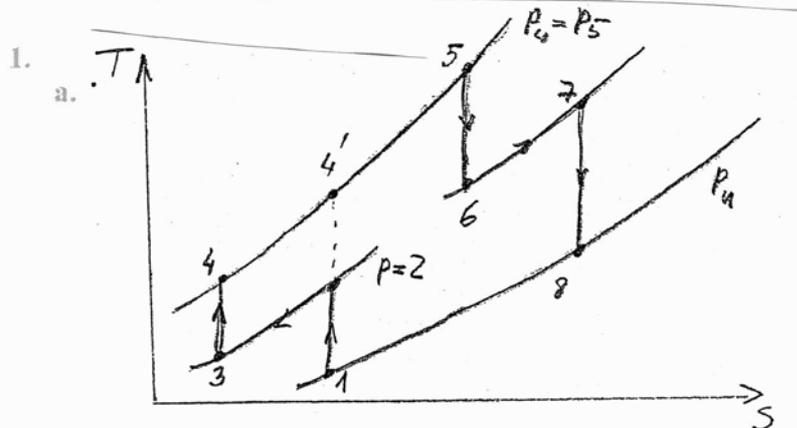
**Klausursammlung**  
**zu Klausur**  
**„Technische Thermodynamik I/II“**

**Zeitraum: 2005 – 2010**

**Lösungen**



Ergebniss  
24. März 2005 - Teil I

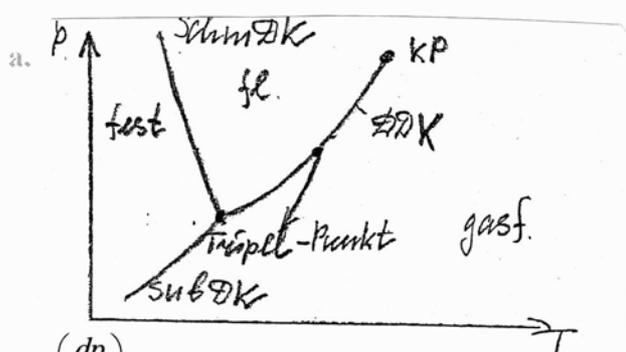


- b.  $T_2 = 430,5 \text{ K}$ ;  $w_{V_1} = 142,5 \text{ J/g}$ ;  $w_{\text{Ges}} = 285,0 \text{ J/g}$
- c.  $w_m = 70,6 \text{ J/g}$
- d.  $p_6 = 6,3 \text{ bar}$
- e.  $T_8 = 703,7 \text{ K}$ ;  $\eta_{\text{th}} = 47\%$

2.

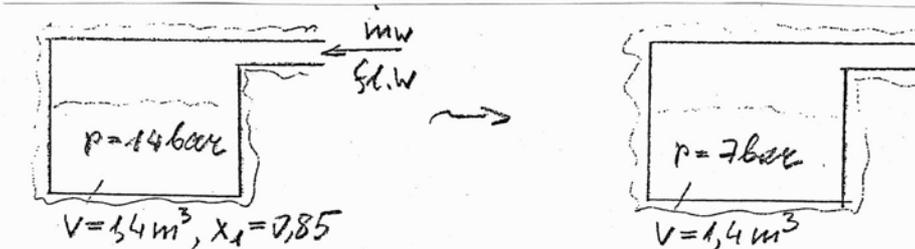
- a.  $Q_{Bl} = 144,0 \text{ kJ}$
- b.  $\Delta S_{Bl} = 0,368 \text{ kJ/K}$
- c.  $|w| = 39,9 \text{ kJ}$

3.

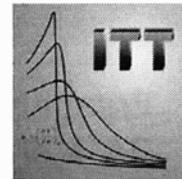


- b.  $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{60} = 0,68 \text{ bar/K}$
- c.  $n \leq 1,19$

4.

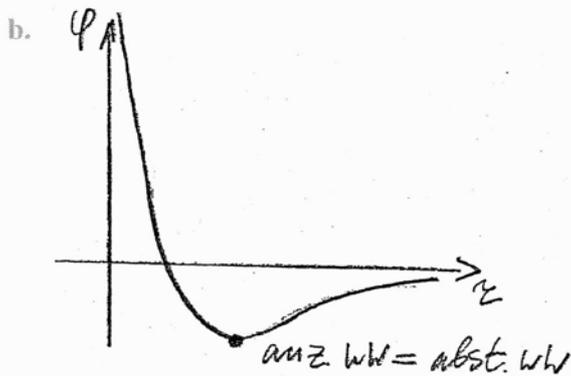
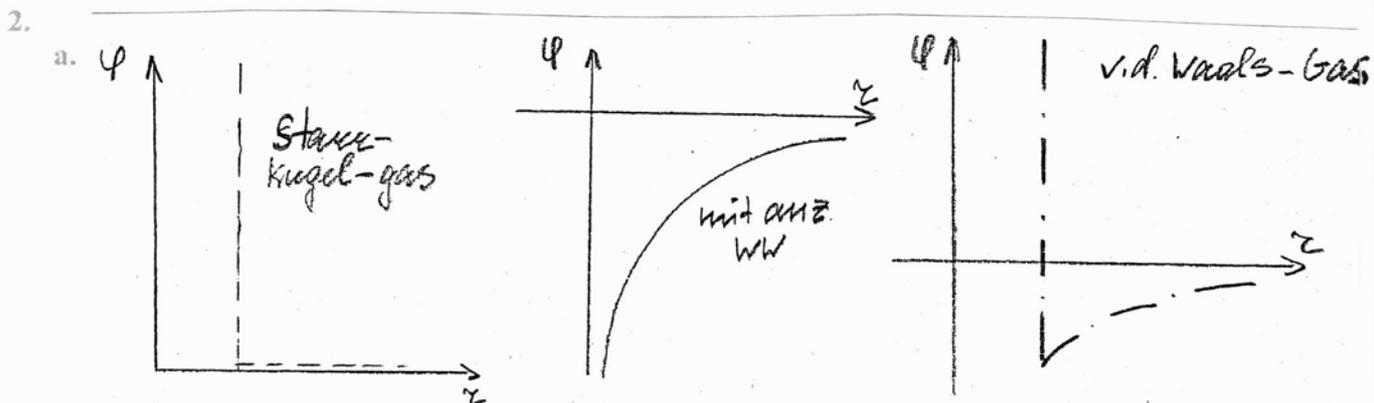


- 5.  $T_2 = 280,0 \text{ K}$ ;  $s_2 - s_1 = 0,05 \text{ J/g} \cdot \text{K} > 0$



Ergebniss  
24. März 2005 - Teil II

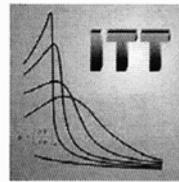
1.
  - a.  $T_2 = 322,0 \text{ K}$
  - b.  $\Delta x = 10,79 \text{ g/kg tr. L.}$
  - c.  $x_s = 2,5 \text{ g/kg tr. L.}$
  - d.  $\varphi_3 = 0,6$
  - e.  $T_4 = 266,57 \text{ K}; \Delta h = -26,66 \text{ J/g}; c_4 = 230,7 \text{ m/s}$



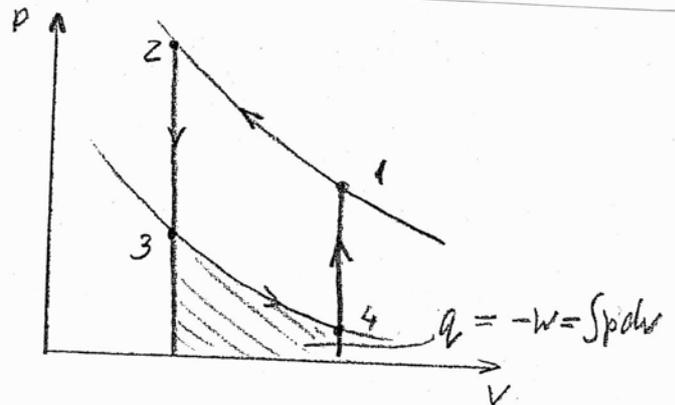
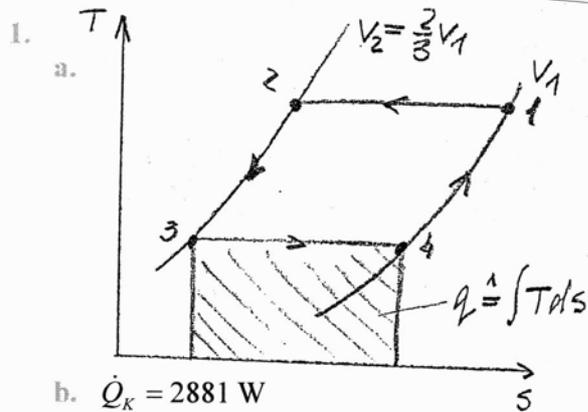
3.  $p_{1/\text{CO}_2} = 67,8 \text{ mbar}; p_{1/L} = 932,2 \text{ mbar}; \frac{W}{m_{\text{CO}_2}} = 207,3 \text{ kJ/kg CO}_2$

4. a.  $c_v(T, v) = c_v^\infty + \frac{2a}{T^2 v}$   
 b.  $A = 418,6 \text{ K}^2; B = -297,21 \text{ K}; T_2 = 298,6 \text{ K}$

5. a.  $\gamma_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}} = 0,0028$   
 b.  $\gamma_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}}^* = 0,0062$



Ergebniss  
29. September 2005 - Teil I



- b.  $\dot{Q}_K = 2881 \text{ W}$   
c.  $\dot{m}_{p.L.} = 2,0 \text{ g/s}$

2.

