

In diesem Kapitel werden Aufgaben angegeben, die für das zweite Kapitel des Lehrbuchs relevant sind. Die wichtigsten Formeln werden zusammengefasst. Kurzfragen und Rechenaufgaben werden vorgestellt und ausführlich gelöst.

2.1 Die wichtigsten Definitionen und Formeln

Zustandsgröße Eine **Zustandsgröße** Z (z. B. p , T , v , ...), die immer wegunabhängig ist, ist durch die folgende Gleichung definiert

$$\oint dZ = 0 \quad (2.1)$$

Temperaturmessung Historisch werden verschiedene Temperaturskalen eingesetzt. Die gebräuchlichsten Temperaturskalen sind neben der „Celsius Temperaturskala“ die „Fahrenheit Temperaturskala“ und die „Rankine Temperaturskala“. In der Thermodynamik verwendet man hingegen fast ausschließlich die „Kelvin Temperaturskala“. Die Temperaturskalen sind über die folgenden Beziehungen miteinander verknüpft

$$\begin{aligned} t[^\circ\text{F}] &= \frac{9}{5}t[^\circ\text{C}] + 32 \\ t[^\circ\text{Ra}] &= \frac{9}{5}t[^\circ\text{C}] + 491,68 \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$T[\text{K}] - 273,15 \text{ K} = t[^\circ\text{C}] \quad (2.3)$$

Energiearten Neben den aus der Mechanik bekannten Energiearten kinetische und potenzielle Energie ($E_{\text{kin}}, E_{\text{pot}}$) benutzt man in der Thermodynamik die innere Energie U .

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m c^2, \quad E_{\text{pot}} = m g z \quad (2.4)$$

Diese Größen sind **Zustandsgrößen**, sind also wegunabhängig.

Arbeit und Wärme Die Arbeit ist allgemein definiert durch

$$\delta W = \vec{F} \cdot d\vec{s}, \quad W_{12} = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{s} \quad (2.6)$$

Für die Thermodynamik wichtig ist die Volumenänderungsarbeit

$$\delta W_V = -p dV, \quad W_{V,12} = - \int_1^2 p dV \quad (2.7)$$

Alle Arbeiten und Wärmen sind **Prozessgrößen**, also wegababhängig.

Größen und Einheiten

- Jede physikalische Größe besteht aus einem Zahlenwert und einer Einheit (z. B. wird das Volumen V in $[\text{m}^3]$ gemessen)
- Intensive Zustandsgrößen (p, T) ändern sich nicht bei einer Teilung des Systems
- Extensive Zustandsgrößen (V, U, H, S) sind der Systemmasse proportional
- Spezifische Zustandsgröße = Extensive Zustandsgröße/Masse
- Molare Zustandsgröße = Extensive Zustandsgröße/Molmenge
- Zwischen der Masse (m), der Molmasse (M) und der Molmenge (n) besteht der folgende Zusammenhang

$$m = n M \quad (2.11)$$

2.2 Verständnisfragen

Frage 1: Was ist ein System? Welche verschiedenen Arten von Systemen unterscheidet man?

Frage 2: Was unterscheidet eine Zustandsgröße von einer Prozessgröße? Nennen Sie jeweils ein Beispiel für eine Zustandsgröße und eine Prozessgröße!

Frage 3: Betrachten Sie ein halb voll mit Whisky gefülltes Glas! Nun werfen wir einen Eiswürfel in das Glas! Betrachten wir als System den Whisky mit dem Eis! Handelt es sich hierbei um ein homogenes System?

Frage 4: Warum stellen das erste und das zweite Gleichgewichtspostulat die Grundlage der Temperaturmessung dar?

Frage 5: Welche Werte nimmt die Temperatur 20 °C in der Fahrenheit, Rankine und der thermodynamischen Temperaturskala (Kelvin) an?

Frage 6: Was versteht man unter einer quasistatischen Zustandsänderung?

Frage 7: Nennen Sie jeweils zwei Beispiele von extensiven Zustandsgrößen, intensiven Zustandsgrößen und spezifischen Prozessgrößen!

