



Klausur im Fach  
Thermodynamik I, WS 2015/2016  
am 24.03.2016

Aufgabe 1	Aufgabe 2	Aufgabe 3	Aufgabe 4	Gesamt

Name:

Matrikelnummer:

Studiengang:

- Bachelor
- Master
- Diplom, modularisiert
- Erasmus/Schüler/Nebenhörer

➔ Ich erkläre, dass ich mich prüfungsfähig fühle. (§39(10) AllgStuPO vom 8.Mai 2013)

---

Datum und Unterschrift

---

1. Der Klausurumfang beträgt inklusive diesem Deckblatt und Formelsammlung 20 Seiten.
2. Tragen Sie auf dem Deckblatt Ihren Namen und Ihre Matrikelnummer ein.
3. Es sind nur Fragen zum Verständnis des Aufgabentextes zulässig. Fragen zur Lösung der Aufgaben werden **nicht** beantwortet.
4. Die Dauer der Prüfung beträgt 120 Minuten.
5. Zum Bestehen werden im Theorieteil (Aufgabe 1) mindestens 10 Punkte, sowie insgesamt mindestens 40 Punkte benötigt.
6. Ihr Schreibpapier wird Ihnen gestellt. **Eigenes Papier darf nicht verwendet werden.**
7. Zugelassene Hilfsmittel: Nichtprogrammierbare Taschenrechner,  $h, s$ -Diagramm. **Bitte schalten Sie Ihre Mobiltelefone aus und nehmen Sie diese vom Arbeitsplatz.**
8. Es dürfen nur **dokumentenechte Stifte (keine Bleistifte, keine rote Farbe)** zur Anfertigung von Texten und Grafiken verwendet werden, anderenfalls werden diese nicht gewertet.
9. Geben Sie die von Ihnen beschriebenen Blätter einschließlich der Aufgabenblätter sofort nach der Klausur ab, später abgegebene Blätter werden nicht berücksichtigt.
10. Die Zahlenwerte bei eventuellen Quereinstiegen entsprechen nicht den exakten Ergebnissen. Treffen Sie gegebenenfalls plausible Annahmen, um auch ohne Zwischenergebnisse weiterrechnen zu können.
11. Rechenwege müssen **nachvollziehbar** dargestellt werden. Nicht zu wertende Berechnungen oder Diagramme müssen durchgestrichen werden.

– Auf dieser Seite steht kein Aufgabentext –

– Auf dieser Seite steht kein Aufgabentext –

– Auf dieser Seite steht kein Aufgabentext –

# Formelsammlung

## Molmassen

$$M_{H_2} = 2 \text{ kg/kmol} \quad M_{N_2} = 28 \text{ kg/kmol} \quad M_{O_2} = 32 \text{ kg/kmol} \quad M_C = 12 \text{ kg/kmol}$$

## Energie und der erste Hauptsatz der Thermodynamik

Energiebilanzgleichung für geschlossene Systeme:

$$\frac{d(U + KE + PE)}{d\tau} = \dot{Q} + \dot{W} \quad (1)$$

Definition der Enthalpie:

$$H := U + pV \quad (2)$$

Energiebilanzgleichung für offene Systeme:

$$\frac{d(U + KE + PE)}{d\tau} = \dot{Q} + \dot{W} + \sum_{ein} \dot{m}_{ein}(h + ke + pe)_{ein} - \sum_{aus} \dot{m}_{aus}(h + ke + pe)_{aus} \quad (3)$$

Volumenänderungsarbeit und Arbeit in Fließprozessen:

$$W_V = -\int pdV \quad \text{und} \quad W_t = W_R + \int V dp + \Delta KE + \Delta PE \quad (4)$$

## Eigenschaften idealer Gase

Thermische Zustandsgleichung idealer Gase:

$$pV = m \frac{\bar{R}}{M} T \quad (\text{id. Gase}) \quad \text{mit} \quad \bar{R} = 8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} \quad (5)$$

Kalorische Zustandsgleichungen für ideale Gase:

$$du = c_v dT \quad (\text{id. Gase}) \quad \text{mit} \quad c_v := \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad (6)$$

$$dh = c_p dT \quad (\text{id. Gase}) \quad \text{mit} \quad c_p := \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad (7)$$

Verhältnis der Wärmekapazitäten / Isentropenexponent idealer Gase:

$$c_p - c_v = \frac{\bar{R}}{M} \quad (\text{id. Gase}) \quad \kappa := \frac{c_p}{c_v} \quad (8)$$

## Quasistatische Zustandsänderungen in homogenen Systemen

Isentrope Zustandsänderung/Isentropenexponent:

$$pv^k = \text{konst.} \quad \text{mit} \quad k := -\frac{v}{p} \left( \frac{\partial p}{\partial v} \right)_s \quad \text{und für ideale Gase:} \quad k = \kappa \quad (9)$$

Isentrope Zustandsänderung idealer Gase:

$$T \cdot v^{\kappa-1} = \text{konst.} \quad (\text{id. Gase}) \quad T \cdot p^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} = \text{konst.} \quad (\text{id. Gase}) \quad (10)$$

Polytrope Zustandsänderung/Polytropenexponent:

$$pv^n = \text{konst.} \quad \text{mit} \quad n := -\frac{v}{p} \left( \frac{\partial p}{\partial v} \right)_{pol} \quad (11)$$

## Entropie und der zweite Hauptsatz der Thermodynamik

Entropiebilanzgleichung für geschlossene Systeme:

$$\frac{dS}{d\tau} = \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \dot{S}_{gen} \quad \text{mit} \quad \dot{S}_{gen} \geq 0 \quad (12)$$

Entropiebilanzgleichung für offene Systeme:

$$\frac{dS}{d\tau} = \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum_{ein} (\dot{m}s)_{ein} - \sum_{aus} (\dot{m}s)_{aus} + \dot{S}_{gen} \quad \text{mit} \quad \dot{S}_{gen} \geq 0 \quad (13)$$