- a.  $\dot{W} = 801 \text{ W}$   
b.  $\dot{W}^* = 2080 \text{ W}$

3.

a.

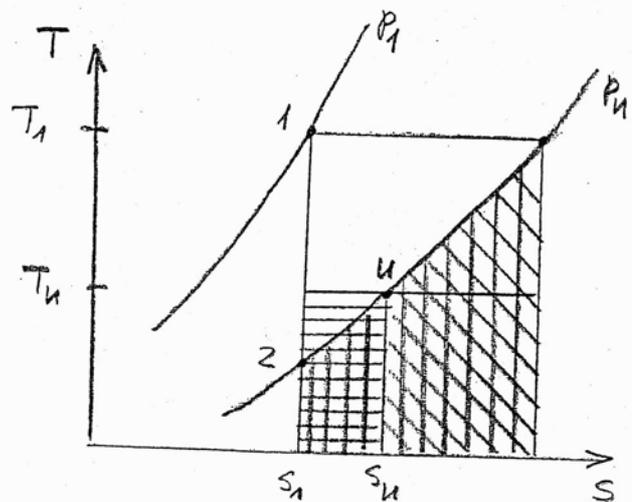
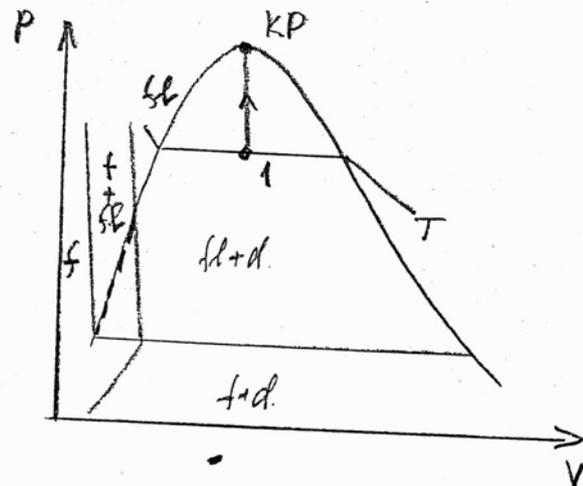
- b.  $m = 31,55 \text{ kg}$   
c.  $x = 0,0009$   
d.  $Q_{\text{notig}} = 52,3 \text{ MJ} > Q_{\text{vorn}}$

4.

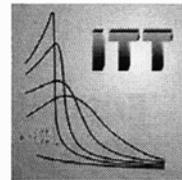
- a.  $m_e = 1959 \text{ g}$   
b.  $W = 721,5 \text{ kJ}$

5.

- a.  $\varepsilon_i = 247,1 \text{ J/g}$   
b.



- c.  $w_{\text{rev}} = -243,6 \text{ J/g}$   
d.  $\varepsilon_i - |w_{\text{rev}}| = (\text{III} - \text{III}) - \text{III} = \text{III}$

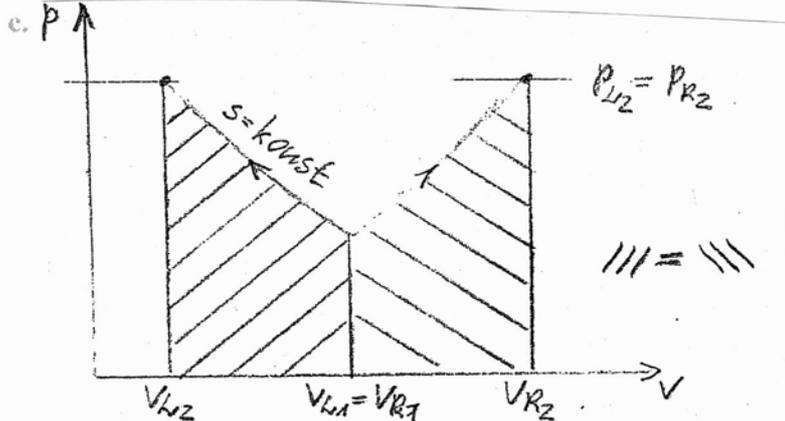


Ergebniss  
29. September 2005 - Teil II

1.

a.  $T_{L2} = 436 \text{ K}; T_{R2} = 1309 \text{ K}$

b.  $Q = 706,3 \text{ J}$



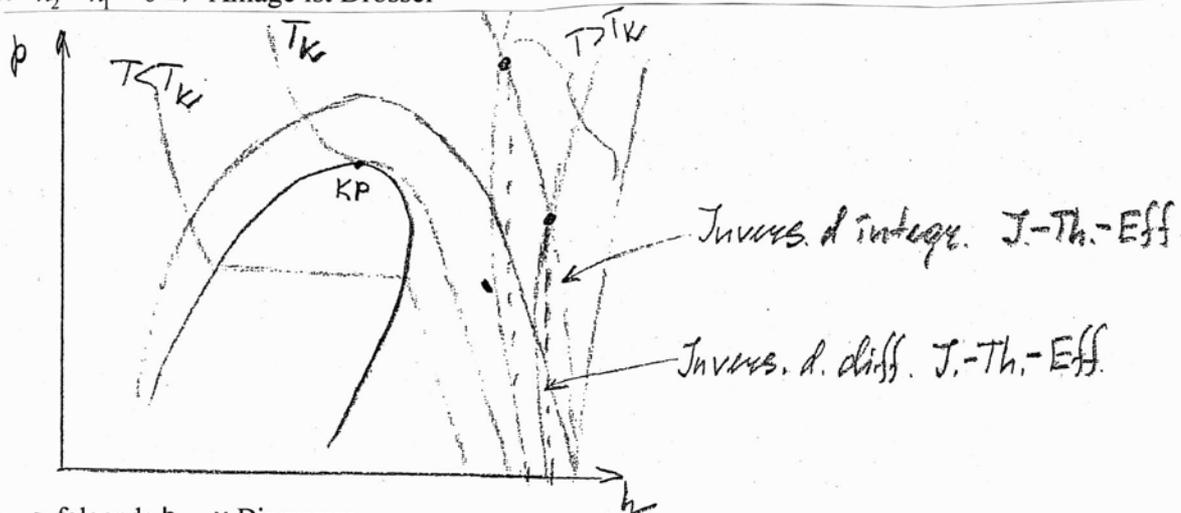
2.  $\alpha = 0,82 \text{ mol/s}; Q = 60 \text{ kW}$

3.

a.  $T_2 = 259,4 \text{ K}$

b.  $h_2 - h_1 = 0 \Rightarrow$  Anlage ist Drossel

4.



5.

a. s. folgende  $h_{1+x}, x$ -Diagramm

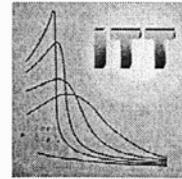
b.  $x_H = 5,6 \text{ g/kg}$

c.  $q_{1+x/verd.} = -30,5 \text{ J/g}$

d.  $q_{1+x/kond.} = 41 \text{ J/g}$

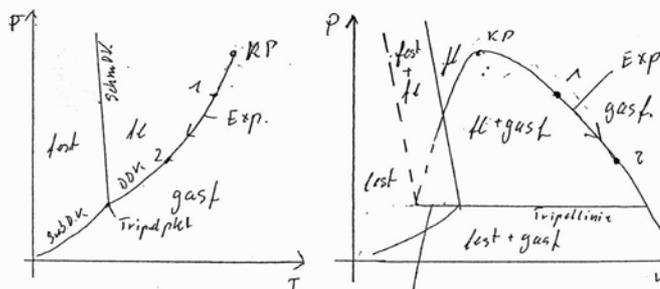


Ergebnisse  
30. März 2006 - Teil I



1. ..
  - a.  $m_D = 9,2\text{g}; m_S = 8,0\text{g}$
  - b.  $p_2 = 1,9\text{ bar}$
  - c.  $T_{D_2} = 281,7\text{ K}$
  - d.  $m_{Aus} = 4,6\text{ g}$
  - e.  $T_{S_2} \approx 364\text{ K}$

2.



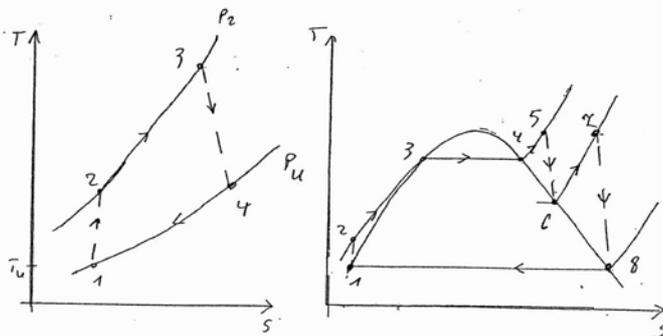
b.  $w = -377,87\text{ J/g}$

3.

- a.  $p_i = 0,88\text{ bar}$
- b.  $m_1 = 1,01\text{ g}$
- c.  $T_2 = 314\text{ K}$

4.

a.

