Thermodynamik für MB und UTRM: 1. Übung

Aufgabe 1.1 (Kurzfragen)

a) – Wodurch ist ein thermodynamisches System gekennzeichnet?
   – Welche Arten von Systemengrenzen gibt es, und wie lassen sie sich charakterisieren?

b) – Was ist das Kennzeichen einer thermodynamischen Zustandsgröße?
   – Was versteht man unter extensiven und intensiven Zustandsgrößen?
   – Was sind spezifische und molare Zustandsgrößen?
   – Was versteht man unter thermischen Zustandsgrößen?
   – Was versteht man unter einem Prozess?

Aufgabe 1.2 (Kurzfragen)

a) – Wie lautet der Nullte Hauptsatz der Thermodynamik?

b) – Welche Beziehung besteht zwischen der Kelvin-Temperatur T und der Celsius-Temperatur t ?

c) – Welcher Kelvin-Temperatur T entspricht t = 20 °C?
   – Welcher Celsius-Temperatur t entspricht T = 373,15 K?

Aufgabe 1.3 (Kurzfragen)

a) – Nennen Sie die Kennzeichen eines idealen Gases.
   – Wie lautet die Zustandsgleichung des idealen Gases?
   – Unter welchen Bedingungen verhält sich ein reales Gas näherungsweise wie ein ideales Gas?

b) – Wie kann ein ideales Gas einen Druck auf eine Behälterwand ausüben?

Aufgabe 1.4

a) Berechnen Sie das spezifische Volumen v und die Dichte ρ von (trockener) Luft bei Umgebungsbedingungen: (t_u = 20 °C, p_u = 1 bar). Die Luft (Molmasse M_L = 28,96 g/mol) kann dabei als ideales Gas betrachtet werden. (v = 0,8416 m^3/kg; ρ = 1,188 kg/m^3)

b) Berechnen Sie die Masse m und die Stoffmenge n der Luft, die sich bei den oben genannten Umgebungsbedingungen in einem Seminarraum mit einem Volumen von V = 200 m^3 befinden. (m = 237,60 kg; n = 8,204 kmol)

c) Wie groß ist die Dichte ρ_n der Luft im „Normzustand“ bei (t_n = 0 °C, p_n = 1,01325 bar). (ρ_n = 1,292 kg/ m^3) (Anmerkung: Der Normzustand ist ein häufig benutzter Referenzzustand.)

Aufgabe 1.5

Eine Stahlflasche (Volumen $V = 1\ \mathrm{dm}^3$) ist vollständig mit flüssigem Wasser gefüllt (Zustand 1: $p_1 = 1$ bar, $t_1 = 20$ °C).

a) Welcher Druck stellt sich in der Stahlflasche ein, wenn die Temperatur auf $t_2 = 50$ °C ansteigt und das Volumen der Stahlflasche näherungsweise als konstant betrachtet werden kann? ($p_2 = 234{,}86$ bar)

Stoffwerte für flüssiges Wasser im hier betrachteten Temperatur- und Druckbereich:

mittlerer (isobarer) Volumenausdehnungskoeffizient $\overline{\alpha} = 343 \cdot 10^{-6}/\mathrm{K}$
mittlerer (isothermer) Kompressibilitätskoeffizient $\overline{\gamma} = 44{,}0 \cdot 10^{-6}/\mathrm{bar}$

Aufgabe 1.6

Ein Kolben-Zylinder-System ist mit Stickstoff gefüllt (Zustand 1: $V_1 = 1\ \mathrm{m}^3$, $p_1 = 1$ bar, $t_1 = 20$ °C). Der Stickstoff (Molmasse $M = 28$ g/mol) kann hier näherungsweise als ideales Gas betrachtet werden.

a) Wie groß ist die spezielle Gaskonstante R vom Stickstoff? ($R = 296{,}93$ J/(kg·K))

b) Berechnen Sie die Masse m und die Substanzmenge n des Stickstoffs im System. ($m = 1{,}1488$ kg; $n = 41{,}03$ mol)

c) Wie groß sind die Dichte ρ_1 und das spezifische Volumen v_1 im Zustand 1? ($\rho_1 = 1{,}1488\ \mathrm{kg/m}^3$; $v_1 = 0{,}8705\ \mathrm{m}^3/\mathrm{kg}$)

d) Welcher Druck p_2 würde sich im System bei einer isochoren Erwärmung auf $t_2 = 100$ °C einstellen? ($p_2 = 1{,}273$ bar)

e) Welcher Druck p_3 würde sich im System einstellen, wenn das Volumen ausgehend vom Zustand 1 isotherm auf die Hälfte ($V_3 = V_1/2$) komprimiert würde? ($p_3 = 2$ bar)

f) Welche Dichte ρ_4 würde sich im System einstellen, wenn das Volumen ausgehend vom Zustand 1 isobar auf $t_4 = 100$ °C erwärmt würde ? ($\rho_4 = 0{,}9025\ \mathrm{kg/m}^3$)

Aufgabe 1.7

Ein Heißluftballon mit einem Hüllenvolumen von $V = 3000\ \mathrm{m}^3$ soll eine Masse von $m = 800$ kg (Ballonhülle, Korb, Propan-Gasflaschen, 5 Personen) tragen. Der Druck in der Ballonhülle ist immer gleich dem Druck der Umgebungsluft. Die Umgebungsluft (Molmasse $M = 28{,}96$ g/mol) kann näherungsweise als ideales Gas betrachtet werden. Da der Anteil der Verbrennungsgase im Ballon relativ gering ist und außerdem die Molmasse dieser Verbrennungsgase nur gering von der Molmasse der Luft abweicht, kann das Gasgemisch im Ballon in guter Näherung als reine Luft behandelt werden.

a) Wie groß muss die mittlere Temperatur t_{LB} der Luft in der Ballonhülle sein, wenn der Ballon in einer Höhe von 1000 m (Umgebungsbedingungen: $p_u = 0{,}9$ bar, $t_u = 12$ °C) fährt? ($t_L = 103{,}31$ °C)

Hinweis: Die Tragfähigkeit des Ballons ergibt sich nach dem Auftriebs-Prinzip von Archimedes aus der Masse der vom Ballon verdrängten Umgebungsluft abzüglich der Masse der sich im Ballon befindlichen Heißluft.

Thermodynamik für MB und UTRM: 2. Übung

Aufgabe 2.1 (Kurzfragen)

a) – Geben Sie eine Erklärung für die innere Energie U eines Systems.
   – Wie kann die thermodynamische Temperatur vom energetischen Standpunkt aus gedeutet werden?

b) – Wie ist die spezifische isochore Wärmekapazität definiert?
   – Wie groß ist die spezifische isochore Wärmekapazität eines einatomigen idealen Gases? Ist sie temperaturabhängig?
   – Ist die molare isochore Wärmekapazität eines zweiatomigen idealen Gases temperaturabhängig? (Begründung erforderlich !)

c) – Wie ist die Enthalpie definiert?
   – Wie ist die spezifische isobare Wärmekapazität definiert?
   – Welcher Zusammenhang besteht zwischen den spez. isochoren und der spez. isobaren Wärmekapazität?
   – Wie groß sind die Isentropenexponenten κ für Argon und für Stickstoff (bei mäßiger Temperatur; Rotation voll angeregt und Schwingung nicht angeregt) im Zustand des idealen Gases?

Aufgabe 2.2 (Kurzfragen)

a) – Welche grundsätzliche Aussage macht der 1. Hauptsatz der Thermodynamik?

b) – Wie lautet der 1. Hauptsatz der Thermodynamik für (ruhende) geschlossene Systeme?
   – Was versteht man unter der Volumenänderungsarbeit, und welche Beziehung kennen Sie für die reversible Volumenänderungsarbeit eines geschlossenen Systems?

c) – Wie lautet der 1. Hauptsatz der Thermodynamik für einen stationären Fließprozess in der Schreibweise mit spezifischen Größen?
   – Erläutern Sie den Begriff „technische Arbeit“.
   – Wie lautet die Berechnungsgleichung für die technische Arbeit bei einem reversiblen stationären Fließprozess, wenn die Änderungen der potentiellen und kinetischen Energie vernachlässigt werden können?

Aufgabe 2.3

In einem Einfamilienhaus ist für die Warmwasserbereitung einer Dusche ein nach außen adiabater elektrischer Durchlauferhitzer vorhanden. In der Sparfunktion wird ein begrenzter Wasser-Volumenstrom von $\dot{V} = 8\ \mathrm{dm^3/min}$ vom Zustand 1 ($t_1 = 12\ °\mathrm{C}$, $p_1 = 4$ bar) isobar auf die Temperatur $t_2 = 37\ °\mathrm{C}$ erwärmt.

a) Wie groß ist die hierzu benötigte elektrische Leistung P_{12}? ($P_{12} = 13{,}95$ kW)

b) Wie groß ist der „Stromverbrauch“ (benötigte Energie) in kWh (Kilowattstunden), wenn die Dusche 10 min in Betrieb ist? ($W = 2{,}325$ kWh)

Stoffwerte von Wasser: Dichte $\rho = 1{,}000\ \mathrm{kg/dm^3}$ = konstant
spez. isobare Wärmekapazität $\bar{c}_p \Big|_{t_1}^{t_2} = 4{,}185\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$

Hinweis: Die Änderung der kinetischen und der potentiellen Energie kann vernachlässigt werden.

Aufgabe 2.4

Zur Versorgung des Druckluftnetzes einer Werkstatt soll ein Kompressor einen Luft-Volumenstrom von $\dot{V} = 1\ \mathrm{m^3/min}$ vom Umgebungszustand $t_1 = 20\ °\mathrm{C}$, $p_1 = 1\ \mathrm{bar}$ auf den Druck $p_2 = 15\ \mathrm{bar}$ verdichten.

a) Skizzieren Sie den Kompressor schematisch, und tragen Sie alle gegebenen Daten ein.

b) Welche Leistung P_{12} nimmt der Kompressor auf, wenn die Kompression reversibel isotherm erfolgt? ($P_{12,\mathrm{rev.isoth.}} = 4{,}514\ \mathrm{kW}$)

c) Welcher Wärmestrom $\dot{Q}_{12}$ muss bei der reversibel isothermen Verdichtung abgeführt werden? ($\dot{Q}_{12} = -P_{12,\mathrm{rev.isoth.}}$)

d) Um wieviel größer müsste die Antriebsleistung des Kompressors sein, wenn statt der reversibel isothermen Verdichtung eine reversibel adiabate Verdichtung (auf den Zustand 3) angenommen werden muss?
Wie groß wäre dann die Endtemperatur T_3?
($P_{13,\mathrm{rev.ad.}} - P_{12,\mathrm{rev.isoth.}} = 2{,}30\ \mathrm{kW}$; $T_2 = 635{,}50\ \mathrm{K}$)

Stoffwerte: Die Luft kann hier näherungsweise als ideales Gas betrachtet werden.
Molmasse: $M = 28{,}96\ \mathrm{g/mol}$
Isentropenexponent: $\kappa = 1{,}40$ = konstant (mittlerer Temperaturbereich)

Hinweis: Die Änderung der kinetischen und der potentiellen Energie kann vernachlässigt werden.

Aufgabe 2.5 (Zusätzliche Übungsaufgabe für zu Hause)

Ein Kolben-Zylinder-System ist mit Luft gefüllt (Zustand 1: $V_1 = 1000\ \mathrm{cm^3}$, $p_1 = 2\ \mathrm{bar}$, $t_1 = 20\ °\mathrm{C}$). Die Luft (Molmasse $M = 28{,}96\ \mathrm{g/mol}$) kann hier näherungsweise als ideales Gas betrachtet werden, und die spez. isobare Wärmekapazität der Luft $c_p^\circ = 1{,}010\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$ soll als konstant angenommen werden.

a) Welche Volumenänderungsarbeit W_{12}^{v} ist erforderlich, um das Volumen ausgehend vom Zustand 1 reversibel isotherm auf $V_2 = 100\ \mathrm{cm^3}$ zu komprimieren, und welche Wärme Q_{12} muss dabei abgeführt werden? ($W_{12}^{\mathrm{v}} = 460{,}45\ \mathrm{J}$; $Q_{12} = -W_{12}^{\mathrm{v}}$)

b) Wie groß müsste die zuzuführende Wärme Q_{13} sein, um das System ausgehend vom Zustand 1 isochor auf die Temperatur $t_3 = 200\ °\mathrm{C}$ zu erwärmen? ($Q_{13} = 309{,}17\ \mathrm{J}$)

c) Welche Volumenänderungsarbeit W_{14}^{v} könnte vom System abgegeben werden, wenn das Volumen ausgehend vom Zustand 1 reversibel isobar auf $V_2 = 2000\ \mathrm{cm^3}$ expandiert würde, und welche Wärme Q_{14} müsste dabei zugeführt werden?
($W_{14}^{\mathrm{v}} = -200\ \mathrm{J}$; $Q_{14} = 703{,}51\ \mathrm{J}$)

Thermodynamik für MB und UTRM: 3. Übung (SS 2007)

Aufgabe 3.1 (Kurzfragen)

a) Wie lauten die Gleichungen zur Beschreibung der folgenden Zustandsänderungen eines idealen Gases:
   – isotherme Zustandsänderung,
   – reversibel adiabate Zustandsänderung,
   – polytrope Zustandsänderung?

b) Zeichnen Sie die drei Zustandsänderungen qualitativ richtig in ein *p,v*-Diagramm ein (als Kompression vom Druck p_1 auf den Druck p_2).

c) Veranschaulichen Sie im *p,v*-Diagramm die technischen Arbeiten w_{t12}, die zur Kompression eines idealen Gases vom Druck p_1 auf p_2 notwendig sind, wenn man die drei genannten Zustandsänderungen jeweils als reversible Prozesse zugrunde legt.
   Welche Schlussfolgerungen lassen sich aus diesem Ergebnis ziehen?

Aufgabe 3.2 (Zusätzliche Übungsaufgabe für zu Hause)

Zur Deckung von Spitzenlasten beim Stromverbrauch werden häufig schnell in Betrieb zu nehmende offene Gasturbinenanlagen eingesetzt (nähere Erläuterung in Kapitel 5). Hierbei durchläuft das Arbeitsmedium Luft (stark vereinfacht betrachtet) die folgenden Zustandsänderungen:

$1 \rightarrow 2$: reversibel adiabate Verdichtung eines Luft-Volumenstroms $\dot{V}_1 = 100\ \mathrm{m^3/s}$ vom Umgebungszustand ($t_1 = t_u = 20$ °C, $p_1 = p_u = 1$ bar) auf den Zustand 2 ($p_2 = 15$ bar).

$2 \rightarrow 3$: isobare Wärmezufuhr bei $p = 15$ bar bis zur Temperatur $t_3 = 1200$ °C.
(Anmerkung: Zur Erwärmung der Luft auf $t_3 = 1200$ °C wird in einer Brennkammer Erdgas oder Heizöl mit der Luft verbrannt. Zur Vereinfachung wird der Massenstrom des Brennstoffs $\dot{m}_B/\dot{m}_L < 3$ % hier nicht weiter berücksichtigt.)

$3 \rightarrow 4$: reversibel adiabate Expansion der Luft in der Gasturbine auf den Druck $p_4 = p_1 = 1$ bar.

Stoffwerte der Luft:

Die Luft kann hier näherungsweise als ideales Gas behandelt werden.

