

Entropie für die Schule

Ein Vorschlag von Jörg Hüfner

Vortrag bei einer Fortbildungsveranstaltung für Physiklehrer an der Universität
Heidelberg, 12.03.05

Vorbemerkung

Entropie ist ein notorisch schwieriger Begriff. Der Schule gelingt es i.a. nicht, diesen Begriff zu vermitteln. Das liegt wohl auch daran, dass er den Lehrern nicht so vertraut ist, dass sie ihn den Schülern nahe bringen können. Da das Wissen der Lehrer auf den Vorlesungen der Universität basiert, ist es bisher nicht gelungen, Entropie so anschaulich zu machen, dass sie in das Denken und Vokabular der Lehrer und Schüler und damit des täglichen Lebens eingeht. Zum Vergleich: der Begriff Energie ist in das „öffentliche Vokabular“ eingegangen, d.h. wird in den Medien und in Gesprächen gebraucht und sogar in den meisten Fällen richtig. Da Entropie eine ähnlich wichtige Rolle wie Energie im Verständnis der Naturvorgänge spielt, sollte sie und die mit ihr verbundenen Phänomene auch Eingang in das naturwissenschaftliche Minimalwissen des Gymnasiums finden. Das ist keine wissenschaftliche, sondern eine pädagogische Herausforderung an Universität und Schule. Ob dies wirklich gelingt, kann nur die Erfahrung zeigen.

In dem hier vorgelegten Vorschlag versuche ich, die Konzepte Wärme und Entropie einzuführen, sie gegeneinander abzugrenzen und ihnen anschauliche Bedeutung zu geben. Möglichst wenige Formeln sollen vorkommen. An drei einfach zu durchschauenden Beispielen zeige ich, wie fruchtbar das Konzept der Entropie ist.

1. Wärme

In dem Gebiet der Physik, das man Wärmelehre oder Thermodynamik nennt, treten drei neue physikalische Begriffe auf, Temperatur, Wärme und Entropie. Ich werde sie in dieser Reihenfolge diskutieren, und gehe dabei den Weg vom Einfachen zum Schwierigen.

Die Empfindungen heiß und kalt sind Erfahrungen des täglichen Lebens. Ihre physikalische Analyse führt auf den Begriff der **Temperatur** T eines Körpers, die man mit einem Thermometer misst. Temperatur ist ein im alltäglichen Leben wohl vertrauter Begriff.

Dagegen ist **Wärme** ein schon etwas schwierigerer Begriff. Um 1800 erahnte Lord Rumford die Wesensgleichheit von Wärme und Energie, als er die Wärmeentwicklung beim Aufbohren von Kanonenrohren beobachtete. Diese seine Vorstellung bestätigte sich in den weiteren Untersuchungen. Es gelang, die Wärme (genauere Begriffe sind vielleicht „Wärmemenge“ oder „Wärmeenergie“) in den Einheiten Joule der mechanischen Energie zu messen. Man benutzt oft das Symbol ΔQ , wenn man die Energiezufuhr in Form von Wärme bezeichnet. Die Energie E eines Systems verändert sich, wenn mechanische Energie („Arbeit“) ΔW und/oder Wärme ΔQ zu- oder abgeführt werden:

$$\Delta E = \Delta W + \Delta Q$$

Man nennt diese Gleichung, die nichts anderes als ein verallgemeinerter Energiesatz ist, oft auch den „ersten Hauptsatz der Wärmelehre“. Der Energiesatz der Mechanik, dass die Gesamtenergie eines abgeschlossenen Systems zeitlich konstant ist, muss jetzt die Wärmeenergie einschließen. Wir formulieren den Merksatz:

Wärme ist eine Form der Energie.

Wenn einem Körper Wärmeenergie zugeführt wird, erhöht sich (außer an einem Phasenübergang) seine Temperatur, aber es treten keine anderen sichtbaren Veränderungen an dem Körper auf. Diese Beobachtung, die natürlich schon recht alt ist, führte wohl Rumford zu der Vermutung, dass Wärme eine Art „innere Energie“ sei. Er schrieb sie der vibrierenden Bewegung der Teilchen, aus denen der erwärmte Körper besteht, zu. Erst nachdem die atomare Struktur der Materie erkannt worden war, konnte man diese Vorstellung verifizieren und präzisieren.

