

Heft
1

Konzepte eines zeitgemäßen Physik- unterrichts

Herausgeber:
G. Falk und
F. Herrmann

Thermodynamik –
nicht Wärmelehre,
sondern Grundlage
der Physik
1. Teil
Energie und Entropie

PA 44
10
Bd 1
1 Ex

Schroedel

Schroedel 76 081

Heft 1

Herausgeber:
G. Falk und
F. Herrmann

Konzepte eines zeitgemäßen Physikunterrichts

Thermodynamik –
nicht Wärmelehre, sondern
Grundlage der Physik

1. Teil
Energie und Entropie



HERMANN SCHROEDEL VERLAG KG
Hannover · Dortmund · Darmstadt · Berlin

ISBN 3-507-76081-9

© 1977 HERMANN SCHROEDEL VERLAG KG, HANNOVER

Alle Rechte vorbehalten.

Die Vervielfältigung und Übertragung auch einzelner Textabschnitte, Bilder oder Zeichnungen ist – mit Ausnahme der Vervielfältigung zum persönlichen und eigenen Gebrauch gemäß §§ 53, 54 URG – ohne schriftliche Zustimmung des Verlages nicht zulässig. Das gilt sowohl für Vervielfältigung durch Fotokopie oder irgendein anderes Verfahren, als auch für die Übertragung auf Filme, Bänder, Platten, Arbeitstransparente oder andere Medien.

Gesamtherstellung: Universitätsdruckerei H. Stürtz AG, Würzburg

Inhaltsverzeichnis

Übersicht	5
<i>F. Herrmann</i>	
Energie und Energieformen	7
<i>M. Fleig</i>	
Einführung der Energie in der Sekundarstufe I	15
<i>F. Herrmann</i>	
Entropie in der Schule	29
<i>G. Falk</i>	
Eine Einführung der Entropie – Thema eines Leistungskurses	37
<i>W. Ruppel</i>	
Entropie und Wärme	50

Anschriften der Autoren:

Prof. Dr. G. Falk, Institut für Didaktik der Physik, Universität Karlsruhe, Kaiserstr. 12, Physikhochhaus, 7500 Karlsruhe 1

Stud. Ass. M. Fleig, Alte Friedrich-Str. 70, 7531 Neureut

Prof. Dr. F. Herrmann, Institut für Didaktik der Physik, Universität Karlsruhe, Kaiserstr. 12, Physikhochhaus, 7500 Karlsruhe 1

Prof. Dr. W. Ruppel, Institut für Angewandte Physik, Universität Karlsruhe, Kaiserstr. 12, Physikhochhaus, 7500 Karlsruhe 1

1. Teil: Energie und Entropie

Übersicht

Die nachfolgenden Aufsätze haben das Ziel, einen Neuaufbau der Physik zu erläutern, bei dem als Fundament Begriffsbildungen verwendet werden, die traditionell zur Thermodynamik gezählt werden. Diese Begriffe, die im Laufe des letzten Jahrhunderts entwickelt worden sind, haben sich als besonders tragfähig erwiesen und erlauben eine weitgehend einheitliche Beschreibung der unterschiedlichsten Naturvorgänge. Sie eignen sich daher besonders gut dazu, die Grundlage der heutigen Physik zu bilden. Aus der Reihe dieser Begriffe werden hier zunächst die Größen Energie und Entropie behandelt. Wegen ihrer zentralen Rolle in der Physik werden sie nicht, wie es üblich ist, über komplizierte Hilfskonstruktionen, wie Kraft und Verschiebung oder Wärme und Temperatur eingeführt, sondern direkt und unter Betonung einer Anschaulichkeit, die auf einfachen Bilanzen beruht.

Historisch wurden die beiden Größen Energie und Entropie im Zusammenhang mit dem Problem der prinzipiellen Effektivitätsgrenzen von Wärmekraftmaschinen entdeckt. Mit ihnen ließ sich die Wärmelehre auf eine sichere wissenschaftliche Grundlage stellen, die den Namen Thermodynamik erhielt. Dieser Name war jedoch nicht sehr glücklich gewählt, denn die beiden Größen Energie und Entropie sind keineswegs auf das beschränkt, was man traditionell unter Wärmelehre versteht. Von der Energie wußte man das im Grunde von Anfang an, bestand doch die Entdeckung ihrer fundamentalen Rolle gerade darin, daß eine in der Mechanik längst bekannte, allerdings dort als aus Kraft und Verschiebung „abgeleitet“ betrachtete Größe nur ein Spezialfall einer allgemeineren physikalischen Größe war, die bei allen Vorgängen mitspielt, in den verschiedensten Formen auftritt und einen universellen Erhaltungssatz befolgt.

Daß der Entropie eine ähnlich universelle Rolle zufällt wie der Energie, wurde erst langsam klar. Die Entropie blieb daher lange der Repräsentant „thermischer“ Physik. Da die Entropie, anders als die Energie, in einer durch die Mechanik beherrschten Physik grundsätzlich neu war, außerdem die ungewohnte Eigenschaft des Aus-dem-Nichts-erzeugt-werden-könnens besaß und schließlich dem

Lernenden, der dem Konstruktionsweg von *Clausius* folgt, ein hohes Maß an Abstraktionsfähigkeit abverlangt, war sie von Anfang an von der Aura der Schwer-, wenn nicht gar Unverständlichkeit umgeben. Auch ihre vermeintliche Rückführung auf die Mechanik durch *Boltzmann* änderte die Sachlage nicht grundsätzlich. Zwar erhielt die Entropie für den in mechanischen Bildern denkenden Physiker so eine anschauliche Seite, nämlich ein Maß der Unordnung zu sein, aber doch um den Preis, daß sie als quantitative Größe aus der Praxis des physikalischen Alltags so gut wie verschwand. Für den Physiker wurde sie so mehr Bildungsgut als Arbeitsmittel, was sich deutlich in den physikalischen Ausbildungsgängen an den Universitäten widerspiegelt. In der Schulphysik gibt es die Entropie, von bloßer Erwähnung abgesehen, bis heute nicht.

Daß Energie wie Entropie nicht nur zu den Fundamenten der Physik zählen, sondern bei geeigneter Fassung auch ohne Einbuße an begrifflicher Genauigkeit anschaulich und sehr einfach zu handhabende Größen sind – jedenfalls anschaulicher und einfacher als z.B. die Kraft – war Gegenstand einer Reihe von Vorträgen, die im Rahmen eines Lehrerfortbildungs-Kurses der Fakultät für Physik der Universität Karlsruhe vom Institut für Didaktik der Physik im Winter-Semester 1976/77 gehalten wurden. Diese Vorträge fanden ihren Niederschlag in den folgenden fünf Aufsätzen.

Der erste Aufsatz „Energie und Energieformen“ verfolgt das Ziel, die wissenschaftlichen Grundlagen einer exakten, aber dennoch elementaren Einführung des Energiebegriffs auseinanderzusetzen. Besonderen Wert gelegt wird dabei auf die wichtige Unterscheidung zwischen *übertragener* Energie, die sich in *Formen* einteilen läßt, und *gespeicherter* Energie, für die eine Einteilung in Formen *nicht* möglich ist. Im zweiten Aufsatz „Einführung der Energie in der Sekundarstufe I“ wird ein von *M. Fleig* im Unterricht erprobter Weg zur Einführung des Energiebegriffs dargestellt. Neben der Aufweisung eines konkreten Weges, auf dem die Energie und ihre wichtigsten Eigenschaften im Unterricht der Sekundarstufe I eingeführt werden können, wird dabei auch auf die logische Kompliziertheit und didaktische Fragwürdigkeit des Kraftbegriffs eingegangen, der im herkömmlichen Physikunterricht eine allzu beherrschende Rolle spielt.

Der dritte Aufsatz „Entropie in der Schule“ macht einen Vorschlag, wie sich die Entropie in der Schule so einführen läßt, daß der Schüler nicht nur eine einfache Anschauung dieser Größe erhält, sondern auch ein Gefühl für ihre Wichtigkeit. Der Aufbau ist eine moderne Version der klassischen Überlegungen *Carnots*. Während die Einführung der Entropie im dritten Aufsatz eine Art Propädeutik darstellt, wird die Entropie im vierten Aufsatz „Einführung der Entropie – Thema eines Leistungskurses“ als eine Größe betrachtet, die den „Wert“ der Energie mißt. Diese für den reiferen und an

naturwissenschaftlichen Fragestellungen besonders interessierten Schüler gedachte Einführung versucht, die logischen Zusammenhänge zwischen Energie, Entropie und absoluter Temperatur anschaulich aber dennoch exakt klar zu machen. Der fünfte Aufsatz „Entropie und Wärme“ schließlich geht der Frage nach, in welchem Sinn das Wort „Wärme“ herkömmlich in der Physik gebraucht wird und ob sich – wie es gern geschieht – durch Gebrauch des Begriffs Wärme die Entropie umgehen läßt. Es zeigt sich, daß das nicht möglich ist, ohne Verwirrung zu hinterlassen.

Energie und Energieformen

Einleitung

In den letzten Jahren hat sich die Einstellung zu der Rolle, die die Energie im Physikunterricht spielen soll, geändert. Man kam zu der Meinung, daß die Energie einen wichtigeren Platz einnehmen sollte als bisher, und zwar aus mindestens zwei Gründen:

- wegen ihrer Wichtigkeit für das Verständnis unserer modernen Umwelt;
- wegen der außerordentlich großen Tragfähigkeit dieser Größe im Begriffssystem der Physik.

Trotz dieser Änderung der Einstellung hat sich an der Art der Behandlung im Unterricht bisher noch recht wenig geändert. Dabei legen beide zitierten Gründe Änderungen nahe. Hier und da sieht man zwar das Bemühen darum, z.B. im IPN-Curriculum oder in Lehrplanentwürfen für die Orientierungsstufe, aber andererseits zeigen gerade diese Versuche sehr deutlich, welch großes Hindernis historisch gewachsene Gewohnheiten darstellen können.

In der vorliegenden Arbeit soll versucht werden, die Grundlagen für eine Einführung der Energie im Unterricht zu legen, die die historischen Umwege, die auf dem Wege zur Einsicht in die fundamentale Rolle der Energie gegangen wurden, nicht nachvollzieht. Man könnte der Meinung sein, der historische Weg sei der natürlichere, der lernpsychologisch bessere Weg. Wer so argumentiert, vergißt, daß der Lernende heute eine ganz andere Erfahrungswelt hat, als die Physiker vergangener Zeiten. Wenn *Newton* heute anfinge, seine Umwelt zu erforschen, würde er sicher ganz andere Theorien machen als seine Gravitationstheorie.

Die folgende Darstellung soll den wissenschaftlichen Hintergrund für einen möglichen Unterricht darstellen. Infolge des begrenzten Raumes kann das Thema allerdings nur in einer stark zusammengerafften Form dargestellt werden. Für den, der tiefer in die angesprochenen Probleme einsteigen möchte, sei auf die am Ende angegebene Literatur verwiesen.

1. Zum Energiebegriff im herkömmlichen Unterricht

Die Energie als abgeleitete Größe

In den meisten Physiklehrbüchern begegnet Schülern wie Studenten die Energie zum erstenmal in der Mechanik. Vorher lernen sie gewöhnlich kennen: Weg, Zeit, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Kraft, Masse, dann die Arbeit. Die Kraft und die Geschwindigkeit erscheinen in diesen Darstellungen als etwas Elementares, die Energie ist eine sogenannte abgeleitete Größe.

Dieser Aufbau tritt mit so starker Regelmäßigkeit auf, daß man fast den Eindruck hat, die Natur sei auch in dieser Reihenfolge aufgebaut worden, der liebe Gott habe erst die Kraft erschaffen und dann die Energie, oder mindestens, als gäbe es irgendeine natürliche Anordnung des Stoffes, wie

z.B. im Geschichtsunterricht die chronologische Anordnung des Stoffes eine natürliche Ordnung ist. Wir wissen, daß der liebe Gott die Natur so nicht aufgebaut hat, aber es scheint doch wenigstens praktische Gründe dafür zu geben, mit der Kinematik und der Kraft im Unterricht zu beginnen. Schließlich haben wir für die Kraft einen Sinn, für die Energie nicht. In den Lehrbüchern lesen wir über die „uns allen vertraute Muskelkraft“ oder wir lesen: „Jeder, der eine Kraft ausübt, spürt dies unmittelbar in seinen Muskeln.“

Ist dieser Appell an unsere natürliche Erfahrung der Kraft eigentlich gerechtfertigt? Wie genau legt die angesprochene Erfahrung die Größe, die der Physiker als Kraft bezeichnet, überhaupt fest? In welchem Maße werden durch sie auch andere physikalische Größen abgedeckt? Um das festzustellen, nehme man sich einen Satz von der oben zitierten Art vor, ersetze das Wort Kraft durch ein anderes Wort und sehe nach, ob der Satz dadurch falsch

wird. Ersetzt man z.B. das Wort Kraft durch das Wort Energie – man muß auch das entsprechende Verb ändern, denn Energien übt man nicht aus, sondern man überträgt sie – so stellt man fest, daß die Sätze, die die Kraft beschreiben sollten, dadurch nicht nur nicht falsch, sondern richtiger werden. Unser Kraftgefühl scheint also doch nicht so gut ausgebildet zu sein, wie es manche Lehrbücher suggerieren.

Das „natürliche Kraftgefühl“ ist also sicher kein Grund dafür, die Kraft vor der Energie zu behandeln. Darüber hinaus trifft aber die Annahme, daß wir keinen natürlichen Sinn für die Energie haben, und daß wir sie uns nur über den Umweg über Masse und Geschwindigkeit oder Kraft und Weg vorstellen können, heute sicher nicht mehr zu. Diese Meinung haben wir wahrscheinlich aus dem vorigen Jahrhundert übernommen, und von Generation zu Generation weitergetragen. Unser Gefühl für Energie ist heute sogar sehr gut entwickelt. Für Energie muß man bezahlen, und jeder weiß es. Jeder weiß auch, daß Energie Mengencharakter hat.

Es ist sowieso leichter, mit mengenartigen Größen umzugehen als mit intensiven Größen. Ein System hat Energie in sich, es gibt sie ab, nimmt sie auf, Energie fließt von einem Körper zum anderen. Das kann man sich gut vorstellen. Kräfte dagegen wirken, herrschen, werden ausgeübt, sind im Gleichgewicht. Das ist schwerer zu verstehen. Jeder Physiklehrer weiß aus einem weniger traditionellen Gebiet der Physik, daß es leichter ist, die extensive vor der intensiven Größe zu behandeln: Den Strom vor der Spannung. Daß die Spannung als intensive Größe begrifflich viel schwieriger ist, kann man selbst bei Erwachsenen noch beobachten.

Nachdem wir die Art, in der die Energie zum erstenmal im Unterricht auftaucht, betrachtet haben, soll nun ein anderer Aspekt der Energie im Unterricht untersucht werden: die Einteilung der Energie in Formen.

Die Verwirrung bei den Energieformen

Die Energie, die ein System enthält, kann sich auf verschiedene Weisen äußern. Man ist daher geneigt zu erwarten, daß man den Energieinhalt eines Systems in verschiedene Anteile zerlegen kann. Unsere Lehrbücher legen das auch nahe, manche sprechen es sogar deutlich aus. Man liest, ein Körper besitze potentielle oder kinetische Energie, in Kohlen sei Energie „in chemischer Form vorhanden“. In derselben Aufzählung kommen noch Wärmeenergie und elektrische Energie vor. An anderer

Stelle liest man, zu der „konstant bleibenden Summe gehören ... elektrische, magnetische und chemische Energie“. „Das elektrische und magnetische Feld ist Träger elektrischer bzw. magnetischer Energie.“

Sieht man sich diese Aufteilung etwas genauer an, so stößt man allerdings auf Schwierigkeiten. Warum achtet man z.B. so sorgfältig darauf, nie zu sagen, ein Körper *habe* oder *enthalte* Wärmeenergie? Man zählt zwar die Wärmeenergie in einem Atemzug mit der potentiellen und mit der kinetischen Energie auf, aber man macht einen kleinen semantischen Unterschied: Ein Körper *hat* kinetische Energie, aber er *nimmt* Wärme *auf*. Hinter diesem kleinen verbalen Unterschied steht ein großer physikalischer Unterschied, der nicht ausgesprochen wird. Würde er ausgesprochen, so sähe man, daß die Aufzählung der Energieformen sinnlos war. Damit ihn kein Schüler bemerkt, macht man Experimente zur Wärmeenergiemessung wohlweislich nur mit Flüssigkeiten und Festkörpern. So schließt jeder normale Schüler, ein Körper *habe* Wärmeenergie, wie er kinetische Energie hat, obwohl es der Lehrer nie gesagt hat.

Gase *haben* dann eigenartigerweise innere Energie. Festkörper wohl nicht? Ähnliche Schwierigkeiten gibt es im Zusammenhang mit der elektrischen Energie. Was ist elektrische Energie? Das, was uns das E-Werk liefert, das, was in einem geladenen Kondensator steckt, oder das, was in einer stromdurchflossenen Spule steckt? Und die elektromagnetische Strahlung: Ist das auch elektrische Energie? Enthält ein Akku elektrische Energie, wie man es in manchen Darstellungen lesen kann, oder chemische, wie es andere Bücher lehren?

Dieses Durcheinander ordnet sich etwas, wenn man bemerkt, daß man bei der Aufteilung der Energie in Formen unterscheiden muß zwischen gespeicherter, in einem System enthaltener Energie und abgegebener oder aufgenommener, kurz ausgetauschter Energie. In anderen Worten, man muß zwischen *Zuständen* und *Prozessen* unterscheiden. Diese Unterscheidung wird in den meisten Darstellungen teilweise gemacht, aber gewöhnlich nicht durchgehalten. Häufig wird sie gerade an den Stellen gemacht, an denen man ihre Notwendigkeit am schwersten einsieht. Den Schülern müssen dann die Bemühungen des Lehrers als unnötige Verrenkungen erscheinen. So findet mancher Schüler in seinem Buch einen zwei Seiten langen Beweis dafür, daß die Hubarbeit gleich der Lageenergie ist, was er sich sicher schon gedacht hatte. Dann folgt der ebenso lange Beweis dafür, daß Bewegungsenergie gleich Beschleunigungsarbeit ist, und schließlich

dafür, daß Spannarbeit gleich Spannungsenergie ist. Wird durch diese Aussagen irgendeine Frage beantwortet, die sich ein Mensch normalerweise stellen könnte?

Zusammenfassend kann man die Schwierigkeiten so beschreiben:

1. Es wird nicht genügend klar zwischen Austausch- und Existenz-Formen der Energie unterschieden.
2. Es wird nicht klar gemacht, warum diese Unterscheidung nötig ist.
3. Es wird nicht klar gemacht, warum man bei manchen Systemen die Aufteilung in Existenzformen gar nicht macht.

2. Austauschformen der Energie

Es soll nun versucht werden, etwas Ordnung in diese Einteilung der Energie in Formen zu bringen. Wir beginnen mit dem einfacheren Teil, nämlich den Energieformen beim Austausch.

Diese Energieformen werden traditionell Arbeit genannt, bis auf eine Ausnahme, die Wärme. Als Arbeit im engeren Sinn wird auch oft nur die Energieform $F \cdot dr$ bezeichnet (F =Kraft, r =Ort). Andere Autoren dagegen haben das Wort Arbeit sogar auf die Wärme ausgedehnt und diese „thermische Arbeit“ genannt. Wir wollen hier den Ausdruck Arbeit aus zwei Gründen ganz vermeiden: Einmal suggeriert er, Arbeit sei etwas anderes als Energie. Ausgetauschte Ladung nennt man auch Ladung. Außerdem ist der physikalische Inhalt des Wortes von seiner Bedeutung außerhalb der Physik so verschieden, daß seine Verwendung nicht zur Klarheit beiträgt. Es ist sicher schwerer verständlich, wenn man sagt, ein System leiste an einem anderen elektrische Arbeit, als wenn man sagt, es gebe elektrische Energie an das andere System ab. Im folgenden wird also stets das Wort Energie benutzt, und zwar auch dann, wenn es sich um ausgetauschte Energie handelt.