Gaskonstante $R_L = 0{,}2871$ kJ/(kg· K)

spez. isobare Wärmekapazität $c^0_{pL} = 1{,}0049$ kJ/(kg· K)

Die spez. isobare Wärmekapazität der Luft sowie der Isentropenexponent κ sollen hier (stark) vereinfachend als konstant angenommen werden.

a) Berechnen Sie den Massenstrom $\dot{m}$ der Luft. ($\dot{m} = 118{,}82$ kg/s)

b) Bestimmen Sie die Temperatur t_2 am Austritt des Luftverdichters sowie die benötigte Leistung des Verdichters P_{12}. ($t_2 = 362{,}35$ °C; $P_{12} = 40{,}877$ MW)

c) Berechnen Sie die Temperatur t_4 am Austritt der Gasturbine sowie die von der Gasturbine abgegebene Leistung P_{34}. ($t_4 = 406{,}40$ °C; $P_{34} = -94{,}758$ MW)

d) Berechnen Sie den zugeführten Wärmestrom $\dot{Q}_{23}$ und die Nutzleistung $P_N = (P_T + P_V)$ der Gasturbinenanlage. ($\dot{Q}_{23} = 100{,}017$ MW; $P_N = -53{,}881$ MW)

e) Welcher Anteil des zugeführten Wärmestroms $\dot{Q}_{23}$ konnte in Nutzleistung P_N umgewandelt werden? ($P_N/\dot{Q}_{zu} = 53{,}87$ % = η_{th} thermischer Wirkungsgrad; Erläuterung im Kapitel 3)

Aufgabe 3.3

In einem Kolben-Zylinder-System befindet sich Luft im Zustand 1 (V_1 = 500 cm^3, p_1 = 1 bar, T_1 = 320 K). Nacheinander werden nun fünf Zustandsänderungen durchlaufen:

1 → 2: reversibel adiabate Verdichtung auf V_2 = 25 cm^3.

2 → 3: isochore Wärmezufuhr bis zum Druck p_3 = 70 bar.

3 → 4: reversibel isobare Wärmezufuhr; spez. Wärme q_{34} = 1650 J/g.

4 → 5: reversibel adiabate Expansion auf $V_5 = V_1$ = 500 cm^3.

5 → 1: isochore Wärmeabfuhr bis zum Druck p_1 = 1 bar.

Das Arbeitsmedium Luft kann hier als ideales Gas betrachtet werden.

Stoffwerte von Luft:

Molmasse	M = 28,96 g/mol
Isentropenexponent	κ = 1,40 = konstant (Der Isentropenexponent $\kappa = \kappa(T)$ wird hier vereinfachend für alle Zustandsänderungen als konstant angenommen.)

Hinweis: Der beschriebene Prozess wird als „Seiliger-Prozess“ bezeichnet. Es ist ein Modellprozess, der in stark vereinfachter Form die in Verbrennungsmotoren ablaufenden Prozesse (Otto-Prozess und Diesel-Prozess) beschreibt (Erläuterung in Kapitel 5).

a) Zeichnen Sie die Zustandsänderungen qualitativ richtig in ein p,v-Diagramm ein.

b) Wie groß ist die Masse m der Luft im Kolben-Zylinder-System? (m = 0,5442 g)

c) Berechnen Sie den Druck p_2, die Temperatur T_2 und die spez. reversible Volumenänderungsarbeit $w^v_{12,rev}$. (p_2 = 66,29 bar; T_2 = 1060,63 K; $w^v_{12,rev}$ = 531,62 J/g)

d) Berechnen Sie die Temperatur T_3 und die zugeführte spez. Wärme q_{23}.
(T_3 = 1119,99 K; q_{23} = 42,61 J/g)

e) Bestimmen Sie die Temperatur T_4, das Volumen V_4 und die spez. reversible Volumenänderungsarbeit $w^v_{34,rev}$.
(T_4 = 2761,94 K; V_4 = 61,65 cm^3; $w^v_{34,rev}$ = – 471,40 J/g)

f) Berechnen Sie den Druck p_5, die Temperatur T_5 und die spez. reversible Volumenänderungsarbeit $w^v_{45,rev}$.
(p_5 = 3,77 bar; T_5 = 1195,64 K; $w^v_{45,rev}$ = – 1124,29 J/g)

g) Wie groß ist die abzuführende spez. Wärme q_{51}? (q_{51} = – 628,53 J/g)

h) Berechnen Sie die Summe der spez. reversiblen Volumenänderungsarbeiten w^v und vergleichen Sie das Ergebnis mit der Summe der zugeführten spez. Wärme q_{zu}.
(w^v = – 1064,07 J/g; q_{zu} = 1692,61 J/g)

Welche Schlussfolgerungen lassen sich aus diesem Vergleich ziehen?

i) Wie groß wäre die Leistung P_N eines nach diesem Prozess arbeitenden Viertakt-Verbrennungsmotors mit vier Zylindern bei einer Drehzahl von n = 4200 1/min.

(Hinweis: Jeder Zylinder führt bei zwei Umdrehungen nur einen Arbeitstakt aus.)

(P_N = 81,06 kW)

Thermodynamik für MB und UTRM: 4. Übung (SS 2007)

Aufgabe 4.1 (Kurzfragen)

a) Wie lauten die mathematischen Formulierungen der beiden Teile des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik?

b) – Zeigen Sie am Beispiel eines geschlossenen adiabaten Systems, welche Beziehung zwischen der Entropieänderung und der dissipierten Arbeit besteht.
   – Bei welchen Prozessen mit einem geschlossenen adiabaten System wird die Entropieänderung größer, gleich bzw. kleiner Null?
   – Welche Eigenschaft der Entropie zeichnet den Gleichgewichtszustand eines abgeschlossenen Systems aus?
   – Leiten Sie aus der Kopplung des 1. und 2. Hauptsatzes der Thermodynamik eine Beziehung zwischen der Entropieänderung eines Systems und der diesem System zu- oder aus diesem System abgeführten Wärme her.

c) Wie lautet das Differential der Entropie, wenn als unabhängige Variablen Enthalpie und Druck benutzt werden ?

d) – Durch welche Zustandsänderungen kann die Entropie eines offenen Systems verändert werden?
   – Durch welche Zustandsänderungen kann die Entropie eines Systems abnehmen?

Aufgabe 4.2 (Kurzfragen)

a) – Welche allgemeinen Aussagen machen der erste und der zweite Hauptsatz der Thermodynamik über Energieumwandlungen?
   – Welche der folgenden Energieumwandlungen unterliegen keiner Beschränkung durch den zweiten Hauptsatz?

elektrische Arbeit	→	Wärme	O
Wärme	→	technische Arbeit	O
elektrische Arbeit	→	kinetische Energie	O
innere Energie	→	technische Arbeit	O
potentielle Energie	→	elektrische Arbeit	O
kinetische Energie	→	Wärme	O

b) – Was versteht man unter Exergie und Anergie?
   – Welche der folgenden Energieformen bestehen ganz aus Exergie?
   technische Arbeit O Enthalpie O kinetische Energie O Wärme O
   – Welche Energien sind reine Anergie?

c) Unter welcher Bedingung bleibt die Energie und unter welcher Bedingung bleibt die Exergie bei einem Prozess konstant?

d) Wie berechnet man die Exergien der Wärme, der Enthalpie und des Stoffstroms?

e) – Was versteht man unter dem Exergieverlust eines Prozesses?
   – Wie hängen Exergieverlust und Entropieerzeugung zusammen?

f) – Wie ist der exergetische Wirkungsgrad definiert?
   – Wie groß ist der exergetische Wirkungsgrad einer reversiblen Wärmekraftmaschine? (Begründung erforderlich)

Aufgabe 4.3 (Kurzfragen)

Zeigen Sie mit Hilfe des *h,s*-Diagramms, wie der isentrope Verdichterwirkungsgrad η_{sV} und der isentrope Turbinenwirkungsgrad η_{sT} definiert ist.

Aufgabe 4.4

In einem Industriebetrieb soll bei einer Umgebungstemperatur von t_u = – 5 °C ein Massenstrom Wasser $\dot{m}$ = 1 kg/s kontinuierlich von t_1 = 10 °C auf t_2 = 70 °C isobar erwärmt werden.

Stoffwerte von Wasser: c_p = 4,19 kJ/ (kg·K) = konstant

Hinweise: Änderungen der kinetischen und der potenziellen Energie sind vernachlässigbar. Die Exergie des zu erwärmenden Wassers am Eintritt in den Wärmeübertrager ist nicht als Exergieaufwand zu rechnen.

a) Wieviel Energie muss für diese Erwärmung pro kg Wasser zugeführt werden?
($q_{12} + w_{t12}$ = 251,40 kJ/ kg)

b) Wieviel Exergie wird dabei vom Wasser pro kg aufgenommen? ($e_2 – e_1$ = 35,46 kJ/ kg)

c) Veranschaulichen Sie die pro kg Wasser aufgenommene Energie, Exergie und Anergie in einem *T,s*-Diagramm.

d) Für die Erwärmung des Wassers kann ein nach außen adiabater Durchlauferhitzer mit einer elektrischen Widerstandsheizung eingesetzt werden.
Berechnen Sie für diesen Fall den spezifischen Exergieverlust, den exergetischen Wirkungsgrad und die erforderliche Leistung P_{12}.
(e_v = 215,94 kJ/kg; η_e = 14,1 %; P_{12} = 251,40 kW)

e) Alternativ steht für die Erwärmung des Wasser in einem nach außen adiabaten Wärmeüberträger kondensierender Wasserdampf zur Verfügung, dessen Temperatur t_D = 81,3°C (Dampfdruck p_s = 0,5 bar) konstant ist.
Berechnen Sie den spezifischen Exergieverlust, den exergetischen Wirkungsgrad und den erforderlichen Wärmestrom $\dot{Q}_{12}$.
(e_v = 25,75 kJ/kg; η_e = 57,9 %; $\dot{Q}_{12}$ = 251,40 kW)

f) Der bei Frage e vom Dampf abgegebene Wärmestrom ließe sich alternativ auch zur Erzeugung elektrischer Energie mit Hilfe einer Wärmekraftmaschine nutzten.
Welcher Anteil des Wärmestroms ließe sich dabei maximal in technische Arbeit umwandeln? (η_c = 0,243)

Veranschaulichen Sie die übertragene spezifische Wärme und die daraus maximal erhältliche spezifische technische Arbeit in einem *T,s*-Diagramm.

g) Welche Schlussfolgerungen lassen sich aus diesen Ergebnissen ziehen?

Thermodynamik für MB und UTRM: 4. Übung **Zusätzliche Aufgaben** (SS 2007)

Aufgabe 4.5 (Zusätzliche Übungsaufgabe für zu Hause)

Ein Erfinder behauptet, eine neue Antriebsmaschine für Schiffe erfunden zu haben, die als (nahezu unerschöpfliche) Energiequelle die innere Energie des Meerwassers nutzt. Das Funktionsprinzip der neuen Maschine soll darauf basieren, dass durch die Abkühlung von 2000 kg Meerwasser je Sekunde (ca. 2 m^3/s) von t = 16 °C auf t = 14 °C eine kontinuierliche Antriebsleistung von P = 15 MW abgegeben werden kann. (Umgebungstemperatur t_u = 10 °C)

a) Was halten Sie von dieser Erfindung? Begründen Sie Ihre Aussage!
(1. Hs.: $P_{12} + \dot{Q}_{12} = -16{,}75$ MW; 2. Hs.: $P_{max} = -0{,}29$ MW; → Abgabe von P = 15 MW nicht möglich!)

b) Widerspricht die Behauptung des Erfinders einem der Hauptsätze der Thermodynamik?
(Ja, dem 2. Hauptsatz! → Perpetuum mobile 2. Art)

(Anmerkung: Eine Wärmekraftmaschine, die dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik widerspricht, bezeichnet man als Perpetuum mobile 1. Art, und eine Wärmekraftmaschine die dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik widerspricht, bezeichnet man als Perpetuum mobile 2. Art.)

Aufgabe 4.6 (Zusätzliche Übungsaufgabe für zu Hause)

In einem Spitzenlast-Kraftwerk wird Helium in einer Gasturbine vom Zustand p_1 = 12 bar, t_1 = 750 °C auf den Druck p_2 = 2 bar entspannt; die Zustandsänderung kann näherungsweise als adiabat betrachtet werden, und der isentrope Wirkungsgrad beträgt η_{sT} = 0,85.

a) Skizzieren Sie das Schaltschema und tragen Sie alle gegebenen Daten ein.

b) Zeichnen Sie die Zustandsänderung in ein *h,s*-Diagramm ein.

c) Wie groß ist der benötigte Massenstrom an Helium, wenn die Leistung dieser Turbine 10 MW betragen soll und Helium als ideales Gas (Molmasse M = 4 g/mol) angesehen werden kann? ($\dot{m}$ = 4,32 kg/s)

d) Wie groß ist die Temperatur T_2 am Austritt der Turbine? (T_2 = 578,2 K)

e) Berechnen Sie für die betrachtete Zustandsänderung den gegenüber einer adiabaten reversiblen Expansion eingetretenen Leistungsverlust. (ΔP = 1765 kW)

Aufgabe 4.7 (Zusätzliche Übungsaufgabe für zu Hause; vgl. auch Aufgabe 3.2)

Zur Deckung von Spitzenlasten beim Stromverbrauch werden häufig schnell in Betreib zu nehmende offene Gasturbinenanlagen eingesetzt (nähere Erläuterung in Kapitel 5). Hierbei durchläuft das Arbeitsmedium Luft (stark vereinfacht betrachtet) die folgenden Zustandsänderungen:

$1 \rightarrow 2$: irreversibel adiabate Verdichtung eines Luft-Volumenstroms $\dot{V}_1 = 100\ \mathrm{m^3/s}$ vom Umgebungszustand ($t_1 = t_u = 20\ °C$, $p_1 = p_u = 1$ bar) auf den Zustand 2 ($p_2 = 15$ bar, $t_2 = 420\ °C$).

$2 \rightarrow 3$: isobare Wärmezufuhr bei $p = 15$ bar bis zur Temperatur $t_3 = 1200\ °C$.
(Anmerkung: Zur Erwärmung der Luft auf $t_3 = 1200\ °C$ wird in einer Brennkammer Erdgas oder Heizöl mit der Luft verbrannt. Zur Vereinfachung wird der Massenstrom des Brennstoffs $\dot{m}_B/\dot{m}_L < 3\ \%$ hier nicht weiter berücksichtigt.)

$3 \rightarrow 4$: irreversibel adiabate Expansion der Luft in der Gasturbine (isentroper Turbinenwirkungsgrad $\eta_{sT} = 0{,}93$) auf den Druck $p_4 = p_1 = 1$ bar.

Stoffwerte der Luft:

Die Luft kann hier näherungsweise als ideales Gas behandelt werden.

Gaskonstante $R_L = 0{,}2871\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$

spez. isobare Wärmekapazität $c^o_{pL} = 1{,}0049\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$

Die spez. isobare Wärmekapazität der Luft sowie der Isentropenexponent κ sollen hier (stark) vereinfachend als konstant angenommen werden.

a) Skizzieren Sie das Schaltschema, und tragen Sie alle gegebenen Daten ein.

b) Stellen Sie den Prozess qualitativ richtig in einem *T*,*s*-Diagramm und in einem *h*,*s*-Diagramm dar.

c) Berechnen Sie den Massenstrom $\dot{m}$ der Luft. ($\dot{m} = 118{,}82$ kg/s)

d) Bestimmen Sie die Leistung des Luftverdichters P_{12} und den isentropen Verdichterwirkungsgrad η_{sV}. ($P_{12} = 47{,}761$ MW; $\eta_{sV} = 0{,}856$)

e) Berechnen Sie die Temperatur t_4 am Austritt der Gasturbine sowie die von der Gasturbine abgegebene Leistung P_{34}. ($t_4 = 461{,}95\ °C$; $P_{34} = -88{,}125$ MW)

f) Berechnen Sie für die Zustandsänderung $3 \rightarrow 4$ den im Vergleich zu einer adiabat reversiblen Expansion eingetretenen Leistungsverlust ΔP_{34}. ($\Delta P_{34} = 6{,}633$ MW)

g) Wie groß ist die bei der Zustandsänderung $3 \rightarrow 4$ erzeugte spez. Entropie $(s_4 - s_3) = \Delta s_{irr}$? ($\Delta s_{irr} = 0{,}0789\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$)

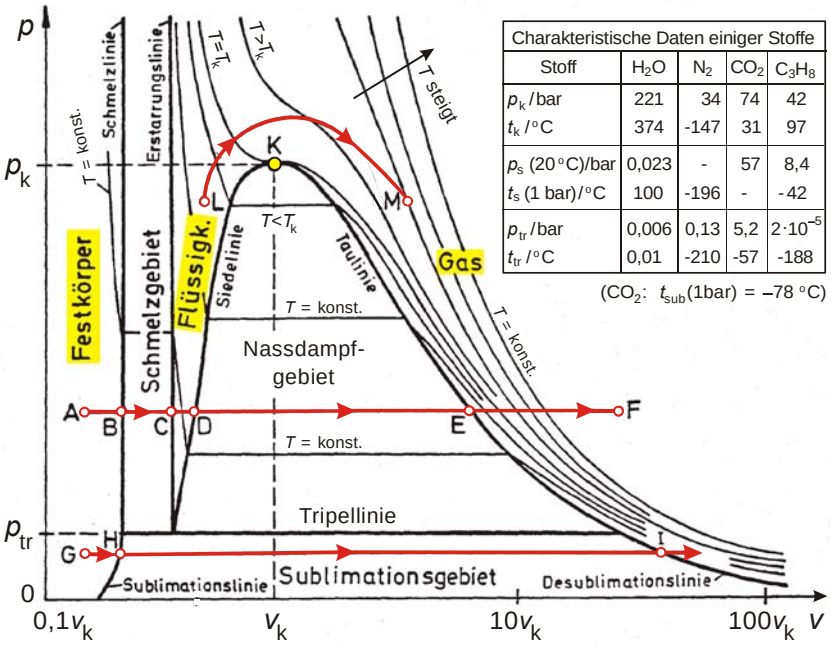
h) Berechnen Sie den zugeführten Wärmestrom $\dot{Q}_{23}$ und die Nutzleistung $P_N = (P_T + P_V)$ der Gasturbinenanlage. ($\dot{Q}_{23} = 93{,}133$ MW; $P_N = -40{,}364$ MW)

i) Welcher Anteil des zugeführten Wärmestroms $\dot{Q}_{23}$ konnte in Nutzleistung P_N umgewandelt werden? ($P_N/\dot{Q}_{zu} = 43{,}34\ \% = \eta_{th}$ thermischer Wirkungsgrad)

Thermodynamik für MB und UTRM: 5. Übung (SS 2007)

Aufgabe 5.1 (Kurzfragen)

Das nebenstehende Bild zeigt ein p,v-Diagramm eines reinen fluiden Stoffes.