Die heutige Vorstellung soll an dem Beispiel eines idealen Gases erklärt werden. Dieses besteht aus Atomen, die sich „kreuz und quer“ durch den Raum bewegen d.h. in allen möglichen Richtungen und mit verschiedenen Geschwindigkeiten. Die Atome werden an den Wänden reflektiert oder ändern ihre Geschwindigkeiten in Stößen zwischen zwei Atomen. Auch wenn sich die Geschwindigkeiten der einzelnen Atome dauernd ändern, bleibt der Eindruck einer „ungeordneten“ Bewegung. Wenn man dem Gas Wärme zuführt, nehmen die Geschwindigkeiten zu. Die **Unordnung** in der Bewegung der Gasatome ist das Neue an der Wärme.

Im Gegensatz dazu wird eine Bewegung von Atomen „geordnet“ genannt, wenn alle Atome mit gleicher Geschwindigkeit und in die gleiche Richtung fliegen, sozusagen in „Reih und Glied“ wie marschierende Soldaten. Die Mechanik ist der Teil der Physik, der sich mit geordneten Bewegungen beschäftigt. Wenn ein Stein fällt, fallen alle seine Atome mit der gleichen Geschwindigkeit und in die gleiche Richtung. Die zugehörige Energie, die Bewegungsenergie oder kinetische Energie des Steins berechnet sich aus seiner Gesamtmasse M und seiner Geschwindigkeit v zu:

$$E_{\text{Stein}} = \frac{1}{2} M v^2.$$

Aber auch der ungeordneten Bewegung in einem Gas kann man eine Gesamtenergie zuordnen, nämlich die Summe der Energien der einzelnen Gasatome

$$E_{\text{Gas}} = \sum (\frac{1}{2} m v_i^2),$$

wobei m die Masse und v_i die Geschwindigkeiten der N einzelnen Atome sind. Die Geschwindigkeiten v_i unterscheiden sich voneinander in Richtung und Größe. Würden sich alle Moleküle in die gleiche Richtung und mit gleicher Geschwindigkeit bewegen, wäre $v_i = v$ und man erhielte die Formel für den Stein mit $M = N m$. Man beachte: um eine geordnete Bewegung zu beschreiben benötigt man nur die Kenntnis einer Geschwindigkeit, während der Zustand des Gases zu einem bestimmten Zeitpunkt nur vollständig bestimmt ist, wenn alle N Geschwindigkeiten bekannt sind. Die Energie, die zu der ungeordneten Bewegung der Atome in einem Gasbehälters gehört, nennt man auch die innere Energie, man könnte sie auch Wärmeenergie nennen. Wir fassen das Ergebnis in den Merksatz

Wärme ist Energie in ungeordneter Bewegung.

Das Gemeinsame an den Beispielen fallender Stein und erwärmtes Gas ist, dass es sich um dieselbe Form von Energie, nämlich Bewegungsenergie handelt. Der Unterschied zwischen beiden Phänomenen ist der Grad der Ordnung, für den wir eine neue Messgröße einführen müssen. Das wird die Entropie sein.

Der **mikroskopische** Zustand eines Gases, nämlich die Bewegung der Gasatome ist zwar sehr anschaulich aber völlig unpraktisch. Denn erstens kann man diese Bewegung nur mit ganz feinen physikalischen Methoden untersuchen. Und zweitens: Will man die ungeordnete Bewegung in einem Gas beschreiben, steht man vor einer unüberwindlichen Schwierigkeit. Wegen der Vielzahl der Atome ($6 \cdot 10^{23}$ in einem Mol eines Gases) ist unmöglich, die Geschwindigkeiten aller Atome zu einem festen Zeitpunkt zu kennen und ihre zukünftige Bewegung zu verfolgen. Der mikroskopische Zugang, d.h. die Betrachtung aller einzelnen Atome, ist zwar anschaulich (und sollte deshalb im Kopf behalten werden), aber nicht praktikabel.