So wie wir die in einem System enthaltene als auch die von ihm ausgetauschte Energie immer mit dem gleichen Namen Energie belegen, benutzen wir zur Bezeichnung der Energie eines Systems auch immer denselben Buchstaben, nämlich E . Da das von der Praxis vieler Lehrbücher abweicht, sind ein paar Worte der Erklärung angebracht. Es ist vielfach üblich, die Energie mit dem Buchstaben W zu bezeichnen. Schaut man aber genauer hin, bemerkt

man, daß das nur in der Mechanik und Elektrodynamik, also bei „mechanischen“ und „elektrischen“ Energien geschieht. In der Wärmelehre hat derselbe Buchstabe W dann nicht die Bedeutung der Energie, sondern der „Arbeit“, während die „innere“ Energie mit U bezeichnet wird und die Wärme mit Q . Hier liegt in der Bezeichnungsweise die gleiche Quelle der Verwirrung vor wie im Umgang mit den verbalen Bezeichnungen. Es ist nur konsequent, wenn man die Energie, die ein Objekt enthält, auch immer mit ein und demselben Buchstaben bezeichnet. Natürlich könnte man dafür den Buchstaben W nehmen, aber das hätte zur Folge, daß in der üblichen Formulierung des 1. Hauptsatzes W mit einem Mal nicht mehr die Arbeit, sondern die innere Energie bedeutet. Um diese für Lehrer wie Schüler unzumutbare Auswirkung einer korrekten Bezeichnungsweise zu vermeiden, haben wir uns entschlossen, auf den Buchstaben W zu verzichten und die Energie konsequent mit E zu bezeichnen.

Wir können nun unser erstes Problem formulieren: Wie kann man der von einem System aufgenommenen oder abgegebenen Energie eine Form zuordnen?

Um diese Frage zu beantworten, betrachten wir verschiedene Prozesse, bei denen ein System seinen Energieinhalt um ΔE ändert (Abb. 1):

- Eine elektrisch geladene Kugel (oder genauer: ihr Feld) gibt Energie ab an ein Glimmlämpchen, mit dem man sie berührt.
- Ein Gas in einem Behälter festen Volumens nimmt Energie auf von einer Flamme, die darunter steht.
- Eine rollende Kugel nimmt Energie auf von einer anderen rollenden Kugel, mit der sie zusammenstößt.
- Ein fallender Gegenstand nimmt Energie auf aus dem Gravitationsfeld der Erde, in dem er fällt.
- Ein Auto nimmt an der Tankstelle Energie auf.
- Ein Expander nimmt Energie auf aus den Muskeln von dem, der an ihm zieht.

Man stellt fest, daß bei allen diesen Prozessen außer der Energie noch etwas anderes aufgenommen oder abgegeben, also „ausgetauscht“ wird.

Von der geladenen Kugel wird elektrische Ladung abgegeben, das Gas nimmt Entropie auf, die rollende Kugel und der fallende Gegenstand nehmen Impuls auf, das Auto nimmt Benzin auf, die Federn

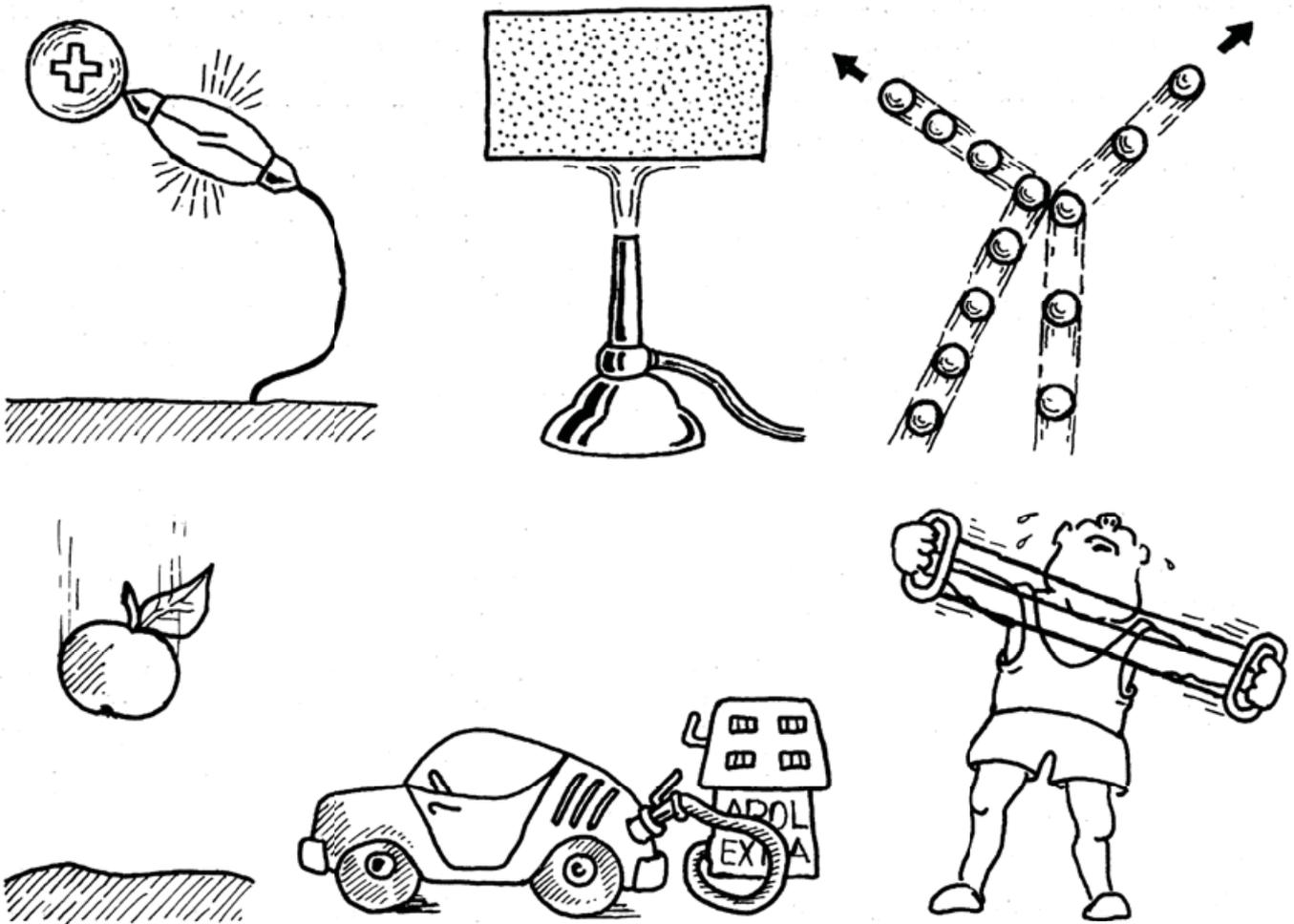


Abb. 1 Systeme, die ihren Energieinhalt ändern

des Expanders verlängern sich. In allen Fällen ist die ausgetauschte Energie proportional zu der gleichzeitig ausgetauschten Größe, solange bei dem Prozeß die anderen physikalischen Größen konstant bleiben. Wenn das System zweimal soviel

Energie austauscht, so ist dieser Prozeß auch von einem doppelt so großen Austausch der mit ausgetauschten Größe begleitet.

Es ist wichtig, festzustellen, daß alle diese begleitenden Größen mengenartig, extensiv sind. Damit ist folgendes gemeint: Wenn die Größe A in einem System 1 den Wert A_1 hat und in einem anderen System 2 den Wert A_2 , so hat sie in dem System 1+2, das man durch Vereinigung der beiden Systeme 1 und 2 erhält, den Wert $A_1 + A_2$ (Abb. 2).

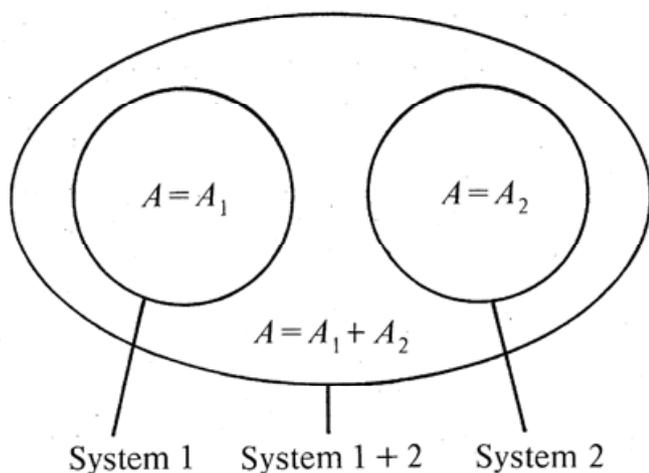


Abb. 2 Die mengenartige Größe A hat im System 1 den Wert A_1 , im System 2 den Wert A_2 und im System 1+2, das durch Vereinigung von System 1 und System 2 entsteht, den Wert $A_1 + A_2$.

Bei einem einzigen der Beispiele ist das nicht ganz leicht einzusehen: Bei der Verlängerung der Federn des Expanders. Das ist auch der Grund dafür, daß die „Arbeit“ $F dr$ so viel Verständnisschwierigkeiten bereitet. Wir empfehlen deshalb, diese auf keinen Fall als Einstieg zur Energie zu verwenden.

Wir können in jedem Fall schreiben $\Delta E \sim \Delta X$, wobei X allgemein für eine mengenartige Größe steht, und sind damit in der Lage, die ausgetauschten Energien in Formen einzuteilen: Zu jeder Größe X gehört eine bestimmte Energieform.

Energieform	gleichzeitig ausgetauschte Größe	Proportionalitätsfaktor	$\Delta E = \xi \Delta x$
elektrische Energie	Q elektrische Ladung	φ elektrisches Potential	$\Delta E = \varphi \Delta Q$
Bewegungsenergie	P Impuls	v Geschwindigkeit	$\Delta E = v \Delta P$
Wärme	S Entropie	T Temperatur	$\Delta E = T \Delta S$
chemische Energie	N Teilchenzahl (Stoffmenge)	μ chemisches Potential	$\Delta E = \mu \Delta N$
Kompressionsenergie	V Volumen	p Druck	$\Delta E = -p \Delta V$
Rotationsenergie	L Drehimpuls	ω Winkelgeschwindigkeit	$\Delta E = \omega \Delta L$
Verschiebungsenergie	r Verschiebung	F Kraft	$\Delta E = F \Delta r$
keine eingebürgerten Namen	m Masse α Verdrehung	gh Gravitationspotential M Drehmoment	$\Delta E = gh \Delta m$ $\Delta E = M \Delta \alpha$

Torsionsenergie

Bis hierher kann man also feststellen, daß der Zusammenhang zwischen ΔE und ΔX einfach ist, und daß eine starke formale Ähnlichkeit zwischen den verschiedenen Energieformen herrscht. Daß diese Analogie aber noch weiter geht, sieht man, wenn man die entsprechenden Proportionalitätsfaktoren betrachtet: In den meisten Fällen ist der Proportionalitätsfaktor eine vertraute physikalische Größe. Diese Größe ist immer intensiv, sie stellt eine Art „Potential“ dar. Im einzelnen sind diese Faktoren in der 3. Spalte der Tabelle aufgeführt. Die kompletten Ausdrücke für ΔE stehen in der 4. Spalte. Einige dieser Ausdrücke sind allgemein bekannt und werden in den Physikbüchern der Oberstufe behandelt: $\varphi \Delta Q$ (oder $U \Delta Q = (\varphi_2 - \varphi_1) \Delta Q$), $-F \Delta r$, $-p \Delta V$.

Einige andere dieser Ausdrücke enthalten den meisten Physikern weniger vertraute Größen. Die Energieformen können gerade deshalb dazu verwendet werden, den in ihnen vorkommenden Größen zu einer gewissen Anschaulichkeit zu verhelfen. So zeigt die Beziehung $\Delta E = T \Delta S$, daß man sich unter Entropie diejenige mengenartige Größe vorzustellen hat, die beim Wärmeaustausch mitausgetauscht wird. Das wird in den folgenden Aufsätzen über die Einführung der Entropie näher erläutert. Der Ausdruck $\Delta E = \mu \Delta N$ lehrt uns, daß das chemische Potential eine Art Gütemaß des Kraftstoffs für unser Auto darstellen kann.

Schließlich gibt es noch mathematische Beziehungen, die vielen Leuten unbekannt sind, obwohl sie nur sehr vertraute physikalische Größen enthalten: $\Delta E = v \Delta P$ und $\Delta E = \omega \Delta L$. Die erste soll hier deshalb hergeleitet werden. Die Herleitung der zweiten geht ganz analog. Es werden zuerst Newtonsche Körper betrachtet und dann extrem relativistische Teilchen, nämlich Photonen. Für eine Herleitung, die allgemein gilt, sei auf die Literatur verwiesen.

Gesucht ist also die Funktion $E = E(P)$, aus der dann durch Ableitung $dE = \frac{dE}{dP} dP$ berechnet werden kann. Für einen Newtonschen Körper gilt

$$E_{\text{kin}} = \frac{m}{2} v^2 \quad \text{und} \quad P = m v.$$

Daraus folgt $E_{\text{kin}} = \frac{P^2}{2m}$ und daraus $dE = \frac{P}{m} dP$, oder $dE = v dP$.

Für Photonen gelten die Beziehungen

$$E = \hbar \omega \quad \text{und} \quad P = \hbar k.$$

Mit $c = \frac{\omega}{k}$ folgt daraus $E = \hbar \frac{cP}{\hbar} = cP$ und daraus

$$dE = c dP = v dP,$$

also dasselbe Ergebnis wie für Newtonsche Körper.

3. Existenzformen der Energie

Wir wollen nun den Versuch unternehmen, die in einem System enthaltene Energie in Formen einzuteilen.

Ein und derselbe Körper kann schnell sein, warm sein, unter hohem Druck stehen, sich hoch oben befinden und trotzdem immer den gleichen Energieinhalt haben. Man könnte also vermuten, daß seine Energie aus additiven Bestandteilen besteht, von denen der eine von seiner Geschwindigkeit, der zweite von seiner Temperatur, der dritte von seinem Druck, der vierte von seiner Höhe usw. abhängt:

$$E = E(v, T, p, h \dots) \\ = E_1(v) + E_2(T) + E_3(p) + E_4(h) + \dots \quad (1)$$

Jeden Term, so vermuten wir, kann er nur durch Austausch der Energieformen ändern, die zu der entsprechenden Variable gehört, also den ersten durch Austausch von Bewegungsenergie, den zweiten durch Austausch von Wärme usw. Man könnte dann übrigens als Variablen ebenso die entsprechenden extensiven Variablen verwenden, also

$$E = E'(P, S, V, m \dots) \\ = E'_1(P) + E'_2(S) + E'_3(V) + E'_4(m) + \dots$$

Wäre diese Zerlegung möglich, so wäre die Physik viel einfacher. Tatsächlich ist sie es nicht, und man kann, wie wir gleich sehen werden, froh darüber sein; denn das gibt die Möglichkeit, Energie von einer Form in eine andere umzuwandeln. Die Funktion $E = E(v, T, p, h \dots)$ ist in Wirklichkeit nicht einfach eine Summe von Termen, von denen jeder nur von einer der intensiven oder extensiven Variablen abhängt. Sie ist komplizierter und sieht für jedes System anders aus. Im allgemeinen ist sie auch nicht gut bekannt. Immerhin ist es häufig möglich, additive Terme von der Gesamtenergie abzuspalten, von denen nicht mehr jeder alle Variablen enthält. In manchen Fällen enthält ein Term nur noch zwei der Variablen des Systems. Solche Terme tragen gewöhnlich besondere Namen. Beispiele dafür sind:

die kinetische Energie $E_{\text{kin}}(m, v) = \frac{m}{2} v^2$

die potentielle Energie $E_{\text{pot}}(m, h) = m g h$

die innere Energie des Festkörpers $E(T, m) = \int_0^T m c(T) dT + E_0$

die elektrische Feldenergie eines Kondensators $E(Q, C) = \frac{Q^2}{2C}$

die magnetische Feldenergie einer Spule $E(I, L) = \frac{LI^2}{2}$

die innere Energie des idealen Gases $E(S, V, N) = \text{komplizierter Ausdruck}$

Diese Terme sind *keine* Energieformen in dem Sinn, in dem wir diese im vorigen Abschnitt definiert haben. Das sieht man daran, daß sich jedem solchen Term mehrere Energieformen zuordnen lassen, nämlich gerade die, in denen die Variablen des betrachteten Terms vorkommen.

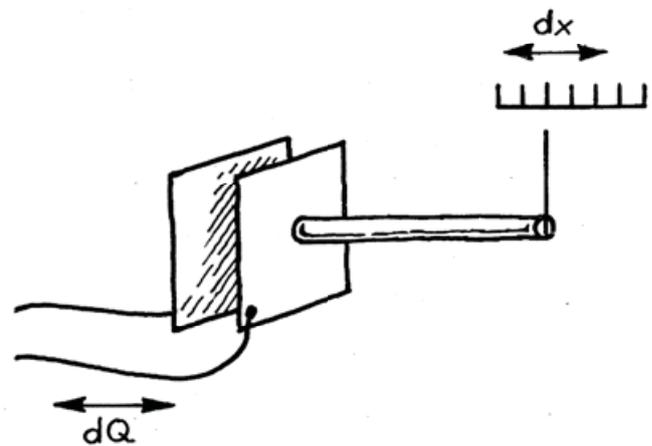


Abb. 3 Ein Kondensator kann Energie in den Formen $-F dx$ und $U dQ$ austauschen.

So kann man z.B. der elektrischen Feldenergie eines Kondensators $E(Q, C)$ die Energieformen elektrische Energie und Verschiebungsenergie zuordnen, wenn man zuläßt, daß die Kapazität C durch Änderung des Plattenabstandes x variiert werden darf, daß also $C = C(x)$ (Abb. 3). Die Tatsache, daß in dem Ausdruck der elektrischen Feldenergie Variablen auftreten, die zu zwei verschiedenen Energieformen gehören, nämlich Q und C , bedeutet, daß der Wert des Ausdrucks durch Austausch sowohl der einen als auch der anderen Energieform geändert werden kann, also sowohl durch Ladungsaustausch dQ als auch durch eine Änderung dx des Plattenabstandes, also der Kapazität C , denn es ist

$$dE(Q, C(x)) = U dQ + \frac{\partial E}{\partial C} \frac{dC}{dx} dx.$$

Da sich $E(Q, C)$ nicht in 2 Summanden $E_1(Q)$ und $E_2(C)$ zerlegen läßt, folgt außerdem, daß man durch

Austausch einer der Energieformen auch eine der anderen Form zugeordnete Variable ändert. Gibt ein geladener Kondensator elektrische Energie ab, d.h. entlädt man ihn ($dQ < 0$), so ändert sich auch die Kraft $-\frac{\partial E}{\partial C} \frac{dC}{dx}$ mit der sich die Platten anziehen. Gibt ein Kondensator Verschiebungsenergie ab, d.h. verringert man seinen Plattenabstand ($dx < 0$), so nimmt die Spannung U ab.

Analoge Aussagen gelten für die anderen oben angeführten Energieausdrücke. Ändert man z.B. die innere Energie eines Gases, indem man ihm Kompressionsenergie zuführt, so erhöht sich seine Temperatur. Führt man ihm Wärme zu, so erhöht sich auch sein Druck.

