



Klausur im Fach  
„Thermodynamik I“, SS 08  
am 01.08.2008

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			
- 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:

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

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

<sup>a</sup> Zustand gasförmig, wenn nicht mit *solid* (s) oder *liquid* (l) anders gekennzeichnet.

Tabelle 2: Parameter bei  $298,15\text{ K} < T \leq T_{max}$  und  $p_{ref} = 1,0\text{ bar}$

$$\bar{c}_p(T, p_{ref}) = a + by + cy^{-2} + dy^2$$

$$\bar{h}(T, p_{ref}) = 10^3 \left( H^+ + ay + \frac{b}{2}y^2 - cy^{-1} + \frac{d}{3}y^3 \right)$$

mit  $y = T/10^3$ , in den Einheiten [kJ/kmol] und [kJ/(kmol·K)]

Stoff <sup>a</sup>	$H^+$	$S^+$	$a$	$b$	$c$	$d$
C (s)	-2,101	-6,540	0,109	38,940	-0,146	-17,385
N <sub>2</sub>	-7,069	51,539	24,229	10,521	0,180	-2,315
O <sub>2</sub>	-9,589	36,116	29,154	6,477	-0,184	-1,017
H <sub>2</sub>	-7,823	-22,966	26,882	3,586	0,105	0,000
CO <sub>2</sub>	-413,886	-87,078	51,128	4,368	-1,469	0,000
H <sub>2</sub> O	-253,871	-11,750	34,376	7,841	-0,423	0,000
H <sub>2</sub> O (l)	-289,932	-67,147	20,355	109,198	2,033	0,000
CH <sub>4</sub>	-81,242	96,731	11,933	77,647	0,142	-18,414

<sup>a</sup> Zustand gasförmig, wenn nicht mit *solid* (s) oder *liquid* (l) anders gekennzeichnet.

Wasser, Sättigungszustand, Drucktafel

$p$ <i>bar</i>	$t$ $^{\circ}\text{C}$	$T$ <i>K</i>	$v'$ $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	$v''$ $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	$h'$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$h''$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$s'$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$	$s''$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$
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

$p$ <i>bar</i>	$t$ $^{\circ}\text{C}$	$T$ <i>K</i>	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

In der Klausur stand an dieser Stelle ein  $h_{1+x}, x$ -Diagramm.

# 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) **(2 Punkte)** Nennen Sie ein Beispiel, anhand dessen Sie die Auswirkungen des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik im täglichen Leben bemerken. Erklären Sie die Auswirkungen kurz.
- b) **(2 Punkte)** Was gibt der Term  $p_0 \frac{dV}{d\tau}$  in der Exergiebilanzgleichung an? Erläutern Sie Ihre Antwort anhand einer Skizze.
- c) **(2 Punkte)** Flüssigem Wasser wird thermische Energie zugeführt. Verdampft das Wasser dabei immer? Begründen Sie Ihre Antwort.
- d) **(3 Punkte)** Welchen Wert nimmt die physikalische Exergie  $e^{PH}$  von Wasser bei  $p = 10 \text{ bar}$  und  $t = 300^\circ\text{C}$  an, wenn  $t_0 = 20^\circ\text{C}$  und  $p_0 = 1 \text{ bar}$  gilt.
- e) **(2 Punkte)** Skizzieren Sie die Zustandsänderungen einer Wärmekraftmaschine, die nach dem Carnot-Prinzip (Arbeitsmedium: ideales Gas) arbeitet, in einem  $h,s$ -Diagramm. Nummerieren Sie die Eckpunkte.
- f) **(4 Punkte)** Zeichnen Sie das Prozessfließbild eines einfachen Kältemaschinenprozesses (Arbeitsmedium: reales Kältemittel) und skizzieren Sie die Zustandsänderungen in einem  $\log p,h$ -Diagramm. Nummerieren Sie die Ströme im Fließbild und die Eckpunkte im Diagramm.
- g) **(1 Punkt)** Warum muss die Leistungszahl einer Wärmepumpe immer größer als eins sein?
- h) **(1 Punkt)** Wodurch unterscheiden sich der Brennwert und der Heizwert von Brennstoffen?
- i) **(3 Punkte)** Skizzieren Sie das Temperaturprofil, welches sich bei der stationären Wärmeübertragung durch eine ebene Wand einstellt. Berücksichtigen Sie auch den Wärmeübergang

## 2. Aufgabe: Gasturbine (18 Punkte)

Die betrachtete Gasturbine besteht aus einem Kompressor, einem Wärmeübertrager und einem Expander. Nach der Verdichtung von Luft des Zustands 1 auf den Zustand 2 wird dem Arbeitsmedium isobar Wärme bis zum Zustand 3 zugeführt. Die Expansion erfolgt auf den Umgebungsdruck im Zustand 4.

### Annahmen und Angaben:

- Luft ist ein ideales Gas mit  $c_p = 1,0 \text{ kJ}/(\text{kgK})$ ,  $c_v = 0,714 \text{ kJ}/(\text{kgK})$ ,  $M = 28,84 \text{ kg}/\text{kmol}$
- Kompressor und Turbine arbeiten adiabat mit jeweils einem isentropen Wirkungsgrad von  $\eta_s = 0,9$ .
- $p_1 = p_4 = 1 \text{ bar}$ ,  $p_2 = 10 \text{ bar}$ ,  $T_3 = 1300 \text{ K}$ ,  $T_4 = 736 \text{ K}$
- $\dot{m}_1 = 10 \text{ kg}/\text{s}$ ,  $t_1 = t_0 = 20^\circ\text{C}$
- Änderungen der kinetischen und potenziellen Energien sind zu vernachlässigen, es handelt sich um einen stationären Fließprozess.

