

Klausur im Fach
„Thermodynamik I“, SS 2011
am 08.08.2011

Aufgabe 1	Aufgabe 2	Aufgabe 3	Aufgabe 4	Gesamt

Name:

Matrikelnummer:

Studiengang:

Bachelor

Diplom, modularisiert

Diplom, nicht-modularisiert

1. Der Klausurumfang beträgt inklusive diesem Deckblatt, Formelsammlung und Diagramm 3 Blätter (6 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 sie vom Arbeitsplatz.**
8. Mit Bleistiften oder in roter Farbe angefertigte Texte und Grafiken werden nicht gewertet.
9. Geben Sie die von Ihnen beschriebenen Blätter einschließlich der Aufgaben- und „Schmier“-blätter sofort nach der Klausur ab, später abgegebene Blätter werden nicht berücksichtigt.
10. Die Zahlenwerte in den Quereinstiegen entsprechen nicht den exakten Ergebnissen.
11. Es können (fast) alle Teilaufgaben unabhängig voneinander gelöst werden.
12. Treffen Sie gegebenenfalls plausible Annahmen, um auch ohne Zwischenergebnisse weiterrechnen zu können.

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:

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

Volumenänderungsarbeit und Arbeit in Fließprozessen:

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

Eigenschaften idealer Gase

Thermische Zustandsgleichung idealer Gase:

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

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:

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

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

Polytrope Zustandsänderung / Polytropenexponent:

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

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:

$$v = v_0 = \text{konst.} \quad (\text{inkompressibel}). \quad (28)$$

Kalorische Zustandsgleichungen für inkompressible Fluide:

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

$$u(T, p) = \int_{T_0}^T c(T) dT + u_0 = u(T) \quad (\text{inkompressibel}) \quad (30)$$

$$h(T, p) = \int_{T_0}^T c(T) dT + v_0(p - p_0) + h_0 \quad (\text{inkompressibel}) \quad (31)$$

$$s(T, p) = \int_{T_0}^T \frac{c(T)}{T} dT + s_0 = s(T) \quad (\text{inkompressibel}) \quad (32)$$

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:

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

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

Relative Feuchte und Wassergehalt (feuchte Luft):

$$\varphi := \frac{p_{Wd}}{p_{W,s}(T)} \quad x := \frac{m_W}{m_L} \quad x = \frac{M_W}{M_L} \cdot \frac{p_{W,s}(T)}{(p/\varphi) - p_{W,s}(T)} \quad (38)$$

Spezifisches Volumen und spezifische Enthalpie feuchter Luft:

$$v_{1+x} := \frac{V}{m_L} \quad h_{1+x} := \frac{H}{m_L} = h_L + xh_W \quad (39)$$

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 $t = 0^\circ C$	$r_0(0^\circ C)$	2500	kJ/kg
Schmelzenthalpie von Wasser bei $t = 0^\circ C$	$r_{f,0}(0^\circ C)$	333	kJ/kg

Enthalpie ungesättigter feuchter Luft:

$$h_{1+x} = c_{p,L} \cdot t + x(r_0 + c_{p,Wd} \cdot t) \quad (40)$$

Enthalpie von flüssigem Wasser:

$$h_{Wfl}(t) = c_{Wfl} \cdot t \quad (41)$$

Enthalpie gesättigter feuchter Luft mit flüssigem Wasser:

$$h_{1+x} = c_{p,L} \cdot t + x_s(r_0 + c_{p,Wd} \cdot t) + (x - x_s)c_{Wfl} \cdot t \quad (42)$$

Enthalpie gesättigter feuchter Luft mit festem Wasser:

$$h_{1+x} = c_{p,L} \cdot t + x_s(r_0 + c_{p,Wd} \cdot t) + (x - x_s)(c_{Wf} \cdot t - r_{f,0}) \quad (43)$$

Wasserdampf tabel

Sättigungszustand (siedende Flüssigkeit und gesättigter Dampf)

Wasser, Sättigungszustand, Drucktabel

p <i>bar</i>	t $^\circ C$	T <i>K</i>	v' $\frac{m^3}{kg}$	v'' $\frac{m^3}{kg}$	h' $\frac{kJ}{kg}$	h'' $\frac{kJ}{kg}$	s' $\frac{kJ}{kgK}$	s'' $\frac{kJ}{kgK}$
0,010	6,976	280,126	0,0010001	129,2	29,35	2513,4	0,1061	8,9734
0,030	24,098	297,248	0,0010026	45,68	100,97	2544,7	0,3543	8,5754
0,050	32,9	306,05	0,0010052	28,2	137,71	2560,7	0,4761	8,3930
0,075	40,32	313,47	0,0010079	19,25	168,67	2574,1	0,5760	8,2493
0,10	45,84	318,99	0,0010102	14,68	191,71	2583,9	0,6489	8,1480
0,15	54	327,15	0,0010141	10,03	225,82	2598,3	0,7545	8,0061
0,20	60,09	333,24	0,0010173	7,652	251,28	2608,9	0,8316	7,9060
0,4	75,89	349,04	0,0010266	3,994	317,46	2635,7	1,0255	7,6667
0,6	85,95	359,1	0,0010334	2,732	359,73	2652,2	1,1449	7,5280
1,0	99,63	372,78	0,0010436	1,694	417,33	2673,8	1,3022	7,3544