Charakteristische Daten einiger Stoffe				
Stoff	H_2O	N_2	CO_2	C_3H_8
p_k / bar	221	34	74	42
t_k / °C	374	-147	31	97
p_s (20 °C)/bar	0,023	-	57	8,4
t_s (1 bar) / °C	100	-196	-	-42
p_{tr} / bar	0,006	0,13	5,2	$2 \cdot 10^{-5}$
t_{tr} / °C	0,01	-210	-57	-188

(CO_2: t_{sub}(1bar) = –78 °C)

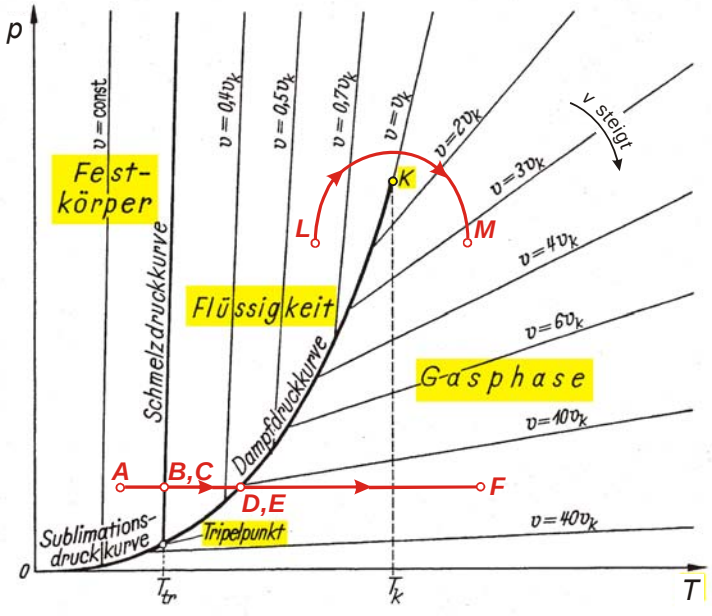
a) – Wie heißen die homogenen und heterogenen Zustandsgebiete?
   – Wie heißen die Phasengrenzkurven?
   – Wo liegt der kritische Punkt, und wo liegt die kritische Isotherme?
   – Was versteht man unter siedender Flüssigkeit und gesättigtem Dampf?
   – Wo liegt in dem gezeichneten Diagramm das Gebiet des idealen Gases?
   – Vergleichen Sie das individuelle Verhalten von vier reinen fluiden Stoffen anhand der charakteristischen Daten in der Tabelle.

b) Erläutern Sie anhand der gezeichneten Isobaren A – F das Zustandsverhalten von Wasser bei p = 1 bar.

c) Welche Voraussetzungen müssen erfüllt sein, damit ein Gas
   – durch <u>isobare</u> Abkühlung
   – durch <u>isotherme</u> Kompression verflüssigt werden kann?

Aufgabe 5.2 (Kurzfragen)

Das nebenstehende Bild zeigt ein p,T-Diagramm eines reinen fluiden Stoffes.



– Wo liegen die homogenen und heterogenen Zustandsgebiete im p,T-Diagramm?
– Wie heißen die Phasengrenzkurven im p,T-Diagramm?
– Wo liegen die Zustände der siedenden Flüssigkeit und des gesättigten Dampfes?
– Wodurch ist der Tripelpunkt gekennzeichnet?
– Erläutern Sie anhand der gezeichneten Isobaren A – F das Zustandsverhalten von Wasser bei p = 1 bar.

Aufgabe 5.3 (Kurzfragen)

a) Wie lautet die Gleichgewichtsbedingung für ein Zweiphasengleichgewicht eines reinen fluiden Stoffes?

b) Wie berechnet man die extensiven Zustandsgrößen eines heterogenen Systems?

c) – Was versteht man unter den Begriffen „nasser Dampf“ und „Dampfgehalt“?
   – Wie lautet die Berechnungsgleichung für eine spezifische Zustandsgröße z im Nassdampfgebiet? – Zeigen Sie dies am Beispiel des spezifischen Volumens υ.

Aufgabe 5.4 (typische Klausuraufgabe)

Ein Kolben-Zylinder-System (Querschnittsfläche $A = 10\ \text{cm}^2$) ist vollständig mit siedendem Kohlendioxid gefüllt (Zustand 1: $t_1 = 28\ °\text{C}$, $V_1 = 20\ \text{cm}^3$). Nacheinander werden nun drei Zustandsänderungen durchlaufen:

Zustandsänderung $1 \rightarrow 2$: isochore Wärmeabfuhr bis zur Temperatur $t_2 = 20\ °\text{C}$.

Zustandsänderung $2 \rightarrow 3$: reversibel isotherme Expansion auf den Dampfgehalt $x_3 = 0{,}8$.

Zustandsänderung $3 \rightarrow 4$: isochore Wärmezufuhr bis zur Temperatur $t_4 = 36\ °\text{C}$.

a) Zeichnen Sie die drei Zustandsänderungen qualitativ richtig in ein p,ρ-Diagramm ein. Wie ändert sich die Höhe des Flüssigkeitsspiegels im Kolben-Zylinder-System während der Zustandsänderung $3 \rightarrow 4$? (Angabe in Stichworten, Rechnung nicht erforderlich!)

b) Wie groß sind die Drücke p_1 und p_2 sowie die Masse des Kohlendioxids im System?
($p_1 = 68{,}85$ bar; $p_2 = 57{,}25$ bar; $m = 13{,}096$ g)

c) Berechnen Sie den Dampfgehalt x_2 sowie den mit Flüssigkeit gefüllten Volumenanteil im Zustand 2.
($x_2 = 0{,}0612$; $V'_2 / V_2 = 0{,}7921$)

d) Berechnen Sie die Volumenänderungsarbeit W^{v}_{23} und die zuzuführende Wärme Q_{23} während der Zustandsänderung von 2 nach 3.
($W^{\text{v}}_{23} = -215{,}92$ J; $Q_{23} = 1483{,}2$ J)

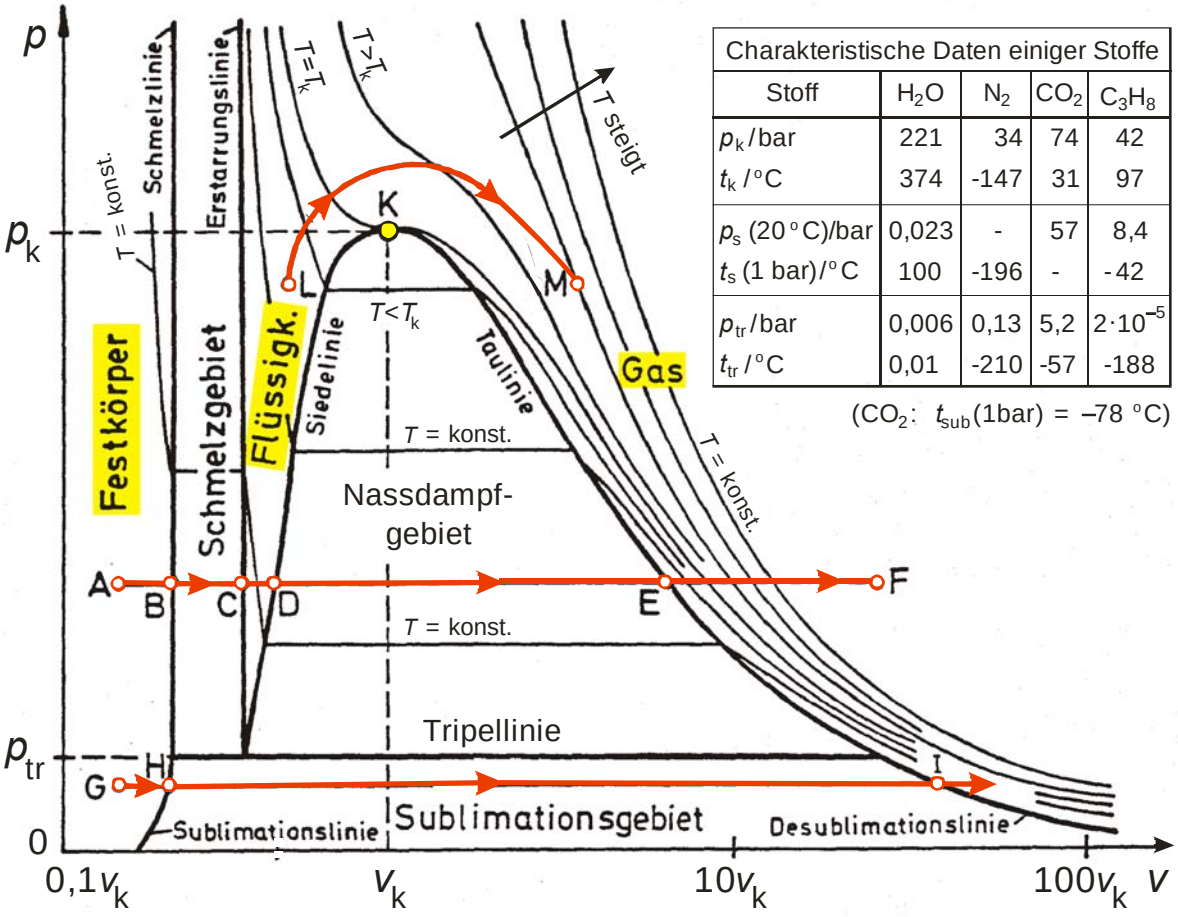
Stoffwerte von Kohlendioxid im Sättigungszustand:

$\frac{t}{^{\text{o}}\text{C}}$	$\frac{p_\text{s}}{\text{bar}}$	$\frac{\rho'}{\text{kg/dm}^3}$	$\frac{\rho''}{\text{kg/dm}^3}$	$\frac{h'}{\text{kJ/kg}}$	$\frac{h''}{\text{kJ/kg}}$	$\frac{u'}{\text{kJ/kg}}$	$\frac{u''}{\text{kJ/kg}}$
20	57,25	0,7761	0,1928	558,3	711,6	550,9	681,9
22	59,98	0,7533	0,2094	565,4	707,1	557,4	678,4
24	62,82	0,7272	0,2293	573,3	701,6	564,7	674,2
26	65,77	0,6958	0,2540	582,3	694,7	572,8	668,8
28	68,85	0,6548	0,2877	593,1	685,3	582,6	661,4
30	72,06	0,5882	0,3457	609,4	669,1	597,1	648,3

Zustandsgrößen am kritischen Punkt: $t_\text{k} = 30{,}98\ °\text{C}$; $p_\text{k} = 73{,}773$ bar; $\rho_\text{k} = 0{,}468\ \text{kg/dm}^3$

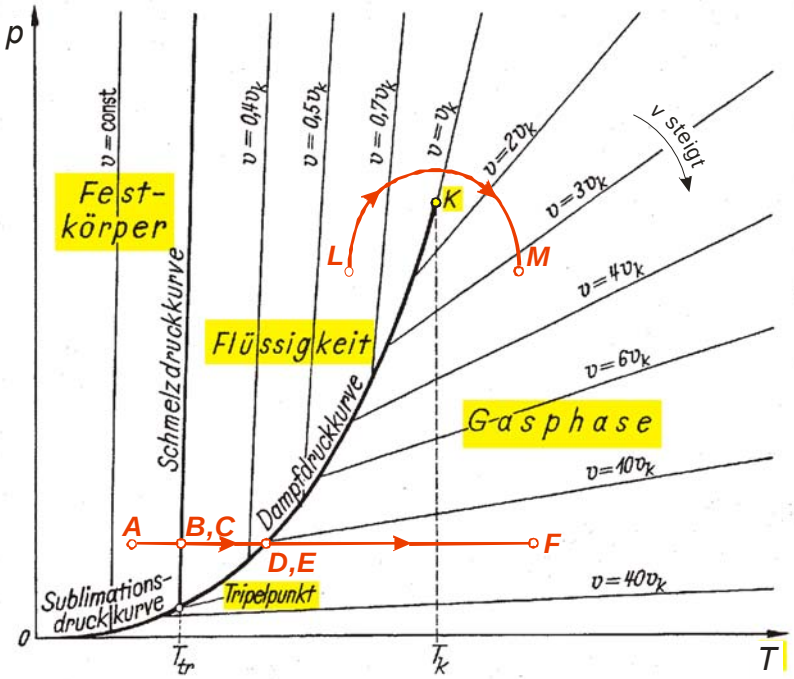
(Zustandsgrößen am Tripelpunkt: $t_\text{tr} = -56{,}56\ °\text{C}$; $p_\text{tr} = 5{,}179$ bar; $\rho'_\text{tr} = 1{,}178\ \text{kg/dm}^3$; $\rho''_\text{tr} = 0{,}0137\ \text{kg/dm}^3$)

p, *v* - und *p*, *T* - Diagramm eines reinen fluiden Stoffes



Charakteristische Daten einiger Stoffe				
Stoff	H_2O	N_2	CO_2	C_3H_8
p_k / bar	221	34	74	42
t_k / °C	374	-147	31	97
p_s (20 °C)/bar	0,023	-	57	8,4
t_s (1 bar)/ °C	100	-196	-	-42
p_{tr} / bar	0,006	0,13	5,2	$2 \cdot 10^{-5}$
t_{tr} / °C	0,01	-210	-57	-188

(CO_2: t_{sub}(1bar) = –78 °C)



Thermodynamik für MB und UTRM: 6. Übung (SS 2007)

Aufgabe 6.1 (Kurzfragen)

a) – Was versteht man unter einer Fundamentalgleichung?
   – Geben Sie die zwei wichtigsten Fundamentalgleichungen mit den jeweils zugehörigen Variablen an.
   – Wie berechnet man den Druck aus einer Fundamentalgleichung $f = f(v,T)$?

b) Welche Informationsquellen bieten sich zur Ermittlung der numerischen Werte für thermodynamische Stoffeigenschaften an?

Aufgabe 6.2 (Kurzfragen)

a) Zeichnen Sie schematisch ein h,s- und T,s-Diagramm eines realen fluiden Stoffes mit den Phasengrenzkurven einschließlich des kritischen Punktes, Linien konstanten Dampfgehaltes sowie einigen Isothermen und Isobaren.

b) – Welche Steigung haben die Isobaren im h,s-Diagramm?
   – Was folgt daraus für den Verlauf im Nassdampfgebiet?

c) Wie bildet sich die Verdampfungsenthalpie im h,s- und im T,s-Diagramm ab?

