

Friedrich Herrmann



Der Karlsruher Physikkurs

Hochschulskripten

Thermodynamik

**Übungsaufgaben
Klausuraufgaben
Diskussionsthemen**

Der Karlsruher Physikkurs

Hochschulschriften

- Mechanik
- **Thermodynamik**
- Elektrodynamik
- Optik

Der Karlsruher Physikkurs

Auflage 2015

Prof. Dr. *Friedrich Herrmann*



Lizenziert unter Creative Commons

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/de/>

Übungsaufgaben

1. Mengenartige Größen und der Aufbau der Physik

1

Das Gas der Masse m im Innern eines Zylinders wird durch gleichmäßiges Herausziehen ($\mathbf{v} = \text{const}$) des Kolbens expandiert. Berechne mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung die Größe $\text{div } \mathbf{j}_m$ für einen beliebigen Punkt im Innern des Zylinders ($\mathbf{j}_m = \text{Massenstromdichte}$).

2

Die Expansion des Weltalls wird beschrieben durch die Hubblekonstante H .

$$H \approx 100 \frac{\text{m}}{\text{s} \cdot \text{kpc}} = 3,3 \cdot 10^{-15} \text{s}^{-1}$$

Berechne mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung die aktuelle mittlere Divergenz der Massendichte des Weltalls.

2. Temperatur und Entropie

1

Durch einen wärmeleitenden Stab fließt ein zeitlich konstanter Entropiestrom von einem Körper hoher Temperatur T_2 zu einem Körper niedriger Temperatur T_1 . Die Körper sind so groß, daß sich ihre Temperatur dabei nicht merklich ändert. Stell die Energie- und die Entropiebilanz auf. Drücke insbesondere den Quotienten $I_S \text{ erzeugt} / I_{S2}$ durch die beiden Temperaturen T_1 und T_2 aus. ($I_{S2} = \text{Stärke des Entropiestroms, der Körper 2 verläßt, } I_S \text{ erz} = \text{Stärke des Stroms der erzeugten Entropie.}$)



2

Der Heizdraht eines in Wasser getauchten 700 W-Tauchsieders hat eine Temperatur von 727 °C.

a) Wieviel Entropie wird pro Sekunde erzeugt,

- wenn die Temperatur des Wassers gerade 77 °C beträgt?
- wenn das Wasser siedet?

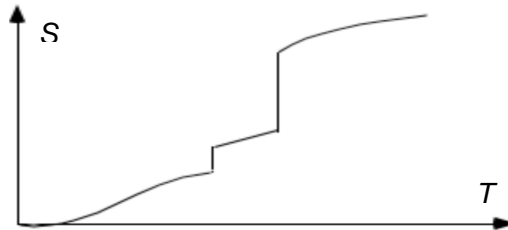
b) Welcher Teil der erzeugten Entropie wird im Heizdraht erzeugt? Wo wird der Rest erzeugt?

c) Wenn das Wasser siedet, steigt die Temperatur des Wassers nicht weiter an, obwohl ständig Entropie zugeführt wird. Wo bleibt die Entropie?

3

a) Die Abbildung zeigt qualitativ den S - T -Zusammenhang für Wasser. Identifiziere die Phasenübergänge fest-flüssig und flüssig-gasförmig.

b) Die physikalische Größe Entropiekapazität $C_S = dS/dT$ (= Steigung der Kurve in der Abbildung) hat den Nachteil, dass sie bei Phasenübergängen unendlich wird. Man kann auch T über S darstellen und mit $1/C_S = dT/dS$ arbeiten. Welche anschauliche Bedeutung hat $1/C_S$?



4

Zwei gleich gebaute und gleich gut isolierte Häuser sollen auf verschiedene Art geheizt werden: das eine mit einer elektrischen Widerstandsheizung, das andere mit einer Wärmepumpe. Die Innentemperatur der Häuser sei T_2 , die Umgebungstemperatur draußen T_1 . Um welchen Faktor ist der Energieverbrauch bei dem Haus mit der Wärmepumpe geringer als bei dem Haus mit der konventionellen Elektroheizung?

Beispiel: $\theta_2 = 25\text{ °C}$, $\theta_1 = 10\text{ °C}$

5

Ein Kohlekraftwerk soll seine Abwärme bei $T_1 = 300\text{ K}$ an einen Fluß abgeben. Aus ökologischen Gründen darf der zugehörige Energiestrom $P_1 = 2000\text{ MW}$ nicht überschreiten.

a) Warum kann man mit der Abwärme nichts besseres anfangen? Vergleiche: Manchmal kann man auch nichts anfangen mit der Energie

- i) in Pressluft
- ii) in einem bewegten Körper
- iii) in Benzin
- iv) in einem Körper in großer Höhe.

b) Welchen Energiestrom kann dieses Kraftwerk ins Netz einspeisen und für welchen thermischen Energiestrom muss man den Dampferzeuger auslegen, wenn die Turbinen bis zu $T_2 = 800\text{ K}$ heißen Dampf verkräften?

c) Berechne den Wirkungsgrad des Kraftwerks. An welchen Teilen liegt es vor allem, dass er kleiner als 1 ist?

d) Tatsächliche Kraftwerke haben Wirkungsgrade $\eta < 0,4$. Woran könnte das liegen?

6

Eine 100 W-Glühlampe brennt in einem idealen Kühlschrank mit 100 W (elektrischer) Leistung. Kann der Kühlschrank auf eine tiefere als Zimmertemperatur kühlen? Wenn ja, wie weit minimal?

7

Der gesamte, von der Sonne ausgehende Energiestrom hat eine Stärke von $3,85 \cdot 10^{23}$ kW.

- Wie stark ist der Energiestrom durch eine 1 m^2 große Fläche im Abstand Sonne-Erde ($1,5 \cdot 10^8 \text{ km}$)?
- Wie viel Wasser kann man mit einem Sonnenkollektor von $A = \text{m}^2$ Absorberfläche pro Stunde von $\theta_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ auf $\theta_2 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ erwärmen, wenn die Atmosphäre ca. 70% des einfallenden Energiestromes durchlässt.

8

Ein Kondensator der Kapazität C wird aus einer Batterie mit der Leerlaufspannung U und dem Innenwiderstand R aufgeladen.

- Wieviele Energie wird der Batterie entnommen?
- Wieviele Energie enthält der Kondensator nach der Aufladung?
- Wo ist die Energiedifferenz zwischen a) und b) geblieben?
- Wieviele Entropie wurde erzeugt?
- Auf welchen Wert (und wie) kann man die Entropieerzeugung reduzieren, wenn die Batterie aus n gleichen Zellen in Reihenschaltung aufgebaut ist?

9

Angenommen, die Wasserrohre der Zentralheizung sollen durch massive Kupferstangen ersetzt werden, so dass die Entropie nicht konvektiv, sondern konduktiv vom Heizkessel zu den Heizkörpern geleitet wird.

- Wie groß müsste der Querschnitt einer 10 m langen Kupferstange sein, in der ein Energiestrom von 3 kW vom $90 \text{ }^\circ\text{C}$ warmen Kessel zu einem $60 \text{ }^\circ\text{C}$ warmen Heizkörper fließt?
 $\lambda_{\text{Cu}} = 3,8 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- Vergleiche die in der Kupferleitung pro Zeit erzeugte Entropie mit der am Heizkessel eingeleiteten.

10

- Ein Liter Wasser der Temperatur $0 \text{ }^\circ\text{C}$ wird in thermischen Kontakt mit einem großen Entropiereservoir der Temperatur $100 \text{ }^\circ\text{C}$ gebracht. Berechne einzeln die Entropieänderung des Wassers, des Entropiereservoirs, sowie des Gesamtsystems.
- Wie ändert sich die Entropie des Gesamtsystems, wenn das Wasser von $0 \text{ }^\circ\text{C}$ auf $100 \text{ }^\circ\text{C}$ in zwei Schritten erwärmt wird: zunächst durch Kontakt mit einem großen Entropiereservoir von $50 \text{ }^\circ\text{C}$ und dann mit einem von $100 \text{ }^\circ\text{C}$?
- Mit was für Systemen muss das Wasser in Kontakt gebracht werden, damit bei der Erwärmung die Gesamtentropie unverändert bleibt?

11

Ein kugelförmiger Wassertank mit dem Radius R wird als Energie- und Entropiespeicher zur Raumheizung benutzt. Zum Zeitpunkt $t = 0$ ist die Wassertemperatur $T = T_2$. Der Was-

Speicher ist von der Umgebung der Temperatur T_1 durch eine Styroporschicht der Dicke d und der Wärmeleitfähigkeit λ_{Styr} isoliert.

a) Berechne Temperatur und Energiestromdichte in Abhängigkeit vom Radius innerhalb des Styropors im stationären Fall.

b) Bestimme die Abklingzeit τ , in der die Differenz zwischen Wasser- und Umgebungstemperatur auf ein e-fel abnimmt. (Die Wassertemperatur sei ortsunabhängig.)

c) Vergleiche die Abklingzeit dieses Speichers mit der eines tief in die Erde vergrabenen Speichers ohne Styroporisolierung.