Entropie reiner idealer Gase:

$$ds = \frac{c_v dT}{T} + \frac{\bar{R}}{M} \frac{dv}{v} = \frac{c_p dT}{T} - \frac{\bar{R}}{M} \frac{dp}{p} \quad (\text{id. Gase}) \quad (14)$$

## Exergie

Exergie eines Systems:

$$E_{S_{ys}} = E_{S_{ys}}^{PH} + E^{KN} + E^{PT} + E^{CH} \quad (15)$$

$$E_{S_{ys}} = m[(u - u_0) + p_0(v - v_0) - T_0(s - s_0)] + \frac{mc^2}{2} + mgz + E^{CH} \quad (16)$$

Exergie eines Stoffstromes:

$$\dot{E} = \dot{E}^{PH} + \dot{E}^{KN} + \dot{E}^{PT} + \dot{E}^{CH} \quad (17)$$

$$\dot{E} = \dot{m}[(h - h_0) - T_0(s - s_0)] + \frac{\dot{m}c^2}{2} + \dot{m}gz + \dot{E}^{CH} \quad (18)$$

Zusammenhang zwischen Entropieerzeugung und Exergievernichtung:

$$E_D = T_0 \cdot S_{gen} \quad (19)$$

Exergietransport verbunden mit Energietransport in Form von Wärme und Arbeit:

$$\dot{E}_{q,j} := \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j \quad \text{und} \quad \dot{E}_w := \dot{W} + p_0 \frac{dV}{d\tau} \quad (20)$$

Exergiebilanz für geschlossene Systeme:

$$\frac{dE_{S_{ys}}}{d\tau} = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j + \left(\dot{W} + p_0 \frac{dV}{d\tau}\right) - \dot{E}_D \quad (21)$$

Exergiebilanz für offene Systeme:

$$\frac{dE_{S_{ys}}}{d\tau} = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j + \left(\dot{W} + p_0 \frac{dV}{d\tau}\right) + \sum_{ein} (\dot{m}e)_{ein} - \sum_{aus} (\dot{m}e)_{aus} - \dot{E}_D \quad (22)$$

## Reale Reinstoffe

Dampfgehalt:

$$x := \frac{m''}{m_{ges}} = \frac{m''}{m'' + m'} \quad \text{mit } ' : \text{ flüssige Phase} \quad \text{und } '' : \text{ dampfförmige Phase} \quad (23)$$

Zustandsgrößen im Nassdampfgebiet:

$$z = z' + x(z'' - z') = (1 - x)z' + xz'' \quad \text{mit } z = v, u, h, s, \dots \quad (24)$$

Kalorische Zustandsgleichungen reiner realer Stoffe:

$$du = c_v(T, p)dT + \left[ T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - p \right] dv \quad (25)$$

$$dh = c_p(T, p)dT + \left[ v - T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right] dp \quad (26)$$

$$ds = \frac{c_p(T, p)}{T} dT - \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dp \quad (27)$$

Thermische Zustandsgleichung für inkompressible Fluide:

$$v = v_{ref} = \text{konst.} \quad (\text{inkompressibel}) \quad (28)$$

Kalorische Zustandsgleichungen für inkompressible Fluide:

$$c_p(T) = c_v(T) = c(T) \quad (\text{inkompressibel}) \quad (29)$$

$$u(T, p) = \int_{T_{ref}}^T c(T)dT + u_{ref} = u(T) \quad (\text{inkompressibel}) \quad (30)$$

$$h(T, p) = \int_{T_{ref}}^T c(T)dT + v_{ref}(p - p_{ref}) + h_{ref} \quad (\text{inkompressibel}) \quad (31)$$

$$s(T, p) = \int_{T_{ref}}^T \frac{c(T)}{T} dT + s_{ref} = s(T) \quad (\text{inkompressibel}) \quad (32)$$

## Mischungen

Massenanteil / Stoffmengenanteil / Partialdruck:

$$\xi_i := \frac{m_i}{m} \quad y_i := \frac{n_i}{n} \quad p_i := y_i p \quad (33)$$

Thermische Zustandsgleichung einer Mischung idealer Gase:

$$pV = n\bar{R}T = mRT \quad (\text{id. Gase}) \quad (34)$$

$$\text{mit } M = \sum_i M_i y_i \quad \text{oder} \quad \frac{1}{M} = \sum_i \frac{\xi_i}{M_i} \quad \text{und} \quad R = \sum_i \xi_i R_i = \bar{R}/M \quad (35)$$

Kalorische Zustandsgrößen einer Mischung idealer Gase:

$$U(T) = \sum_i m_i u_i(T) \quad (\text{id. Gase}) \quad H(T) = \sum_i m_i h_i(T) \quad (\text{id. Gase}) \quad (36)$$

$$S(T, p) = \sum_i m_i s_i(T, p) - \sum_i m_i R_i \ln y_i \quad (\text{id. Gase}) \quad (37)$$

$$= \sum_i n_i \bar{s}_i(T, p) - \bar{R} \sum_i n_i \ln y_i \quad (\text{id. Gase}) \quad (38)$$

Relative Feuchte und Wassergehalt (feuchte Luft):

$$\varphi := \frac{p_{Wd}}{p_{W,s}(T)} \quad x := \frac{m_W}{m_L} \quad x = \frac{M_W}{M_L} \cdot \frac{p_{W,s}(T)}{(p/\varphi) - p_{W,s}(T)} \quad (39)$$

Spezifisches Volumen und spezifische Enthalpie feuchter Luft:

$$v_{1+x} := \frac{V}{m_L} \quad h_{1+x} := \frac{H}{m_L} = h_L + xh_W \quad (40)$$

Stoffwerte für die Berechnung der Enthalpie feuchter Luft:

