



Klausur im Fach
„Thermodynamik I“, SS 08
am 30.09.2008

Aufgabe 1	Aufgabe 2	Aufgabe 3	Aufgabe 4	Gesamt

Name:

Matrikelnummer:

Studiengang:

1. Der Klausurumfang beträgt inklusive Deckblatt und Formelsammlung 4 Blätter (8 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 (Für Studierende des Maschinenbaus nach alten Prüfungsordnungen gelten gesonderte Regeln).
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:

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

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

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:

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

Exergiebilanz für offene Systeme:

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

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			
- dampförmig	$c_{p,Wd}$	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:

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

Wärmeübertragung

Eindimensionale Wärmeleitung (Fourier-Gesetz):

$$\dot{q} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial r} \quad \dot{Q} = \dot{q}A \quad (44)$$

Wärmeübergang (eindimensional):

$$\dot{q} = \alpha (t_W - t_F) \quad (\text{W:Wand, F:Fluid}) \quad (45)$$

Dimensionslose Kennzahlen:

$$Re = \frac{wL}{\nu} = \frac{wL\rho}{\eta} \quad Nu = \frac{\alpha L}{\lambda} \quad Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\eta c_p}{\lambda} \quad Pe = Re \cdot Pr \quad (46)$$

Wärmedurchgang:

$$\dot{Q} = kA\Delta t \quad \text{mit} \quad \frac{1}{kA} = \sum_i \frac{1}{\alpha_i A_i} + \sum_j \frac{\delta_j}{\lambda_j A_j} \quad (47)$$

Stoffwerte

Tabelle 1: Daten ausgewählter Stoffe im Referenzzustand ($T_{ref} = 298,15\text{ K}$, $p_{ref} = 1,0\text{ bar}$)

Stoff ^a	$\bar{c}_{p,ref}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kmol}\cdot\text{K}}$	\bar{h}_{ref} $\frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}$	\bar{s}_{ref} $\frac{\text{kJ}}{\text{kmol}\cdot\text{K}}$	\bar{g}_{ref} $\frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}$
C (s)	8,53	0	5,740	-1711
N ₂	29,49	0	191,610	-57128
O ₂	28,92	0	205,146	-61164
H ₂	29,13	0	130,679	-38961
CO ₂	35,91	-393521	213,794	-457264
H ₂ O	31,96	-241856	188,824	-298153
H ₂ O (l)	75,79	-285829	69,948	-306685
CH ₄	35,05	-74872	186,251	-130403

^a Zustand gasförmig, wenn nicht mit *solid* (s) oder *liquid* (l) anders gekennzeichnet.

Wasser, Sättigungszustand, Drucktafel

p bar	t $^{\circ}\text{C}$	T K	v' $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	v'' $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	h' $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	h'' $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	s' $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$	s'' $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$
0,010	6,976	280,126	0,0010001	129,2	29,35	2513,4	0,1061	8,9734
0,017	15,000	288,15	0,0010008	77,96	62,96	2528,1	0,2244	8,7793
0,030	24,098	297,248	0,0010026	45,68	100,97	2544,7	0,3543	8,5754
0,0317	25,000	298,150	0,0010029	43,41	104,74	2546,4	0,3669	8,5561
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
0,8	93,51	366,66	0,0010389	2,087	391,53	2664,3	1,2324	7,4300
1,0	99,63	372,78	0,0010436	1,694	417,33	2673,8	1,3022	7,3544
2,0	120,23	393,38	0,001061	0,8852	504,52	2704,6	1,5295	7,1212
10,0	179,88	453,03	0,0011276	0,1944	762,2	2777,5	2,1370	6,5843

flüssiges Wasser

p bar	t $^{\circ}\text{C}$	T K	Zustand	v $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	h $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	s $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$
1,00	10,00	283,15	flüssig	0,0010003	42,1	0,1511
1,00	20,00	293,15	flüssig	0,0010018	84,0	0,2965
1,00	25,00	298,15	flüssig	0,0010030	104,9	0,3672
1,00	95,00	368,15	flüssig	0,00103962	398,0	1,25017