Frage 8: Wie sind die Größen Enthalpie, freie Energie, freie Enthalpie und Entropie definiert?

Frage 9: Wie groß ist die Volumenänderungsarbeit für eine isobare Zustandsänderung ($p = \text{konst.}$), wenn sich das Volumen von V_1 auf V_2 vergrößert?

Frage 10: Wie groß ist die Volumenänderungsarbeit für eine isochore ($V = \text{konst.}$) Zustandsänderung?

Frage 11: Warum ist p keine extensive Zustandsgröße? Warum ist V eine extensive Zustandsgröße?

Frage 12: G sei eine Zustandsgröße mit der Einheit [J]. Welche Einheit haben dann die Größen g , G_m und \dot{G} ?

Frage 13: Wodurch ist ein **adiabates** System gekennzeichnet?

Antworten auf die Verständnisfragen:

Antwort zu Frage 1: Ein System ist in der Thermodynamik ein Gebilde, das man betrachtet. Es ist durch eine Systemgrenze umschlossen. Außerhalb des Systems befindet sich die Umgebung. Man unterscheidet die drei Systemarten:

Offenes System: Austausch von Energie und Masse über die Systemgrenze

Geschlossenes System: Austausch von Energie über die Systemgrenze, keine Masse tritt über die Systemgrenze

Abgeschlossenes System: Weder Masse noch Energie treten über die Systemgrenze

Antwort zu Frage 2: Eine Zustandsgröße ist wegunabhängig und erfüllt Gl. (2.1). Beispiele für Zustandsgrößen sind p , T , V . Eine Prozessgröße hängt vom Weg ab, z. B. die Arbeit W_{12} oder die Wärme Q_{12} .

Antwort zu Frage 3: Es handelt sich um ein heterogenes System, da wir eine flüssige Phase (Whisky) und eine feste Phase (Eiswürfel) haben. Ist der Eiswürfel nach einiger Zeit geschmolzen, so haben wir es wieder mit einem homogenen System zu tun.

Antwort zu Frage 4: Bei der Temperaturmessung will man die Temperatur eines beliebigen Körpers messen. Diesen bringt man mit einem möglichst kleinen Körper (Thermoelement, Thermometer) ins Gleichgewicht. Dann haben beide Körper die gleiche Temperatur. Da man das Messgerät (Thermoelement, Thermometer) vorher mittels eines anderen Körpers (mit dem man es auch ins Gleichgewicht gebracht hat) geeicht hat, kann man so die Temperatur bestimmen.

Antwort zu Frage 5: Nach Gl. (2.2) und (2.3) berechnet man

$$\begin{aligned} t[^\circ\text{F}] &= \frac{9}{5}t[^\circ\text{C}] + 32 & \rightarrow 20[^\circ\text{C}] &= 68[^\circ\text{F}] \\ t[^\circ\text{Ra}] &= \frac{9}{5}t[^\circ\text{C}] + 491,68 & \rightarrow 20[^\circ\text{C}] &= 527,68[^\circ\text{Ra}] \\ T[\text{K}] - 273,15 \text{ K} &= t[^\circ\text{C}] & \rightarrow 20[^\circ\text{C}] &= 293,15[\text{K}] \end{aligned}$$

Antwort zu Frage 6: Hierunter versteht man eine Zustandsänderung, die so langsam abläuft, dass zu jedem Zeitpunkt ein Gleichgewichtszustand herrscht.

Antwort zu Frage 7:

Beispiele extensiver Zustandsgrößen V, U
 Beispiele intensiver Zustandsgrößen p, T
 Beispiele spezifischer Prozessgrößen q_{12}, w_{12}

Antwort zu Frage 8: Diese Größen sind nach Gl. (2.8) wie folgt definiert

$$\begin{aligned} H &= U + pV & \text{Enthalpie} \\ dS &= \frac{\delta Q_{rev}}{T} & \text{Entropie} \\ F &= U - TS & \text{Freie Energie} \\ G &= H - TS & \text{Freie Enthalpie} \end{aligned} \tag{2.8}$$

Antwort zu Frage 9: Für eine isobare Zustandsänderung ist die Volumenänderungsarbeit nach Gl. (2.7) $W_{V,12} = p(V_1 - V_2)$.

