



Der Karlsruher Physikkurs

für die Sekundarstufe II

**Thermodynamik**

**Unterrichtshilfen**

---

## Der Karlsruher Physikkurs

*Ein Lehrbuch für den Unterricht in der Sekundarstufe II  
Unterrichtshilfen*

- Elektrodynamik
- **Thermodynamik**
- Schwingungen, Wellen, Daten
- Mechanik
- Atomphysik, Kernphysik, Teilchenphysik

Herrmann

### **Der Karlsruher Physikkurs**

Auflage 2014

Bearbeitet von Prof. Dr. *Friedrich Herrmann* und Dr. *Holger Hauptmann*

Abbildungen: *F. Herrmann*

---



Lizenziert unter Creative Commons

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

---

# A

## Allgemeine Bemerkungen

---

---

Wie schon in der Version für die Sekundarstufe I des *Karlsruher Physikkurses* (KPK I), so steht auch beim vorliegenden Text für die Sekundarstufe II die Entropie im Mittelpunkt der Wärmelehre. Wer das Konzept noch nicht kennt, dem seien die Unterrichtshilfen zum KPK I (Herrmann 1998) empfohlen und außerdem die am Ende aufgelistete Literatur (Falk und Ruppel 1976, Job 1972, Fuchs 1996, Falk und Herrmann 1977–1982). Im Folgenden wird also nicht alles wiederholt, was ein Lehrer zu unserem Konzept wissen sollte, sondern es werden vorwiegend Themen angesprochen, die mit dem Unterricht der Sekundarstufe II zu tun haben.

## 1. Fehlende physikalische Größen

Eines der wichtigsten Werkzeuge des Physikhandwerks ist die physikalische Größe. Mit Hilfe physikalischer Größen wird die Natur mathematisch beschrieben. Die physikalischen Größen wurden nach und nach eingeführt, entdeckt oder konstruiert. Dabei offenbarte sich eine Ordnung oder Symmetrie, die Ausdruck einer entsprechenden Symmetrie der Phänomene ist, welche man mit ihnen beschreibt.

Einfache Beispiele solcher Symmetrien sind das Auftreten von Größenpärchen, wie etwa

- elektrische Feldstärke  $E$  und magnetische Feldstärke  $H$
- Masse  $m$  und Federkonstante  $D$
- elektrische Leitfähigkeit  $\sigma$  und thermische Leitfähigkeit  $\lambda$ .

Dass die beiden Partner eines Pärchens zusammengehören, erkennt man daran, dass sie in Gleichungen derselben mathematischen Struktur auftreten.

Es gibt auch Symmetrien, die sich auf mehr als nur zwei Variablen beziehen. Im *Karlsruher Physikkurs* spielt eine solche Symmetrie eine wichtige Rolle. Tabelle 1 bringt sie noch einmal in Erinnerung (siehe auch die Unterrichtshilfen zum KPK I).

Natürlich sind die Größen von Tabelle 1 nicht alle gleichzeitig erfunden worden. Es gab Zeiten, in denen nur ein Teil von ihnen bekannt war. Es leuchtet ein, dass, als das der Fall war, ein Schema wie das von Tabelle 1 hätte nahelegen können, die fehlenden Größen einzuführen. Ein solches Vorgehen wäre analog zu einem anderen, das jeder kennt: Als man das Periodensystem entdeckt hatte, wurde

---

extensive Größe	konjugierte intensive Größe	Strom	Energiestrom
elektrische Ladung $Q$	elektrisches Potenzial $\phi$	elektrische Stromstärke $I$	$P = U \cdot I$
Impuls $p$	Geschwindigkeit $v$	Kraft $F$	$P = v \cdot F$
Entropie $S$	absolute Temperatur $T$	Entropiestromstärke $I_S$	$P = T \cdot I_S$
Stoffmenge $n$	chemisches Potenzial $\mu$	Stoffstromstärke $I_n$	$P = \mu \cdot I_n$

**Tabelle 1**

schnell klar, dass es chemische Elemente geben musste, die bis dahin noch nicht entdeckt waren.

Die letzte noch fehlende Größe von Tabelle 1 war das chemische Potenzial. Es wurde von R. W. Gibbs eingeführt, der die Systematik erkannt hatte.

Obwohl nun die Tabelle und die ihr zu Grunde liegende Struktur seit mehr als 100 Jahren komplett ist, wird sie noch heute so dargestellt, als wäre sie unvollständig. Zwei der Größen sind nämlich so unbeliebt, dass sie in vielen Lehrbüchern überhaupt nicht vorkommen. Es sind

1. die Entropie und
2. das chemische Potenzial.

Vielerorts, wo man sie mit großem Nutzen verwenden könnte, tut man es nicht, ja man erfindet die merkwürdigsten Konstruktionen, nur um zu vermeiden, dass man es mit ihnen zu tun bekommt. Und wenn sie schließlich doch eingeführt werden, wird es so gemacht, dass man das Gefühl hat, sie seien nicht unentbehrlich.

Gerade die Entropie würde aber schon im Anfängerunterricht dringend gebraucht. Es wurden daher eine ganze Reihe von Ersatzgrößen konstruiert.

Was das chemische Potenzial betrifft, so werden im Anfängerunterricht diejenigen Fragen, die sich leicht mit dem chemischen Potenzial beantworten ließen, einfach nicht gestellt.

---

## 2. Ersatzkonstruktionen für die Entropie

### *Zur Geschichte des Wärmebegriffs*

Sie begann im 18. Jahrhundert, ist also jünger als die Mechanik. Der Chemiker und Arzt Joseph Black (1728–1799) erkannte, dass man zwischen einem Intensitätsmaß, d. h. einem Maß für die „Wärmheit“, und einem Mengenmaß für die Wärme unterscheiden muss. Das Intensitätsmaß war die damals schon bekannte Temperatur, das Mengenmaß wurde von Black eingeführt. Es wurde Wärme genannt (im Englischen „heat“, im Französischen „chaleur“). Die Black'sche Wärme war eine extensive Größe, und, in der Sprache der späteren Thermodynamik, eine Zustandsgröße, also ein ganz normales Mengenmaß. Aus moderner Sicht wäre sie mit dem zu identifizieren, was man später Entropie nannte (Falk 1985).

Den nächsten entscheidenden Schritt ging Sadi Carnot (1796–1832). In moderner Sprache ausgedrückt, stellte er die Verbindung zwischen Entropie und Energie her. Wie konnte er das, gab es doch damals weder die eine noch die andere Größe? Tatsächlich gab es die Entropie, wenn man nämlich die Black'sche Wärme als Entropie nimmt. Die Energie als Zustandsgröße wurde zwar erst kurz danach eingeführt; man darf aber nicht vergessen, dass die Arbeit ein längst bekannter Begriff war.

Damit waren die wichtigsten Grundlagen vorhanden, und die Entwicklung der Thermodynamik hätte einen gesunden weiteren Verlauf nehmen können, wenn nicht im Zusammenhang mit der Einführung der Energie ein Unglück passiert wäre. Das Unglück bestand natürlich nicht in der Einführung der Energie, sondern vielmehr in der damit verbundenen Euphorie, die so weit ging, dass man glaubte, außer der Energie brauche man keine andere extensive Größe, wenigstens was die Thermodynamik betrifft. Der Name Wärme wurde neu vergeben, und zwar für etwas, das besser gar keinen Namen bekommen hätte, nämlich für eine so genannte Prozessgröße.

Die Entropie war damit zunächst wieder aus der Physik verschwunden. Sie tauchte ohne eigenen Namen immer mal wieder in verschiedenen Veröffentlichungen auf, bis sie schließlich 1865 von Clausius offiziell neu eingeführt wurde. Das Clausius'sche Verfahren war aber so kompliziert, dass sie als eine der schwierigsten Größen der Physik überhaupt erschien. Der Name „Wärme“ hätte vielleicht helfen können, den Nachteil der komplizierten Einführung zu mil-

---

---

dern, aber der war ja inzwischen anderweitig vergeben. Die Größe bekam also den Namen, den sie heute noch trägt: Entropie.

Jahrzehntelang schien niemand zu bemerken, was geschehen war. Es wurde schließlich im Jahr 1911 von H. L. Callendar bemerkt, dem Präsidenten der englischen Physical Society, blieb aber ohne jegliche Folgen. Der Grund: Es war zu spät. Die Entropie lebte weiter in der Form, in die Clausius sie gebracht hat: eine durch ein Integral definierte Funktion, von der man sich nur schwer eine Anschauung bilden kann. Insbesondere ist an der Clausius'schen Einführung kaum zu erkennen, dass die Entropie Mengencharakter hat, d. h. dass sie fließen kann und dass man sie bilanzieren kann. Gerade ihre einfachen Eigenschaften kann man ihr also nicht ansehen. Dass sie eine bilanzierbare Größe ist, d. h., dass man für sie eine Kontinuitätsgleichung formulieren kann, wurde übrigens im selben Jahr 1911 in einer Publikation von G. Jaumann gezeigt.

### *Ein Mengenmaß für die Wärme*

Auf Grund unserer Alltagserfahrung ist es naheliegend, dass sich eine Größe definieren lassen muss, die dem entspricht, was man umgangssprachlich Wärme nennt. Eine Wärmflasche mit heißem Wasser enthält mehr davon als eine mit kaltem, und eine große enthält mehr als eine kleine derselben Temperatur. Dass man eine solche Größe einführen und direkt metrisieren kann, war seit dem 18. Jahrhundert bekannt. Wie wir gesehen haben, verschwand die Größe wieder aus der Physik.

Da man aber ohne ein Wärmemengenmaß nicht auskommt, wurden Ersatzgrößen konstruiert. Eine solche Ersatzgröße ist die Energieform Wärme, eine Prozessgröße, wie man sagt. Ihre Benutzung hat die Probleme zur Folge, die jedem Physiklehrer bekannt sind. Es sind Probleme, die durchaus nicht nur die Schüler haben. Es gibt genügend Fachphysiker, die bei dem Thema in Schwierigkeiten geraten. Die Konstruktion der Größe verführt die meisten Lernenden dazu, falsche Schlüsse zu ziehen.

So ist es zwar nicht falsch zu sagen, man führe einem Körper Wärme zu. Wenn man nun die unserer Sprache zu Grunde liegende Logik anwendet, so müsste man schließen, dass durch das Wärmezuführen die in dem Körper enthaltene Wärmemenge zunimmt. Eine solche Aussage ist aber falsch, und zwar nicht in dem Sinne, dass die Wärme vielleicht nicht zu-, sondern abnehme. Nein, der Körper

---

---

enthält weder viel noch wenig Wärme. Das Konzept lässt sich auf ihn gar nicht anwenden. Diese Wärme ist also nicht das Mengenmaß, das zu sein sie dem Lernenden vorspiegelt.

Im Anfängerunterricht findet die Gaukelei ihren Höhepunkt in den kalorimetrischen Versuchen. Bei deren Beschreibung tritt die Größe  $Q$  auf, die jeder Student oder Schüler als Wärmehalt interpretiert, auch dann, wenn sich der Lehrer alle Mühe gibt, kein falsches Wort zu sagen. Die Größe  $c$  nennt man spezifische Wärmekapazität, Fassungsvermögen auf deutsch – obwohl es nichts zu fassen gibt.

Da nun ein Wärmehaltsmaß nicht nur von den Lernenden erwartet, sondern ebenso von der Fachwissenschaft gebraucht wird, sind noch andere Ersatzkonstruktionen entstanden. So benutzt man in der Chemie gern die Enthalpie als Wärmemaß. Diesem Anspruch kann die Enthalpie einerseits natürlich nicht gerecht werden. Andererseits ist sie, als Legendretransformierte der Energie, eine so schwierige Konstruktion, dass sie dem schlichten Anspruch nach einem Mengenmaß auch nicht gerecht werden kann. Sie ist zwar immerhin eine Zustandsgröße, und man kann sie sicher als extensive Größe bezeichnen. Um eine anschauliche Größe zu sein, so wie etwa Energie oder elektrische Ladung, müsste sie aber bilanzierbar sein. Es müsste sich eine Kontinuitätsgleichung formulieren lassen. Das ist aber nicht der Fall. So gibt es keinen allgemeinen Satz über Erhaltung oder Nichterhaltung der Enthalpie.

### *Der Wirkungsgrad*

Maschinen sind unvollkommen in dem Maße, wie in ihnen Entropie produziert wird. Man verliert Energie nur wegen der Entropieproduktion. Alle anderen Verluste könnte man rückgängig machen.

Nun wird der Wirkungsgrad gewöhnlich ohne Entropie formuliert. So kann die eigentliche Ursache der Verluste nicht zum Ausdruck gebracht werden.

### *Der Wert der Energie*

Die Vorstellung ist, dass man der Energie einen Wert zuordnet. In vielen Prozessen verliert die Energie an Wert. Und wenn sie welchen gewinnt, so nur dadurch, dass andere Energie entwertet wird. Dies ist ein Beispiel dafür, dass eine Eigenschaft der Entropie einer anderen Größe zugeschrieben wird. Was an einem technischen

---



---

Prozess schlecht ist, ist gewöhnlich die Erzeugung von Entropie. Man drückt nun aber diese Verschwendung im Energiemaß aus, mit dem merkwürdigen Ergebnis, dass die Energie außer ihren bekannten Eigenschaften noch eine weitere Eigenschaft erhält, nämlich einen Wert.

### *Die Exergie*

Sie ist eine Konstruktion derselben Art. Sie wurde eingeführt zum Zwecke der Bewertung von Anlagen der thermischen und chemischen Verfahrenstechnik. Wo sind die Stellen, die sich verbessern lassen? Es sind natürlich einfach die Stellen, wo Entropie erzeugt wird. Je mehr Entropie erzeugt wird, desto größer das Potenzial für Verbesserungen der Anlage. Was macht man aber angesichts des Tabus, das auf der Entropie liegt? Man konstruiert eine Ersatzgröße.

### *Der zweite Hauptsatz*

Man kann ihn so formulieren:

*Entropie kann erzeugt, aber nicht vernichtet werden.*

Der zweite Hauptsatz ist also ein Satz von der Art, wie es mehrere andere gibt: Man kann über jede mengenartige Größe sagen, ob sie erhalten ist oder nicht, ob sie erzeugt oder vernichtet werden kann. Beispiele sind:

*Energie kann weder erzeugt noch vernichtet werden.*

*Impuls kann weder erzeugt noch vernichtet werden.*

*Elektrische Ladung kann weder erzeugt noch vernichtet werden.*

*Stoffmenge kann erzeugt und vernichtet werden.*

Wie formuliert man nun den zweiten Hauptsatz, wenn man den Entropiebegriff nicht benutzen will?

Die Clausius'sche Formulierung lautet so:

*Es ist unmöglich, Wärme von einem kälteren zu einem wärmeren Reservoir zu bringen, ohne in der Umgebung irgendwelche Veränderungen zu hinterlassen.*

Oder die Thomson'sche Formulierung:

*Es ist unmöglich, eine periodisch arbeitende Maschine zu konstruieren, die weiter nichts bewirkt als Arbeit zu leisten und ein Wärmereservoir abzukühlen.*

---

---

Natürlich sind diese Formulierungen richtig. Es sind aber sehr spezielle Formulierungen: Beide beziehen sich auf eine bestimmte Klasse von Prozessen, und ihre Tragweite ist nur schwer zu erkennen.

Nebenbei: In der Mechanik liegt eine ähnliche Situation vor. Die Newton'schen Axiome sind nichts anderes als eine verklausulierte Formulierung der Impulserhaltung. Auch die Impulserhaltung formuliert man hier unter Bezugnahme auf spezielle Vorgänge.

### *Thermische Maschinen*

Seit Carnot ist bekannt, wie man sie ganz einfach beschreiben könnte: So wie Wasser über ein Mühlrad von oben nach unten geht und dabei etwas antreibt, so geht in einer Wärmekraftmaschine Entropie von der hohen zur niedrigen Temperatur und treibt dabei etwas an. Die Entropiemenge ändert sich dabei nicht, so wie sich beim Wasserrad die Wassermenge nicht ändert.

Die Wärmepumpe, die es zu Carnots Zeit noch nicht gab, kann man entsprechend erklären: Mit Hilfe der Wärmepumpe wird Entropie von kalt nach warm befördert, so wie eine Wasserpumpe Wasser von tief nach hoch bringt. Eine Wärmepumpe ist also eigentlich eine Entropiepumpe.

Diese einfache Erklärung funktioniert nicht mit der Energieform „Wärme“.

### *Konvektiver Wärmetransport*

Mit Entropie geht es so: Man lädt die Entropie auf das Wasser, und wenn das Wasser irgendwie in Bewegung gesetzt wird, wird die Entropie mitgenommen. So einfach ist es. Was für eine Anstrengung und Verschleierung ist es aber, wenn man diesen Sachverhalt formulieren muss, ohne zu sagen, die Wärme stecke im Wasser.

### *Adiabatische Prozesse*

In Prozessen, die man gewöhnlich zur Thermodynamik zählt, benutzt man außer der Energie die vier Variablen Druck, Volumen, Temperatur und Entropie. Zwei davon können als unabhängige Variablen gewählt werden, die anderen folgen auf Grund der Zustandsgleichungen des betrachteten Systems. Um den Überblick zu

---

---

behalten, betrachtet man nun gewöhnlich Prozesse, bei denen eine Variable konstant gehalten wird. Es bleibt dann nur noch eine unabhängige Variable. Welche Größe konstant gehalten wird, bringt man normalerweise im Namen des Prozesses zum Ausdruck:

isobar ( $\beta\acute{\alpha}\rho\omicron\varsigma$  = schwer) für  $p = \text{const.}$

isochor ( $\chi\omega\rho\omicron\varsigma$  = Raum) für  $V = \text{const.}$

isotherm ( $\theta\epsilon\rho\mu\omicron\varsigma$  = warm) für  $T = \text{const.}$

Wie heißen aber die Prozesse mit  $S = \text{const.}$ ? Nicht etwa isentrop, sondern „adiabatisch“. So braucht man das ungeliebte Wort nicht auszusprechen. Es wird also nicht gesagt, welche Größe konstant bleibt, sondern wie man es anstellen kann, damit die Größe konstant bleibt: Man macht die Wände undurchdringlich ( $\alpha\delta\iota\alpha\beta\alpha\tau\omicron\varsigma$  = unpassierbar). Man benutzt die Bezeichnung übrigens auch dann, wenn es gar keine Wände gibt.

### *Das Temperaturgefälle in der Troposphäre*

Warum nimmt die Temperatur der Troposphäre nach oben hin ab? Die Frage ist sehr leicht zu beantworten, wenn man die Entropie zur Verfügung hat: Wenn man die Luft der Atmosphäre ordentlich durchmischt, so verteilt sich die Entropie gleichmäßig: Jedes Mol Luft hat gleich viel Entropie. Wenn sich ein Gas bei konstant gehaltener Entropie ausdehnt, so nimmt die Temperatur ab.

Diese einfachen Sachverhalte kann man ohne Entropie nicht formulieren. Das erklärt, warum ein so auffälliger und wichtiger Effekt in vielen Physikbüchern gar nicht angesprochen wird.

### *Phasenübergänge*

Wasser steht auf dem Herd und siedet. Die Beschreibung des Vorgangs mit der Entropie ist so: Von der Herdplatte fließt Entropie ins Wasser. Das Wasser verdampft. Da Dampf mehr Entropie enthält als flüssiges Wasser, muss man Entropie zuführen, wenn man es verdampfen will.

Wie lautet die Beschreibung des Vorgangs, wenn die Entropie nicht erwähnt werden darf?

Dem Wasser wird Energie in Form von Wärme zugeführt. Als Folge davon erhöht sich seine Enthalpie um den entsprechenden Betrag. Welcher Schüler kann mit diesem Satz etwas anfangen? Der Satz:

---

---

„Ich führe Wärme zu, also ändert sich der Wärmeinhalt“, ist bekanntlich falsch. Könnte man nicht wenigstens sagen: „Ich führe Enthalpie zu, also ändert sich die Enthalpie“? Nein, auch dieser Satz ist falsch. Versuchen wir es noch mit der Energie, in die wir vielleicht etwas mehr Vertrauen haben: „Ich führe dem Wasser Energie zu, also ändert sich sein Energieinhalt entsprechend“. Auch dieser Satz ist falsch, denn beim Verdampfen wird ein Teil der Energie dazu benutzt, die Atmosphäre etwas „anzuheben“.