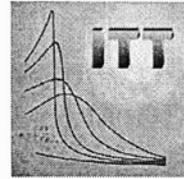


b.  $T_2 = 529,8\text{ K}$

c.  $\eta_{th_{GT}} = 0,33$

d.  $|\dot{W}_{GT}| = 38,4\text{ MW}; \dot{Q}_{zu_{Netto}} = 587,96\text{ MW}; \eta_{th_{ges}} = 0,36$

Ergebnisse  
30. März 2006 - Teil II



1.

a.  $w_{id} = 152,0 \text{ J/g}; q_{id} = -152,0 \text{ J/g}$

b.  $\frac{w_{req} - w_{id}}{w_{id}} \hat{=} -5\%; \frac{|q_{req}| - |q_{id}|}{q_{id}} \hat{=} 11,2\%$

2.

a.  $T \geq 985,7 \text{ K}$

b.  $\gamma_{CO} = 1/4 = \gamma_{CO_2} = \gamma_{H_2} = \gamma_{H_2O}$

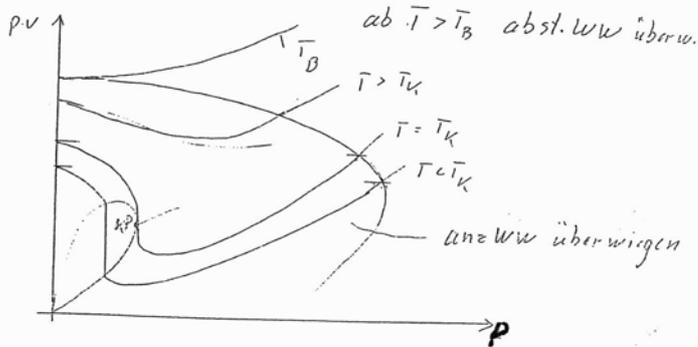
3.

a.  $T_M = 338,5 \text{ K}$

b.  $p_{He_M} = 2/3 \times p_M = 2/3 \text{ bar}; p_{Pr_M} = 1/3 \text{ bar}$

c.  $\dot{S}_{erz} = 16,96 \text{ W/K}$

4.

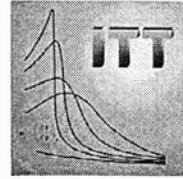


5.

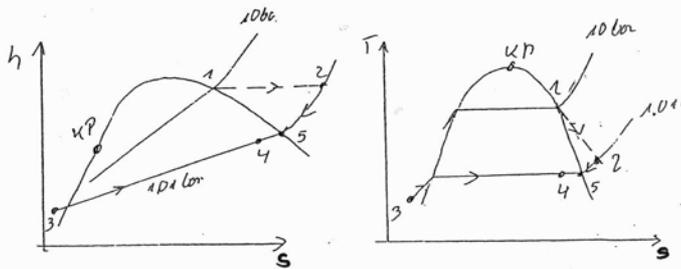
a. siehe Bild

b.  $q_{1+y/\max} = -69 \text{ J/g}; \frac{\dot{m}_{Lir/1}}{\dot{m}_{Lir/2}} = 1,9$

Ergebnisse  
5. Oktober 2006 - Teil I



1.  
a.



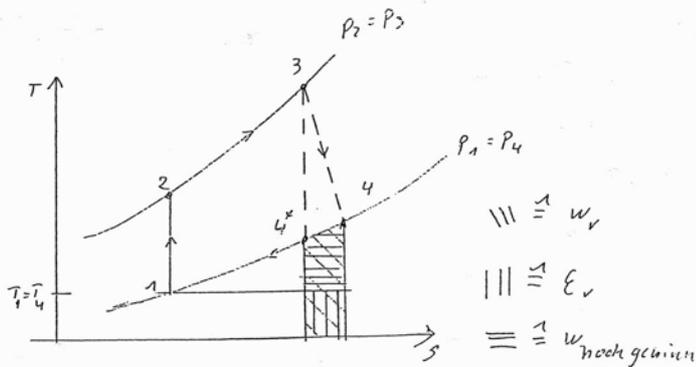
b.  $\dot{m}_D = 0,71 \text{ kg/s}$

c.  $\dot{S}_{\text{erz}} = 732,4 \text{ W/K}; \dot{E}_V \approx 234 \text{ kW}$

2.

a.  $(h'' - h')_{\text{sub}} = 386,4 \text{ J/g}; (s'' - s')_{\text{sub}} = 1,32 \text{ J/g} \cdot \text{K}$

3.  
a.



b.  $\gamma_{\text{th}} = 0,386 \hat{=} 39\%$

c.  $w_V = 71 \text{ J/g}$

d.  $\epsilon_V = 30,7 \text{ J/g}$

4.

a.  $p_i = 1,12 \text{ bar} = p_1$

b.  $m_1 = 1,29 \text{ g}$

c.  $T_2 \approx 313 \text{ K}$

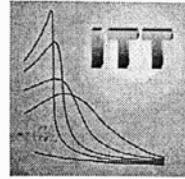
5.

a.  $\dot{S}_{\text{erz}} = 12,1 \text{ W/K}$



Ergebnisse  
5. Oktober 2006 - Teil II

---



1.  $\gamma_{OH} = 0,25$  bei 3200 K, 1 atm nicht möglich

2.

a.  $T_2 = 259,5 \text{ K}$

b.  $\Delta s = 0,54 \text{ J/g} \cdot \text{K}$

3.

a.  $n_{N_2} = 0,71 \text{ mol}$

b.  $\frac{w_{He}}{w_{ges}} = 0,58$

4.

a.  $c_V^\infty = 0,80 \text{ J/g} \cdot \text{K}$

5.

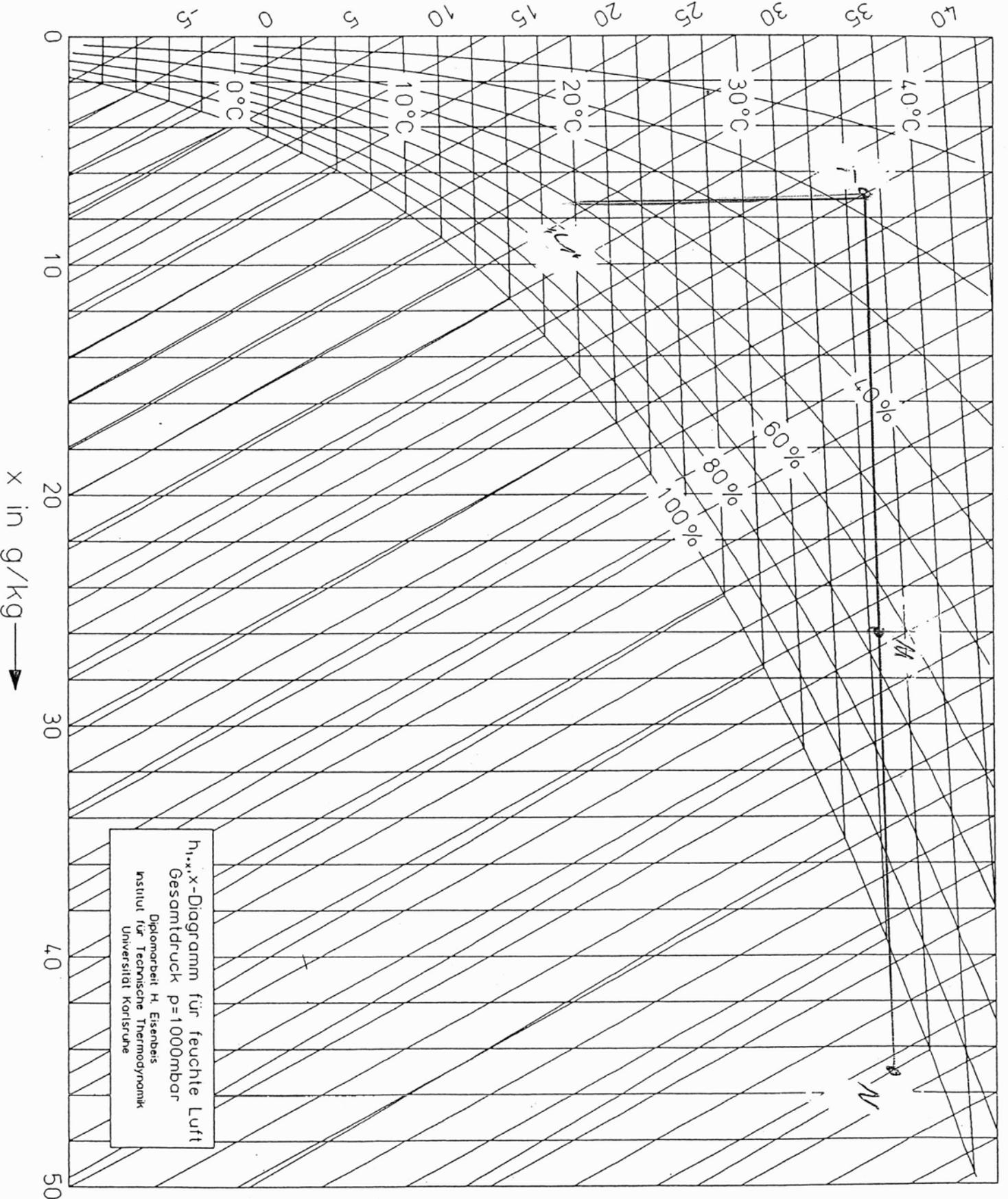
a.  $\frac{|\dot{Q}_T|}{|\dot{Q}_N|} = 0,14$