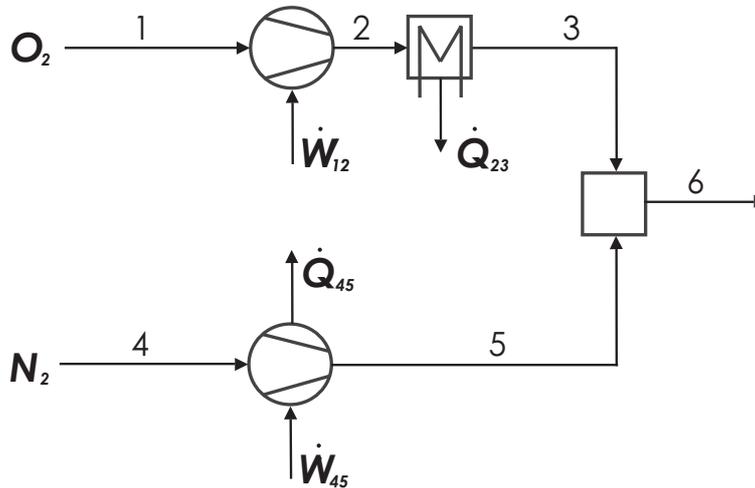
1. Aufgabe: Theoretische Fragen (20 Punkte)

Hinweis: Bei falschen oder fehlenden Begründungen (dort, wo es explizit gefordert ist) gibt es auch für richtige Antworten keine Punkte!

- a) (3 Punkte) Ordnen Sie folgenden Größen die Eigenschaften intensive Zustandsgröße, extensive Zustandsgröße und Prozessgröße zu: T , S_{gen} , \dot{V} , v , \dot{Q} und w .
- b) (4 Punkte) Ein Wärmepumpenprozess besteht aus folgenden Zustandsänderungen:
- 1 \rightarrow 2 : adiabate Drosselung trocken gesättigten Dampfes, so dass Zustand 2 auf der Taulinie liegt ($x_1 = x_2 = 1$)
 - 2 \rightarrow 3 : adiabate und reversible Kompression
 - 3 \rightarrow 1 : isobare Wärmeabfuhr
- Skizzieren Sie den Prozess in einem log p,h-Diagramm mit Nassdampfgebiet. Wie groß ist die Leistungszahl des Wärmepumpenprozesses?
- c) (2 Punkte) Wie groß ist der maximale Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine, wenn die Wärmezufuhr durch kondensierenden Sattdampf bei 0,6 bar erfolgt und Kühlwasser bei 15°C zur Verfügung steht?
- d) (2 Punkte) Einem Stoffstrom wird in einem Wärmeübertrager isobar Wärme zugeführt. Ist die physikalische Exergie des Stoffstroms am Austritt des Wärmeübertragers immer größer als am Eintritt? Begründen Sie Ihre Antwort.
- e) (3 Punkte) I) Wie ist der Realgasfaktor Z definiert (Formel)? II) Wie groß ist Z für ein ideales Gas? III) Weshalb kann dampfförmiges Wasser in feuchter Luft als ideales Gas betrachtet werden?
- f) (1 Punkte) Zeigen Sie ausgehend von $h = u(T) + pv$, dass die spezifische Enthalpie eines idealen Gases unabhängig vom Druck ist.
- g) (1 Punkt) Ein ideales Gas ($c_p = 1 \text{ kJ/kg}$, $M = 28,84 \text{ g/mol}$) wird in einer *adiabaten* Düse *reversibel* beschleunigt. Dabei sinkt der Druck von 2 bar auf 1 bar und die Temperatur von 25°C auf -29°C. Wie groß ist die spezifische Exergievernichtung e_D ?
- h) (2 Punkte) Bestimmen Sie die fehlenden stöchiometrischen Koeffizienten a , b , c und d folgender Reaktion: $2 \text{ CH}_4\text{O} + 1 \text{ H}_2\text{S} + a \text{ O}_2 \rightarrow b \text{ CO}_2 + c \text{ H}_2\text{O} + d \text{ SO}_2$
- i) (2 Punkte) Stimmen Sie folgender Aussage zu: "Die Entropie eines adiabaten geschlossenen Systems kann niemals abnehmen."? Begründen Sie Ihre Antwort.