Man kann also eine Variable auf zweierlei Art, nämlich durch Betätigung von zwei verschiedenen Energieformen in ihrem Wert ändern und das hat zur Folge, daß man ein System als *Energiewandler* benutzen kann. Man kann die durch Energieaustausch in einer Form bewirkte Änderung einer Variablen durch Energieaustausch in einer anderen Form rückgängig machen. Diese Möglichkeit bildet die Grundlage der technisch wichtigen Kreisprozesse. Bei ihnen muß man dafür sorgen, daß nach Ablauf von 4 Teilprozessen alle Variablen wieder ihren Ausgangswert haben.

Wir sehen also, warum es sehr schlecht wäre, wenn es nur Systeme mit der Eigenschaft gäbe, daß sich ihre Energie in der Form der Gl. (1) schreiben läßt: Man könnte Energie nur in derselben Form herausholen, in der man sie in das System hineingesteckt hat, es gäbe nur Energiespeicher, aber keine Energiewandler.

Man kann nun auch deutlich sehen, wie man ein System beschreiben muß, wenn aus der Beschreibung hervorgehen soll, in welchen Formen das System Energie austauschen kann. Es genügt z.B. nicht zu sagen, das System sei ein Kondensator. Die Kennzeichnung des Systems erfordert, daß man angibt, welche Variablen es hat, d.h. welche Größen an ihm geändert werden dürfen. Wenn wir als System einen Kondensator betrachten, dessen Platten nicht bewegt werden, so kann es auch keine Verschiebungsenergie austauschen. Der Term $E = \frac{Q^2}{2C}$ hängt dann nur noch von einer einzigen Variablen ab, nämlich von Q , denn C ist konstant.

Unter dieser Einschränkung wirkt der Kondensator wie ein Speicher elektrischer Energie. Man kann aber ebensogut festlegen, daß der Plattenabstand variabel, aber die Ladung konstant sein

soll. Dann kann man den Kondensator als Speicher von Verschiebungsenergie betrachten. Das Wort Speicher sagt nicht wie die Energie in dem Kondensator steckt, sondern nur, wie sie hinein- und herausfließt. Die Tatsache, daß Kondensatoren meist so benutzt werden, daß ihre Kapazität konstant ist, erklärt den Fehler, der oft gemacht wird, wenn die gespeicherte Energie selbst als elektrische Energie bezeichnet wird. Eine Spule konstanter Induktivität tauscht übrigens genauso elektrische Energie aus wie ein Kondensator konstanter Kapazität.

Schließlich sollen noch die mechanischen Energierterme E_{pot} und E_{kin} betrachtet werden. Die potentielle Energie kann man durch Austausch von Verschiebungsenergie, die kinetische durch Austausch von Bewegungsenergie ändern. Da man sich in der Mechanik mit Körpern oder Massenpunkten beschäftigt, macht man gewöhnlich die stillschweigende Annahme, daß Energieaustausch, der mit einem Materieaustausch gekoppelt ist, auszuschließen ist. m ist in der Mechanik keine Variable, sondern eine dem Körper zugeordnete Konstante. Unter dieser Voraussetzung hängt jeder der beiden Terme E_{pot} und E_{kin} nur noch von einer einzigen Variable ab, E_{pot} von r und E_{kin} von v oder P , so daß die Terme nur noch durch Austausch je einer Energieform geändert werden können. Daher kommen die Schwierigkeiten, die wir beim Unterscheiden zwischen Bewegungsenergie und kinetischer Energie oder zwischen Verschiebungsenergie und potentieller Energie haben.

Wir haben gesehen, daß die Tatsache, daß die kinetische Energie in der Newtonschen Mechanik nur durch Austausch von Bewegungsenergie geändert werden kann, ein Zufall ist (in der relativistischen Mechanik trifft das auch gar nicht mehr zu). Wegen dieses Zufalls ist es so schwer, die Notwendigkeit einzusehen zwischen der kinetischen Energie und der Austauschform Bewegungsenergie zu unterscheiden. Solange man nicht den Zufall der Newtonschen Mechanik sieht, ist es nicht möglich, den Sinn von einem Satz wie dem folgenden zu verstehen: „Der Betrag der Bewegungsenergie eines Körpers ist gleich dem Betrag der an ihm verrichteten Beschleunigungsarbeit.“ Von einem Schüler, der gerade mit der Mechanik beginnt, kann man das sicher nicht erwarten. Der Lehrer hat ein gutes Gewissen, da er sorgfältig unterschieden hat, aber er sollte es eigentlich nicht haben, denn die Schüler haben etwas auswendig gelernt, das sie nicht verstehen können.

Ähnlich verhält es sich mit der Wärme bei Festkörpern. Festkörper geben Wärme ab und nehmen

Wärme auf. Der Lehrer hat ein gutes Gewissen, da er nicht gesagt hat, die Wärme stecke im Körper drin, aber er sollte es eigentlich nicht haben, denn die Schüler denken, die Wärme steckt drin.

4. Hinweise für eine Übertragung auf den Unterricht

Wir hoffen, den Leser davon überzeugt zu haben, daß die Problematik der Energieformen einfacher ist, als es nach den meisten Darstellungen den Anschein hat. Die bisherigen Betrachtungen seien noch einmal kurz zusammengefaßt:

Energie ist eine mengenartige Größe, die einem Erhaltungssatz genügt. Sie kann zwischen verschiedenen Systemen ausgetauscht werden. Beim Austausch von Energie wird stets eine weitere mengenartige Größe mit ausgetauscht oder zumindest mitgeändert. Die Menge dieser Größe ist proportional zur ausgetauschten Energiemenge. Die Natur dieser zweiten Größe bestimmt die Form der ausgetauschten Energie. Der Proportionalitätsfaktor ist eine intensive Größe. Die in einem System enthaltene Energie kann nicht in Formen eingeteilt werden, da ein System im allgemeinen Energie, die es in einer Form aufgenommen hat, in einer anderen wieder abgeben kann.

Eine für den Unterricht schwierige Aussage stellt nur der letzte Satz dieser Zusammenfassung dar. Es ist eine natürliche Reaktion, wenn die Schüler dasselbe versuchen, was auch die Physiker immer wieder versucht haben, nämlich die in einem System enthaltene Energie ebenfalls in Formen einzuteilen. Gerade bei den Systemen und Prozessen, mit denen Physik-Curricula im allgemeinen beginnen, sieht man aber nicht, daß diese Einteilung zu Widersprüchen führt. Der Lehrer sollte den Schülern deshalb von vornherein sagen „wir sagen nicht, die Bewegungsenergie steckt im Körper drin, wir nennen diese Energie absichtlich anders, denn wir werden später sehen, daß man sie aus dem Körper auch anders herausholen kann als durch Austausch von Bewegungsenergie“ oder „wir sagen nicht, die Wärme, die wir einem Körper zugeführt haben, steckt in ihm drin, denn wir werden sehen, daß man die (innere) Energie auch anders, als durch Wärmeaustausch ändern kann“.

Das beschriebene Schema der Einteilung der übertragenen Energie in Formen ist so einfach, daß es sich sehr gut zur Behandlung in niedrigen Klas-

senstufen eignet. Es ist leicht, Aspekte dieses Schemas abzutrennen, die sehr wenig mathematische Vorkenntnisse voraussetzen. Alles, was die Schüler können müssen, ist „Bilanzieren“.

In den Klassen 5 und 6 kann man sich zunächst auf Prozesse mit konstanten Strömen beschränken, und man kann etwa die folgenden Erkenntnisse erarbeiten:

- Energie strömt von einer „Quelle“ zu einem „Verbraucher“.
- Der Energiestrom ist stets begleitet von einem anderen Strom, z.B. einem elektrischen Strom, einem Wasserstrom, einem Heizölstrom, dem „Strom einer sich bewegenden Fahrradkette“.
- Ein und derselbe elektrische Strom kann verschiedene starke Energieströme begleiten. Die transportierte Energie hängt von der „Stärke“ der Quelle (oder Pumpe) ab, von ihrer Spannung.
- Die Energie strömt von der Quelle zum Verbraucher, der elektrische Strom aber fließt hin und zurück, genauso wie die Fahrradkette.
- Auch die Energie wird im „Verbraucher“ nicht verbraucht, sondern nur umgewandelt.

In der Sekundarstufe I ist man in der Lage, Energieaustauschprozesse quantitativ zu betrachten, Man wird insbesondere untersuchen, welche physikalischen Größen sich ändern, und wie stark sie das tun, wenn ein System Energie aufnimmt oder abgibt. In der Sekundarstufe I wird man auch das Problem der Einteilung in Existenzformen zum ersten Mal erörtern.

In der Oberstufe schließlich kann man neue Energieformen hinzunehmen und damit neue physikalische Größen einführen: Die Entropie, das chemische Potential, den Drehimpuls. Hier können Energieumwandlungsprozesse ausführlich diskutiert werden, so daß das Problem der Existenzformen der Energie für die Schüler seine endgültige Lösung erfährt.

Literatur:

- Falk/Ruppel*: „Mechanik, Relativität, Gravitation“. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York (2. Aufl. 1975)
- Falk/Ruppel*: „Energie und Entropie“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York (1976)
- Job*: „Neudarstellung der Wärmelehre“, Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt/M. (1972)

Einführung der Energie in der Sekundarstufe I

Einleitung

In der hier vorgeschlagenen Einführung des Energiebegriffs für den Unterricht der 8. Klasse wird die Energie als physikalische Grundgröße angesehen, die nicht durch andere Begriffe definiert, also etwa auf Kraft und Verschiebung zurückgeführt wird. Der Schüler lernt die Bedeutung des Begriffs Energie, indem er an zahlreichen Beispielen erfährt, wie und in welchem Zusammenhang der Begriff gebraucht wird. Dabei wird von Vorstellungen ausgegangen, die der Schüler von der Energie bereits aus dem Alltag und eventuell aus dem Unterricht in anderen Fächern hat. Weiter orientiert sich der Unterricht an dem Gedanken, daß die Energie eine physikalische Größe ist mit folgenden wichtigen Eigenschaften:

- Sie ist mengenartig, was bedeutet, daß beim Zusammensetzen von Systemen die Werte der Energie addiert werden.
- Sie kann von einem physikalischen System auf ein anderes übertragen, allgemein zwischen Systemen ausgetauscht werden.
- Sie kann strömen wie Stoffmengen, Ladungen und andere mengenartige Größen strömen können.
- Beim Austausch zwischen Systemen wie überhaupt beim Strömen tritt die Energie in verschiedenen *Formen* auf.
- Energieformen können ineinander umgewandelt werden.
- Für die Energie gilt ein Erhaltungssatz.

Der Unterrichtsgang ist in zwei Teile gegliedert. Im ersten Teil wird auf quantitative Betrachtungen verzichtet. Es soll im wesentlichen eine Differenzierung der Vorstellung erreicht werden, die die Schüler über die Energie bereits mitbringen. Dazu wird der Weg strömender Energie anhand einiger Beispiele untersucht. Die Schüler lernen, daß man strömende Energie nach Formen klassifizieren kann. Es wird festgestellt, daß sich an einem System, das Energie aufnimmt oder abgibt, stets noch etwas anderes als nur sein Energieinhalt ändert. Eine Diskussion der Energie in dieser Weise wäre mit geringen Einschränkungen bereits mit Schülern der Klassen 5 und 6 möglich.

Im zweiten Teil werden Energien und Energieströme gemessen. Dazu werden zwei Meßverfahren benutzt:

1. Mit dem Elektrizitätszähler mißt man elektrische Energie, die durch den Zähler hindurchgeströmt ist. Der Zähler ist ein geeichtes Meßgerät, das die Energie in kWh anzeigt.
2. Aus der Temperaturerhöhung einer bestimmten Wassermenge schließt man auf die Änderung des *Energieinhalts* dieses Wassers. Dieses Meßverfahren wird über das 1. Verfahren geeicht.

Die Energieerhaltung wird an einem Beispiel quantitativ gezeigt.

Eine Systematik der Standard-Energieformen der Physik wird *nicht* gegeben, sie wird auch nicht angestrebt. Am Beispiel der Wärme wird jedoch klar gemacht, daß naheliegende Kennzeichnungen von Energieformen – wie die Kennzeichnung der Energieform „Wärme“ durch die Änderung der Temperatur – oft nicht funktionieren, daß es im Gegenteil meist ein Problem ist, physikalische Größen zu finden, deren Änderungen eine bestimmte Energieform *eindeutig* kennzeichnen. Für die mechanische Energieform Gravitationsenergie lernen die Schüler den analytischen Ausdruck kennen, da er sich unmittelbar anbietet. Auf die Behandlung des Ausdrucks $U\Delta Q$ für die elektrische Energie wird hingegen verzichtet, da dieser in Klasse 9 im Rahmen der Elektrizitätslehre hergeleitet wird. Die Ausdrücke $-p\Delta V$ für die Kompressionsenergie und $T\Delta S$ für die Wärme sollten erst in der Oberstufe eingeführt werden.

1. Energieströme

Zugang zur Energie

Der Unterricht beginnt damit, daß den Schülern eine Reihe von vertrauten Geräten vorgeführt wird, wie Kochplatte, Tauchsieder, Gaskocher, Glühbirne, Spielzeugauto, Spielzeugkran, Weihnachtsmühle, Dampfmaschine. Es werden sodann Begriffe gesucht, die auf alle Geräte anzuwenden sind.

In der Diskussion taucht erfahrungsgemäß bald der Begriff der Energie auf. Der Begriff wird dann auf weitere Beispiele ausgedehnt, wie Maschinen, Lebewesen, Haushalt.

Der nächste Schritt orientiert sich an den Fragen:

- Wie bekommt ein Gerät, eine Maschine, ein Lebewesen Energie geliefert?
- Wozu braucht man Energie?

Die Ergebnisse werden in Tabelle 1 festgehalten.

Tabelle 1

Energieträger	Gerät	Wirkungen des Geräts
elektrischer Strom	Herd	Kochtopf, Speise und Umgebung werden <i>erwärmt</i> .
elektrischer Strom	Glühbirne	Die Umgebung wird <i>beleuchtet</i> und <i>erwärmt</i> .
Kerze	Weihnachtsmühle	Die Mühle <i>bewegt</i> sich, die Umgebung wird <i>beleuchtet</i> und <i>erwärmt</i> .
Spiritus	Dampfmaschine	Die angeschlossenen Maschinen <i>bewegen</i> sich, die Umgebung wird <i>erwärmt</i> .
elektrischer Strom	Waschmaschine	Die Trommel <i>bewegt</i> sich, das Wasser und die Umgebung werden <i>erwärmt</i> .
Benzin	Auto	Das Auto <i>bewegt</i> sich, Auto und die Umgebung werden <i>erwärmt</i> .
elektrischer Strom	Kran	Lasten werden <i>hochgehoben</i> .
strömendes Wasser	Turbine	Die angeschlossenen Geräte werden <i>bewegt</i> .
Nahrung	Lebewesen	Das Lebewesen <i>bewegt</i> sich, es <i>hebt</i> Gegenstände oder sich selbst (klettert). Die Umgebung wird <i>erwärmt</i> .

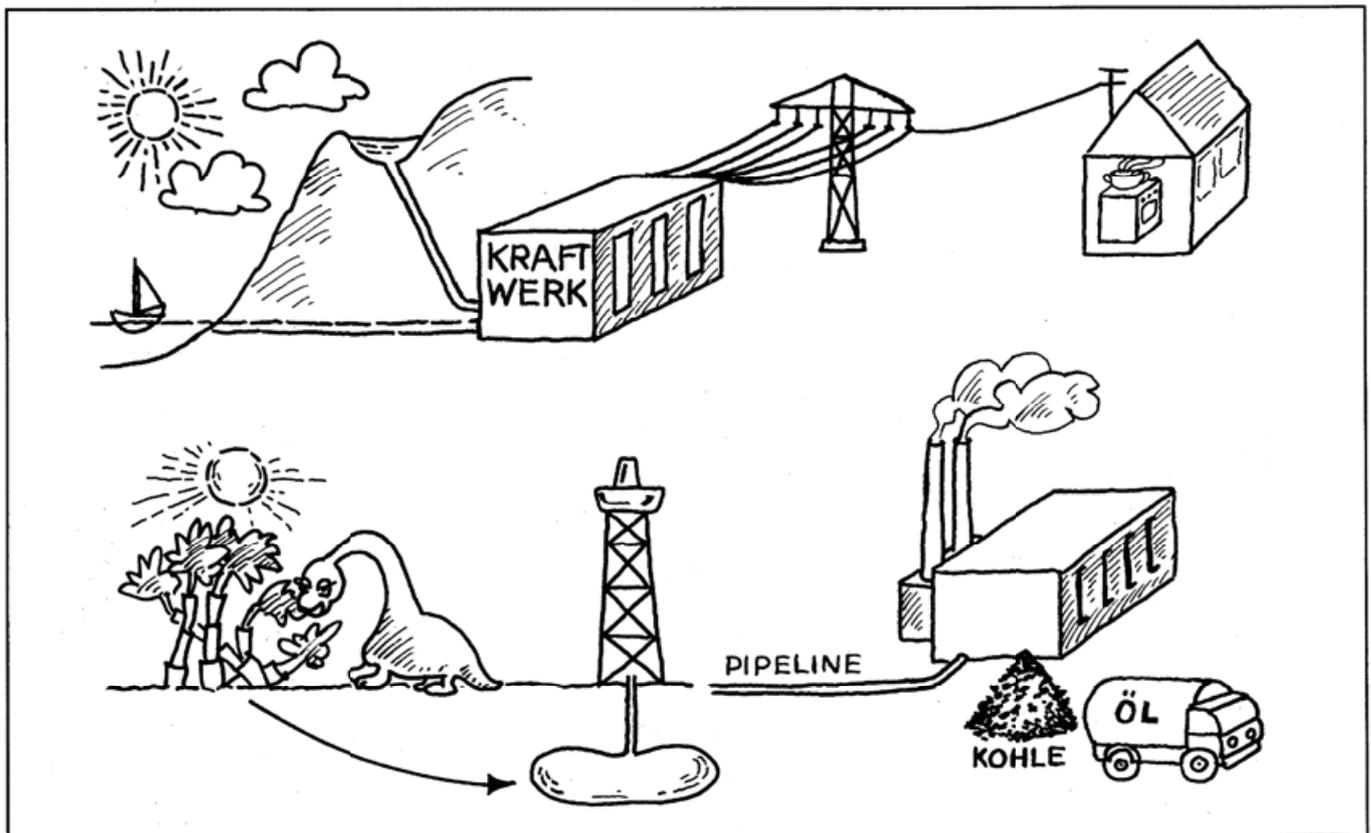


Abb. 1 Wege der Energie

Energie wird geliefert zusammen mit Strom, Öl, Kohle, Gas, Benzin, Spiritus, Nahrung, Sonnenlicht, Wasser. Sie wird gebraucht, wenn man einen Gegenstand bewegen, hochheben, erwärmen oder beleuchten will. Wichtig ist die Erkenntnis, daß dazu immer ein zweites Objekt erforderlich ist, das die Energie liefert. Damit ist man bei der ersten zentralen Erfahrung: Veränderungen, die man an einem Gegenstand beobachtet, sind fast immer damit verknüpft, daß auf den Gegenstand Energie übertragen oder ihm Energie entzogen wird. So verlangt das Bewegtwerden eines Gegenstandes (genauer jede Änderung seines Bewegungszustands) Energiezufuhr bzw. das Abbremsen Energieentzug. Analoges gilt für das Heben oder das Erwärmen eines Gegenstandes.

Der Weg strömender Energie

Welchen Weg legt die Energie zurück bis sie zum Kochtopf gelangt, in dem sie zum Kochen verwendet wird? Bei der Diskussion dieser Frage entsteht ein Bild wie es die Abb. 1 zeigt.

Erfahrungsgemäß fällt es den Schülern leicht, Wege der Energie zu verfolgen. Trotzdem staunen sie, wenn sie am Anfang einer Energiekette gewöhnlich die Sonne finden. Die Betrachtungen werden durch weitere Beispiele vertieft (Abb. 2).