b.  $t_T \approx 36^\circ\text{C}$ ;  $\varphi \approx 18\%$

c.  $t_M \approx 36^\circ\text{C}$ ;  $\chi_M = 26 \text{ g/kg}$

---

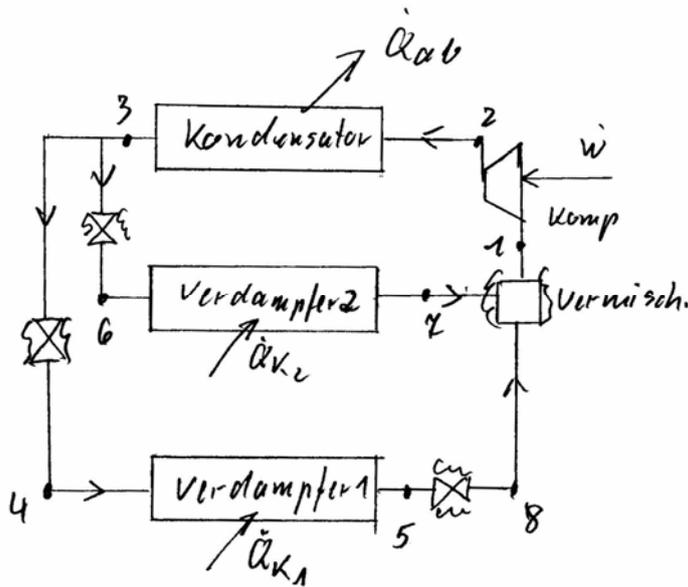
$h$  in kJ/kg →



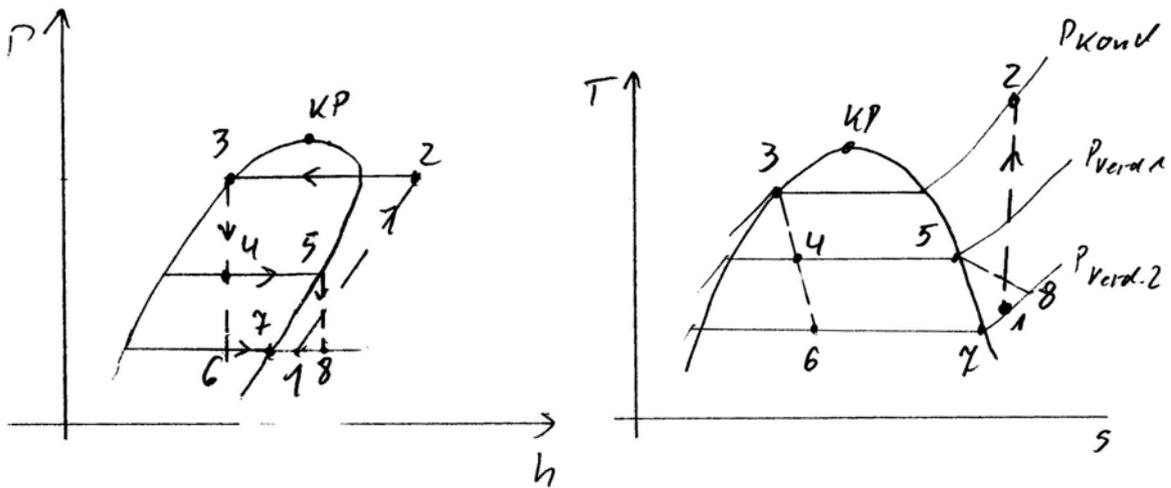
$h, x$ -Diagramm für feuchte Luft  
Gesamtdruck  $p=1000\text{mbar}$   
Diplomarbeit H. Eisenbeis  
Institut für Technische Thermodynamik  
Universität Karlsruhe



1.  
a.



b.



c.  $\dot{m}_1 = 3,5 \text{ g/s}$ ;  $\dot{m}_2 = 3,96 \text{ g/s}$

d.  $\dot{W} = 556,3 \text{ W}$

e.  $\dot{S}_{\text{erzeugt}} = 0,548 \text{ W/K}$

2.  $(h'' - h')_{\text{Verd.}} = 373,6 \text{ J/g}$ ;  $(S'' - S')_{\text{Verd.}} = 1,32 \text{ J/g} \cdot \text{K}$

3.

a.  $T_2 = 374,6 \text{ K}$ ;  $m_e = 62,6 \text{ g}$

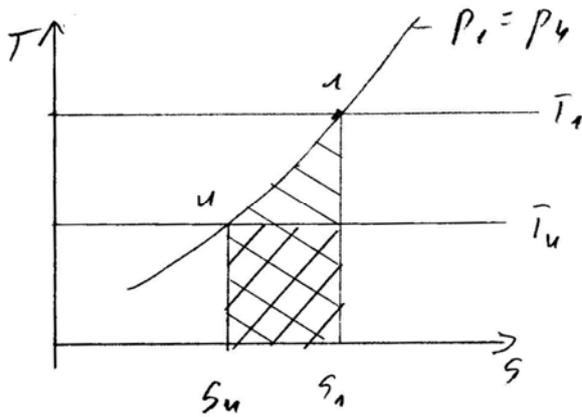
b.  $S_{\text{erzeugt}} = 10,74 \text{ J/K}$

c.  $m_e^* = 88,2 \text{ g}$ ;  $Q = 7,5 \text{ kJ}$



4.

a.  $\varepsilon_i(T_1, P_1) = 0,68 \text{ J/g}$

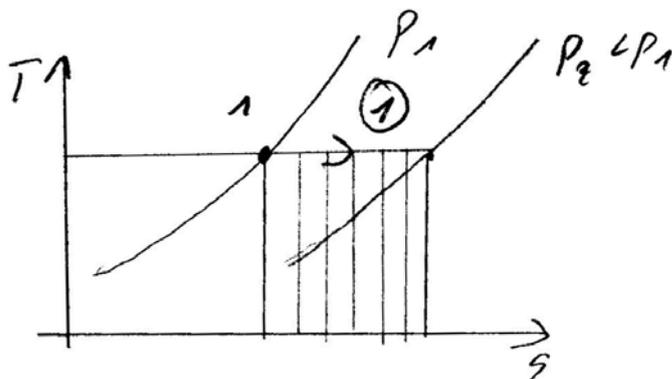


$$h_1 - h_u \stackrel{I}{=} III > 0$$

$$T_u (s_1 - s_u) \stackrel{II}{=} III > 0$$

$$\approx \varepsilon_i \stackrel{I}{=} III - III \stackrel{II}{=} \Delta$$

b.



$$q_{zu} \stackrel{I}{=} III$$

c.  $p_2 = 0,89 \text{ bar}$

d.  $\frac{A_2}{A_1} = 0,11$

Ergebnisse  
6. März 2007 - Teil II



1.

a.  $B(400\text{K}) = -1,32 \text{ cm}^3/\text{g}$

b.  $T_{\text{Boyle}} = \pm \sqrt{\frac{b}{a}} \approx 748 \text{ K};$

$p_{\text{id.k}}(400\text{K}) \approx 1017 \text{ bar}$

2.

a.  $\chi_{\text{CH}_3\text{OH}} = 0,077;$

$\chi_{\text{CO}} = 0,308;$

$\chi_{\text{H}_2} = 0,615$

b.  $K_\chi(\text{aus } \bar{K}_p) = 2,75 \neq K_\chi(\text{aus } \chi_i)$

3.

a.  $n_{\text{N}_2} = 0,71 \text{ mol}$

b.  $\frac{W_{\text{He}}}{W_{\text{ges}}} = \frac{n_{\text{He}}}{n_{\text{ges}}} = 0,58$

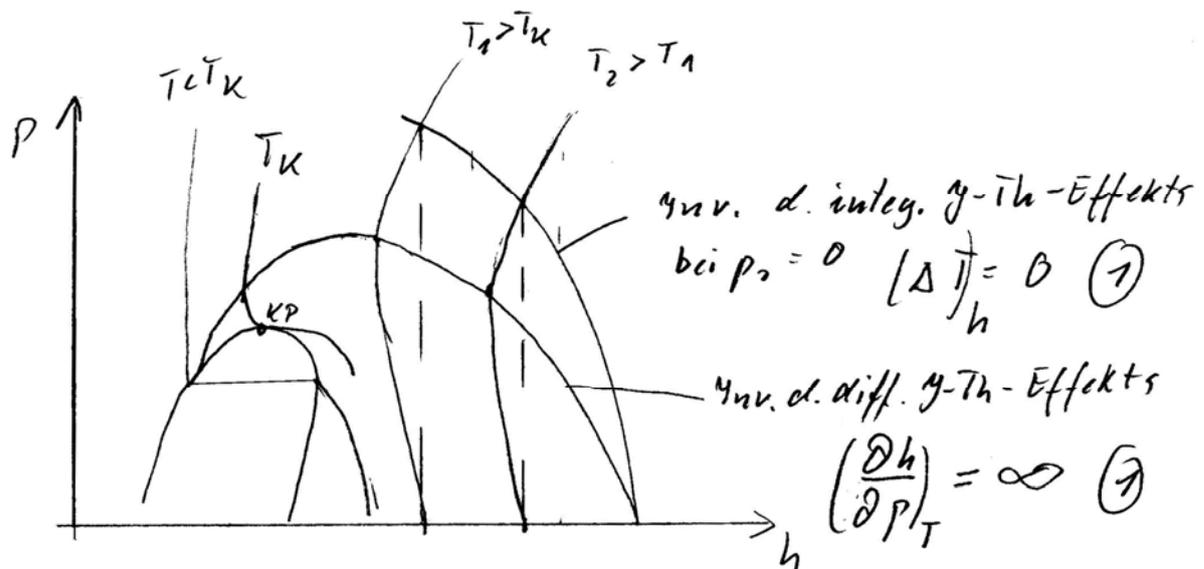
4.