### **3. Entropie und Leben**

Man liest oft Hinweise darauf, dass die Entropie eine Größe ist, die es gestattet, die Besonderheit von organischer oder sogar lebender Materie zu charakterisieren. Leben sei ein Zustand der Materie mit hoher Ordnung. Es wird nahegelegt, dass ein Widerspruch zum zweiten Hauptsatz zu befürchten ist. Dann wird mit einigem Aufwand nachgewiesen, dass der zweite Hauptsatz doch nicht verletzt ist.

Solche Überlegungen sind zwar nicht falsch, aber doch recht unangebracht.

Lebende Systeme zeichnen sich durchaus nicht dadurch aus, dass ihre Entropie besonders gering wäre. Ein lebender Mensch, der, sagen wir, 80 kg wiegt, hat etwa dieselbe Entropie wie ein Behälter mit 80 Liter Wasser derselben Temperatur. Das Wasser hat sogar weniger Entropie, wenn es eine niedrigere Temperatur hat als der Mensch, sagen wir 5 °C, und noch viel weniger, wenn es als Eisklotz vorliegt. Die Entropie ist einfach nicht das richtige Maß, um das zum Ausdruck zu bringen, was man zum Ausdruck bringen möchte.

### **4. Die statistische Einführung der Entropie**

Die Statistik ist eines der schönsten und elegantesten Teilgebiete der Physik. Wenn man in der Schule, besonders in der Oberstufe, Zeit dazu hätte, sollte man sie behandeln. Aber bleiben wir realistisch. Wenn man sie behandelt, so geht das auf Kosten der so genannten phänomenologischen Thermodynamik. Und jemand, der nur die statistische Thermodynamik lernt, kann kaum eines der Anwendungsprobleme lösen, die einem in der natürlichen und technischen Umwelt begegnen.

Die Entropie über die Unordnung einzuführen, ist, als ob man die Temperatur über einen Parameter in der Boltzmann-Verteilung –

---

---

statt über heiß und kalt einführt, wie wir es gewöhnlich tun. So mit der Temperatur zu beginnen, wäre einfach weltfremd. Genau so weltfremd ist es, die statistischen Eigenschaften der Entropie an den Anfang zu stellen.

## 5. Das chemische Potenzial

Die Situation ist ähnlich wie bei der Entropie; eigentlich ist sie sogar schlimmer. Allerdings schafft man hier auf eine einfachere Art als bei der Entropie Abhilfe: Fragen, auf die man mit Hilfe des chemischen Potenzials bequem antworten könnte, werden, wenigstens im Physikunterricht, gar nicht erst gestellt.

Dabei wäre es so einfach, die Größe anschaulich einzuführen. Ähnlich wie die Temperatur oder das elektrische Potenzial ist das chemische Potenzial ein Antriebsmaß. Es sagt uns, von wo nach wo etwas diffundiert, in welche Richtung ein Phasenübergang läuft oder in welche Richtung eine chemische Reaktion läuft.

Aus der Sicht der statistischen Physik ist es ein Parameter ganz ähnlich der Temperatur: Die Boltzmann-, Fermi-Dirac- und Bose-Einstein-Besetzungsverteilungen  $p(E)$  enthalten zwei solcher Parameter, nämlich die Temperatur  $T$  und das chemische Potenzial  $\mu$ .

$$\text{Bose-Einstein} \quad p(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-\mu}{kT}} - 1}$$

$$\text{Fermi-Dirac} \quad p(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-\mu}{kT}} + 1}$$

$$\text{Boltzmann} \quad p(E) = e^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$

Die Temperatur sagt uns, wie steil die Verteilungskurve ist; das chemische Potenzial gibt ihre vertikale Lage an.

Temperatur und chemisches Potenzial sind also zwei Größen, die auf besondere Art miteinander verwandt sind. Sie verdienen daher eine ganz ähnliche Behandlung im Unterricht. Bekanntlich kommt nun das chemische Potenzial im Physikunterricht gar nicht vor. So wird eben bei einem Phasenübergang einfach nicht danach gefragt, welches der Antrieb dafür ist. Wie merkwürdig die Situation ist, kann man sich etwa so klarmachen: Man stelle sich ein Lehrbuch vor, in dem jeder Hinweis auf die Temperatur fehlt.

---

---

CALLENDAR, H. L.: Proc. Phys. Soc. London 23, 153 (1911).

FALK, G.: Entropy, a resurrection of caloric – a look at the history of thermodynamics, Eur. J. Phys. 6, 108–115 (1985).

FALK, G. und HERRMANN, F., Hrsg.: Schriftenreihe „Konzepte eines zeitgemäßen Physikunterrichts“, Schroedel Schulbuchverlag, Hannover (1977–1982).

FALK, G. und RUPPEL, W.: Energie und Entropie, Springer-Verlag, Berlin (1976).

FUCHS, H.: The dynamics of heat, Springer-Verlag, New York (1996).

HERRMANN, F.: Der Karlsruher Physikkurs – ein Lehrbuch für die Sekundarstufe I, AULIS Verlag Deubner & Co KG, Köln (1998).

JAUMANN, G.: Geschlossenes System physikalischer und chemischer Differentialgesetze, Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien, Nat.-Naturw. Klasse, Abt. IIA **120**, 385–530 (1911)

JOB, G.: Neudarstellung der Wärmelehre – die Entropie als Wärme, Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt am Main (1972).

---

---

# B

**Bemerkungen zu den einzelnen  
Abschnitten**

---

---

# 1. Wärmelehre

## 1.7 Die Entropieleitfähigkeit

Ein Entropiestrom ist immer begleitet von einem Energiestrom. Die Beziehung zwischen den Stromstärken ist

$$P = T \cdot I_S.$$

Die Stromstärken von Energie- und Entropiestrom hängen zusammen mit dem thermischen Widerstand des Materials, durch den sie fließen. Um diesen Umstand auszudrücken, kann man entweder eine Leitfähigkeit definieren, die sich auf den Energiestrom, oder eine, die sich auf den Entropiestrom bezieht. Beide – die Energie- und die Entropieleitfähigkeit – sind äquivalent zueinander, wenigstens was die Mathematik betrifft.

Nun will es die Tradition, dass man die Energieleitfähigkeit benutzt. Sie heißt Wärmeleitfähigkeit, ihr Symbol ist  $\lambda$ . Sie hängt mit der Entropieleitfähigkeit, die wir durch das Symbol  $\sigma_S$  bezeichnen wollen, zusammen über

$$\lambda = \sigma_S \cdot T.$$

Beide Leitfähigkeitsmaße haben Vor- und Nachteile. Die Wärmeleitfähigkeit hat den Vorteil, dass die strömende Größe eine Erhaltungsgröße ist. In einem Leiter, in dem sich nirgends Energie anhäuft und der nicht verzweigt ist, ist die Energiestromstärke durch jeden Querschnitt gleich.

Dagegen hat die Entropiestromstärke begriffliche Vorteile. Zur Energie gibt es keine konjugierte intensive Größe, d. h., es gibt keine Antriebsgröße. Wenn man suggeriert, die Temperatur sei ein solches Maß, so sündigt man genau in dem vorn angesprochenen Sinn. Man schreibt der Energie eine Eigenschaft zu, die ihr nicht zukommt. Wenn man überhaupt das Bild von Antrieb und Widerstand benutzt, so ist die korrekte Anwendung die: Ein Temperaturgradient ist ein Antrieb für einen Entropiestrom und der Energiestrom fließt, weil an jeden Entropiestrom ein Energiestrom gekoppelt ist. Auch den elektrischen Widerstand definiert man nicht über den Energiestrom, sondern über den Strom der elektrischen Ladung.

Andere Tatsachen weisen ebenfalls darauf hin, dass  $\sigma_S$  und nicht  $\lambda$  das passende Maß für den Wärmewiderstand ist. So sagt das Wiedemann-Franz'sche Gesetz, dass die „Lorentz-Zahl“  $\lambda/(\sigma_Q \cdot T)$  für viele Metalle denselben Wert hat. Hier ist  $\sigma_Q$  die elektrische Leitfähigkeit.

---



---

Man sagt, der Quotient aus thermischer und elektrischer Leitfähigkeit sei proportional zur Temperatur, was nicht gerade leicht zu verstehen ist. Mit der Entropieleitfähigkeit ausgedrückt, sagt das Gesetz dagegen, dass der Quotient aus Entropie- und elektrischer Leitfähigkeit konstant ist. Dies ist einleuchtend, wenn man weiß, dass für den Entropietransport und für den Ladungstransport dieselben Teilchen zuständig sind, nämlich die freien Elektronen.

Wir haben uns im Karlsruher Physikkurs zugunsten der Entropieleitfähigkeit entschieden. Die Entropieerzeugung macht sich bei der Wärmeleitung häufig kaum bemerkbar, nämlich dann, wenn die Temperaturdifferenz klein gegen die absolute Temperatur ist. Die erzeugte Entropie spielt unter dieser Bedingung für die gesamte Entropiebilanz keine Rolle.

### **1.10 Der Zusammenhang zwischen Energie- und Entropiestrom**

Für die Herleitung der Gleichung

$$P = T \cdot I_S$$

wird dasselbe Verfahren benutzt, das in der Elektrizitätslehre angewendet wurde, um die Gleichung

$$P = U \cdot I$$

herzuleiten. Wir haben in beiden Fällen als plausibel unterstellt, dass sich beim Hintereinanderschalten von zwei „Pumpen“ (Elektrizitäts- bzw. Entropiepumpen) die entsprechenden „Potenzialdifferenzen“ (elektrische Potenzialdifferenz bzw. Temperaturdifferenz) addieren. Wenn man das akzeptiert, so ist ein Experiment gar nicht mehr notwendig. Das Ergebnis wird allein durch logisches Schließen gewonnen. Wer viel Wert auf eine axiomatisch saubere Einführung von Gleichungen legt, wird aber das vorgeschlagene Vorgehen als unbefriedigend empfinden.

Tatsächlich müsste man das Experiment ausführen, und das Ergebnis würde so lauten: Die Temperaturskala, die unserem Temperaturmessgerät zu Grunde liegt, ist gerade so eingerichtet, dass sich beim Hintereinanderschalten von Wärmepumpen die Temperaturdifferenzen addieren. Dieser Sachverhalt ist jedoch im Schulunterricht kaum zu vermitteln.

Außerdem müssen die Wärmepumpen, damit das Experiment funktioniert, reversibel arbeiten. Das trifft nun für unsere Peltiermodule

---

---

ganz und gar nicht zu. Wir bleiben also bei der etwas unsaubereren Argumentation und machen kein Experiment.

Wäre das Experiment möglich, so wäre das Ergebnis übrigens äquivalent zu der Aussage: Die absolute Temperatur, die unser Messgerät anzeigt, ist durch die Gleichung

$$T := \frac{P}{I_S}$$

definiert. Das bedeutet, dass man die Gleichung

$$P = T \cdot I_S$$

mit viel weniger Aufwand einführen könnte. Dass  $P$  proportional zu  $I_S$  ist, folgt aus der Mengenartigkeit von Energie und Entropie. Den Proportionalitätsfaktor nennt man Temperatur. Die Temperatur wird also über die Gleichung

$$P = T \cdot I_S$$

definiert.

Da den Schülern die Temperatur aus ihrer alltäglichen Erfahrung gut bekannt ist, würden sie dieses Vorgehen als weltfremd empfinden: Wozu eine Größe, die ich längst kenne, neu definieren?

### 1.14 Energieverlust und Wirkungsgrad

1. Energieverlust  $V$  und Wirkungsgrad  $\eta$  hängen zusammen über  $\eta = 1 - V$ .

Wenn man die Mängel einer Maschine beurteilen will, so ist die Ursache der Verluste der eigentliche Gegenstand der Betrachtung. Wir glauben also, die Größe  $V$  sollte die primäre der beiden Größen  $\eta$  und  $V$  sein.

Die Ausdrücke für den Verlust sind etwas einfacher als die für den Wirkungsgrad. Während der Carnot'sche Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2}$$

lautet, ist der „Carnot'sche Verlust“  $1 - \eta$  einfach der Quotient aus niedriger und hoher Temperatur:

$$V = \frac{T_1}{T_2}$$

Wir stellen daher die Betrachtung des Verlustes in den Vordergrund.

---

---

2. Ein Wirkungsgrad ist ein Maß, mit dem man eine Maschine hinsichtlich ihrer Energieverluste charakterisiert. Man versucht, ihn so definieren, dass er die folgenden Eigenschaften hat: Er soll eine dimensionslose Größe sein, deren Werte zwischen 0 und 1 liegen. Er soll den Wert 0 haben, wenn die Maschine wegen ihrer Energieverluste völlig unbrauchbar ist, und den Wert 1, wenn es prinzipiell unmöglich ist, die Maschine noch zu verbessern oder durch eine bessere zu ersetzen.

Üblicherweise wird der Wirkungsgrad etwa so definiert:

$$\eta = \frac{\text{in der gewünschten Form abgegebene Energie}}{\text{aufgenommene Energie}}$$

Solange weder die aufgenommene noch die in der „gewünschten Form“ abgegebene Energie Wärme ist, entspricht die Definition den oben formulierten Forderungen. Sobald aber eine der Energieformen die Wärme ist, oder in unserer Sprache, sobald einer der Energieträger an Ein- und Ausgang die Entropie ist, liefert die Definition Werte, die den Forderungen, die wir an eine Wirkungsgraddefinition stellen, nicht erfüllt. Wir betrachten als Beispiele drei Maschinen oder Geräte.

### *1. Die Wärmepumpe*

Eine gute Wärmepumpe gibt bekanntlich mehr Energie in Form von Wärme ab, als sie in elektrischer Form aufnimmt. Der Wirkungsgrad wäre also größer als 1. Um diese Unstimmigkeit auszuräumen, hat man dem Wirkungsgrad hier kurzerhand einen anderen Namen gegeben. Man nennt ihn Leistungsziffer.

### *2. Die Carnotmaschine*

Wir stellen uns vor, wie es üblich ist, die Maschine arbeite reversibel, d. h. ohne Entropieerzeugung. Der Wirkungsgrad, der sich nach der üblichen Definition ergibt, ist hier immer kleiner als 1, obwohl die Maschine im Sinne der Thermodynamik perfekt ist. Sie hat keine durch Entropieproduktion bedingten Verluste. Sie kann prinzipiell nicht verbessert werden. Dass der Wirkungsgrad trotzdem kleiner als eins ist, erscheint als eine schwer verständliche Besonderheit der Thermodynamik.

---

---

### 3. Die elektrische Widerstandsheizung

Ein Tauchsieder zum Beispiel: Da die elektrische Energie vollständig in Wärme umgewandelt wird, ergibt sich ein Wirkungsgrad von 1, obwohl eine solche Heizung ein notorischer Energieverschwender ist. Man kann sie verbessern, indem man sie durch eine Wärmepumpe ersetzt.

Diese Unzulänglichkeiten sind hausgemacht. Sie beruhen auf einer ungeschickten Wirkungsgraddefinition. Tatsächlich gibt es seit langem eine bessere Definition. Sie hat allerdings Eingang nur in die fortgeschrittene Fachliteratur gefunden und trägt Namen, die eher einschüchternd als Vertrauen erweckend wirken: Wirkungsgrad 2. Ordnung, exergetischer Wirkungsgrad oder „second law efficiency“. Dabei ist sie keineswegs komplizierter als die übliche Wirkungsgraddefinition. Man kann sie so formulieren:

$$\eta = \frac{P_{\text{ideal}}}{P_{\text{real}}}$$

Hier ist  $P_{\text{real}}$  der Energieverbrauch der realen, zu beurteilenden Maschine.  $P_{\text{ideal}}$  ist der Energieverbrauch einer Maschine, die dasselbe leistet wie die reale, die aber keine Entropie erzeugt, die also verlustfrei arbeitet.

Noch durchsichtiger wird die Definition, wenn man statt des Wirkungsgrades den Verlust betrachtet:

$$V = 1 - \frac{P_{\text{ideal}}}{P_{\text{real}}} = \frac{P_{\text{real}} - P_{\text{ideal}}}{P_{\text{real}}}$$

Die Differenz  $P_{\text{real}} - P_{\text{ideal}}$  im Zähler ist gerade der Verlustenergiestrom. Es ist der Energiestrom, der in der Maschine zur Entropieproduktion verwendet, oder besser, verschwendet wird. Wir können den Verlust damit noch einfacher formulieren:

$$V = \frac{P_{\text{Verlust}}}{P}$$

Hier ist  $P_{\text{Verlust}}$  der zur Entropieerzeugung verwendete Energiestrom und  $P$  ist der Energiestrom, den wir vorher mit  $P_{\text{real}}$  bezeichnet hatten, d. h. der Energieverbrauch der Maschine.

Mit dieser Definition werden alle vorher angesprochenen Unstimmigkeiten beseitigt. Für die reversibel arbeitende Wärmepumpe ergibt sich der Wirkungsgrad 1, ebenso für die Carnotmaschine.

---

---

Für eine elektrische Widerstandsheizung, wie für jede andere irreversibel arbeitende Heizung, deren Funktionsprinzip auf Entropieerzeugung beruht, ist in den Zähler

$$P_{\text{Verlust}} = T \cdot I_{S, \text{ erzeugt}}$$

einzusetzen, wobei  $T$  die Temperatur ist, bei der die Heizung die Entropie an den abliefern, der am Heizen interessiert ist. Soll beispielsweise ein Zimmer geheizt werden, so dass seine Temperatur  $25\text{ °C}$  ( $298\text{ K}$ ) beträgt, so ist  $T = 298\text{ K}$  und  $I_{S, \text{ erzeugt}}$  der bei dieser Temperatur von der Heizung angelieferte Entropiestrom.

### 1.16 Die Messung der Entropie

Das Kapitel ist relativ umfangreich geschrieben, allerdings mehr mit Rücksicht auf die Lehrer als auf die Schüler. Wir meinen, dass man es in verschiedenen kürzeren Varianten unterrichten kann:

1. Man lässt es ganz weg.
2. Man berechnet die Entropie aus dem Mittelwert des Entropiestroms am Anfang und am Ende der Messung.
3. Man setzt ein Modellbildungsprogramm ein, wie COACH oder STELLA. Man lässt die Integration vom Rechner ausführen, ohne dass die Schüler den Integralbegriff aus der Mathematik kennen müssen.

### 1.17 Die Erwärmbarkeit

1. Das Wort Kapazität bedeutet auf deutsch Fassungsvermögen. Wer das nicht weiß, ist in der Physik besser dran, denn das Wort suggeriert etwas, was nicht zutrifft, und zwar gleich in zweierlei Hinsicht.

Den ersten Mangel kann man anhand der elektrischen Kapazität besser verstehen. Ein Fassungsvermögen ist immer eine Angabe in derselben Maßeinheit, in der man die Menge dessen misst, was gespeichert wird. Das Fassungsvermögen eines Benzintanks in Litern, eines Lastwagens in Tonnen, eines Datenspeichers in Megabytes. Entsprechend müsste man das Fassungsvermögen eines Kondensators in Coulomb angeben. Es würde uns sagen, wie viel Coulomb maximal auf eine Kondensatorplatte passen. Tatsächlich sagt uns die Größe  $C$ , die elektrische „Kapazität“, etwas anderes: um wie viel sich die Ladung ändert, wenn die Spannung variiert. Sie sagt uns, wie schwer es ist, Ladung auf einen Kondensator zu bringen, wenn

---

---

man die elektrische Spannung als ein Maß für die Anstrengung nimmt. Der Name Kapazität für diese Größe ist nun so etabliert, dass es unrealistisch wäre, an eine Änderung zu denken. Auf jeden Fall sollte man vermeiden zu sagen, dass die Bedeutung der Größe die eines Fassungsvermögens ist, sondern statt dessen darauf hinweisen, dass der Name Kapazität die Sache nicht trifft.

Der Name Wärmekapazität ist aus einem zweiten Grund ungeschickt. Ein Fassungsvermögen für die Größe, die traditionell als Wärme bezeichnet wird, gibt es nämlich ohnehin nicht, denn als so genannte Prozessgröße hat die Wärme für den Zustand eines Systems keinen bestimmten Wert.

Eine Erwartung, die man von  $c$  hat, die diese Größe aber nicht erfüllt, wird dagegen erfüllt von der spezifischen Entropiekapazität  $c_S$

$$c_S = \frac{1}{n} \cdot \frac{\Delta S}{\Delta T}$$

Die molare spezifische Wärmekapazität  $c$  hängt mit ihr zusammen gemäß

$$c = T \cdot c_S.$$

Die beiden Größen unterscheiden sich also einfach um den Faktor  $T$ .