Glücklicherweise gibt es einen **makroskopischen** Zugang, wobei man das Verhalten eines Systems durch wenige Eigenschaften charakterisieren kann. Als Beispiel kann die Energie E_{Gas} gelten: Aus dem Gesetz von der Erhaltung der Energie wissen wir, dass sich der Wert von E_{Gas} nicht ändert, auch wenn sich in dem Gas durch Stöße die Geschwindigkeiten dauernd ändern. Die Gesamtenergie ist also eine makroskopische Variable des Systems. Der Grad der Unordnung eines Systems lässt sich mit einer anderen makroskopischen Variablen, der Entropie, beschreiben.

Experiment: Brownsche Bewegung als Beispiel für eine ungeordnete Bewegung von Teilchen.

2. Ordnung

Jeder glaubt intuitiv zu wissen, was Ordnung ist, hätte aber Schwierigkeiten, dem Ordnungszustand eines Systems eine Zahl zuzuordnen. Hat die Ordnung auf dem Schreibtisch den Wert 7 oder 0,3? Das klingt absurd, ist aber nicht so. Um der Quantifizierung von Ordnung näher zu kommen, betrachten wir als Beispiel eine Bibliothek mit N Büchern. Der ordentlichste Zustand der Bibliothek, ist hergestellt, wenn alle N Bücher nach dem Alphabet angeordnet sind. Dafür gibt es nur eine Möglichkeit. Wir bezeichnen mit dem Buchstaben Ω die Zahl der Möglichkeiten die Bücher anzuordnen. Für die alphabetische Anordnung gilt also

$$\Omega_0 = 1.$$

Nehmen wir nun an, ein Leser habe ein Buch herausgenommen und nach dem Lesen zurückgestellt, ohne darauf zu achten, wohin er es stellt. Da er vor sich $N-1$ Bücher hat, kann er sein Buch vor die $N-1$ Bücher, zwischen die Bücher und hinter die Bücher stellen, er hat also insgesamt also N Möglichkeiten,

$$\Omega_1 = N.$$

Nur eine davon ist die alphabetische. Also hat der nachfolgende Leser, der das Buch nicht an der richtigen Stelle findet, $N-1$ weitere Möglichkeiten, an denen er suchen muss. Entsprechend: wenn zwei Leser jeweils ihr Buch an beliebige Positionen zurückstellen, sieht der erste $N-2$ Bücher vor sich und hat damit $N-1$ Möglichkeiten, sein Buch einzustellen. Der zweite Leser hat dann die Situation wie oben, also N Möglichkeiten, also insgesamt:

$$\Omega_2 = N(N-1) .$$

Wenn aber überhaupt keine Ordnung d.h. maximale Unordnung bei den Büchern vorliegt, dann können die N Bücher in jeder möglichen Reihung vorliegen, wobei die Zahl dieser Reihungen ist:

$$\Omega_N = N!$$

Die Zahl Ω wird sehr schnell sehr groß: Für eine Bibliothek von nur 10 Büchern erhält man $3.6 \cdot 10^6$ Möglichkeiten. Die Zahl Omega der möglichen Anordnungen kann als Maß für die Unordnung einer Bibliothek genommen werden. Für ein ganz allgemeines System formulieren wir den Merksatz:

Der Grad der Unordnung eines Systems wird durch die Zahl Ω der möglichen Zustände, die das System einnehmen kann, charakterisiert. $\Omega = 1$ bedeutet maximale Ordnung.

Bei der Bibliothek ist eine Reihung der Bücher ein möglicher Zustand. Man beachte, dass jeweils nur einer der Ω möglichen Zustände realisiert ist, aber es ist nicht bekannt, welcher. Deshalb hat Unordnung auch etwas mit Information zu tun. An dem Beispiel der Bibliothek lernen wir noch wichtige Eigenschaften der Unordnung.