### Aufgaben:

- a) **(2 Punkte)** Skizzieren Sie den beschriebenen Prozess mit allen notwendigen Hilfslinien in einem  $T,s$ -Diagramm und nummerieren Sie die Eckpunkte.
- b) **(6 Punkte)** Berechnen Sie die Temperatur  $T_2$ .

*Hinweis: Rechnen Sie gegebenenfalls mit  $T_2 = 500 \text{ K}$  weiter.*

- c) **(3 Punkte)** Berechnen Sie die von der Gasturbine netto abgegebene Leistung  $\dot{W}_{\text{GT}}$ .

*Hinweis: Rechnen Sie gegebenenfalls mit  $\dot{W}_{\text{netto}} = -1 \text{ MW}$  weiter.*

- d) **(3 Punkte)** Berechnen Sie den energetischen Wirkungsgrad  $\eta_{\text{GT}}$  der gesamten Gasturbine.
- e) **(4 Punkte)** Berechnen Sie den exergetischen Wirkungsgrad  $\varepsilon_{\text{Kompressor}}$  des Kompressors.

### 3. Aufgabe: Verbrennung (25 Punkte)

In einer Brennkammer wird Methan ( $CH_4$ ) mit Luft ( $y_{O_2} = 0,21$ ,  $y_{N_2} = 0,79$ ) verbrannt. Die Verbrennung erfolgt in einem stationären Fließprozess isobar bei einem Druck von  $p = 1$  bar.

#### Annahmen und Angaben:

- $\dot{V}_{\text{Luft}} = 2360,77 \text{ m}^3/\text{s}$ , Luft wird als ideales Gas betrachtet.
- $\dot{n}_{CH_4} = 1 \text{ kmol/s}$
- $t_{\text{Produkte}} = t_{\text{Edukte}} = 25^\circ\text{C}$  durch Kühlung der Brennkammer.
- Änderungen der kinetischen und potenziellen Energien sind zu vernachlässigen.

#### Aufgaben:

- a) (4 Punkte) Bestimmen Sie die Stoffmengenströme  $\dot{n}_i$  von Sauerstoff und Stickstoff in der Luft. Runden Sie bitte auf die dritte Nachkommastelle.

*Hinweis: Rechnen Sie gegebenenfalls mit  $\dot{n}_{O_2} = 10 \text{ kmol/s}$  weiter.*

- b) (4 Punkte) Bestimmen Sie die Luftzahl  $\lambda$ , die bei der Verbrennung herrscht.
- c) (5 Punkte) Geben Sie die Stoffmengenanteile  $y_i$  der Produkte im Abgas an.

*Hinweis: Nehmen Sie gegebenenfalls an, dass alle Produkte den gleichen Stoffmengenanteil aufweisen.*

- d) (2 Punkte) Geben Sie an, ob Wasser im Abgas auskondensiert oder nicht. Begründen Sie Ihre Antwort.
- e) (5 Punkte) Berechnen Sie den Wärmestrom  $\dot{Q}$ , der der Brennkammer zu- oder aus ihr abgeführt werden muss, damit der Produktstrom eine Temperatur von  $t = 25^\circ\text{C}$  aufweist.
- f) (5 Punkte) Berechnen Sie den Entropiestrom  $\dot{S}_{\text{Luft}}$  der Luft.

## 4. Aufgabe: Feuchte Luft (17 Punkte)

Trockene Luft ( $\dot{m}_1 = 1 \text{ kg/s}$ ) wird mit flüssigem Wasser ( $\dot{m}_2 = 0,025 \text{ kg/s}$ ) gemischt. Es ergibt sich der im Nebelgebiet liegende Zustand 3.

### Annahmen und Angaben:

- Luft ist ein ideales Gas,  $M_{\text{Luft}} = 28,84 \text{ kg/kmol}$
- Die Mischung erfolgt adiabat und isobar bei  $p = 1 \text{ bar}$ . Die Temperatur der Stoffströme 1 und 2 beträgt  $t = 40^\circ\text{C}$ .
- Änderungen der kinetischen und potenziellen Energien sind zu vernachlässigen, es handelt sich um einen stationären Fließprozess. Es wird an keiner Stelle des Prozesses Arbeit verrichtet.

### Aufgaben:

- a) (5 Punkte) Wie hoch ist die Temperatur der Mischung ( $t_3$ )?

*Hinweis: Treffen Sie im weiteren Verlauf der Aufgabe gegebenenfalls plausible Annahmen, um weiterrechnen zu können.*

- b) (3 Punkte) Wie groß sind die Massenströme flüssigen und gasförmigen Wassers in Strom 3?
- c) (3 Punkte) Wie groß ist der Enthalpiestrom  $\dot{H}_3$  der Mischung?
- d) (3 Punkte) Wieviel Wärme  $\dot{Q}_{34}$  müsste dem Strom 3 zugeführt werden, damit das gesamte in ihm enthaltene Wasser gerade gasförmig ist (Zustand 4)?
- e) (3 Punkte) Ließe sich durch die Zumischung von feuchter Luft beliebiger Temperatur und beliebiger relativer Feuchte zum Zustand 4 wieder der Zustand 1 erreichen? Begründen Sie Ihre Antwort und schlagen Sie gegebenenfalls vor, wie sich dieser Zustand stattdessen erreichen ließe.

Auf dieser Seite befindet sich kein Aufgabentext.

Auf dieser Seite befindet sich kein Aufgabentext.