Die Entropiekapazität führt in der traditionellen Physik nur eine Randexistenz. Sie taucht gelegentlich in der Festkörperphysik unter dem Namen Sommerfeldkonstante auf.

Für uns hat sich allerdings die Frage, wie wir die Größe nennen könnten, gar nicht gestellt, da wir statt mit der spezifischen Entropiekapazität mit dem Kehrwert der Größe, der „Erwärmbarkeit“, operieren.

2. Statt der Entropiekapazität, die immerhin Vorteile gegenüber der Wärmekapazität hat, führen wir im Unterricht deren Kehrwert  $\alpha$  ein:

$$\alpha = \frac{n \cdot \Delta T}{\Delta S}$$

Die Größen  $\alpha$  und  $c_S$  sind äquivalent zueinander, so wie der spezifische Widerstand und sein Kehrwert, die elektrische Leitfähigkeit, äquivalent zueinander sind. Im Fall der Wahl zwischen der spezifischen Entropiekapazität und ihrem Kehrwert spricht einiges zugunsten des Kehrwerts.

---

---

Zum einen hat er eine einfache anschauliche Bedeutung: Er sagt uns, wie leicht es ist, die Temperatur eines Körpers zu erhöhen. Wir nennen die Größe  $\alpha$  daher „Erwärmbarkeit“.

Die Erwärmbarkeit ist groß, wenn man mit einer geringen Entropiezufuhr eine starke Temperaturzunahme bewirkt; sie ist klein, wenn eine große Entropiezufuhr nur eine geringe Temperaturerhöhung zur Folge hat.

Der wichtigere Grund für unsere Entscheidung ist jedoch ein anderer. Wenn man in einem Diagramm auftragen möchte, wie die Temperatur eines Körpers auf Wärmezufuhr reagiert, so wählt man am besten die Darstellung im  $T$ - $S$ -Diagramm. Warum? Als unabhängige Variable wählt man gewöhnlich die Ursache, also diejenige Variable, die man als Experimentator am leichtesten beeinflussen kann. Tatsächlich ist das, was wir tun, eine Wärme- bzw. Entropiezufuhr. Wir sehen nach, wie der Körper darauf reagiert: wie sich seine Temperatur ändert. Dies ist im Übrigen die Darstellung, die in der Thermodynamik üblich ist: die intensive Variable über der konjugierten extensiven. (Das bekannteste Beispiel ist das  $p$ - $V$ -Diagramm.)

Die Erwärmbarkeit ist nun einfach die Steigung der Kurve in diesem Diagramm. Die spezifische Wärmekapazität dagegen wäre der Kehrwert der Steigung. Besonders günstig wirkt sich unsere Wahl aus, wenn man Phasenübergänge betrachtet. Im  $T$ - $S$ -Diagramm äußert sich ein Phasenübergang (genauer: ein Phasenübergang erster Ordnung) in einem Plateau. Die Steigung der Kurve ist hier null. Der Stoff ist also, solange der Phasenübergang stattfindet, nicht erwärmbar. Man führt Wärme bzw. Entropie zu, aber die Temperatur nimmt nicht zu.

Die spezifische Wärmekapazität und die spezifische Entropiekapazität dagegen werden an diesen Stellen unendlich. Es entsteht der Eindruck, dass man es mit einer merkwürdigen Singularität zu tun hat.

**3.** Wir beziehen die Erwärmbarkeit auf die Entropie pro Stoffmenge und nicht auf die Entropie pro Masse. Hätten wir uns entschieden, mit der Wärmekapazität zu operieren, so hätten wir auch diese Größe über die Entropie pro Stoffmenge eingeführt. Tatsächlich ist es üblich, die spezifische Wärmekapazität als übertragene Wärmeenergie pro Temperaturerhöhung und Masse einzuführen. Für dieses Vorgehen spricht, dass man die Werte für diese Größe in den Tabellen findet, sowie, dass man die Masse einer Stoffportion leicht

---

---

ter bestimmen kann als die Stoffmenge. Andererseits hat aber das Mengenmaß Masse in der Thermodynamik ebenso wenig zu suchen wie etwa in der Elektrodynamik. Solange Trägheit und Schwere eines Stoffes keine Rolle spielen, ist die Masse das falsche Mengenmaß.

Wenn wir die Gasgleichung mit der Masse formulieren:

$$p \cdot V = m \cdot R_i \cdot T$$

so tritt eine materialabhängige „Gaskonstante“  $R_i$  auf. Das ist kein Wunder, denn die Eigenschaften Trägheit und Schwere, für die die Masse ein Maß ist, haben nichts mit den Zusammenhängen zu tun, die in der Gasgleichung zum Ausdruck kommen. Ähnlich ist es mit den anderen thermischen Eigenschaften der Materie, wie etwa der spezifischen Wärmekapazität und der Verdampfungswärme.

Die molaren spezifischen Wärmen der festen und flüssigen Elemente sind – bei hinreichend hoher Temperatur – untereinander ungefähr gleich. Diese Tatsache ist unter dem Namen Dulong-Petit'sches Gesetz bekannt. Bezieht man die spezifische Wärme oder auch die Erwärmbarkeit auf die Masse, so ist diese einfache Eigenschaft nicht mehr zu erkennen.

4. Im traditionellen Aufbau der Wärmelehre spielen kalorimetrische Mischungsversuche eine wichtige Rolle. Wir schlagen vor, ihre Wichtigkeit etwas zurückzunehmen. Es gibt hierfür mehrere Gründe.

Bei der traditionellen Vorgehensweise suggerieren diese Experimente und die üblichen Interpretationen eine falsche Vorstellung, die man später nur mit großer Mühe korrigieren kann: dass die Größe  $Q$  einen Wärmeinhalt darstellt. Man erzeugt ein Problem, das man ohne diese Art Vorbereitung nicht hätte.

Zum zweiten werden die Unterschiede der Werte der spezifischen Wärmekapazität für die verschiedenen Stoffe überbetont. Tatsächlich unterscheiden sich Wärmekapazitäten nur wenig, insbesondere, wenn man sie auf die Stoffmenge bezieht. Es gibt kaum einen Effekt, der auf einem besonders großen oder besonders kleinen Wert der spezifischen Wärmekapazität beruht. Man hört zwar manchmal, die Zentralheizung werde mit Wasser betrieben, weil die spezifische Wärmekapazität von Wasser so groß ist. Welche Flüssigkeit aber wäre denn sonst in Frage gekommen? Manchmal dient zur Rechtfertigung des Themas auch die Behauptung, der Unterschied zwischen Land- und Seeklima beruhe auf der unterschiedlichen Wärmekapazität von Erde und Wasser. Diese Erklärung ist nicht korrekt.

---



---

Das höhere Speichervermögen des Meerwassers beruht darauf, dass durch die Konvektion die Entropie im Meer in größeren Tiefen gespeichert werden kann als am Land.

5. Wir erkaufen uns die begriffliche Klarheit mit einem Zugeständnis an die praktische Bequemlichkeit.

Sowohl die traditionelle spezifische Wärmekapazität als auch die Entropiekapazität und deren Kehrwert, die Erwärmbarkeit, sind temperaturabhängig. Nun ist in einem großen Temperaturbereich oberhalb der Debye-Temperatur die spezifische Wärmekapazität nahezu temperaturunabhängig. Das ist ein Verhalten, das man von einer Materialgröße gar nicht erwarten kann. Vom spezifischen Widerstand bis zur magnetischen Permeabilität, von der Viskosität bis zur Kompressibilität – alle diese Größen ändern sich mit der Temperatur.

Die Entropiekapazität und die Erwärmbarkeit sind in dieser Hinsicht den anderen Materialgrößen ähnlicher.

Solange man es nur mit kleinen Temperaturänderungen zu tun hat, ist diese Temperaturabhängigkeit allerdings gar nicht wichtig. Man kommt durchaus mit Mittelwerten der Erwärmbarkeit aus.

---

---

## 2. Gase

### 2.3 Quantitative Zusammenhänge zwischen $S$ , $T$ , $V$ und $p$

1. Ein thermodynamisches System mit den Variablen  $S$ ,  $T$ ,  $V$  und  $p$  hat zwei Freiheitsgrade. Über die Werte von zwei dieser Variablen kann man verfügen, die beiden anderen ergeben sich auf Grund der Zustandsgleichungen, die das Gas charakterisieren.

Man kann diese Zusammenhänge auf die unterschiedlichsten Arten beschreiben, etwa, wie es häufig geschieht, durch die „thermische“ und die „calorische“ Zustandsgleichung. Eine Zustandsgleichung enthält dabei immer drei Variablen. Zwei davon kann man als unabhängig und eine als abhängig betrachten.

Nun interessiert man sich im Allgemeinen für den Zusammenhang zwischen nur zwei Variablen. Eine der beiden unabhängigen hält man konstant. Solche Zweierkombinationen, die allerdings nicht unabhängig voneinander sind, gibt es zwölf Stück, wie man leicht nachzählen kann. Die Wahl, welche dieser Zusammenhänge behandelt werden sollen, fällt nicht leicht.

Das Ergebnis unserer Überlegungen ist nicht originell. Wir behandeln die allgemeine Gasgleichung, die drei solcher Zweierbeziehungen enthält, sowie zwei der drei so genannten Adiabatangleichungen.

Daraus sind zwar alle fehlenden Beziehungen herleitbar; allerdings sind diese Herleitungen für den Schulunterricht zu schwierig.

So haben wir etwa auf die Diskussion der Entropie als Funktion des Volumens (bei konstanter Temperatur) verzichtet.

2. Der so genannte Adiabatenexponent  $\kappa$  wird gewöhnlich eingeführt als Quotient aus den spezifischen Wärmekapazitäten bei konstantem Druck und konstantem Volumen. Da wir die spezifischen Wärmekapazitäten nicht einführen, wäre es sinnvoller, den Exponenten selbst als Materialkonstante einzuführen. Wählt man nun noch statt dem üblichen  $\kappa$  die Größe  $\beta = \kappa - 1$ , so hat man es mit einer Größe zu tun, die selbst wieder eine einfache anschauliche Bedeutung hat. Dass die Temperatur zunimmt, wenn man ein Gas isentrop komprimiert, ist einleuchtend. Die Materialkonstante  $\beta$  sagt uns nun einfach, wie groß dieser Effekt ist.

3. Gleichungen werden oft nach verdienten Forschern benannt. So hat man einerseits die Möglichkeit, Personen für ihre Leistungen zu ehren, andererseits kann man sich auf eine Gleichung beziehen, in-

---

---

dem man einfach ihren Namen nennt: „Nach der zweiten Maxwell'schen Gleichung ist...“.

Es treten nun im Zusammenhang mit diesem Brauch einige Probleme auf.

Das erste: Wen soll man ehren? Manche Person kommt zu großem Ruhm, obwohl ihre Leistungen vielleicht längst nicht so bedeutend waren wie die einer anderen Person, die nicht das Glück hatte, dass man sie als Namenspatron für eine viel benutzte Gleichung auserwählt hat.

Ein anderes Problem: Dass eine Gleichung einen Namen hat, verleitet uns Lehrer nur all zu leicht dazu, eine Antwort auf eine bestimmte Art von Fragen als physikalische Einsicht misszuverstehen. „Wie lautet das Ohm'sche Gesetz?“ – „ $U$  gleich  $R$  mal  $I$ .“

Ein geradezu groteskes Beispiel für den Missbrauch von Namen ist die Gasgleichung.

Sie stellt eine der Zustandsgleichungen des idealen Gases dar. Für diese Zustandsgleichung gibt es nun noch zahlreiche, zueinander äquivalente Formulierungen. Keine dieser Gleichungen trägt einen Namen, mit Ausnahme der, die wir u. a. „thermische Zustandsgleichung des idealen Gases“ nennen, die aber noch eine ganze Reihe anderer Namen trägt, etwa „allgemeine“ und „universelle“ Gasgleichung. Da die Gleichung vier Variablen miteinander verknüpft, kann man aber, indem man jeweils zwei Variablen konstant hält, mehrere Zweierbeziehungen aus ihr machen. Diese Teilgesetze tragen wiederum die Namen von Forschern. Eines heißt Boyle'sches oder Mariotte'sches Gesetz oder auch Boyle-Mariotte'sches Gesetz; eines ist nach Gay-Lussac benannt, ein drittes nach Amontons, ein viertes nach Avogadro. Womit verdient sich die eine Zustandsgleichung so viele Namen, während die anderen Zustandsgleichungen gar keinen abbekommen?

---

---

## 3. Mengenartige Größen

### 3.4 Masse und Schwerepotenzial

Der in Abb. 3.8 skizzierte Vorgang läuft nur dann so ab, wie es im Text beschrieben wird, wenn zwei Bedingungen erfüllt sind:

1. Der Reibungswiderstand muss so hoch sein, dass die Energie nur im Rohr „dissipiert“ wird. In anderen Worten: Alle Entropie, die erzeugt wird, muss im Rohr erzeugt werden, und nicht dadurch, dass sich das zu schnell ausströmende Wasser verwirbelt.
2. Das Rohr (bzw. der Schlauch) muss eine konstante Querschnittsfläche haben.

Nur wenn beide Bedingungen erfüllt sind, ist der Druck über die ganze Rohrlänge konstant, sodass der einzige Antrieb die Schwerepotenzialdifferenz ist.

---

---

## 4. Stoffmenge und chemisches Potenzial

### 4.5 Der Zusammenhang zwischen chemischem Potenzial und Druck

Die wichtigste Gleichung von Kapitel 4 beschreibt den logarithmischen Zusammenhang zwischen chemischem Potenzial und Druck. Obwohl sie einen sehr einfachen Sachverhalt ausdrückt, ist ihre Herleitung recht problematisch.

Prinzipiell bieten sich zwei Wege an.

Die Gleichung folgt aus der allgemeinen Gasgleichung. Sie ist zu ihr äquivalent. Der erste Weg, sich die Gleichung zu beschaffen, wäre also die Herleitung aus der Gasgleichung. Dieser Weg, der sicher der sauberste wäre, kommt aber für die Schulphysik kaum in Frage. Die direkte Rechnung ist zu kompliziert, da sie partielles Ableiten erfordert. Man kann dieser Rechnung durch Tricks aus dem Weg gehen – etwa dadurch, dass man die Energiebilanz einer Pressluftmaschine aufstellt (Herrmann 1978). Immerhin ist noch die Integration der Funktion  $1/V$  erforderlich. Um sie zu umgehen, haben wir im vorliegenden Text einen weiteren Trick angewendet: das Parallel- und Hintereinanderschalten von Pressluftmaschinen. So kommen wir zwar auf den Logarithmus, die Betrachtung liefert aber nicht den Proportionalitätsfaktor  $RT$ . Außerdem sind die Argumente etwas schwerfällig, so dass die Konzentrationsfähigkeit der Schüler überfordert sein könnte.

Der zweite Weg, den man ins Auge fassen könnte, besteht darin, die Gleichung aus einem Experiment zu erschließen. Dieses Vorgehen ist zum einen unelegant, da der Eindruck entsteht, es handele sich um ein neues, von den bisher bekannten Gleichungen unabhängiges Gesetz. (Diesen Einwand kann man allerdings ebenso gegen andere physikalische Herleitungen erheben.) Ein anderes Problem besteht darin, dass die notwendigen Experimente nicht gerade bequem und transparent sind. Als ein Kandidat würde sich die Konzentrationszelle anbieten. Nun ist die Erklärung ihrer Funktionsweise aber so kompliziert, dass man dabei das eigentlich Ziel des Experiments leicht aus den Augen verliert. Es sei daran erinnert, dass die Konzentrationszelle prinzipiell irreversibel arbeitet.

Ein weiterer Kandidat für ein Experiment, das begrifflich einfacher ist, wäre die  $\lambda$ -Sonde, die im Autokatalysator verwendet wird. In der Tat stellt sie ein Gerät zur direkten Messung von chemischen Potentialdifferenzen dar. Das elektrische Signal am Ausgang der  $\lambda$ -Sonde

---

---

ist proportional zur Differenz der chemischen Potenziale des Sauerstoffs zwischen Messgas und Umgebungsluft. Ihr Nachteil besteht darin, dass sie nur bei hohen Temperaturen arbeitet, so dass das Experiment recht aufwendig ist.

Es bleibt schließlich noch ein dritter Weg. Er ist weder elegant noch begrifflich befriedigend, dafür aber sehr kurz, was auch ein Vorteil ist: Man gibt die Formel einfach an und operiert mit ihr. Auch so erzeugt man Vertrauen in ihre Zuverlässigkeit.

HERRMANN, F.: Chemische Energie in der Schule. Konzepte eines zeitgemäßen Physikunterrichts, Heft 2, S. 58. Hermann Schroedel Verlag KG, Hannover 1978.

---

---

## 5. Phasenübergänge

### 5.2 Der Antrieb für Phasenübergänge

Wenn eine extensive Größe eine Erhaltungsgröße ist, so ist der Nullpunkt der zugehörigen, energiekonjugierten intensiven Größe frei wählbar. Befolgt die extensive Größe keinen Erhaltungssatz, so kann über den Nullpunkt der intensiven Größe nicht verfügt werden.

Wenn eine extensive Größe sich nur unter bestimmten Umständen wie eine erhaltene Größe verhält, darf man den Nullpunkt der zugehörigen intensiven Größe frei wählen, solange man sich auf die Beschreibung von Erscheinungen beschränkt, bei denen die extensive Größe erhalten ist.

Tatsächlich gibt es für alle Nichterhaltungsgrößen Erscheinungsbereiche, in denen sie sich wie erhaltene Größen verhalten. Bei der Entropie etwa ist es die Menge aller reversiblen Prozesse.

Noch auffälliger ist in dieser Hinsicht das Verhalten der Größe Stoffmenge. Es gibt ganze Zweige der Naturwissenschaft, die sich geradezu dadurch definieren, dass die Stoffmengen bestimmter Stoffklassen Erhaltungsgrößen sind.

So befasst sich die Chemie mit denjenigen Stoffumwandlungen, bei denen die Stoffmengen der so genannten chemischen Elemente einem Erhaltungssatz genügen. Beim Einrichten einer chemischen Reaktionsgleichung macht man hiervon ausgiebig Gebrauch: Die Stoffmengen der Elemente müssen auf beiden Seiten der Reaktionsgleichung gleich sein. Sind sie es nicht, so hat man es mit einem Reaktionstyp zu tun, der nicht mehr zur gewöhnlichen Chemie gehört, sondern zur Kernchemie.

Solange man nur chemische Reaktionen ins Auge fasst, darf man daher die Nullpunkte der chemischen Potentiale aller chemischen Elemente frei wählen, und das tut man auch. Sobald Kernreaktionen hinzukommen, hat man diese Wahlmöglichkeit nicht mehr.

Es gibt nun aber Stoffumwandlungen, bei denen nicht nur die Stoffmengen der chemischen Elemente erhalten bleiben, sondern sogar die Stoffmengen aller reinen Stoffe. Wenn in der Reaktionsgleichung links ein Mol Wasser steht, so steht es auch rechts. Diese Reaktionen rechnet man traditionell wieder der Physik zu, und man nennt sie Phasenübergänge. Sie sind der Gegenstand unseres Kapitels 5.

Wie man bei der Behandlung chemischer Reaktionen, die Nullpunkte der etwa 100 chemischen Elemente frei wählen kann, so kann

---

---

man, wenn man sich auf die Behandlung von Phasenübergängen beschränkt, die Nullpunkte aller reinen Stoffe frei wählen. Wir haben von dieser Möglichkeit bei der Angabe der Werte in Tabelle 5.1 Gebrauch gemacht.

---



---

## **6. Gekoppelte Ströme**

### **6.1 Ein Stoff – mehrere Energieträger**

Wir haben den „Energieträger“ Impuls hier nicht einbezogen. Das hätte uns gezwungen, die Geschwindigkeitsabhängigkeit des chemischen Potentials zu diskutieren. (Das chemische Potential ist tatsächlich  $v$ -abhängig.) Dieses Thema ist aber für den Schulunterricht nicht geeignet.

---

## 7. Thermische Strahlung

### 7.2 Das Lichtgas – thermische Strahlung

Für die grafische Darstellung von Spektren kann man verschiedene Abszissen wählen: Frequenz, Wellenlänge, Wellenzahl oder Photonenenergie. Je nach Erscheinungsbereich hat sich ein anderer Brauch etabliert.