$d = 30 \text{ cm}$, $\lambda_{\text{Styr}} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $\lambda_{\text{Erde}} = 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

12

Analog zur Entropiekapazität $C_S = \Delta S / \Delta T$ eines Körpers lässt sich seine Impulskapazität $\Delta p / \Delta v$ bilden.

a) Um welche bekannte Größe handelt es sich dabei?

b) Zeige, dass die Impulskapazität positiv sein muss, wenn der Impulsaustausch $\Delta p_1 + \Delta p_2 = 0$ zwischen zwei Körpern stets zu einem stabilen Gleichgewicht führen soll.

c) Um welches Gleichgewicht handelt es sich?

d) Ebenso wie die Entropiekapazität kann auch die Impulskapazität unendlich werden. Wann? Welche anschauliche Bedeutung hat der Kehrwert der Impulskapazität $\Delta v / \Delta p$?

13

Wieviel Joules gibt ein Liter Sonne in einer Sekunde ab?

Nimm zur Berechnung vereinfachend an, dass der Energieumsatz innerhalb der Sonne homogen ist. Du brauchst für die Rechnung die Solarkonstante, sowie einige astronomische Daten. Die Solarkonstante beträgt 1 kW/m^2 . Besorge Dir die astronomischen Daten aus dem Internet.

Schätze zum Vergleich ab, wieviel Watt ein Liter Mensch und 1 Liter Flamme abgibt.

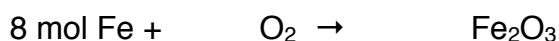
Nimm nun an, die Energie werde in der Sonne durch Wärmeleitung von innen nach außen transportiert. Mach eine plausible Annahme über die Wärmeleitfähigkeit der Sonne. Welche Temperatur ergibt sich für das Zentrum der Sonne?

Tatsächlich beträgt die Temperatur im Sonnenzentrum etwa $15 \cdot 10^6 \text{ K}$. Diskutiere das Ergebnis Deiner Rechnung.

3. Stoffmenge und chemisches Potenzial

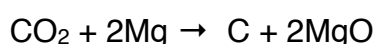
1

Vervollständige die folgende Reaktionsgleichung, und gib den Umsatz der Reaktion an:



2

Kohlenstoffdioxid kann mit Magnesium zu Kohlenstoff und Magnesiumoxid reagieren:



- a) Es entstehen 4 g Kohlenstoff. Schreibe die Reaktionsgleichung mit den zugehörigen Stoffmengenangaben auf.
- b) Wieviel Gramm Kohlenstoffdioxid und wieviel Gramm Magnesium reagieren miteinander?
- c) Wieviele CO₂-Moleküle verschwinden?
- d) Wie groß ist der Umsatz der Reaktion?

3

Man stellt fest, daß die Verbrennung einer Flüssigkeit mit trockener Luft einen Mengenanteil von 13,4% H₂O im Abgas ergibt, wenn aller Sauerstoff verbraucht wird. Rechne für die Luft mit den Mengenanteilen 20% Sauerstoff und 80% Stickstoff.

- a) Angenommen, die Flüssigkeit ist ein reiner Kohlenwasserstoff. Welches Reaktionsprodukt entsteht dann noch? Mit welchem Mengenanteil?
- b) Um welchen Stoff könnte es sich handeln? Schreibe die Reaktionsgleichung auf.
- c) Wie groß ist der Umsatz der Reaktion, wenn pro Stunde ein Liter Wasser entsteht? Wieviel Gramm der Flüssigkeit und wieviel Sauerstoff werden gebraucht?

4

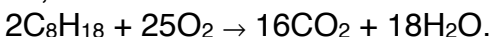
Bestimme die chemische Spannung für die folgenden Reaktionen und gib an, ob die jeweilige Reaktion (unter Normalbedingungen) stattfinden kann oder nicht.

- a) $2\text{Mg (fest)} + \text{O}_2 \text{ (gasf.)} \rightarrow 2\text{MgO (fest)}$
- b) $2\text{Hg (flüss.)} + \text{O}_2 \text{ (gasf.)} \rightarrow 2\text{HgO (rot, fest)}$
- c) $\text{C}_5\text{H}_{12} \text{ (flüss.)} + 8 \text{ O}_2 \text{ (gasf.)} \rightarrow 5\text{CO}_2 \text{ (gasf.)} + 6\text{H}_2\text{O (flüss.)}$
- d) $12\text{CO}_2 \text{ (gasf.)} + 11\text{H}_2\text{O (flüss.)} \rightarrow \text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11} \text{ (fest)} + 12\text{O}_2 \text{ (gasf.)}$
- e) $\text{CuO (fest)} + \text{Zn (fest)} \rightarrow \text{Cu (fest)} + \text{ZnO (fest)}$

Von welchen der folgenden Stoffe lässt sich eine einmolare Lösung in Wasser herstellen? I₂, KOH, NH₄Cl, NH₃, AgCl.

5

In den Zylindern eines Automotors wird Benzin verbrannt. Zur Vereinfachung nehmen wir an, das Benzin bestehe aus reinem Oktan:



Wie groß ist die Umsatzrate, wenn nach dem Durchfahren einer Strecke von 100 km 10 Liter Wasser entstehen und das Auto mit 50 km/h gefahren wird?

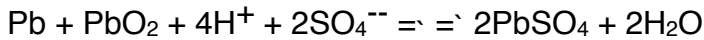
6

In der Umgebung der Normalbedingungen ($T = 298 \text{ K}$ und $p = 1 \text{ bar}$) lassen sich Temperatur- und Druckabhängigkeit des chemischen Potentials durch lineare Funktionen beschreiben. Berechne in dieser Näherung

- a) Siede- und Schmelztemperatur von Wasser bei Normaldruck
- b) Siede- und Schmelztemperatur von Wasser auf dem Mont Blanc ($p = 0,56 \text{ bar}$)
- c) den Tripelpunkt des Wassers.

7

Im Bleiakkumulator läuft die folgende Reaktion ab (beim Laden nach links, beim Entladen nach rechts):



- Wie groß ist die Umsatzrate, wenn der Akku 100 Watt abgibt?
- Beim Laden werden 2 kg Bleisulfat in Blei und Bleioxid verwandelt. Wieviel Energie wird dabei gespeichert?

8

- Wieviel Entropie wird bei der Verbrennung von 1 kg Benzin erzeugt? (Rechne mit C_8H_{18} , einem der Hauptbestandteile des Benzins.)
- Wieviel Entropie wird beim Verrosten von 1 kg Eisen erzeugt?
- Wird beim Verrosten von Eisen Entropie aufgenommen oder abgegeben? Wieviel wird aufgenommen bzw. abgegeben?

9

In der Umgebung der Normalbedingungen ($T = 298 \text{ K}$ und $p = 1 \text{ bar}$) lassen sich Temperatur- und Druckabhängigkeit des chemischen Potentials durch lineare Funktionen beschreiben. Berechne in dieser Näherung

- Siede- und Schmelztemperatur von Wasser bei Normaldruck
- Siede- und Schmelztemperatur von Wasser auf dem Mont Blanc ($p = 0,56 \text{ bar}$)
- den Tripelpunkt des Wassers.

10

- Wieviel Energie wird gebraucht, um aus Kochsalz 1 kg Natrium zu gewinnen?
- Wieviel Energie braucht man, um 2 mol Blei aus Bleichlorid zu gewinnen?

11

In einer Brennstoffzelle reagiert Methan mit Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid und Wasser. Welchen Energiestrom liefert die Zelle bei einer Umsatzrate von 1 mol/s ?

11

- In eine einmolare wässrige CaCl_2 -Lösung wird noch etwas zusätzliches CaCl_2 hineingeschüttet und aufgelöst. Wird die Lösung wärmer oder kälter?
- In eine einmolare wässrige NaBr -Lösung wird noch etwas zusätzliches NaBr hineingeschüttet und aufgelöst. Wird die Lösung wärmer oder kälter?
- In eine einmolare wässrige KNO_3 -Lösung wird noch etwas zusätzliches KNO_3 hineingeschüttet und aufgelöst. Wird die Lösung wärmer oder kälter?

