



Klausur im Fach
„Thermodynamik I“, SS 07
am 11.10.2007

Aufgabe 1	Aufgabe 2	Aufgabe 3	Aufgabe 4	Gesamt

Name:

Matrikelnummer:

Studiengang:

1. Der Klausurumfang beträgt inklusive Deckblatt und Formelsammlung 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.

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			
- 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, Temperaturtafel

t °C	T K	p bar	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	273,15	0,0061	0,0010002	206,3	0,00	2500,5	0,0000	9,1545
5	278,15	0,0087	0,0010000	147,1	21,05	2509,7	0,0764	9,0234
10	283,15	0,0123	0,0010002	106,4	42,03	2518,9	0,1511	8,8985
15	288,15	0,0170	0,0010008	77,96	62,96	2528,1	0,2244	8,7793
20	293,15	0,0234	0,0010017	57,84	83,86	2537,3	0,2963	8,6652
25	298,15	0,0317	0,0010029	43,41	104,74	2546,4	0,3669	8,5561
30	303,15	0,0424	0,0010043	32,94	125,61	2555,5	0,4364	8,4516
35	308,15	0,0562	0,0010059	25,26	146,47	2564,5	0,5046	8,3514
40	313,15	0,0737	0,0010078	19,56	167,34	2573,5	0,5718	8,2553
45	318,15	0,0958	0,0010099	15,28	188,22	2582,4	0,6379	8,1631
50	323,15	0,1233	0,0010121	12,05	209,11	2591,3	0,7031	8,0745

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) Was besagt der nullte Hauptsatz der Thermodynamik?
- b) (2 Punkte) Worin besteht der Unterschied zwischen Prozess- und Zustandsgrößen? Nennen Sie zusätzlich jeweils ein Beispiel.
- c) (2 Punkte) Benötigen ideale Prozesse als Arbeitsmedium ein ideales Gas? Begründen Sie Ihre Antwort.
- d) (3 Punkte) Skizzieren Sie einen Kältemaschinenprozess nach dem Carnot-Prinzip (Arbeitsmedium: ideales Gas) in einem p,v -Diagramm. Nummerieren Sie die Eckpunkte.
- e) (3 Punkte) Skizzieren Sie das $\log p,h$ -Diagramm eines realen Stoffes und zeichnen Sie eine isenthalpe und eine isotherme Linie durch den kritischen Punkt in dieses Diagramm ein.
- f) (2 Punkte) Kann die physikalische Exergie eines Stoffstromes negative Zahlenwerte annehmen? Begründen Sie Ihre Antwort kurz ohne die Verwendung von Gleichungen.
- g) (5 Punkte) Skizzieren Sie in je einem h,s -Diagramm die Kompression und die Expansion eines idealen Gases in einem Kompressor/einem Expander. Zeichnen Sie jeweils den idealen und den realen Prozess ein. Die Ein- und Austrittsdrücke seien im idealen und realen Fall identisch.
- h) (2 Punkte) Eine ebene Wand ($A = 1\text{m}^2$) habe folgende Eigenschaften: $\alpha_{\text{außen}} = 25\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, $\lambda = 0,4\text{ W}/(\text{mK})$, $\delta_{\text{Wand}} = 20\text{ cm}$, $\alpha_{\text{innen}} = 10\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Die Außentemperatur betrage $t_{\text{außen}} = 10^\circ\text{C}$, die Innentemperatur $t_{\text{innen}} = 25^\circ\text{C}$. Wie groß ist der Wärmestrom \dot{Q} durch die Wand?

2. Aufgabe: Geschlossenes System (22 Punkte)

Zwei mit Wasser gefüllte Teilsysteme I und II sind durch ein Rohr mit Absperrventil miteinander verbunden. Im Teilsystem I herrscht im Anfangszustand ($m_{A,I} = 10 \text{ kg}$) ein Druck von $p_{A,I} = 0,3 \text{ bar}$ und eine Temperatur von $t_{A,I} = 80^\circ\text{C}$. Im Teilsystem II herrscht im Anfangszustand ($m_{A,II} = 20 \text{ kg}$) ein Druck von $p_{A,II} = 1,0 \text{ bar}$ und eine Temperatur von $t_{A,II} = 150^\circ\text{C}$.

Annahmen und Angaben:

- Nach dem Öffnen des Ventils stellt sich der Endzustand E ($t_E = 90^\circ\text{C}$) ein. Im Anfangs- und Endzustand befindet sich das System im inneren Gleichgewicht.
- Das System sei während der Zustandsänderung $A \rightarrow E$ nicht wärmeisoliert.
- $t_0 = 20^\circ\text{C}$, $p_0 = 1 \text{ bar}$
- Die Volumina der Teilsystem und des Gesamtsystems sind konstant.