Bei Radio und Fernsehen benutzt man durchweg die Frequenz. Von den Mikrowellen bis ins ultraviolette Spektralgebiet sind Wellenlänge und Wellenzahl das übliche Maß, und vom Röntgengebiet an aufwärts (auf der Frequenzskala) nimmt man die Energie der Photonen, die bis auf eine universelle Konstante gleich der Frequenz ist, als Maß.

Der Grund für eine so unsystematische Benutzung unterschiedlicher Skalen beruht auf den unterschiedlichen Messverfahren. Während man in der Radiotechnik die Frequenz direkt mit dem Oszilloskop misst, bestimmt man im Bereich der optischen Strahlung die Wellenlänge über Interferenzerscheinungen. Für Kern- und Teilchenreaktionen benutzt man „Beschleuniger“, so dass man die Energie der Teilchen und damit auch der Gamma-Photonen direkt bestimmt.

Die Schulphysik sollte derartige Angewohnheiten nicht unbedingt übernehmen. Insbesondere, wenn es um ein Thema geht, bei dem die verschiedensten Strahlungen vorkommen, also sowohl aus dem Radio- als auch aus dem optischen und dem Röntgen- und Gammabereich, muss man sich für eines der Maße entscheiden.

Hat man zwischen Frequenz und Wellenlänge zu entscheiden, so fällt die Wahl eindeutig auf die Frequenz. Da sie bis auf universelle Konstanten mit Energie und Impuls der Photonen identisch ist, ist sie sicher die fundamentalere der beiden Größen.

Man beachte, dass das Maximum der Planckkurve nicht an derselben Stelle liegt wie wenn man die Wellenlänge als Abszisse des Spektrums wählt.

---

---

## 8. Entropieströme in den Gashüllen von Planeten und Sternen

### 8.1 Die Troposphäre

1. Die Atmosphäre ist ein komplexes System. Um ihre Energiebilanz im Rahmen der Schulphysik zu aufzustellen, muss man vereinfachen. Es trägt nicht viel zum Verständnis bei, wenn man die zahlreichen Beiträge zu den Energieströmen behandelt, als wären sie alle gleich wichtig. Energieflussbilder, wie man sie von den Meteorologen bekommt, sind unserer Meinung nach unnötig kompliziert und für die Schule ungeeignet.

Wer die entsprechenden Darstellungen kennt, wird bemerken, welche Vereinfachungen wir eingeführt haben. Demjenigen, der sie nicht kennt, wird ihr Fehlen gar nicht auffallen.

2. Die Treibhausgase beeinflussen die Wärmebilanz der Erde über die Absorption von Infrarotstrahlung. Will man den Einfluss dieser Gase verstehen, muss man eine sorgfältige Bilanz der mit der Strahlung transportierten Energie machen.

Diese Bilanz wird nun oft etwas missverständlich durchgeführt. Zum Beispiel heißt es, die Erde gebe im Mittel etwa  $393 \text{ W/m}^2$  mit elektromagnetischer Strahlung ab und  $106 \text{ W/m}^2$  als „fühlbare“ und „latente“ Wärme. Dabei entsteht der Eindruck, die Strahlung sei für den Abtransport der Wärme besonders wichtig. Die Bedeutung der Strahlung wird dadurch noch gewaltiger, dass ein Strahlungsstrom von etwa  $342 \text{ W/m}^2$  von der Atmosphäre zurück in die Erde fließt. Durch diese Betrachtung wird die Bedeutung der Strahlung unnötig aufgeblasen. Passender wäre es, von vornherein nur den Nettostrahlungsstrom zu betrachten.

Natürlich kann man den Nettostrahlungsstrom zerlegen in zwei Anteile entgegengesetzter Richtung, aber eine solche Zerlegung verursacht eher Verwirrung als Klarheit. Auf dieselbe Art könnten wir alle Infrarotstrahlung um uns herum zerlegen. Welche Einsicht bringt es, wenn wir wissen, dass überall sehr viel Energie nach rechts und ebenso viel nach links fließt? Andere Ströme als den Energiestrom könnte man ebenfalls auf diese Art zerlegen, und käme man zu dem Schluss, in einem Draht, selbst wenn er an keine elektrische Energiequelle angeschlossen ist, fließe ein elektrischer Strom gewaltiger Stärke in die eine Richtung und ein ebenso starker in die andere.

---

---

Dem Zerlegen des Photonenstroms in der Atmosphäre würde auch ein Zerlegen des Phononenstroms in einem festen Körper entsprechen, durch den ein Wärmestrom fließt. Man würde dann einen Wärmestrom, der durch einen Glasstab fließt, so beschreiben: Es fließt ein Phononenstrom in die eine Richtung und ein fast, aber nicht ganz gleich großer in die entgegengesetzte Richtung.

In unseren Bilanzen tritt nur der mit der Strahlung verbundene Nettoenergiestrom auf. Das sind nur  $51 \text{ W/m}^2$ , also viel weniger als der konvektiv fließende Energiestrom.

**3.** Eine weitere begriffliche Vereinfachung ergibt sich, wenn man den Unterschied zwischen „fühlbarer“ und „latenter“ Wärme nicht zu sehr betont – bei uns müsste es fühlbare und latente Entropie heißen –, sondern auf ihre Gemeinsamkeit hinweist. Bei beiden handelt es sich um Entropieströme, die nicht einen Temperaturunterschied als Antrieb haben, also um konvektive Ströme. Die Entropie wird an der Erdoberfläche der Luft mitsamt ihrem Wasser zugeführt, und dann durch thermische Konvektion nach oben getragen.

### **8.3 Schichtungen von Gasen**

Der Zustand der indifferenten Schichtung eines Gases ist ein Gleichgewichtszustand. Das Gleichgewicht ist jedoch von einer besonderen Art. Es ist offensichtlich kein thermisches Gleichgewicht – die Temperatur ist ja nicht konstant. Es ist kein gravito-chemisches, denn auch dieses ist hier nicht konstant. Tatsächlich handelt es sich um ein „gravito-thermo-chemisches“ Gleichgewicht: Die Summe aus den drei Größen Gravitationspotenzial, Temperatur und chemisches Potenzial (mit geeigneten Maßsystemsfaktoren) ist konstant, d. h. unabhängig von der Höhenkoordinate.

Für den Schulunterricht ist diese Erklärung sicher zu kompliziert. Wir haben das Ergebnis des Durchmischens daher mit einem anderen Argument plausibel gemacht, dessen Gültigkeit wir aber nicht bewiesen haben. Wir haben uns darauf verlassen, dass es vernünftig erscheint, dass sich ein Zustand einstellt, in dem die Entropie pro Stoffmenge konstant ist.

---

---

# C

**Versuche**

---

---

# 1. Wärmelehre

## 1.1 Entropie und Temperatur

1. Messung der Temperaturen verschiedener Körper mit verschiedenen Messgeräten, z.B.
  - mit einem Quecksilberthermometer die Temperatur des kalten und des warmen Wassers aus der Leitung, die Temperatur der Luft am Boden und an der Decke des Klassenzimmers;
  - mit dem elektrischen Temperaturmessgerät die Temperatur an verschiedenen Stellen einer Bunsenbrennerflamme, die Temperatur von flüssiger Luft.
2. Man gießt, wie im Schülertext beschrieben, heißes Wasser in andere Gläser um.

## 1.2 Der Temperaturunterschied als Antrieb für einen Entropiestrom

1. Man führt den im Schülertext beschriebenen Versuch zum Temperaturengleich aus.
2. Man misst mit dem elektrischen Temperaturmessgerät die Temperatur verschiedener Gegenstände im Klassenzimmer: Gegenstände aus Metall, Holz, Beton etc. Um beim Berühren mit der Messsonde einen guten thermischen Kontakt zu erreichen, bringt man einen Tropfen Öl an die Stelle, an der die Temperatur gemessen werden soll. (Wasser würde wegen der Verdunstung das thermische Gleichgewicht stören.)

## 1.3 Die Wärmepumpe

1. Man stellt, wenn möglich, einen Kühlschrank im Klassenzimmer auf, lässt ihn laufen und identifiziert Wärmepumpe, Entropieeingang und Entropieausgang.
  2. Falls in der Sammlung eine Wärmepumpe vorhanden ist, lässt man sie laufen und erklärt, was mit den bisher im Unterricht erarbeiteten Mitteln erklärbar ist.
  3. Man lässt ein Peltiermodul als Wärmepumpe laufen. Man misst die Temperatur am Eingang und am Ausgang für die Entropie. Man lässt die Schüler die kalte und die heiße Seite mit den Fingern berühren.
-

---

## 1.4 Die absolute Temperatur

Hier wird nur ein Gedankenexperiment gemacht: Ein Ziegelstein wird mit immer perfekteren Kältemaschinen abgekühlt.

## 1.5 Entropieerzeugung

1. Obwohl in jeder Glühlampe und in den meisten anderen elektrischen Geräten Entropie erzeugt wird, macht man das folgende Experiment: Durch einen nicht zu dünnen Draht wird ein sehr starker elektrischer Strom geschickt, so dass der Draht zu glühen beginnt.

2. In eine elektrische Handbohrmaschine wird ein stumpfer Bohrer oder einfach ein dicker Nagel eingespannt. Man versucht dann, ein Loch in einen harten Stein oder ein Stück Beton zu bohren. Der Bohrer bzw. Nagel beginnt zu glühen.

3. Man führt verschiedene irreversible und (nahezu) reversible Vorgänge vor:

Man lässt einen Gegenstand fallen. Der Fallvorgang ist reversibel, der Auftreffvorgang irreversibel.

Der Lehrer versteckt sich hinter dem Lehrerpult und wirft einen Gegenstand in die Luft, so dass die Schüler weder den Abwerfvorgang noch den Auftreffvorgang sehen können. Der Teil des Gesamtvorgangs, den die Schüler sehen, ist (fast) reversibel.

Die Bewegung eines Pendels ist nahezu reversibel. Beobachtet man sie nur kurze Zeit, so ist die Irreversibilität nicht zu erkennen. (An einem kurzen Ausschnitt eines Films, in dem ein Pendel zu sehen ist, erkennt man nicht, ob der Film in die richtige Richtung läuft.)

## 1.7 Die Entropieleitfähigkeit

Da die Wärmeleitungsgleichung dieselbe Gestalt hat wie die Gleichung, die den elektrischen Strom als Funktion von Potenzialdifferenz, Leiterlänge und Leiterquerschnitt beschreibt, könnte man hoffen, dass sich hier in der Wärmelehre Experimente machen lassen, wie wir sie aus der Elektrizitätslehre kennen. Tatsächlich muss man aber feststellen, dass wir von der Elektrizitätslehre her verwöhnt sind. Für elektrische Ströme gibt es sowohl sehr gute Leiter als auch hervorragende Nichtleiter. Außerdem gibt es bequeme Strommessgeräte. Das alles ist in der Wärmelehre weniger schön. Es gibt weder gute Wärmeleiter noch gute Wärmenichtleiter. Die Messung von

---

---

Entropieströmen ist zwar auf dem Papier ganz einfach. Praktisch aber ist sie mühsam und ungenau. Statt das Vertrauen der Schüler in die Gesetze der Wärmelehre durch schlecht funktionierende Messungen zu erschüttern, schlagen wir vor, sich auf qualitative Versuche zu beschränken.

1. Die Wärmeleitfähigkeit verschiedener fester Materialien wird qualitativ untersucht.

2. Ein Experiment zur Wärmeleitfähigkeit von Wasser: In einem Reagenzglas befindet sich kaltes Wasser, und am Boden des Reagenzglases liegt ein Stück Eis. Um das Eis am Aufsteigen zu hindern, wurde es mit einem Stück Draht beschwert. Man hält das Glas schräg über eine Bunsenbrennerflamme, so dass es in seinem oberen Teil erhitzt wird. Das Wasser im oberen Teil beginnt zu sieden, während das Eis am Boden nicht schmilzt. Man misst die Temperaturen oben und unten im Glas. (Man muss das Eis unten halten und oben erhitzen, um eine stabile Schichtung des Wassers zu erreichen, d. h. um die natürliche Konvektion zu verhindern.)

3. Manche Materialien fühlen sich kälter an als andere Materialien derselben Temperatur. Hierzu werden die folgenden Experimente gemacht: Ein Stück Holz und ein Stück Eisen (oder anderes Metall) werden gekühlt (entweder direkt im Kühlschrank oder mit Hilfe einer Eis-Wasser-Mischung) und dann von verschiedenen Schülern berührt. Das Eisen fühlt sich kälter an. Beide Gegenstände werden dann in kochendem Wasser erhitzt und wieder berührt. Diesmal fühlt sich das Eisen wärmer an.

## **1.8 Entropietransport durch Konvektion**

1. Die Zentralheizungsanlage der Schule wird besichtigt.
2. Das Zentralheizungsmodell wird vorgeführt und diskutiert.
3. Die Kühlanlage eines Automotors wird identifiziert.

## **1.9 Die Entropie als Energieträger**

Ein Tauchsieder oder ein anderes elektrisches Heizgerät steht auf dem Tisch, nur um Ein- und Ausgänge für Energie, Entropie und elektrische Ladung zu identifizieren.

---



---

## 1.10 Der Zusammenhang zwischen Energie- und Entropiestrom

Damit das Experiment die Aussage liefert, die wir brauchen, müssten die Wärmepumpen reversibel arbeiten. Peltier-Wärmepumpen arbeiten aber sehr irreversibel. Das „Experiment“, das im Schülertext diskutiert wird, ist also als Gedankenexperiment zu betrachten.

## 1.12 Wärmemotoren

Man lässt verschiedene Wärmekraftmaschinen oder „Wärmemotoren“ laufen und untersucht jedes Mal, wo die Entropie auf hoher Temperatur in die Maschine eintritt, und wo sie auf niedriger Temperatur wieder austritt. Man wird, je nach Umständen, Details der Funktionsweise der Maschinen diskutieren.

### 1. Die Stirlingmaschine

Man lässt sie sowohl als Wärmepumpe als auch als Wärmemotor laufen. Wenn sie als Wärmemotor läuft, zeigt man, dass der Ausgang für die Entropie genau so wichtig ist wie der Eingang: Man stellt die Heizung sehr schwach, so dass die Maschine gerade eben noch läuft, und dreht dann das Kühlwasser ab. Nach wenigen Minuten kommt die Maschine zum Stillstand. Lässt man das Kühlwasser wieder fließen, so beginnt sie wieder zu laufen.

### 2. Das Peltiermodul

Peltiermodule sind im Elektronikfachhandel erhältlich. An das Modul wird ein kleiner Elektromotor angeschlossen. Das Modul wird betrieben etwa zwischen einem Becherglas mit heißem Wasser und einem mit kaltem Wasser. Eine andere Möglichkeit: Eine Seite des Moduls wird mit einem Metallklotz gekühlt, die andere mit einem warmen Bügeleisen in Kontakt gebracht.

### 3. Die Dampfmaschine

Es lohnt sich, eine gewöhnliche Spielzeugdampfmaschine vorzuführen, da viele Schüler noch nie eine Dampfmaschine haben laufen sehen. Ein viel schöneres Experiment kann man mit einer Dampfmaschine mit Kondensator machen, die es allerdings in kaum einer Schulsammlung gibt. Man dreht auch hier das Kühlwasser ab. Man kann nun gut verfolgen, wie der Druck im Kondensator nach und nach ansteigt, bis er schließlich gleich dem Kesseldruck ist. Die Maschine kommt natürlich dabei zum Stillstand. Nach dem Wiederauf-

---

---

drehen des Kühlwassers beginnt die Maschine wieder zu laufen, und zwar sehr schnell.

#### 4. Der Verbrennungsmotor

Man lässt einen Mofamotor laufen. Die Abgase leitet man über einen Schlauch ins Freie. Man nützt die Gelegenheit, Einzelheiten des Verbrennungsmotors zu erklären. (Man baut z.B. die Zündkerze aus, lässt sie aber angeschlossen, und versetzt die Motorwelle in Drehung, so dass der Zündfunke zu sehen ist.)

Es gibt eine Reihe von Spielzeugen, die nach dem Prinzip einer Wärmekraftmaschine arbeiten:

#### 5. Weihnachtsmühle

#### 6. Das Dampf-Bötchen

#### 7. Der Gummimotor

Ein Rad, dessen Speichen aus Gummi bestehen, wird auf einer Seite mit einer Glühlampe erhitzt. Die Gummispeichen ziehen sich auf der warmen Seite zusammen. Dadurch verlagert sich der Schwerpunkt des Rades nach außerhalb der Achse, und das Rad beginnt sich zu drehen.

### 1.14 Energieverlust und Wirkungsgrad

Man misst den Energieverlust verschiedener Geräte.

#### 1. Netzgerät, Transformator

Das Gerät muss selbstverständlich belastet sein. Man misst die Energiestromstärke am Eingang und am Ausgang mit dem Wattmeter. Man kann zeigen, dass der Verlust von der Belastung abhängt.

#### 2. Verlängerungskabel

Mit einem Wattmeter misst man den Verlust eines sehr langen (z.B. 50 m) belasteten Verlängerungskabels. (Er ist sehr gering.)

#### 3. Dynamo

Auf die Welle eines guten Dynamos oder als Dynamo verwendbaren Elektromotors wird eine Schnur gewickelt. An die Schnur hängt man ein Gewichtsstück. Man lässt das Gewichtsstück nach unten laufen, so dass es die Dynamowelle antreibt. An den Dynamo ist ein elektrischer Energieverbraucher angeschlossen. Die Stärke des hineinfließenden Energiestroms bestimmt man über Kraft und Geschwindigkeit, die des herausfließenden mit einem Wattmeter.

---

---

#### 4. Flaschenzug

Ein Flaschenzug wird aufgehängt. An den (langsam laufenden) Haken wird ein Gewichtsstück gehängt. An das (schnell laufende) Seil hängt man einen Federkraftmesser. Man zieht nun am anderen Ende des Federkraftmessers. Da man das geometrische Übersetzungsverhältnis des Flaschenzuges kennt, kennt man auch das Verhältnis der beiden Geschwindigkeiten. Über Kräfte und Geschwindigkeiten werden die Energiestromstärken bestimmt. Besonders geeignet ist ein recht großer Flaschenzug, wie man ihn im Baumarkt kaufen kann.

#### 1.16 Die Messung der Entropie

1. Man legt eine „Eichtabelle“ für einen Tauchsieder an: Man bestimmt die Stärke des Entropiestroms, den der Tauchsieder an ein Wasserbad abgibt, für verschiedene Werte der Temperatur. Dazu misst man mit dem Wattmeter die Stärke des Energiestroms, der in den Tauchsieder hineinfließt. (Die Wattangabe, die auf das Gerät gedruckt ist, ist nicht zuverlässig.) Man überzeugt sich davon, dass die Energiestromstärke unabhängig von der Temperatur ist, dividiert die Energiestromstärke durch verschiedene absolute Temperaturwerte zwischen 273 K und 373 K (etwa in Schritten von 20 K) und erhält so die Entropiestromstärkewerte für die jeweiligen Temperaturen.

2. Die Temperatur von 5 l Wasser in einen Plastikeimer wird als Funktion der mit einem Tauchsieder zugeführten Entropie bestimmt. Der Versuch ist besonders unproblematisch, wenn man ihn bei Umgebungstemperatur ausführt: Wärmeverluste sind dann vernachlässigbar.

#### 1.18 Der Zusammenhang zwischen Energiezufuhr und Temperaturänderung

Man bestimmt die spezifische Wärmekapazität von Wasser. Man erhitzt mit dem Tauchsieder, misst die Energiestromstärke mit dem Wattmeter und misst die Temperatur als Funktion der Zeit.

---

---

## 2. Gase

### 2.1 Gase und kondensierte Stoffe

1. Man zeigt, dass Luft beim Einströmen in ein evakuiertes Gefäß den ganzen zur Verfügung stehenden Raum einnimmt, Wasser dagegen nicht.
2. Ein Kolbenprober enthält Luft. Der Kolben lässt sich hineindrücken. Ist der Kolbenprober mit Wasser gefüllt, so lässt sich der Kolben nicht hineindrücken. Daran ändert sich auch nichts, wenn sich im Wasser noch ein Festkörper befindet.
3. Man demonstriert die starke thermische Ausdehnung von Luft, Abb. 2.4 im Schülertext.

### 2.2 Qualitative Zusammenhänge zwischen $S$ , $T$ , $V$ und $p$

1.  $V = \text{const}$ , verändern von  $S$

Man erwärmt die Luft in einem geschlossenen Behälter, an den ein Manometer angeschlossen ist. Der Druck nimmt zu. (Es lohnt sich nicht zu zeigen, dass auch die Temperatur zunimmt.)