4. Gibbs'sche Fundamentalform, Gibbsfunktion, Gleichgewicht

1

Unter dem *vollständigen Differential* einer Funktion $f = f(x,y)$ versteht man den Ausdruck

$$df = \frac{\partial f(x,y)}{\partial x} dx + \frac{\partial f(x,y)}{\partial y} dy$$

Nun sei $df = \xi dx + \eta dy$ das vollständige Differential einer Funktion $f = f(x,y)$. Drücke die Funktionen $\xi = \xi(x,y)$ und $\eta = \eta(x,y)$ als partielle Ableitungen der Funktion $f = f(x,y)$ aus. Welche Beziehung besteht zwischen den Funktionen

$$\frac{\partial \xi(x,y)}{\partial y} \text{ und } \frac{\partial \eta(x,y)}{\partial x} ?$$

2

Gegeben sind n geladene Kondensatoren mit den Kapazitäten C_1, \dots, C_n . Werden alle Kondensatoren miteinander parallel, leitend verbunden, so tauschen sie untereinander elektrische Ladung aus. Zeige, daß im elektrischen Gleichgewicht ($U_1 = \dots = U_n$) die Gesamtenergie

$$E = \frac{Q_1^2}{2C_1} + \dots + \frac{Q_n^2}{2C_n}$$

unter Erhaltung der Nebenbedingung $Q = Q_1 + \dots + Q_n$ ein Minimum annimmt. (Wende die Methode der Lagrangeschen Multiplikatoren an.)

3

Sind die beiden Differentialformen

$$\alpha = \frac{y^3}{x} dx + 3y^2 \ln x dy$$

$$\beta = \frac{2x}{y} dx + \left(2 - \frac{1}{y^2}\right) dy$$

totale Differentiale von Funktionen $f(x,y)$ bzw. $g(x,y)$? Wenn ja, gib die Funktionen an.

4

Außer $f = f(x,y)$ ist eine weitere Funktion $z = z(x,y)$ gegeben. Beweise die folgenden Relationen

$$a) \frac{\partial f(x,y)}{\partial x} = \frac{\partial f(x,z)}{\partial x} + \frac{\partial f(x,z)}{\partial z} \cdot \frac{\partial z(x,y)}{\partial x}$$

$$b) \frac{\partial f(x,y)}{\partial y} = \frac{\partial f(x,z)}{\partial z} \cdot \frac{\partial z(x,y)}{\partial y} \quad (\text{Kettenregel})$$

$$c) \frac{\partial f(x,y)}{\partial x} = - \frac{\partial f(x,y)}{\partial y} \cdot \frac{\partial y(x,f)}{\partial x}$$

$$d) \frac{\partial f(x,y)}{\partial y} = \frac{1}{\frac{\partial y(x,f)}{\partial f}}$$

5

Beweise die Beziehung

$$C_s^p - C_s^v = \frac{\left(\frac{\partial V(T,p)}{\partial T}\right)^2}{\frac{\partial V(T,p)}{\partial p}}$$

Welche unsinnige Eigenschaft hat ein physikalisches System, für das $C_s^p < C_s^v$ gilt?

6

Damit eine einmal (mit Energie) geladene Spule ihre Energie behält, müssen ihre Anschlüsse miteinander verbunden und ihr Draht perfekt leitend sein.

a) Wie lädt man eine supraleitende Spule mit einem Netzgerät auf einen Strom I_0 ? Was ist zu beachten? Wie trennt man sie vom Netzgerät?

b) Leite den Term der Gibbs'schen Fundamentalform her, der dem Laden der Spule mit Energie entspricht. Orientiere dich an den Argumenten für den Kondensator in Abschnitt 4.2 des Skriptums.

c) Die Spule sei in Längsrichtung ausdehnbar. Beim Ausdehnen tauscht sie Energie mit der Umgebung aus. Was für ein Term der Gibbs'schen Fundamentalform entspricht diesem Energieaustausch? Bestimme die Gibbsfunktion einer langen, geraden, supraleitenden, ausdehnbaren Spule. (Falls du Probleme hast, orientiere dich am Kondensator.)

7

Betrachte ein System (mit bekanntem $E(T,V,n)$, z. B. ein Gas) im Kontakt mit einem Wärmereservoir der Temperatur T_R .

a) Wie ändert sich die Energie von System und Reservoir bei isothermer, reversibler Expansion von V_1 auf V_2 ?

b) Drücke die gesamte Energieänderung durch die Energie, Entropie und Temperatur des Systems aus. Definiere eine Funktion $F(T,V,n)$ mit der $\Delta E = F(T,V_2,n) - F(T,V_1,n)$ wird.

c) Welche Bedeutung haben die Funktionen $H(S,p,n)$ und $G(T,p,n)$?

8

$Y = Y(X_1, \dots, X_n)$ sei Gibbsfunktion eines Systems und

$$\xi_j = \xi_j(X_1, \dots, X_n) = \frac{\partial Y(X_1, \dots, X_n)}{\partial X_j}$$

sei eindeutig nach

$$X_j = X_j(X_1, \dots, X_{j-1}, \xi_j, X_{j+1}, \dots, X_n) \text{ auflösbar.}$$

Die Funktion

$$Y_j = Y_j(X_1, \dots, X_{j-1}, \xi_j, X_{j+1}, \dots, X_n) := Y - \xi_j \cdot X_j$$

heißt dann Legendre-Transformierte von Y .

a) Beweise die Beziehungen

$$\frac{\partial Y_j}{\partial X_k} = \xi_k(X_1, \dots, X_{j-1}, \xi_j, X_{j+1}, \dots, X_n) \text{ für } k \neq j \text{ und}$$

$$\frac{\partial Y_j}{\partial \xi_j} = -X_j(X_1, \dots, X_{j-1}, \xi_j, X_{j+1}, \dots, X_n)$$

b) Zeige, dass mit der Kenntnis der Funktion $Y_j = Y_j(X_1, \dots, X_{j-1}, \xi_j, X_{j+1}, \dots, X_n)$ auch die Funktion $Y = Y(X_1, \dots, X_n)$ bekannt ist, d.h. dass auch Y_j eine Gibbsfunktion des Systems ist.

c) Beweise die Maxwell-Beziehungen:

$$\frac{\partial \xi_j}{\partial X_k} = \frac{\partial X_k}{\partial \xi_j} \text{ für } j \neq k \text{ und } \frac{\partial X_j}{\partial X_k} = -\frac{\partial \xi_k}{\partial \xi_j} \text{ für } j \neq k$$

9

An Stelle der Entropie, die Gibbsfunktion ist, wenn sie von E , V und n abhängt, möchten wir eine Funktion S' , die von T (oder $\beta = 1/T$), V und n abhängt, als Gibbsfunktion zur Beschreibung eines Systems benutzen.

a) Wie hängen S' und S zusammen?

b) Mit welcher energieartigen Gibbsfunktion hängt S' direkt zusammen?

10

Die Energie eines Systems als Funktion von S , V und n sei:

$$E(S, V, n) = \frac{3}{2} nk \left(\frac{n}{V} \right)^{\kappa-1} \exp \left[\left(\frac{S}{nk} - a \right) (\kappa - 1) - 1 \right]$$

a) Bestimme die Zustandsgleichungen $T = T(S, V, n)$, $p = p(S, V, n)$ und $\mu = \mu(S, V, n)$.

b) Verschaffe dir aus a) p , μ , E , S als Funktionen von T , V , n .

11

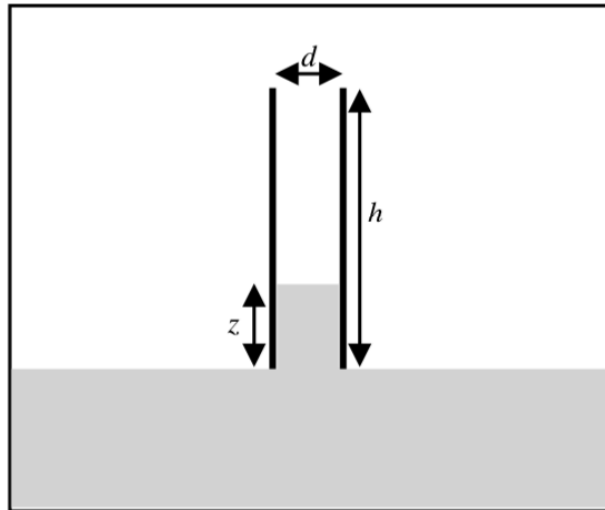
a) Zeige, dass es keine physikalischen Größe „Arbeit A “ und „Wärme Q “ gibt, die allgemein definiert wären z. B. durch $dA = -p dV$ bzw. $dQ = T dS$.

b) Welche einschränkende Bedingung müssen die intensiven Variablen v , F , U , p und T erfüllen, damit die Energieformen $v dP$, $-F dx$, $U dQ$, $-p dV$ und $T dS$ vollständige Differentiale bilden?

c) Zeige, dass bei der Erfüllung dieser einschränkenden Bedingung keine Energieform in eine andere umgewandelt werden kann.