Wärmekapazität von Luft	$c_{p,L}$	1,004	kJ/(kgK)
Wärmekapazität von Wasser			
– dampfförmig	$c_{p,Wd}$	1,86	kJ/(kgK)
– flüssig	$c_{Wfl}$	4,19	kJ/(kgK)
– fest	$c_{Wf}$	2,05	kJ/(kgK)
Verdampfungsenthalpie von Wasser bei $t = 0 \text{ °C}$	$r_0(0 \text{ °C})$	2500	kJ/kg
Schmelzenthalpie von Wasser bei $t = 0 \text{ °C}$	$r_{f,0}(0 \text{ °C})$	333	kJ/kg

Enthalpie ungesättigter feuchter Luft:

$$h_{1+x} = c_{p,L} \cdot t + x (r_0 + c_{p,Wd} \cdot t) \quad (41)$$

Enthalpie von flüssigem Wasser:

$$h_{Wfl}(t) = c_{Wfl} \cdot t \quad (42)$$

Enthalpie gesättigter feuchter Luft mit flüssigem Wasser:

$$h_{1+x} = c_{p,L} \cdot t + x_s (r_0 + c_{p,Wd} \cdot t) + (x - x_s) c_{Wfl} \cdot t \quad (43)$$

Enthalpie gesättigter feuchter Luft mit festem Wasser:

$$h_{1+x} = c_{p,L} \cdot t + x_s (r_0 + c_{p,Wd} \cdot t) + (x - x_s) (c_{Wf} \cdot t - r_{f,0}) \quad (44)$$

## 1. Aufgabe: Theoriefragen (20 Punkte)

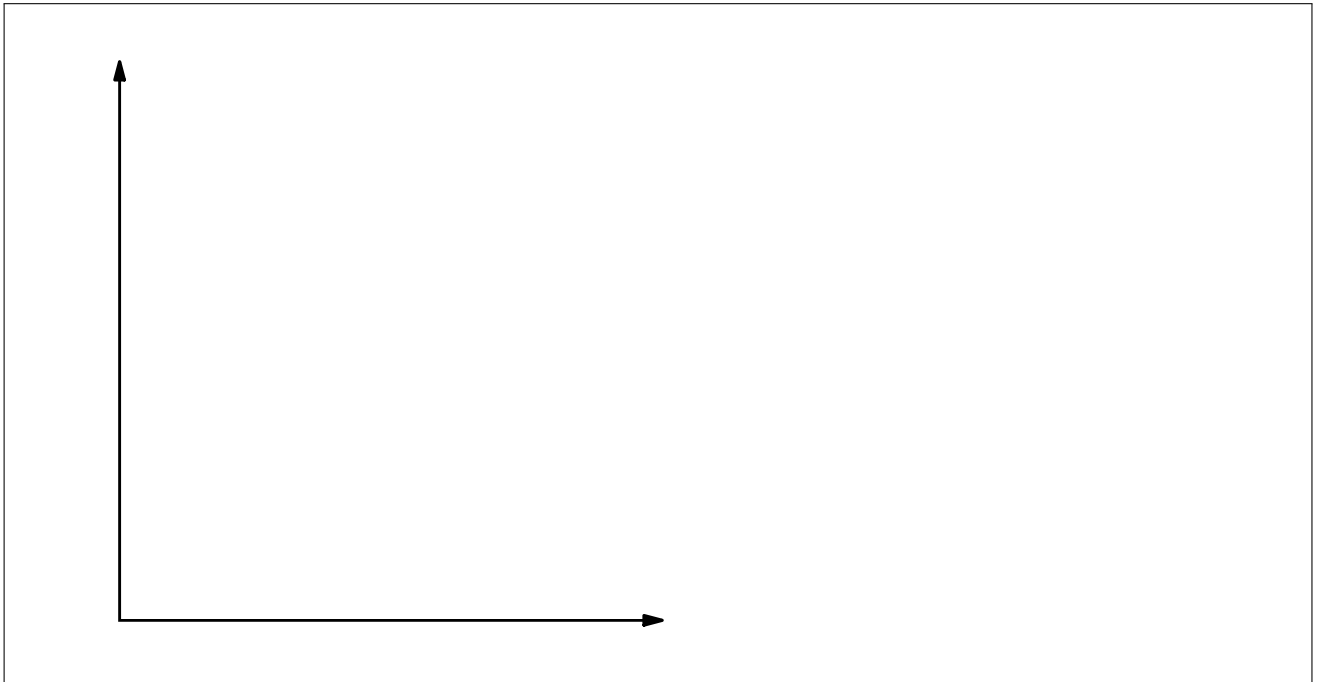
Tragen Sie in die gegebenen Kästen ihre Antworten ein. Sollte der Platz nicht ausreichen, nutzen Sie das Schreibpapier und vermerken dies im Kasten der entsprechenden Aufgabe. Für Diagramme steht jeweils ein Ersatz zu Verfügung.

- a) **(2 Punkte)** Zwei verschiedene Systeme befinden sich im thermischen und mechanischen Gleichgewicht zueinander. Welche Schlussfolgerungen lassen sich aus dieser Aussage ableiten? /2

- b) **(2 Punkt)** Kann die spezifische Enthalpie  $h$  eines Stoffes kleiner als die spezifische innere Energie  $u$  sein? Begründen Sie ihre Antwort mit Hilfe eines geeigneten Zusammenhangs. /2