2.  $T = \text{const}$ , verändern von  $V$

Der Kolbenprober wird vertikal montiert, so dass der Kolben nach oben weist. Der Kolben wird mit einem Gewichtsstück belastet. Man sieht, dass das Volumen zunimmt. Wegen der höheren Last muss der Druck ebenfalls zugenommen haben. (Man könnte auch ein Manometer anschließen.) Wenn man etwas wartet, kann man sicher sein, dass die Temperatur wieder Normaltemperatur ist.

3.  $S = \text{const}$ , verändern von  $V$

In einen geschlossenen Kolbenprober ist ein Temperaturfühler eingebaut. Man komprimiert die Luft und beobachtet eine Temperaturerhöhung.

4. Die Temperaturerhöhung, die man beobachtet, wenn man ein Gas zusammendrückt, ist nicht sehr groß. Sie wäre viel größer, wenn Temperaturfühler und Zylinderwände nicht so viel Entropie aufnehmen. Man erreicht aber eine recht große Temperaturerhöhung durch einen Trick:

In die Luftaustrittsöffnung einer Fahrradpumpe wird der Temperaturfühler eingeführt. Die Öffnung wird mit einer Dichtung so verschlossen, dass sie nicht ganz dicht ist. Drückt man nun den Kolben

---

---

schnell in den Zylinder hinein, so erwärmt sich zunächst die Luft. Sie gibt aber schnell Entropie an die Zylinderwand und an den Messfühler ab und strömt durch das Leck aus. Man macht anschließend einen weiteren Kolbenhub. Die neue Luft gibt wieder Entropie an den Messfühler ab und entweicht danach. Der Versuch läuft nun so: Man pumpt schnell hintereinander einige zig Male. Man erreicht auf diese Weise eine Temperatur von über 100 °C.

5. Eine einfachere Version des vorigen Experiments, die jeder Schüler selbst machen kann: Man pumpt mit einer beliebigen Luftpumpe ins Freie, hält dabei aber die Luftaustrittsöffnung mit dem Daumen so zu, dass die Luft erst ganz am Ende jedes Kolbenhubes austritt, also wenn sie schon stark komprimiert ist. Nach einigen zig Pumpenhüben wird die Luft so heiß, dass man die hohe Temperatur am Daumen nicht mehr ertragen kann.

Derselbe Effekt ist dafür verantwortlich, dass beim Aufpumpen des Fahrradreifens das Ventil heiß wird.

6. Man führt ein pneumatisches Feuerzeug vor.

### **2.3 Quantitative Zusammenhänge zwischen $T$ , $V$ und $p$**

Man zeigt mit den Geräten der Schulsammlung die Gültigkeit der verschiedenen in der Gasgleichung enthaltenen Zusammenhänge.

### **2.4 Die Funktionsweise von Wärmemotoren**

Falls noch nicht geschehen, wird man eine Dampfmaschine und einen Benzinmotor vorführen. Man untersucht zum Beispiel den Motor im Auto des Lehrers: Wo befinden sich Ein- und Auslassrohre, Vergaser, Benzinpumpe, Zündkerzen, Zündspule und Zündverteiler. Möglicherweise zeigt man die Ventilkipphebel.

### **2.6 Die thermische Konvektion**

Man führt das Zentralheizungsmodell aus der Sammlung vor.

### **2.7 Irreversible Prozesse**

Man würde hier gern den Gay-Lussac-Versuch durchführen, d. h. die Expansion eines Gases ins Vakuum mit Messung der Temperatur. Leider ist der Versuch für die Schule zu aufwendig.

---

---

## 4. Stoffmenge und chemisches Potenzial

### 4.3 Wovon das chemische Potenzial abhängt

1. Man zeigt die Diffusion von Permanganat-Ionen, etwa so wie im Schülertext beschrieben.
2. Etwas Iod wird in Wasser gelöst. Die Lösung sieht bräunlich aus. Man gibt etwas Ether hinzu, rührt um und wartet, bis sich der Ether über dem Wasser gesammelt hat. Jetzt ist das Wasser farblos und der Ether braun. Das chemische Potenzial des Iods war also im Wasser höher als im Ether.
3. Mit dem Osmosegerät aus der Schulsammlung macht man den Versuch von Abb. 4.7 im Schülertext. Damit die Drücke rechts und links gleich sind, setzt man keine Steigrohre auf, sondern lässt die Zuckerlösung heraustropfen.

### 4.5 Der Zusammenhang zwischen chemischem Potenzial und Druck

1. Die Pressluftmaschine wird in diesem Abschnitt nur für ein Gedankenexperiment gebraucht. Die Maschine muss in dem Gedankenexperiment reversibel und isotherm laufen. Eine echte Pressluftmaschine tut natürlich weder das eine noch das andere. Trotzdem lohnt es, sich im Unterricht eine solche Maschine vorzuführen, damit die Schüler eine bessere Vorstellung davon haben, wovon wir reden. So kann man etwa eine Spielzeugdampfmaschine statt mit Dampf mit der Pressluft einer Fahrradpumpe laufen lassen.
2. Die  $\lambda$ -Sonde, die im Autokatalysator verwendet wird, stellt ein Gerät zur direkten Messung von chemischen Potenzialdifferenzen dar. Das elektrische Signal am Ausgang der  $\lambda$ -Sonde ist proportional zur Differenz der chemischen Potentiale des Sauerstoffs zwischen Messgas und Umgebungsluft. Da sie nur bei hohen Temperaturen arbeitet, ist das Experiment recht aufwendig.

### 4.6 Der Stoffwiderstand

Experiment im Schülertext mit  $\text{CO}_2$ . Experiment mit Mineralwasser (siehe Aufgabe im Schülertext).

---

---

## 5. Phasenübergänge

### 5.2 Der Antrieb für Phasenübergänge

1. Man misst die Sättigungsdrücke einiger geeigneter Stoffe bei Normaltemperatur.

Wasser: Man stellt einen Wasserbehälter unter die Vakuumbglocke, pumpt die Luft ab und unterbricht die Verbindung zur Pumpe. Nicht weiter pumpen, denn wenn immer mehr Wasser verdampft, wird das zurückbleibende Wasser immer kälter und der Sättigungsdruck wird immer geringer.

Butan und Propan: Man braucht Gasflaschen, an die man ein Manometer anflanschen kann.

2. Man misst den Sättigungsdruck als Funktion der Temperatur von Wasser mit den Geräten aus der Schulsammlung.

### 5.3 Die Wärmebilanz bei Phasenübergängen

1. Man erhitzt Wasser in einem Erlenmeyerkolben mit dem Bunsenbrenner und misst die Temperatur. Die Temperatur steigt nicht über 100 °C, trotz weiterer Entropiezufuhr. Während des Siedens misst man ebenfalls die Temperatur des Dampfes, oberhalb der Wasseroberfläche.

2. Man bringt Wasser in einem Erlenmeyerkolben zum Sieden und leitet den Dampf durch ein waagrechtes Glasröhrchen ab. Man erhitzt das Röhrchen von außen mit einer zweiten Flamme und misst die Temperatur des austretenden Dampfes. Man erreicht leicht eine Dampftemperatur von 150 °C.

3. Man misst die spezifische Verdampfungsentropie: Mit dem Tauchsieder verdampft man eine gewisse Menge Wasser. Man bestimmt die Masse des verdampften Wassers durch Wiegen des flüssigen Wassers am Anfang und am Ende des Versuchs. Die Entropie bestimmt man über Energiestrom, Zeit und Temperatur (373 K).

4. Man erhitzt Wasser durch Kondensation von Wasserdampf und macht die Entropiebilanz: In einen Joghurtbecher aus Plastik gießt man Wasser mit einer Temperatur von etwa 80 °C. In dieses Wasser leitet man Wasserdampf ein, den man aus einem Dampferzeuger oder aus einer espressomaschine nimmt, bis die Temperatur etwa 90 °C beträgt. Bevor man den Dampf einleitet, lässt man ihn eine Weile durch das Rohr ins Freie strömen, damit im Rohr während des Versuchs kein Dampf mehr kondensiert. Man misst Masse und

---

---

Temperatur des Wassers am Anfang und am Ende des Versuchs. Über die Massendifferenz bestimmt man die Entropie, die der Dampf bei der Kondensation abgegeben hat. Man vergleicht sie mit der Entropie, die man aus der Temperaturerhöhung berechnet.

#### **5.4 Phasenübergang im Gedankenexperiment**

Obwohl die beiden Experimente, die im Schülertext diskutiert werden, als Gedankenexperimente gemeint sind, kann man das zweite qualitativ ausführen – vorausgesetzt, man hat das entsprechende Gerät in der Schulsammlung: einen durchsichtigen Zylinder, der recht hohe Drücke aushält, mit einem Kolben, den man mit einem soliden Handgriff hineindrücken kann, und der sich arretieren lässt. Man bringt einige Milliliter flüssiges Butan in den Zylinder. Das Butan verdampft und drückt die Luft heraus, die sich noch im Zylinder befindet. Man setzt dann den Kolben ein.

Man drückt nun den Kolben in den Zylinder hinein. Auf dem letzten Stück des Weges entsteht unter dem Kolben flüssiges Butan.

Einen interessanten Aspekt des Experiments nimmt nur derjenige wahr, der es selbst ausführt. Beim Hineindrücken des Kolbens nimmt der Druck zunächst deutlich spürbar zu. Sobald die Kondensation einsetzt, bleibt der Druck konstant.

#### **5.6 Sieden und Verdunsten**

Man füllt einen Rundkolben mit heißem Wasser und pumpt die Luft über dem Wasser mit einer Wasserstrahlpumpe weg. Gleichzeitig misst man die Temperatur. Das Wasser beginnt zu sieden, obwohl seine Temperatur unter 100 °C liegt.

#### **5.7 Der Stoffwiderstand bei Phasenübergängen**

1. Man zeigt die Erscheinung des Siedeverzuges beim Wasser: Erhitzen von doppelt destilliertem Wasser im Ölbad. Den Wasserbehälter vorher mit Chromschwefelsäure reinigen. Falls man die Temperatur im Wasser (d.h. nicht im Ölbad) messen will, muss man den Thermofühler in ein unten abgeschmolzenes Glasröhrchen (das ebenfalls mit Chromschwefelsäure gereinigt wurde) einführen, und in das Wasser eintauchen. Achtung: Die Verdampfung des Wassers setzt sehr plötzlich ein. Das heiße Wasser kann aus dem Behälter herausschießen.

---



---

2. Man stellt eine unterkühlte Schmelze von Natriumthiosulfat her, wie im Schülertext beschrieben.

### **5.9 Phasenübergänge in Natur und Technik**

1. Die „Verdunstungskälte“ von Ether wird gezeigt: Man tränkt etwas Watte mit Ether und misst die Temperatur. Durch Pusten erreicht man, dass die Temperatur noch weiter sinkt.

2. Man präpariert eine Kältemischung: Kochsalz und zerstampftes Eis werden im Verhältnis 1 : 3 gemischt. Die Temperatur wird gemessen.

---

## 6. Gekoppelte Ströme

### 6.4 Thermo-elektrische Energieumlader

1. Man zeigt, wie einfach es ist, ein Thermoelement selbst zu bauen: Zwei Drahtstücke aus verschiedenen Materialien (z.B. Eisen und Konstantan, oder Kupfer und Konstantan) werden an den Enden einfach durch Verdrillen zu einem geschlossenen Stromkreis verbunden. Einer der Drähte wird durchgetrennt, so dass ein Voltmeter (Messbereich 30 mV) eingebaut werden kann. Man hält eine der Drahtverbindungen in eine Streichholzflamme. Das Voltmeter schlägt aus. Erhitzt man auch die andere Verbindungsstelle, so geht der Ausschlag wieder zurück.
2. Man experimentiert mit einem Peltierelement.
3. Man führt den symmetrischen und den unsymmetrischen Mitnahmeeffekt mit einem über eine Rolle laufenden Seil vor, siehe Abb. 6.14 im Schülertext.

### 6.5 Elektro-chemische Energieumlader

1. Falls in der Sammlung vorhanden, experimentiert man mit der Brennstoffzelle.
  2. Man baut einen Bleiakкумуляtor auf und betreibt ihn in beiden Richtungen.
  3. Man betreibt einen Autoakku in beiden Richtungen: Man lädt ihn mit einem Netzgerät, und man entlädt ihn über einen Verbraucher. In den Stromkreis ist ein Amperemeter eingebaut, so dass man sieht, dass die Stromrichtung beim Laden und Entladen verschieden ist.
-

---

## 7. Thermische Strahlung

### 7.1 Licht hat Entropie

1. Ein Metallstück von etwa 2 kg wird mit dem Bunsenbrenner auf etwa 300 °C erhitzt und so unter der Vakuumblocke aufgehängt oder aufgestellt, dass die Wärmeverluste durch Wärmeleitung gering sind (z.B. auf drei Reißzwecken stellen). Man stellt bzw. hängt den Gegenstand nicht in die Mitte, sondern in die Nähe der Wand. Man evakuiert. Die Wand in der Nähe des Gegenstandes wird deutlich spürbar warm.

### 7.2 Das Lichtgas – thermische Strahlung

Ein Eisennagel wird in der Bunsenbrennerflamme erhitzt. Man beobachtet Farbe und Intensität des emittierten Lichts.

### 7.3 Emission und Absorption, schwarze Körper

1. Man experimentiert mit dem Leslie-Würfel aus der Schulsammlung.

2. Man erhitzt verschiedene kleine Proben mit einer kräftigen Flamme, siehe Schülertext. Eine Bunsenbrennerflamme ist etwas zu schwach. Man könnte erwarten, dass Tafelkreide nicht glüht, weil sie weiß ist. Tatsächlich glüht sie sehr gut. Offenbar enthält sie Verunreinigungen. Auch Glas ist ungeeignet: Erstens schmilzt es beim Erhitzen. Zweitens ist es nicht rein genug, um nicht zu glühen.

3. Auf dem Lehrertisch stehen zwei Bügeleisen, die Kabel verschwinden hinter dem Tisch. Das eine ist angeschlossen, das andere nicht. Man lässt Schüler die IR-Strahlung fühlen, so dass sie feststellen können, welches der beiden Bügeleisen eingeschaltet ist.

---

---

## **8. Entropieströme in den Gashüllen von Planeten und Sternen**

### **8.1 Die Troposphäre**

Man misst, so gut es geht, die Energiestromdichte des Sonnenlichts.

### **8.2 Schichtungen von Flüssigkeiten**

Wasser wird erhitzt, einmal von oben mit einer IR-Lampe, einmal von unten auf einer Kochplatte. Man misst die Temperatur in verschiedenen Höhen.

Beim Erhitzen von oben entsteht ein Temperaturgefälle von oben nach unten. Beim Erhitzen von unten entsteht eine homogene Temperaturverteilung.

---

---

# D

**Lösungen der Aufgaben**

---

---

# 1. Wärmelehre

## 1.1 Entropie und Temperatur

1. In Zimmer A ist mehr Entropie, denn Luftmasse und -temperatur haben für A höhere Werte als für B.

2. In jede Tasse wird  $1/6$  des Kaffees ausgeschenkt; in der Kanne bleiben  $3/6$  zurück. Entsprechend ist in jeder Tasse eine Entropiemenge von

$$S_{\text{Tasse}} = 3900/6 \text{ Ct} = 650 \text{ Ct}$$

enthalten und in der Kanne

$$S_{\text{Kanne}} = 3900/2 \text{ Ct} = 1950 \text{ Ct}.$$

## 1.2 Der Temperaturunterschied als Antrieb für einen Entropiestrom

1. (a) Weil die Temperatur der Kochplatte höher ist als die des Topfes; (b) weil die Temperatur des Untersetzers niedriger ist als die des Topfes. (c) Die Temperatur des Tisches ist zunächst höher als die der Flasche. Darum fließt Entropie vom Tisch zur Flasche. Dadurch sinkt die Temperatur des Tisches.

2. Es fließt Entropie vom großen Klotz zum kleinen. Die Endtemperatur liegt näher bei  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  als bei  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ .

3. (a) Nein, es fehlt Information über die Größe. (b) Die Temperatur des kleinen Klotzes nimmt ab, die des großen nimmt zu. Es fließt Entropie vom kleinen zum großen. (c) Der große Klotz hat am Ende mehr Entropie als der kleine.

## 1.3 Die Wärmepumpe

2. Die Wärmepumpe pumpt Entropie aus dem Innern des Kühlschranks heraus, und durch die offene Tür fließt wieder genauso viel hinein. (Die analoge elektrische Situation wäre ein Kurzschluss.)

## 1.4 Die absolute Temperatur

1.  $273,15 \text{ K}$ ;  $298,15 \text{ K}$ ;  $373,15 \text{ K}$ ;  $90,15 \text{ K}$ ;  $77,35 \text{ K}$ ;  $4,25 \text{ K}$ ;  $0 \text{ K}$ .

2.  $-259,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $-252,8 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $-218,8 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $-210 \text{ }^\circ\text{C}$ .

---

---

## 1.5 Entropieerzeugung

1. In die Lampe geht Licht hinein, das von den Gegenständen der Umgebung kommt. Die Batterie wird nach und nach voll.
2. In den Auspuff strömen Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid hinein. Der Kühler kühlt die an ihm vorbeistreichende Luft ab, wobei das Kühlwasser warm wird. Aus dem Motor kommt ein Benzin-Luft-Gemisch heraus. Im Vergaser werden Luft und Benzin voneinander getrennt. Die frische Luft verlässt den Motor am Luftfilter. Die Benzinpumpe füllt nach und nach den Tank mit Benzin.
3. Warme Luft gelangt zur Bremse. Die Bremse kühlt sich ab und das Fahrrad wird schneller, und zwar nach rückwärts.

## 1.7 Die Entropieleitfähigkeit

1. (a) Die Wände müssen dick sein. (b) Die Gesamtoberfläche der Außenwände muss klein sein, d. h., das Haus darf keine verwinkelte Außenfläche haben. (c) Die Wände müssen aus einem Material sein, das einen hohen Wärmewiderstand hat.
2. (a) Das Material, aus dem der Heizkörper besteht, ist dünn. (b) Die Oberfläche (d. h. die Querschnittsfläche des Wärmeleiters) ist groß. (c) Das Material ist ein guter Wärmeleiter.

Andere Geräte, bei denen es auf eine gute Wärmeleitung ankommt: der Autokühler, der Zylinderkopf von luftgekühlten Verbrennungsmotoren, der Wärmetauscher an der Rückseite des Kühlschranks.

3.

$$I_s = \sigma_s \frac{A}{d} \Delta T$$

$$\Delta T = 10 \text{ K}$$

	Fenster	Wände
$\sigma_s \left( \frac{\text{Ct}}{\text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{K}} \right)$	0,0027	0,00013
$A \text{ (m}^2\text{)}$	0,75	120
$d \text{ (m)}$	1,00	120
$I_s \text{ (Ct/s)}$	1,50	120

Es lohnt sich, nicht zu große, gut isolierende Fenster zu installieren.

---

---

4.

a)

$$\frac{I_s}{A} = \sigma_s \cdot \frac{\Delta T}{d} = 0,003 \frac{\text{Ct}}{\text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{K}} \cdot \frac{20 \text{ K}}{0,12 \text{ m}} = 0,5 \frac{\text{Ct}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

b)

$$\sigma_{s, \text{Ziegel}} \cdot \frac{A}{d_{\text{Ziegel}}} \cdot \Delta T_{\text{Ziegel}} = \sigma_{s, \text{Styr}} \cdot \frac{A}{d_{\text{Styr}}} \cdot \Delta T_{\text{Styr}}$$
$$\frac{0,003}{0,12} \cdot \Delta T_{\text{Ziegel}} = \frac{0,00013}{0,05} \cdot \Delta T_{\text{Styr}}$$

$$\Delta T_{\text{Styr}} = \frac{0,05 \cdot 0,003}{0,00013 \cdot 0,12} \cdot \Delta T_{\text{Ziegel}}$$
$$= 9,62 \cdot \Delta T_{\text{Ziegel}}$$

Mit

$$\Delta T_{\text{Ziegel}} = 20 \text{ K} - \Delta T_{\text{Styr}}$$

wird

$$\Delta T_{\text{Ziegel}} = 20 \text{ K} - 9,62 \cdot \Delta T_{\text{Ziegel}}$$

$$\Delta T_{\text{Ziegel}} (1 + 9,62) = 20 \text{ K}$$

$$\Delta T_{\text{Ziegel}} = 1,88 \text{ K}$$

c)

$$\frac{I_s}{A} = 0,003 \cdot \frac{1,88 \text{ Ct}}{0,12 \text{ m}^2 \cdot \text{s}} = 0,047 \frac{\text{Ct}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

$\approx 1/10$  des Wertes ohne Isolation

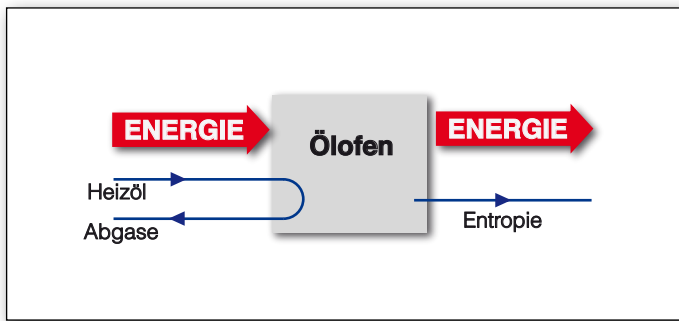
## 1.8 Entropietransport durch Konvektion

1. Über Wände, geschlossene Fenster und geschlossene Türen Verluste durch Wärmeleitung; durch Türritzen und undichte Fenster Verluste durch Konvektion.