Aufgabe 6.3

Aus einer Zustandstafel für Wasser sind die folgenden Stoffwerte bekannt:

Sättigungszustand:

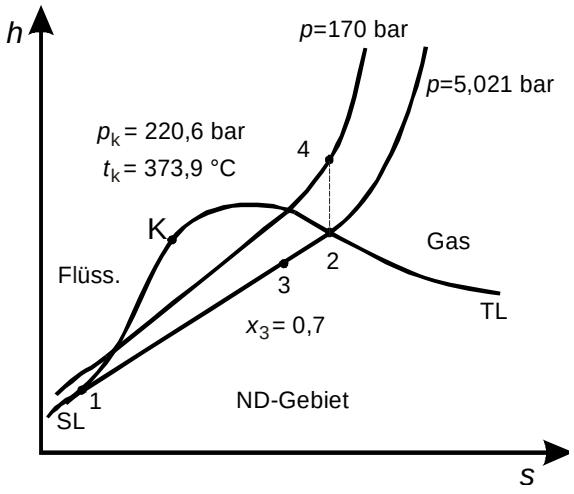
$\frac{t_S}{°C}$	$\frac{p_s}{bar}$	$\frac{v'}{m^3/kg}$	$\frac{v''}{m^3/kg}$	$\frac{h'}{kJ/kg}$	$\frac{h''}{kJ/kg}$	$\frac{s'}{kJ/(kgK)}$	$\frac{s''}{kJ/(kgK)}$
150,00	4,762	0,0010905	0,3925	632,18	2745,9	1,8418	6,8371
151,00	4,891	0,0010916	0,3827	636,49	2474,1	1,8519	6,8281
152,00	5,021	0,0010927	0,3732	640,82	2748,3	1,8621	6,8192
153,00	5,157	0,0010939	0,3640	645,14	2749,5	1,8722	6,8103
154,00	5,295	0,0010950	0,3551	649,46	2750,7	1,8823	6,8014
352,29	170	0,0083693	0,0017	1690,04	2547,4	3,8077	5,1785

Homogenes Gebiet:

p = 170 bar			
$\frac{t}{°C}$	$\frac{v}{dm^3/kg}$	$\frac{h}{kJ/kg}$	$\frac{s}{kJ/(kgK)}$
500	17,994	3283,6	6,2628
550	19,948	3429,0	6,4451
600	21,752	3565,7	6,6063
650	23,459	3697,5	6,7531
700	25,097	3826,6	6,8894

Bestimmen Sie die folgenden Zustandsgrößen für die im nebenstehenden h,s-Diagramm gekennzeichneten Punkte:

a) t_1, v_1 b) h_2, s_2 c) h_3 d) h_4, t_4



Aufgabe 6.4 (Frage d: Übungsaufgabe für zu Hause)

In einer Dampfkraftanlage expandiert überhitzter Wasserdampf in einer adiabaten Dampfturbine vom Zustand 1 (p_1 = 50 bar, t_1 = 550 °C) bis ins Nassdampfgebiet auf den Druck p_2 = 0,05 bar und den Dampfgehalt x_2 = 0,92. Anschließend wird der Dampf im Kondensator bei konstantem Druck vollständig kondensiert (Zustand 3). Der Massenstrom des Dampfes beträgt $\dot{m}$ = 40 kg/s.

a) Stellen Sie die Zustandsänderungen qualitativ richtig in einem *T,s*-Diagramm und in einem *h,s*-Diagramm dar.

b) Berechnen Sie die Leistung P_{12} der Dampfturbine. (P_{12} = – 47,353 MW)

c) Wie groß ist der im Kondensator abzuführende Wärmestrom $\dot{Q}_{23}$? ($\dot{Q}_{23}$ = – 89,166 MW)

d) Bestimmen Sie den isentropen Turbinenwirkungsgrad η_{sT}. (η_{sT} = 0,8586)

Stoffwerte von Wasser:

Sättigungszustand					
$\frac{p_s}{\text{bar}}$	$\frac{t}{^{o}\text{C}}$	$\frac{h'}{\text{kJ/kg}}$	$\frac{h''}{\text{kJ/kg}}$	$\frac{s'}{\text{kJ/(kg·K)}}$	$\frac{s''}{\text{kJ/(kg·K)}}$
0,03	24,08	100,99	2544,88	0,3543	8,5766
0,04	28,96	121,40	2553,71	0,4224	8,4735
0,05	32,88	137,77	2560,77	0,4763	8,3939
0,06	36,16	151,49	2566,67	0,5209	8,3291

Überhitzter Dampf			
$\frac{p}{\text{bar}}$	$\frac{t}{^{o}\text{C}}$	$\frac{h}{\text{kJ/kg}}$	$\frac{s}{\text{kJ/(kg·K)}}$
50	530	3504,31	7,0664
	540	3527,54	7,0952
	550	3550,75	7,1235
	560	3573,96	7,1516
	570	3597,17	7,1793
	580	3620,38	7,2066

Thermodynamik für MB und UTRM: 6. Übung **Zusätzliche Aufgaben** (SS 2007)

Aufgabe 6.5 (Kurzfragen) (Zusätzliche Übungsaufgabe für zu Hause)

a) Welche Aussagen machen die Clausius-Clapeyron'schen Gleichungen und wie lauten sie?

b) – Mit Hilfe welcher Größen können Sie entscheiden, welches Vorzeichen die Steigung der Schmelzdruckkurve im p,T-Diagramm besitzt?

– Ist die Steigung der Schmelzdruckkurve für die meisten Stoffe positiv oder negativ?

Aufgabe 6.6 (Zusätzliche Übungsaufgabe für zu Hause)

Von Wasser sind Ihnen die folgenden Eigenschaften bekannt:

t_1 = 100 °C: Dampfdruck p_1 = 1,014 bar
t_2 = 110 °C: Dampfdruck p_2 = 1,434 bar

Schätzen Sie mit geeigneten Annahmen den Dampfdruck bei t_3 = 150 °C und t_4 = 50 °C ab.
(p_3 = 4,870 bar; Tab.: 4,761 bar, Abw.: +2,3%; p_4 = 0,130 bar; Tab.: 0,124 bar, Abw.: +4,8%)

Aufgabe 6.7 (Zusätzliche Übungsaufgabe für zu Hause)

Ein Wasserkocher besitzt eine elektrische Leistung von P = 2 kW.

a) Wie lange dauert es, um damit 1 Liter Wasser (m = 1 kg; spez. isobare Wärmekapazität c_p = 4,20 kJ/(kg·K) = konst.) von t_1 = 20 °C auf t_2 = 100 °C zu erwärmen? ($\Delta\tau$ = 2,80 min)

b) Falls sich der Wasserkocher aufgrund eines technischen Defektes nicht von selbst bei t_2 = 100 °C abschaltet, wie lange würde es dauern, bis das gesamte Wasser (Verdampfungsenthalpie r (100 °C) = 2257,51 kJ/kg) verdampft ist? ($\Delta\tau$ = 18,81 min)

Aufgabe 6.8 (Zusätzliche Übungsaufgabe für zu Hause)

Ein Trinkglas (m_G = 500 g; spez. Wärmekapazität c = 0,84 J/(g·K)) ist mit 0,3 Litern (m = 300 g) Coca Cola gefüllt; die Temperatur des Glases und der Coca Cola beträgt t_1 = 26 °C. Die Coca Cola kann hier näherungsweise als Wasser (spez. isobare Wärmekapazität c_p = 4,20 kJ/(kg·K) = konst.) behandelt werden.

a) Wieviel Gramm Eis von t = 0 °C (Schmelzenthalpie Δh_{sch} = 333,5 J/g) müssen in das Glas gegeben werden, damit sich die Flüssigkeit und das Glas bis auf t_2 = 6 °C abkühlen? (m = 93,67 g)
(Hinweis: Die Wärmezufuhr aus der Umgebung soll hierbei unberücksichtigt bleiben.)

Aufgabe 6.9 (Zusätzliche Übungsaufgabe für zu Hause)

In einem Verdichter (isothermer Verdichterwirkungsgrad $\eta_{t,V} = 0{,}80$) wird ein Massenstrom Ethylen $\dot{m} = 0{,}1$ kg/s isotherm vom Zustand 1 ($p_1 = 10$ bar, $t_1 = 25$ °C) auf den Druck $p_2 = 100$ bar komprimiert. Dabei wird ein Wärmestrom von $\dot{Q}_{12} = -45{,}81$ kW abgeführt.

Stoffwerte von Ethylen:

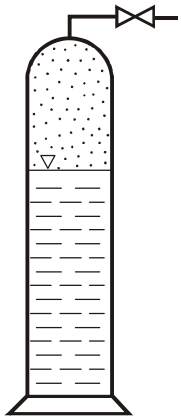
Molmasse: $M = 28{,}05$ g/mol; Gaskonstante $R = 296{,}42$ J/(kg·K)
Zustandsgrößen am kritischen Punkt: $t_k = 9{,}20$ °C; $p_k = 50{,}42$ bar; $\rho_k = 214{,}24$ kg/m^3
Enthalpie: $h_1(t_1,p_1) = -16{,}27$ kJ/kg; $h_2(t_2,p_2) = -293{,}79$ kJ/kg
Isentropenexponent des idealen Gases: $\kappa = 1{,}25$ (bei $t = 25$ °C)

a) Stellen Sie den Prozess qualitativ richtig in einem p,v-Diagramm dar.

b) Berechnen Sie die erforderliche Verdichterleistung P_{12}. ($P_{12} = 18{,}06$ kW)

c) Wie groß wäre der Fehler in der berechneten Verdichterleistung, wenn das Ethylen stark vereinfachend als ideales Gas angesehen würde? ($\Delta P_{12,\,id.G.}/P_{12} = +40{,}1\%$)

Aufgabe 6.10 (Zusätzliche Übungsaufgabe für zu Hause)



In der gezeichneten Druckgasflasche ($V = 10$ dm^3) befinden sich 6 kg Kohlendioxid im Phasengleichgewicht Gas-Flüssigkeit. Die Temperatur beträgt im Zustand 1 $t_1 = 20$ °C.

a) Wie groß sind der Druck p_1, der Dampfgehalt x_1 und der mit Flüssigkeit gefüllte Volumenanteil im Zustand 1?
($p_1 = 57{,}29$ bar; $x_1 = 0{,}09690$; $V'_1/V = 0{,}7006$)

b) Auf welche Temperatur t_2 müsste das CO_2 im Behälter erwärmt werden, damit die Phasengrenze Gas-Flüssigkeit gerade verschwindet? Zeichnen Sie diese Zustandsänderung qualitativ richtig in ein p,ρ-Diagramm ein.
($t_2 = 29{,}78$ °C)

c) Berechnen Sie die für die Zustandsänderung $1 \rightarrow 2$ erforderliche Wärme Q_{12}.
($Q_{12} = 179{,}12$ kJ)

Stoffwerte von Kohlendioxid im Sättigungszustand:

$\frac{t}{^{o}C}$	$\frac{p_s}{bar}$	$\frac{\rho'}{kg/dm^3}$	$\frac{\rho''}{kg/dm^3}$	$\frac{h'}{kJ/kg}$	$\frac{h''}{kJ/kg}$	$\frac{u'}{kJ/kg}$	$\frac{u''}{kJ/kg}$
20	57,29	0,7734	0,1942	255,9	407,9	248,5	378,4
22	60,03	0,7508	0,2110	262,9	403,3	255,0	374,8
24	62,88	0,7250	0,2310	270,6	397,8	262,0	370,5
26	65,84	0,6944	0,2558	279,3	390,7	269,8	365,0
28	68,92	0,6553	0,2891	289,6	381,2	279,1	357,4
30	72,14	0,5933	0,3453	304,6	365,1	292,4	344,2
Zustandsgrößen am kritischen Punkt: $t_k = 30{,}98$ °C; $p_k = 73{,}773$ bar; $\rho_k = 0{,}4676$ kg/dm^3 Zustandsgrößen am Tripelpunkt: $t_{tr} = -56{,}56$ °C; $p_{tr} = 5{,}179$ bar							

Thermodynamik für MB und UTRM: 7. Übung (SS 2007)

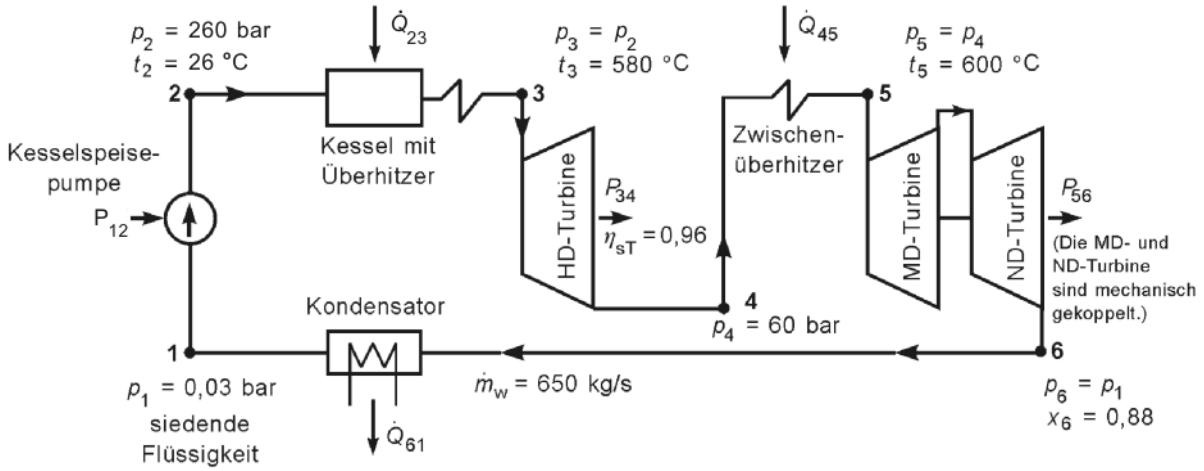
Aufgabe 7.1 (Kurzfragen)

a) – Was versteht man unter einem Kreisprozess?
   – Was ist der Zweck eines Kreisprozesses?
   – Wie lautet der 1. Hauptsatz angewendet auf Kreisprozesse?

b) – Was versteht man unter einer Wärmekraftanlage (WKA)?
   – Wie berechnet man den thermischen Wirkungsgrad η_{th} einer WKA?
   – Wie lautet die Berechnungsgleichung für den Carnot-Wirkungsgrad, und welche Bedeutung hat diese Größe?

Aufgabe 7.2 (typische Klausuraufgabe)

Die RWE Power AG betreibt in Niederaußem bei Köln ein neues Braunkohle-Dampfkraftwerk mit einer Nutzleistung von über 1000 MW. In diesem Kraftwerk durchläuft das Arbeitsmedium Wasser (Massenstrom $\dot{m}$ = 650 kg/s) einen Kreisprozess, der in stark vereinfachter Form durch das folgende Schema dargestellt wird.



Zustandsänderungen:

1 → 2: irreversibel adiabate Förderung des Wassers in der Kesselspeisepumpe vom Zustand 1 (siedende Flüssigkeit, p_1 = 0,03 bar) auf p_2 = 260 bar und t_2 = 26 °C.

2 → 3: isobare Wärmezufuhr im Kessel mit Überhitzer auf t_3 = 580 °C.

3 → 4: irreversibel adiabate Expansion in der Hochdruckturbine ($\eta_{sT,HD}$ = 0,96) auf p_4 = 60 bar.

4 → 5: isobare Wärmezufuhr im Zwischenüberhitzer auf die Temperatur t_5 = 600 °C.

5 → 6: irreversibel adiabate Expansion in der mechanisch gekoppelten Mittel- und Niederdruckturbine bis ins Nassdampfgebiet (x_6 = 0,88) auf den Kondensatordruck p_6 = 0,03 bar.

6 → 1: isobare Kondensation des Dampfes bis zur Siedelinie.