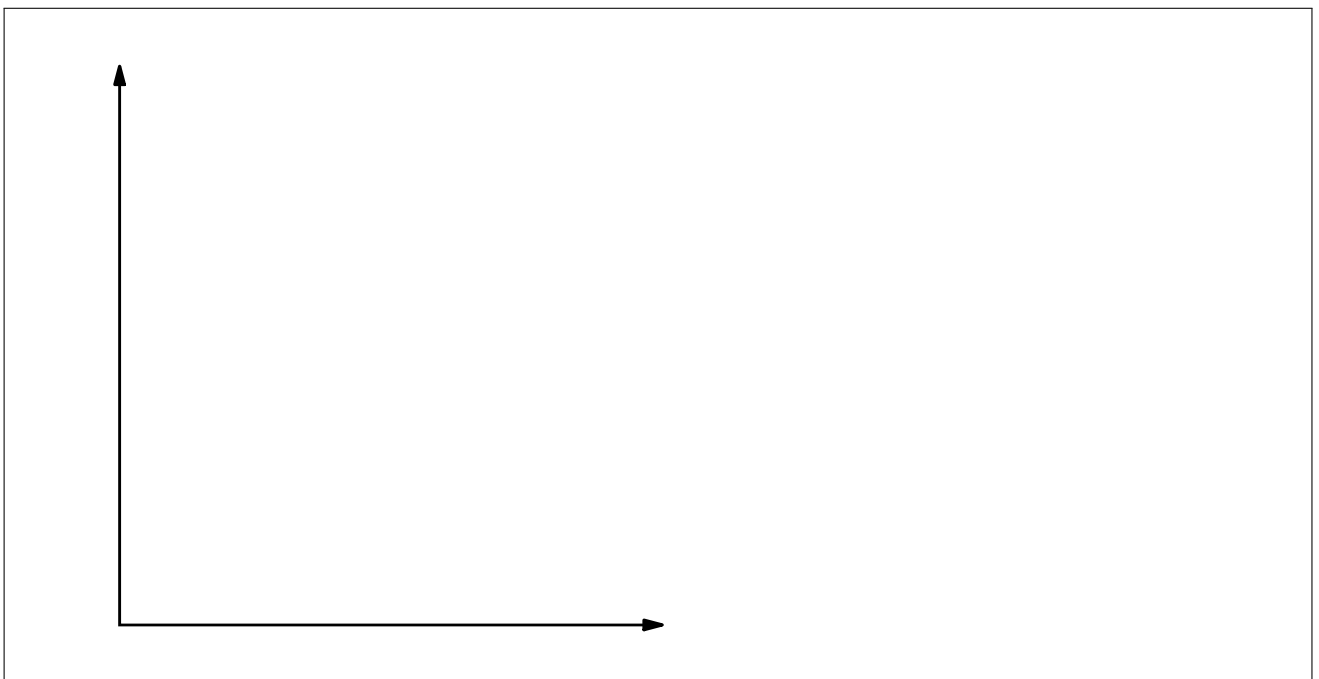
- c) **(2 Punkte)** Definieren Sie die Leistungszahl einer Wärmepumpe, die ohne Wärmeverluste an die Umwelt arbeitet. Die zugeführte Wärme wird dabei aus der Umgebung bezogen. Unter welcher Bedingung kann die Leistungszahl einer Wärmepumpe kleiner als 1 werden? /2

- d) **(2 Punkte)** Stellen Sie den Verlauf einer isochoren Zustandsänderung eines idealen Gases qualitativ in einem  $p, T$ -Diagramm dar. Wie ändert sich der Verlauf, wenn das spezifische Volumen  $v$  größer wird? /2



- e) **(2 Punkte)** Stellen Sie den folgenden Prozess mit einem realen Stoff in einem  $\log p, h$ -Diagramm dar. Um welche allgemeine Prozesscharakteristik (Wärme-  
kraftmaschine/Kältemaschine/Wärmepumpe) handelt es sich? /2

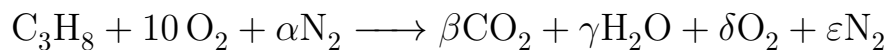
- 1  $\rightarrow$  2 isentrope Verdichtung von gerade gesättigtem Dampf
- 2  $\rightarrow$  3 isobare Wärmeabfuhr
- 3  $\rightarrow$  1 isenthalpe Drosselung



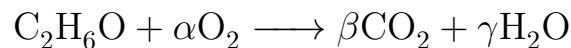


- f) **(3 Punkte)** Unter welcher Bedingung nimmt die physikalische Exergie eines Stoffstroms (ideales Gas mit konstantem  $c_p$ ) bei konstantem Druck und steigender Temperatur ab? Belegen Sie ihre Aussage mit Hilfe eines geeigneten Zusammenhangs oder Diagramms. /3

- g) **(3 Punkte)** Propan ( $C_3H_8$ ) soll mit Luft ( $y_{O_2} = 0,21; y_{N_2} = 0,79$ ) überstöchiometrisch vollständig verbrannt werden. Bestimmen Sie die stöchiometrischen Koeffizienten  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  und  $\varepsilon$ . /3



- h) **(2 Punkte)** Ethanol ( $C_2H_6O$ ) wird mit reinem Sauerstoff ( $O_2$ ) stöchiometrisch vollständig verbrannt. Bestimmen Sie die stöchiometrischen Koeffizienten  $\alpha, \beta, \gamma$  und die Stoffmengenanteile  $y_i$  der Komponenten im Abgas. /2



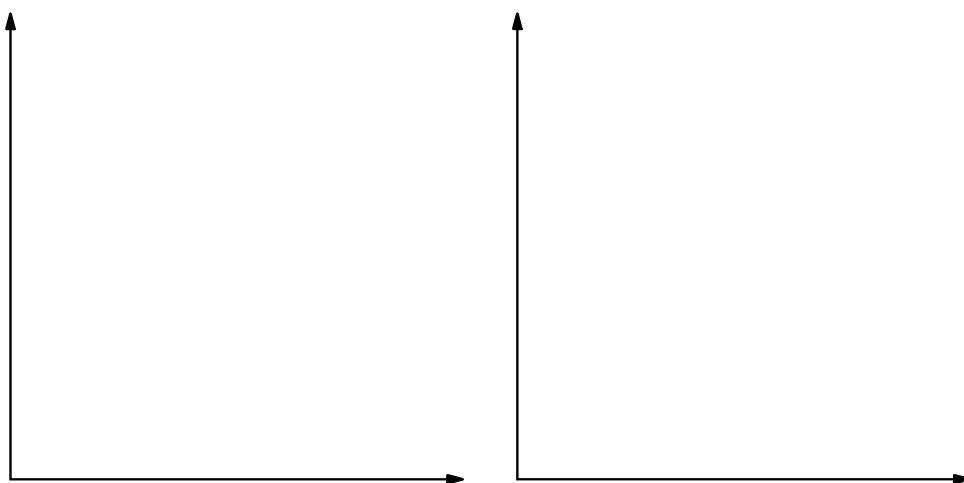
i) (2 Punkt) Zeigen Sie, dass der Wasserdampfpartialdruck  $p_{\text{WD}}$  ungesättigter feuchter Luft eindeutig durch den Wassergehalt  $x$  und den Druck  $p$  bestimmt wird. Nutzen Sie hierzu einen geeigneten Zusammenhang.  /2