Antwort zu Frage 10: Für eine isochore Zustandsänderung ändert sich das Systemvolumen nicht und die Volumenänderungsarbeit ist nach Gl. (2.7) gleich Null.

Antwort zu Frage 11: Teilt man das System, so bleibt der Druck gleich. Er ist also nicht von der Systemgröße abhängig. Das bedeutet, dass p eine intensive Zustandsgröße ist. Das Volumen V ändert sich mit einer Systemteilung und ist deshalb eine extensive Zustandsgröße.

Antwort zu Frage 12:

$$g \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}} \right], \quad G_m \left[\frac{\text{J}}{\text{kmol}} \right] \text{ und } \dot{G} \left[\text{W} = \frac{\text{J}}{\text{s}} \right]$$

Antwort zu Frage 13: Ein adiabates System ist wärmedicht, d. h. es wird keine Energie in Form von Wärme mit der Umgebung ausgetauscht. Es kann aber sowohl Masse als auch Arbeit über die Systemgrenze übertragen werden.

2.3 Rechenaufgaben

Aufgabe 2.1 (X) Ein fahrendes Kraftfahrzeug ist als thermodynamisches System zu betrachten. Zeichnen Sie eine Prinzipskizze mit folgenden Teilen: Fahrgastraum, Motor, Kühler, Einspritzpumpe, Tank, Auspuff, Getriebe, Räder, Lichtmaschine, Batterie, Lampe. Zeichnen Sie für das gesamte Fahrzeug und für die genannten Teile Systemgrenzen, und zwar für offene Systeme (strichlierte Linie) und für geschlossene Systeme (durchgezogene Linie). Kennzeichnen Sie die grenzüberschreitenden Energie- und Stoffströme durch Pfeile!

Lösung: In Abb. 2.1 sind alle Systemgrenzen, Energie- und Stoffströme enthalten.

Aufgabe 2.2 (X) In manchen Ländern werden Temperaturen des täglichen Lebens nicht als Celsius-Temperaturen angegeben, sondern als

- Reaumur-Temperatur (t^R),
- Fahrenheit-Temperatur (t^F) oder
- Rankine-Temperatur (t^{Ra}).

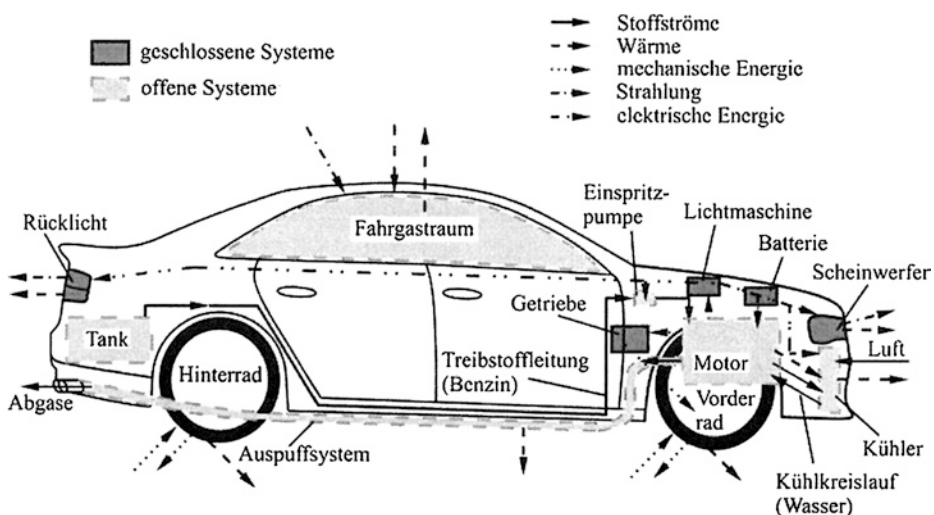


Abb. 2.1 Kraftfahrzeug

Tab. 2.1 Konstanten A, B für die verschiedenen Temperaturskalen

	°R	°F	°Ra
A	80/100	180/100	180/100
B	0	32	491,7

Diese Temperaturen sind durch lineare Beziehungen der Form: $t^x = A t + B$ mit der Celsius-Temperatur t verknüpft. Die Werte der Konstanten sind in der Tab. 2.1 angegeben.