- (a) Wenn man die Bibliothek sich selbst, d.h. den Lesern, überlässt, wird die Unordnung mit der Zeit zunehmen, nie abnehmen.
- (b) Es gibt einen Maximalwert der Unordnung, nämlich der, wenn alle Bücher möglicherweise verstellt sind. Auch wenn sich durch weitere Benutzer der Bibliothek die Reihung der Bücher verändert, bleibt der Grad der Unordnung bestehen, weil von keinem Buch bekannt ist, wo es steht.
- (c) Je größer die Unordnung, desto weniger wert ist eine Bibliothek.
- (d) Nur durch ein Eingreifen von außen, z.B. durch Bibliothekare, kann die Unordnung wieder abnehmen.

Bei dem Beispiel der Bibliothek war das Abzählen der möglichen Anordnungen einfach, weil es sich um ein eindimensionales Problem handelt. Wie man die Möglichkeiten der Anordnung von Geschwindigkeiten und Orten von Atomen in Gasen oder in Festkörpern abzählt, d.h. ihren Ordnungszustand charakterisiert, geht wohl über den Stoff der Schule hinaus.

Anmerkung: Ich empfehle nicht den Begriff Information im Zusammenhang mit Entropie einzuführen, da man einen Begriff wie die Entropie nicht besser versteht, wenn man ihn mit einem anderen auch nicht verstandenem Begriff in Verbindung bringt.

3. Entropie

Nicht nur die Zahl Ω der Möglichkeiten ist ein Maß für die Unordnung, sondern auch jede monoton wachsende Funktion $f(\Omega)$. Diese Freiheit hat man benutzt und das folgende Maß eingeführt und es Entropie S genannt

$$S = k_B \ln(\Omega)$$

und das nicht ohne Grund: Denn die Logarithmusfunktion hat die wichtige Eigenschaft, dass der Logarithmus eines Produktes gleich der Summe der Logarithmen ist, $\ln(a \cdot b) = \ln a + \ln b$. Für zwei Systeme, die nichts miteinander zu tun haben, ist die Zahl der Möglichkeiten Ω gleich dem Produkt der Einzelmöglichkeiten $\Omega = \Omega_1 \cdot \Omega_2$. Das überlegt man sich leicht an dem Beispiel der Reihungen von Bücher in zwei völlig getrennten Bibliotheken. Damit gilt für zwei nicht in Kontakt stehenden Systeme 1 und 2

$$S = S_1 + S_2 .$$

Die multiplikative Konstante k_B in der Definition der Entropie ist im gewissen Sinn willkürlich. Identifiziert man sie jedoch mit der Boltzmann Konstante, werden viele Formeln einfacher und das tut man in der statistischen Physik der Wärme.

Die folgende Aussage, auch „**zweiter Hauptsatz der Wärmelehre**“ genannt, enthält die allerwichtigste Eigenschaft der Entropie:

In einem abgeschlossenen System nimmt die Entropie niemals ab.

$$\Delta S \geq 0.$$

Aus dem Zusammenhang von Entropie und Unordnung ist diese Aussage plausibel („Von selbst nimmt Unordnung nie ab“). Aber Plausibilität ist kein Beweis. Die Eigenschaft $dS \geq 0$ lässt sich jedoch unter gewissen Voraussetzungen aus dem Zusammenhang von Unordnung und Entropie ableiten. Da die Entropie in einem abgeschlossenen System sich immer in eine Richtung entwickelt, wollen wir Entropie eine **Richtungsgröße** nennen, zum Unterschied von der Energie, die für dasselbe System eine **Erhaltungsgröße** ist. Das Wort „Entropie“, griech. entropo: sich nach etwas hinwenden, drückt diese Bedeutung auch aus.