---

Gesamtpunktzahl:  /20

---

– Ersatzdiagramme –

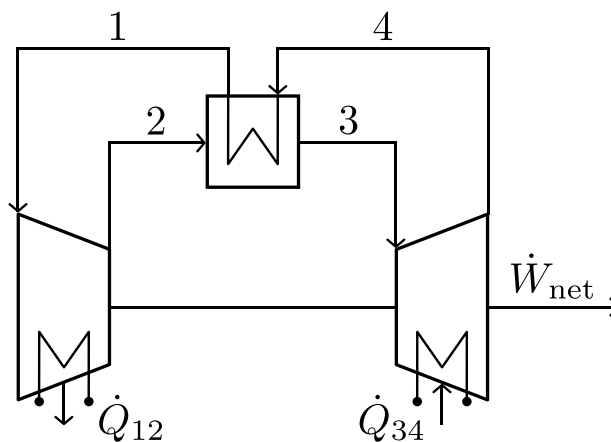


## 2. Aufgabe: Ideales Gas (21 Punkte)

In der Literatur wird ein Kreisprozess mit den folgenden Zustandsänderungen zur Bereitstellung mechanischer Leistung vorgeschlagen:

- 1 → 2: Isotherme Kompression mit  $p_1 \rightarrow p_2$
- 2 → 3: Isobare Wärmezufuhr mit  $T_2 \rightarrow T_3$
- 3 → 4: Isotherme Expansion mit  $p_3 \rightarrow p_4$
- 4 → 1: Isobare Wärmeabfuhr mit  $T_4 \rightarrow T_1$

Das Fließbild des Prozesses ist in der folgenden Abbildung zu sehen. Das Arbeitsmedium ist Luft. Die thermodynamischen Zustandsdaten sind in der untenstehenden Tabelle zu finden.



### Annahmen und Angaben:

Zustand	$T$ [K]	$p$ [bar]
1	298	5,0
2	298	50,0
3	745	50,0
4	745	5,0

$$\dot{m}_{\text{Luft}} = 1 \text{ kg/s}$$

$$c_{p,\text{Luft}} = 1,0 \text{ kJ/kgK}$$

$$\kappa_{\text{Luft}} = 1,4$$

$$M_{\text{Luft}} = 28,96 \text{ kg/kmol}$$

$$\bar{R} = 8314 \text{ J/kmolK}$$

$$\dot{W}_{12} = 196,931 \text{ kW}$$

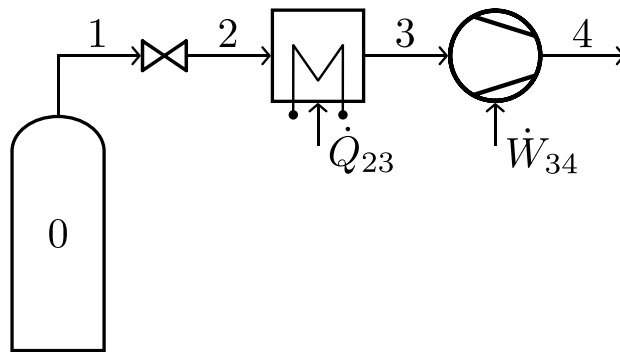
- Das eingesetzte Arbeitsmedium Luft verhält sich wie ein ideales Gas.
- Verdichter und Turbine sind reversibel.
- Alle Prozesskomponenten arbeiten stationär.
- Es treten keine Wärmeverluste an die Umgebung auf.
- Differenzen kinetischer und potentieller Energien können vernachlässigt werden.

## Aufgaben:

- a) **(2 Punkte)** Bestimmen Sie das spezifische Volumen  $v_1$ .
- b) **(4 Punkte)** Stellen Sie den Prozess in einem  $p, v$  und einem  $T, s$ -Diagramm **qualitativ** dar. Nummerieren Sie hierbei die Eckpunkte der Zustandsänderungen.
- c) **(7 Punkte)** Bestimmen Sie die Leistung  $\dot{W}_{34}$  der Turbine. Nutzen Sie hierzu die Definition der technischen Arbeit. Wie groß ist die vom Prozess abgegebene Nettoleistung  $\dot{W}_{\text{net}}$ ?
- d) **(2 Punkte)** Definieren und bestimmen Sie den Wirkungsgrad  $\eta$  des Gesamtprozesses.
- e) **(3 Punkte)** Zeigen Sie, dass der interne Wärmeübertrager reversibel arbeitet.
- f) **(3 Punkte)** Bestimmen Sie den Wirkungsgrad  $\eta_C$  eines Carnot-Prozesses der zwischen den gleichen Temperaturniveaus ( $T_{12}$  und  $T_{34}$ ) arbeitet. Welche Schlussfolgerungen können Sie daraus für den hier vorliegenden Prozess ableiten?