2. Von der Flamme der Verbrennung des Benzins konvektiv zur Zylinderinnenwand; von dort durch Wärmeleitung zu den Kühlwasserkanälen; mit dem Kühlwasser konvektiv vom Motor zum Kühler; durch die Rohrwände des Kühlers durch Wärmeleitung nach außen; weiter konvektiv mit der Luft.

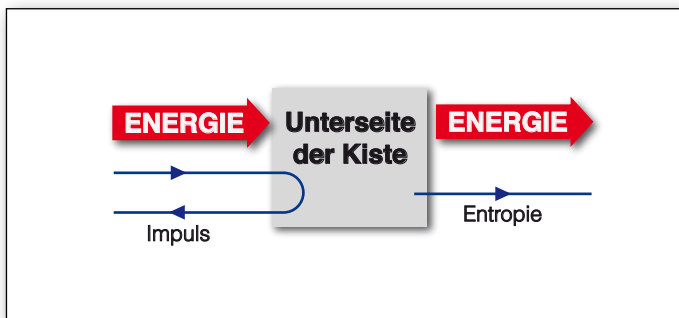
---





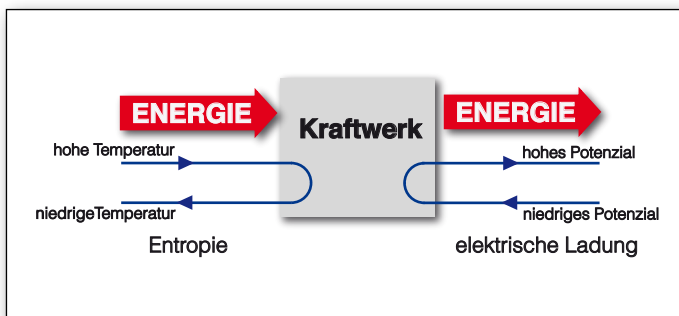
**Abb. 1**

Abschnitt 1.9, Aufgabe 1



**Abb. 2**

Abschnitt 1.9, Aufgabe 2



**Abb. 3**

Abschnitt 1.9, Aufgabe 4

3. Die Entropie gelangt mit dem Kühlwasser des Motors zu einer Art Heizkörper. Hier geht sie über auf Luft, die in den Fahrgastraum geblasen wird.

### 1.9 Die Entropie als Energieträger

1. Siehe Abb. 1

2. Siehe Abb. 2

3. Die Entropie wird beim Auftreffen der Klötze auf den Boden erzeugt. Die Energie kommt aus dem Schwerfeld.

4. Siehe Abb. 3. Es handelt sich um ein Wärmekraftwerk (Heizung mit Kohle, Gas oder Kernreaktion).

---

## 1.10 Der Zusammenhang zwischen Energie- und Entropiestrom

1. Gegeben:  $T = (273 + 20)\text{K} = 293 \text{ K}$

$$I_S = 35 \text{ Ct/s}$$

Gesucht:  $P$

$$P = T \cdot I_S = 293 \text{ K} \cdot 35 \text{ Ct/s} = 10\,255 \text{ W} \approx 10 \text{ kW}$$

2. Gegeben:  $T = (273 + 90)\text{K} = 363 \text{ K}$

$$I_S = 60 \text{ Ct/s}$$

Gesucht:  $P$

$$P = T \cdot I_S = 363 \text{ K} \cdot 60 \text{ Ct/s} = 21\,780 \text{ W} \approx 22 \text{ kW}$$

3. Gegeben:  $T = (273 + 300)\text{K} = 573 \text{ K}$

$$P = 1000 \text{ W}$$

Gesucht:  $I_S$

$$P = T \cdot I_S \Rightarrow I_S = P/T = 1000 \text{ W}/573 \text{ K} = 1,7 \text{ Ct/s}$$

4. Gegeben:  $T_A - T_B = 10 \text{ K}$

$$I_S = 500 \text{ Ct/s}$$

Gesucht:  $P$

$$P = (T_A - T_B) \cdot I_S = 10 \text{ K} \cdot 500 \text{ Ct/s} = 5000 \text{ W}$$

5. a)

Gegeben:  $T_A - T_B = 25 \text{ K}$

$$I_S = 30 \text{ Ct/s}$$

Gesucht:  $P$

$$P = (T_A - T_B) \cdot I_S = 25 \text{ K} \cdot 30 \text{ Ct/s} = 750 \text{ W}$$

b)

Gegeben:  $T = (273 + 25)\text{K} = 298 \text{ K}$

$$I_S = 30 \text{ Ct/s}$$

Gesucht:  $P$

$$P = T \cdot I_S = 298 \text{ K} \cdot 30 \text{ Ct/s} = 8940 \text{ W}$$

---

---

## 1.11 Entropieerzeugung durch Entropieströme

1. Gegeben:  $P = 20 \text{ kW}$   
 $T_1 = (273 - 5)\text{K} = 368 \text{ K}$   
 $T_2 = (273 + 20)\text{K} = 293 \text{ K}$

Gesucht:  $I_{S2}, I_{S1}, I_{S \text{ erzeugt}}$

$$P = T \cdot I_S \Rightarrow I_S = P/T$$

- a)  $I_{S2} = P/T_2 = 20 \text{ kW}/293 \text{ K} = 68,3 \text{ Ct/s}$   
b)  $I_{S1} = P/T_1 = 20 \text{ kW}/368 \text{ K} = 54,3 \text{ Ct/s}$   
c)  $I_{S \text{ erzeugt}} = I_{S1} - I_{S2} = (54,3 - 68,3) \text{ Ct/s} = -14 \text{ Ct/s}$

2. Gegeben:  $P = 1000 \text{ W}$   
 $T_1 = 373 \text{ K}$   
 $T_2 = 1000 \text{ K}$

Gesucht:  $I_{S2}, I_{S1}, I_{S1} - I_{S2}$

$$P = T \cdot I_S \Rightarrow I_S = P/T$$

- a)  $I_{S2} = P/T_2 = 1000 \text{ W}/1000 \text{ K} = 1 \text{ Ct/s}$   
b)  $I_{S1} = P/T_1 = 1000 \text{ W}/373 \text{ K} = 2,7 \text{ Ct/s}$   
c)  $I_{S1} - I_{S2} = 1,7 \text{ Ct/s}$

## 1.13 Entropiequellen für Wärmemotoren

1. Gegeben:  $\vartheta_A = 150 \text{ }^\circ\text{C}$   $\vartheta_B = 50 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $I_S = 100 \text{ Ct/s}$

Gesucht:  $P$

$$T_A - T_B = 100 \text{ K}$$

$$P = (T_A - T_B) \cdot I_S = 100 \text{ K} \cdot 100 \text{ Ct/s} = 10 \text{ kW}$$

2. Gegeben:  $P = 1000 \text{ MW}$   
 $T_A = 750 \text{ K}$   
 $T_B = 310 \text{ K}$

Gesucht:  $I_S, P_B$

$$T_A - T_B = 750 \text{ K} - 310 \text{ K} = 440 \text{ K}$$

$$P = (T_A - T_B) \cdot I_S \Rightarrow I_S = P/(T_A - T_B)$$

$$I_S = 1000 \text{ MW}/440 \text{ K} = 2,27 \text{ MCt/s}$$

$$P_B = T_B \cdot I_S = 310 \text{ K} \cdot 2,27 \text{ MCt/s} = 704 \text{ MW}$$

3. Man könnte eine Wärmekraftmaschine laufen lassen

- zwischen dem Wasser eines kalten Gebirgssees und dem wärmeren Wasser eines Sees in Tal;
  - zwischen dem Meerwasser am Äquator und dem Meerwasser am Nordpol;
-

- 
- zwischen einem Eisberg, den man mit Schiffen zum Äquator geschleppt hat, und dem warmen Meerwasser;
  - zwischen der Erde und dem Weltraum (der eine Temperatur von 2,7 K hat);
  - zwischen einem Vulkan und dem Meerwasser;
  - zwischen dem Wasser an der Oberfläche des Meers und dem kälteren Wasser in größeren Tiefen.

### 1.14 Energieverlust und Wirkungsgrad

1. Gegeben:  $P_{\text{hinein}} = 20 \text{ kW}$   
 $P_{\text{heraus}} = 18 \text{ kW}$   
 Gesucht:  $V$

$$P_V = (20 - 18) \text{ kW} = 2 \text{ kW}$$

$$V = (P_V / P_{\text{hinein}}) \cdot 100 \% = (2 \text{ kW} / 20 \text{ kW}) \cdot 100 \% = 10 \%$$

2. Gegeben:  $V = 40 \%$   
 $P_{\text{hinein}} = 10 \text{ W}$   
 $T = 300 \text{ K}$

Gesucht:  $P_{\text{heraus}}, I_S$

$$V = (P_V / P_{\text{hinein}}) \cdot 100 \%$$

$$\Rightarrow P_V = (V / 100 \%) \cdot P_{\text{hinein}} = (40 / 100) \cdot 10 \text{ W} = 4 \text{ W}$$

$$P_{\text{heraus}} = P_{\text{hinein}} - P_V = 10 \text{ W} - 4 \text{ W} = 6 \text{ W}$$

$$I_S \text{ erzeugt} = P_V / T = 4 \text{ W} / 300 \text{ K} = 0,013 \text{ Ct/s}$$

3. Gegeben:  $V = 8 \%$   
 $P_{\text{heraus}} = 46 \text{ kW}$   
 $T = 300 \text{ K}$

Gesucht:  $P_{\text{hinein}}, P_V, I_S \text{ erzeugt}$

46 kW entspricht 92 % von  $P_{\text{hinein}}$ .

$$P_{\text{hinein}} / P_{\text{heraus}} = P_{\text{hinein}} / 46 \text{ kW} = 100 \% / 92 \%$$

$$P_{\text{hinein}} = 46 \text{ kW} \cdot (100 / 92) = 50 \text{ kW}$$

$$P_V = P_{\text{hinein}} - P_{\text{heraus}} = (50 - 46) \text{ kW} = 4 \text{ kW}$$

$$I_S \text{ erzeugt} = P_V / T = 4000 \text{ W} / 300 \text{ K} = 13,3 \text{ Ct/s}$$

### 1.15 Der Wirkungsgrad von Heizungen

$$\eta_{\text{Reaktor}} = (550 \text{ K} - 300 \text{ K}) / 550 \text{ K} = 0,45$$

$$\eta_{\text{Kohle}} = (800 \text{ K} - 300 \text{ K}) / 800 \text{ K} = 0,63$$


---

---

## 1.16 Die Messung der Entropie

2. Von dem Körper, dessen Entropie gemessen werden soll, fließt ein Entropiestrom zum Messgerät. Bei einem solchen Strom wird Entropie erzeugt. Das Messgerät misst auch diese zusätzliche Entropie.

## 1.17 Die Erwärmbarkeit

1.  $\alpha(100\text{K}) = 7,0 \frac{\text{mol} \cdot \text{K}}{\text{Ct}}$   $\alpha(300\text{K}) = 14,6 \frac{\text{mol} \cdot \text{K}}{\text{Ct}}$

2.  $\alpha(P) = 0 \frac{\text{mol} \cdot \text{K}}{\text{Ct}}$

Solange der Schmelzvorgang stattfindet, wird die ganze Entropie zum Schmelzen verwendet.

3.  $\Delta T = \alpha \frac{\Delta S}{n} = \alpha \frac{\Delta S}{m} \cdot M$

Hier ist  $M = m/n$  die Masse pro Stoffmenge.

	Cu	Al
$\alpha \left( \frac{\text{mol} \cdot \text{K}}{\text{Ct}} \right)$	12,11	11,93
$M \left( \frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)$	63,5	27
$\Delta T(\text{K})$	61,5	25,8

Das Kupfer erwärmt sich um den Faktor  $61,5/25,8 \approx 2,4$  mehr als das Aluminium.

4.  $\Delta S = \frac{n}{\alpha} \Delta T = \frac{m}{M \cdot \alpha} \Delta T = \frac{100 \text{ kg} \cdot 80 \text{ Ct}}{18(\text{g} / \text{mol}) \cdot 3,89 \text{ mol} \cdot \text{K} / \text{Ct}} = 114 \text{ kCt}$

---

---

## 1.18 Der Zusammenhang zwischen Energiezufuhr und Temperaturänderung

1. Gegeben:  $m = 0,5 \text{ kg}$   
 $P = 500 \text{ W} = 500 \text{ J/s}$   
 $\vartheta_1 = 25 \text{ °C}$   
 $\vartheta_2 = 100 \text{ °C}$   
Gesucht:  $t$

$$\Delta E = cm \Delta T$$

$$P = \Delta E/t \Rightarrow t = \Delta E/P$$

$$\Rightarrow t = cm \Delta T / P = 4180 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \cdot 0,5 \text{ kg} \cdot 75 \text{ K} / 500 \text{ (J/s)}$$
$$= 313,5 \text{ s} \approx 5 \text{ min}$$

2. Gegeben: Wasserstromstärke =  $0,1 \text{ kg/s}$   
 $t = 5 \text{ min} = 300 \text{ s}$   
 $\vartheta_1 = 15 \text{ °C}$   
 $\vartheta_2 = 45 \text{ °C}$

Gesucht:  $\Delta E$

$$m = 0,1 \text{ kg/s} \cdot 300 \text{ s} = 30 \text{ kg}$$

$$\Delta E = cm \Delta T = 4180 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \cdot 30 \text{ kg} \cdot 30 \text{ K} = 3,76 \text{ MJ}$$

3.  $c = \frac{T}{M \cdot \alpha} = \frac{300 \text{ K}}{63,5 (\text{g} / \text{mol}) \cdot 12,11 \text{ mol} \cdot \text{K}/\text{Ct}} = 390 \text{ Ct/kg}$

4. Wasser:  $3 \text{ €/m}^3 \Rightarrow \underline{0,3 \text{ Cent/kg}}$

$$\text{Energie: } 10 \text{ Cent/kWh} = 2,8 \text{ Cent/MJ}$$

Wir nehmen an, die Temperatur des Wassers werde beim Heizen um  $20 \text{ K}$  erhöht.

$$\frac{\Delta E}{m} = c \cdot \Delta T = 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{mol}} \cdot 20 \text{ K} = 0,084 \text{ MJ/kg}$$

$$0,084 \text{ MJ/kg} \cdot 2,8 \text{ Cent/MJ} = \underline{0,24 \text{ Cent/kg}}$$

Wasser und Energie sind also fast gleich teuer.

5.

Wasserstrom:  $0,1 \text{ kg/s}$

Energiestrom:  $20 \text{ m}^2 \cdot 200 \text{ W/m}^2 = 4000 \text{ J/s}$

$$\Delta T = \frac{\Delta E}{c \cdot m} = \frac{4000 \text{ J}}{4180 (\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}) \cdot 0,1 \text{ kg}} = 9,6 \text{ K}$$

---

## 2. Gase

### 2.1 Gase und kondensierte Stoffe

1. Ein Reifen gleicht die Unebenheiten der Straße aus, weil er durch diese Unebenheiten – etwa durch ein Steinchen – zusammengedrückt wird. Da Wasser nicht zusammendrückbar ist, könnte ein mit Wasser gefüllter Reifen die Unebenheiten der Straße nicht ausgleichen.
2. Die Luft im Ballon dehnt sich bei konstantem Druck aus. Dabei nimmt ihre Dichte ab. (Ein Teil der Luft fließt aus dem Ballon heraus.) Die Dichte der Luft im Ballon ist damit geringer als die der Umgebungsluft. Die Luft im Ballon steigt mit dem Ballon nach oben.

### 2.2 Qualitative Zusammenhänge zwischen $S$ , $T$ , $V$ und $p$

1. (a) Es steigen Bläschen auf. Aus der Flasche tritt Luft aus. Die abgekühlte Luft hatte zunächst Normaldruck. Nachdem die Flasche verschlossen worden ist, wird ihr bei  $V = \text{const}$  Entropie zugeführt. Dabei wächst nach Zeile 2 von Tabelle 2.1 der Druck. Der Druck wird also höher als der Umgebungsdruck. Beim Öffnen der Flasche strömt Luft aus, so dass sich der Druck ausgleichen kann.  
(b) In die Flasche strömt Wasser ein. Die erhitzte Luft hatte Normaldruck. Ihr wird, solange die Flasche verschlossen ist, d. h. bei  $V = \text{const}$ , Entropie entzogen. Dabei nimmt der Druck ab. Er wird niedriger als der Außendruck. Beim Öffnen wird Wasser in die Flasche hineingedrückt, so dass sich der Druck ausgleicht.
  2. In beiden Gasen nimmt die Temperatur zu. In dem Gas mit  $V = \text{const}$  ist die Temperaturzunahme größer. Den Prozess mit  $p = \text{const}$  kann man in zwei Schritten ausführen. Zuerst führt man dem Gas die Entropie bei  $V = \text{const}$  zu. Dabei wachsen Temperatur und Druck. Dies ist genau der Vorgang, den man auch mit dem anderen Gas ausgeführt hat. Danach lässt man das Gas expandieren, so dass der Druck wieder den alten Wert annimmt. Dabei nimmt die Temperatur ab (Umkehrung des Prozesses von Zeile 4 in Tabelle 2.1).
  3. Nach Zeile 2 von Tabelle 2.1 wächst die Temperatur, wenn Entropie bei  $V = \text{const}$  zugeführt wird. Nach Zeile 4 sinkt die Temperatur, wenn bei  $S = \text{const}$  das Volumen wächst. Entropiezufuhr und Volumenvergrößerung haben also die entgegengesetzte Wirkung auf die Temperatur. Wenn sich nun das Volumen hinreichend stark vergrößert, „gewinnt“ es gegenüber der Entropiezufuhr: die Temperatur nimmt ab.
-

---

## 2.3 Quantitative Zusammenhänge zwischen $S$ , $T$ , $V$ und $p$

1. Aus der Gasgleichung folgt

$$\rho = \frac{Mp}{RT}$$

wobei  $\rho$  die Massendichte und  $M$  die Masse pro Stoffmenge ist. Da der Druck innerhalb und außerhalb des Ballons gleich ist, folgt

$$\frac{\rho_{\text{Ballon}}}{\rho_{\text{draußen}}} = \frac{T_{\text{draußen}}}{T_{\text{Ballon}}} = \frac{293}{473} = 0,619$$

Die Dichte der Luft im Ballon wird damit

$$\rho_{\text{Ballon}} = 0,619 \cdot 1,29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,799 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Das Volumen ist

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3 = 905 \text{ m}^3$$

Die gesuchte Masse ergibt sich zu

$$\begin{aligned} m &= (\rho_{\text{draußen}} - \rho_{\text{Ballon}}) \cdot V \\ &= (1,29 - 0,799) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 905 \text{ m}^3 = 444 \text{ kg} \end{aligned}$$

2.

a) 10 Liter

b) Da die rechte Seite der Gasgleichung  $nRT$  bei der Entspannung konstant ist, nimmt das Volumen um denselben Faktor zu, um den der Druck abnimmt. Es ergeben sich also 900 Liter.

$$d) \quad n = \frac{pV}{RT} = \frac{9 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot 10^{-2} \text{ m}^3}{8,3 \text{ Ct/mol} \cdot 298 \text{ K}} = 36,4 \text{ mol}$$

$$c) \quad m = M \cdot n = 2 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot 36,4 \text{ mol} = 72,8 \text{ g} = 0,0728 \text{ kg}$$