12

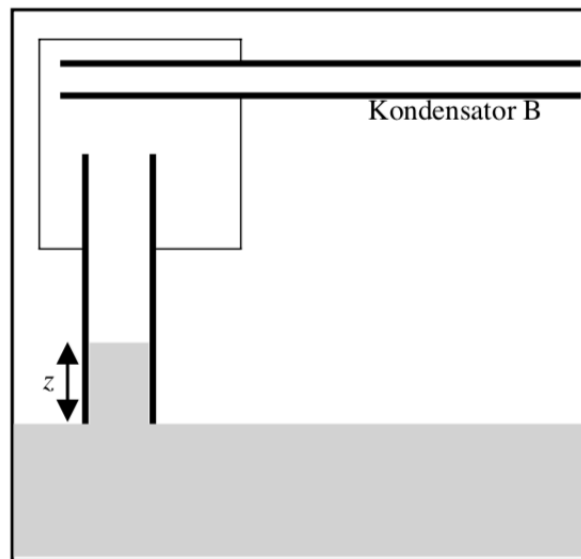
a) Bestimme die Steighöhe z einer Flüssigkeit mit der Dielektrizitätskonstanten ε und der Massendichte ρ_m in einem Plattenkondensator A mit vorgegebener konstanter Geometrie und konstanter Ladung Q_A , Abb. 1.



Hinweise: Suche das Minimum der Energie $E_A = E_A(Q_A, z)$ des Systems „Kondensator A + Flüssigkeit im Gravitationsfeld“. Es ergibt sich eine kubische Gleichung für z . Bestimme eine Lösung. (Am erfolgversprechendsten ist die Verwendung konkreter (und realistischer) Zahlenwerte für die Koeffizienten in der kubischen Gleichung.)

b) Bestimme die Steighöhe z für den Fall, daß Kondensator A mit einem Kondensator B verbunden ist, Abb. 2, wobei $C_B \gg C_A$.

Hinweis: Suche das Minimum der Energie $E_{A,B} = E_{A,B}(Q_{A,B}, z)$ des Systems „Kondensator A + Kondensator B + Flüssigkeit im Gravitationsfeld“.



c) Zeige, daß sich die Steighöhe z im Fall b) auch bestimmen lässt, indem man das Minimum der Legendretransformierten $K = K(U, z)$ der Energie $E_A = E_A(Q_A, z)$ bestimmt.

13

Die Aufteilung eines elektrischen Stroms konstanter Stärke auf 2 parallelgeschaltete Widerstände kann aufgefasst werden als das Einstellen eines Fließgleichgewichts. Zeichne ein Schaltbild (analog zu Abb. 4.24 im Skriptum, Abschnitt 4.12), dem man ansieht, dass es auch Nichtgleichgewichtszustände gibt. Zeige, dass die Entropieproduktion im Gleichgewicht einen Extremalwert hat. Handelt es sich um ein Minimum oder ein Maximum?

14

In Abb. 4.14 im Skriptum (Abschnitt 4.9) ist ein Kreisprozess mit einem Kondensator mit variablem Plattenabstand als „Arbeitsmedium“ dargestellt.

a) Berechne die Energiemengen, die bei jedem der dargestellten Prozessschritte an- bzw. abtransportiert werden.

b) Berechne die Energiemengen, die bei einmaligem Durchlaufen des Kreisprozesses netto

- mit der elektrischen Ladung
- mit dem Impuls

an- bzw. abtransportiert werden.

15

Im Prinzip könnte man die Längenänderung von Eisenbahnschienen bei Temperaturänderung nutzen. Skizziere im F - x -Diagramm die beiden folgenden Kreisprozesse und berechne die Arbeit der einzelnen Schritte.

a) Die Schiene wird tags bei fester Länge erwärmt und dann isotherm verlängert. Nachts wird sie bei fester Länge abgekühlt und dann isotherm verkürzt.

b) Die kalte Schiene wird bis zu einer Kraft F_0 zusammengedrückt. Beim Erwärmen bleibt F_0 konstant. Anschließend wird die Schiene bis zu $-F_0$ gedehnt und bei konstanter Kraft abgekühlt.

Diskutiere die technischen Schwierigkeiten und die Vor- und Nachteile beider Methoden. Wodurch wird F_0 bei b) begrenzt?

Elastizitätsmodul: $E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$

therm. Ausdehnungskoeffizient: $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5}/\text{K}$

$\Delta T = 20 \text{ K}$

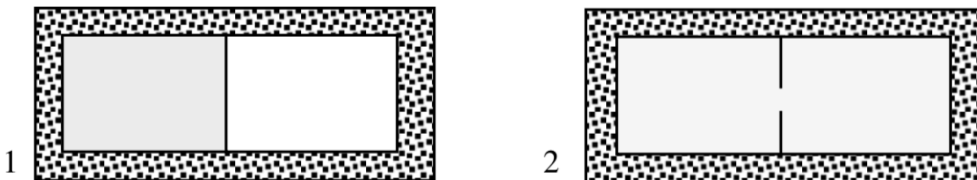
Querschnittsfläche: $A = 10^{-2} \text{ m}^2$

Länge: $l = 1000 \text{ km}$

5. Das ideale Gas

1

Ein ideales Gas gelange aus dem Zustand 1 durch freie Expansion bei konstanter Stoffmenge in den Zustand 2:



Wegen $E_1 = E_2$, $T_1 = T_2$, $p_1 V_1 = p_2 V_2$ folgt aus $E = TS - pV$, dass $S_1 = S_2$, was offensichtlich falsch ist, denn es wird Entropie erzeugt. Wo steckt der Fehler?

Hinweis: Ist wegen $dX_j = 0$ ein Term der Gibbsschen Fundamentalform $\xi_j dX_j = 0$, so folgt daraus nicht, dass auch $\xi_j X_j = 0$ ist. Welches Variablenpaar könnte hier unterschlagen worden sein?

2

Zwei durch einen dünnen Schlauch verbundene Behälter mit Volumen V_1 und V_2 werden mit einem idealen Gas gefüllt, sodass bei T_0 der Druck p_0 beträgt.

- Welche Gleichgewichte stellen sich ein, wenn man das Gas in Behälter 1 auf T_{01} und in Behälter 2 auf T_2 bringt? Welche nicht?
- Welcher Druck ergibt sich?

3

Ein ideales Gas werde bei fester Stoffmenge von Zustand A in Zustand B gebracht, und zwar durch folgende Prozesse:

- zuerst isobar, dann isochor
- zuerst isochor, dann isobar
- unter linearer Änderung des Drucks mit dem Volumen
- isotherm

- Skizziere die Prozesse im pV - und im ST -Diagramm.
 - Berechne die jeweils vom Gas geleistete Arbeit.
- Zahlenbeispiel: $p_A = 10 \text{ bar}$, $p_B = 1 \text{ bar}$, $V_A = 10^{-3} \text{ m}^3$.

4

Die Partialdrücke zweier Gase mit den Molmassen $\hat{m}_1 = 2 \text{ g/mol}$ und $\hat{m}_2 = 4 \text{ g/mol}$ haben im Zentrum einer Zentrifuge das Verhältnis $p_1/p_2 = 1/100$. In welchem Abstand r von der Drehachse ist $p_1/p_2 = 1/1000$, wenn die Winkelgeschwindigkeit $\omega = 5000 \text{ s}^{-1}$ und $RT = 2,5 \text{ kG}$ betragen ?

5

Wie groß ist der osmotische Druck einer Lösung von 180 g Zucker ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) in 1 l Wasser? Kann die Lösung als hinreichend verdünnt betrachtet werden? (Kriterium für hinreichende Verdünnung ist, dass der Molenbruch $x_i = (n_i/n) \ll 1$.)

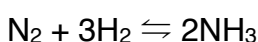
6

Die Mischungsentropie zweier Gase 1 und 2 hängt vom Mischungsverhältnis bzw. vom Molenbruch der beiden Gase ab.

- Woher kommt diese Mischungsentropie?
- Für welche Werte von x_1 und x_2 nimmt die Mischungsentropie ein Maximum an?
- Finde eine reversible Prozessrealisierung anstatt der einfachen Vermischung der Gase. Wieviel Arbeit kann so geleistet werden?

7

Wasserstoff, Stickstoff und Ammoniak liegen als Gase in einem Gefäß eingeschlossen bei der festen Temperatur T im chemischen Gleichgewicht der Reaktion



vor. Die Stoffmenge des Wasserstoffs sei dreimal so groß wie die des Stickstoffs.