- a) Skizzieren Sie in einem maßstäblichen t^x, t -Diagramm die Funktionen für die Umrechnung von °C in die anderen Temperatureinheiten!
- b) Beschreiben Sie in Worten die verschiedenen Temperaturskalen; verwenden Sie dabei die beiden Fixpunkte der Celsius-Skala (0 und 100 °C). Wie kommt es in der Rankine-Skala zum Zahlenwert $B = 491,7$?
- c) Tragen Sie auch die Funktion der Kelvin-Temperatur in das Diagramm von Teil a) ein! Welche Beziehung besteht zwischen der Kelvin-Temperatur $T = t^K$ und der Rankine-Temperatur t^{Ra} ?

Lösung:

- a) Die Funktionen sind in Abb. 2.2 dargestellt
- b) °C: Bereich zwischen den Fixpunkten 0 und 100 °C unterteilt in 100 Einheiten

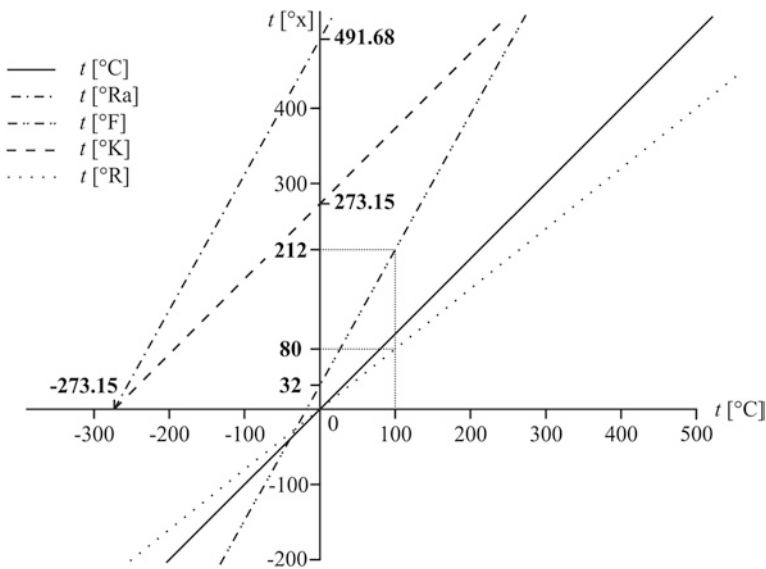


Abb. 2.2 Zusammenhang zwischen den verschiedenen Temperaturskalen

°R: Bereich unterteilt in 80 Einheiten.

°F: Bereich unterteilt in 180 Einheiten. Nullpunkt verschoben, so dass 0 °C dem Wert 32 °F entspricht.

°Ra: Entspricht Fahrenheitunterteilung (identische Steigung), Nullpunkt ist in den absoluten Nullpunkt 0 K bzw. -273,15 °C verschoben.

$$t^{Ra}(-273,15\text{ °C}) \equiv 0$$

$$t^{Ra} = A^{Ra}t + B^{Ra} \rightarrow 0 = \frac{180}{100}(-273,15) + B$$

$$\rightarrow B = -\frac{180}{100}(-273,15) = 491,7$$

$$c) \quad \left. \begin{array}{l} t^{Ra} = A^{Ra}t + B^{Ra} \text{ oder } \frac{t^{Ra} - B^{Ra}}{A^{Ra}} = t \\ t^K = A^Kt + B^K \text{ oder } t^K - B^K = t \end{array} \right\} \rightarrow t^{Ra} = A^{Ra}(t^K - B^K) + B^{Ra}$$