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) (1 Punkt) Erklären Sie stichpunktartig den Begriff „quasistatische Zustandsänderung“.
- b) (2 Punkte) Handelt es sich beim Realgasfaktor Z um eine für ein reales Gas konstante Größe, kann also für jedes reale Gas jeweils nur ein Realgasfaktor angegeben werden? Begründen Sie Ihre Antwort.
- c) (3 Punkte) Benötigen ideale Prozesse als Arbeitsmedium ein ideales Gas? Geben Sie zusätzlich stichpunktartig an, welche Eigenschaften ein ideales Gas und einen idealen Prozess ausmachen.
- d) (1 Punkt) In einem Fernwärmenetz soll als Arbeitsmedium Wasser bei einer Temperatur von $t = 110^\circ\text{C}$ eingesetzt werden. Wie kann die Forderung nach einem flüssigen Arbeitsmedium erfüllt werden?
- e) (1 Punkt) Was kennzeichnet ein überkritisches Fluid?
- f) (4 Punkte) Die Gibbsche Fundamentalgleichung lautet $Tds = du + pdv = dh - vdp$. Zeigen Sie, wieso die Linie einer isochoren Zustandsänderung eines idealen Gases im T,s -Diagramm steiler verläuft als die einer isobaren Zustandsänderung.
- g) (3 Punkte) An einer durchströmten Rohrleitung treten Wärmeverluste auf. Skizzieren Sie das System mit allen ein- und austretenden Energie- und Entropieströmen und geben Sie den Strömen eindeutige Indizes (gegebenenfalls sind diese zu erläutern).
- h) (3 Punkte) Berechnen Sie die physikalische Exergie e^{PH} eines Wasserstroms bei $t = 95^\circ\text{C}$ und $p = 1\text{ bar}$, wenn die Umgebung $t_0 = 25^\circ\text{C}$ und $p_0 = 1\text{ bar}$ aufweist.
- i) (2 Punkte) Vereinfacht können die Stoffmengenanteile von Stickstoff und Sauerstoff in Luft mit $y_{N_2} = 0,79$ und $y_{O_2} = 0,21$ angegeben werden. Berechnen Sie die Massenanteile ($M_{\text{Luft}} = 28,84\text{ kg/kmol}$).

2. Aufgabe: Speicher (19 Punkte)

Ein mit Wasser gefülltes geschlossenes und wärmeisoliertes System wird als Energiespeicher verwendet. Dem System wird mechanische Leistung über eine Welle in Höhe von $\dot{W}_{\text{Welle}} = 1000 \text{ W}$ zugeführt und das Wasser dabei von t_1 auf t_2 erwärmt.

Annahmen und Angaben:

- $m_{\text{Wasser}} = 100 \text{ kg}$
- $t_0 = 20^\circ\text{C}$, $p_0 = 1 \text{ bar}$, $t_1 = 105^\circ\text{C}$, $x_1 = 1$, $p_2 = 2 \text{ bar}$
- Bei dem Arbeitsmedium handelt es sich um einen realen Stoff.
- Die Wände des Behälters sind starr.

Aufgaben:

- a) (4 Punkte) Skizzieren Sie die Zustandsänderung in einem p,v - und in einem T,s -Diagramm.
- b) (1 Punkt) Wie groß ist t_2 ?

Hinweis: Rechnen Sie ggf. mit $t_2 = 200^\circ\text{C}$ weiter.

- c) (5 Punkte) Wie lange dauert es, bis Zustand 2 erreicht wird?
- d) (4 Punkte) Wieviel Nutzarbeit $W_{\text{Nutz,max}}$ könnte maximal aus dem Energiespeicher gewonnen werden? Die Aufgabe vereinfacht sich durch die Verwendung der Exergie deutlich

Hinweis: Rechnen Sie ggf. mit $W_{\text{Nutz,max}} = 10^4 \text{ MJ}$ weiter.

- e) (2 Punkte) Wie ließe sich in einem theoretischen Prozess diese maximale Nutzarbeit gewinnen? Welche Annahmen und welche Prozessschritte wären hierfür notwendig?
- f) (3 Punkte) Der Energiespeicher befindet sich nach dem Entladen wieder im Zustand 1 ($E_1^{PH} = 45479 \text{ kJ}$). Geben Sie eine sinnvolle Definition für den exergetischen Wirkungsgrad ε des Energiespeichers an und berechnen Sie diesen.

3. Aufgabe: Drossel (18 Punkte)

In einer Drossel wird der Druck des idealen Gases Luft von $p_1 = 10 \text{ bar}$ ($t_1 = 200^\circ\text{C}$) auf $p_2 = 5 \text{ bar}$ reduziert. Hierbei tritt der Wärmeverlust q_{12} auf.