- Wie ändert sich die Gesamt-Stoffmenge $n = n_{\text{N}_2} + n_{\text{H}_2} + n_{\text{NH}_3}$ wenn sich Ammoniak bildet?

- b) In welche Richtung verschiebt sich das chemische Gleichgewicht bei Erhöhung des Drucks?
- c) Wie groß ist die NH_3 -Ausbeute in Prozent der Gesamt-Stoffmenge, wenn $p = 10 \text{ bar}$ und $T = 298 \text{ K}$? Die Gleichgewichtskonstante im Massenwirkungsgesetz hat für $T = 298 \text{ K}$ den Wert $K = 1,92 \text{ bar}^2$.

8

Eine Carnot-Wärmekraftmaschine arbeite zwischen $T_2 = 600 \text{ K}$ und $T_1 = 300 \text{ K}$ und sei so gebaut, dass das Verdichtungsverhältnis (Verhältnis von größtem zu kleinstem Arbeitsgasvolumen) $V_C/V_A = 8$ beträgt.

- a) Zeichne ein maßstäbliches pV -Diagramm, sowie ein TS -Diagramm, für die Arbeitssubstanzen Helium, Luft, CO_2 (ideale Gase).
- b) Berechne die pro Umlauf geleistete Arbeit, die für die Kompressionsschritte nötige Arbeit und die zwischen den Wärmereservoirs transportierte Entropie.
- c) Welches Arbeitsgas ist am geeignetsten? Überlege qualitativ, was passiert, wenn man die für Helium gebaute Maschine mit Luft bzw. CO_2 betreibt.

9

Das chemische Potential des Rheinwassers ist (trotz Verschmutzung) höher als das des Nordseewassers. Man könnte daher an der Rheinmündung ein Osmosekraftwerk betreiben, in dem das Rheinwasser auf das chemische Potential der Nordsee heruntergelassen und dadurch Ladung auf höheres elektrisches Potential gepumpt wird.

- a) Schätze die Leistung eines solchen Kraftwerks ab.
- b) Wie könnte man es realisieren? Wo liegt die Schwierigkeit?

Salzkonzentration der Nordsee: $0,5 \text{ mol/l}$

Salzkonzentration im Rhein: 0 mol/l

Stromstärke des Rheins: $2000 \text{ m}^3/\text{s}$

6. Flüssigkeiten und Feststoffe

1

Zwei Festkörper, die aus demselben Material bestehen, haben die Stoffmengen n_1 und n_2 und die Temperaturen T_1 und T_2 , wobei $T_1, T_2 \ll T_{\text{Debye}}$. Die beiden Festkörper werden in thermischen gebracht. Welche Endtemperatur stellt sich ein, wenn der Prozess

- a) isoenergetisch
- b) isentrop realisiert wird?
- c) Berechne die Endtemperaturen für zwei Diamantstücke mit gleicher Stoffmenge und den Anfangstemperaturen $T_1 = 200 \text{ K}$ und $T_2 = 300 \text{ K}$.

7. Phasenübergänge

1

- a) Diskutiere anhand der $\mu(T, p)$ -Kurven (vgl. Skriptum Abschnitt 7.5, Abb. 7.8) folgende Erscheinungen, die beim Lösen von Salz in Wasser auftreten:

- 1) Dampfdruckerniedrigung des Wassers (bei $T = \text{const}$)
- 2) Siedepunkterhöhung des Wassers (bei $p = \text{const}$)
- 3) Schmelzdruckerniedrigung des Wassers (bei $T = \text{const}$)
- 4) Schmelzpunkterniedrigung des Wassers (bei $p = \text{const}$)

Hinweise:

- Das Salz verdampft nicht und löst sich nicht im Eis.
- Verwende statt der komplizierten $\mu(T)$ -Abhängigkeit eine lineare Näherung für $\mu(T)$.

b) Bei welcher Temperatur beginnen sich Eisschollen auf dem Meer zu bilden? Die Salzkonzentration an der Meeresoberfläche beträgt 0,5 mol/l.

2

a) Bestimme die Funktion $p(T)$ für den Phasenübergang flüssig-gasförmig aus der Clausius-Clapeyronschen Gleichung bei folgenden Annahmen:

$$\hat{V}_{\text{gas}} - \hat{V}_{\text{fl}} \approx \hat{V}_{\text{gas}}$$

$$\hat{V}_{\text{gas}} = \frac{RT}{p}$$

$$T \cdot (\hat{S}_{\text{gas}} - \hat{S}_{\text{fl}}) \approx \text{const}$$

- b) Sind die Annahmen in (a) für Wasser gerechtfertigt?
- c) Bei welcher Temperatur siedet Wasser in 5 km Höhe über dem Meeresspiegel?

Es ist

$$\hat{S}_{\text{gas}} - \hat{S}_{\text{fl}} \approx 110 \text{ Ct/mol}$$

8. Strömungen

1

Eine inkompressible Flüssigkeit mit der Massendichte $\rho_m = 1 \text{ kg/l}$ durchströmt ein Rohr mit der Geschwindigkeit $v_1 = 1 \text{ m/s}$. Der Innenradius r_1 des Rohrs beträgt 10 cm. Die innere Reibung der Flüssigkeit und die Reibung mit der Rohrwand sei vernachlässigbar, d. h. der Druck ist konstant und beträgt $p_1 = 2 \text{ bar}$.

- a) Welchen Innenradius r_2 muss ein anschließendes Rohrstück haben, damit die Flüssigkeit in diesem Rohrstück einen Druck $p_2 = 1 \text{ bar}$ hat?
- b) Bei welchem Innenradius ergibt sich ein Druck von 0 bar? Was passiert, wenn man den Rohrdurchmesser weiter verkleinert?

2

Bestimme die Geschwindigkeit, mit der die Luft (ideales Gas) aus einem kleinen Loch in einem Autoreifen (2,5 bar Überdruck) entweicht.

9. Reale Gase

1

a) Berechne für ein van-der-Waals-Gas den Ausdruck

$$\frac{\partial E(T, V, n)}{\partial V}$$

b) Wie groß ist bei einer freien Expansion eines van-der-Waals-Gases von V_A auf V_E die Änderung der Energie, der Temperatur und der Entropie?

2

Man misst für Stickstoff die kritischen Daten $T_k = 128,3$ K und $p_k = 34,05$ bar. Wie groß sind die van-der-Waalsschen Konstanten von Stickstoff?

Hinweis: Am kritischen Punkt hat die Isotherme einen Sattelpunkt.

3

Die Energie und die Entropie eines Systems seien als Funktionen von T , V und n gegeben:

$$E(T, V, n) = n \cdot \left(R \cdot c \cdot (T - T_0) + n \cdot a \cdot \left(\frac{1}{V_0} - \frac{1}{V} \right) \right) + E(T_0, V_0, n)$$

$$S(T, V, n) = n \cdot R \cdot \ln \left(\frac{T^c \cdot (V - n \cdot b)}{T_0^c \cdot (V_0 - n \cdot b)} \right) + S(T_0, V_0, n)$$

Dabei sind a , b und c drei für das System charakteristische Größen.

- Wie lautet die „thermische Zustandsgleichung“ $p = p(T, V, n)$ des Systems? Um welches System handelt es sich?
- Hängen die molaren Wärmekapazitäten $c_V = T \cdot c^S_V$ bzw. $c_p = T \cdot c^S_p$ des Systems von T und V oder nur von T ab? Was gilt für $a = 0$?
- Was passiert mit der Temperatur des Systems bei einer Gay-Lussac-Expansion (freie Expansion)?

10. Kombipotenziale

1

Die Einstellung des thermischen Gleichgewichts zwischen verschiedenen hohen Schichten der Erdatmosphäre ist stark gehemmt. Auch das in der Vorlesung behandelte „gravito-chemische“ Gleichgewicht stellt sich daher nicht ein, sondern ein „gravito-thermo-chemisches“: Masse, Entropie und Stoffmenge sind fest aneinander gekoppelt.

- Eine Luftportion geringer vertikaler Ausdehnung wird aus der Höhe z_1 auf die Höhe z_2 gebracht. Wie sieht die zu diesem Prozess gehörende Gibbssche Fundamentalform aus? Definiere ein gravito-thermo-chemisches Potential ε .
- Im gravito-thermo-chemischen Gleichgewicht ist $\varepsilon(z) = \text{const.}$ Berechne für diesen Fall die Funktionen $p(T)$, $\mu(T)$, $T(z)$, $p(z)$ und $\mu(z)$.
- Um wieviel ändert sich die Temperatur pro 100 m Höhenunterschied? Wie passt dieses Ergebnis zu der Erfahrung, dass warme Luft aufsteigt?

d) Wie hoch ist der Luftdruck in 5 km, 10 km, 50 km Höhe über dem Erdboden? Interpretiere das Resultat für 50 km.