Hier ist $A^K = 1$, da die Steigung der Kelvin-Skala identisch ist mit der Steigung der Celsius-Skala. Hieraus folgt

$$\rightarrow t^{Ra} = A^{Ra}t^K \underbrace{- A^{Ra}B^K + B^{Ra}}_{=0, \text{vgl. b)}} \rightarrow t^{Ra} = A^{Ra}t^K = \frac{180}{100}T$$

Aufgabe 2.3 (XX) Das Messverhalten eines Quecksilberthermometers soll untersucht werden. Die Kapillare hat einen Durchmesser von 0,2 mm. Die Skalenlänge für die Temperaturdifferenz zwischen Siede- und Eispunkt des Wassers soll 20 cm betragen. Für Quecksilber gilt die Beziehung

$$\rho(0)/\rho(t) = 1 + Et + Ft^2 \quad (t \text{ in } ^\circ\text{C})$$

mit folgender Bedeutung der Größen:

$\rho(0)$ = Dichte des Quecksilbers bei 0 °C,

$\rho(t)$ = Dichte des Quecksilbers bei einer Temperatur t im Bereich 0 °C < t < 100 °C,

$$E = 1,8182 \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}, F = 0,78 \cdot 10^{-8} 1/^\circ\text{C}^2$$

Es kann angenommen werden, dass das Volumen des Glaskörpers des Thermometers konstant bleibt.

- Wie groß ist das Quecksilbervolumen bei 0 °C?
- Berechnen Sie in Temperaturschritten von 10 K die Skaleneinteilung zwischen 0 und 100 °C! Es ist davon auszugehen, dass das Thermometer vollständig in den Bereich der zu messenden Temperatur eintaucht.
- Geben Sie an, welcher maximale Fehler sich einstellt, wenn die Skala in gleiche Intervalle eingeteilt wird!

- c) In Teilaufgabe b) zeigte sich der größte Fehler bei $t = 50^\circ\text{C}$. Man kann bei gegebener Höhe die Temperatur bestimmen

$$h(t) = h(100^\circ\text{C}) \frac{Et + Ft^2}{E100 + F100^2} = 1095,29(Et + Ft^2) [\text{cm}]$$

Nach der Temperatur aufgelöst ergibt sich aus der quadratischen Gleichung: $t = 50,107^\circ\text{C}$ als sinnvoller Wert. Dies entspricht einem relativen Fehler von 2,1%.

- d) Betrachtung des Thermometers als zwei geschlossene Systeme: I bis zur 0°C -Markierung, II die Kapillare

$$\text{rel. Fehler} = \frac{h(100^\circ\text{C}) - h^*(100^\circ\text{C})}{h(100^\circ\text{C})} = 1 - \frac{\rho(100^\circ\text{C})}{\rho(20^\circ\text{C})} = 1,44 \cdot 10^{-2}$$

Der relative Messfehler beträgt also ca. 1,44 %.

Aufgabe 2.4 (XX) Der atmosphärische Luftdruck ergibt sich, wie der Schweredruck bei Flüssigkeiten, aus der Gewichtskraft der über dem Erdboden ruhenden Luftsäule. Seine Berechnung kann jedoch nicht nach der bei Flüssigkeiten bekannten Beziehung $p = \rho g z$ (ρ = Dichte, g = Erdbeschleunigung) erfolgen, da die Luft im Vergleich zu Flüssigkeiten eine wesentlich höhere Kompressibilität besitzt. Man kann obige Beziehung aus diesem Grund nur auf eine kleine Höhendifferenz dz anwenden, in der die Dichte ρ näherungsweise als konstant angesehen werden darf. Einer Höhenabnahme $-dz$ entspricht dann einer Druckzunahme

$$dp = -\rho g dz$$

- a) Leiten sie die barometrische Höhenformel für die isotherme Atmosphäre her, d. h. stellen Sie den Druck p als Funktion der Höhe z über dem Meeresspiegel dar! Hinweis: Es seien p und ρ Druck und Dichte in der Höhe z sowie p_0 und ρ_0 Druck und Dichte auf Meeresspiegelhöhe $z = 0$. Für die isotherme Atmosphäre gilt dann die Beziehung

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{p}{p_0}, \quad \frac{p_0}{\rho_0} = RT_0$$

- b) Wie hoch ist der Luftdruck danach in 70 m (Braunschweig), 245 m (Stuttgart), 2962 m (Zugspitze) und 8850 m (Mt. Everest) Höhe über dem Meeresspiegel? Nutzen Sie dabei die Angaben in Tab. 2.2!