- Fortsetzung -

a) Stellen Sie den Kreisprozess qualitativ richtig in einem T,s-Diagramm dar.

b) Welche Leistung P_{12} benötigt die Kesselspeisepumpe, und wie groß ist der im Kessel (mit Überhitzer) zugeführte Wärmestrom $\dot{Q}_{23}$?
(P_{12} = 20,66 MW; $\dot{Q}_{23}$ = 2138,80 MW)

c) Berechnen Sie die Leistung der Hochdruckturbine P_{34} sowie den im Zwischenüberhitzer zugeführten Wärmestrom $\dot{Q}_{45}$.
(P_{34} = –263,24 MW; $\dot{Q}_{45}$ = 416,33 MW)

d) Bestimmen Sie die gemeinsame Leistung der Mittel- und Niederdruckturbine P_{56} und den gemeinsamen isentropen Turbinenwirkungsgrad $\eta_{sT,MD+ND}$.
(P_{56} = –914,66 MW; $\eta_{sT,MD+ND}$ = 0,9184)

e) Berechnen Sie den thermischen und den exergetischen Wirkungsgrad der Dampfkraftanlage. Die Umgebungstemperatur beträgt t_u = 20 °C.
(η_{th} = 0,4529; η_e = 0,9144)

(Hinweis: Die Exergie des im Kondensator abgeführten Wärmestroms $\dot{Q}_{61}$ wird hierbei nicht als Nutzen berücksichtigt.)

Stoffwerte von Wasser:
Sättigungszustand:

$\frac{p}{\text{bar}}$	$\frac{t}{^{\circ}\text{C}}$	$\frac{h'}{\text{kJ/kg}}$	$\frac{h''}{\text{kJ/kg}}$	$\frac{s'}{\text{kJ/(kg·K)}}$	$\frac{s''}{\text{kJ/(kg·K)}}$
0,03	24,08	100,98	2544,84	0,3543	8,5764
60,0	275,58	1213,92	2784,59	3,0278	5,8901
Zustandsgrößen am kritischen Punkt: t_k = 373,946 °C; p_k = 220,64 bar					

Homogenes Gebiet:

$\frac{p}{\text{bar}}$	$\frac{t}{^{\circ}\text{C}}$	$\frac{h}{\text{kJ/kg}}$	$\frac{s}{\text{kJ/(kg·K)}}$
	320	2953,61	6,1871
	330	2984,93	6,2395
	340	3014,94	6,2888
	350	3043,90	6,3357
60	360	3071,99	6,3804
	560	3564,81	7,0591
	580	3611,80	7,1149
	600	3658,75	7,1693
	620	3705,71	7,2224

$\frac{p}{\text{bar}}$	$\frac{t}{^{\circ}\text{C}}$	$\frac{h}{\text{kJ/kg}}$	$\frac{s}{\text{kJ/(kg·K)}}$
	24	124,55	0,3464
	26	132,77	0,3740
	28	141,00	0,4014
	30	149,23	0,4286
260	32	157,46	0,4557
	560	3360,07	6,1916
	580	3423,23	6,2665
	600	3484,24	6,3372

Thermodynamik für MB und UTRM: 7. Übung **Zusätzliche Aufgaben** (SS 2007)

Aufgabe 7.3 (typische Klausuraufgabe) (Zusätzliche Übungsaufgabe für zu Hause)

In einer einfachen Dampfkraftanlage durchläuft das Arbeitsmedium Wasser (Massenstrom $\dot{m}$ = 200 kg/s) den folgenden Kreisprozess:

Zustandsänderungen:

Zust. 1: flüssiges Wasser bei p_1 = 0,1 bar, t_1 = 40 °C.

1 → 2: irreversibel adiabate Förderung des Wassers in der Kesselspeisepumpe (isentroper Verdichterwirkungsgrad η_{sV} = 0,80) auf den Druck p_2 = 100 bar.

2 → 3: isobare Wärmezufuhr im Kessel mit Überhitzer auf t_3= 550 °C.

3 → 4: irreversibel adiabate Expansion des Wasserdampfes in der Dampfturbine (isentroper Turbinenwirkungsgrad η_{sT} = 0,85) auf p_4 = 0,1 bar.

4 → 1: isobare Wärmeabfuhr bis zum Anfangszustand 1.

a) Skizzieren Sie das Schaltschema, und tragen Sie alle gegebenen Daten ein.

b) Stellen Sie den Kreisprozess qualitativ richtig in einem *T,s*- und in einem *h,s*-Diagramm dar. – Zeichnen Sie den Kreisprozess anschließend in das beiliegende *T*,*s*- und *h*,*s*-Diagramm ein.

c) Bestimmen Sie den zugeführten Wärmestrom $\dot{Q}_{23}$.
($\dot{Q}_{23}$ = 664,37 MW)

d) Berechnen Sie die Leistungen der Kesselspeisepumpe P_{12} und der Turbine P_{34} sowie die Nutzleistung P_N und den thermischen Wirkungsgrad η_{th} der Dampfkraftanlage.
(P_{12} = 2,51 MW, P_{34} = –231,46 MW, P_N = –228,95 MW, η_{th} = 0,3446)

e) Wie groß ist der Volumenstrom $\dot{V}_4$ des aus der Turbine austretenden Wasserdampfes?
($\dot{V}_4$ = 2640,7 m^3/s)

f) Wie groß ist der exergetische Wirkungsgrad η_e der Dampfkraftanlage?
(Umgebungstemperatur t_u = 20 °C) (η_e = 0,7531)

Stoffwerte von Wasser:

siehe Rückseite

Auszug aus der Wasserdampftafel:

(berechnet nach: Wagner, W.; Kruse, A.: Properties of Water and Steam, Springer-Verlag, Berlin 1998.)

***p* = 0,1 bar**					
t [°C]	v [dm³/kg]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	c_p [kJ/kgK]	w [m/s]
0	1,0001	0,39	0,0014	4,220	1402,7
5	1,0001	21,03	0,0763	4,205	1426,1
10	1,0003	42,03	0,1511	4,196	1447,4
15	1,0009	62,99	0,2245	4,189	1466,5
20	1,0018	83,93	0,2965	4,185	1483,3
25	1,0030	104,84	0,3673	4,182	1498,0
30	1,0044	125,75	0,4368	4,180	1510,8
35	1,0060	146,65	0,5052	4,179	1521,8
40	1,0079	167,54	0,5724	4,179	1531,2
45	1,0099	188,44	0,6386	4,179	1538,9
t_{Sat}	v'	h'	s'	c_p'	w'
45,81	1,0103	191,81	0,6492	4,179	1540,0
	v''	h''	s''	c_p''	w''
	14670,6	2583,89	8,1489	1,941	440,5
50	14867,0	2591,99	8,1741	1,927	443,7
60	15334,9	2611,18	8,2326	1,912	450,7
70	15801,5	2630,27	8,2891	1,907	457,5
80	16267,1	2649,33	8,3438	1,905	464,1
90	16732,0	2668,38	8,3970	1,905	470,6
100	17196,4	2687,43	8,4488	1,906	476,9
150	19513,2	2783,02	8,6892	1,920	507,1
200	21825,6	2879,59	8,9048	1,944	535,1
250	24136,1	2977,45	9,1014	1,971	561,5
300	26445,6	3076,73	9,2827	2,001	586,4
350	28754,5	3177,54	9,4513	2,032	610,0
400	31063,1	3279,94	9,6093	2,064	632,6
450	33371,4	3383,96	9,7584	2,097	654,2
500	35679,6	3489,67	9,8997	2,131	674,9
550	37987,6	3597,10	10,0343	2,166	694,8
600	40295,6	3706,27	10,1631	2,201	714,1
650	42603,5	3817,20	10,2866	2,236	732,7
700	44911,3	3929,91	10,4055	2,272	750,8
750	47219,1	4044,37	10,5202	2,307	768,3
800	49526,9	4160,62	10,6311	2,342	785,4

***p* = 100 bar**					
t [°C]	v [dm³/kg]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	c_p [kJ/kgK]	w [m/s]
0	0,9952	10,07	0,0003	4,172	1418,2
5	0,9952	30,91	0,0759	4,164	1442,0
10	0,9956	51,72	0,1501	4,160	1463,3
15	0,9963	72,51	0,2229	4,157	1482,4
20	0,9973	93,29	0,2944	4,155	1499,2
25	0,9985	114,06	0,3646	4,154	1514,0
30	1,0000	134,83	0,4337	4,154	1526,8
35	1,0016	155,60	0,5017	4,154	1537,9
40	1,0035	176,37	0,5685	4,155	1547,4
45	1,0055	197,15	0,6344	4,156	1555,3
50	1,0078	217,93	0,6992	4,157	1561,8
60	1,0127	259,53	0,8259	4,161	1570,8
70	1,0182	301,17	0,9491	4,167	1575,2
80	1,0244	342,87	1,0689	4,174	1575,4
90	1,0312	384,66	1,1856	4,184	1571,9
100	1,0385	426,55	1,2994	4,195	1565,2
150	1,0842	638,18	1,8315	4,281	1491,2
200	1,1482	855,92	2,3177	4,447	1362,3
250	1,2412	1085,72	2,7791	4,788	1180,0
300	1,3980	1343,10	3,2484	5,682	922,8
t_{Sat}	v'	h'	s'	c_p'	w'
311,00	1,4526	1407,87	3,3603	6,128	847,7
	v''	h''	s''	c_p''	w''
	18,0336	2725,47	5,6159	7,147	472,4
350	22,4397	1666,59	3,7701	9,687	591,1
400	26,4363	3097,38	6,2139	3,096	582,0
450	29,7817	3242,28	6,4217	2,747	617,9
500	32,8107	3375,06	6,5993	2,583	647,9
550	35,6545	3501,94	6,7584	2,5011	674,4
600	38,3780	3625,84	6,9045	2,460	698,5
650	41,0180	3748,32	7,0409	2,442	721,0
700	43,5973	3870,27	7,1696	2,438	742,0
750	46,1308	3991,98	7,2916	2,444	762,1
800	48,6290	4114,73	7,4087	2,456	781,1

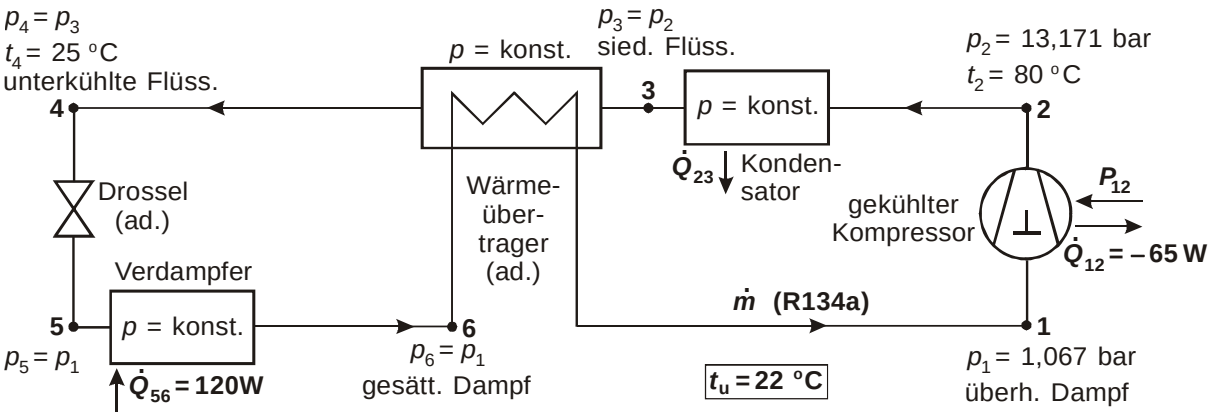
Kritischer Punkt:

t_k = 373,946 °C ; p_k = 220,64 bar ; ρ_k =322,0 kg/m³

Thermodynamik für MB und UTRM: 8. Übung (SS 2007)

Aufgabe 8.2 (typische Klausuraufgabe)

Zur Lagerung von Lebensmitteln soll in einem Haushalts-Gefrierschrank eine Kühltemperatur von −20 °C konstant gehalten werden. Um diese Temperatur aufrechtzuerhalten, wird dem Gefrierschrank bei einer Umgebungstemperatur von 22 °C mit Hilfe einer Kompressionskältemaschine ein Wärmestrom von 120 W entzogen. In der Kältemaschine durchläuft hierzu das Arbeitsmedium R134a (Tetrafluorethan $C_2H_2F_4$) vereinfachend betrachtet den im folgenden Schema dargestellten Kreisprozess:



Zustandsänderungen:

1 → 2: irrreversibel polytrope Verdichtung vom Zustand 1 (überhitzter Dampf, p_1 = 1,067 bar) auf p_2 = 13,171 bar und t_2 = 80 °C, wobei der mit Luft gekühlte Verdichter einen Wärmestrom von $\dot{Q}_{12}$ = −65 W an die Umgebung abgibt.

2 → 3: isobare Wärmeabfuhr in einem Rippenrohrkondensator bis zur Siedelinie.

3 → 4: isobare Unterkühlung der Flüssigkeit auf die Temperatur t_4 = 25 °C durch Wärmeabfuhr an den Stoffstrom 6 → 1 in einem nach außen hin adiabaten Gegenstromwärmeübertrager.

4 → 5: adiabate Drosselung auf den Druck $p_5 = p_1$ = 1,067 bar.

5 → 6: vollständige isobare Verdampfung des Kältemittels bis zur Taulinie durch Aufnahme des Wärmestroms aus dem Gefrierschrank.

6 → 1: isobare Überhitzung des Dampfes auf die Temperatur t_1 durch Wärmeaufnahme vom Stoffstrom 3 → 4.

a) Stellen Sie den Prozess qualitativ richtig in einem *T,s*-Diagramm dar.

b) Berechnen Sie die Temperatur t_1 und die Leistung des Verdichters.
(t_1 = 19,01 °C, P_{12} = 96,42 W)

c) Wie groß sind die Leistungsziffer ε_{KM} und der exergetische Wirkungsgrad η_e der Kältemaschine? (ε_{KM} = 1,245, η_e = 0,236)

d) Wie groß ist der Exergieverluststrom in der Drossel? ($\dot{E}_{v45}$ = 6,71 W)

e) Um wieviel Prozent würde sich die Kälteleistung $\dot{Q}_{56}$ verringern, wenn auf den Gegenstromwärmeübertrager verzichtet würde? ($\Delta\dot{Q}/\dot{Q}_{56}$ = 24,7 %)

Anmerkung: Es kann hier außer acht gelassen werden, dass die Kältemaschinen von Gefrierschränken im allgemeinen nur eine Einschaltdauer von ca. 50 % haben!

Stoffwerte für R134a:

Sättigungszustand							
$\frac{t}{^{o}C}$	$\frac{p}{bar}$	$\frac{v'}{dm^3/kg}$	$\frac{v''}{dm^3/kg}$	$\frac{h'}{kJ/kg}$	$\frac{h''}{kJ/kg}$	$\frac{s'}{kJ/(kg\cdot K)}$	$\frac{s''}{kJ/(kg\cdot K)}$
– 30	0,848	0,720	224,6	161,40	379,18	0,8510	1,7467
–25	1,067	0,728	180,7	167,59	382,34	0,8762	1,7416
–20	1,330	0,736	146,7	173,88	385,48	0,9012	1,7370
40	10,160	0,871	19,89	256,11	418,33	1,1895	1,7075
50	13,171	0,907	15,05	271,02	422,41	1,2355	1,7040
60	16,811	0,949	11,44	286,53	425,76	1,2817	1,6997

überhitzter Dampf p = 1,067 bar		
$\frac{t}{^{o}C}$	$\frac{h}{kJ/kg}$	$\frac{s}{kJ/(kg\cdot K)}$
–10	394,41	1,7888
0	402,63	1,8195
10	411,04	1,8497
20	419,70	1,8785

überhitzter Dampf p = 13,171 bar		
$\frac{t}{^{o}C}$	$\frac{h}{kJ/kg}$	$\frac{s}{kJ/(kg\cdot K)}$
60	434,44	1,7407
70	446,09	1,7751
80	457,53	1,8080
90	468,85	1,8396

Unterkühlte Flüssigkeit, p = 13,171 bar: In der Nähe der Phasengrenze ist c_p = 1,46 kJ/(kg·K) ≈ konstant

Aufgabe 8.1 (Kurzfragen)

a) Was versteht man unter einer Wärmepumpe (WP) und einer Kältemaschine (KM)?

b) Nennen Sie die prinzipiellen Unterschiede zwischen einer Wärmepumpe und einer Kältemaschine.

c) Wie berechnet man die Leistungsziffern ε_{WP} und ε_{KM} von Wärmepumpen und Kältemaschinen?