Die Entropie eines physikalischen Systems hängt von den Eigenschaften des Systems ab, z. B. seiner Energie E , seinem Volumen V , seiner Teilchenzahl N und natürlich von seiner stofflichen Zusammensetzung und verändert sich mit diesen Parametern. Wir schreiben deshalb $S(E, V, N, \dots)$. Man kann nun studieren, wie sich die Entropie eines Systems verändert, wenn man die einzelnen Parameter verändert. Der wichtigste Fall ist der folgende

Verändert man in einem System die Energie E um ein ΔE und hält alle anderen Parameter konstant, dann ändert sich die Entropie um

$$\Delta S = \Delta E / T,$$

worin T die absolute Temperatur ist. Man schreibt diese Formel auch oft mit ΔQ anstelle von ΔE , wobei ΔQ die zu- oder abgeführte Wärme ist. Auch in dieser Form ist die Formel richtig, da hinzugefügte Energie ohne Änderung anderer makroskopischer Parameter gerade das ist, was man Erwärmung nennt. Die obige Aussage ist kein Axiom, sondern lässt sich aus der Definition und der Eigenschaft, dass die Entropie eines abgeschlossenen Systems ein Maximum hat, ableiten. Allerdings nimmt sie nur für die sog. absolute Temperaturskala diese einfache Form an. Weitere Eigenschaften der Entropie werden wir im folgenden nicht brauchen.

In seinem Lehrbuch der theoretischen Physik bringt A. Sommerfeld in dem Abschnitt Entropie den folgenden Vergleich: Wenn man die Natur mit einem Industriebetrieb vergleicht, dann spielt die Energie die Rolle der Bilanzbuchhalterin und die Entropie die Rolle der Direktorin. Die Buchhalterin bilanziert Einnahmen und Ausgaben: nichts darf verloren gehen. Die Direktorin aber führt den Betrieb nach gewissen Zielvorgaben, z.B. die Maximierung des Gewinns, wobei die Bilanz natürlich stimmen muss. Der Gewinn aus einem Betrieb ist keinem Erhaltungssatz unterworfen, allerdings kann er nicht größer als der Umsatz sein. In der Natur gibt die „Direktorin Entropie“ die Richtung der „Geschäftsentwicklung“ vor: Alle Prozesse in der Natur müssen so ablaufen, dass in einem abgeschlossenen System die Entropie maximiert wird.

Im Physikunterricht lernt man schon früh Beispiele für Erhaltungsgrößen kennen, z.B. Energie, Impuls, Masse und Ladung. Mit der Entropie stößt man zum ersten Mal im Unterricht auf eine Richtungsgröße. Deshalb muss man diesen Begriff klären und ihn scharf gegen die vertrauten Erhaltungsgrößen, hier insbesondere die Energie abgrenzen. In den folgenden drei Abschnitten werden wir verschiedene Phänomene analysieren und mit Hilfe der Eigenschaften von Entropie und Energie zu interessanten Ergebnissen kommen.

4. Wohin fließt Wärme?

Warum frieren wir im Winter? Das scheint eine dumme Frage zu sein. Denn wir frieren doch, weil es um uns herum kalt ist. Nun könnte ein physikalischer Sokrates nachhaken: „Klar, es ist kalt, aber was hat die Kälte der Luft mit unserem Frieren zu tun?“ Ihm würde man antworten, dass man friere, weil ein Teil der Körperwärme an die Luft abgeben werde. Aber warum, so würde er weiterfragen, fließt denn die Körperwärme von der Person weg? Da der Vorgang uns aus dem täglichen Leben so sehr vertraut ist, dass wir ihn nie infrage stellen, müssten wir an dieser Stelle die Antwort schuldig bleiben – außer wir rufen die Entropie zu Hilfe.

Zurück zur Physik: Wir behandeln das folgende Problem zur Wärmeleitung: Zwei Systeme, die wir durch die Indizes 1 und 2 unterscheiden, werden in Wärmekontakt gebracht. Das Gesamtsystem aus den beiden Systemen bleibe dabei nach außen abgeschlossen. Vor dem Kontakt haben die Untersysteme die Energien E_1 und E_2 und Entropien S_1 und S_2 , wobei dann für das Gesamtsystem gilt

$$E = E_1 + E_2,$$

$$S = S_1 + S_2.$$

Über den Wärmekontakt fließe spontan, d.h. ohne unser Zutun, eine Wärmemenge ΔQ von System 1 nach 2. Wegen der Energieerhaltung ändert sich die Gesamtenergie nicht, so dass für die Energie E' nach dem Wärmekontakt gilt