In Abb. 3 wird eine Diagrammtechnik dargestellt, in der Energieströme als dicke Pfeile System mit System verbinden.

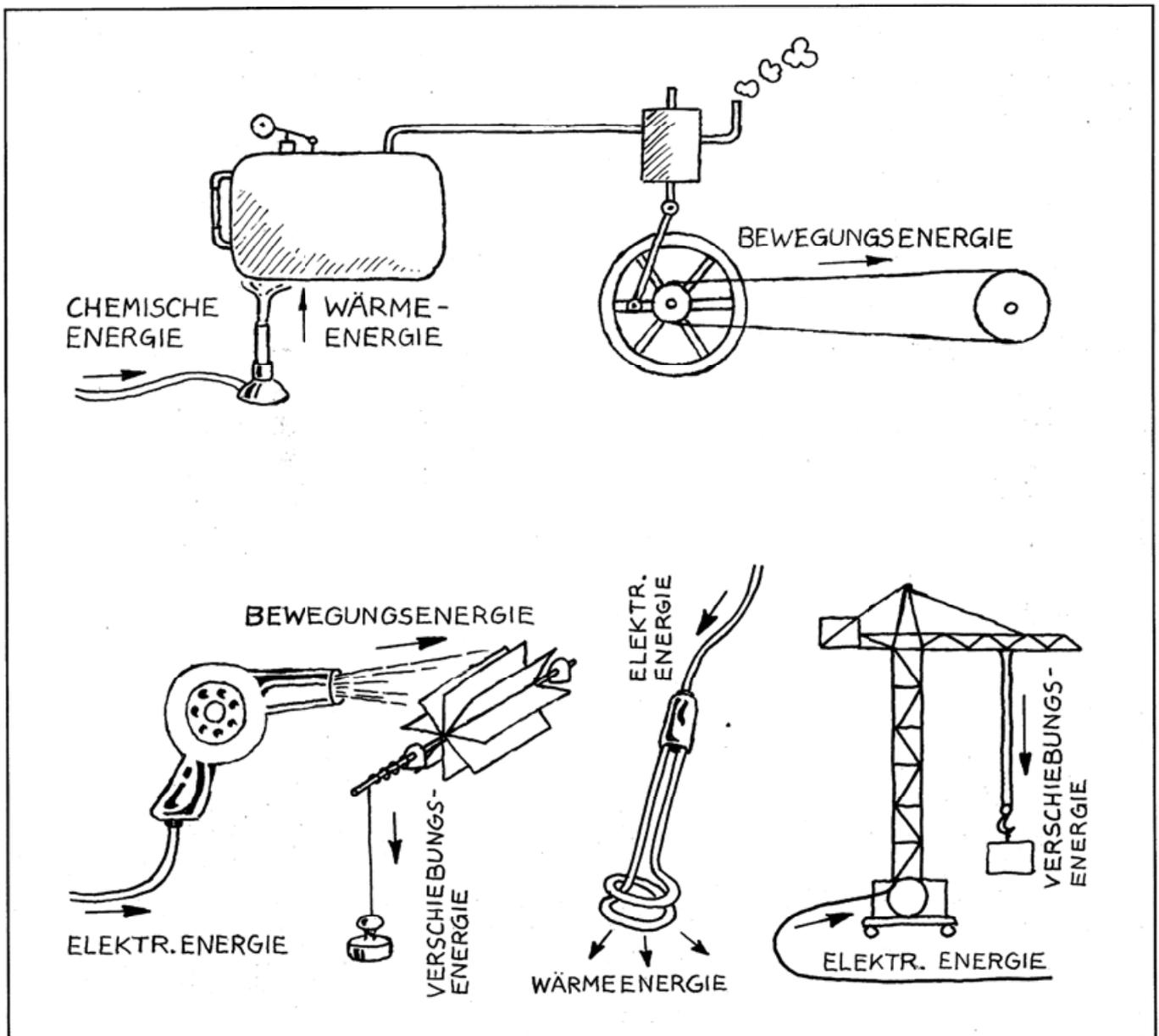


Abb. 2 Beispiele für Energieströme: Dampfmaschine, Ventilator mit Windrad, Tauchsieder, Kran

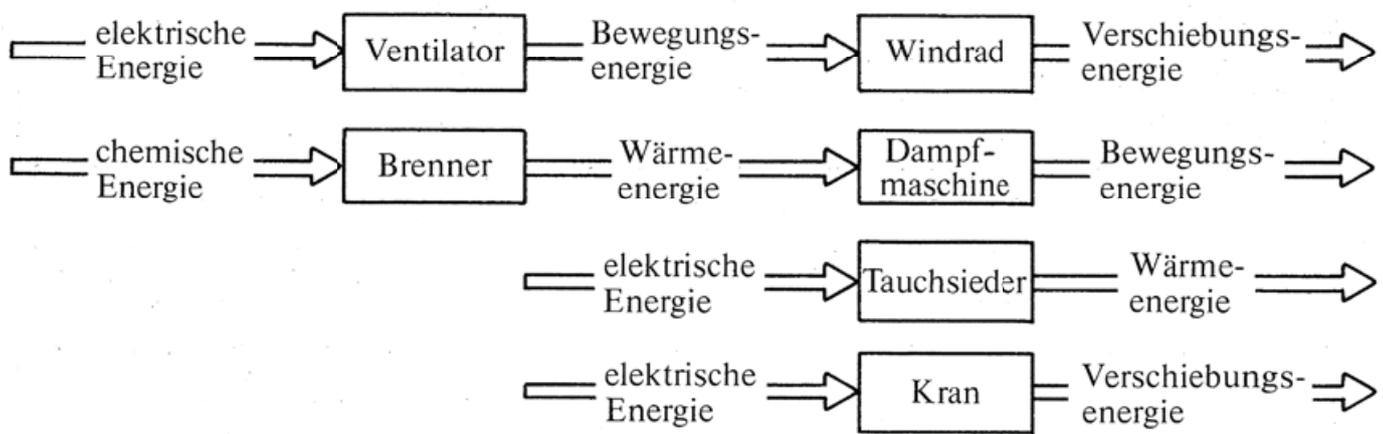


Abb. 3. Die in Abb. 2 auftretenden Energieformen und ihre Namen

Austauschformen der Energie

Bisher wurden Formulierungen verwendet wie „die Energie strömt vom Kraftwerk zum Herd“. Es erhebt sich die Frage, ob dieser Vorgang nicht näher und genauer beschrieben werden kann. Wie kommt die Energie von einem System zum anderen? Was „ist“ zwischen den Systemen, wie sind sie verbunden? Bei erneuter Diskussion der bereits bekannten Beispiele wird festgestellt, daß die Energie mit verschiedenen Transportvorrichtungen übertragen wird, d.h. daß die Verbindung zwischen den Systemen, die Energie miteinander austauschen, verschieden ist. Das hängt damit zusammen, daß die Energie immer zusammen mit einer anderen physikalischen Größe strömt, die bei den verschiedenen Transportvorrichtungen im allgemeinen eine andere ist. Auf diese Art kann der transportierten Energie eine *Energieform* zugeordnet werden. Geschieht die Verbindung durch ein Kabel, so strömt außer der Energie noch elektrische Ladung, und wir sagen, die Energie ströme in Form von „elektrischer Energie“. Wird die Verbindung durch ein Rohr hergestellt, so strömt außer der Energie noch Öl oder Gas, und wir sagen, die Energie ströme in Form von „chemischer Energie“.

Bei einigen Übertragungsvorgängen ist es schwierig, die Größe, die zusammen mit der Energie strömt, aufzufinden, so die Entropie bei der Wärme und beim Licht und den Impuls bei der Bewegungsenergie. Der Lehrer sollte diese Größen, ohne sie genauer zu erklären, erwähnen, damit die Schüler sehen, daß die Systematik der Einteilung übertragener oder strömender Energie in Energieformen immer funktioniert. Außerdem kann dadurch erreicht werden, daß später bei einer sorgfältigeren Einführung dieser Größen weniger Aversionen auftreten.

In Tabelle 2 sind die Namen der Energieformen angegeben, zusammen mit den entsprechenden Verbindungen und den jeweils mitströmenden mengenartigen Größen.

Tabelle 2

Energieform	Verbindung zwischen den Systemen	mengenartige Größe, die mit der Energie strömt
elektrische Energie	Kabel	elektrische Ladung
chemische Energie	Rohr, Pipeline, Förderband	Öl, Gas, Benzin, Kohle
Wärmeenergie	Berührung	Entropie
Licht	Sichtverbindung	Entropie
Verschiebungsenergie	Transmission (Schnur, Stange)	Material des Treibriemens
Bewegungsenergie	Stoß	Impuls

Hiermit sind die ersten Lehrziele erreicht. Der Schüler weiß, was Energieformen sind, und kennt die wichtigsten Standardformen. Er hat bei vielen Geräten die Energieströme untersucht, die herein- und hinausfließen, und er hat erfahren, daß diese Geräte Energiewandler sind. Hier ließe sich die Diskussion anschließen, welche Energiewandlung bei den einzelnen Maschinen erwünscht ist und welche einen meist unerwünschten Nebeneffekt darstellen. Die Rolle der Reibung bei allen Bewegungsvorgängen läßt sich so klar und einfach erläutern.

Tabelle 3

Form der abgegebenen bzw. aufgenommenen Energie	Gerät/Vorgang	Änderung
elektrische Energie	Auf- und Entladen eines Akkus	Änderung der Zusammensetzung und der Dichte der Flüssigkeit
elektrische Energie/ Wärmeenergie	Erwärmen und Schmelzen eines Metalls Erwärmen und Verdampfen von Wasser	Änderung des Volumens, des Widerstands, des Aggregatzustands Änderung der Temperatur, der Dichte, des Aggregatzustands
Wärmeenergie	Erwärmen eines Gases Erwärmen von präpariertem Papier oder Flüssigkristallen	Änderung der Temperatur, des Drucks Änderung der Farbe
Wärmeenergie/ Licht	Strahlung der Sonne, einer Lampe	Änderung der Temperatur von Gegenständen
Licht	Belichten eines Films	Änderung der chemischen Zusammensetzung der lichtempfindlichen Schicht
chemische Energie	Auftanken eines Autos Nahrungsaufnahme eines Lebewesens	Änderung des Gewichts Änderung des Gewichts, der Größe
Bewegungsenergie	Beschleunigen und Bremsen eines Autos	Änderung der Geschwindigkeit
Rotationsenergie	Beschleunigen und Bremsen eines Schwungrads	Änderung der Drehgeschwindigkeit
Verschiebungsenergie	Heben einer Last Spannen einer Feder	Änderung der Höhe Änderung der Länge

Mit Energiezufuhr zusammenhängende Zustandsänderungen der Körper

Bisher stand die Fähigkeit von Geräten im Vordergrund, Energie von einer Form in eine andere umzuwandeln. Dabei wurden der ein- und ausfließende Energiestrom jeweils als gleich groß angenommen. Im folgenden wird der Frage nachgegangen, was sich an einem Körper ändert, wenn ihm Energie zugeführt wird, der Körper zeitweilig also mehr Energie aufnimmt als abgibt, oder umgekehrt mehr abgibt als aufnimmt. Neben Energiewandlern werden so Energiespeicher und Energiequellen in die Betrachtungen einbezogen. Die in der Tabelle 3 aufgeführten Beispiele verdeutlichen das Gemeinte. Die Beispiele zeigen, daß sich Energiezufuhr äußert in Änderungen der Temperatur, der Masse, der Geschwindigkeit, des Volumens, der Länge, der Lage, des Aggregatzustands, des Drucks und der Farbe.

Der Unterrichtsgang läßt nun bei den Schülern von selbst Fragestellungen quantitativer Art aufkom-

men: Haben die ein- und ausfließenden Energieströme bei den Energiewandlern denselben Betrag? Wie groß sind die angegebenen Änderungen in Abhängigkeit von der Menge der zugeführten Energie? Diese Fragen führen zum zweiten Teil dieses Aufsatzes.

2. Quantitativer Vergleich von Energieströmen

Die Frage nach dem Messen und quantitativen Vergleichen von Energieströmen beginnt am besten wieder mit der Diskussion von Verfahren, die die Schüler als Vorschläge unterbreiten. Derartige Vorschläge sind, wie die Erfahrung zeigt, elektrische Energie mit dem Elektrizitätszähler zu messen, oder chemische Energie durch die Menge von Brennstoffen, etwa Benzin oder Dieselöl. Letzteres liegt nahe, wenn man daran denkt, daß die Strecke, die ein

Auto fahren kann, proportional ist der Menge des Benzins in seinem Tank. Allerdings ist die Proportionalität zwischen Menge der Energie und Menge des Treibstoffs nur der triviale Teil des Problems. Worauf es hier ankommt, ist der quantitative Vergleich zwischen *verschiedenen* Energieströmen. Etwa: Welche Menge Dieseltreibstoff oder Benzin liefert beim Verbrennen denselben Betrag an Energie wie ein Liter Spiritus? Es lassen sich leicht Anordnungen angeben, mit denen diese Frage beantwortet werden kann, etwa durch die Erwärmung einer bestimmten Menge Wassers. Die Methode erlaubt, die durch das Verbrennen aller möglichen Brennstoffe gelieferten Energiemengen untereinander zu vergleichen.

Das im üblichen Unterrichtsgang angewandte Verfahren, die Energiemessung auf die Messung von Kraft und Weg zurückzuführen, wird von seiten der Schüler so gut wie nie vorgeschlagen. In der Tat ist dieses Vorgehen, das das Produkt aus Kraft und Weg nicht Energie, sondern Arbeit nennt, und erst in einem späteren Schritt Energie als Erweiterung des Begriffs der Arbeit einzuführen sucht, ein Resultat der historischen Vormachtstellung der Newtonschen Mechanik und mit ihr des Vorurteils, daß die Kraft primär sei gegenüber der Energie. Die Ablehnung dieses Weges bedeutet übrigens nicht, daß man in den umgekehrten Fehler verfallen müßte, die Kraft vollständig zu beseitigen. Es geht vielmehr darum, ihr einen nach heutigen Erkenntnissen angemessenen Platz im System der Physik zuzuweisen. Auf die methodischen und dadurch bedingten didaktischen Schwierigkeiten des Kraftbegriffs wird im letzten Abschnitt eingegangen.

Der Unterrichtsgang, wie er im folgenden dargestellt wird, baut auf dem Vorschlag auf, sich zunächst auf elektrische Energieströme zu konzentrieren und an ihnen quantitative Messungen mit Hilfe des Elektrizitätszählers zu machen. Einen Vorteil bei diesem Verfahren sehen wir darin, daß die Messung an einem Energiestrom beginnt, der dem Schüler vertraut ist.

Das Meßinstrument „Elektrizitätszähler“

Zunächst werden mit dem elektrischen Zähler Energiemengen beim Betrieb verschiedener Geräte wie Kochplatte, Heizlüfter, Glühbirne etc. gemessen. Der Zähler wird dabei als Meßinstrument akzeptiert, ohne daß sein „Innenleben“ bekannt zu sein braucht. Man benutzt den Zähler so wie jedermann die Uhr als Zeitmesser benutzt oder das Tachometer als Geschwindigkeitsmesser. Auch bei

diesen Instrumenten bleibt die Funktionsweise für die meisten Menschen im Dunkeln. Es erhebt sich dabei übrigens das Problem der Meßgenauigkeit, da für die im Schulexperiment auftretenden Energiemengen der Zähler ein sehr grobes Meßinstrument ist.

Ebenso wird ohne große Erklärung die auf dem Zähler angegebene Einheit der Energiemenge, die Kilowattstunde benutzt. Auf die Bestandteile „Kilo“ und „Stunde“ des Wortes Kilowattstunde wird man hinweisen. Die Einheit stellt auch den Übergang zum nächsten Schritt dar. Das Wort „Watt“ ist den Schülern zumindest von Glühbirnen und anderen elektrischen Geräten her bekannt. Was drückt die Angabe einer Wattzahl aus?

Stärke des Energiestroms (Leistung)

Um den Energiestrom der Anschauung näher zu bringen, sollten zum Vergleich Ströme anderer mengenartiger Größen diskutiert werden wie Wasserstrom, Autostrom, Menschenstrom, Luftstrom. Der Vergleich macht es den Schülern leicht, den Zusammenhang von Strom und Menge als allgemeinen begrifflichen Zusammenhang zu erfassen.

Tabelle 4

Menge	Stromstärke	Einheit
Wasser	Wassermenge pro Zeit	$\frac{\text{Liter}}{\text{Sekunde}}$
Auto	Menge (= Anzahl) der Autos pro Zeit	$\frac{\text{Autos}}{\text{Stunde}}$
Menschen	Menge (= Anzahl) der Menschen pro Zeit	$\frac{\text{Menschen}}{\text{Minute}}$
Energie	Energiemenge pro Zeit	$\frac{\text{kWh}}{\text{h}} = \text{kW}$

Die Stärke des Energiestroms wird so gemessen, daß die während einer Zeitspanne Δt gelieferte Energiemenge ΔE durch das Zeitintervall Δt dividiert wird. Die Größe $\Delta E/\Delta t$ ist auch als „Leistung“ bekannt, hat aber als *Stromstärke des Energiestroms* eine anschaulichere Bedeutung. Das Watt entpuppt sich als die Einheit der Energiestromstärke. Entsprechend drückt die „Wattzahl“ die Stärke des Energiestroms durch ein Gerät aus. Über $\Delta E = (\text{Energiestrom}) \cdot \Delta t$ lassen sich aus der auf den Geräten angegebenen Wattzahl die für eine bestimmte Betriebszeit notwendige Energie und damit die Betriebskosten errechnen.

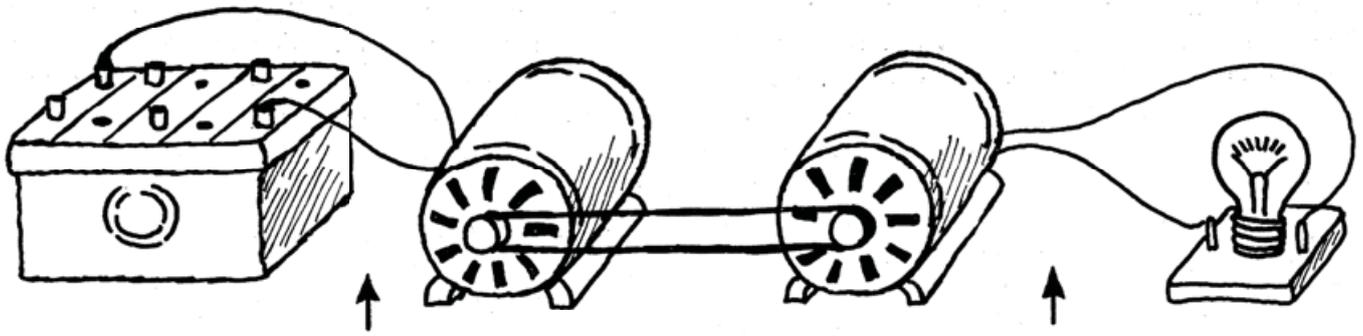


Abb. 4 Energieströme: Batterie-Motor, Motor-Generator, Generator-Verbraucher. Die Messung der elektrischen Energieströme Batterie-Motor und Generator-Verbraucher liefert den Wirkungsgrad der Anordnung Motor-Generator (Umformer).

Mit dem Wattmeter als Meßinstrument für die Energiestromstärke und der Stoppuhr steht von jetzt ab eine wesentlich bessere, nämlich empfindlichere Meßeinrichtung als der Zähler zur Verfügung.