2

Wie stark ändert sich die Temperatur von Luft (d. h. im wesentlichen von N_2), wenn die Luft isentrop von 1 bar auf

- a) 0,54 bar
- b) 0,26 bar expandiert?
- c) Vergleiche die Temperaturänderungen mit denen, die sich aus dem Resultat der vorangehenden Aufgabe für $\Delta z = 5$ km und $\Delta z = 10$ km ergeben.
- d) Berechne die Temperaturänderung von Helium ebenfalls bei isentroper Expansion von 1 bar auf 0,54 bar und 0,26 bar.

11. Das Lichtgas

1

Schätze den Lichtdruck im Zentrum einer Atombombe ab, wenn die Temperatur bei der Explosion 10^8 K beträgt. Schätze auch den Druck des Urans ab.

Hinweis: Behandle das Uran wegen der hohen Temperatur als ideales Gas.

2

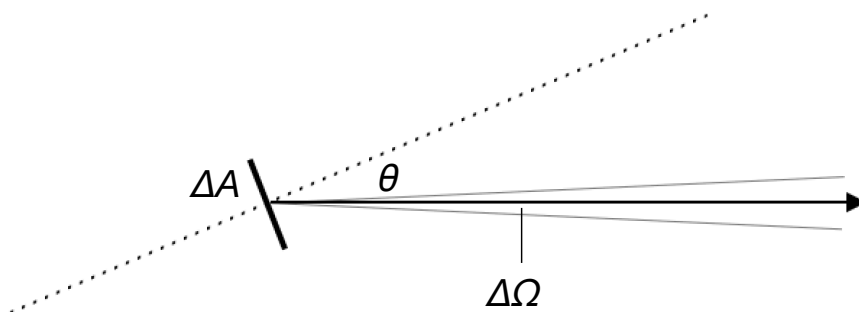
- a) Berechne aus der Planck-Formel die Photonenzahl in einem Hohlraum mit dem Volumen V .
- b) Überprüfe, ob Photonen ein ideales Gas bilden.

Hinweis:

$$\int_0^{\infty} \frac{x^2}{e^x - 1} dx = 2,4$$

3

Obwohl die Sonne und der Mond kugelförmig sind, nehmen wir sie von der Erde gesehen als gleichmäßig leuchtende Flächen wahr. Also muss die Energiestromstärke, die von einem Flächenelement ΔA auf der Sonnen- oder Mondoberfläche in ein Raumwinkelelement $\Delta\Omega$ abgestrahlt wird, auf bestimmte Art von der Richtung θ abhängen (siehe Abb.), in der das Raumwinkelelement liegt. Wie?



4

Der Wolframdraht einer Glühlampe ist 4 cm lang und hat einen Durchmesser von 0,1 mm. Wie stark ist der Energiestrom, der vom Draht wegfließt, wenn die Temperatur des Drahts 3000 K beträgt?

5

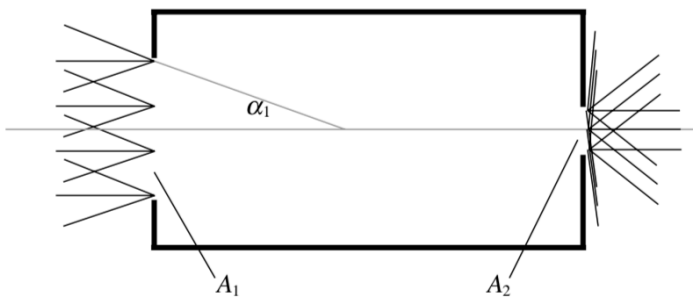
- Skizziere einen Carnot-Prozess mit schwarzer Strahlung als „Arbeitsgas“ im pV -Diagramm.
- Berechne die über die Kolbenstange abgegebene Energie für jeden Teilschritt.
- Verifiziere auch hier den Carnot-Faktor.

6

- Welche mittlere Temperatur hätte die Erdoberfläche, wenn die Erde keine Atmosphäre hätte?
- Welche mittlere Temperatur hätte die Erdoberfläche, wenn die Atmosphäre als dünne, von der Oberfläche getrennte Schicht (Strahlungsschild) betrachtet wird, die die Sonnenstrahlung ungehindert durchläßt und die Abstrahlung der Erdoberfläche völlig absorbiert? Sind diese Annahmen sinnvoll?

7

Berechne den maximalen Konzentrationsfaktor $c = A_1/A_2$ eines Lichtkonzentrators als Funktion des Öffnungswinkels α_1 der ankommenden Strahlung. A_1 ist die Eintrittsfläche, A_2 die Austrittsfläche des Konzentrators.



Benutze die Tatsache, dass das Volumen im Phasenraum, das die Strahlung einnimmt, bei der Lichtkonzentration konstant bleibt (wegen der Entropieerhaltung):

$$\Delta x \cdot \Delta k_x = \text{const und}$$

$$\Delta y \cdot \Delta k_y = \text{const,}$$

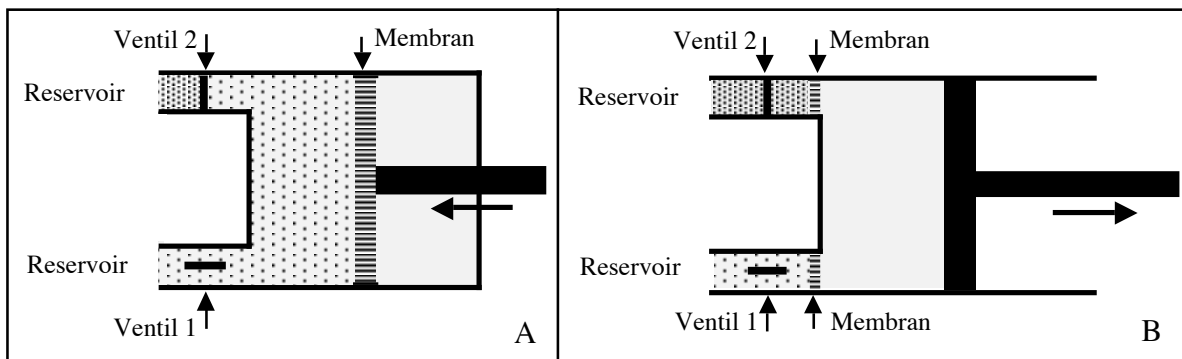
wo x und y die beiden zur Strahlrichtung orthogonalen Richtungen sind.

12. Thermische Maschinen

1

In Analogie zur Carnotmaschine, die zwischen zwei Entropiereservoirien arbeitet, und zur (isothermen) Pressluftmaschine, die zwischen zwei Pressluftreservoirien arbeitet, kann man „Osmosemotoren“ betrachten, die zwischen zwei Lösungsreservoirien 1 und 2 arbeiten. Die Konzentration $c = n_G/V$ des gelösten Stoffs (etwa ein Salz) habe in den beiden Reservoirien die konstanten Werte c_1 und c_2 mit $c_2 > c_1$.

Die Abbildung zeigt zwei denkbare Versionen A und B. Bei A ist der gesamte Zylinder mit Lösungsmittel (etwa mit Wasser) gefüllt. Der Kolben besteht aus einer Membran, die für das Lösungsmittel durchlässig ist, aber nicht für den gelösten Stoff. Der gelöste Stoff diffundiert vom Reservoir 2 durch die Maschine hindurch ins Reservoir 1.



Bei B ist der Kolben für Lösungsmittel und Gelöstes undurchlässig, dafür befinden sich in den Zuleitungen Membranen, die nur für das Lösungsmittel, nicht aber für das Gelöste durchlässig sind. (Im Zylinder befindet sich ausschließlich Lösungsmittel.) Das Lösungsmittel strömt vom Reservoir 1 durch die Maschine hindurch ins Reservoir 2.

- Zeichne für beide Versionen A und B die ξ - X -Diagramme. Vergleiche mit den ξ - X -Diagrammen der Carnotmaschine und der Pressluftmaschine.
- Berechne für beide Versionen die Energiemengen, die bei einmaligem Durchlaufen des Kreisprozesses über die Kolbenstange (mit dem Träger Impuls) abgegeben werden.
- Die Konzentration des Salzes in der Nordsee beträgt etwa 0,5 mol/l. Der Rhein liefert an der Mündung in die Nordsee etwa 2000 m³/s Süßwasser mit der Salzkonzentration $c_1 = 0$ mol/l. Welche der beiden Versionen A und B bietet sich für den Bau eines Kraftwerks an, das den Konzentrationsunterschied zwischen Salzwasser und Süßwasser ausnutzt? Wie stark wäre der mit dem Drehimpuls aus dem Osmosemotor herausfließende Energiestrom? Warum werden solche Kraftwerke nicht gebaut?