Annahmen und Angaben:

- Luft ist ein ideales Gas mit $c_p = 1,0 \text{ kJ}/(\text{kgK})$, $c_v = 0,714 \text{ kJ}/(\text{kgK})$ und $M = 28,84 \text{ kg}/\text{kmol}$
- Stationärer Prozess. Änderungen der kinetischen Energie des Arbeitsmediums sind zu vernachlässigen. Potenzielle Energien ändern sich nicht.
- $q_{12} = -100 \text{ kJ}/\text{kg}$, $t_0 = 20^\circ\text{C}$

Aufgaben:

a) (2 Punkte) Berechnen Sie die Temperatur t_2 nach der Drosselung.

Hinweis: Rechnen Sie ggf. mit $t_2 = 50^\circ\text{C}$ weiter.

b) (3 Punkte) Ändert sich die Strömungsgeschwindigkeit c in der Realität tatsächlich nicht? Geben Sie an, wie Sie die Geschwindigkeit c_2 berechnen würden und vereinfachen Sie die Gleichung so weit wie möglich (*Hinweis: Sie sollen keinen Zahlenwert für c_2 ausrechnen. Gehen Sie davon aus, dass c_1 bekannt ist*).

c) (4 Punkte) Für die Berechnung der Entropieerzeugung s_{gen} während des Durchströmens der Drossel können zwei verschiedene Systemgrenzen gewählt werden:

- **Systemgrenze I** in „unendlicher“ Entfernung von der Drossel.
- **Systemgrenze II** direkt an den Wänden der Drossel.

Diskutieren Sie stichpunktartig den Vorteil der von Ihnen gewählten Systemgrenze und berechnen Sie die Entropieerzeugung s_{gen} .

Hinweis: Rechnen Sie ggf. mit $s_{gen} = 1 \text{ kJ}/(\text{kgK})$ weiter.

d) (2 Punkte) Berechnen Sie die spezifische Exergievernichtung $e_{D,12}$ im System.

e) (2 Punkte) Ist die Entropieerzeugung in den beiden Systemen aus Aufgabenteil c) identisch? Begründen Sie Ihre Aussage.

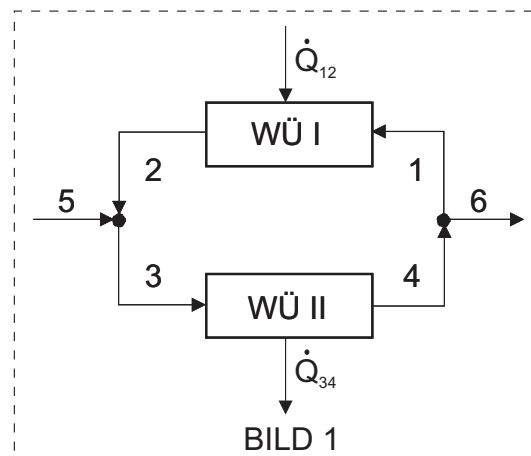
f) (2 Punkte) Skizzieren Sie den Prozess in einem h,s - und in einem p,v -Diagramm.

g) (3 Punkte) Ließe sich der Zustand 2 (p_2 und t_2 aus Aufgabenteil a) theoretisch auch in einem einzigen, nun aber **adiabaten** Prozessschritt erreichen? Wieviel Arbeit könnte bei diesem Alternativprozess gegebenenfalls gewonnen werden?

Achtung: Auf der folgenden Seite befindet sich eine weitere Aufgabe!

4. Aufgabe: Wäschetrockner (23 Punkte)

Ein Kondenswäschetrockner funktioniert vereinfacht nach dem im Bild 1 dargestellten Prinzip: Feuchte Luft wird im Wärmeübertrager WÜ I ausgehend vom Zustand 1 auf $t_2 = 55^\circ\text{C}$ erwärmt. Die Luft wird durch die feuchte Wäsche geleitet und nimmt dabei reines Wasser vom Zustand 5 auf, bis sie im Zustand 3 gesättigt ($\varphi_3 = 1$) vorliegt. Anschließend wird thermische Energie \dot{Q}_{34} an die Umgebung abgeführt (Temperaturdifferenz ΔT im Wärmeübertrager WÜ II beachten!), so dass die Temperatur t_4 erreicht wird. Im Prozessschritt von 4 nach 1 wird das auskondensierte Wasser entzogen (Strom 6, reines Wasser).