Nach diesen Betrachtungen kann die eingangs gestellte Aufgabe wieder aufgegriffen werden, unterschiedliche Energieströme zu vergleichen. Die Tatsache, daß bisher nur elektrische Energie gemessen werden kann, schränkt die Zahl der zu untersuchenden Vorgänge zunächst ein. Dennoch gibt es eine Menge interessanter Fragestellungen, die sich allein mit der Messung der elektrischen Energie behandeln lassen. Eine derartige Möglichkeit ist in der Anordnung der Abb. 4 angegeben; die Messung erfolgt an den markierten Stellen.

Das Ergebnis wird die Schüler enttäuschen, da sie eine vollständige Umwandlung und die Erhaltung der Energie erwarten. In einer Diskussion wird geklärt, daß kein Widerspruch zur Energieerhaltung vorliegt, da Energieströme die Anordnung verlassen können, die von der Messung nicht erfaßt werden. Ein Rückblick auf die Energiestromdiagramme läßt vermuten, daß es sich bei den nicht erfaßten Energieströmen meist um unerwünschte Wärmeströme handelt. Die Erwärmung, genauer die Temperaturerhöhung von Motoren, die in Betrieb genommen werden, zeigt das deutlich.

Energiezufuhr und Temperaturänderung

Die letzte Feststellung lenkt die Aufmerksamkeit auf die Frage, welche Änderungen an physikalischen Systemen zu beobachten sind, denen Energie zugeführt wird. Ein besonders evidentes Beispiel dafür, daß mit der Zufuhr von Energie die physikalischen Größen eines Körpers ihren Wert ändern, liefert der Tauchsieder. Der Zusammenhang zwischen Temperaturerhöhung des Wassers und elektrisch zugeführter und gemessener Energiemenge

läßt sich quantitativ gewinnen. Um deutlich zu machen, daß dieser Zusammenhang nicht einfach eine Proportionalität zu sein braucht, wird der Versuch zweckmäßigerweise mit einer Eisschmelze begonnen und erst dann beendet, wenn ein Teil des Wassers verdampft ist. Das so gewonnene Diagramm (Abb. 5) zeigt einen Bereich, in dem die gemessene Temperaturerhöhung ΔT der zugeführten Energie ΔE proportional ist. Dort, wo sich die Temperatur mit der zugeführten Energie nicht ändert, zeigen andere Größen eine Änderung, beim Schmelzen die Menge des Eises, beim Verdampfen die Menge des flüssigen Wassers. Mit neueren Versuchsanordnungen der Lehrmittelindustrie können die Untersuchungen auf Metalle ausgedehnt werden, wobei allerdings nur der Proportionalitätsbereich in Erscheinung tritt. Das gibt unmittelbar Anlaß zu der Frage, ob bei Metallen ein Diagramm auftritt, das dem des Wassers analog ist. Daß auch Metalle verdampfen können, erweist sich oft als Vorstellungsschwierigkeit.

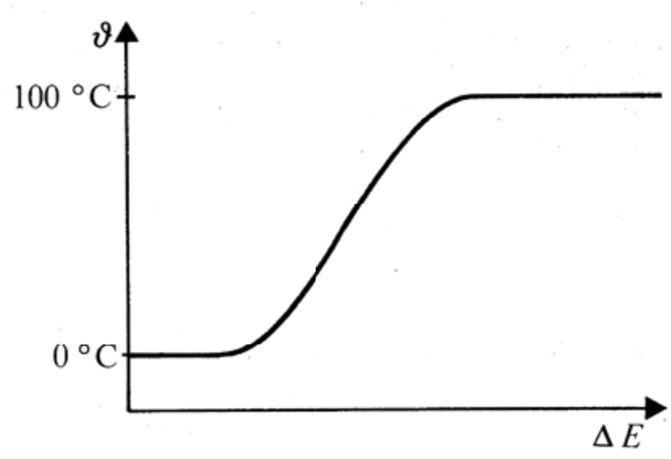


Abb. 5 Aufheizen einer Eisschmelze, Abhängigkeit der Temperatur ϑ von der zugeführten Energie ΔE

Die Erkenntnis, daß in „normalen“ Temperaturbereichen die dem Wasser zugeführte Menge an Energie der Temperaturerhöhung des Wassers propor-

tional ist, läßt sich unmittelbar anwenden auf die Temperaturerhöhung, die ein Fluß durch die „Abwärme“ eines Kraftwerks erfährt. (Daß Abwärme bei einem Kraftwerk notwendigerweise auftritt, wird hier einfach hingenommen.) Wie groß ist die Temperaturerhöhung bei bekanntem Abwärme- und Wasserstrom? Die Schüler weisen den Lösungsweg selbst. In einem Fluß steht sehr viel mehr Wasser zur Verfügung als die 50 g im Schulexperiment. Allein die Vorstellung, mit der Versuchsanordnung das Wasser in einer Badewanne zu erwärmen, macht das Problem deutlich. Vor der experimentellen Überprüfung werden theoretische Überlegungen angestellt, die noch einmal die Mengengartheit der Energie unterstreichen. Um die Temperatur von 50 g Wasser um 1 K zu erhöhen, seien x Js notwendig. Wird das Experiment mit zwei Wassermengen von je 50 g durchgeführt, muß die Energie $2x$ Js zugeführt werden. Faßt man beide Wassermengen als ein einziges „System“ auf, so sind $2x$ Js notwendig, um die Temperatur der Gesamtwassermenge um 1 K zu erhöhen. Im Proportionalitätsbereich zwischen zugeführter Energie ΔE und Temperaturerhöhung ΔT gilt somit die Beziehung

$$\Delta E = cm \Delta T. \quad (1)$$

Der Wert des Proportionalitätsfaktors c wird experimentell bestimmt, indem ΔE elektrisch gemessen wird, m durch Wägen oder Volumenbestimmung des Wassers und ΔT mit Hilfe eines Thermometers. Für andere Stoffe hat c , wie das Experiment zeigt, einen anderen Wert als für Wasser. Der Faktor c mißt, wieviel Energie dem Stoff zugeführt werden muß, damit die Temperatur eines Kilogramms des Stoffes um 1 Grad erhöht wird.

Mit dem ermittelten Wert von c für Wasser läßt sich die Temperaturerhöhung eines Flusses vorher-sagen. Dazu ist außerdem nötig, daß man den vom Kraftwerk gelieferten Wärmestrom und den Wasserstrom des Flusses kennt.

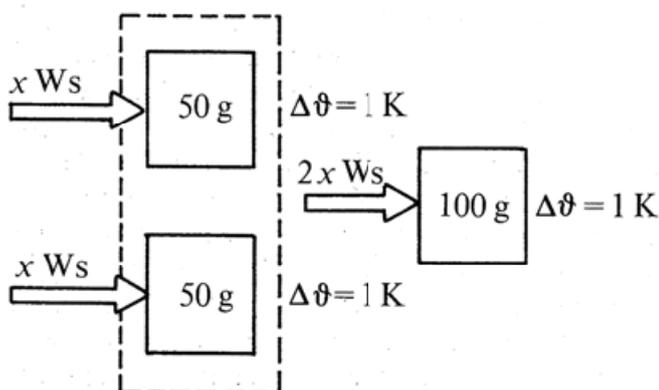


Abb. 6 Die Mengengartheit der Energie beim Aufheizen von Wasser

Messung zugeführter Energie durch Messung von Temperaturerhöhungen

Gl. (1) läßt sich nun umgekehrt dazu benutzen, aus der Messung der Temperaturerhöhung ΔT einer bestimmten, durch m charakterisierten Menge eines Stoffes, etwa Wasser, die dem Stoff zugeführte Energie ΔE zu bestimmen, wenn die Energiezufuhr nicht elektrisch erfolgt. Das liefert eine Möglichkeit zur Messung von Energiemengen, die dem Wasser statt mit Hilfe eines Tauchsieders mit Hilfe einer Gas- oder Spiritusflamme zugeführt werden.

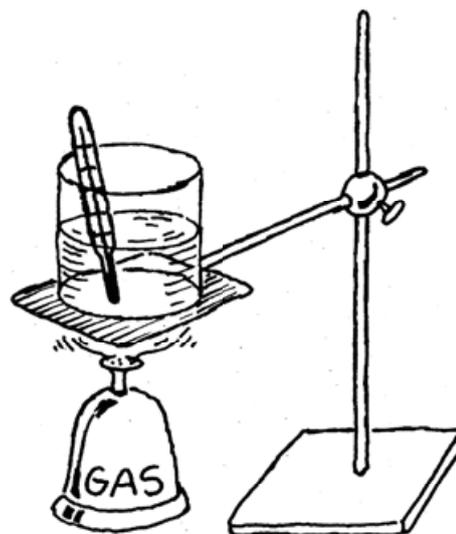
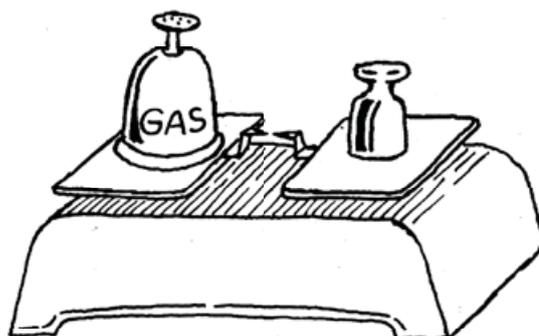


Abb. 7 Messung der Energie, die ein Brennstoff bei seiner Verbrennung liefert

Der in Abb. 7 skizzierte Versuchsaufbau erlaubt es, über die Messung der Temperaturerhöhung von Wasser die Energie abzuschätzen, die beim Verbrennen von beispielsweise 2 g Spiritus an das Wasser abgegeben wird. Diese Energiemenge ist zwar, da auch der Behälter und die umgebende Luft erwärmt werden, nicht völlig identisch mit der Energie, die bei der Verbrennung des Spiritus frei wird, aber sie stellt doch eine Abschätzung dar. Hiermit ist ein wichtiges Ziel erreicht, nämlich Energiemengen-

gen, die in chemischer Form auftreten, quantitativ mit der elektrischen Energie zu vergleichen. Die chemische Energie wird damit ebenfalls in der Einheit kWh gemessen. Ferner erhebt sich auf natürliche Weise das Problem, wie die angegebene Messung zu verbessern ist. Die Diskussion führt zu Vorschlägen, die eine gute und möglichst vollständige Wärmeübertragung (Wärmeaustauscher) möglich machen.

Energieerhaltung und Wärmeaustausch

Die schon mehrfach aufgekommene Vermutung der allgemeinen Erhaltung der Energie läßt sich nun am Beispiel des Wärmeaustausches experimentell untersuchen. Normalerweise liegt die Schwierigkeit einer experimentellen Bestätigung der Energieerhaltung darin, daß man nicht immer alle Energieströme übersieht, die an einem Vorgang beteiligt sind, und daß man auch meist nicht die Meßinstrumente hat, um alle Energieströme zu messen. Auch die etwa durch eine Flamme zugeführte Wärme wird nach der vorgestellten Meßmethode ja nicht als Energiestrom, sondern als Energiemenge gemessen.

Der einfache Wärmeaustausch zwischen zwei isoliert aufgestellten Körpern kann nun benutzt werden, um in diesem Spezialfall die Energieerhaltung zu demonstrieren. Unter Ausnutzung der Gl. (1) wird für beide Körper der Zusammenhang zwischen Energieänderung ΔE_1 bzw. ΔE_2 und Temperaturänderung ΔT_1 bzw. ΔT_2 experimentell festgestellt. Beide Körper werden auf unterschiedliche Anfangstemperatur T_{1a} bzw. T_{2a} gebracht und in einem Styroporkasten in thermischen Kontakt gebracht. Die beiden Körpern gemeinsame Endtemperatur T_e wird unter Postulierung der Energieerhaltung ausgerechnet und im Experiment festgestellt. Es zeigt sich, daß die vom Körper 1 abgegebene Energiemenge gleich ist der vom Körper 2 aufgenommenen.

Messung der Gravitationsenergie

Als Ausgangspunkt wird ein Planspiel gewählt über den Bau eines Kraftwerks. Eine Kraftwerksgesellschaft plant ein neues Wasserkraftwerk. Es kommen verschiedene Standorte in Betracht. Welche Angaben über Standort und Wasser müssen bekannt sein, damit der Energieertrag berechnet werden kann?

Sehr schnell erkennen die Schüler, daß der Energiestrom, den das Kraftwerk liefern kann, abhängt von der Fallhöhe h des Wassers und vom Wasserstrom. Geht man vom Energiestrom $\Delta E/\Delta t$ zur Energiemenge ΔE über, die pro Zeitintervall Δt geliefert wird, bedeutet der Vorschlag, daß

$$\Delta E = g h \Delta m. \quad (2)$$

Der Wert des Proportionalitätsfaktors g von der Dimension „Energie/(Länge · Masse)“ läßt sich experimentell bestimmen, wenn es gelingt, die vom herabfallenden Wasser pro Masse Δm gelieferte Energiemenge ΔE zu messen. Es bietet sich an, diese Energie durch Verwendung einer Turbine oder eines Wasserrades mit angekoppeltem elektrischen Generator in elektrische Energie umzuformen und diese zu messen. Ein anderer Vorschlag wäre, das Wasser in einem Wasserfall herabstürzen zu lassen und die dabei auftretende Temperaturzunahme des Wassers zu messen, also auch die Gravitationsenergie (2) aus einer Temperaturerhöhung ΔT mit Hilfe der Gl. (1) zu bestimmen. Der zweite Vorschlag zeigt bei seiner Realisierung eine generelle Schwierigkeit, die sich hier auftut: Die Temperaturerhöhung ist zu klein, als daß sie gemessen werden könnte. Das wirft auch Zweifel auf die praktische Brauchbarkeit des ersten Vorschlags, denn die bei gängigen Fallhöhen h und Massenwerten Δm zu erwartende Energiemenge ΔE ist offenbar so klein, daß das Mitspielen unerwünschter Energieformen, wie Reibungswärme, große Ungenauigkeiten in der Messung zur Folge haben.

Wenn der Energiebetrag (2) hinreichend große Werte annehmen soll, ist das nur dadurch möglich, daß die Fallhöhe h oder die Masse Δm groß gewählt wird. Die Masse groß zu machen, erfordert aber auch, der ganzen Anordnung gewaltige Ausmaße zu geben, was im Rahmen normaler experimenteller Bedingungen nicht möglich ist. Alle Experimente, die die Energie (2) zu bestimmen trachten, beruhen deshalb darauf, daß h groß gemacht wird, meist dadurch, daß man den Vorgang des Fallens oder Absenkens von Gewichten im Erdfeld iteriert. Eine bekannte und experimentell relativ einfache Möglichkeit besteht darin, daß man sich das durch die Aufgabenstellung noch im Vordergrund stehende Wasser in Stücke zerhackt denkt, das Wasser also durch Körper ersetzt. Die Energiebilanz wird davon nicht berührt. Der Wasserfall verwandelt sich durch diesen Gedankenschritt in einen Hagel von Schrotkugelchen, deren Fallhöhe h man durch Wiederholen des Fallvorgangs beliebig vergrößern kann. So ergibt sich das bekannte Experiment, Schrotkugeln in einem Papprohr fallen zu lassen, das zur Wiederholung des Vorgangs um eine Quer-

achse gedreht wird. Man mißt dabei die Temperaturerhöhung der Schrotkugeln nach einer größeren Anzahl von Drehungen des Rohres. Der so erhaltene Wert von g stimmt zwar nur näherungsweise überein mit $g = 9,8 \text{ Ws}/(\text{m kg}) \approx 10 \text{ Ws}/(\text{m kg})$, aber das ist für den Lernenden kein Nachteil.

Eine Variante des Experiments ist das Joule-Experiment. Die Körper sind darin schwere Gewichte, die im Schwerfeld der Erde nicht fallen, sondern langsam abgesenkt werden und ihre Energie dabei an ein Rührwerk abgeben, das eine möglichst zähe Flüssigkeit umrührt, deren Temperaturerhöhung gemessen wird. Statt einer Flüssigkeit könnte man auch eine mechanische Bremsvorrichtung benutzen. Es ist nützlich, das Joule-Experiment auf seine experimentellen Schwierigkeiten hin zu diskutieren (Wärmeabgabe nach außen, Genauigkeit der T -Messung).

Der Wert $g = 10 \text{ Ws}/(\text{m kg})$ ist offensichtlich ein Charakteristikum des Gravitationsfeldes der Erde. Würde man das Experiment auf dem Mond machen, hätte g sicher einen anderen, und zwar kleineren Wert. Jedem Kind ist heute geläufig, daß das Heben von Körpern auf dem Mond „leichter“ ist als auf der Erde: Mit dem gleichen Energieaufwand läßt sich derselbe Körper auf dem Mond höher heben als auf der Erde.

3. Didaktische Kommentare zum geschilderten Unterrichtsgang

Die folgenden drei Abschnitte sind als Kommentare zu dem entwickelten Unterrichtsgang gedacht. Sie machen keine Vorschläge zur unmittelbaren Gestaltung des Unterrichts, sondern wenden sich an den Physiker, der eine bestimmte Art des Vorgehens im Physikunterricht gewöhnt ist, und versuchen, Fragen zu beantworten, die erfahrungsgemäß als Folge der Abweichung des vorgestellten Unterrichtsgangs vom gewohnten auftreten.

Das Problem der Kennzeichnung von Energieformen, diskutiert am Beispiel der Energieform „Wärme“

Die Aufgabe, eine Energieform, etwa die Energieform Wärme, zu kennzeichnen, ruft zunächst zwei Gesichtspunkte in Erinnerung. Jede Einteilung von strömender Energie geschieht danach, welche an-

dere physikalische Größe jeweils mit der Energie strömt. Zum zweiten besteht die grundlegende Beobachtung bei Energieänderungen eines Systems darin, daß mit der Energie stets mindestens eine weitere Größe des Systems ihren Wert ändert. Im allgemeinen ändern sich sogar mehrere Größen gleichzeitig. Die Frage nach der Kennzeichnung von Energie, die auf ein System übertragen wird, legt somit die Idee nahe, die Form, in der die Energieübertragung geschieht, dadurch zu kennzeichnen, daß man nach Größen des Systems sucht, die sich bei der betreffenden Übertragung mit der Energie des Systems ändern. Tun das mehrere Größen, so wählt man zunächst einfach eine von ihnen aus, etwa diejenige, die sich am leichtesten messen läßt. Die Beobachtung, daß sich bei der Zufuhr von Energie an Wasser mittels eines Tauchsieders oder einer Flamme die Temperatur des Wassers ändert, legt es somit nahe, die zugeführte Energiemenge ΔE in der Form (1) zu schreiben. Der nächstliegende Gedanke scheint daher, die Energieform „Wärme“ wäre durch eine Gleichung der Gestalt (1) gekennzeichnet. Daß das aber nicht generell richtig sein kann, zeigt die in Abb. 5 dargestellte weitere Beobachtung, daß die Energiezufuhr bei Einsetzen des Verdampfungsvorgangs nicht mehr mit einer Temperaturzunahme des Wassers verbunden ist, sondern mit einer Abnahme ΔN_{fl} der Menge des flüssigen Wassers bzw. einer Zunahme $\Delta N_{Dampf} = -\Delta N_{fl}$ der Menge des Dampfes. In diesem Temperaturbereich ist also (1) nicht mehr anwendbar. Statt dessen wird man die zugeführte Energie nun schreiben

$$\Delta E = L \Delta N_{Dampf} \quad (3)$$

Der Proportionalitätsfaktor L , die Verdampfungswärme pro Menge N_{Dampf} der Substanz, hat von Stoff zu Stoff einen anderen Wert. Für Wasser ließe sich L mit den üblichen Schulversuchen experimentell bestimmen.