a.  $x_{\text{fe}} = 0,0077 \hat{=} 7,7 \text{ g/kg tr. Luft}$

b.  $\dot{Q} = -348,6 \text{ W}$

5.

a.



b.  $\Delta h = \left(a + \frac{2b}{T}\right) \cdot p + \frac{c}{2} \cdot T^2 + d \cdot T + \text{const}$

c.  $c_p = d + 2 \cdot T - \frac{2b}{T^2} \cdot p$

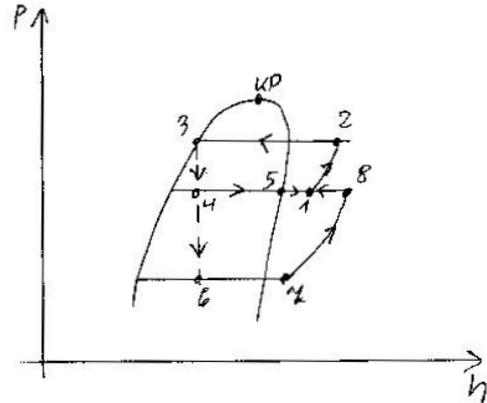
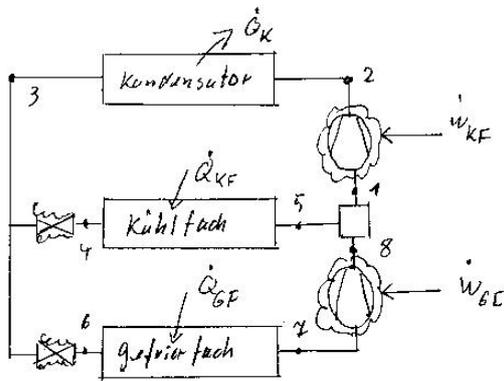
# Ergebnisse

## 1. Oktober 2007 - Teil I



1.

a.



b.  $\dot{m}_{KF} = 0,82 \frac{\text{g}}{\text{s}}$ ;  $\dot{m}_{GF} = 0,53 \frac{\text{g}}{\text{s}}$

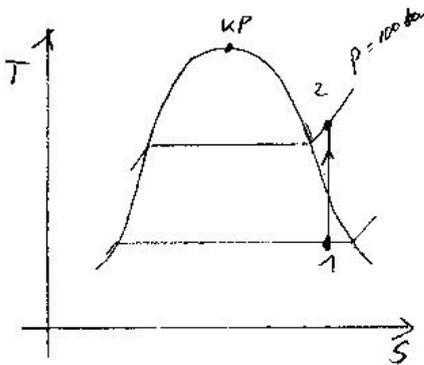
c.  $\dot{W}_{GF} = 13,2 \text{ W}$ ;  $\dot{W}_{KF} = 35,4 \text{ W}$

2.  $|W|_{\text{max}} = 92 \text{ MJ}$

3.  $\Delta h_{\text{Schm}} = 355,3 \frac{\text{J}}{\text{g}}$

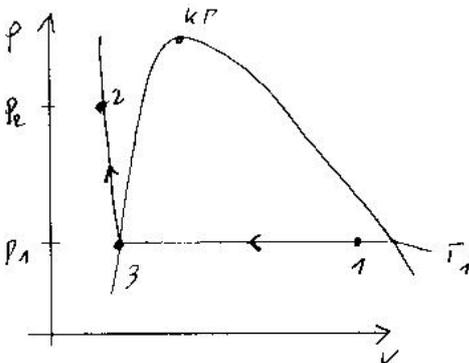
4.

a.



$W = 126,7 \text{ J}$

b.



$W_{\text{ges}} = 9,2 \text{ J}$

$Q_{\text{ges}} = -170,1 \text{ J}$

5.  $V_B = V_{\text{min}} = 286 \text{ l} > 250 \text{ l}$ ; 250 l reichen nicht

# Ergebnisse

## 1. Oktober 2007 - Teil II

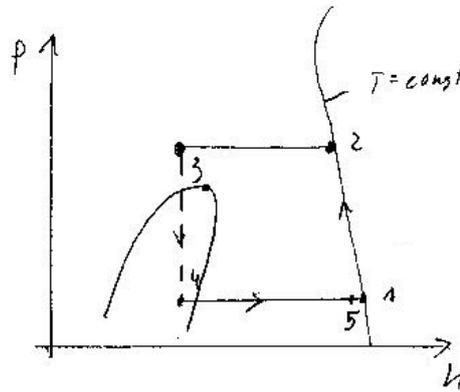
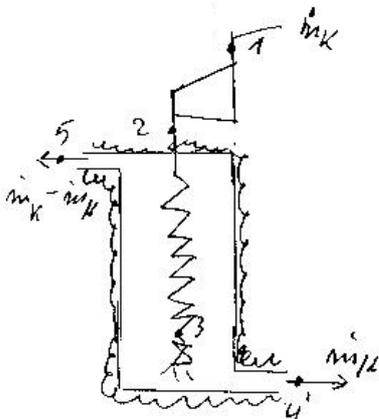
1.

a.  $\frac{q}{|W|} = \frac{f+2}{2} = 3,5$

b.  $\frac{q}{|W|} = 3,3$

2.

a.



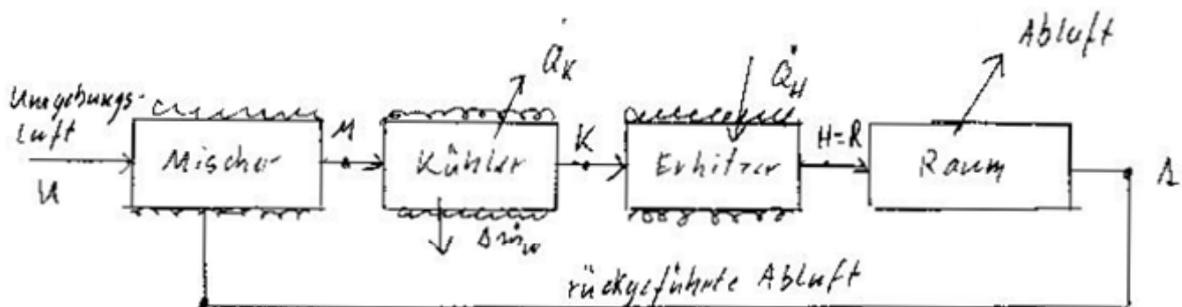
b.  $\frac{\Delta z}{z} = 4 \%$

3.  $p_{ges2} \approx 515 \text{ atm}$

4.  $\chi_{CO_2} = 0,2$

5.

a.



b.  $t = 25 \text{ °C}; \quad \varphi_M = 85 \%$

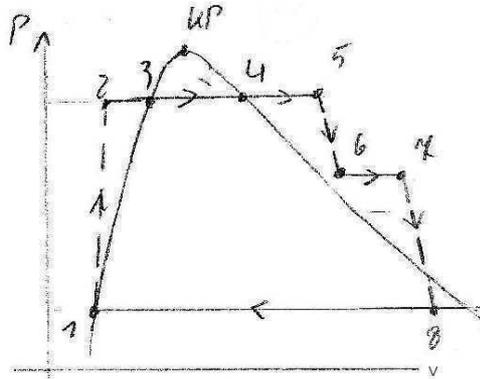
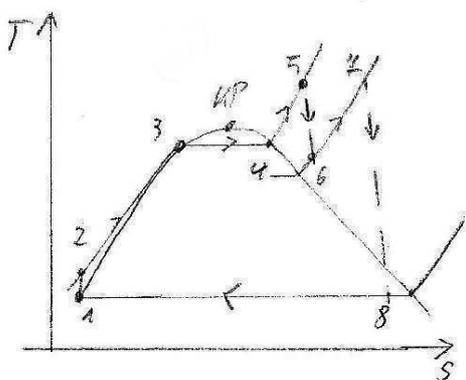
c.  $\frac{|\dot{Q}_K|}{|\dot{Q}_H|} = 3,1$

d.  $\frac{|\dot{Q}_K|}{|\dot{Q}_H|} = 3,7$



Ergebnisse Thermodynamik I, Klausur vom 11. März 2008

1. a)



1. b)

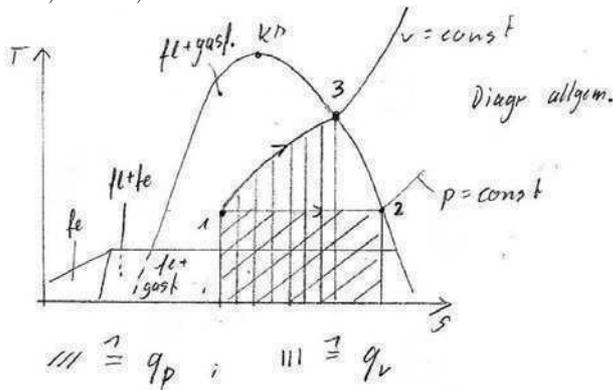
$$\dot{W}_{HD} = -53,56 \text{ MW}$$

$$\dot{W}_{ND} = -157,23 \text{ MW}$$

$$\eta_{th} \hat{=} 38,5 \%$$

1. c)  $\eta_{th} \hat{=} 39,2 \%$

2. a) und b)