$$E' = (E_1 - \Delta Q) + (E_2 + \Delta Q) = E$$

d.h. die Energie ΔQ , die von System 1 abgeflossen ist, ist dem System 2 zugeflossen, so dass die neue Gesamtenergie E' sich nicht von E unterscheidet. Die Entropie S' , die sich nach dem Überfließen der Wärme ΔQ ergibt, unterscheidet sich aber von der Anfangsentropie S , denn

$$S' = S_1 + (-\Delta Q)/T_1 + S_2 + \Delta Q/T_2 = S + \Delta Q (1/T_2 - 1/T_1).$$

Jetzt kommt die Grundaussage der Entropie ins Spiel, nämlich, dass in einem abgeschlossenen System die Entropie immer zunimmt. Deshalb muss die Differenz $S' - S$ positiv sein. Wenn aber die positive Energie ΔQ spontan von System 1 nach System 2 fließt, kann das nur geschehen, wenn

$$(1/T_2 - 1/T_1) \geq 0, \text{ d.h. } T_1 \geq T_2,$$

d.h. wenn sie von dem System mit höherer Temperatur zu dem mit niedrigerer fließt. Wir fassen das Ergebnis in dem Merksatz zusammen:

In einem abgeschlossenen System fließt Wärme spontan immer nur vom heißeren zum kälteren Körper.

Diese Erkenntnis entspricht unserer Erfahrung. Im Winter fließt von unserem Körper Wärme in die kältere Umgebung ab. Deshalb frieren wir. Dass die Wärme nur in die eine Richtung, von heiß nach kalt, fließt, hat nichts mit der Energieerhaltung zu tun, sondern folgt aus dem „Ziel der Natur“, immer den Zustand maximaler Entropie herstellen zu wollen. Der Wärmefluss wird erst enden, wenn die Temperaturen der beiden Körper ausgeglichen sind.

Versucht man sich ein anschauliches Bild zu machen, was beim Wärmefluss passiert, sollte man wieder auf das mikroskopische Modell zurückgreifen. Wärme ist Energie in ungeordneter Bewegung. In einem kälteren System bewegen sich die Moleküle im Mittel langsamer als in einem heißeren. Wenn ein kälteres System mit einem wärmeren in Kontakt gebracht werden, geben im Mittel die schnelleren Gasmoleküle Energie an die langsameren ab und nicht umgekehrt. Unterschiede gleichen sich eher aus, als dass sie sich verstärken. Damit lässt sich verstehen, warum der Wärmefluss in die Richtung läuft, dass sich die Temperaturen ausgleichen.

Allerdings sagt das Entropiegesetz nichts darüber, wie **schnell** die Energie von der höheren Temperatur zur tieferen fließt. Aus dem täglichen Leben weiß man, dass man den Wärmeabfluss stark drosseln kann, wenn man sich warm anzieht, am besten mit Kleidern, die schlecht Wärme leiten. Der entscheidende Begriff für die Geschwindigkeit des Wärmeflusses ist die Wärmeleitfähigkeit.

Experiment: Zwei Metallblöcke verschiedener Temperatur werden in Kontakt gebracht, man verfolgt die zeitliche Entwicklung der Relativtemperatur.

5. Wärmekraftmaschinen

Maschinen sind die Sklaven der modernen Zivilisation. In der Tat kann man das Industriezeitalter mit der Erfindung der Dampfmaschine (James Watt erhielt 1769 sein erstes Patent) beginnen lassen. Die Dampfmaschine wandelt die in der Kohle steckende chemische Energie teilweise in mechanische Energie um, z.B. zum Heben von Lasten. Dazu wird die chemische Energie zunächst in Wärmeenergie verwandelt und dann die Wärme in mechanische Energie. Da der Wirkungsgrad, d.h. die Ausbeute an mechanischer Energie, bei den ersten Dampfmaschinen noch nicht allzu hoch war, versuchte man, ihre Konstruktion zu verbessern. Erst etwa 50 Jahre nach der Erfindung der Dampfmaschine untersuchte Carnot prinzipiell, d.h. unabhängig von einer bestimmten Konstruktion der Maschine, ob es überhaupt einen 100% Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine geben könnte. Bei den Untersuchungen kam er dann als erster auf das Konzept der Entropie.