2. Aufgabe: Atemluft (21 Punkte)

Im Tauchsport wird mit Sauerstoff angereicherte Druckluft benötigt. Hierzu wird in der im Fließbild dargestellten Anlage reiner Sauerstoff (O_2) *adiabat* und *reversibel* auf 100 bar komprimiert und anschließend *isobar* auf $25^\circ C$ abgekühlt. Reiner Stickstoff (N_2) wird *isotherm* und *reversibel* auf den gleichen Druck von 100 bar komprimiert und anschließend mit dem Sauerstoff *adiabat* gemischt.



Annahmen und Angaben:

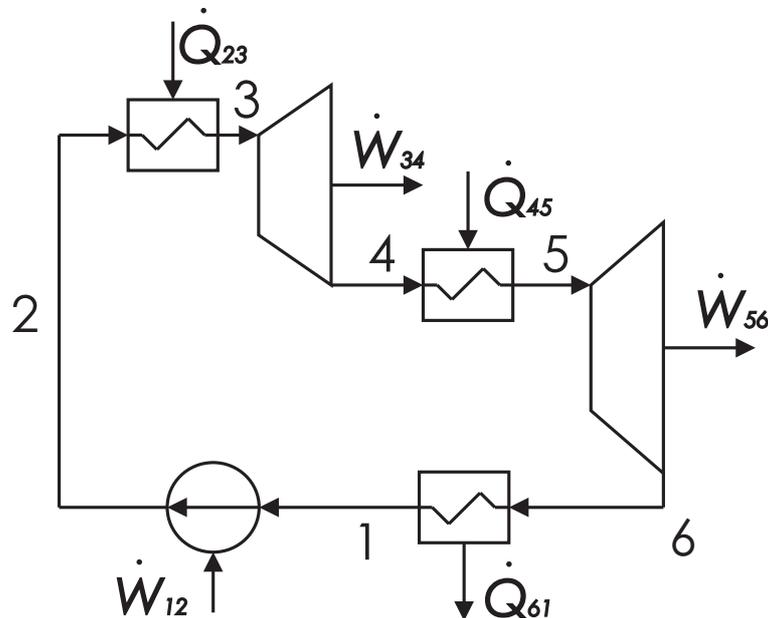
- Es handelt sich um einen stationären Fließprozess.
- Differenzen potentieller und kinetischer Energien können vernachlässigt werden.
- Sauerstoff (O_2) und Stickstoff (N_2) sind ideale Gase mit $M_{O_2} = 32 \text{ g/mol}$, $c_{pO_2} = 0,92 \text{ kJ/(kgK)}$ und $M_{N_2} = 28 \text{ g/mol}$, $c_{pN_2} = 1,04 \text{ kJ/(kgK)}$ und $\kappa = 1,4$.
- $t_1 = t_4 = 25^\circ C$, $p_1 = p_4 = 1 \text{ bar}$, $t_3 = 25^\circ C$, $p_3 = p_5 = p_6 = 100 \text{ bar}$
- $\dot{m}_1 = 10 \text{ g/s}$, $\dot{m}_4 = 16 \text{ g/s}$, $t_0 = 25^\circ C$

Aufgaben:

- (7 Punkte)** Bestimmen Sie die Temperatur T_2 , die Leistung des Sauerstoffkompressors \dot{W}_{12} und den Wärmestrom \dot{Q}_{23} .
- (5 Punkte)** Berechnen Sie die Leistung des Stickstoffkompressors \dot{W}_{45} und den Wärmestrom \dot{Q}_{45} .
- (4 Punkte)** Wie groß ist der Stoffmengenanteil von Sauerstoff y_{O_2} und von Stickstoff y_{N_2} in der Atemluft (Strom 6)?
Hinweis: Nehmen Sie ggf. an, dass die Stoffmengenanteile gleich groß sind.
- (5 Punkte)** Berechnen Sie die auf Grund der Mischung von Strom 3 und Strom 5 auftretende Entropieerzeugung \dot{S}_{gen} und Exergievernichtung \dot{E}_D .

3. Aufgabe: Dampfkraftwerk (25 Punkte)

Ein Dampfkraftwerk mit Zwischenüberhitzung hat die im Fließbild beschriebene Komponentenverschaltung und wird im *stationären* Zustand mit den in der Tabelle aufgeführten Prozessparametern betrieben.