Die Gln. (1) und (3) zeigen, daß Energiemengen, die durch *dieselbe* Art der Energiezufuhr übertragen werden, nämlich mittels eines Tauchsieders oder einer Flamme, in verschiedenen Zustandsbereichen durch die Änderungen ganz verschiedener physikalischer Größen beschrieben werden, nämlich einmal durch die Änderung der Temperatur und zum anderen durch die Änderung der Menge des Dampfes. Die Idee, strömende Energie als eine bestimmte Form zu kennzeichnen, beruht aber darauf, daß *eine bestimmte* Größe mit der Energie strömt. Eine bestimmte Art der Energiezufuhr, etwa die mittels einer Flamme, sollte also unabhängig davon, bei welcher Temperatur das geschieht und aus welchem Stoff der Körper besteht, dem

die Energie zugeführt wird, durch die Zufuhr und damit die Änderung einer ganz bestimmten physikalischen Größe des Systems beschrieben werden. Als eine derartige Größe eignet sich, wie unsere Überlegungen zeigen, weder die Temperatur, noch die Menge des Stoffs. Die *Energieform* „Wärme“ wird daher weder durch (1) noch durch (3) beschrieben. Die physikalische Größe, die das Gewünschte leistet, sollte strömen können, sie sollte also mengenartig sein und immer und überall dort auftreten, wo Energie in Form von Wärme übertragen wird. Diese Größe ändert an einem Körper ihren Wert immer dann, wenn dem Körper Energie in Form von Wärme zugeführt wird. Wie in den folgenden Aufsätzen gezeigt wird, ist die gesuchte Größe die Entropie S . Die Energieform „Wärme“ wird demgemäß durch $T\Delta S$ gekennzeichnet.

Die vorstehenden Betrachtungen machen deutlich, daß die Festlegung von Standard-Energieformen an die Auswahl bestimmter standardisierter physikalischer Größen gebunden ist, deren Änderung an einem System genau anzeigt, wann das System Energie in einer ganz bestimmten Form austauscht. Diese Größen zu finden, ist, wie das Beispiel der Wärme zeigt, meist nicht einfach. Als brauchbare Anweisung befolgt man zweckmäßigerweise die Regel, Größen zu suchen, die *mengenartig* sind, die ein physikalisches System also aufnehmen und abgeben kann und die es enthält so wie es Energie aufnimmt, abgibt und enthält.

Verschiebungsenergie und Kraft

Vom herkömmlichen Unterrichtsgang aus gesehen, wird es manchem „unnatürlich“ erscheinen, den Proportionalitätsfaktor g in (2) aus der Messung von Energien ΔE , Höhen, also Längen h und Massen Δm zu gewinnen; handelt es sich bei g doch um die „Erdbeschleunigung“ $g=9,8 \text{ Ws}/(\text{m kg})=9,8 \text{ m/s}^2$, die traditionell in die Kinematik des freien Falls gehört. Überhaupt wird man längst Begriffe wie Weg (Verschiebung), Geschwindigkeit, Beschleunigung, Kraft erwartet haben, und man mag sich des Eindrucks nicht immer erwehren können, als würden diese Begriffe hier mit Sorgfalt vermieden.

Die Beziehung, die man im Zusammenhang mit der Energie gewohntermaßen erwartet, ist

$$\Delta E = F\Delta s. \quad (4)$$

Sie drückt die auf einen Körper übertragene Energie ΔE durch die auf den Körper wirkende Kraft F und den Weg Δs aus, den der Körper zurücklegt,

oder wie wir sagen, die Verschiebung, die er erfährt. Demgemäß wird $F\Delta s$ auch *Verschiebungsenergie* genannt. Daß F und Δs Vektoren im 3-dimensionalen Raum sind, kann hier außer Betracht bleiben, denn die folgenden Überlegungen werden nicht davon berührt, ob F und Δs 3- oder 1-dimensionale Vektoren sind.

Zunächst zeigt schon die verbale Formulierung von (4) einen Unterschied zu den bisherigen Gln. (1) bis (3). In diesen traten vornehmlich Größen auf, die dem Körper, um dessen Energieaufnahme oder Energieabgabe es geht, selbst zugeordnet sind: Seine Masse m bzw. Δm , seine Temperatur T bzw. ΔT , seine Menge N bzw. ΔN sowie die ihm ebenfalls zugeordneten Proportionalitätsfaktoren c und L . Lediglich die Höhe h und der Faktor g in (2) machen eine Ausnahme, denn h drückt nicht eine Eigenschaft des Körpers aus, sondern eine Beziehung zwischen Körper und Erde. In (4) ist F die „auf den Körper wirkende oder ausgeübte“ Kraft. Sie ist keine Eigenschaft des Körpers, sondern die Wirkung eines anderen Objekts auf den Körper, wobei es aber nicht darauf ankommt, um welches andere Objekt es sich handelt. Von dem anderen Objekt bleibt in dieser Beschreibung sozusagen nur die Kraft übrig, die es auf den betrachteten Körper ausübt. Bei der Größe Δs handelt es sich, ähnlich wie bei h , nicht um eine dem Körper allein zugeordnete Größe, sondern um eine Beziehung zwischen dem Körper und einem anderen Objekt, etwa der Erde oder allgemein einem „Bezugssystem“.

Betrachten wir ein paar für die herkömmliche Verwendung des Kraftbegriffs typische Beispiele: (a) Ein Körper fällt frei, (b) ein Körper liegt auf einem Tisch, (c) ein Körper wird durch eine Winde gleichförmig gehoben oder gesenkt, (d) ein Körper wird von einem Menschen auf einer rauhen Unterlage mit konstanter Geschwindigkeit gezogen (Abb. 9).

Wie stellt man die jeweils auf den Körper wirkende Kraft F fest? Wie sich eine Kraft äußert, sagt das grundlegende 2. Axiom der Newtonschen Mechanik: Es ist $F=ma$, wenn m die Masse des bewegten Körpers bezeichnet und a seine Beschleunigung. Im Fall (a) ist die Kraft, wie die Beschleunigung des Körpers im freien Fall zeigt, gleich mg , wobei g die beim freien Fall beobachtete Beschleunigung ist ($g=9,8 \text{ m/s}^2$). Im Fall (b) ist $F=0$, denn der Körper ruht, so daß $a=0$. Auch in (c) ist $F=0$, wenn der Körper gleichförmig ($a=0$) bewegt wird, und dasselbe gilt für (d). Nach (4) würde man somit schließen, daß nur im Fall (a) Energie auf den Körper übertragen wird, dagegen weder in (b), noch in (c) noch in (d). Jeder Leser wird sich hier irritiert

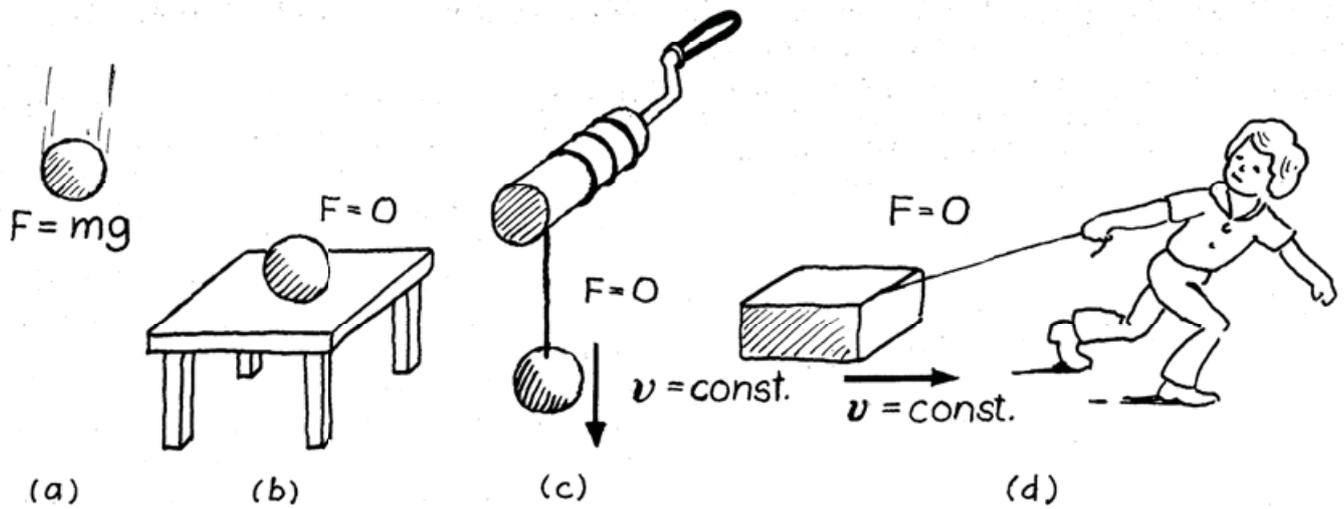


Abb. 9 Zur Frage des Begriffs „Kraft“ bei einfachen Anordnungen

fühlen, denn er weiß, daß in den Fällen (c) und (d) auf den Körper Energie übertragen wird. Handelt es sich um einen Trick, oder ist etwas im Begriffssystem nicht in Ordnung? Tatsächlich erhält unter alleiniger Anwendung der Newtonschen Axiome der Körper nicht nur im Fall (b), sondern auch in (c) und (d) keine Energie. Auch wenn im Fall (d) die Unterlage wie auch der Körper warm werden, bekommt im Sinn der Newtonschen Mechanik der Körper keine Energie; denn die einzigen Größen, die die Newtonsche Mechanik kennt, um den Körper und seine Prozesse zu beschreiben, nämlich Masse, Geschwindigkeit, Beschleunigung, erfahren keine Änderung.

Welche „Kraft“ F ist dann aber in (4) einzusetzen, wenn man z.B. den Energiebetrag ΔE bestimmen will, der pro Zeitintervall zur Aufrechterhaltung einer gleichförmig reibenden Bewegung wie in Abb. 9 aufzuwenden ist? Ganz sicher ist es *nicht* die nach dem 2. Axiom der Newtonschen Mechanik erklärte Kraft, denn die ist ja Null.

Tatsächlich zerlegt man gewohnheitsmäßig diese Kraft vom Betrag Null in zwei entgegengesetzt gleiche Kräfte, genannt Zugkraft und Reibungskraft (Abb. 10). Ist diese Kräftezerlegung überhaupt eindeutig?

Schließlich läßt sich die Null auf beliebig viele Weisen als Summe einer positiven und einer negativen Zahl darstellen. Durch welche Überlegung erreicht man eine Eindeutigkeit der Zerlegung? Das Vorbild hierfür ist eine Argumentation, die wir am Beispiel der Abb. 9b erläutern. Zwar wird nach den Axiomen der Newtonschen Mechanik keine Kraft auf den Körper ausgeübt, wenn er nicht beschleunigt bewegt wird, aber nach der Newtonschen Gravitationstheorie übt die Erde auch auf den ruhenden Körper eine Kraft aus und zwar dieselbe Kraft, die im freien Fall der Abb. 9a aus dem 2. Newtonschen Axiom bestimmt wird. Wenn der Körper trotz der Kraftausübung durch die Erde nicht beschleunigt wird, muß diese Kraft kompensiert werden durch eine entgegengesetzte Kraft, die durch den Tisch ausgeübt wird. Eine entsprechende Argumentation ist auch in Abb. 9d möglich. Eine zwischen Körper und Zugseil gespannte Feder dient dazu, durch ihre Längenänderung die hier „wirkende Kraft“ zu demonstrieren, die ebenfalls nicht zur Beschleunigung führt. Auch hier ist festzuhalten, daß diese Art Kraft *nicht* aus den Axiomen der Newtonschen Mechanik gefolgert werden kann, sondern aus zusätzlichen Überlegungen, die im wesentlichen der Argumentation der Newtonschen Gravitationstheorie äquivalent sind. Man verweise hier auch nicht auf das 3. Newtonsche Axiom, wonach $actio = reactio$, denn dieses Axiom bezieht sich auf die gegenseitige Kraftausübung zweier Körper aufeinander.

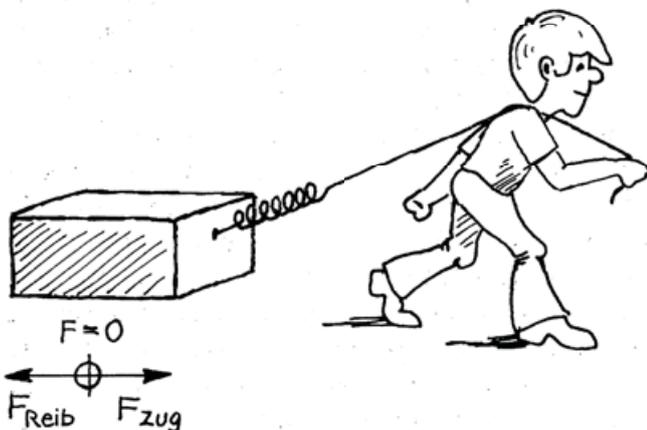


Abb. 10 Zerlegung der Kraft Null in die entgegengesetzten Kräfte „Zugkraft“ und „Reibungskraft“

Im Fall der Abb. 10 und Abb. 9d bekommt der Körper also über das Seil den Energiebetrag $F_{\text{Zug}} \Delta s$, und er gibt den Betrag $F_{\text{Reib}} \Delta s = -F_{\text{Zug}} \Delta s$ ab, zum Teil an die Unterlage, zum Teil an sich selbst. Wie beweist man nun, daß diese ganze Überlegung stimmt? Eine Antwort gibt Abb. 11.

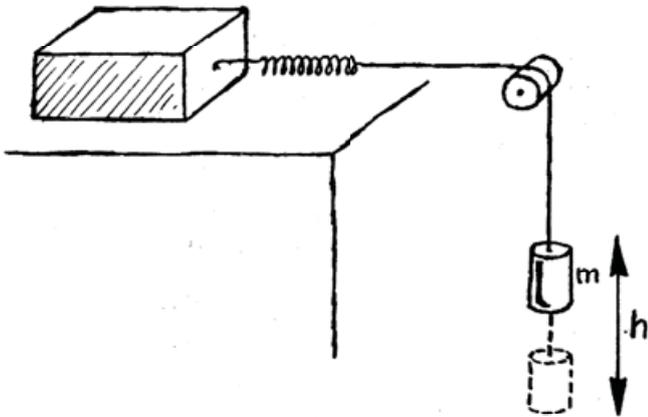


Abb. 11 Bestimmung der zum Ziehen eines Körpers aufzuwendenden Energie aus einer einfachen Bilanz

Mit dieser Abbildung erhält man das Resultat ohne all die Komplikationen des Kraftbegriffs der Newtonschen Mechanik, denn die von dem im Schwerfeld sinkenden Körper der Masse m abgegebene Energie ist $\Delta E = gh m$. Dieser Energiebetrag wird auf den gezogenen Körper übertragen. Da h der Weg oder die Verschiebung Δs ist, die der gezogene Körper dabei erfährt, kann man schreiben

$$\Delta E = (mg) \Delta s. \quad (5)$$

Damit hat man die Beziehung (4) für den Fall der Verschiebung eines Körpers im Schwerfeld der Erde.

Die nach (5) als Quotient $\Delta E / \Delta s$ auftretende Zugkraft $mg = F_{\text{Zug}}$ läßt sich „sichtbar“ machen in der Verlängerung einer Feder, die zwischen dem gezogenen Körper und dem ziehenden Seil eingespannt ist. Daß auch das Spannen der Feder Energie kostet, läßt sich dadurch zeigen, daß man den Körper mit Gewalt an der Bewegung hindert. Auch diese Energie kann man auf dem zuletzt angegebenen Weg quantitativ bestimmen (s. *Falk-Ruppel: Mechanik – Relativität – Gravitation*, §7).

Wir brechen hier die Diskussion ab. Die angegebenen Überlegungen dürften hinreichend klar gemacht haben, daß wir den herkömmlichen Weg, die Energie über die Kraft in der Newtonschen Mechanik einzuführen, für logisch viel zu verwickelt und schwierig halten, als daß man ihn mit gutem Gewissen im Physik-Unterricht der Schule beschreiten könnte.

Der Energieaustausch eines frei fallenden Körpers

Wir betonen, daß die im 1. und 2. Abschnitt dargestellte Einführung des Energiebegriffs *nicht* auf der Annahme beruht, daß dem Schüler die Kinematik der Newtonschen Mechanik bekannt ist. So tritt $g = 10 \text{ Ws/m kg}$ hier als eine Größe auf, die die Erde, genauer das Schwerfeld der Erde kennzeichnet, und nicht als Erdbeschleunigung. Obwohl der direkte und zweckmäßigste Weg zum Begriff der Energie und ihrer vielseitigen Anwendungen sicher nicht über die Kinematik führt, wollen wir doch auseinandersetzen, wie sich kinematische Überlegungen und damit auch die Deutung von g als Beschleunigung in den Unterrichtsgang einfügen ließen. Dabei läßt sich allerdings nicht übersehen, daß die Anforderungen an das Abstraktionsvermögen des Schülers erheblich in die Höhe schnellen.

Daß das Heben und Senken eines Körpers im Schwerfeld der Erde Energie kostet bzw. liefert, ist eine sehr elementare, unmittelbare Erfahrung. Dabei ist allerdings stets vorausgesetzt, daß der Körper am Anfang und Ende eines derartigen Prozesses zur Ruhe kommt. Ganz anders ist die Situation, wenn der Körper frei fällt. Das Wort „frei“ bedeutet dabei, daß es kein System gibt, an das der Körper beim Fallen Energie abgeben kann. Die mit einer Höhenabnahme Δs verknüpfte Energiedifferenz (4) muß der Körper nun selbst übernehmen. Das äußert sich darin, daß der Körper seine Geschwindigkeit v ändert. Man sagt gewöhnlich, der Körper nimmt die Energie auf, die durch seine Höhenänderung beim Fallen „frei“ wird. Hat der Körper diese Energie nicht schon vor dem Fallen gehabt, war sie beim Heben in die Anfangslage, aus der der Fall beginnt, nicht auf den Körper übertragen worden? Gewohnte Redewendungen wie die „potentielle Energie des Körpers“ führen zu dieser Vorstellung. Die überraschende Antwort auf unsere Frage ist jedoch „nein“. Die zum Heben eines Körpers aufzuwendende Energie erhält nämlich nicht der Körper, sondern das System „Körper + Erde“. Das erkennt man daran, daß sich dabei keine Größe des Körpers ändert, sondern nur die Größe Δs , die keine Größe des Körpers ist, sondern des Systems „Körper + Erde“, nämlich der Abstand zwischen Körper und Erdoberfläche. Auch die Ausdrücke (2) und (4) zeigen im Auftreten der Faktoren m und g , von denen der erste den Beitrag des Körpers und der zweite den Beitrag der Erde wiedergibt, daß das System, das hier die Energie erhält, nicht der Körper allein sein kann. Erst beim Vorgang des Fallens geht die Energie auf den Körper allein über. Das ist darin zu erkennen, daß

v ist doch aber auch abhängig vom Koordinatensystem

sich nun eine Größe des Körpers ändert, nämlich seine Geschwindigkeit v . Wir sagen, die Energie wird dabei in Form von *Bewegungsenergie* auf den Körper übertragen.

Wie von *F. Herrmann* im vorausgegangenen Aufsatz gezeigt wurde, hat Bewegungsenergie die Gestalt $v\Delta P$, wobei ΔP die Impulsänderung ist, die der Körper bei der Übertragung von Energie in Form von Bewegungsenergie erfährt. Beim Fallen um die Strecke Δs besteht zwischen der Abgabe von Verschiebungsenergie $mg\Delta s$ des Systems „Körper+Erde“ und der Aufnahme von Bewegungsenergie $v\Delta P$ durch den Körper die Beziehung

$$mg\Delta s = v\Delta P. \quad (6)$$

Kennt man den Zusammenhang $P = mv$ zwischen Impuls P , Masse m und Geschwindigkeit v eines Körpers, so läßt sich die letzte Gleichung umformen in

$$mg\Delta s = v\Delta(mv) = mv\Delta v. \quad (7)$$

Man erkennt, daß die Masse m herausfällt. Da außerdem $v = \Delta s / \Delta t$ ist, liefert Division von (7) durch Δt die gewünschte Beziehung

$$g = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \text{Beschleunigung beim freien Fall.} \quad (8)$$

Physikalisch von besonderer Wichtigkeit ist das Herausfallen des Faktors m aus der Energiebilanz (7). Das bedeutet, daß der Vorgang des freien Falls im Schwerfeld unabhängig ist von der Masse des fallenden Körpers. Alle Körper fallen also, wenn sie frei fallen, gleich schnell. Der Grund ist, daß beide beteiligten Energieformen denselben Faktor m , die Masse des Körpers, enthalten. Es ist unmittelbar einzusehen, daß die Abgabe von Energie an

irgendein weiteres System, wie die Energieabgabe an die reibende Luft, diese Unabhängigkeit des Fallvorgangs von der Masse zerstört.