13. Entropie und Wahrscheinlichkeit

1

Zeige, daß die Datenmenge

$$H(p_1, p_2, \dots, p_z) = -f \sum_{i=1}^z p_i \ln p_i$$

für $p_1 = p_2 = \dots = p_z$ ein Maximum hat.

2

- a) Jemand misst die Temperatur eines Dir unbekanntes Gegenstands mit einem Thermometer mit Digitalanzeige. Der Messbereich des Thermometers reicht von $-40,0\text{ °C}$ bis $+1000,0\text{ °C}$ in Schritten von $0,1\text{ °C}$. Wie groß ist die Datenmenge, die Du erhältst, wenn Dir das Ergebnis der Messung mitgeteilt wird?
- b) Wie groß ist die Datenmenge, wenn Du im Voraus weißt, daß es sich bei dem Gegenstand, dessen Temperatur gemessen wird, um die Luft in einem normal temperierten Raum handelt?

3

Wie groß ist die Datenmenge, die ein Lottospieler erhält, wenn er erfährt, ob er im Lotto 6 Richtige hat oder nicht?

Klausuraufgaben

Klausuraufgaben (I)

1

Ein mit Helium (ideales Gas) auf den Umgebungsdruck p_0 gefüllter Ballon werde von der Sonne gleichmäßig von der Umgebungstemperatur T_0 an um ΔT erwärmt.

Um welchen Betrag nimmt die Tragkraft des Ballons zu, wenn er

- a) geschlossen ist und sein Volumen konstant bleibt
- b) geschlossen ist und sein Druck konstant bleibt
- c) unten offen ist und sein Volumen konstant bleibt

Zahlenbeispiel: $p_0 = 1\text{bar}$, $T_0 = 300\text{K}$, $\Delta T = 6\text{K}$, $V_0 = 200\text{ m}^3$.

2

Die Innenwand eines geraden zylindrischen Kupferrohres hat die konstante Temperatur

$\theta_i = 75\text{ °C}$, die Außenwand hat die Temperatur $\theta_a = 25\text{ °C}$.

- a) Wie groß sind Temperatur und Energiestromdichte in Abhängigkeit vom Radius innerhalb der Rohrwand im stationären Fall?
- b) Wie groß ist die Energiestromdichte näherungsweise für eine sehr dünne Wand

$r_a - r_i = 1\text{ mm} \ll r_i$?

3

Ein Erfinder behauptet, sein neuer Motor gibt pro mit Luft verbranntem Kilogramm Methanol 20 MJ über die Welle ab.

- a) Stelle die Reaktionsgleichung auf und überprüfe die Energiebilanz.
- b) Angenommen, es handelt sich um eine Carnot-Maschine, die zwischen T_2 und $T_1 = 300\text{ K}$ arbeitet. Wie groß müsste dann T_2 sein?
- c) Können die Angaben des Erfinders stimmen?

4

- a) Leite aus der Clausius-Clapeyron-Gleichung mit sinnvollen Näherungen (angeben!) die Dampfdruckkurve von Wasser her.
- b) Welche Temperatur hat ein Dampfkochtopf bei einem Überdruck von 1 bar, wenn nach Gebrauchsanleitung alle Luft aus dem Inneren verdrängt wurde?
- c) Welcher Druck herrscht in einem Dampfkochtopf, wenn er an Luft bei 20 °C fest verschlossen und dann auf die Temperatur aus b) geheizt wurde?

5

Die zu einer Magnetisierungsänderung dM gehörende Energieänderung eines Systems beträgt $dE = H dM$. Die Zustandsgleichung eines idealen Paramagneten ist $M = CH/T$, mit der Curie-Konstante C .

Zeige, dass für einen idealen Paramagneten gilt:

$$\frac{\partial E(T, M)}{\partial M} = 0$$

(Denke an das ideale Gas, wo gilt:

$$\frac{\partial E(T, V)}{\partial V} = 0$$

Hilfsmittel:

$$R = 8,31 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$$

$$g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$$

$$\lambda_{\text{Cu}} = 380 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$$

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\Delta S}{\Delta V}$$

$$\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} = \frac{\partial f(x, z)}{\partial x} + \frac{\partial f(x, z)}{\partial z} \cdot \frac{\partial z(x, y)}{\partial x}$$

unter Normalbedingungen:

Wasser, flüssig:	$\mu = -237,18 \text{ kG}$	$S/n = 69,91 \text{ Ct/mol}$
------------------	----------------------------	------------------------------

Wasser, gasig:	$\mu = -228,59 \text{ kG}$	$S/n = 188,72 \text{ Ct/mol}$
----------------	----------------------------	-------------------------------

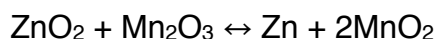
Methanol, flüssig:	$\mu = -166,34 \text{ kG}$	$S/n = 126,70 \text{ Ct/mol}$
--------------------	----------------------------	-------------------------------

CO ₂ gasig:	$\mu = -394,36 \text{ kG}$	$S/n = 213,64 \text{ Ct/mol}$
------------------------	----------------------------	-------------------------------

Klausuraufgaben (II)

1

In einem alkalischen Zink-Braunstein-Akku läuft (etwas vereinfacht) folgende Reaktion ab:

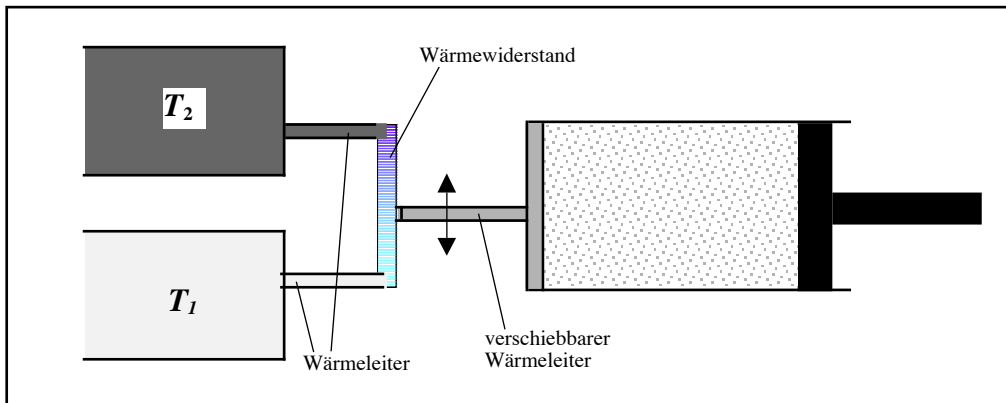


- In welcher Richtung läuft die Reaktion beim Entladen? Begründung!
- Wie groß ist die Umsatzrate, wenn der Akku 50 Watt abgibt?
- Wie muss man die Batterie betreiben, damit die Entropieerzeugung *in* der Batterie vernachlässigbar klein bleibt? Nimmt die Batterie dann (bei konstanter Temperatur) Entropie aus der Umgebung auf oder gibt sie Entropie ab? Begründung!
- Wie muss man die Batterie betreiben, damit in der Batterie maximale Entropieerzeugung stattfindet? Nimmt die Batterie dann (bei konstanter Temperatur) Entropie aus der Umgebung auf oder gibt sie Entropie ab? Begründung

2

In einem Zylinder, der durch einen beweglichen Kolben verschlossen ist, befindet sich Luft. Der Zylinder ist in Kontakt mit einem Entropiereservoir, dessen Temperatur kontinuierlich von T_1 bis T_2 (wobei $T_2 > T_1$) variiert werden kann. Die Abbildung zeigt die Maschine

schematisch. (Das Entropiereservoir mit variabler Temperatur wird durch einen „thermischen Spannungsteiler“ repräsentiert.)



a) Skizziere das T - S - und das p - V -Diagramm für folgenden Kreisprozess (idealisierte Stirlingprozess)! Die qualitativ richtige Darstellung der Steigungen und Krümmungen der Kurvenstücke ist notwendig und hinreichend.

Prozessschritt $A \rightarrow B$: isotherme Expansion bei $T = T_2$

$B \rightarrow C$: isochore Abkühlung von $T_B = T_2$ auf $T_C = T_1$ (isochor: $V = \text{const}$)

$C \rightarrow D$: isotherme Kompression bei $T = T_1$

$D \rightarrow A$: isochore Erwärmung von $T_D = T_1$ auf $T_A = T_2$

b) Berechne die Energiemenge, die bei einmaligem Durchlaufen des Kreisprozesses über die Kolbenstange abgegeben wird. ($n_{\text{Luft}} = 0,1 \text{ mol}$, $T_2 = 600 \text{ K}$, $T_1 = 300 \text{ K}$, $V_B = 10 \cdot V_A$)

c) Berechne die Entropieänderung der Luft bei dem Prozeß $B \rightarrow C \rightarrow D$.