Zustand	$t[^\circ C]$	$p[bar]$	$h[\frac{kJ}{kg}]$	$s[\frac{kJ}{kg K}]$	$x[-]$
1		0,1	191,7		0
2	46,47	200	211,9		-
3			3539		-
4	350	35	3105	6,66	-
5		35	3679	7,436	-
6					0,95

Annahmen und Angaben:

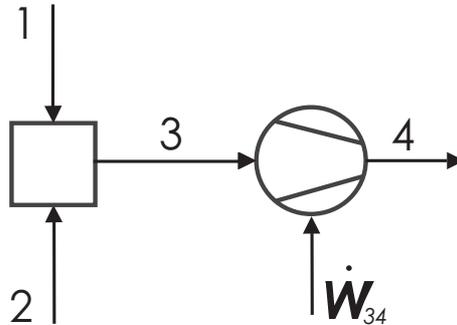
- $v_0 = 0,001 m^3/kg$, $c_w = 4,7 kJ/(kg K)$
- $t_0 = 20^\circ C$
- Die Pumpe arbeitet adiabatisch und reversibel, die Turbinen *nur* adiabatisch.
- In den Wärmeübertragern treten keine Druckverluste auf.
- Differenzen potentieller und kinetischer Energien können vernachlässigt werden.

Aufgaben:

- a) **(7 Punkte)** Vervollständigen Sie die Tabelle mit den fehlenden Werten für Temperatur, Druck, Enthalpie und Entropie. **Hinweis:** Nutzen Sie das h,s -Diagramm und die Wasserdampf tabel.
- b) **(5 Punkte)** Skizzieren Sie den Prozess in einem T,s -Diagramm mit Naßdampfgebiet und nummerieren Sie alle Zustände. Kennzeichnen Sie zusätzlich jede Wärmezufuhr als Fläche im Diagramm.
- c) **(2 Punkte)** Bestimmen Sie die spezifische Arbeit w_{12} der Speisewasserpumpe.
- d) **(3 Punkte)** Bestimmen Sie nun $w_{12,\text{ink}}$ unter der Annahme, dass sich Wasser bei der *isentropen Verdichtung* von $0,1 \text{ bar}$ auf 200 bar wie ein inkompressibles Fluid verhält.
- e) **(3 Punkte)** Bestimmen Sie den isentropen Wirkungsgrad $\eta_{s,T}$ der Hochdruckturbine (Zustandsänderung $3 \rightarrow 4$).
- f) **(3 Punkte)** Berechnen Sie den mit der Abgabe des Wärmestroms \dot{Q}_{61} verbundenen spezifischen Exergietransport $e_{q,61}$.
- g) **(2 Punkte)** Formulieren Sie die Gleichung zur Bestimmung des energetischen Wirkungsgrades der hier beschriebenen Wärmekraftmaschine unter Verwendung der im Fließbild aufgeführten Prozessgrößen.

4. Aufgabe: Feuchte Luft (14 Punkte)

Zwei Massenströme feuchter Luft (\dot{m}_1 und \dot{m}_2) werden *adiabat* und *isobar* bei einem Druck von $p_1 = p_2 = 1 \text{ bar}$ gemischt, wodurch sich Zustand 3 ergibt. Ausgehend von Zustand 3 wird der Massenstrom ($\dot{m}_{L,3} = 10 \text{ kg/s}$) *adiabat* auf p_4 verdichtet, wobei die Temperatur auf t_4 steigt.



Annahmen und Angaben:

- Luft und Wasserdampf können als ideale Gase betrachtet werden.
- Es handelt sich um einen stationären Fließprozess.
- Differenzen potentieller und kinetischer Energien können vernachlässigt werden.
- $t_1 = 35^\circ\text{C}$, $\varphi_1 = 1$
- $x_2 = 0,02$
- $t_3 = 45^\circ\text{C}$, $x_3 = 0,025$, $\dot{m}_{L,3} = 10 \text{ kg/s}$
- $p_4 = 1,5 \text{ bar}$, $t_4 = 90^\circ\text{C}$

Hinweis: Verwenden Sie das h_{1+x}, x -Diagramm für feuchte Luft.

Aufgaben:

- (3 Punkte)** Zeichnen Sie die Zustandspunkte 1, 2, 3 in das beiliegende h_{1+x}, x -Diagramm und bestimmen Sie x_1 , t_2 und φ_3 .
Hinweis: Rechnen Sie ggf. mit $\varphi_3 = 0,5$ weiter.
- (4 Punkte)** Bestimmen Sie den Massenstrom der *feuchten Luft* im Zustand 3 (\dot{m}_3) und die Massenströme der *trockenen Luft* im Zustand 1 und 2 ($\dot{m}_{L,1}$ und $\dot{m}_{L,2}$).
- (3 Punkte)** Wie groß ist der Partialdruck des Wasserdampfs p_{Wd} in Zustand 3?
- (4 Punkte)** Bestimmen Sie die Leistung \dot{W}_{34} des Verdichters. Die feuchte Luft bleibt bei der Verdichtung ungesättigt ($\varphi_4 < 1$).

h_{1+x}, x - Diagramm für feuchte Luft