Zusammenfassend führen die vorstehenden Überlegungen zu folgendem Urteil. Obwohl der hier skizzierte Weg der Einbeziehung der Kinematik des freien Falls in die Regeln von Energieaustausch und Energiebilanz nicht der einzig mögliche ist, bedeutet die Einbeziehung in jedem Fall eine wesentliche Komplizierung. Man muß sich deshalb fragen, unter welchen Umständen dieser Mehraufwand gerechtfertigt ist. Geht es dem Unterricht primär darum, die kultur- und wissenschaftshistorische Rolle der Analyse des Fallproblems durch *Galilei* zu vermitteln, die ja zweifellos zu den Paradebeispielen naturwissenschaftlichen Denkens gehört, ist gegen die Behandlung des freien Falls nicht das mindeste einzuwenden. Im Gegenteil, man wird sich schwer tun, ein besseres Beispiel zu finden. Allerdings bedeutet das weit mehr, als lediglich die Formeln $s = gt^2/2$ und $v = gt$ anzustreben! Geht es jedoch primär um die zentralen Begriffe der *heutigen* Physik, so stehen die Regeln von Energieaustausch und Energiebilanz im Vordergrund. Ihre Wichtigkeit auf der einen und ihre Einfachheit auf der anderen Seite reichen sich dabei in geradezu idealer Weise die Hand. Die Kinematik des freien Falls muß dann aber in ihrer Bedeutung zurücktreten; weder sind ihre Begriffe so fundamental noch ihre Anwendungen vergleichbar mit denen der Energie. Hat man also nicht genügend Zeit, um beide Gesichtspunkte der Physik, nämlich ihre Kulturgeschichte auf der einen und ihre heutige Struktur auf der anderen Seite zu behandeln, muß man bekennen, was man im Augenblick für „wichtiger“ hält. Hier haben wir uns für den zweiten Gesichtspunkt entschieden.

Entropie in der Schule

Einleitung

Die meisten Physik-Lehrer sind sich heute darüber einig, daß die Energie im Physikunterricht eine zentrale Rolle spielen soll, und zwar nicht nur wegen der großen Tragfähigkeit des Energiebegriffs im Gedankengebäude der Physik, sondern auch wegen seiner Wichtigkeit für das Verständnis unserer modernen Welt.

Ein Schüler, der in der Schule gut aufgepaßt hat als die Energie dran war, der also insbesondere den Energiesatz kennt, kann aber trotzdem wichtige mit der Energie zusammenhängende Probleme der modernen Welt nicht verstehen, wenigstens dann nicht, wenn er etwas nachdenkt.

Er weiß einerseits aus der Zeitung, daß Energie „knapp“ ist. Andererseits hat er im Unterricht gelernt, daß Energie weder erzeugt noch vernichtet werden kann, und daß alle Dinge um uns herum sehr viel Energie enthalten. Ist das nicht ein Widerspruch? Kann man sich nicht Energie dadurch beschaffen, daß man z.B. das Meerwasser abkühlt? Das scheint wohl nicht zu gehen. Oder doch? Ebenfalls in der Zeitung kann man nämlich manchmal lesen, daß dieses oder jenes Schwimmbad geheizt wird und die Energie dazu mit einer Wärmepumpe einem vorbeifließenden Bach entnommen wird. Warum macht man das nicht immer so, wenn es so einfach ist? Warum gibt es das Problem der Abwärme bei Kraftwerken?

Solche Fragen muß sich der Schüler stellen, der zwar gelernt hat, was Energie ist, aber die Entropie und ihre wichtigsten Eigenschaften nicht kennt. Formuliert man die Überschrift dieses Artikels als Frage „Entropie in der Schule?“, so ist deshalb unsere Antwort darauf ganz klar: „ja“.

Man könnte einwenden, die Einführung der Entropie in der Schule sei zwar wünschenswert, aber zu schwierig. In dem vorliegenden Artikel und in dem folgenden von *G. Falk* soll gezeigt werden, daß dies nicht der Fall ist. Die Entropie ist zwar ein schwieriger Begriff, aber sie ist nicht schwieriger als andere physikalische Größen, die im Physikunterricht der Schule behandelt werden, wie etwa die Kraft, der Impuls oder neuerdings sogar die ψ -Funktion. Die Entropie hat eine Eigenschaft, die uns sogar berechtigt, sie zu den leichter verständlichen Größen zu zählen, nämlich ihre Mengentartigkeit.

Der erste der beiden Aufsätze über die Entropie ist elementarer als der zweite, aber dafür an einigen Stellen weniger konsequent in der Logik. Beiden Vorschlägen ist gemeinsam, daß sie auf die statistische Deutung der Entropie verzichten.

1. Warum viele Physiker eine Aversion gegen die Entropie haben

Woher kommt es, daß die Entropie in dem Ruf steht, so schwierig zu sein? Es ist nützlich, die Gründe dafür zu analysieren. Einmal kann man hoffen, diese Antipathie etwas abzubauen, genauso wie der Psychoanalytiker einen Patienten zu heilen hofft, indem er ihm die Ursachen seiner Krankheit darlegt. Zum anderen werden wir daraus didaktische Entscheidungen ableiten.

Einer der Gründe für die Schwierigkeiten, die fast jeder Physiker mit der Entropie hat, ist, daß er weiß, daß Entropie ein Maß für Unordnung ist. *Wagenschein* würde in diesem Zusammenhang von

„verdunkelndem Wissen“ sprechen. Die statistische Deutung der Entropie wurde von Boltzmann gegeben, und zwar eine beträchtliche Zeit nachdem die Entropie von *Carnot* und *Clausius* eingeführt worden war. Die Situation war also ähnlich wie bei der Temperatur: Auch die Temperatur war längst ein vertrauter Begriff als man sie als ein Maß für die kinetische Energie der Moleküle eines Gases deutete.

Die statistische Deutung der Entropie führt zu Schwierigkeiten, wenn man sie heranziehen will, die fundamentalen Eigenschaften dieser Größe zu begreifen. Zum Beispiel ist nicht leicht zu verstehen, warum „Unordnung“ bei bestimmten, nämlich den reversiblen Prozessen erhalten bleibt, daß sich also das Ausmaß der Unordnung nicht ändert.

Daß das Verständnis der Details nicht immer hilft, das Gesamte, Komplexe zu verstehen, wissen wir aus anderen Bereichen der Physik sehr gut. Die Beherrschung der Elementarteilchenphysik hilft uns in der Festkörperphysik nicht viel weiter, obwohl doch alle Festkörper aus Elementarteilchen aufgebaut sind. Ebenso verstehen wir die Natur der elektrischen Ladung deshalb nicht besser, weil wir wissen, daß jede Ladung aus kleinen Elementarladungen besteht. Im vorliegenden Unterrichtsvorschlag für die Sekundarstufe II wird deshalb auf die statistische Deutung der Entropie verzichtet. Es ist wahrscheinlich sogar zweckmäßig, die Entropie im Schulunterricht vor der kinetischen Gastheorie zu behandeln.

Es gibt mindestens noch einen anderen Grund für den schlechten Ruf der Entropie. Die Entropie ist zwar eine mengenartige Größe, wie Ladung oder Masse, genügt aber nicht, wie diese beiden Größen, einem Erhaltungssatz, sondern nur einem „halben“ Erhaltungssatz: Sie kann nicht verlorengehen, aber sie kann erzeugt werden. Diese unangenehme Eigenschaft läßt sich nicht aus der Welt schaffen. Man kann aber im Unterricht diejenigen Prozesse, bei denen sie erhalten bleibt, stärker in den Vordergrund stellen als es gewöhnlich getan wird. Viele wichtige Prozesse sind ja praktisch reversibel, in vielen wichtigen Maschinen bleibt die Entropie so gut wie erhalten. Das sind nicht nur solche Maschinen, die unendlich sanft und langsam laufen, sondern auch solche, die Lärm machen und sich mit 10000 Umdrehungen pro Minute drehen. So ein Vorgehen, d.h. die Beschränkung auf eine bestimmte Art von Prozessen, ist übrigens für den Physikunterricht nicht ungewöhnlich: Wir sprechen über die Energieerhaltung in der Mechanik, aber der Energiesatz gilt nicht, wenn man sich auf die Mechanik beschränkt. Wir sagen eben dazu, daß wir bestimmte Prozesse ausschließen müssen.

2. Das Konzept der Unterrichtseinheit

Dem Unterrichtsvorschlag liegt eine Analogie zugrunde, die *Carnot* in seiner klassischen Abhandlung „Réflexions sur la puissance motrice du feu“ beschreibt: Die Energieform „Wärme“ wird mit der Gravitationsenergie verglichen. Zu diesem Zweck wird als zentrales Problem die Frage nach der Funktionsweise eines Dampfkraftwerks gestellt. Der Energiewandler Dampfkraftwerk wird während der ganzen Unterrichtseinheit mit dem Energiewandler Wasserkraftwerk verglichen. Den

zunächst schwierigen Größen Entropie S , Temperatur T und Wärme $T\Delta S$ entsprechen dabei die vertrauten Größen Masse m , Höhe h und Gravitationsenergie $gh\Delta m$. Es wird aber nicht die detaillierte Funktionsweise der beiden Kraftwerke untersucht, sondern es wird nur nach Bilanzen gefragt, also: Was fließt hinein? Was fließt heraus? Damit diese Fragen eindeutig beantwortet werden können, muß sich der Lehrer genau im klaren darüber sein, an welche Stelle er die Grenzen der Energiewandler legt, denn Kraftwerke stellen ja eine Reihe von hintereinander geschalteten Wandlern dar. Es muß also klar sein, welche Wandler in die Betrachtungen einbezogen werden. Es empfiehlt sich, die Grenzen wie folgt zu legen:

Der Eingang des Dampfkraftwerks liegt so, daß die hineinfließende Energieform Wärme $T\Delta S$ ist. Die Grenze ist also die Wand des Wasserkessels. (Wäre das Fabriktor die Grenze, so wäre die hineinfließende Energie chemische Energie.)

Der Eingang des Wasserkraftwerks ist das Ende der Leitung, das auf der Höhe des Stausees liegt. Die hineinfließende Energie ist also Gravitationsenergie $gh\Delta m$ (h =Höhe, g =Erdbeschleunigung, m =Masse). Der Ausgang beider Kraftwerke liegt hinter dem Generator, so daß die herausfließende Energie elektrische Energie $U\Delta Q$ ist (U =Spannung, Q =elektrische Ladung). Befände sich die Grenze gleich hinter der Dampf- bzw. Wasserturbine, so läge die herausfließende Energie in der Form $\omega\Delta L$ vor (ω =Winkelgeschwindigkeit, L =Drehimpuls). Der Ausdruck $\Delta E = \omega\Delta L$ läßt sich zwar mit den Schülern erarbeiten, aber das würde zusätzliche Zeit kosten. Außerdem besitzt er nicht dasselbe Maß an Vertrautheit wie der Ausdruck $\Delta E = U\Delta Q$, den die Schüler bereits von der Mittelstufe her kennen.

3. Der Ablauf des Unterrichts

Im Verlauf des Unterrichts soll die Tabelle 1 aufgestellt werden. Ausgehend von den in Abschnitt 1 aufgeworfenen Fragen („Warum gibt es eine Energiekrise?“ usw.) wird man zu folgendem Problem gelangen: Wie funktioniert ein Dampfkraftwerk? Wie sind die Bilanzen der hinein- und herausfließenden Ströme? Da Mengen anschaulicher sind als Ströme, wird man die Bilanzen für ein festes Zeitintervall aufstellen, also die Mengen ΔE , Δm usw. betrachten und nicht die Ströme $\frac{dE}{dt}$, $\frac{dm}{dt}$ usw.

Das Wasserkraftwerk

Man beginnt damit, das Diagramm links oben in der Tabelle aufzustellen. Der Kasten stellt das Kraftwerk dar. In das Kraftwerk hinein fließt die Gravitationsenergie $gh\Delta m$. Wir haben dabei den Nullpunkt der Höhe an eine ausgezeichnete Stelle gelegt: auf das Niveau der Turbine. Das muß man nicht. Man wird die Analogie zum Wärmekraftwerk besser sehen, wenn man den Nullpunkt von h an eine andere, beliebige Stelle legt, so daß der Stausee auf der Höhe h_2 , die Turbine auf der Höhe h_1 liegt. Dann ist die hineinfließende Gravitationsenergie $g(h_2 - h_1)\Delta m$. Man sieht, daß man sie formal in zwei Teile aufspalten kann: In die hineinfließende Energie $gh_2\Delta m$ und die herausfließende

$gh_1\Delta m$. Der Differenzbetrag $g(h_2 - h_1)\Delta m$ wird im Kraftwerk in elektrische Energie umgewandelt. Die herausfließende Energie $gh_1\Delta m$ ist nicht mehr nutzbar, da sich das Wasser, das sie transportiert, auf Normalniveau befindet. Man könnte sie aber nutzen, wenn man ein Loch fände, in das man das Wasser über ein Wasserrad hineinlaufen läßt.

Aus dem Kraftwerk heraus fließt außerdem die elektrische Energie $U\Delta Q = (\varphi_2 - \varphi_1)\Delta Q$. Wir können auch diese formal in zwei Anteile zerlegen: Die hineinfließende Energie $\varphi_1\Delta Q$ und die herausfließende $\varphi_2\Delta Q$. (Durch einen größeren Index wird in diesem Artikel immer auf einen höheren Wert der Variable hingewiesen.) Außerdem fließt in das Kraftwerk hinein und aus ihm heraus die Masse Δm und die elektrische Ladung ΔQ .

Tabelle 1 Vergleich von Wasser- und Wärmekraftwerk

Wasserkraftwerk		Wärmekraftwerk	
hinein	heraus	hinein	heraus
Gravitationsenergie $g(h_2 - h_1)\Delta m$ Wasser Δm elektrische Ladung ΔQ	elektrische Energie $(\varphi_2 - \varphi_1)\Delta Q$ Wasser Δm elektrische Ladung ΔQ	Wärme $(T_2 - T_1)\Delta S$ Entropie ΔS elektrische Ladung ΔQ	elektrische Energie $(\varphi_2 - \varphi_1)\Delta Q$ Entropie ΔS elektrische Ladung ΔQ
$g(h_2 - h_1)\Delta m = (\varphi_2 - \varphi_1)\Delta Q$ Die Wassermasse Δm fließt vom hohen Niveau h_2 auf das tiefe Niveau h_1 . Dabei wird die Energie $g(h_2 - h_1)\Delta m$ in elektrische Energie verwandelt.		$(T_2 - T_1)\Delta S = (\varphi_2 - \varphi_1)\Delta Q$ Die Entropie ΔS fließt von der hohen Temperatur T_2 auf die tiefe Temperatur T_1 . Dabei wird die Energie $(T_2 - T_1)\Delta S$ in elektrische Energie verwandelt.	
Wasserfall		Freie Expansion des Dampfes	
$S_e = \text{erzeugte Entropie}$ $g(h_2 - h_1)\Delta m = T\Delta S_e$ $\Delta S_e = \frac{g(h_2 - h_1)}{T}\Delta m$		$S_e = \text{erzeugte Entropie}$ $S_h = \text{hineinströmende Entropie}$ $(T_2 - T_1)\Delta S_h = T_1\Delta S_e$ $\Delta S_e = \frac{T_2 - T_1}{T_1}\Delta S_h$	

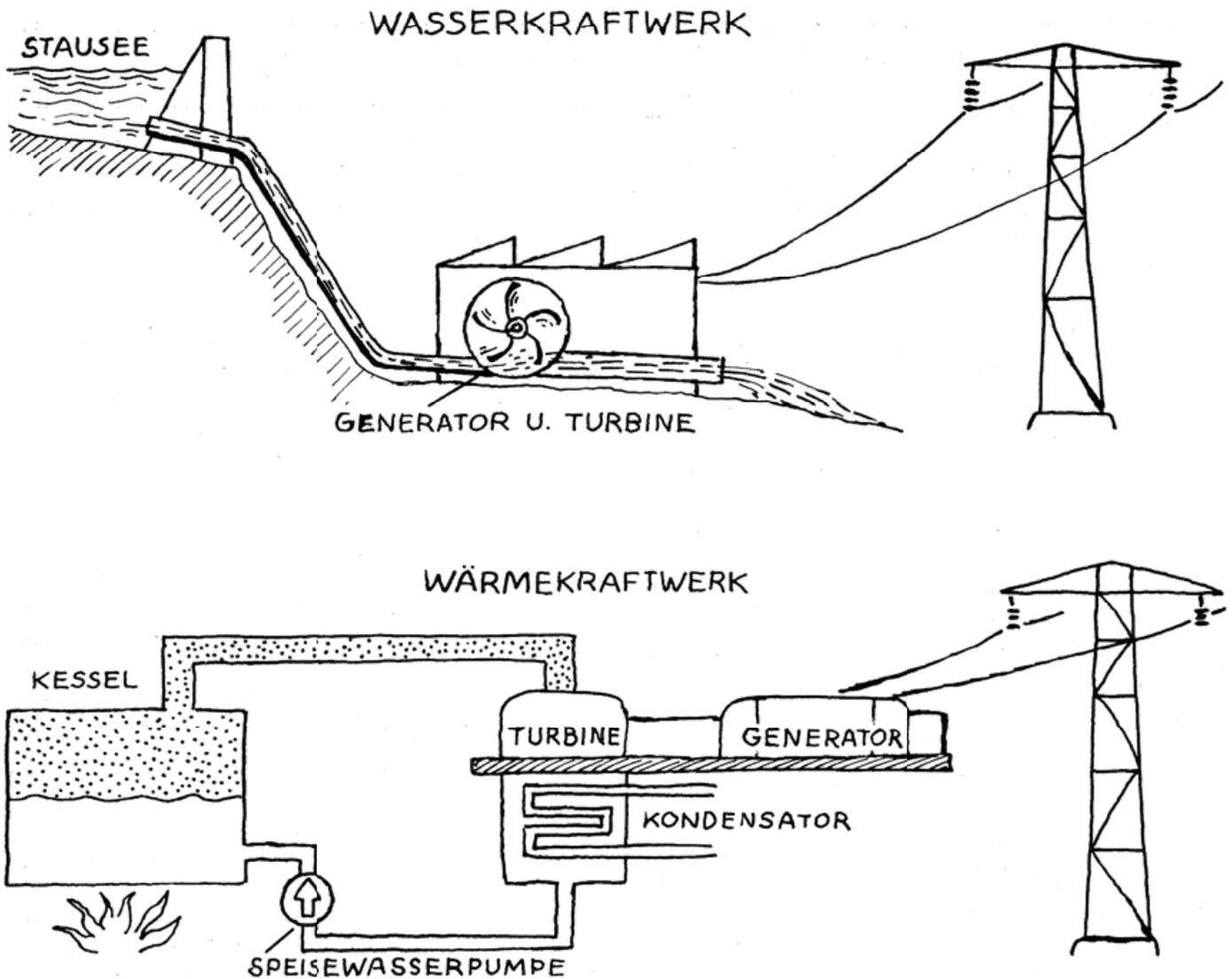


Abb. 1 Schematische Darstellung eines Wasser- und eines Wärmekraftwerks

Das Wärmekraftwerk

Wir versuchen nun, analoge Bilanzen für das Dampfkraftwerk aufzustellen. Für die folgenden Überlegungen ist es belanglos, was für eine Wärmekraftmaschine man betrachtet. Sie gelten für eine Dampfturbine genauso wie für eine Kolbendampfmaschine oder für einen Stirling-Motor.