Aufgabe 8.3 (Zusätzliche Übungsaufgabe für zu Hause)

Ein Einfamilienhaus wird mit Hilfe einer einfachen Wärmepumpe beheizt, wobei die folgenden Daten gegeben sind:

Umgebungstemperatur t_U = 2 °C Erforderlicher Heizwärmestrom $\dot{Q}_H$ = 10 kW
Wohnraumtemperatur t_R = 20 °C Leistungszahl der Wärmepumpe ε_{WP} = 4

a) Wie groß ist die Antriebsleistung des Kompressors? (P_K = 2,5 kW)

b) Wie groß wäre die erforderliche Antriebsleistung des Kompressors bei einer reversibel arbeitenden Wärmepumpe ? ($P_{K,rev.WP}$ = 0,61 kW)

c) Erläutern Sie die Ursachen für die erheblich höhere Kompressorleistung im Fall der Frage a).

Thermodynamik für MB und UTRM: 8. Übung **Zusätzliche Aufgaben** (SS 2007)

Aufgabe 8.4 (typische Klausuraufgabe) (Zusätzliche Übungsaufgabe für zu Hause)

Ein Einfamilienhaus wird mit Hilfe einer einfachen Kompressionswärmepumpe beheizt. An einem kalten Wintertag soll die mittlere Temperatur der Wohnräume t_R = 20 °C betragen, wozu eine Heizleistung (Wärmestrom) von $|\dot{Q}_H|$ = 10 kW benötigt wird. Als Wärmequelle für die Wärmepumpe dient ein Erdwärmekollektor, der unter dem Garten des Hauses installiert worden ist; die mittlere Temperatur des Erdreiches kann mit t_E = 10 °C angesetzt werden. Als Arbeitsmedium der Wärmepumpe dient das Kältemittel R134a (Tetrafluorethan, $CH_2F\text{-}CF_3$), das den folgenden Kreisprozess durchläuft:

Zustandsänderungen:

Zust.1: gesättigter Dampf, p_1 = 3 bar.

$1 \rightarrow 2$: irreversibel adiabate Verdichtung des Kältemittels (isentroper Verdichterwirkungsgrad η_{sV} = 0,75) auf den Druck p_2 = 10 bar.

$2 \rightarrow 3$: isobare Wärmeabfuhr in einem Kondensator bis zur Siedelinie, wobei ein Wärmestrom von $\dot{Q}_{23}$ = –10 kW an den Wasserkreislauf der Heizung abgegeben wird.

Hierbei erwärmt sich das Heizungswasser ($c_{p,W}$ = 4,180 kJ/(kg·K)) einer Fußbodenheizung von t_{W1} = 28 °C (Rücklauftemperatur) auf t_{W2} = 32 °C (Vorlauftemperatur).

$3 \rightarrow 4$: adiabate Drosselung auf den Druck $p_4 = p_1$ = 3 bar.

$4 \rightarrow 1$: isobare Verdampfung des Kältemittels bis zur Taulinie.

(Anmerkung: Der Wärmetransport vom Erdwärmekollektor zum Verdampfer der Wärmepumpe erfolgt mit Hilfe eines geschlossenen Sole-Kreislaufes. Für die hier gegebene Aufgabenstellung kann dies außer Acht gelassen werden.)

a) Zeichnen Sie das Schaltschema der Wärmepumpe, und tragen Sie alle gegebenen Daten ein.

b) Stellen Sie den Prozess qualitativ richtig in einem T,s-Diagramm dar.

c) Berechnen Sie den umlaufenden Massenstrom $\dot{m}_W$ des Heizungswassers und den umlaufenden Massenstrom $\dot{m}$ des Kältemittels in der Wärmepumpe.
($\dot{m}_W$ = 0,5981 m/s; $\dot{m}$ = 56,54 g/s)

d) Bestimmen Sie den im Verdampfer zugeführten Wärmestrom $\dot{Q}_{41}$ sowie die Leistung des Verdichters P_{12}. ($\dot{Q}_{41}$ = 8,114 kW; P_{12} = 1,886 kW)

e) Berechnen Sie die Leistungszahl ε_{WP} und den exergetischen Wirkungsgrad η_e der Wärmepumpe. (Hinweis: Setzen Sie hierbei als Umgebungstemperatur $t_U = t_E$ = 10 °C an.)
(ε_{WP} = 5,302; η_e = 0,505)

Stoffwerte von R134a:

Sättigungszustand:

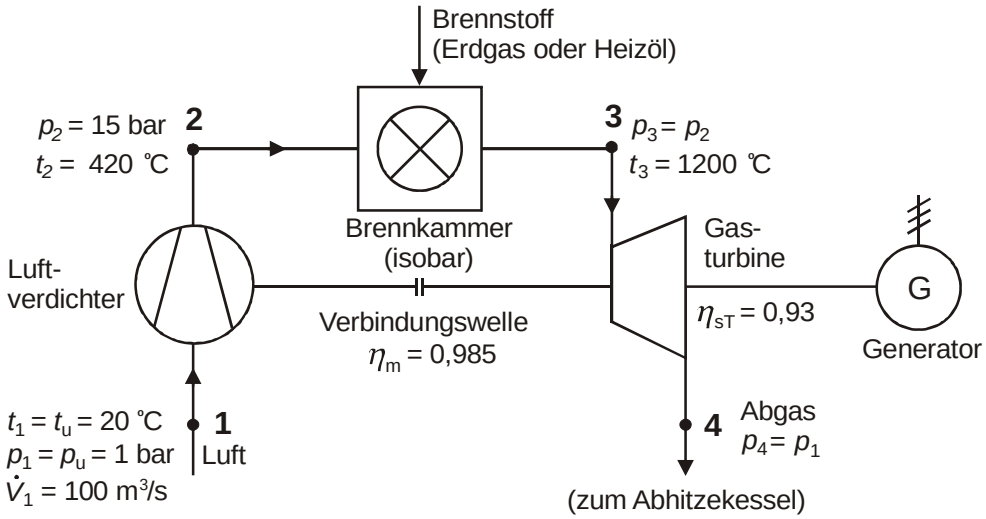
$\frac{p}{\text{bar}}$	$\frac{t_s}{^oC}$	$\frac{h'}{\text{kJ/kg}}$	$\frac{h''}{\text{kJ/kg}}$	$\frac{s'}{\text{kJ/(kg·K)}}$	$\frac{s''}{\text{kJ/(kg·K)}}$
2	–10,08	186,60	392,62	0,9503	1,7334
3	0,67	200,90	399,00	1,0033	1,7267
5	15,73	221,50	407,47	1,0759	1,7197
10	39,39	255,50	419,16	1,1876	1,7113
Zustandsgrößen am kritischen Punkt: t_k = 101,06 °C; p_k = 40,59 bar					

Überhitzter Dampf:

$\frac{p}{\text{bar}}$	$\frac{t}{^oC}$	$\frac{h}{\text{kJ/kg}}$	$\frac{s}{\text{kJ/(kg·K)}}$
10	40	419,86	1,7135
	45	425,44	1,7312
	50	430,88	1,7482
	55	436,24	1,7646
	60	441,53	1,7804

Aufgabe 8.5 (typische Klausuraufgabe) (Zusätzliche Übungsaufgabe für zu Hause)

In einer offenen Gasturbinenanlage (siehe Schaltschema) durchläuft das Arbeitsmedium Luft die folgenden Zustandsänderungen:



$1 \rightarrow 2$: irreversibel adiabate Verdichtung eines Luft-Volumenstroms $\dot{V}_1 = 100\ \text{m}^3/\text{s}$ vom Umgebungszustand ($t_1 = t_u = 20\ °\text{C}$, $p_1 = p_u = 1\ \text{bar}$) auf den Zustand 2 ($p_2 = 15\ \text{bar}$, $t_2 = 420\ °\text{C}$).

$2 \rightarrow 3$: isobare Verbrennung des Brennstoffs (Erdgas oder Heizöl) mit dem zugeführten Luftstrom bei $p = 15\ \text{bar}$ in einer nach außen adiabaten Brennkammer. Die Austrittstemperatur des Verbrennungsgases beträgt $t_3 = 1200\ °\text{C}$.
Zur Vereinfachung soll der Massenstrom des Brennstoffs ($\dot{m}_B/\dot{m}_L < 3\ \%$) hier nährerungsweise vernachlässigt werden!

$3 \rightarrow 4$: irreversibel adiabate Expansion der Luft in der Gasturbine (isentroper Turbinenwirkungsgrad $\eta_{sT} = 0{,}93$) auf den Druck $p_4 = p_1 = 1\ \text{bar}$.

a) Stellen Sie den Prozess qualitativ richtig in einem h,s-Diagramm dar.

b) Berechnen Sie den Massenstrom $\dot{m}$ der Luft. ($\dot{m} = 118{,}82\ \text{kg/s}$)

c) Bestimmen Sie die Leistung des Luftverdichters P_{12} und den isentropen Verdichterwirkungsgrad η_{sV}. ($P_{12} = 47{,}761\ \text{MW}$; $\eta_{sV} = 0{,}856$)

d) Berechnen Sie die Temperatur t_4 am Austritt der Gasturbine sowie die von der Gasturbine abgegebene Leistung P_{34}. ($t_4 = 461{,}95\ °\text{C}$; $P_{34} = -88{,}125\ \text{MW}$)

e) Wie groß sind die Nutzleistung und der thermische Wirkungsgrad der Gasturbinenanlage, wenn der Luftverdichter über eine Verbindungswelle von der Gasturbine angetrieben wird und der mechanische Wirkungsgrad $\eta_m = 0{,}985$ beträgt? ($P_N = -39{,}637\ \text{MW}$; $\eta_{th} = 0{,}4256$)

f) Wie groß ist der Exergiestrom des Abgases (Zustand 4)? ($\dot{E}_4 = 20{,}591\ \text{MW}$)

Stoffwerte der Luft:

Die Luft kann hier näherungsweise als ideales Gas behandelt werden.

Gaskonstante $R_L = 0{,}2871\ \text{kJ/(kg·K)}$

spez. isobare Wärmekapazität $c_{pL}^{o} = 1{,}0049\ \text{kJ/(kg·K)}$

Die spez. isobare Wärmekapazität der Luft sowie der Isentropenexponent κ sollen hier (stark) vereinfachend als konstant angenommen werden.

Hinweis: Die Änderung der kinetischen und der potentiellen Energie soll hier vernachlässigt werden.

Thermodynamik für MB und UTRM: 9. Übung (SS 2007)

Aufgabe 9.1 (Kurzfragen)

a) Kennzeichnen Sie einen Strömungsprozess, und geben Sie die eingeführten einschränkenden Voraussetzungen für die thermodynamische Behandlung an.

b) Wie lauten die Kontinuitätsgleichung und der 1. Hauptsatz in der Schreibweise für Strömungsprozesse ?

c) Leiten Sie eine Beziehung für die Dissipationsenergie bei einem adiabaten Strömungsprozess her.

Aufgabe 9.2 (Kurzfragen) (Zusätzliche Kurzfragen für zu Hause)

a) – Was versteht man unter der Schallgeschwindigkeit und unter welchen Voraussetzungen ist sie eine Zustandsgröße eines Fluids ?
   – Wie lautet die Definitionsgleichung der "Zustandsgröße" Schallgeschwindigkeit?

b) Schätzen Sie die Schallgeschwindigkeit in Luft (M = 28,96 g/mol; κ = 1,40) bei Umgebungsbedingungen T_1= 300 K, p_1 = 1 bar ab. (c_1^* = 347,3 m/s)

Aufgabe 9.3 (Kurzfragen)

a) – Was versteht man unter einer Düse und einem Diffusor ?
   – Welche Beziehung besteht zwischen der Querschnittsänderung und der Druckänderung beim reversiblen Durchströmen von Düsen und Diffusoren?
   – Welche Bauformen resultieren daraus für eine Düse und für einen Diffusor ?

b) Zeichnen Sie jeweils eine adiabate Düsen- und Diffusorströmung (reversibel und irreversibel) in ein *h,s*-Diagramm ein.

c) Definieren Sie analog zum isentropen Turbinenwirkungsgrad η_{sT} und zum isentropen Verdichterwirkungsgrad η_{sV} einen isentropen Düsenwirkungsgrad η_{sD} und einen isentropen Diffusorwirkungsgrad $\eta_{s,Diff}$.

Aufgabe 9.4

Aus einem großen Druckbehälter strömt Luft stationär durch eine am Behälter angeschlossene adiabate Lavaldüse. Im Druckbehälter befindet sich die Luft im Zustand 1 (p_1 = 1,5 bar, T_1 = 300 K, c_1 = 0 m/s); der Druck am Düsenaustritt (Zustand 2) beträgt p_2 = 1 bar. Die Luft (Molmasse M_L = 28,96 g/mol; Isentropenexponent κ = 1,40 = konstant) kann hier näherungsweise als ideales Gas betrachtet werden.

a) Ist die Geschwindigkeit am Düsenaustritt bei Annahme einer reibungsfreien Strömung größer oder kleiner als die Schallgeschwindigkeit? (Rechnung erforderlich!)
($c_{2s} < c_2^*$, c_{2s} = 256,8 m/s, c_2^* = 327,7 m/s)

b) Welcher Druck p_1 muss bei gegebener Temperatur T_1 im Behälter eingestellt werden, wenn die Luft mit 1,2-facher Schallgeschwindigkeit aus der Düse ausströmen soll (p_2 = 1 bar) und der isentrope Düsenwirkungsgrad η_{sD} = 0,90 beträgt?
(p_1 = 2,72 bar)

c) Auf welche Temperatur T_1 müsste die Luft im Behälter mindestens erwärmt werden, wenn bei einem Druck im Behälter von p_1 = 3 bar und einem Austrittsdruck von p_2 = 1 bar die Austrittstemperatur 0 °C nicht unterschreiten soll?
Der isentrope Düsenwirkungsgrad beträgt η_{sD} = 0,90.
(T_1 = 360,4 K)

Aufgabe 9.5 (Zusätzliche Übungsaufgabe für zu Hause)

In einer Gasleitung befindet sich Erdgas im Zustand 1 (p_1 = 1,5 bar, T_1= 300 K). Durch ein kleines Leck in der Leitung strömt permanent Erdgas in die Umgebung (Druck $p_u = p_2$ = 1 bar). Das Leck kann näherungsweise als adiabate Düse (Austrittsgeschwindigkeit $c_2 < c_2^*$) mit einem Austrittsquerschnitt A_2 = 1 mm^2 betrachtet werden. Das Erdgas (M = 18,5 g/mol; c_p^o = 2,02 kJ/(kg·K) = konstant) kann als ideales Gas behandelt werden.

a) Berechnen Sie den Massenstrom $\dot{m}$ (in kg/h), der **maximal** durch das Leck in die Umgebung austreten kann.

b) Wie groß ist die Schallgeschwindigkeit in Zustand 2?

Thermodynamik für MB und UTRM: 10. Übung (SS 2007)

Aufgabe 10.1 (Kurzfragen)

a) – Welche Zustandsgröße tritt bei Gemischen zusätzlich auf?
   – Wie berechnet man die Molmasse M und die spezielle Gaskonstante R von Gemischen?

b) – Erläutern Sie den Begriff Mischungsgröße am Beispiel des Volumens.
   – Wie lautet die Berechnungsgleichung für die allgemeine molare und spezifische Zustandsgröße z eines Gemisches?
   – Welche Aussagen ergeben sich bezüglich der Mischungsgrößen für ein Gemisch realer Fluide und idealer Gase?

Aufgabe 10.2

Trockene Luft ist ein Gemisch aus N_2, O_2, Ar, CO_2 und einigen anderen Gasen in vernachlässigbar kleiner Menge. Die Molmassen, die mittleren spezifischen isobaren Wärmekapazitäten im Zustand des idealen Gases und die Molenbrüche der vier Komponenten der trockenen Luft können aus der folgenden Tabelle entnommen werden.