2. c)

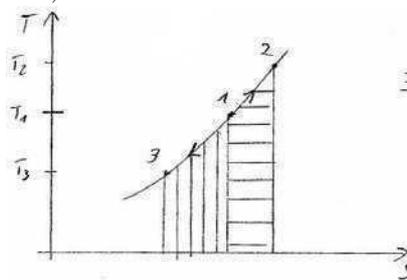
$$q_v \hat{=} \text{festgehalten};$$

$$q_p \hat{=} \text{gleitend};$$

$$q_v > q_p$$

3. a)  $m_1 = 1,29 \text{ kg/s}$

3. b)



$$\equiv \hat{=} h_2 - h_1$$

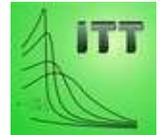
$$\equiv \hat{=} h_3 - h_1$$

$$\equiv \neq \equiv$$

4. a)  $Q_{ges} = -23,03 \text{ kJ}$

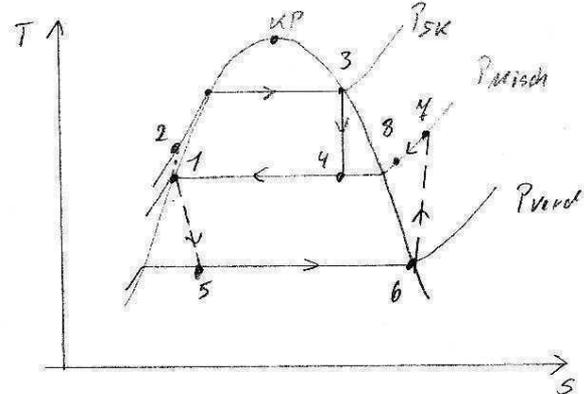
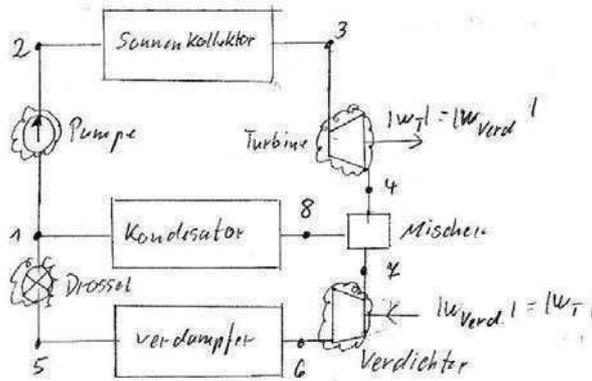
4. b)  $\frac{Q_{Beh}}{Q_{Komp}} = 0,64$





Ergebnisse Thermodynamik I, Klausur vom 7. Oktober 2008

1. a)



1. b)  $\frac{\dot{m}_{Verd}}{\dot{m}_T} = 0,72$

1. c)  $\dot{Q}_{Kollekt} = 712,4 \text{ kW}$

2. a)  $T_{L2} = T_{R2} = 300 \text{ K}$

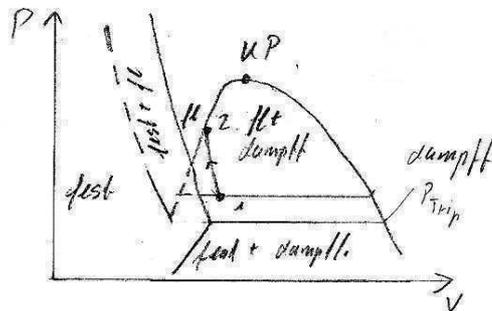
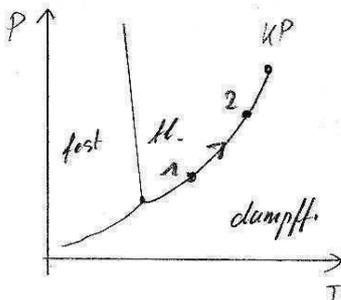
$p_2 = 10,5 \text{ bar}$

2. b)  $S_{erz} = 3,5 \text{ J/K}$

2. c)  $\Delta E = 1,05 \text{ kJ}$

3. a) und b)

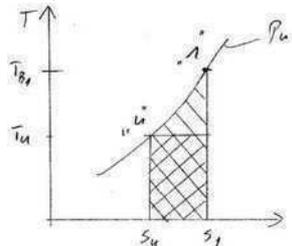
3. b)  $m = 10,4 \text{ g}$



4. a)  $\varepsilon_{t1} = 30,2 \text{ MJ}$

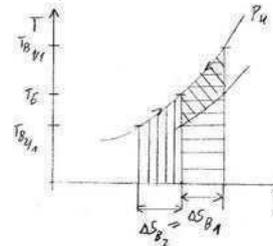
4. c)  $W_{\max} = 15,5 \text{ MJ}$

4. b)



$h_2 - h_u \cong \text{III} > 0$   
 $T_u (s_2 - s_u) \cong \text{III} > 0$   
 $\varepsilon_{t1} \cong \text{III} - \text{III} = \Delta$

4. d)



$w \cong -\text{III}$   
 oder  
 III parallel zur s-Achse  
 verschieben  
 $\downarrow w \cong \text{III}$

5.  $p_1 = 1,75 \text{ bar}$



## Ergebnisse Thermodynamik II, Klausur vom 7. Oktober 2008

1. a)  $x_1 = 0,0055 \hat{=} 5,5 \frac{\text{g}}{\text{kg}_{\text{L, tr}}}$       1. b)  $t_2 - t_1 = -14,8 \text{ K}$

2. a)  $c_v(v_2, T) = 0,93 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{K}}$       2. b)  $T_2 = 660,0 \text{ K}$       2. c)  $T_3 = 982,7 \text{ K}$

3. a)  $T_2 = 391,4 \text{ K}$      $p_{\text{N}_2,2} = 0,2 \text{ bar}$      $p_{\text{He},2} = 2,8 \text{ bar}$       3. b)  $\dot{W}_T = 1,48 \text{ kW}$

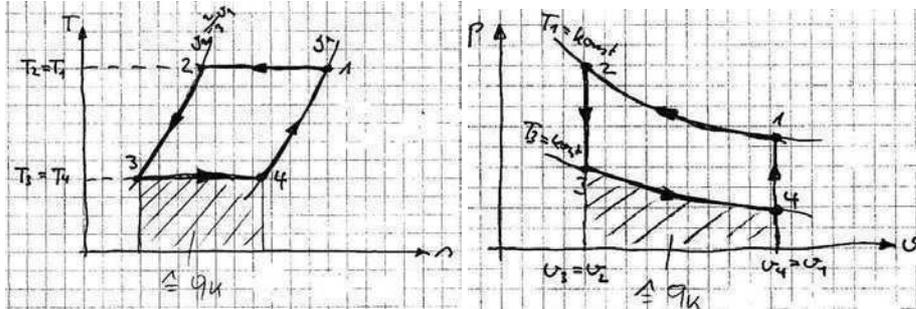
4. a)  $\dot{m} = 0,81 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$       4. b)  $p_1 = 7,3 \text{ bar}$

5.  $\gamma_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH},A} \hat{=} 2,8 \text{ mol-}\%$  >  $\gamma_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH},B} \hat{=} 6,2 \text{ mol-}\%$   $\implies$       Maßnahme B



Ergebnisse Thermodynamik I, Klausur vom 31. März 2009

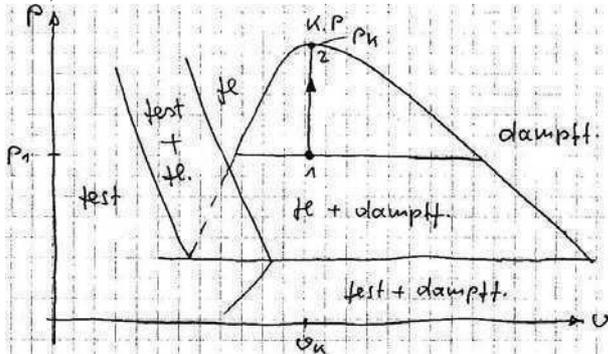
1. a)



1. b)  $\dot{Q}_K = 298 \text{ W}$

1. c)  $\varepsilon = 0,29$

2. a)

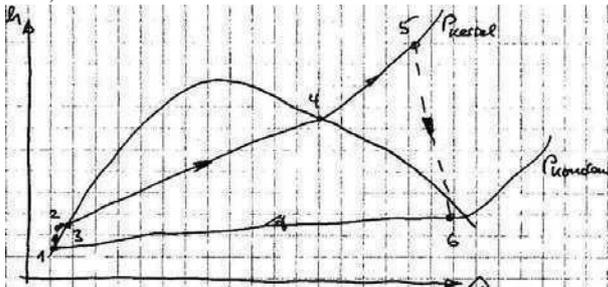


2. b)  $m = 31,55 \text{ kg}$

2. c)  $x_1 = 0,0009 \hat{=} 0,9 \text{ ‰}$

2. d)  $Q = 52,3 \text{ MJ}$

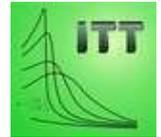
3. a)