### 3. Aufgabe: Laborgasflasche mit CO<sub>2</sub> (28 Punkte)

In einem Labor wird über eine Gasflasche Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) bereitgestellt. Davon ist zu Anfang eine Masse  $m_{0,A}$  in einer Flasche (Zustand 0) mit dem Volumen  $V_0$  gespeichert. Es wird gesättigter Dampf über ein Drosselventil aus der Flasche abgelassen ( $1 \rightarrow 2$ ). Anschließend wird das CO<sub>2</sub> durch isobare Wärmezufuhr ( $2 \rightarrow 3$ ) zum Schutz des Verdichters überhitzt. Die nachfolgende adiabate Verdichtung ( $3 \rightarrow 4$ ) stellt den gewünschten Zustand ein. Die Tabelle zur Aufgabe 3 enthält Informationen zum Prozess und kann zum Eintragen von Zustandsgrößen genutzt werden. Der Prozess ist im folgenden Fließbild dargestellt:



#### Annahmen und Angaben:

Zustand	$T$ [K]	$p$ [bar]	$h$ [kJ/kg]	$s$ [kJ/kgK]	$x$ [-]
0	293,15				
1			407,87		1
2		10,00			
3	243,15				
4	293,15	20,00	481,32	2,1095	

$$\dot{m}_1 = 0,15 \text{ kg/h}$$

$$m_{0,A} = 30 \text{ kg}$$

$$V_0 = 50 \text{ l}$$

$$T_0 = T_{\dot{Q},23} = 293,15 \text{ K}$$

- Die Temperatur in der Flasche ist über den gesamten Prozess konstant.
- Drosselventil, Wärmeübertrager und Verdichter werden als stationär betrachtet.
- Drosselventil und Verdichter sind adiabat zur Umgebung.
- Differenzen potentieller und kinetischer Energien können vernachlässigt werden.
- Beachten Sie die gegebenen Zustandsdaten für CO<sub>2</sub>.

## Aufgaben:

- a) **(3 Punkte)** Wie groß ist der Dampfmassenanteil  $x_{0,A}$  in der Flasche zu Anfang?
- b) **(3 Punkte)** Bestimmen Sie den Aggregatzustand 2 des  $\text{CO}_2$  nach der Drossel anhand einer geeigneten Kenngröße.
- c) **(8 Punkte)** Zeichnen Sie den Prozess (1-2-3-4) jeweils **qualitativ** in ein  $\log p, h$  und  $h, s$ -Diagramm ein. Kennzeichnen Sie sowohl die Zustandspunkte und Verläufe des Prozesses als auch die Isotherme für die Umgebungstemperatur  $T_0$  in beiden Diagrammen.
- d) **(3 Punkte)** Wie groß ist der zugeführte Wärmestrom  $\dot{Q}_{23}$  um den Zustand 3 zu erreichen?
- e) **(5 Punkte)** Bestimmen Sie die Leistung  $\dot{W}_{34}$  und den isentropen Wirkungsgrad  $\eta_{s,v}$  des Verdichters.
- f) **(3 Punkte)** Wie groß ist die Exergievernichtung  $\dot{E}_{D,\text{tot}}$  des Gesamtprozesses (1-2-3-4)?
- g) **(3 Punkte)** Wie lange dauert es bei kontinuierlicher Entnahme mit  $\dot{m}_1$ , bis der Druck in der Flasche anfängt zu sinken?

– Zustandsdaten CO<sub>2</sub> –

**Temperaturtafel**

$T$ [K]	$p$ [bar]	$h'$ [kJ/kg]	$h''$ [kJ/kg]	$s'$ [kJ/kgK]	$s''$ [kJ/kgK]	$v'$ [m <sup>3</sup> /kg]	$v''$ [m <sup>3</sup> /kg]
223,15	6,82	92,94	432,68	0,5794	2,1018	0,000866	0,055789
233,15	10,04	112,90	435,32	0,6656	2,0485	0,000896	0,038284
243,15	14,28	133,34	436,82	0,7498	1,9980	0,000930	0,026956
253,15	19,70	154,45	436,89	0,8328	1,9485	0,000969	0,019343
263,15	26,49	176,52	435,14	0,9157	1,8985	0,001017	0,014048
273,15	34,85	200,00	430,89	1,0000	1,8453	0,001078	0,010241
283,15	45,02	225,73	422,88	1,0884	1,7847	0,001161	0,007399
293,15	57,29	255,87	407,87	1,1877	1,7062	0,001293	0,005149
303,15	72,14	304,55	365,13	1,3435	1,5433	0,001685	0,002898
304,13	73,77	332,25		1,4336		0,002898	

**Drucktafel**

$p$ [bar]	$T$ [K]	$h'$ [kJ/kg]	$h''$ [kJ/kg]	$s'$ [kJ/kgK]	$s''$ [kJ/kgK]	$v'$ [m <sup>3</sup> /kg]	$v''$ [m <sup>3</sup> /kg]
10,00	233,03	112,66	435,30	0,6646	2,0491	0,000895	0,038453
20,00	253,65	155,52	436,85	0,8369	1,9461	0,000971	0,019033
30,00	267,60	186,75	433,61	0,9529	1,8754	0,001042	0,012207
40,00	278,45	213,27	427,25	1,0461	1,8145	0,001119	0,008640
50,00	287,43	237,87	417,66	1,1289	1,7544	0,001209	0,006383
60,00	295,13	262,85	403,32	1,2102	1,6862	0,001331	0,004742
70,00	301,83	293,88	376,91	1,3093	1,5844	0,001567	0,003289
73,77	304,13	332,25		1,4336		0,002139	

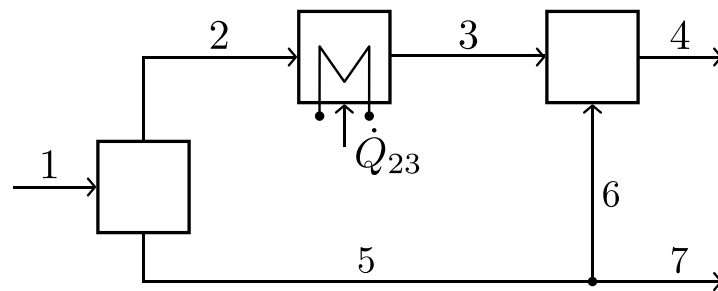
**Andere Zustände**

Zustand	$T$ [K]	$p$ [bar]	$h$ [kJ/kg]	$s$ [kJ/kgK]	$v$ [m <sup>3</sup> /kg]
überhitzter Dampf	233,15	10,00	435,42	2,0497	0,038485
überhitzter Dampf	243,15	10,00	445,50	2,0920	0,041012
überhitzter Dampf	253,15	10,00	455,21	2,1312	0,043418
überhitzter Dampf	283,15	20,00	470,84	2,0731	0,023257
überhitzter Dampf	293,15	20,00	481,32	2,1095	0,024526
überhitzter Dampf	303,15	20,00	491,57	2,1438	0,025748