Komponente	N_2	O_2	Ar	CO_2
Molmasse M/(g/mol)	28,013	31,999	39,948	44,011
Molenbruch ψ	0,7809	0,2095	0,0093	0,0003
spez. Wärmekap. c_p^o /(kJ/(kg·K))	1,0387	0,9164	0,5203	0,8299

a) Berechnen Sie die Molmasse und die spezielle Gaskonstante der Luft.
(M_L = 28,96 g/mol; R_L = 287,1 J/(kg·K))

b) Geben Sie die Zusammensetzung der Luft mit Hilfe der Massenbrüche an.
(ξ_{N_2} = 0,7553; ξ_{O_2} = 0,2314; ξ_{Ar} = 0,0128; ξ_{CO_2} = 0,0005)

c) Wie groß ist der Partialdruck des Sauerstoffes bei einem Gesamtdruck der Luft von p = 1 bar und T = 300 K bzw. 600 K ? (p_{O_2} = 0,21 bar)

Bei den folgenden Fragen d und e kann die Luft im betrachteten Temperatur- und Druckbereich als Gemisch idealer Gase angesehen werden.

d) Berechnen Sie die Dichte von trockener Luft bei p = 1 bar und t = 20 °C.
(ρ_L = 1,188 kg/m^3)

e) Welche Antriebsleistung muss einem adiabaten Kompressor (η_{sV} = 0,8) zugeführt werden, um einen Luft-Volumenstrom $\dot{V}_1$ = 2 m^3/min von p_1 = 1 bar, t_1 = 20 °C auf p_2 = 10 bar zu komprimieren? (P_{12} = 13,56 kW)

Aufgabe 10.3 (Kurzfragen)

a) – Was versteht man unter einem idealen Gas-Dampf Gemisch?
   – Nennen Sie Beispiele für Gas-Dampf-Gemische.

b) – Was versteht man unter feuchter Luft?
   – Nennen Sie einige Anwendungen, bei denen die Zustandseigenschaften der feuchten Luft eine entscheidende Rolle spielen.

c) – Erklären Sie die Begriffe "ungesättigte" und "gesättigte" feuchte Luft.
   – Was versteht man unter der relativen Feuchte?
   – Wie ist der Wassergehalt der feuchten Luft definiert, und zwischen welchen Grenzen können sich die Zahlenwerte für dieses Konzentrationsmaß bewegen?
   – Welcher Zusammenhang besteht zwischen dem Wassergehalt und dem Partialdruck des Wasserdampfes für ungesättigte und gesättigte feuchte Luft?

Aufgabe 10.4

In einem Orchideen-Gewächshaus soll bei einer Temperatur t = 25 °C und einem Druck von p = 1 bar eine relative Luftfeuchtigkeit φ = 60 % herrschen.
Damit es Besuchern möglich ist, durch die Glaswände in das Innere zu schauen, soll die Temperatur t_{GI} der inneren Oberfläche der Glasscheiben so eingestellt werden, dass die Scheiben nicht beschlagen.

a) Welchen Wert muss t_{GI} mindestens haben ?

   (t_{GI} = 16,6 °C)

b) Wieviel Wasserdampf enthält 1 kg <u>feuchte</u> Luft im Gewächshaus ?

   (m_W = 0,0119 kg H_2O)

c) Wieviel Wasserdampf ist in 1 m^3 der feuchten Luft im Gewächshaus enthalten ?

   (m_W = 0,0138 kg)

d) Wie groß wäre die Dichte trockener Luft bei t = 25 °C und p = 1 bar, und wie groß ist die Dichte der feuchten Luft bei den gegebenen Bedingungen?
   Ist die Dichte feuchter Luft größer oder kleiner als die Dichte trockener Luft bei gleichen Bedingungen.

   (ρ_L= ..... kg/m^3; ρ_{fL}= 1,160 kg/m^3)

   Wasser: M_W = 18,016 g/mol; R_W = 461,5 J/(kg·K)
   trockene Luft: M_L = 28,96 g/mol; R_L = 287,1 J/(kg·K)

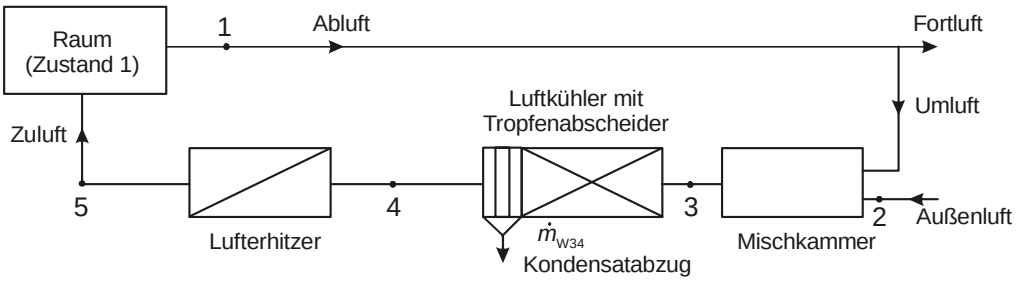
Dampfdruck von Wasser:

t / °C	14	16	18	20	22	24	25
p_s / mbar	15,97	18,17	20,62	23,37	26,42	29,82	31,66

Thermodynamik für MB und UTRM: 11. Übung (SS 2007)

Aufgabe 11.2 (typische Klausuraufgabe)

Zur Klimatisierung eines Hörsaals (Zustand der Raumluft: t_1= 22 °C, φ_1 = 50 %) an einem warmen Sommertag wird dem Hörsaal ein Volumenstrom Luft $\dot{V}_1$ = 15000 m^3/h entzogen (Zustand der Abluft = Zustand der Raumluft).



Schaltschema der Klimaanlage

Bezogen auf den Massenstrom der trockenen Luft $\dot{m}_{L1}$ werden 40 % als Fortluft ins Freie abgeführt und 60 % als Umluft wieder verwendet. Die Umluft wird in einer nach außen adiabaten Mischkammer mit Außenluft (t_2 = 28 °C, φ_2 = 70 %, x_2 = 0,01691 kg H_2O/kg trockene Luft, $\dot{m}_{L2}$ = 0,4 $\dot{m}_{L1}$) vermischt (Zustand 3) und dann in einem Luftkühler mit Tropfenabscheider auf die Temperatur t_4 (φ_4 = 100 %) abgekühlt. Das hierbei abgeschiedene Wasser wird mit der Temperatur t_4 abgeführt. Anschließend wird die Luft in einem Lufterhitzer auf die Temperatur t_5 erwärmt und dann dem Hörsaal als Zuluft zugeführt. Durch die Wärmezufuhr aus der Umgebung ($\dot{Q}$ = 12,5 kW) sowie durch die Wärmeabgabe (90 W/Person) und die Wasserdampfabgabe (40 g/h je Person, t_D = 36 °C; Atmung) der im Hörsaal anwesenden 250 Studenten ergibt sich dann wieder der Raumzustand 1. Der gesamte Prozess verläuft isobar bei p = 1 bar.

a) Stellen Sie die Zustandsänderungen der Luft qualitativ richtig in einem h_{1+x},x-Diagramm dar.

b) Zeichnen Sie Zustandsänderungen der Luft in das beiliegende h_{1+x},x-Diagramm ein, und schätzen Sie anhand des Diagrammes die Werte für t_3, φ_3, x_3 und $h_{1+x,3}$ ab.

c) Wie groß ist der Massenstrom der trockenen Luft $\dot{m}_{L1}$, der dem Hörsaal entzogen wird, und wie groß ist die Dichte ρ_1 der Luft? ($\dot{m}_L$ = 4,854 kg/s; ρ_1 = 1,175 kg/m^3)

d) Berechnen Sie die Temperaturen t_4 und t_5, den Wärmestrom $\dot{Q}_{45}$ sowie den Massenstrom $\dot{m}_{W34}$ des im Tropfenabscheider abgeführten Wassers.
(t_4 = 10,01 °C; t_5 = 14,90 °C; $\dot{Q}_{45}$ =24,17 kW; $\dot{m}_{W34}$ = 0,0195 kg/s)

e) Berechnen Sie die Temperatur t_3. (t_3 = 24,42 °C) (Übungsaufgabe für zu Hause)

Stoffwerte:

Gaskonstante der trockenen Luft	R_L	=	0,2871	kJ/(kg·K)
Gaskonstante des Wassers	R_w	=	0,4615	kJ/(kg·K)
spez. Wärmekapazität der trockenen Luft	c_{pL}	=	1,004	kJ/(kg·K)
spez. Wärmekapazität des Wasserdampfes	c_{pW}	=	1,86	kJ/(kg·K)
spez. Wärmekapazität des flüssigen Wassers	c_W	=	4,19	kJ/(kg·K)
Verdampfungsenthalpie des Wassers bei 0 °C	r_0	=	2500	kJ/kg

Damfdruck von Wasser:

t / °C	0	5	8	10	12	14	16	18	20	22	25	28	30
p_s/ mbar	6,1	8,7	10,7	12,3	14,0	16,0	18,2	20,6	23,4	26,4	31,7	37,8	42,5

Hinweis: Alle gasförmigen Komponenten können wie ideale Gase behandelt werden.

Aufgabe 11.1 (Kurzfragen)

a) – Wie sind bei Prozessen mit feuchter Luft die spezifische Enthalpie h_{1+x} und das spezifisches Volumen v_{1+x} definiert ?

– Wie lauten die zugehörigen Berechnungsgleichungen für ungesättigte feuchte Luft ?

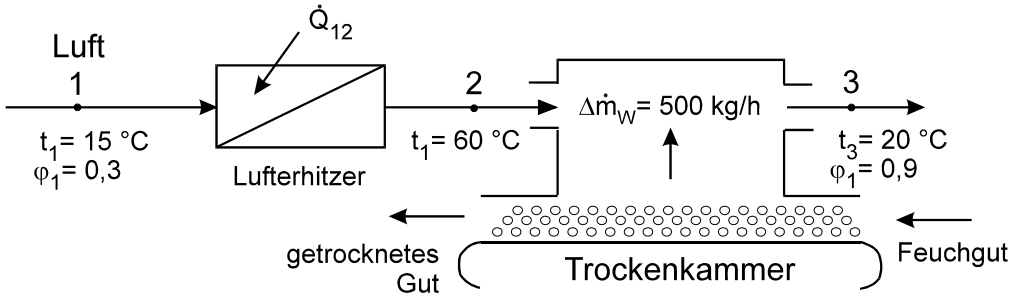
b) – Zeichnen Sie für $h_{1+x} \geq 0$ schematisch ein vollständiges h_{1+x},x-Diagramm feuchter Luft mit einigen Isenthalpen, Isothermen und Linien φ = const.

– Begründen Sie die Abweichung der Isothermen von der Horizontalen sowohl im ungesättigten Gebiet als auch im Nebelgebiet.

– Enthält das h_{1+x},x-Diagramm druckabhängige Informationen ?

Aufgabe 11.3 (Zusätzliche Übungsaufgabe für zu Hause)

In einer Trockenkammer (siehe Skizze) wird einem Massenstrom Feuchtgut stündlich 500 kg Wasser dadurch entzogen, dass Luft im Gegenstrom über das Feuchtgut geleitet wird. Dafür wird die Luft aus der Umgebung mit t_1 = 15 °C und φ_1 = 0,3 angesaugt und in einem Wärmeübertrager auf t_2 = 60 °C aufgewärmt. Die erhitzte Luft tritt dann in die Trockenkammer ein, nimmt die Feuchtigkeit auf und verlässt den Trockner mit t_3 = 20 °C und φ_3 = 0,9. Die Zustandsänderungen der Luft verlaufen isobar bei p = 1 bar; Änderungen der kinetischen und potentiellen Energie der Luftströmung sind zu vernachlässigen.



a) Welcher Volumenstrom $\dot{V}_1$ der feuchten Luft (Ansaugzustand) wird benötigt, um die Trocknung, wie vorgesehen, zu erreichen ? ($\dot{V}_1$ = 40873 m^3/h)

b) Wie groß ist der im Wärmeübertrager zuzuführende Wärmestrom ? *($\dot{Q}_{12}$ = 620,8 kW)*

Stoffwerte: siehe Aufgabe 11.2

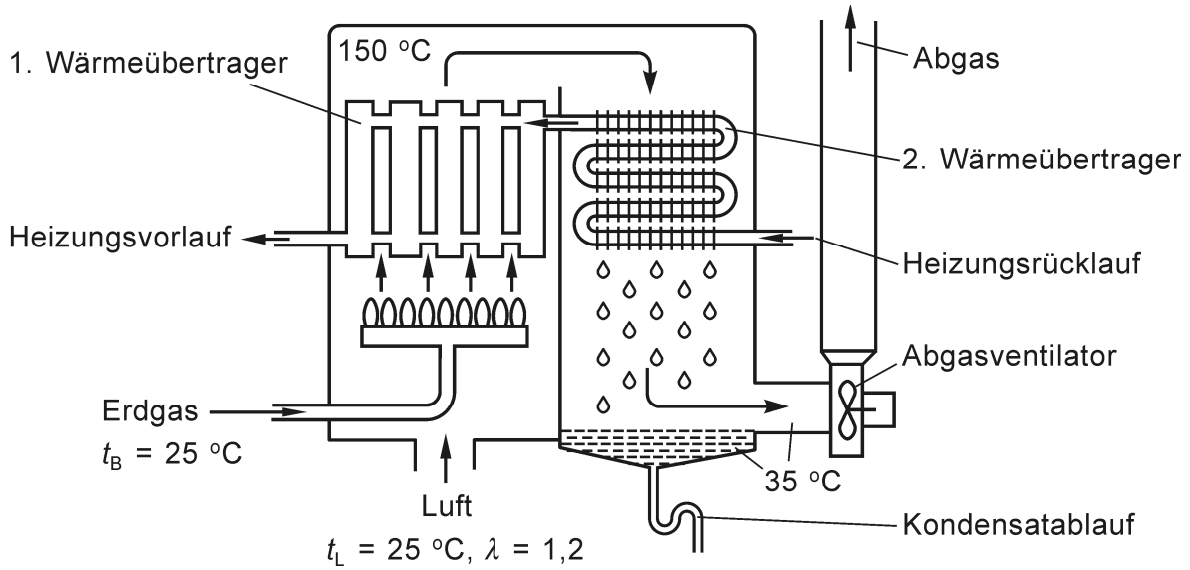
Dampfdruck des Wassers:

t / °C	15	20	60
p_S / mbar	17,04	23,37	199,2

Thermodynamik für MB und UTRM: 12. Übung (SS 2007)

Aufgabe 12.2

Um bei Heizungsanlagen Primärenergie einzusparen, sind sogenannte Brennwertkessel entwickelt worden. In diesen Brennwertkesseln werden die Verbrennungsgase in einem dem eigentlichen Kessel nachgeschalteten zweiten Wärmeübertrager auf eine Temperatur abgekühlt, die deutlich unterhalb der Taupunkttemperatur t_T des Wassers liegt.



In dem in der Skizze dargestellten Brennwertkessel wird Erdgas mit Luft (Luftverhältnis $\lambda = 1{,}2$) vollständig verbrannt. Das Erdgas soll vereinfachend nur aus den drei Komponenten Methan (Molenbruch $\psi_{CH_4} = 0{,}88$), Ethan ($\psi_{C_2H_6} = 0{,}10$) und Kohlendioxid ($\psi_{CO_2} = 0{,}02$) bestehen.