3.

$$T_n = 15 \text{ }^\circ\text{C} = 288 \text{ K}$$

$$T_h = 40 \text{ }^\circ\text{C} = 313 \text{ K}$$

$$p_0 = 1 \text{ bar}$$

$$V_0 = 1 \text{ Liter}$$

---



---

a) Aufwärmen der Luft in der verschlossenen Flasche von  $T_n$  auf  $T_h$  ( $n = \text{const}$  und  $V_0 = \text{const}$ ). Der Druck wächst von  $p_0$  auf  $p_h$ :

$$\frac{p_h}{p_0} = \frac{T_h}{T_n}$$

$$p_h = p_0 \cdot \frac{T_h}{T_n} = p_0 \cdot \frac{313}{288} = 1,087 \text{ bar}$$

Beim Herauslassen der Luft bei der konstanten Temperatur  $T_h$  und  $V_0 = \text{const}$  nimmt die Stoffmenge ab von  $n_0$  auf  $n_{\text{end}}$ :

$$\frac{p_h}{p_0} = \frac{n_0}{n_{\text{end}}}$$

$$\Delta n = n_0 - n_{\text{end}} = n_0 - \frac{n_0}{1,087} = 0,080 n_0$$

8 % der Luft strömen aus.

b) Abkühlen der Luft in der verschlossenen Flasche von  $T_h$  auf  $T_n$  ( $n = \text{const}$  und  $V_0 = \text{const}$ ). Der Druck nimmt von  $p_0 = 1 \text{ bar}$  ab auf  $p_n$ :

$$\frac{p_n}{p_0} = \frac{T_n}{T_h}$$

$$p_n = p_0 \cdot \frac{T_n}{T_h} = p_0 \cdot \frac{288}{313} = 0,920 \text{ bar}$$

Beim Hineinlassen des Wassers bei der konstanten Temperatur  $T_n$  und  $n = \text{const}$  nimmt das Volumen ab von  $V_0$  auf  $V_{\text{end}}$ :

$$p_n \cdot V_0 = p_0 \cdot V_{\text{end}}$$

$$\Delta V = V_0 - V_{\text{end}} = V_0 - 0,92 V_0 = 0,08 V_0 = 80 \text{ ml}$$

4.  $V = 8 \text{ Liter}$ ,  $p_0 = 3 \text{ bar}$ ,  $T_0 = 293 \text{ K}$ ,  $T_1 = 353 \text{ K}$

Beim Erwärmen ist  $V = \text{const}$  und  $n = \text{const}$ , also gilt:

$$\frac{p_1}{p_0} = \frac{T_1}{T_0}$$

$$p_1 = p_0 \frac{T_1}{T_0} = 3 \text{ bar} \cdot \frac{353 \text{ K}}{293 \text{ K}} = 3,61 \text{ bar}$$

---

---

5.  $T_0 = 288 \text{ K}$ ,  $T_1 = 295 \text{ K}$

Beim Erwärmen ist  $p = \text{const}$  und  $V = \text{const}$ , also gilt:

$$n_0 \cdot T_0 = n_1 \cdot T_1$$

$$n_1 = n_0 \frac{T_0}{T_1} = n_0 \cdot \frac{288 \text{ K}}{295 \text{ K}} = 0,976 n_0$$

$$\Delta n = n_0 - n_1 = n_0(1 - 0,976) = 0,024 n_0$$

$$\frac{\Delta n}{n_0} = 0,024$$

Es strömen 2,4 % der Luft aus.

6.  $p_1 = 15 \text{ bar}$ ,  $p_2 = 2 \text{ bar}$ ,  $T_1 = 673 \text{ K}$ ,  $\beta = 0,30$

$$T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\beta}{\beta+1}}$$

$$= 673 \text{ K} \cdot 0,133^{0,23} = 673 \text{ K} \cdot 0,629 = 423 \text{ K}$$

$$\vartheta = 150 \text{ }^\circ\text{C}$$

7. Wir betrachten einen Prozess mit  $n = \text{const}$ . Druck, Volumen und Temperatur sind in einem Zustand  $p$ ,  $V$  und  $T$ , im anderen  $p_0$ ,  $V_0$  und  $T_0$ . Für die beiden Zustände gilt also

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \text{ bzw. } p_0 \cdot V_0 = n \cdot R \cdot T_0$$

Division der ersten Gleichung durch die zweite:

$$\frac{p}{p_0} \cdot \frac{V}{V_0} = \frac{T}{T_0}$$

Daraus folgt:

$$\frac{V_0}{V} = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T}$$

Ersetzen in Gleichung (1) ergibt:

$$\frac{T}{T_0} = \left( \frac{p}{p_0} \right)^\beta \cdot \left( \frac{T_0}{T} \right)^\beta$$

Umrechnen:

$$\frac{T}{T_0} = \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\beta}{\beta+1}}$$

---

---

## 2.4 Die Funktionsweise von Wärmemotoren

1. Wir betrachten Abb. 2.11. Bei der Entspannung würde sich der Kolben fast nicht verschieben. Er würde daher keine Energie abgeben. Ebenso würde bei der Entspannung die Temperatur der Flüssigkeit gar nicht abnehmen. Mit der Entropie würde daher nach der Entspannung fast genauso viel Energie herauskommen, wie vorher mit ihr hineingeflossen war.

2.  $p_1 = 1 \text{ bar}$ ,  $p_2 = 30 \text{ bar}$ ,  $T_1 = 300 \text{ K}$ ,  $\beta = 0,40$

$$T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\beta}{\beta+1}} = 300 \text{ K} \cdot 30^{0,29} = 804 \text{ K}$$

$$\vartheta = 1077 \text{ }^\circ\text{C}$$

3. Wenn der Kolben am Ende seines Weges ist, ist der Zylinder noch voll mit Dampf unter hohem Druck. Beim Öffnen des Auslasses entspannt er sich ins Freie. Er könnte aber noch viel Energie abgeben. Diese Energie wird verschenkt.

## 2.5 Warum die Luft über der Erdoberfläche nach oben hin kälter wird

$p_1 = 100 \text{ kPa}$ ,  $p_2 = 80 \text{ kPa}$ ,  $T_1 = 293 \text{ K}$ ,  $\beta = 0,40$

$$T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\beta}{\beta+1}} = 293 \text{ K} \cdot 0,8^{0,29} = 274 \text{ K}$$

$$\vartheta = 1 \text{ }^\circ\text{C}$$

## 2.6 Die thermische Konvektion

1. Man erhitzt Wasser in einem Topf auf dem Herd. Die Entropie wird dem Wasser von unten her zugeführt. Es gibt sie an den Seitenwänden und an der oberen, freien Wasseroberfläche, wo sie zum Verdunsten gebraucht wird, wieder ab.

2. Die Gase in der Flamme (zum größten Teil der Luftstickstoff) haben wegen ihrer hohen Temperatur eine geringere Dichte als die umgebende Luft. Sie strömen daher nach oben und reißen dabei natürlich die festen Teilchen mit, die sich in der Flamme befinden.

---

---

## 2.7 Irreversible Prozesse

1. Sie entspricht der Umkehrung der 3. Zeile: Das Volumen nimmt zu, die Temperatur bleibt konstant, der Druck nimmt ab, die Entropie nimmt zu.
  2. Für die Luft links, die sich nicht zu nahe an der Öffnung befindet, ist die Expansion reversibel. Die Luft kühlt sich daher ab, siehe (Umkehrung der) 4. Zeile von Tabelle 2.1. Die Luft rechts, weit genug weg von der Öffnung, erleidet eine reversible Kompression, sie wird wärmer. Nach längerem Warten hat sich thermisches Gleichgewicht eingestellt: Die Temperatur ist jetzt dieselbe wie vorher.
  3. Es handelt sich um das *Gibbs'sche Paradoxon*. Die Quantennatur der Materie sorgt dafür, dass ein Stoff nicht kontinuierlich in einen anderen übergehen kann. Diese Antwort ist natürlich von den Schülern nicht zu erwarten. Es wäre aber gut, wenn sie wenigstens die Frage verstünden.
-

---

## 3. Mengenartige Größen

### 3.1 Mengenartige Größen

1. Abstand, elektrische Spannung
2. Zeit, Frequenz, Winkel, Widerstand

### 3.3 Energieströme

Gleichung (1a): in ein Wärmekraftwerk hinein, aus einer Wärmepumpe heraus

Gleichung (1b): Energietransport mit Fahrradkette, Treibriemen

Gleichung (1c): Energietransport mit einem elektrischen Kabel

### 3.4 Masse und Schwerepotenzial

1.  $I_m = 900\,000 \text{ kg/s}$ ,  $h_2 - h_1 = 11 \text{ m}$

$$P = g \cdot (h_2 - h_1) \cdot I_m$$
$$= 10 \text{ N/kg} \cdot 11 \text{ m} \cdot 900\,000 \text{ kg/s} = 99 \text{ MW}$$

2.  $I_m = 10\,000 \text{ kg/s}$ ,  $h_2 - h_1 = 300 \text{ m}$

$$P = g \cdot (h_2 - h_1) \cdot I_m$$
$$= 10 \text{ N/kg} \cdot 300 \text{ m} \cdot 10\,000 \text{ kg/s} = 30 \text{ MW}$$

---

---

## 4. Stoffmenge und chemisches Potenzial

### 4.1 Die Stoffmenge

1.

$$\text{H}_2\text{O}: m/n = 18,01494 \text{ g/mol} \approx 0,018 \text{ kg/mol}$$

$$\text{O}_2: m/n = 31,998 \text{ g/mol} \approx 0,032 \text{ kg/mol}$$

$$\text{CO}_2: m/n = 44,009 \text{ g/mol} \approx 0,044 \text{ kg/mol}$$

$$\text{Ag}_2\text{S}: m/n = 247,804 \text{ g/mol} \approx 0,248 \text{ kg/mol}$$

$$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2: m/n = 331,198 \text{ g/mol} \approx 0,331 \text{ kg/mol}$$

$$\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}: m/n = 342,296 \text{ g/mol} \approx 0,342 \text{ kg/mol}$$

2.  $m/n = 0,342 \text{ kg/mol}$

$$n = 0,29 \text{ mol}$$

3. 1 l Wasser wiegt 1 kg.

$$m/n = 0,018 \text{ kg/mol}$$

$$n = \frac{1 \text{ kg}}{0,018 \text{ kg}} \cdot \text{mol} = 55,5 \text{ mol}$$

4. Für Propan ist  $m/n = 0,044 \text{ kg/mol}$

$$n = \frac{m}{0,044 \text{ kg/mol}} = \frac{12 \text{ kg}}{0,044 \text{ kg}} \cdot \text{mol} = 273 \text{ mol}$$

### 4.5 Der Zusammenhang zwischen chemischem Potenzial und Druck

1.  $p_1 = 60 \text{ bar}$ ,  $p_2 = 110 \text{ bar}$

$$\mu(p_2) - \mu(p_1) = RT \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = 2,5 \text{ kG} \cdot \ln\frac{110}{60} = 1,515 \text{ kG}$$

2.  $p_{\text{Stickstoff}} = 0,78 \text{ bar}$ ,  $p_{\text{Sauerstoff}} = 0,21 \text{ bar}$ ,  
 $p_0 = 1 \text{ bar}$ ,  $\mu(p_0) = 0 \text{ kG}$

$$\mu_{\text{Stickstoff}} = RT \ln\left(\frac{p_{\text{Stickstoff}}}{p_0}\right) = 2,5 \text{ kG} \cdot \ln 0,78 = -0,62 \text{ kG}$$

$$\mu_{\text{Sauerstoff}} = RT \ln\left(\frac{p_{\text{Sauerstoff}}}{p_0}\right) = 2,5 \text{ kG} \cdot \ln 0,21 = -3,90 \text{ kG}$$

---

---

3. Der Druck nähert sich 0 bar; das chemische Potenzial nimmt immer größere negative Werte an oder, mathematisch gesprochen, es geht gegen minus unendlich.

4. a) Da die Dichte des Alkohols geringer ist als die des Wassers, schwimmt der Alkohol auf dem Wasser.

b) Nach und nach verteilt sich der Alkohol gleichmäßig im Wasser. Er folgt dem Antrieb durch Differenzen seines chemischen Potentials. Schließlich stellt sich chemisches Gleichgewicht ein.

5.

a)  $c_0 = 1 \text{ mol/l}$ ,  $\mu(c_0) = 8,36 \text{ kG}$ ,  $\mu(c) = 0 \text{ kG}$

$$\mu(c_0) - \mu(c) = RT \ln\left(\frac{c_0}{c}\right) \Rightarrow 8,36 \text{ kG} = 2,5 \text{ kG} \cdot \ln\left(\frac{c_0}{c}\right)$$

$$\Rightarrow \ln\left(\frac{c_0}{c}\right) = \frac{8,36}{2,5} = 3,34 \Rightarrow \frac{c_0}{c} = e^{3,34} = 28,22$$

$$\Rightarrow c = 0,035 \text{ mol/l}$$

b) Berechnung des chemischen Potentials der Gasphase:

$p = 150 \text{ kPa}$ ,  $p_0 = 100 \text{ kPa}$ ,  $\mu(p_0) = 0 \text{ kG}$

$$\mu(p) = \mu(p_0) + RT \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) = 0 \text{ kG} + 2,5 \text{ kG} \ln 1,5 = 1,014 \text{ kG}$$

Gasphase und gelöste Phase sind im chemischen Gleichgewicht, d.h. die chemischen Potentiale sind gleich:  $\mu(c_1) = 1,014 \text{ kG}$

$$\mu(c_0) - \mu(c_1) = RT \ln\left(\frac{c_0}{c_1}\right)$$

$$\Rightarrow 8,36 \text{ kG} - 1,014 \text{ kG} = 2,5 \text{ kG} \cdot \ln\left(\frac{c_0}{c_1}\right)$$

$$\Rightarrow \ln\left(\frac{c_0}{c_1}\right) = \frac{8,36 - 1,014}{2,5} = 2,94 \Rightarrow \frac{c_0}{c_1} = e^{2,94} = 18,9$$

$$\Rightarrow c_1 = 0,053 \text{ mol/l}$$

---

---

6.  $p_1 = 2 \text{ bar}$ ,  $p_2 = 6 \text{ bar}$

Wegen des chemischen Gleichgewichts zwischen Gasphase und gelöster Phase ist:

$$\mu(p_1) = \mu(c_1) \text{ und } \mu(p_2) = \mu(c_2)$$

Aus

$$\mu(p_2) - \mu(p_1) = RT \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = \mu(c_2) - \mu(c_1) = RT \ln\left(\frac{c_2}{c_1}\right)$$

folgt

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{c_2}{c_1} = \frac{6}{2} = 3$$



---

## 5. Phasenübergänge

### 5.3 Die Wärmebilanz bei Phasenübergängen

1. Aus Abb. 5.7 entnimmt man:

Bei 100 °C enthält

– 1 kg flüssiges Wasser 4600 Ct;

– 1 kg gasförmiges Wasser 10 700 Ct.

$$f = 10700/4600 \approx 2,3$$

Gasförmiges Wasser enthält 2,3 mal so viel Entropie wie flüssiges.

2. Gegeben:  $m = 10 \text{ kg}$

$$\vartheta = 90 \text{ °C}$$

Gesucht:  $\Delta S$

$$\Delta S = \Delta S_{\text{erwärmen}} + \Delta S_{\text{verdampfen}}$$

$$\Delta E = T \Delta S_{\text{erwärmen}} = c \cdot m \cdot \Delta T$$

$$\Delta S_{\text{erwärmen}} = c \cdot m \cdot \frac{\Delta T}{T} = 4180 \frac{\text{Ct}}{\text{kg}} \cdot 10 \text{ kg} \cdot \frac{10 \text{ K}}{368 \text{ K}} = 1136 \text{ Ct}$$

$$\Delta S_{\text{verdampfen}} = 10 \cdot 6048 \text{ Ct} = 60 480 \text{ Ct}$$

$$\Delta S = (1136 + 60 480) \text{ Ct} = 61 616 \text{ Ct}$$

3. Gegeben:  $\Delta S_{\text{schmelzen}} = 6000 \text{ Ct}$

Gesucht:  $m$

Zum Schmelzen von 1 kg Eis werden 1222 Ct gebraucht. Mit 6000 Ct kann man

$$(6000/1222) \text{ kg} = 4,91 \text{ kg Eis schmelzen.}$$

4. Gegeben: Temperaturänderung von 20 °C auf 0 °C

Masse des Sprudels = 0,25 kg

Gesucht: Masse des geschmolzenen Eises

$$\Delta E = T \Delta S_{\text{abkühlen}} = c \cdot m \cdot \Delta T$$

$$\Delta S_{\text{abkühlen}} = c \cdot m \cdot \frac{\Delta T}{T} = 4180 \frac{\text{Ct}}{\text{kg}} \cdot 0,25 \text{ kg} \cdot \frac{20 \text{ K}}{283 \text{ K}} = 74 \text{ Ct}$$

Dem Sprudel müssen 74 Ct entzogen werden. Sie werden zum Schmelzen von Eis verbraucht.

Zum Schmelzen von 1 kg Eis werden 1222 Ct gebraucht. Mit 74 Ct kann man

$$(74/1222) \text{ kg} = 0,061 \text{ kg Eis schmelzen.}$$

---

5. Gegeben: Temperaturänderung von 15 °C auf 60 °C  
 Masse der Milch = 0,2 kg  
 Gesucht: Masse des Dampfes

$$\Delta E = T \Delta S_{\text{abkühlen}} = c \cdot m \cdot \Delta T$$

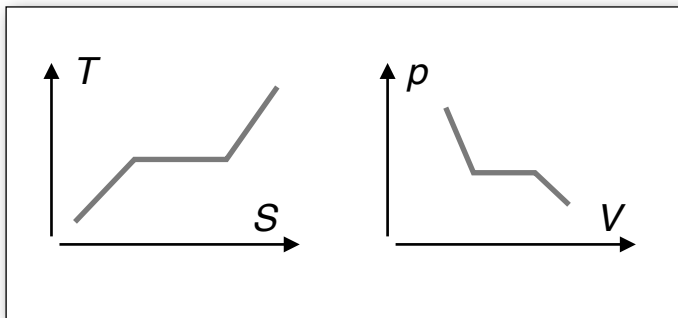
$$\Delta S_{\text{erwärmen}} = c \cdot m \cdot \frac{\Delta T}{T} = 4180 \frac{\text{Ct}}{\text{kg}} \cdot 0,2 \text{ kg} \cdot \frac{45 \text{ K}}{310 \text{ K}} = 121 \text{ Ct}$$

Der Milch müssen 121 Ct zugeführt werden. Sie werden von dem kondensierenden Dampf bezogen.

Beim Kondensieren von 1 kg Dampf werden 6048 Ct abgegeben.  
 Um 121 Ct zu bekommen, muss man  
 $(121/6048)\text{kg} = 0,020 \text{ kg} \approx 20 \text{ g}$  Dampf kondensieren.

## 5.4 Phasenübergang im Gedankenexperiment

1. Siehe Abb. 4



**Abb. 4**

Abschnitt 5.4, Aufgabe 1

2. Solange der Phasenübergang noch nicht begonnen hat, spürt man, dass der Druck zunimmt. Während der Phasenübergang stattfindet, nimmt der Druck nicht zu, obwohl man den Kolben nach unten bewegt. Wenn das ganze Gas kondensiert ist, spürt man plötzlich einen großen Widerstand: Der Kolben lässt sich nicht weiter hineindrücken.

## 5.5 Partialdruck und Luftfeuchtigkeit

$T = 293 \text{ K}$ , relative Luftfeuchte = 40 %

a) Sättigungsdruck = 2337 Pa  
 Partialdruck = 2337 Pa · 0,4 = 935 Pa

b) Der Gesamtdruck sei 100 000 Pa.

$$\frac{\text{Partialdruck des Wassers}}{\text{Gesamtdruck}} = \frac{935}{100\,000} = 0,00935 = \frac{n_{\text{Wasser}}}{n_{\text{gesamt}}}$$

0,935 % der Moleküle sind Wassermoleküle.