Lösung:

a)

$$dp = -\rho g dz = -p \frac{\rho_0}{p_0} g dz \rightarrow \frac{dp}{p} = -\frac{\rho_0}{p_0} g dz$$

$$\int_{p_0}^p \frac{d\tilde{p}}{\tilde{p}} = -\frac{\rho_0}{p_0} g \int_{z_0=0}^z d\tilde{z} \rightarrow \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) = -\frac{\rho_0}{p_0} g z = -\frac{g z}{RT_0}$$

Tab. 2.2 Weitere Angaben

Bezeichnung	numerische Werte	Einheit
Erd- oder Fallbeschleunigung g	9,81	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
Druck in Meereshöhe $p_0(z = 0 \text{ m})$	1013	mbar
Dichte der Luft in Meereshöhe $\rho_0 = \rho_{\text{Luft}}(z = 0 \text{ m}; t = 20^\circ\text{C})$	1,2045	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

$$\frac{p}{p_0} = \frac{\rho}{\rho_0} = \exp\left(-\frac{gz}{RT_0}\right)$$

b) Braunschweig

$$\begin{aligned} p &= p_0 \exp\left(-\frac{gz}{p_0/\rho_0}\right) = \\ &= 1013 \text{ mbar} \cdot \exp\left(-\frac{9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 70 \text{ m}}{1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa} / 1,2045 \text{ kg/m}^3}\right) = 1004,76 \text{ mbar} \end{aligned}$$

Braunschweig: 1004,76 mbar; Stuttgart: 984,46 mbar; Zugspitze: 717,1 mbar und Mt. Everest: 360,81 mbar.

Aufgabe 2.5 (XX) Das Schmelzen von 1 kg Eis erfordert eine Wärmezufuhr von 333,3 kJ. Das Erwärmen von 1 kg Wasser um 1 K erfordert 4180 J, d. h.

$$c_{H_2O} = 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}.$$

Ein 5 kg schwerer Eisblock der Temperatur 0°C habe die Entropie $S = 0 \frac{\text{J}}{\text{K}}$. Er wird durch reversible Wärmezufuhr geschmolzen, ohne dass sich seine Temperatur ändert.

a) Welche Entropie wird dem Eisblock beim Schmelzen zugeführt?

Anschließend wird das Wasser auf 10°C erwärmt, wobei die Wärmezufuhr wiederum reversibel ablaufen soll.

b) Welche Entropie wird dem Wasser dabei insgesamt (beim Schmelzen und Erwärmen) zugeführt?

Lösung:

a) Während des Schmelzvorganges bleibt die Temperatur des Eisblocks konstant bei $T = 273,15 \text{ K}$. Die Entropieänderung berechnet sich zu

$$dS = \frac{\delta Q_{rev}}{T} \rightarrow S_1 - S_0 = \frac{5 \text{ kg} \cdot 333,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{273,15 \text{ K}} = 6,101 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$$

Anmerkung Die Entropieänderung des Eisblocks ist damit auch für den Fall berechnet, dass die Wärmezufuhr nicht reversibel erfolgt (dieser Fall gilt übrigens immer). In diesem Fall erfolgt die Wärmezufuhr bei einer höheren Temperatur als 273,15 K und enthält folglich einen kleineren Entropiestrom. Der Wärmestrom folgt einem Temperaturunterschied und vermehrt dabei die ihm zugeordnete Entropie, die dann schließlich die 6,101 kJ/K erreicht. Die Entropie des geschmolzenen Wassers hängt nicht davon ab, wie der Schmelzvorgang erfolgte, denn die Entropie ist eine Zustands- und keine Prozessgröße.