Die Temperaturen des Erdgases und der Luft am Kesseleintritt sowie des Verbrennungsgases direkt nach dem 1. Wärmeübertrager und vor dem Eintritt in den Kamin sind in der Skizze angegeben.

a) Wie groß ist der molare (untere) Heizwert $\Delta^V h^u_{m,\theta}$ ($H_{um,\theta}$) des Erdgases im Standardzustand?
($\Delta^V h^u_{m,\theta} = 848{,}74$ kJ/mol)

b) Berechnen Sie den Luftbedarf L und die Zusammensetzung des Verbrennungsgases (molares Verhältnis Verbrennungsgas-Komponenten/Brennstoff $y_{Vi} = \dot{n}_{Vi}/\dot{n}_B$) nach dem 1. Wärmeübertrager.
($L = 12{,}057$ mol L/mol B; $y_{CO_2} = 1{,}10$ mol CO_2/mol B; $y_{H_2O} = 2{,}06$; $y_{O_2} = 0{,}422$; $y_{N_2} = 9{,}525$)

c) Wie groß ist der molare Brennwert $\Delta^V h^u_{m,\theta}$ ($H_{om,\theta}$) im Standardzustand?
($\Delta^V h^u_{m,\theta} = 939{,}31$ kJ/mol)

d) Welche Wärme pro mol Erdgas würde bei sonst gleichen Bedingungen ein herkömmlicher Kessel (HK) abgeben, bei dem das Verbrennungsgas mit $t = 150$ °C direkt in den Kamin eintritt?
($q^B_{12,HK} = -798{,}21$ kJ/mol)

Die folgenden Fragen beziehen sich auf den gegebenen Betrieb als Brennwertkessel (BK).

e) Wie groß ist das molare Wasser/Brennstoffverhältnis y_{H_2O}, aufgespalten in den flüssigen Anteil und den im Verbrennungsgas verbleibenden gasförmigen Anteil?
($y^{Gas}_{H_2O} = 0{,}658$ mol H_2O/ mol B; $y^{Fl}_{H_2O} = 1{,}402$ mol H_2O/ mol B)

f) Wie groß ist nun die pro mol Erdgas abgegebene Wärme? ($q^B_{12,BK} = -905{,}80$ kJ/mol)

g) Welche Einsparung an Erdgas wird beim Brennwertkessel im Vergleich zum herkömmlichen Kessel gleicher Leistung erreicht? (Einsparung 11,9 %)

Stoffwerte der gasförmigen Komponenten:

Stoff	Molmasse M/(g/mol)	(unterer) Heizwert $\Delta^{V}h_{\theta}^{u}$/(kJ/g)	mittlere molare Wärmekapazität $c_p^{o}\big\|_{25\,°C}^{35\,°C}$/(J/mol·K))	$c_p^{o}\big\|_{25\,°C}^{150\,°C}$/(J/mol·K))
CH_4	16,0	50,14		
C_2H_6	30,1	47,43		
CO_2	44,0		37,3	39,7
O_2	32,0		29,3	29,8
N_2	28,0		29,1	29,2
H_2O	18,0		33,6	33,9

Wasser hat bei t_θ = 25 °C eine Verdampfungsenthalpie von r_θ = 2442,5 kJ/kg und bei t = 35 °C einen Dampfdruck von p_s = 56,22 mbar. Die mittlere spezifische Wärmekapazität des flüssigen Wassers beträgt in diesem Temperaturbereich c_p = 4,18 kJ/(kg·K).

Hinweise:

Alle gasförmigen Komponenten können als ideale Gase behandelt werden. Zusammensetzung der Luft (Molenbrüche): ψ_{O_2} = 0,21; ψ_{N_2} = 0,79. Der Druck p = 1 bar ist im gesamten System konstant.

Aufgabe 12.1 (Kurzfragen)

a) – Geben Sie die zwei Schreibweisen für eine chemische Reaktionsgleichung an, die in der Vorlesung verwendet werden.
   – Was versteht man unter den stöchiometrischen Koeffizienten und unter einem stöchiometrischen Gemisch?

b) Welche der folgenden Größen bleiben bei einer chemischen Reaktion konstant?
   q die Masse des Systems
   q die Anzahl der Atome eines jeden der an der Reaktion beteiligten chemischen Elemente
   q die Anzahl der Moleküle im System
   q die Substanzmenge des Systems

c) Erläutern Sie am Beispiel der Verbrennung von 1 kg Wasserstoff mit reinem Sauerstoff den Zusammenhang zwischen Reaktionsgleichung und Massenbilanz.

d) Was versteht man unter der Mindestluftmenge?
   – Was beschreibt das Luftverhältnis?
   – Welche Auswirkungen hat ein Luftverhältnis λ < 1?

e) Wie ist das Normvolumen definiert ?

Aufgabe 12.3 (Kurzaufgabe) (Zusätzliche Übungsaufgabe für zu Hause)

Wieviel Kubikmeter Luft im Normzustand muss ein Gebläse zur vollständigen Verbrennung von 50 kg Ethan (C_2H_6, Molmasse M = 30,07 g/mol) pro Stunde mindestens liefern? ($\dot{V}_n$ = 621,17 m³/h)

Aufgabe 12.4 (Kurzaufgabe) (Zusätzlich Übungsaufgabe für zu Hause)

a) Was versteht man unter dem (unteren) Heizwert $\Delta^{V}h^{u}$ (H_u) und dem Brennwert $\Delta^{V}h^{o}$ (H_o) eines Brennstoffes?

b) Berechnen Sie den spezifischen Heizwert und Brennwert von Propan bei t_θ = 25 °C.
($\Delta^{V}h_{\theta}^{u}$ = 46,34 MJ/kg; $\Delta^{V}h_{\theta}^{o}$ = 50,34 MJ/kg)

Stoff	M/(g/mol)	$\Delta^{B}h_{\theta}$/(kJ/mol)
C_3H_8 (g)	44,10	–103,9
CO_2 (g)	44,01	–393,5

Stoff	M/(g/mol)	$\Delta^{B}h_{\theta}$/(kJ/mol)
H_2O (g)	18,02	–241,8
H_2O (fl)	18,02	–285,9

Aufgabe 12.5 (Zusätzliche Übungsaufgabe für zu Hause)

In der Feuerung eines Heizkraftwerkes der Steag AG in Herne wird Steinkohle mit Luft (Luftverhältnis $\lambda = 1{,}5$) isobar bei $p = 1$ bar vollständig verbrannt. Der Massenstrom der Steinkohle beträgt $\dot{m}_B = 45$ kg/s. Die Zusammensetzung der Steinkohle sei vereinfachend wie folgt gegeben (Massenbrüche): $\xi_C = 0{,}73$; $\xi_{H_2} = 0{,}04$; $\xi_{N_2} = 0{,}03$; $\xi_{H_2O} = 0{,}20$. Der (untere) Heizwert im Standardzustand beträgt $\Delta^V h_\theta^u = 28{,}3$ MJ/kg. Der Brennstoff (B) und die Luft (L) werden der Brennkammer mit der Temperatur $t_B = t_L = 25$ °C zugeführt. Die Abgastemperatur (des Verbrennungsgases) beträgt $t_V = 125$ °C.

a) Berechnen Sie die pro kg Brennstoff benötigte Luftmenge L' und die Verbrennungsgas/Brennstoff-Verhältnisse $y'_{Vi} = \dot{n}_{Vi}/\dot{n}_B$ für alle Verbrennungsgas-Komponenten.
($L' = 504{,}87$ mol L/mol B; $y'_{CO_2} = 60{,}78$ mol CO_2/mol B; $y'_{H_2O} = 30{,}90$ mol/kg; $y'_{O_2} = 35{,}34$ mol/kg; $y'_{N_2} = 399{,}92$ mol/kg)

b) Berechnen Sie den von der Feuerung abgegebenen Wärmestrom $\dot{Q}_{12}$.
($\dot{Q}_{12} = -1201{,}0$ MW)

c) Wie groß wäre der Wärmestrom $\dot{Q}_{23}$, den das Verbrennungsgas bei einer Abkühlung von $t_V = 125$ °C auf $t_\theta = 25$ °C abgeben könnte, wenn dabei 47,4 mol-% des im Verbrennungsgas enthaltenen Wassers kondensieren würden?
($\dot{Q}_{23} = -101{,}5$ MW)

d) Wieviel Kilogramm CO_2 werden je erzeugte Kilowattstunde Nutzleistung in die Atmosphäre geleitet, wenn das Kraftwerk einen thermischen Wirkungsgrad von $\eta_{th} = 0{,}30$ besitzt?
($\dot{m}_{CO_2} / |P_N| = 1{,}20$ kg CO_2/kWh)

Stoffwerte:

Stoff	Molmasse $\frac{M}{\text{g/mol}}$	mittl. molare Wärmekapazität $\frac{c_p^{\circ}\big\vert_{25\,°C}^{125\,°C}}{\text{J/(mol K)}}$
C	12,01	—
H_2	2,02	—
S	32,07	—
O_2	32,00	29,7
N_2	28,01	29,1
CO_2	44,01	39,1
H_2O (g)	18,02	33,9

Verdampfungsenthalpie des Wasser bei $t_\theta = 25$ °C: $r(t_\theta) = 2442{,}5$ kJ/kg.

Hinweise: Alle gasförmigen Komponenten können als ideale Gase behandelt werden.
Zusammensetzung der Luft (Molenbrüche): $\psi_{O_2} = 0{,}21$; $\psi_{N_2} = 0{,}79$.

Thermodynamik für MB und UTRM: 13. Übung (SS 2007)

Aufgabe 13.1 (Kurzfragen) (Kurzfragen c und d als Übung für zu Hause)

a) – Was versteht man unter der Energieform Wärme?
   – Was ist die „treibende Kraft“ bei der Übertragung von Wärme?
   – Nennen Sie die drei Mechanismen, durch die Wärme übertragen werden kann.

b) – Was versteht man unter der Wärmeleitfähigkeit λ, dem Wärmeübergangskoeffizienten α und dem Wärmedurchgangskoeffizienten k?
   – Vergleichen Sie die Wärmeleitfähigkeiten λ von Kupfer, Stahl, Mauerwerk, Styropor und Luft.

c) – Was versteht man unter Wärmestrahlung?
   – Was versteht man unter einem schwarzen Körper?
   – Wie groß ist der Wärmestrom, den ein schwarzer Körper (z. B. schwarze Teerpappe auf einem Hausdach) je m^2 bei T = 270 K nachts (bei wolkenfreiem Himmel) maximal ins All abstrahlen kann? ($\dot{q}_S$ = 301,33 W/m^2)

d) – Was versteht man unter dem Begriff Diffusion bei Stoffgemischen?
   – Was ist die „treibende Kraft“ bei Diffusionsvorgängen?
   – Welche analoge Größe bei Diffusionsvorgängen entspricht der Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)] bei der Wärmeübertragung?

Aufgabe 13.2

Die Hauswände eines älteren Mehrfamilienhauses bestehen aus den tragenden Wänden aus Ziegelstein (s_{ZS} = 30 cm dick), einer Isolierung aus 10 cm dicken Styroporplatten auf der Außenseite des Mauerwerks sowie einer äußeren Klinkerschicht mit einer Dicke von 10 cm. Die Innentemperatur des Hauses beträgt t_H = 20 °C. Der Wärmeübergangskoeffizient an der Innenseite des Hauses kann mit α_i = 4 W/(m^2·K) abgeschätzt werden.

a) Wie groß ist der Wärmestrom pro m^2 (Wärmestromdichte $\dot{q}$) an die Umgebung, wenn die Umgebungstemperatur an einem Wintertag t_u = –5 °C beträgt? Der Wärmeübergangskoeffizient an der Außenseite des Hauses kann mit α_a = 6 W/(m^2·K) abgeschätzt werden. ($\dot{q}$ = 7,50 W/m^2)

b) Um wieviel Prozent ändert sich der Wärmestrom pro m^2 während eines Sturms (t_u = –5 °C, wie bei Frage a), wenn sich dadurch der Wärmeübergangskoeffizient auf der Außenseite des Hauses auf α_a = 30 W/(m^2·K) erhöht? ($\Delta\dot{q}/\dot{q}$ = +4,4%)

c) Berechnen Sie den Wärmestrom pro m^2 an die Umgebung (im Fall der Frage a) für ein Isolierglasfenster aus zwei 4 mm dicken Glasscheiben mit einem Abstand zwischen den Scheiben von 12 mm. (Die Luft zwischen den zwei Scheiben kann als ruhend betrachtet werden.) ($\dot{q}$ = 27,50 W/ m^2)

d) Wie groß sind die Temperaturen an der Innen- und Außenseite der Hauswand sowie an der Innenseite und der Außenseite der Styroporschicht im Fall der Frage a?
Veranschaulichen Sie den Temperaturverlauf in der Wand in einem Diagramm (Temperatur über Wanddicke aufgetragen).
($t_{H,i}$ = 18,13 °C; $t_{H,a}$ = –3,75 °C; $t_{St,i}$ = 15,63 °C; $t_{St,a}$ = –3,12 °C)

e) Wie groß ist der Wärmestrom aus einer Wohnung des Hauses an die Umgebung (im Fall der Frage a), wenn die Außenfläche A_W =120 m^2 und die Fensterfläche A_F = 20 m^2 beträgt? (Anmerkung: Die Wärmeströme durch die Decke und den Boden an die Nachbarwohnungen können näherungsweise vernachlässigt werden.) ($\dot{Q}$ = 1,450 kW)

Stoffwerte: Wärmeleitfähigkeiten λ:

Ziegelstein:	λ_{ZS} = 0,90 W/(m·K)	Luft:	λ_L = 0,025 W/(m·K)
Klinker:	λ_{Kl} = 1,20 W/(m·K)	Styropor:	λ_{St} = 0,040 W/(m·K)
Glas:	λ_{Gl} = 0,80 W/(m·K)		

Aufgabe 13.3 (Frage c als Übungsaufgabe für zu Hause)

Eine Thermoskanne ist mit 1 l Kaffee ($m \approx 1$ kg, $c_p = 4{,}20$ kJ/(kg·K), $\rho \approx$ konstant) mit einer Temperatur von $t_K = 90$ °C gefüllt. Der Druck in der Kanne $p = 1$ bar ist konstant. Die Wärmedurchgangszahl vom Kaffee an die Umgebung ($t_u = 20$ °C) beträgt $k = 0{,}80$ W/(m^2·K). Die Kanne hat eine mittlere Oberfläche von $A = 0{,}070$ m^2.

a) Schätzen Sie ab, wie lange es dauert, bis der Kaffee auf $t = 80$ °C abgekühlt ist (Zeit = τ).
Hinweis: Die Masse der Thermoskanne soll hier in grober Näherung vernachlässigt werden.
($\Delta\tau = 3{,}21$ h)

b) Schätzen Sie ab, wie lange es dauert, bis sich der Kaffee von 40 °C auf 30 °C abgekühlt hat. ($\Delta\tau = 13{,}89$ h)

c) Zusatzfrage zum „Knobeln“ (ohne Klausurrelevanz !!!):
Stellen Sie eine Differentialgleichung für die Abkühlkurve des Kaffees auf, und lösen Sie diese (einfache) Gleichung. Skizzieren Sie das Ergebnis in einem t,τ-Diagramm (τ = Zeit). ($t = t_u + 70\ \text{K}\cdot e^{-\tau/\tau_0}$; $\tau_0 = (m\cdot c_p)/(k\cdot A) = 20{,}83$ h)

Aufgabe 13.3 (Zusätzliche Übungsaufgabe für zu Hause)

Eine Apparatur zur Untersuchung physikalischer Vorgänge besteht aus einem Hochdruck-Autoklaven, der sich in einem evakuierten Behälter befindet. Der Autoklav besteht aus Edelstahl (Emissionsgrad $\varepsilon_{St} \approx 0{,}40$) und besitzt eine Oberfläche von $A_A = 0{,}2$ m^2. Der äußere Behälter ist auf seiner Innenseite vernickelt ($\varepsilon_{Ni} = 0{,}06$) und seine innere Oberfläche beträgt $A_B = 0{,}8$ m^2. Aufgrund des Hochvakuums im Behälter (Druck $p < 10^{-5}$ mbar) ist die Wärmeübertragung durch die Wärmeleitung der Luft äußerst gering.

Die Wärmeübertragung durch Strahlung lässt sich für die gegebene Anordnung durch die folgende Gleichung beschreiben (Autoklav = 1, äußerer Behälter = 2):

$$\dot{Q} = \frac{\sigma \cdot A_1 \cdot \left(T_1^4 - T_2^4\right)}{1/\varepsilon_1 + A_1/A_2 \cdot \left(1/\varepsilon_2 - 1\right)} = \frac{\sigma^* \cdot A_1 \cdot \left[\left(T_1/100\ \text{K}\right)^4 - \left(T_2/100\ \text{K}\right)^4\right]}{1/\varepsilon_1 + A_1/A_2 \cdot \left(1/\varepsilon_2 - 1\right)}$$

a) Berechnen Sie den Wärmestrom vom Autoklaven zum äußeren Behälter aufgrund der Strahlung, wenn die Temperatur des Autoklaven $T_A = 400$ K und die Temperatur des äußeren Behälters $T_B = 300$ K beträgt. ($\dot{Q} = 30{,}9$ W)

Stoffwerte:

$\sigma = 5{,}67\cdot10^{-8}$ W/(m^2·K^4) = $\sigma^*/(100\ \text{K})^4$

$\sigma^* = 5{,}67$ W/m^2