3. b)  $\eta \hat{=} 34,13 \%$

3. c)  $h'' - h' = 2135,72 \frac{\text{J}}{\text{g}}$

4.  $Q = -3736,3 \text{ kJ}$



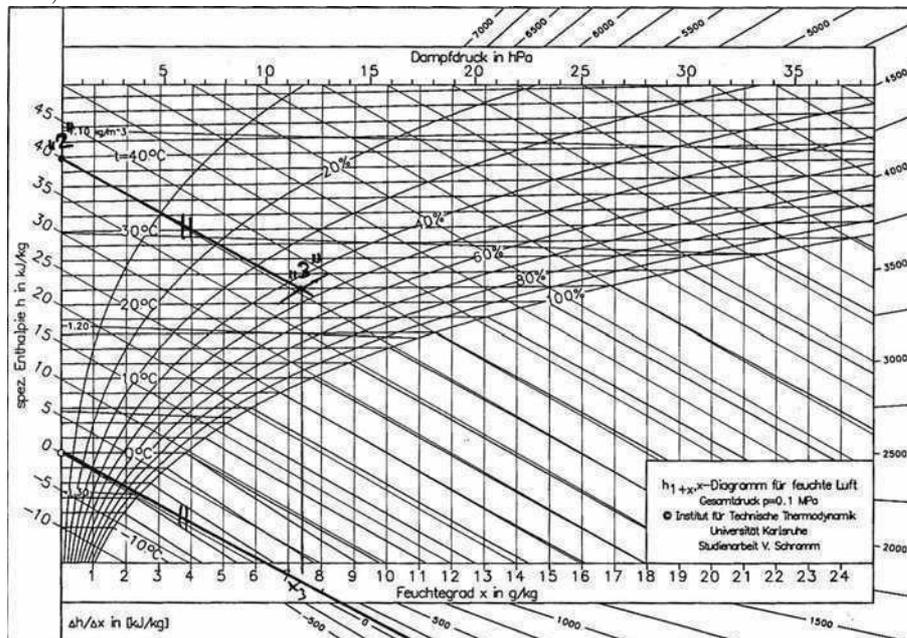
Ergebnisse Thermodynamik II, Klausur vom 31. März 2009

1. a)  $T_M = 366,7 \text{ K}$     1. b)  $p_{O_2} = 0,33 \text{ bar}$      $p_{H_2} = 0,67 \text{ bar}$     1. c)  $\dot{S}_{\text{erz}} = 16,66 \frac{\text{W}}{\text{K}}$

2. a)  $m = 1,77 \text{ g}$     2. b)  $T_2 = 555,5 \text{ K}$      $V_2 = 0,09 \text{ l}$     2. c)  $W = 329,5 \text{ J}$

3. a)  $p_{\text{PCl}_3} = p_{\text{Cl}_2} = 0,8 \text{ atm}$      $p_{\text{PCL}_5} = 0,4 \text{ atm}$     3. b)  $\bar{K}_p = 1,6$     3. c) 94% wären zerfallen

4. a)

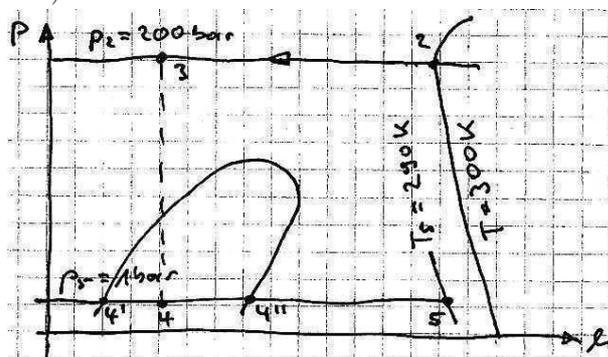


4. a)  $\dot{Q} = -94,95 \text{ kW}$

4. b)  $\dot{m} = 79,92 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$

4. c)  $\varphi \approx 50\%$

5. a)



5. b)  $z \hat{=} 7,19\%$

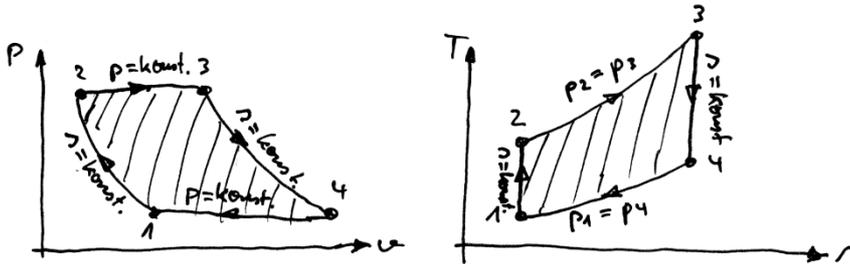
5. c)  $T_3 = 177,04 \text{ K}$

5. d)  $z^* \hat{=} 12\%$



Ergebnisse Thermodynamik I, Klausur vom 2. Oktober 2009

1. a)



$$/// \cong \omega$$

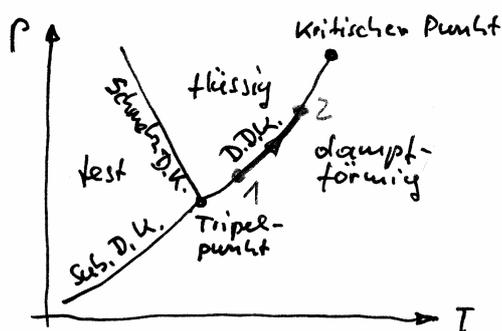
1. b)  $|\dot{W}| = 16,77 \text{ MW}$ ,  $\eta_{th} = 0,48 \cong 48\%$

1. c)  $\eta_{th}^* = 0,535 \cong 54\%$

1. d)  $p_2^* < 12,6 \text{ bar}$

2.  $\Delta s = -0,14 \frac{\text{J}}{\text{gK}} \rightarrow$  Die Maschine ist eine Turbine

3. a)

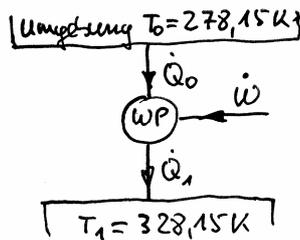


3. b)  $T_2 = 611,2 \text{ K}$

3. c)  $p_1 = 9,5 \text{ bar}$ ,  $p_2 = 122,2 \text{ bar}$

3. d)  $Q = 176,2 \text{ kJ}$

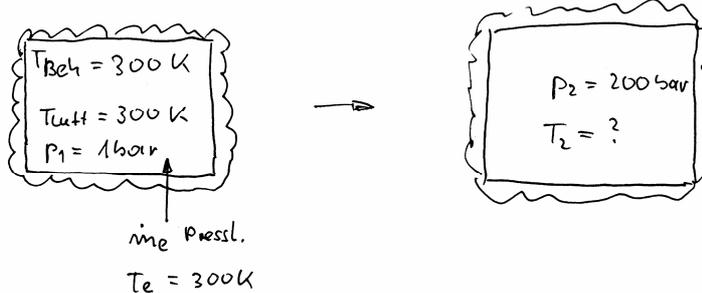
4.



4. a)  $\epsilon_{WP_{max}} = 6,56$

4. b)  $\epsilon_{WP} = 3,0$

5.  $T_2 = 371,3 \text{ K}$



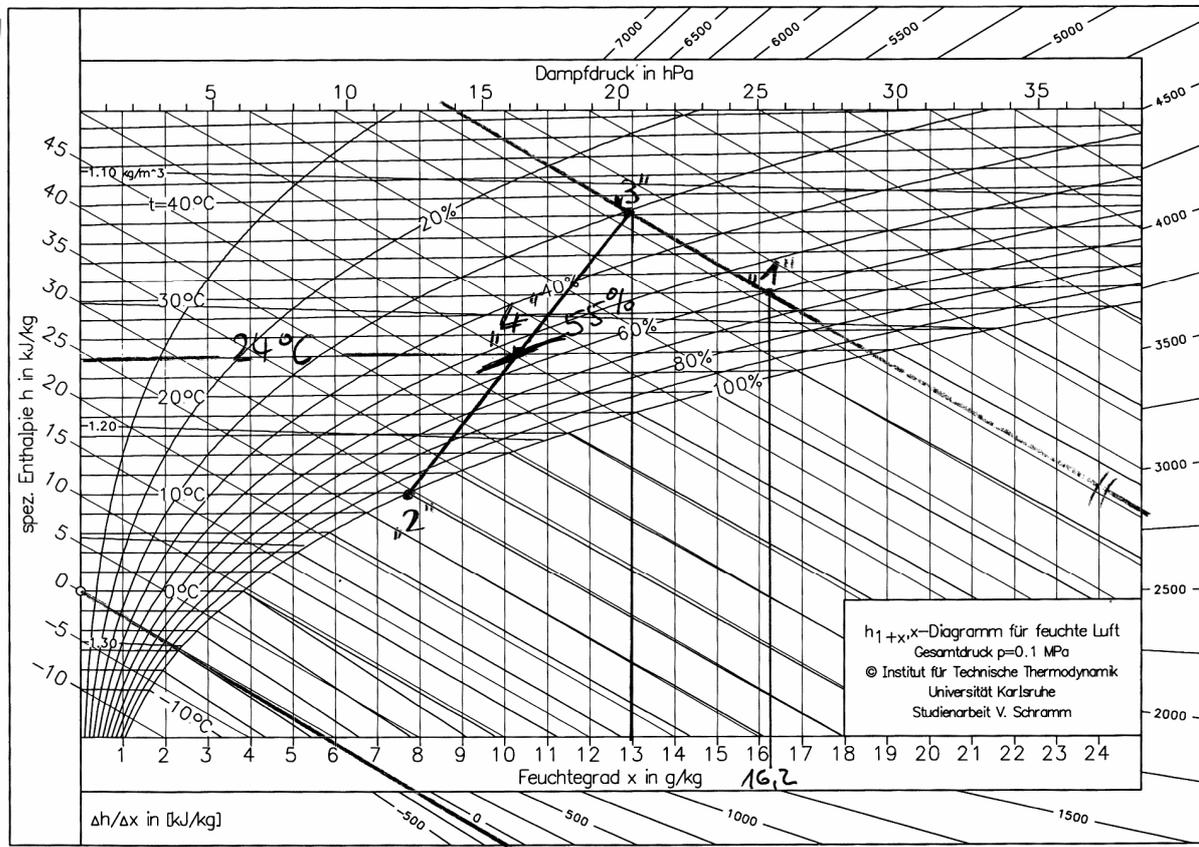
**Ergebnisse Thermodynamik II, Klausur vom 2. Oktober 2009**