Warum Entropie bei der Frage nach dem Wirkungsgrad entscheidend sein könnte, ist von dem heutigen Standpunkt recht einsichtig und hat mit der Natur der Wärme zu tun. Wärme ist Energie in ungeordneter Bewegung. Mechanische Energie ist aber vollständig geordnete Bewegung. Es erscheint plausibel, dass man ungeordnete Bewegung nicht vollständig in geordnete umwandeln kann, insbesondere da ein System, das sich selbst überlassen ist, dahin tendiert, dass die Unordnung sich vergrößert.

Um die Rolle der Entropie bei der Betrachtung der Wärmekraftmaschinen herauszuheben, sollte man vielleicht zunächst eine idealisierte Maschine betrachten. Diese arbeitet zwischen zwei Temperaturen T_1 und T_2 ($T_1 > T_2$), nimmt bei der Temperatur T_1 Wärme ΔQ_1 auf und wandelt sie durch isotherme Expansion vom Volumen V_1 nach Volumen V_2 in Arbeit ΔW_1 um. Dann wechselt die Maschine zu der Temperatur T_2 ohne, dass Wärme oder Arbeit entsteht oder verbraucht wird. Bei T_2 benutzt man die Arbeit ΔW_2 , um das System vom Volumen V_2 auf V_1 isotherm zu komprimieren und führt die dabei entstehende Wärme ΔQ_2 ab. Es gelten dann die beiden Beziehungen, die aus Energie- und Entropiesatz folgen:

$$\Delta W = \Delta W_1 - \Delta W_2 = \Delta Q_1 - \Delta Q_2,$$

$$\Delta S = \Delta Q_1/T_1 - \Delta Q_2/T_2 \geq 0.$$

Wir definieren den Wirkungsgrad einer Maschine als den Quotienten aus gewonnener Arbeit ΔW und der bei der höheren Temperatur entnommenen Wärme ΔQ_1 , wobei die entstehende Wärme ΔQ_2 bei der niedrigen Temperatur als Abwärme oder Verlustwärme gezählt wird. Durch die Kombination der beiden Gleichungen erhält man für den Wirkungsgrad

$$\eta = \Delta W / \Delta Q_1 \leq (T_1 - T_2) / T_1$$

Diese Formel ist in mehrfacher Weise interessant:

- (1) Es gibt in der Tat eine obere Grenze für den Wirkungsgrad der Umwandlung von Wärme in mechanische Energie. η kann nie den Wert 1 annehmen, außer, wenn die Endtemperatur T_2 die Temperatur des absoluten Nullpunktes ist. D.h.

ACHTUNG

Man kann nie, auch mit der besten Maschine nicht, eine gegebene Wärmeenergie vollständig in Arbeit umwandeln.

ACHTUNG

Da es bei den Temperaturen T um absolute Temperaturen handelt, ist der Wirkungsgrad erstaunlich klein. Wenn man eine Maschine zwischen $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ betreibt, dann ergibt sich ein Wirkungsgrad von höchstens 50%. Das ist schon ein sehr guter Wert für realistische Maschinen.

(2) Wenn keine Temperaturdifferenz vorhanden ist, ist $\eta=0$, d.h. kann Wärmeenergie nicht in mechanische Energie umgewandelt werden, auch wenn sie im Überfluss vorhanden ist. In diesem Zusammenhang wird immer der Ozean als Beispiel gebracht. Wenn man ihn nur von seiner Temperatur von ca. $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ um $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ abkühlen würde, könnte man eine Unmenge Wärmeenergie gewinnen. Warum kann ein auf dem Ozean fahrender Dampfer diese Energie nicht nutzen, um damit die Schiffsmotoren zu betreiben? Eben aus dem Grund, dass keine Temperaturdifferenz vorhanden ist, und somit der Wirkungsgrad null ist.