---

c)

$$n = \frac{p \cdot V}{R \cdot T} = \frac{935 \text{ Pa} \cdot 1 \text{ m}^3}{8,31 \text{ Ct/mol} \cdot 293 \text{ K}} = 0,384 \text{ mol}$$

$$m = M \cdot n = 18 \text{ g/mol} \cdot 0,384 \text{ mol} = 6,9 \text{ g}$$

## 5.6 Sieden und Verdunsten

Aus Abb. 5.4 liest man ab, dass bei etwa 80 °C der Gleichgewichtsdruck für den Übergang flüssig → gasig 0,5 bar ist. Bei einem Luftdruck von 0,5 bar ist daher die Siedetemperatur des Wassers 80 °C.

## 5.8 Alles verdunstet, alles löst sich

Im Wesentlichen dieselbe Fragestellung wie in Aufgabe 5b von Abschnitt 4.5.

a) Berechnung des chemischen Potentials des CO<sub>2</sub>:

$$p = 0,3 \text{ kPa}, p_0 = 100 \text{ kPa}, \mu(p_0) = 0 \text{ kG}$$

$$\mu(p) = \mu(p_0) + RT \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) = 0 \text{ kG} + 2,5 \text{ kG} \ln 0,003 = -14,5 \text{ kG}$$

b) Gasphase und gelöste Phase sind im chemischen Gleichgewicht, d.h., die chemischen Potentiale sind gleich:  $\mu(c_1) = -14,5 \text{ kG}$ .

Wir benutzen außerdem aus Tabelle 5.1:

$$\mu(c_0) = \mu(1 \text{ mol/l}) = 8,36 \text{ k}$$

$$\mu(c_0) - \mu(c_1) = RT \ln\left(\frac{c_0}{c_1}\right)$$

$$\Rightarrow 8,36 \text{ kG} + 14,5 \text{ kG} = 2,5 \text{ kG} \cdot \ln\left(\frac{c_0}{c_1}\right)$$

$$\Rightarrow \ln\left(\frac{c_0}{c_1}\right) = \frac{8,36 + 14,5}{2,5} = 9,14 \Rightarrow \frac{c_0}{c_1} = e^{9,14} = 9321$$

$$c_1 = 0,000107 \text{ mol/l}$$

---

---

## 6. Gekoppelte Ströme

### 6.1 Ein Stoff – mehrere Energieträger

#### 1. Masse, Stoffmenge, Impuls, Entropie

Nur das Schwerepotenzial ist an Eingang und Ausgang unterschiedlich. Der für die Energieübergabe zuständige Energieträger ist die Masse.

2. Masse und Entropie spielen keine Rolle für die Energieübergabe, da Schwerepotenzial bzw. Temperatur an Eingang und Ausgang gleich sind.

3. Mit  $M = m/n$  und  $m = \rho \cdot V$  wird

$$n = \frac{m}{M} = \frac{\rho}{M} \cdot V$$

Daraus folgt:

$$I_n = \frac{\rho}{M} I_V$$

und

$$\mu = \frac{V}{n} \cdot \rho = \frac{M}{\rho} \cdot \rho$$

Damit wird der Energieverbrauch der Pumpe:

$$P = (\mu - \mu_0) \cdot I_n = \frac{M}{\rho} (p - p_0) \cdot \frac{\rho}{M} I_V = (p - p_0) \cdot I_V$$

$$= 4,5 \text{ bar} \cdot 12 \text{ l/s} = 450 \text{ kPa} \cdot 0,012 \text{ m}^3/\text{s} = 5400 \text{ J/s}$$

### 6.3 Gleichgewichte

1. Zucker in Tee. Das chemische Potenzial des Zuckers wird ortsunabhängig.

2. Ein elektrisch leitender Körper aus einem einheitlichen Material wird elektrisch geladen. Die Ladung verteilt sich so, dass das elektrische Potenzial überall denselben Wert hat.

3. Wasser wird in einen Behälter gegossen. Die Oberfläche stellt sich so ein, dass das Wasser überall an der Oberfläche dasselbe Gravitationspotenzial hat.

4. Bedingung für Bewegungsgleichgewicht:

$$v(x) = \text{const}$$

---

Wasser in der Mitte eines Flusses, dort, wo das Wasser ruhig fließt, und wo es nicht verwirbelt ist. Benachbarte Wasserportionen haben dieselbe Geschwindigkeit.

5. Aus

$$\mu = \frac{V}{n} \cdot p$$

$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

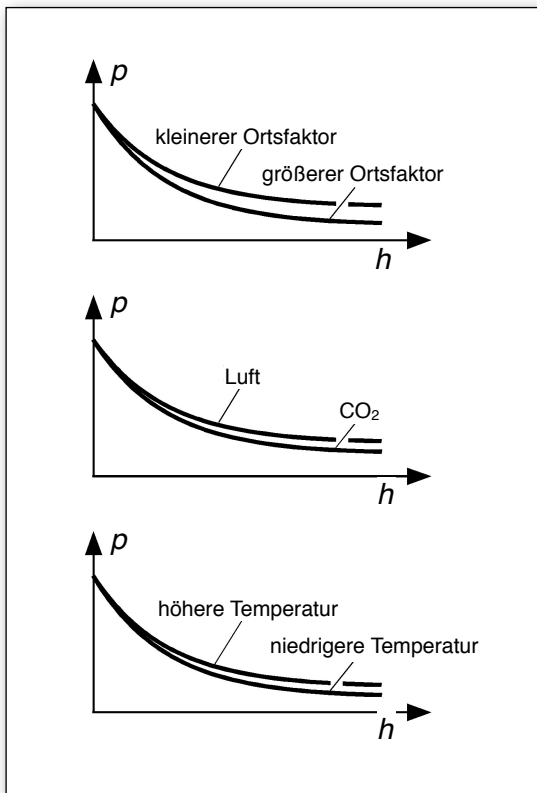
folgt

$$\mu(h) = \frac{V}{n} \cdot \frac{m}{V} \cdot g \cdot h = M \cdot g \cdot h = M \cdot \psi(h)$$

und daraus

$$\mu(h) + M \cdot \psi(h) = 0$$

6. Siehe Abb. 5



**Abb. 5**

Abschnitt 6.3, Aufgabe 6

7.  $p_0 = 1 \text{ bar}$ ,  $g = 10 \text{ N/kg}$ ,  $T = 293 \text{ K}$ ,

$R = 8,3 \text{ Ct/mol}$

$M = 0,8 \cdot M_{\text{Stickstoff}} + 0,2 \cdot M_{\text{Sauerstoff}} = 0,0288 \text{ kg/mol}$

$$p = p_0 \cdot e^{-\frac{M \cdot g \cdot h}{R \cdot T}} = \dots = 0,62 \text{ bar}$$

---

8. Die beiden Metalle befinden sich im elektro-chemischen Gleichgewicht:

$$\mu_1 - F \cdot \phi_1 = \mu_2 - F \cdot \phi_2$$

$$\Delta\phi = \frac{\Delta\mu}{F}$$

$$\text{Na-Cu: } \Delta\phi = \frac{198}{96\,500} \text{ V} = 2,1 \text{ mV}$$

$$\text{Pb-Al: } \Delta\phi = \frac{24,2}{96\,500} \text{ V} = 0,25 \text{ mV}$$

9. Wenn das Lämpchen selbst mit Kupferdrähten angeschlossen ist, so entsteht ein weiterer Kontakt Aluminium-Kupfer, an dem eine zweite Kontaktspannung liegt. Die beiden Kontaktspannungen heben sich gegenseitig auf; die Nettospannung ist 0 V.

#### 6.4 Thermo-elektrische Energieumlader

Man wählt die beiden Leiter so, dass der eine positive, der andere negative Ladungsträger hat. Wenn nun beide Ladungsträgersorten vom Entropiestrom von warm nach kalt mitgenommen werden, so tragen beide zum Nettoantrieb der Ladung im selben Drehsinn bei.

#### 6.5 Elektro-chemische Energieumlader

Damit  $\Delta\phi = 1 \text{ V}$  wird, muss

$$\Delta\mu = \Delta\phi \cdot z \cdot F = 1 \text{ V} \cdot 96\,500 \text{ C/mol} = 96,5 \text{ kG}$$

sein. Damit wird:

$$96,5 \text{ kG} = 2,5 \text{ kG} \cdot \ln \frac{p}{p_0}$$

$$\ln \frac{p}{p_0} = 38,6$$

$$\frac{p}{p_0} = e^{38,6} = 5,8 \cdot 10^{16}$$

Mit  $p_0 = 1 \text{ bar}$  wird  $p = 5,8 \cdot 10^{16} \text{ bar}$ , ein unrealistisch hoher Wert.

---

---

## 7. Thermische Strahlung

### 7.2 Das Lichtgas – thermische Strahlung

$$f_{\max} = 0,588 \cdot 10^{11} \cdot 500 \text{ Hz} = 29,4 \text{ THz}$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{29,4 \cdot 10^{12} \text{ Hz}} = 10,2 \text{ } \mu\text{m}$$

### 7.3 Emission und Absorption, schwarze Körper

1.  $f = 6,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$

$$T = \frac{f_{\max}}{0,588 \cdot 10^{11}} \cdot \frac{\text{K}}{\text{Hz}} = \frac{6,5 \cdot 10^{14}}{0,588 \cdot 10^{11}} \text{ K} = 11\,050 \text{ K}$$

3. Energiestromdichte an der Sonnenoberfläche:

$$j_{E, \text{ Sonne}} = \sigma T^4 = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 5800^4 \text{ W/m}^2 = 64 \text{ MW/m}^2$$

Oberfläche der Sonne:

$$A = 4\pi r^2 = 4\pi \cdot 7^2 \cdot 10^{16} \text{ m}^2 = 6,16 \cdot 10^{18} \text{ m}^2$$

Energiestrom von der Sonne:

$$P_{\text{ Sonne}} = j_{E, \text{ Sonne}} \cdot A = 64 \text{ MW/m}^2 \cdot 6,16 \cdot 10^{18} \text{ m}^2 = 3,94 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

Aus einer Kugeloberfläche mit dem Radius

$$r_{\text{ Sonne-Erde}} = \text{Abstand Sonne-Erde} = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$$

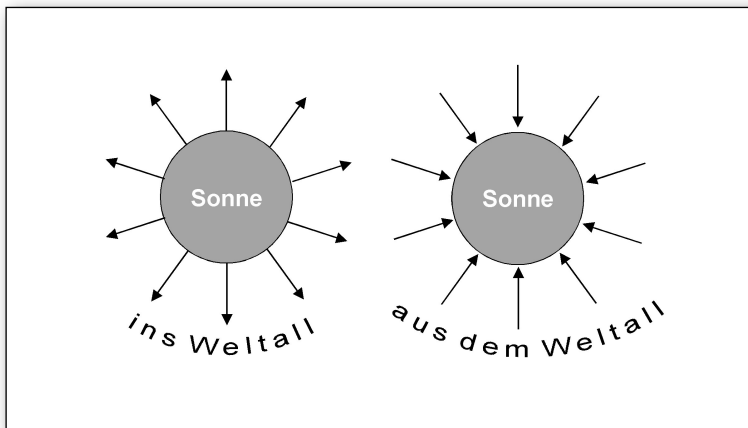
schneidet die Erde eine Fläche vom Flächeninhalt  $\pi r_{\text{ Erde}}^2$  aus. Die Erde trifft also ein Energiestrom der Stärke:

$$P_{\text{ Erde}} = P_{\text{ Sonne}} \cdot \frac{\pi r_{\text{ Erde}}^2}{4\pi r_{\text{ Sonne-Erde}}^2} = 3,94 \cdot 10^{26} \text{ W} \cdot \frac{6371^2}{4 \cdot 1,5^2 \cdot 10^{22}} = 1,78 \cdot 10^{11} \text{ W}$$

---

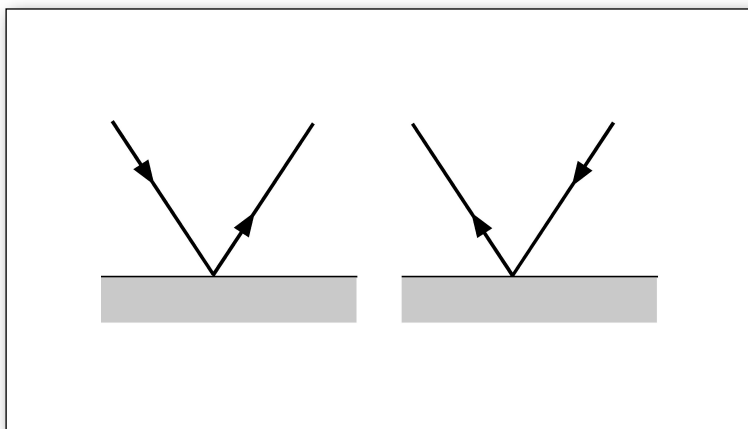
## 7.4 Umkehrbare und nichtumkehrbare Prozesse mit Licht

1. Siehe Abb. 6. Den rechten Vorgang beobachtet man nie.
2. Siehe Abb. 7. Beide Vorgänge werden beobachtet.
3. Siehe Abb. 8. Jedes Lichtbündel, das vom Glühdraht kommt, wird an der Oberfläche der Glühlampe gestreut: Das Licht geht in alle Richtungen weiter. Wir betrachten wieder ein dünnes Bündel von diesem Streulicht, das nach außen wegläuft. Es wird noch einmal gestreut, nämlich am Lampenschirm.



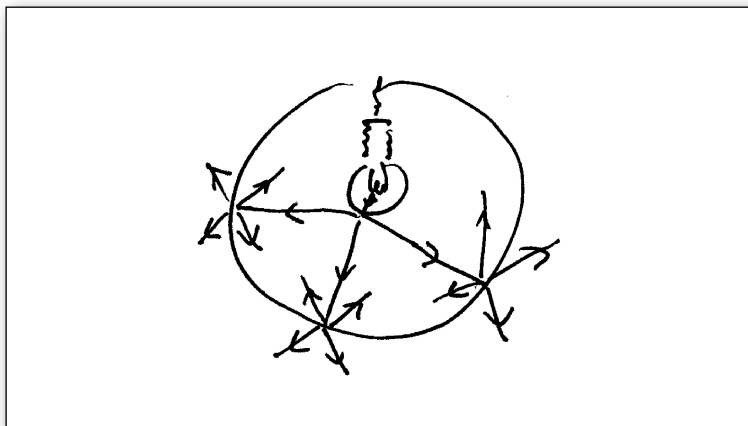
**Abb. 5**

Abschnitt 7.4, Aufgabe 1



**Abb. 7**

Abschnitt 7.4, Aufgabe 2



**Abb. 8**

Abschnitt 7.4, Aufgabe 3

---



---

## 8. Entropieströme in den Gashüllen von Planeten und Sternen

### 8.1 Die Troposphäre

1. Für den Energiestrom von der Sonne am Ort der Erde gilt:

$$j_E = 1368 \text{ W/m}^2$$

Der Energiestrom, den die Erde abbekommt, ist:

$$P = \pi \cdot r_{\text{Erde}}^2 \cdot j_E$$

Er wird im Mittel auf die ganze Erdoberfläche  $4\pi \cdot r_{\text{Erde}}^2$  verteilt. Es ist also auch

$$P = 4\pi \cdot r_{\text{Erde}}^2 \cdot j_{E, \text{mittel}}$$

Damit wird

$$j_{E, \text{mittel}} = j_E/4 = 342 \text{ W/m}^2$$

Davon gehen noch 31 % für direkte Rückstreuung ab. Es bleiben  $0,69 \cdot 342 \text{ W/m}^2 = 236 \text{ W/m}^2$

2. Ohne Atmosphäre gäbe es auch keine Wolken, also auch keine Rückstreuung von Wolken. Vielleicht gäbe es aber mehr Eis und dadurch wieder mehr Rückstreuung. Wir schätzen  $j_E = 300 \text{ W/m}^2$ .

Mit

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

$$T = \sqrt[4]{\frac{j_E}{\sigma}} = \sqrt[4]{\frac{300}{5,67 \cdot 10^{-8}}} \text{ K} = 270 \text{ K}$$

### 8.2 Schichtungen von Flüssigkeiten

1. Das Wasser von 4 °C befindet sich ganz unten, darüber nebeneinander Wasser höherer und niedrigerer Temperatur. Etwa in gleicher Höhe Wasser von 3 °C und 5 °C, darüber von 2 °C und 6 °C usw.

2. Erhitzen von oben bewirkt, dass die Dichte oben höher wird als unten. Es setzt Konvektion ein, das Wasser wird umgerührt, die Schichtung wird indifferent. Erhitzen von unten bewirkt, dass die Dichte unten höher wird als oben. Die Schichtung wird also stabil, die Temperatur unten wird höher als die oben.

---

---

### 8.3 Schichtungen von Gasen

Weg der Entropie: Vom Heizkörper auf die vorbeistreichende Luft. Mit dieser nach oben und zur Seite. Dabei geht die Entropie auf die umgebenden kälteren Gegenstände über. Die Temperatur ist oben höher als unten, die Luftschichtung ist stabil. Das Einstellen einer indifferenten Schichtung wird durch das Aufheizen der Luft am Heizkörper gestört.

### 8.4 Der konvektive Entropietransport durch die Troposphäre

1. Siehe auch Aufgabe 3., Abschnitt 7.3.

Berechnung der Energiestromdichte  $j_E$  des Sonnenlichts am Ort der Venus:

Mit  $j_{E, \text{ Sonne}} = 64 \text{ MW/m}^2$  wird

$$\frac{j_E}{j_{E, \text{ Sonne}}} = \frac{4\pi r_{\text{Sonne}}^2}{4\pi r_{\text{Sonne-Venus}}^2}$$

$$j_E = j_{E, \text{ Sonne}} \cdot \frac{r_{\text{Sonne}}^2}{r_{\text{Sonne-Venus}}^2} \\ = 64 \frac{\text{MW}}{\text{m}^2} \cdot \frac{(7 \cdot 10^5 \text{ km})^2}{(1,16 \cdot 10^8 \text{ km})^2} = 2330 \text{ W/m}^2$$

$$j_{E, \text{ mittel}} \frac{j_E}{4} = \frac{2330 \text{ W/m}^2}{4} = 583 \text{ W/m}^2$$

$$T = \sqrt[4]{\frac{j_E}{\sigma}} = \sqrt[4]{\frac{583}{5,67 \cdot 10^{-8}}} \text{ K} = 318 \text{ K}$$

Es wurde angenommen, dass gar kein Sonnenlicht direkt zurückgestreut wird.

2. Siehe auch Aufgabe 7., Abschnitt 6.3.

$$h = 2850 \text{ m}$$

$$p_0 = 1 \text{ bar}, M = 0,0288 \text{ kg/mol}, g = 10 \text{ N/kg},$$

$R = 8,3 \text{ Ct/mol}, T = 293 \text{ K}$ . (Für  $T$  wurde 293 K als mittlere Temperatur angenommen.)

$$p = p_0 \cdot e^{-\frac{M \cdot g \cdot h}{R \cdot T}} = \dots = 0,71 \text{ bar}$$

---

---

$\beta = 0,4$ ,  $T_0 = 310 \text{ K}$  (geschätzt am Äquator auf Meeresspiegelhöhe)

$$T = T_0 \cdot \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\frac{\beta}{\beta+1}} = 310 \text{ K} \cdot 0,71^{0,286} = 281 \text{ K}$$

## 8.7 Der Wärmetransport in der Sonne und in Sternen

Temperatur im Innern der Sonne:

$$T_i = 15\,000\,000 \text{ K}$$

Temperatur an der Oberfläche der Sonne:

$$T_a = 6\,000 \text{ K}$$

Energiestrom von der Sonne

$$P = 4 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

Der Energiestrom ist innen und außen gleich groß. Es ist also

$$P = T_i \cdot I_{S,i} \Rightarrow I_{S,i} = \frac{P}{T_i}$$

$$P = T_a \cdot I_{S,a} = T_a (I_{S,i} + I_{S,erz}) \Rightarrow I_{S,erz} = \frac{P}{T_a} - I_{S,i}$$

Aus den beiden Gleichungen folgt:

$$I_{S,erz} = \frac{P}{T_a} - \frac{P}{T_i} = P \left( \frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_i} \right)$$

Da  $T_i \gg T_a$  ist, ist  $1/T_i$  gegen  $1/T_a$  vernachlässigbar. Praktisch die ganze Entropie, die außen ankommt, wird auf dem Weg von innen nach außen erzeugt:

$$I_{S,erz} \approx \frac{P}{T_a} = \frac{4 \cdot 10^{26} \text{ W}}{6 \cdot 10^3 \text{ K}} = 6,7 \cdot 10^{22} \text{ Ct/s}$$

---