3

Welche Wärmeleitfähigkeit darf das 1 cm dicke Isolationsmaterial eines Raumanzugs für Astronauten höchstens haben, damit die Stärke des Energiestroms, der vom Astronauten in die Umgebung fließt, bei geringer körperlicher Betätigung 200 W nicht überschreitet? Die ca. 1 m^2 große Oberfläche des Raumanzugs sei schwarz und die Einstrahlung aus dem Weltraum vernachlässigbar klein.

4

a) Berechne die Salzkonzentration einer gesättigten Salzlösung (NaCl in H_2O) bei $T = T_0 = 298 \text{ K}$ und $p_{\text{Lösung}} = p_0 = 1 \text{ bar}$!

Hinweise:

Das chemische Potential eines gelösten Stoffes als Funktion der Konzentration c ist (bei $T = T_0 = 298 \text{ K}$)

$$\mu_{\text{gel}}(T_0, c) = \mu_{\text{gel}}(T_0, c_0) + R \cdot T_0 \cdot \ln(c/c_0).$$

Die chemischen Potentiale gelöster Stoffe bei der Konzentration $c_0 = 1 \text{ mol/l}$ findest Du in der Tabelle.

- b) In welcher Tiefe unter der Meeresoberfläche erreicht die Salzkonzentration im Meerwasser den in (a) berechneten Wert? ($T = T_0 = \text{const}$)
- c) Schätze den Druck des Meerwassers in der in (b) berechneten Tiefe ab. Hat dieser Druck einen merklichen Einfluss auf das Potential des festen Salzes oder beginnt das Gelöste dort auszukristallisieren? Begründung!

$$R = 8,3 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

$$c_V = (3/2) \cdot R \quad c_p = (5/2) \cdot R \quad (\text{für einatomige Gase})$$

$$c_V \approx (5/2) \cdot R \quad c_p \approx (7/2) \cdot R \quad (\text{für zweiatomige Gase})$$

$$\gamma = c_p/c_V$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$$

$$V_{\text{NaCl, fest}} = 0,025 \text{ l/mol}$$

$$\hat{m}_{\text{NaCl}} = 60 \text{ g/mol}$$

$$\text{Salzkonzentration an der Meeresoberfläche} = 0,5 \text{ mol/l}$$

Diskussionsthemen

1

Ein Kühlschrank arbeitet mit weit offener Tür. Wird es in dem Raum, in dem er steht, kälter oder wärmer?

Vergleiche den Betriebszustand der Wärmepumpe mit dem einer „Impulspumpe“ (d.h. eines Motors) und dem einer „Elektrizitätspumpe“ (z. B. einer Batterie).

2

In Abschnitt 1.1 des Skriptums wird gesagt, die Bilanzgleichung (1.1) mache eine Aussage über einen Raumbereich.

a) Nenne Relationen aus beliebigen Gebieten der Physik, die sich auf einen Punkt beziehen.

b) Nenne Beziehungen, die Größen, welche sich auf einen Punkt beziehen, mit anderen Größen verknüpfen, die sich auf einen Raumbereich oder eine Fläche beziehen. Nenne Beispiele. Welche mathematische Besonderheit haben diese Beziehungen?

c) Auf welche Art von geometrischem Gebilde beziehen sich die Werte der Größen des Ohmschen Gesetzes U , I und R ? Können diese Größen negative Werte annehmen? Wenn ja, was bedeuten diese negativen Werte?

3

Wie könnte man Einheiten und Vielfache der folgenden Größen festlegen?

Kraft, elektrische Ladung, elektrische Stromstärke

4

Diskutiere und vergleiche Messverfahren der folgenden mengenartigen Größen:

Masse, elektrische Ladung, Entropie, Impuls.

Gib Verfahren an, die die Messung der mengenartigen Größen nicht auf die Messung anderer Größen zurückführen. (Der Impuls soll also nicht über Masse und Geschwindigkeit bestimmt werden.)

5

Welche Teile des eingerückten Textes von Abschnitt 2.1 des Skriptums werden falsch, wenn man das Wort Wärme mit dem Wärmebegriff der traditionellen Physik identifiziert?

6

Diskutiere verschiedene Beispiele für Energieverluste. Wird die Energie in diesen Beispielen verbraucht, um Entropie zu erzeugen? Diskutiere die Frage, welche Entropieerzeugungsvorgänge sich im Prinzip vermeiden lassen. Welche Folgerung ergibt sich daraus für den Mindest-Energieverbrauch einer prosperierenden Gesellschaft?

7

Statt der Entropiekapazität $C_s = \Delta S/\Delta T$ wollen wir eine Größe $k = \Delta T/\Delta S$ definieren, also einfach den Kehrwert von C_s . Welche anschauliche Bedeutung hat diese Größe?

8 (Frage eines Studenten)

„Sie haben gesagt, die Temperatureinheit werde über die Temperatur am Tripelpunkt des Wassers festgelegt. Zur Festlegung einer Einheit muss man doch aber ein Intervall angeben, also zwei charakteristische Zustände.“

9 (Frage eines Studenten)

“Sie haben gesagt, gleichzeitig mit der Energie fließe immer noch mindestens eine andere mengenartige Größe. Gilt ein entsprechender Satz auch für andere mengenartige Größen? Gilt also zum Beispiel <Impuls fließt nie allein> oder <Elektrische Ladung fließt nie allein> etc?”

10

Diskutiere die Aussagen

„Die Größe X ist eine Erhaltungsgröße“, und „Die Größe X ist konstant“.

11

Bei einem Reibungsvorgang, an dem zwei Körper beteiligt sind, fließt Impuls vom Körper mit der höheren zum Körper mit der niedrigeren Geschwindigkeit.

Zeige, dass dieser Satz für die in der Abbildung dargestellten Situationen gilt.



12

Warum fühlen sich Metalle kälter an als Holz oder Plastik derselben Temperatur? Manchmal fühlt sich ein Metall wärmer an als Holz der gleichen Temperatur. Wann und warum?

13

In Schulbüchern findet man oft die Aussage, dass die Wassertemperatur am Boden eines Sees sowohl im Winter, wenn der See gefroren ist, als auch im Sommer $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ beträgt, da die Dichte des Wassers bei dieser Temperatur ihr Maximum hat. Analysiere das Problem genauer.

Handelt es sich bei der Temperaturverteilung um ein Gleichgewicht?

Kann das Wasser im See auch ganz gefrieren; kann es umgekehrt im Sommer auch am Boden über $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ erreichen?

Mach vernünftige Annahmen darüber von wo der See im Jahresverlauf geheizt bzw. abgekühlt wird. Überlege wie sich die Temperaturschichtung ändert. Welche Rolle spielen Konvektion und Wärmeleitfähigkeit?

14

Ein Sprengstoff ist ein Stoff, der von selbst in andere Stoffe zerfallen kann. Sein chemisches Potential ist höher als das der Zerfallsprodukte. Was kann man über den Widerstand der Reaktion sagen?

15

Nach welchen Kriterien entscheidet man, welche Terme in der Gibbsschen Fundamentalform berücksichtigt werden müssen? Welche Aussagen kann man mit ihrer Hilfe machen, welche nicht?

Wieviel Information enthält eine Gibbsfunktion des Systems?

Was ist der Unterschied zwischen den Begriffen System und Objekt?

16

Das chemische Potential entspricht der Energie, die man aufwenden muss, um zu einem System ein Teilchen hinzuzufügen. Das ideale Gas zeichnet sich dadurch aus, dass seine Teilchen wechselwirkungsfrei sind. Warum ist dann nicht $\mu_{\text{id. Gas}}(T, p, n) = E_0$ (Ruheenergie pro Teilchen) unabhängig von T und p ?

17

Erschiene uns die Sonne auch dann als gleichmäßig leuchtende Scheibe, wenn sie nicht kugelförmig, sondern beliebig verbeult wäre?

18

Sowohl beim Strahlungshohlraum, als auch beim Festkörper (bei kleinen Temperaturen) gilt $c_V \sim T^3$. Diskutiere die Gemeinsamkeiten und die Unterschiede.

19

Manchmal beobachtet man an einem Schornstein die folgende Erscheinung:

Unmittelbar über der Austrittsöffnung nichts, dann weiße Wolken und darüber wieder nichts.

Was kommt aus dem Schornstein? Erkläre die Beobachtung.

Wo kann man Ähnliches beobachten?