## 4. Aufgabe: Feuchte Luft (11 Punkte)

Mit Hilfe des nachfolgenden Prozesses soll ein Umluftstrom für die Klimatisierung eines Gebäudes bereitgestellt werden. Dazu wird das flüssige Wasser (5) vollständig aus dem übersättigten Feuchtluftstrom (1) isotherm abgetrennt. Dieser enthält den Trockenluftstrom  $\dot{m}_{L,1}$ . Anschließend wird der Feuchtluftstrom durch Wärmezufuhr vom Zustand (2) in den Zustand (3) überführt. Um anschließend eine angenehme Luftfeuchte ( $\varphi_4$ ) zu erreichen, wird ein Teil des flüssigen Wassers wieder in den Feuchtluftstrom (3) eingespritzt.

Der Gesamtprozess ist in folgender Abbildung dargestellt:



### Annahmen und Angaben:

Zustand	$t$ [°C]	$x$ [-]	$\varphi$ [-]	$h_{1+x}$ [kJ/kg]
1		0,02	–	43
2			1,00	
3	35			
4			0,60	

$$M_{\text{Luft}} = 28,96 \text{ kg/kmol}$$

$$M_{\text{W}} = 18,01 \text{ kg/kmol}$$

$$\bar{R} = 8314 \text{ J/kmolK}$$

$$\dot{m}_{L,1} = 1,5 \text{ kg/s}$$

- Der Druck ist im gesamten Prozess konstant mit  $p = 100 \text{ kPa}$ .
- Der Prozess ist ein stationärer Fließprozess.
- Es treten keine Wärmeverluste an die Umgebung auf.
- Differenzen kinetischer und potentieller Energien können vernachlässigt werden.
- Luft und Wasserdampf können jeweils als ideale Gase betrachtet werden.

### Hinweise:

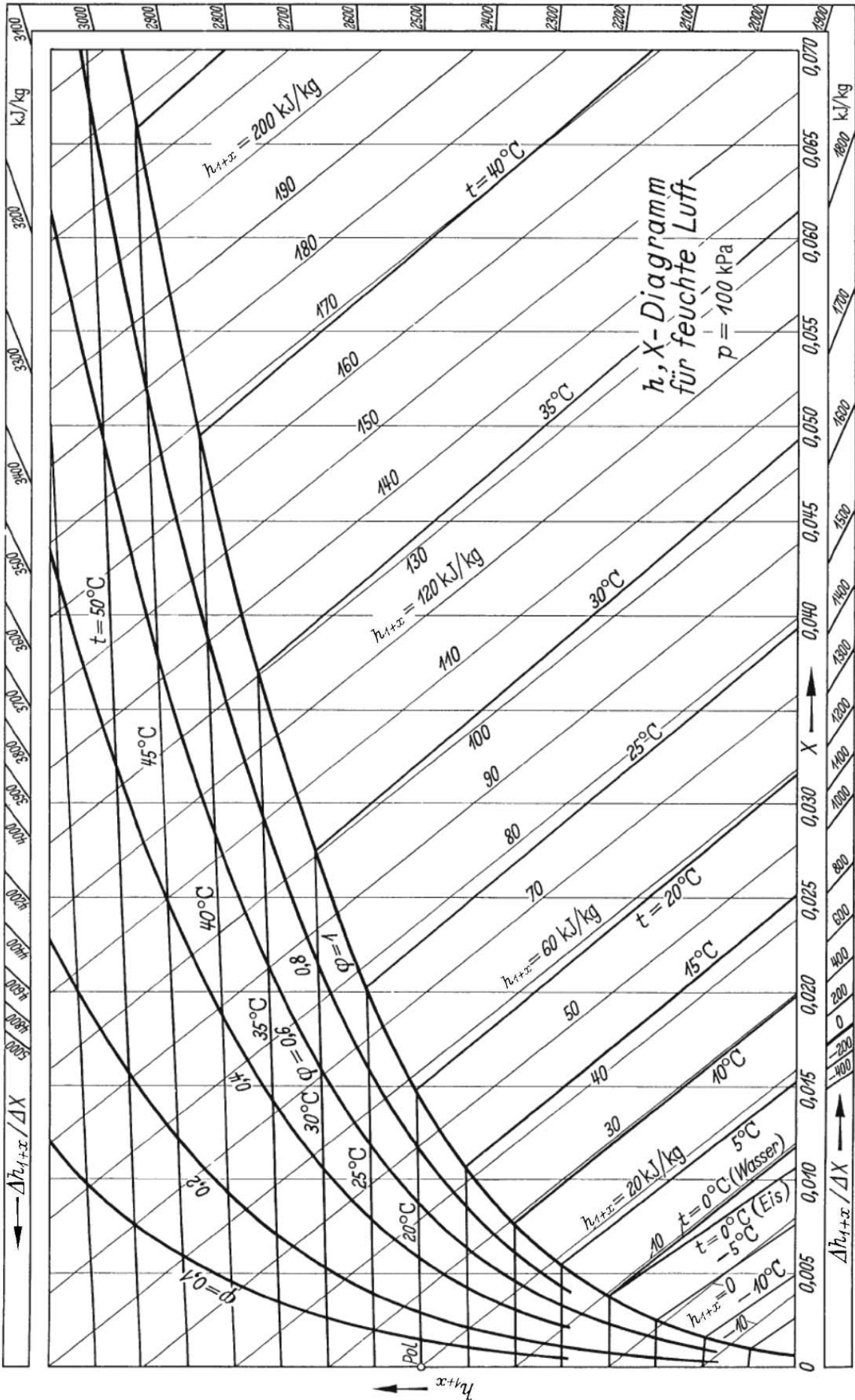
- Nutzen Sie das Mollier  $h_{1+x}, x$ -Diagramm. Nutzen Sie eventuell auch die kalorischen Zustandsgleichungen für feuchte Luft.