- b) Die Erwärmung des Wassers ist ein komplizierter Fall der Entropieberechnung, weil sich – anders als beim Phasenwechsel – die Temperatur während der Wärmezufuhr ändert. Es gilt:

$$dS = \frac{\delta Q}{T} = \frac{m c_{H_2O} dT}{T}$$

$$\int_{S_1}^{S_2} dS = \int_{T_1}^{T_2} \frac{m c_{H_2O}}{T} dT = m c_{H_2O} \int_{T_1}^{T_2} \frac{1}{T} dT$$

$$S_2 - S_1 = m c_{H_2O} [\ln T]_{T_1}^{T_2} = m c_{H_2O} [\ln T_2 - \ln T_1]$$

$$S_2 = S_1 + m c_{H_2O} \ln \frac{T_2}{T_1}$$

$$= \Delta S_{\text{Schmelzen+Erwärmen}} = \underbrace{6,101 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}}_{\text{Schmelzen}} + \underbrace{5 \text{ kg} \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot \ln \frac{283,15 \text{ K}}{273,15 \text{ K}}}_{\text{Erwärmen}} = 6,852 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$$

Auch dieses Ergebnis ist unabhängig von der Art der Prozessführung. Die Entropie des erwärmten Wassers hängt nur von den Zustandsgrößen des Wassers ab und nicht davon, wie es zu dieser Situation kam.

Aufgabe 2.6 (X) Zwei Systeme A und B, die beide für sich im thermodynamischen Gleichgewicht sind, werden durch eine dünne Wand verbunden, die einen Stoffaustausch zwischen den Systemen verhindert. Isolierende Wände unterbinden einen Einfluss der Umgebung. In einem Anfangszustand sind die Temperaturen T_A und T_B nicht gleich. Wenn sich ein thermisches Gleichgewicht zwischen A und B eingestellt hat, werden sich die Drücke p_A und p_B geändert haben. Wie lautet dann die Beziehung

$$F(p_A, V_A, p_B, V_B) = 0$$

im Falle eines idealen Gases, wenn eine thermische Zustandsgleichung der Form

$$p_i V_i = C \frac{m_i}{M_i} T_i$$

für jedes Teilsystem ($i = A, B$) angenommen werden kann? Es ist m_i die Masse und M_i die molare Masse des Teilsystems i , C ist eine Konstante, T_i sind absolute Temperaturen.

Das System A soll für eine Temperaturmessung von T_B benutzt werden, zum einen als Gasthermometer (isochor), zum andern als Quecksilberthermometer (isobar). Erläutern Sie die Funktionsweisen der beiden Messanordnungen!

Lösung: Die Beziehung zwischen den Drücken und den Volumina der Systeme A und B im Gleichgewicht ergibt sich zu

$$F(p_A, V_A, p_B, V_B) = p_A V_A \left(\frac{M_A}{m_A} \right) - p_B V_B \left(\frac{M_B}{m_B} \right) = 0$$

System A als Gasthermometer

Messprinzip: $V_A = \text{konst.}$ Gemessen wird der Druck im System A und daraus wird T_B mit Hilfe der thermischen Zustandsgleichung bestimmt.

$$T_A = \underbrace{\left(V_A \frac{M_A}{m_A C} \right)}_{\text{fester Proportionalitätsfaktor bei } V_A = \text{konst.}} \quad p_A \quad \overset{\text{im thermischen Gleichgewicht}}{=} \quad T_B$$

Das heißt, das Gasthermometer misst die Temperatur T_B absolut.

System A als Quecksilberthermometer

Messprinzip: die Temperatur wird aus der Volumenausdehnung bei $p_A = \text{konst.}$ bestimmt. Man kann zeigen, dass gilt

$$(T_2 - T_1) = \frac{1}{\beta} \frac{\overbrace{V_2 - V_1}^{\text{entspricht der Differenz auf der Skala des Hg-Thermometers}}}{V_1}$$

Hieraus erkennt man, dass das Quecksilberthermometer Temperaturdifferenzen misst!

<http://www.springer.com/978-3-662-49700-5>

Thermodynamik kompakt - Formeln und Aufgaben

Weigand, B.; Köhler, J.; von Wolfersdorf, J.

2016, XX, 202 S. 36 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-662-49700-5