1. a)  $T_2 = 365,9\text{K}$       1. b)  $\dot{S}_{\text{erz}} = 38,71 \frac{\text{W}}{\text{K}}$

1. c)  $p_3 = 2\text{bar}$  ist unmöglich

2. a)  $t_4 \approx 24^\circ\text{C}$ ,  $\varphi_4 = 55\%$

2. b) Es werden  $1,6 \frac{\text{kg Trocknungsmittel}}{\text{kg trockene Luft}}$  aufgenommen.



3. a)  $T_2 = 235,5\text{K}$       3. b)  $c_2 = 964,2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$       3. c)  $\frac{A_2}{A_1} = 0,98$

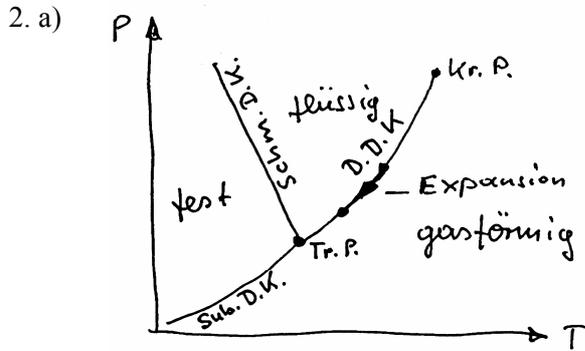
4. a)  $\Delta_R H^{500} = -111,08\text{kJ}$ ,  $\Delta_R S^{500} = -259,8 \frac{\text{J}}{\text{K}}$       4. b)  $\bar{K}_p = e^{-13,97} = 8,6 \cdot 10^{-7}$

4. c) Eine Druckerhöhung verschiebt das Gleichgewicht zu Methanol hin (nach rechts), da bei der Reaktion (von links nach rechts) die Molzahl abnimmt.

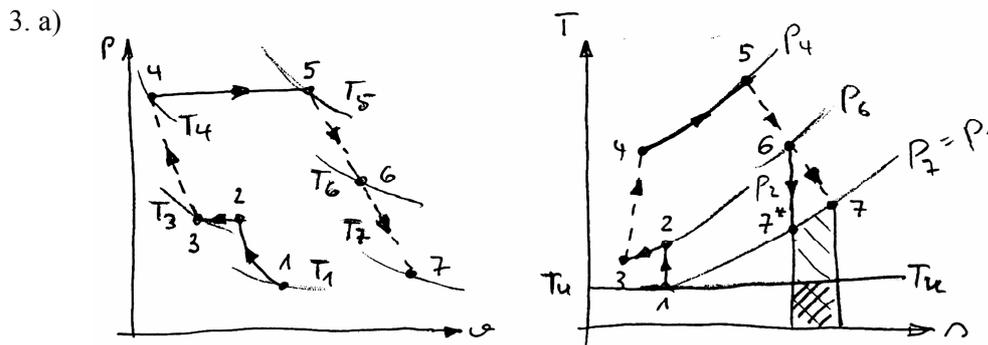
4. d)  $p_{\text{ges}} = 284,4\text{atm}$

**Ergebnisse Thermodynamik I, Klausur vom 6. März 2010**

1. a)  $m_1 = 440,5 \text{ kg}$       1. b)  $x_2 = 0,222$       1. c)  $Q = 8,49 \text{ MJ}$



2. b)  $T_2 = 354,25 \text{ K} \hat{=} 81,1^\circ \text{C}$       2. c)  $\Delta s = 0,71 \frac{\text{J}}{\text{gK}}$



3. b)  $\eta = 0,40 \hat{=} 40\%$       3. c)  $w_V = 76 \frac{\text{J}}{\text{g}}, \quad \varepsilon_V = 59,5 \frac{\text{J}}{\text{g}}$

3. d) siehe Teil a)   $\hat{=} w_V$         $\hat{=} \varepsilon_V$

4. a)  $|\dot{W}_{WP}| = 2250 \text{ W} = 2,25 \text{ kW}$       4. b)  $t_{L,aus} = -10^\circ \text{C}$

4. c)  $\frac{\text{Heizenergie}}{\text{eingesetzte Primärenergie}} = \frac{\dot{m}_{H_2O} \cdot c_W \cdot \Delta T_W}{\dot{E}_{\text{Primär}}} = 1,4$

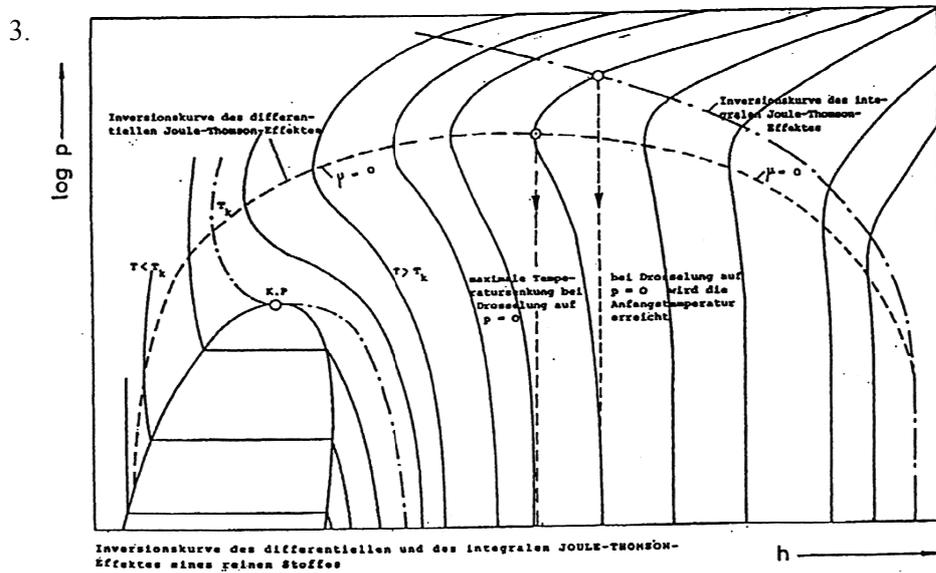


**Ergebnisse Thermodynamik II, Klausur vom 6. März 2010**



1. b)  $W = 489,3 \text{ J}$       1. c)  $\Delta S_{\text{verm}} = 1,83 \frac{\text{J}}{\text{K}}$

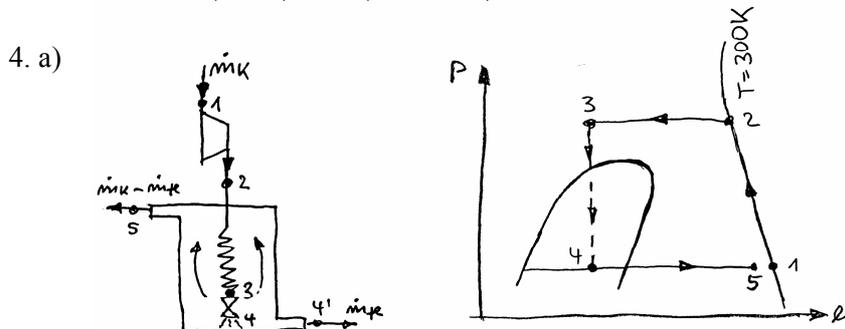
2. a)  $T_2 = 297,1 \text{ K}$ ,  $\varphi_2 = 80\%$       2. b)  $c_2 = 180,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$



Bedingung für Inversion des differentiellen Joule-Thomson-Effektes:  $\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h = 0 \rightarrow \left(\frac{\partial p}{\partial h}\right)_T = \infty$

Bedingung für Inversion des integralen Joule-Thomson-Effektes:

$\Delta T = 0$  für  $h_1(T, p_1) = h_2(T, p_2 = 0)$



4. b)  $h_2 = 265 \frac{\text{J}}{\text{g}}$       4. c)  $z = 6\%$       4. d)  $\frac{\dot{W}_{\text{kompr.}}}{\dot{m}_f} = 7099 \frac{\text{J}}{\text{g}}$

5. a)  $x = 0,0084$ ,  $\gamma_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}} = 0,28 \text{ mol-}\%$ ,  $\gamma_{\text{C}_2\text{H}_4} = 66,57 \text{ mol-}\%$ ,  $\gamma_{\text{H}_2\text{O}} = 33,15 \text{ mol-}\%$

5. b)  $p_{\text{ges}} = 47,1 \text{ atm}$