Aufgaben:

- a) (7 Punkte) Wie groß sind das spezifische Volumen v_E , der Druck p_E und die Enthalpie h_E im Endzustand? (Hinweis: Bestimmen Sie die Größen in der angegebenen Reihenfolge.)

Hinweis: Rechnen Sie ggf. mit $v_E = 4 \text{ m}^3/\text{kg}$, $p_E = 0,8 \text{ bar}$ und $h_E = 2500 \text{ kJ/kg}$ weiter.

- b) (7 Punkte) Wieviel Wärme Q und/oder Arbeit W muss dem Gesamtsystem während der Zustandsänderung $A \rightarrow E$ zu- oder aus ihm abgeführt werden?

Hinweis: Treffen Sie ggf. eigene Annahmen bezüglich Q und W .

- c) (6 Punkte) Wie groß ist die Entropieerzeugung S_{gen} während dieser Zustandsänderung, wenn ein möglicher Entropietransport aufgrund von Wärmetransport bei der Umgebungstemperatur t_0 stattfindet?

- d) (2 Punkte) Wie groß ist die Exergievernichtung E_D während der Zustandsänderung $A \rightarrow E$?

3. Aufgabe: Feuchte Luft (21 Punkte)

Annahmen und Angaben:

- Ungesättigte Feuchte Luft kann vereinfacht als ideales Gas betrachtet werden.
- $M_{\text{trockene Luft}} = 28,84 \text{ kg/kmol}$
- Es handelt sich um ein geschlossenes System.

Aufgaben:

- (1 Punkt)** Was gibt der Partialdruck (z.B. von Wasserdampf) an?
- (8 Punkte)** Ein System ($V = 10 \text{ m}^3$) ist mit gesättigter feuchter Luft gefüllt ($\varphi_1 = 1$, $p_1 = 1 \text{ bar}$, $t_1 = 25^\circ\text{C}$). Wie groß sind die im System enthaltenen Massen der trockenen Luft und des Wassers?
- (2 Punkte)** Wie ändert sich die relative Feuchte φ qualitativ, wenn isobar das Systemvolumen vergrößert wird?
- (2 Punkte)** Wieviel Arbeit W_{12} müsste dem System zu- oder aus ihm abgeführt werden, wenn das System isobar auf ein Volumen von $V_2 = 20 \text{ m}^3$ vergrößert wird?
- (6 Punkte)** Wieviel Wärme Q_{12} müsste dem System zu- oder aus ihm abgeführt werden, wenn das System isobar auf ein Volumen von $V_2 = 20 \text{ m}^3$ vergrößert wird?
- (2 Punkte)** Skizzieren Sie die Zustandsänderung $1 \rightarrow 2$ in einem h_{1+x}, x -Diagramm.

4. Aufgabe: Verbrennung (17 Punkte)

In einer Brennkammer wird pro Sekunde ein kmol Wasserstoff (H_2) mit Sauerstoff (O_2) verbrannt.

Annahmen und Angaben:

- Es handelt sich um einen stationären Fließprozess mit idealen Gasen.
- Am Brennkammereintritt gilt $t_{H_2} = t_{O_2} = 25^\circ C$, $p_{H_2} = p_{O_2} = 1 \text{ bar}$
- Es treten keine Druckverluste auf.
- Bei adiabater Verbrennung gilt $h_{O_2}(t) = 38,84 \text{ kJ}/(\text{kmol}^\circ C) \cdot t - 8181 \text{ kJ}/\text{kmol}$ und $h_{H_2O}(t) = 53,3 \text{ kJ}/(\text{kmol}^\circ C) \cdot t - 261963 \text{ kJ}/\text{kmol}$.
- Das Oxidationsverhältnis beträgt $\lambda = 5$

Aufgaben:

- a) (**5 Punkte**) Wie groß sind die Stoffmengenströme des Sauerstoffs und der Produkte?
- b) (**6 Punkte**) Wie hoch ist die Temperatur der Produkte t_2 im Falle einer adiabaten Verbrennung?

Nach der Verbrennung wird das Abgas auf die Temperatur $t_3 = 25^\circ C$ abgekühlt.

- c) (**2 Punkte**) Wie groß ist der maximale Dampfdruck des Wassers im Abgas bei t_3 ?
- d) (**3 Punkte**) Wäre der Partialdruck des Wassers nach der Abkühlung im Abgas (Zustand 3) größer oder kleiner als dieser maximale Dampfdruck? Berechnen Sie den Partialdruck unter der Annahme, das gesamte im Abgas enthaltene Wasser sei dampfförmig.
- e) (**1 Punkt**) Geben Sie ausgehend von Aufgabenteil d) an, ob das Wasser im Abgas im Zustand 3 vollständig dampfförmig wäre.

Auf dieser Seite befindet sich kein Aufgabentext