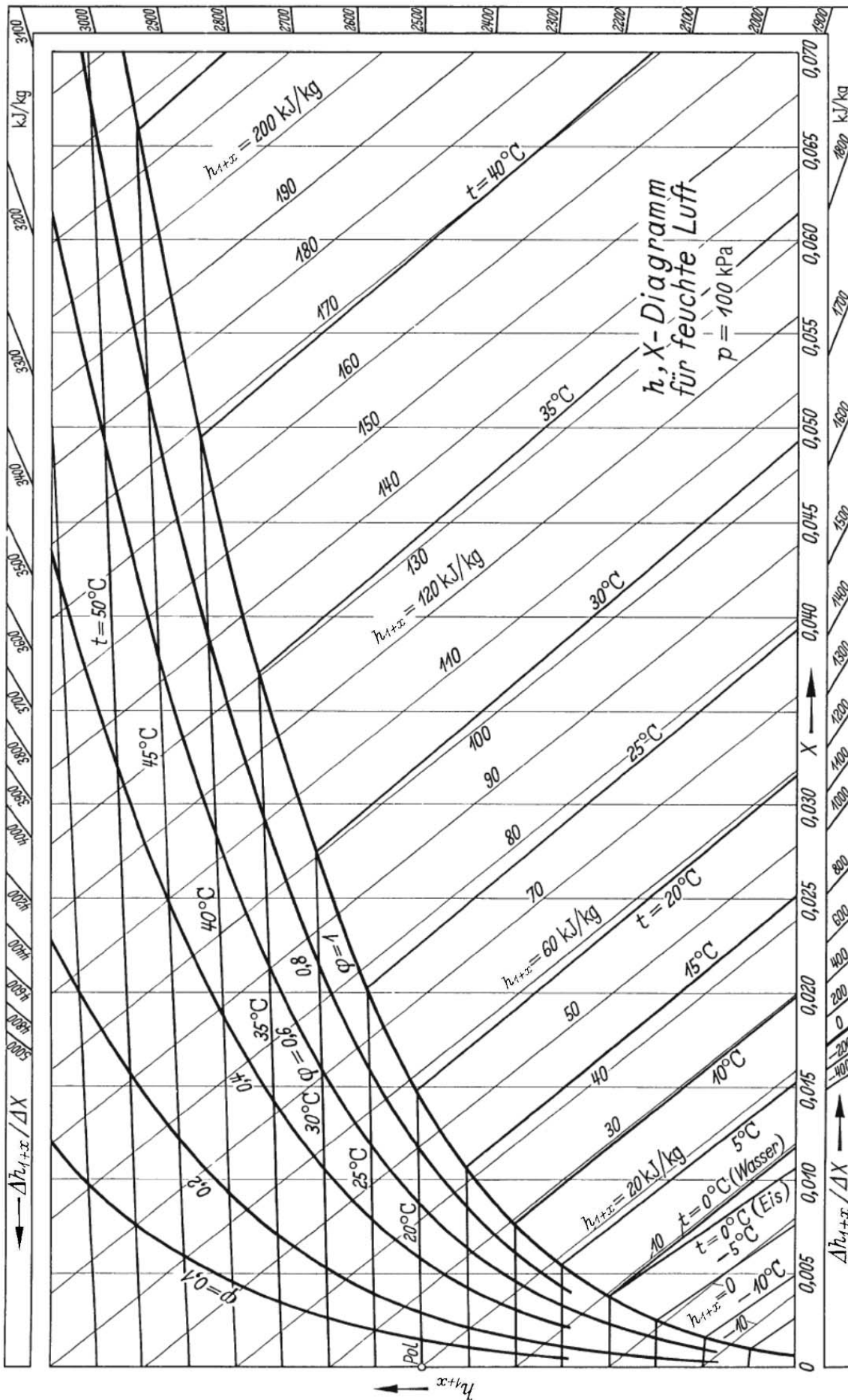


## Aufgaben:

- a) **(1 Punkt)** Bestimmen Sie die Temperatur  $t_1$  im Zustand 1. Zeichnen Sie dazu den Zustandspunkt in das beiliegende  $h_{1+x}, x$ -Diagramm ein.
- b) **(3 Punkte)** Welche Temperaturen haben jeweils die feuchte Luft  $t_2$  und das abgeschiedene Wasser  $t_5$ ? Kennzeichnen Sie den Zustandspunkt 2 im Diagramm. Wie groß ist die spezifische Enthalpie  $h_5$  des Wassers?
- c) **(2 Punkte)** Bestimmen Sie den zugeführten Wärmestrom  $\dot{Q}_{23}$ . Kennzeichnen Sie den Punkt 3 im Diagramm.
- d) **(2 Punkte)** Wie groß sind Temperatur  $t_4$  und Wassergehalt  $x_4$  der feuchten Luft im Zustand 4? Wo befindet sich dieser Punkt im Diagramm?
- e) **(3 Punkte)** Wie groß ist der Massenstrom  $\dot{m}_{W,7}$  an Wasser, das im Gesamtprozess abgeschieden wird?

$h_{1+x}, x$ -Diagramm für feuchte Luft bei  $p = 100 \text{ kPa}$





– Auf dieser Seite steht kein Aufgabentext –

– Auf dieser Seite steht kein Aufgabentext –

– Auf dieser Seite steht kein Aufgabentext –