Annahmen und Angaben:

- Luft ist ein ideales Gas, $M_{\text{Luft}} = 28,84 \text{ kg/kmol}$
- Stationärer Fließprozess. Änderungen der kinetischen und potenziellen Energien sind zu vernachlässigen. Es treten keine Druckverluste auf, der Druck beträgt überall $p = 1 \text{ bar}$.
- Strom 5 ist flüssiges Wasser bei $t_5 = 47^\circ\text{C}$. $t_1 = 35^\circ\text{C}$, $\varphi_1 = 1$, $t_{\text{Umgebung}} = 20^\circ\text{C}$
- Für die Wärmeübertragung wird eine Temperaturdifferenz von $\Delta T = 15 \text{ K}$ benötigt.
- $\dot{Q}_{12} = 3 \text{ kW}$
- Die gegebenen Zahlenwerte sind an die Aufgabe angepasst und entsprechen nicht den in der Realität auftretenden Zahlenwerten.

Aufgaben:

- a) (1 Punkt) Wie hoch ist die Temperatur t_4 .
- b) (5 Punkte) Tragen Sie alle Zustandspunkte des Prozesses in das beiliegende h_{1+x}, x -Diagramm ein.

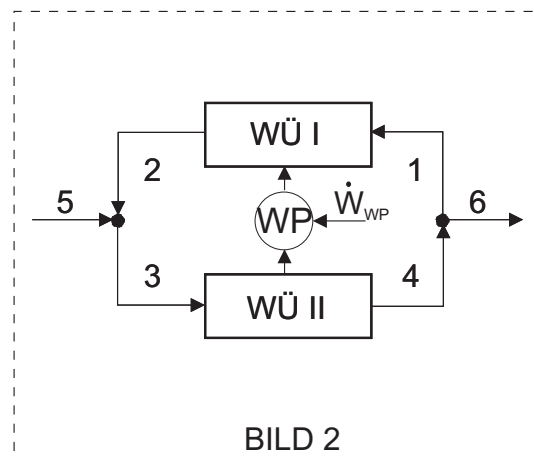
c) (4 Punkte) Wie groß ist der Massenstrom der trockenen Luft \dot{m}_L im Prozess?

Hinweis: Rechnen Sie ggf. mit $\dot{m}_L = 10 \text{ kg/s}$ weiter.

d) (4 Punkte) Wieviel Wasser wird dem Prozess mit dem Strom 5 zugeführt und wieviel Wasser wird ihm mit dem Strom 6 entzogen?

e) (2 Punkte) Wieviel thermische Leistung \dot{Q}_{34} wird aus dem Prozess abgeführt?

Im bisher analysierten Prozess wurde die thermische Energie \dot{Q}_{12} durch eine elektrische Widerstandsheizung bereitgestellt. Könnte die Verwendung einer Wärmepumpe (siehe Bild 2) helfen, die benötigte elektrische Leistung \dot{W}_{el} zu verringern? Beantworten Sie hierfür die nachfolgenden Fragen.



f) (3 Punkte) Die thermodynamischen Mitteltemperaturen der Stoffströme 1 und 2 sowie 2 und 3 betragen $t_{m,12} = 45^\circ\text{C}$ und $t_{m,34} = 36^\circ\text{C}$. Bestimmen sie die maximale Leistungszahl einer Wärmepumpe $LZ_{WP,max}$, die diese Ströme als Wärmereservoir nutzt (berücksichtigen Sie hierbei die Temperaturdifferenzen, die zur Wärmeübertragung an das Arbeitsmedium der Wärmepumpe notwendig sind!).

Hinweis: Rechnen Sie ggf. mit $LZ_{WP,max} = 2$ weiter.

g) (2 Punkte) Wieviel elektrische Leistung müsste diese ideale Wärmepumpe aufnehmen, um die thermische Leistung \dot{Q}_{12} bereitzustellen?

h) (2 Punkte) Ein realer Wärmepumpenprozess benötigt doppelt so viel elektrische Energie wie der ideale Prozess aus Aufgabenteil g), um die gleiche thermische Energie \dot{Q}_{12} bereitzustellen. Wieviel elektrische Leistung $\dot{W}_{el,WP}$ müsste der Wäschetrockner in diesem Fall also aufnehmen? Beurteilen Sie diesen Prozess aus thermodynamischer Sicht im Vergleich zum Prozess ohne Wärmepumpe.