Experiment: Stirling Motor, dessen einzelne Phasen man im Detail diskutieren sollte.

6. Offene Systeme

Jedes abgeschlossene System entwickelt sich so, dass seine Gesamtentropie einem Maximum zustrebt. Dann sind z.B. alle Temperatur- und Druckdifferenzen ausgeglichen und nichts bewegt sich mehr. Das ist der sog. Wärmetod. Die Erde, auf der wir leben, zeigt ganz offensichtlich keine solches Zeichen eines Wärmetodes. Der Grund ist, dass die Erde kein abgeschlossenes System ist. Auch wenn wir mit keinem Körper des Universums physischen Kontakt haben, besteht jedoch ein Wärmekontakt mit unserer Umgebung über Strahlung. Die Erde ist also ein offenes System. Für ein offenes System gilt z.B. der zweite Hauptsatz der Wärmelehre nicht, die Entropie kann zu- oder abnehmen, je nach den Bedingungen. Man hört immer wieder, dass die Sonne uns Energie in Form von Strahlung schickt. Das ist zwar richtig, trifft aber nicht den Kern, warum die Sonne so lebensnotwendig ist. Denn da sich trotz der Sonneneinstrahlung die Temperatur auf der Erde nicht ändert, muss die Energie, die von der Sonne auf die Erde trifft, wieder abfließen. Während der Zufluss an Energie durch sichtbare Strahlung geschieht, fließt die Energie von der Erde in den Weltraum durch unsichtbare Strahlung ab. Die Temperatur auf der Sonne ist etwa $T_s = 6000\text{ K}$ und die auf der Erde etwa $T_e = 300\text{ K}$. Beide Körper sind heiß und strahlen deshalb, nur liegt die Strahlung der Erde im Infraroten.

Von der Sonne erhalten wir pro Zeiteinheit die Energie E_s und pro Zeiteinheit fließt von der Erde die Energie E_e ab. Da sich insgesamt die Temperatur und damit die Gesamtenergie auf der Erde nicht ändert, gilt

$$E_{\text{netto}} = E_s + E_e = 0.$$

Wir gewinnen von der Sonne also keine Nettoenergie. Was geschieht aber mit der Entropie? Mit den eingestrahlt und abgestrahlten Energien sind ein- und wegströmende Entropien pro Zeiteinheit verbunden, wobei für die Differenz gilt

$$S_{\text{netto}} = E_s/T_s + E_e/T_e = E_s (1/T_s - 1/T_e) < 0.$$

Auf die Erde wird „negative Entropie“ eingestrahlt. Die negative Entropie wird benutzt, um die von selbst auf der Erde bei vielen Prozessen ablaufende Produktion von (positiver) Entropie auszugleichen und um uns vor dem Wärmetod zu bewahren. Die negative Entropie kann benutzt werden, um z.B. die Vorgänge des Lebens zu ermöglichen, die ja einen hohen Grad von Ordnung darstellen. Ein DNS Molekül ist sicherlich eine geordnete Struktur im Vergleich zu einer Ansammlung von Atomen des Wasserstoffs, Sauerstoffs, Stickstoffs usw.. Die DNS lässt sich aus den Atomen nur aufbauen, wenn die überschüssige Entropie abgeführt wird. Das ist natürlich nur eine notwendige Bedingung und noch keine hinreichende für die Entstehung des Lebens. Wir fassen dieses Ergebnis in dem Merksatz zusammen:

Während sich abgeschlossene Systeme spontan immer nur in Richtung wachsender Unordnung entwickeln, können in offenen Systemen geordnete Strukturen aus der Unordnung entstehen.

Die Frage der „Selbstorganisation“ von komplexen Strukturen aus einfacheren ist allerdings noch eine Wissenschaft in den Kinderschuhen.

Dank: Diskussionen mit und Kritik durch die Herren K. Haberkant, H. Horner und R. Löhken haben mir in vielfältiger Weise geholfen. Für weitere Kritik unter joerg.huefner@tphys.uni-heidelberg.de werde ich dankbar sein.