Man wird zunächst ein Wärmekraftwerk an der Tafel skizzieren (Abb. 1) und dabei den Kondensator zunächst weglassen. Man versucht dann, die rechte Seite der Tabelle 1 aufzustellen. Das Kraftwerk ist wieder ein Kasten. Die hereinfließende Energie ist Wärme. Dafür wird vorläufig noch kein Symbol benutzt. Die herausfließende Energie ist, wie beim Wasserkraftwerk, elektrische Energie $(\varphi_2 - \varphi_1)\Delta Q$. Außerdem fließt hinein und heraus die elektrische Ladung ΔQ .

Vergleich der beiden Kraftwerke

Zwischen Wasserkraftwerk und Wärmekraftwerk scheint es einen grundsätzlichen Unterschied zu geben. Während beim Wasserkraftwerk die hereinfließende Energie von etwas begleitet ist, das wieder herausfließen muß, nämlich dem Wasser der Masse Δm , haben wir beim Wärmekraftwerk auf der linken Seite des Kastens nur einen Energiestrom, den Wärmestrom, und dieser verschwindet zu hundert Prozent im Kraftwerk. Dieser Unterschied ist unbefriedigend und sollte die Schüler zu etwas sorgfältigerer Überlegung anregen. Beim Zeichnen des Kraftwerks wurde etwas weggelassen, das wir bisher für nicht besonders wesentlich hielten: Der Kondensator, d.h. der Ausgang für die Abwärme. Man vermutet, daß dieser Ausgang beim Wärmekraftwerk dieselbe Rolle spielt wie der Wasserausgang beim Wasserkraftwerk. Aus dem Wärme-

kraftwerk kommt am Kondensator Wärme heraus, die man nicht mehr nutzen kann, weil sie Umgebungstemperatur hat. Aus dem Wasserkraftwerk kommt die Gravitationsenergie $gh_1\Delta m$ heraus, die man nicht mehr nutzen kann, weil sie „Umgebungshöhe“ hat. Man sieht, daß die Temperatur beim Wärmekraftwerk eine ähnliche Rolle spielt wie die Höhe beim Wasserkraftwerk.

Bis jetzt ist aber noch nicht einzusehen, warum die Abwärme beim Wärmekraftwerk herausgelassen werden muß. Beim Wasserkraftwerk ist es klar: Es liegt daran, daß die Gravitationsenergie $gh_1\Delta m$ mit der Masse Δm verbunden ist, und diese muß aus dem Kraftwerk heraus, sonst verstopft es sich. Die Vermutung liegt nahe, daß es auch beim Wärmekraftwerk etwas gibt, das zusammen mit der Wärme hineinströmt, und das wieder herausfließen muß, damit sich das Kraftwerk nicht verstopft. Diese Hypothese war auch von *Carnot* aufgestellt worden. Die Größe, auf deren Existenz er genauso schloß wie wir, nennt man heute Entropie und bezeichnet sie mit dem Buchstaben S . Die Entropie spielt also beim Wärmekraftwerk dieselbe Rolle wie die Wassermasse beim Wasserkraftwerk.

Daß sich eine Wärmekraftmaschine genauso verstopft, wenn man die Entropie nicht herausläßt, wie eine Wasserturbine, wenn man das Wasser nicht herausläßt, kann man schön in einem Versuch mit einem Stirling-Motor sehen. Man läßt den Stirling-Motor zunächst vorschriftsmäßig laufen: Die Wärmezufuhr ist eingeschaltet (gewöhnlich benutzt man eine elektrische Heizung), und die Kühlung ist angeschlossen, d.h. es wird Wärme wieder abgegeben. Schaltet man die elektrische Heizung, also die Energiezufuhr, ab, so bleibt die Maschine selbstverständlich stehen. Was passiert, wenn man bei eingeschalteter Wärmezufuhr das Kühlwasser abschaltet, also die Wärmeenergieabgabe unterbindet? Man könnte erwarten, daß nun mehr Wärme in Rotationsenergie verwandelt wird, die Maschine also schneller läuft. Es passiert aber das Gegenteil: Die Maschine bleibt stehen. Sie ist mit Entropie verstopft.

Eigenschaften der Entropie

Wir fassen das bisherige Ergebnis des Vergleichs der beiden Kraftwerke zusammen: Wir vermuten, daß beim Wärmekraftwerk die hinein- und herausfließende Wärme vom Fluß einer Größe S begleitet ist, die wir Entropie nennen, genauso wie beim Wasserkraftwerk die Gravitationsenergie von

einem Wasserfluß begleitet ist. Wir vermuten, daß die Entropie folgende Eigenschaften hat:

- Sie ist mengenartig, und ihre Menge ist proportional zur Wärmeenergie, mit der zusammen sie ausgetauscht wird. Es gilt also $\Delta S \sim \Delta E$.
- Es fließt genauso viel Entropie in das Kraftwerk hinein wie aus ihm heraus, also

$$(\Delta S)_{\text{hinein}} = (\Delta S)_{\text{heraus}}$$

Wir wollen nun versuchen, die Größe S strenger zu definieren. Die Definition muß so sein, daß S die Eigenschaften (a) und (b) hat. Damit S die Eigenschaft (a) hat, muß die Definition von der Form sein: Ausgetauschte Wärme $\Delta E = f\Delta S$. Es ist schwieriger zu entscheiden, wie der Proportionalitätsfaktor f aussehen muß, damit die definierte Größe S die Eigenschaft (b) hat.

Beim Wasserkraftwerk war gh der entsprechende Faktor. Wir hatten festgestellt, daß beim Wärmekraftwerk die Temperatur dieselbe Rolle wie h oder gh beim Wasserkraftwerk spielt. Man könnte hoffen, daß die absolute Temperatur T selbst der gesuchte Faktor ist. Wäre das der Fall, so gälte $\Delta E = T\Delta S$. Leider müssen wir damit rechnen, daß der Faktor f nicht diese einfache Form hat, sondern eine komplizierte Funktion der Temperatur ist, daß also $\Delta E = f(T)\Delta S$ ist.

Welche Möglichkeit zutrifft, kann man nicht durch Analogieschlüsse feststellen, sondern nur durch Befragen der Natur: Wie muß $f(T)$ aussehen, damit $(\Delta S)_{\text{hinein}} = (\Delta S)_{\text{heraus}}$, also daß

$$\frac{(\Delta E)_{\text{hinein}}}{f(T_2)} = \frac{(\Delta E)_{\text{heraus}}}{f(T_1)} ?$$

Ist T selbst der Proportionalitätsfaktor, d.h. $f(T) = T$, so daß die einfache Beziehung

$$\frac{(\Delta E)_{\text{hinein}}}{T_2} = \frac{(\Delta E)_{\text{heraus}}}{T_1} \quad (1)$$

gilt? Ob die letzte Gleichung gilt, kann man feststellen, denn sie enthält nur Größen, die sich messen lassen. Es genügt allerdings nicht, ihre Gültigkeit an einer einzigen Maschine zu untersuchen, genauso wie man z.B. den Energiesatz nicht durch Messung an einer einzigen Maschine beweisen kann. Man muß sehr viele Messungen machen, und wenn alle Versuche zu derselben Aussage führen, glauben wir, daß die Aussage richtig ist. Die Gültigkeit von Gl. (1) ist, genau wie die Gültigkeit des Energiesatzes, seit vielen Jahrzehnten immer und immer wieder untersucht worden. Der Grund dafür ist, wie beim Energiesatz, nicht nur der Zweifel

an der Gültigkeit des Gesetzes, sondern auch ein technisches oder kommerzielles Interesse. Das experimentelle Feststellen der Gültigkeit von Gl. (1) ist nämlich gleichbedeutend mit der Messung des Wirkungsgrades einer Wärmekraftmaschine.

Der Wirkungsgrad

Unter dem Wirkungsgrad η einer Wärmekraftmaschine versteht man den Quotienten aus der in mechanischen Formen abgegebenen Energie und der hineingesteckten Wärme, also aus dem Energiebetrag, den man möglichst groß und dem, den man möglichst klein haben möchte. Die abgegebene Energie ist gerade die Differenz zwischen aufgenommener und abgegebener Wärme. Es ist also

$$\eta = \frac{\text{aufgenommene Wärme} - \text{abgegebene Wärme}}{\text{aufgenommene Wärme}} \quad (2)$$

Wenn der Proportionalitätsfaktor f , den wir suchen, die Temperatur T selbst ist, so ist

$$\eta = \frac{T_2 \Delta S - T_1 \Delta S}{T_2 \Delta S} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2}. \quad (3)$$

Den Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine kann man nach (2) messen. Die Temperatur T_2 im Kessel des Dampfkraftwerks und die Temperatur T_1 im Kondensator kann man auch messen. Man kann also feststellen, ob $(T_2 - T_1)/T_2$ denselben Wert liefert wie den Wert, den man nach (2) gemessen hat. Ist das nicht der Fall, so muß der Proportionalitätsfaktor eine andere Funktion von T sein.

Der Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen wurde sehr oft gemessen und mit $(T_2 - T_1)/T_2$ verglichen. Es stellte sich heraus, daß η für gute Maschinen diesen Wert hat. Es ist noch nie gelungen, diesen Wert zu überschreiten. Das ist für die Techniker bedauerlich. Für uns ist es erfreulich, denn es zeigt, daß der Proportionalitätsfaktor zwischen ΔE und ΔS eine sehr einfache Gestalt hat: Es ist die absolute Temperatur selbst.

Die Definition der Entropie

Wir sind damit in der Lage, die Entropie zu definieren: $\Delta S = \Delta E/T$, oder in Worten: Tauscht ein System die Wärmemenge ΔE aus, so ist dieser Vorgang begleitet vom Austausch der Entropie $\Delta S = \Delta E/T$. T ist dabei die absolute Temperatur des

Systems. Die so definierte Entropie hat die Eigenschaft, daß von ihr in eine Wärmekraftmaschine genau soviel hineinfließt wie aus ihr herausfließt. Sie hat also, wie die Masse, die Eigenschaft, daß sie, wenigstens in der Wärmekraftmaschine, weder erzeugt, noch vernichtet wird.

Nun kann das Diagramm rechts oben in der Tabelle 1 vervollständigt werden: Links fließt in den Kasten die Wärme $T_2 \Delta S$ hinein, aus ihm heraus fließt die Wärme $T_1 \Delta S$. Der Differenzbetrag $(T_2 - T_1) \Delta S$ wird in elektrische Energie $(\varphi_2 - \varphi_1) \Delta Q$ umgewandelt. Außerdem fließt die Entropie ΔS hinein und wieder heraus.

Entropieerzeugung – der zweite Hauptsatz

Wir haben eine Größe kennengelernt, die bei Wärmekraftmaschinen einem Erhaltungssatz genügt. Haben wir damit ein neues Naturgesetz kennengelernt? Sicher nicht. Ein Naturgesetz soll immer gelten. Vom Gesetz von der Erhaltung der Entropie wissen wir bisher nur, daß es für Wärmekraftmaschinen gilt. Es wäre wünschenswert zu wissen, ob es andere Systeme als Wärmekraftmaschinen gibt, in denen Entropie erzeugt oder vernichtet wird.

Wir untersuchen zuerst die Möglichkeit der Entropievernichtung. Gäbe es einen Vorgang, bei dem Entropie vernichtet wird, so könnte man mit ihm eine Wärmekraftmaschine bauen, in die mehr Entropie hinein, als aus ihr herausfließt, $(\Delta S)_{\text{hinein}} > (\Delta S)_{\text{heraus}}$. Nach Gleichung (2) ist

$$\eta = \frac{T_2(\Delta S)_{\text{hinein}} - T_1(\Delta S)_{\text{heraus}}}{T_2(\Delta S)_{\text{hinein}}} = 1 - \frac{T_1(\Delta S)_{\text{heraus}}}{T_2(\Delta S)_{\text{hinein}}}.$$

Weil $(\Delta S)_{\text{heraus}} < (\Delta S)_{\text{hinein}}$ ist, wäre der Wirkungsgrad η größer als $(T_2 - T_1)/T_2$. Das steht aber im Widerspruch zu allen bisherigen Erfahrungen. Es gibt also keinen Vorgang, bei dem Entropie vernichtet wird.

Gibt es Vorgänge, bei denen Entropie erzeugt wird? Mit einem System, das das tut, kann man eine Maschine bauen, für die $\eta < (T_2 - T_1)/T_2$. Gibt es Wärmekraftmaschinen mit schlechtem Wirkungsgrad? Als Vorübung für die Beantwortung dieser Frage überlegen wir uns, wie denn ein Wasserkraftwerk mit möglichst schlechtem Wirkungsgrad aussehen könnte: Man ließe das Wasser einfach im Wasserfall von der Höhe h_2 auf die Höhe h_1 hinunterfallen. Was passiert in diesem Fall mit der Gravitationsenergie $g(h_2 - h_1)\Delta m$? Sie bewirkt, daß das abfließende Wasser etwas wärmer ist als das

ankommende. Wegen der hohen Wärmekapazität des Wassers ist der Temperaturunterschied allerdings nicht sehr groß. Die Wirkung des Wasserfalls ist dieselbe, als hätte man dem Wasser Wärme, und damit Entropie zugeführt. Das abfließende Wasser hat also mehr Entropie als das ankommende. Es wurde ihm aber keine Entropie von außen zugeführt. Die Entropie, die es dazubekommen hat, ist also erzeugt worden.

Wir können mit Hilfe des Energiesatzes angeben, wieviel Entropie erzeugt wurde. Die Gravitationsenergie $g(h_2 - h_1)\Delta m$ hat dieselbe Wirkung wie die Zufuhr des gleichen Betrages an Wärmeenergie $T\Delta S$. Da der Temperaturunterschied zwischen vorher und nachher klein ist gegen den Wert von T selbst, ist es gleichgültig, ob man die Temperatur des Wassers vor oder nach dem Wasserfall einsetzt. T ist also die Wassertemperatur. Die erzeugte Entropie $(\Delta S)_{\text{erzeugt}}$ erhält man damit aus

$$g(h_2 - h_1)\Delta m = T(\Delta S)_{\text{erzeugt}}$$

zu $(\Delta S)_{\text{erzeugt}} = \frac{g(h_2 - h_1)\Delta m}{T}$

Wir kennen nun die wichtigsten Eigenschaften der Entropie:

Entropie kann erzeugt, aber nicht vernichtet werden.

Man nennt diesen Satz den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik. Im Unterricht wird man ihm den ersten Hauptsatz der Thermodynamik gegenüberstellen:

Energie kann weder erzeugt noch vernichtet werden.

Die Vorgänge bei einer Wärmekraftmaschine mit sehr schlechtem Wirkungsgrad sind nun leicht durchschaubar. Man erhält eine Wärmekraftmaschine mit dem Wirkungsgrad 0, wenn man den Dampf, statt ihn durch die Turbine zu schicken, sich einfach frei in den Kondensator entspannen läßt. In Analogie zum Wasserfall ist

$$(T_2 - T_1)(\Delta S)_{\text{hinein}} = T_1(\Delta S)_{\text{erzeugt}}$$

$(\Delta S)_{\text{hinein}}$ ist die Entropie, die in die Maschine hineinströmt. Der Energiebetrag $(T_2 - T_1)(\Delta S)_{\text{hinein}}$, den wir aus der Maschine nicht mehr als Rotationsenergie herausholen, muß nun am Kondensator als Wärme herausgeholt werden. Zusätzlich zu der bei reversiblen Betrieb (also bei Entropieerhaltung) auftretenden Wärme $T_1(\Delta S)_{\text{hinein}}$ fällt also notwendig am Kondensator noch die Wärme

$T_1(\Delta S)_{\text{erzeugt}} = (T_2 - T_1)(\Delta S)_{\text{hinein}}$ an, insgesamt also $(T_2 - T_1)(\Delta S)_{\text{hinein}} + T_1(\Delta S)_{\text{hinein}} = T_2(\Delta S)_{\text{hinein}}$. Dies ist nicht überraschend. Es fließt bei T_1 derselbe Betrag an Wärme aus der Maschine heraus, der bei der höheren Temperatur T_2 hineingeflossen ist. Die abfließende Wärme hat nur eine niedrigere Temperatur und daher eine größere Entropie, nämlich $(\Delta S)_{\text{hinein}} + (\Delta S)_{\text{erzeugt}}$. Die „schlechte“ Maschine tut übrigens genau dasselbe wie ein Gegenstand, der Wärme von einem Punkt der Temperatur T_2 zu einem Punkt der Temperatur T_1 leitet. Man kann wieder die erzeugte Entropie berechnen:

$$(\Delta S)_{\text{erzeugt}} = \frac{T_2 - T_1}{T_1} (\Delta S)_{\text{hinein}}$$

4. Zusammenfassung der Ergebnisse

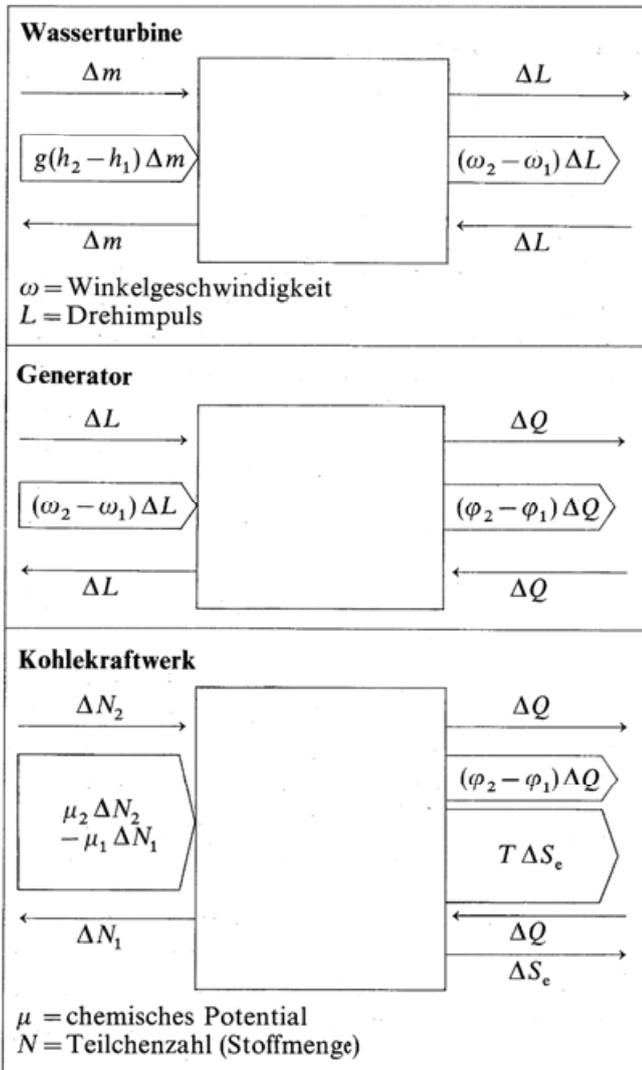
Der Vergleich von Dampf- und Wasserkraftwerk hat gezeigt, daß jeder Austausch von Wärme von einem Austausch einer anderen mengenartigen Größe begleitet ist. Man nennt sie Entropie. Der Zusammenhang zwischen ausgetauschter Wärme ΔE und ausgetauschter Entropie ΔS ist durch die einfache Beziehung $\Delta E = T\Delta S$ gegeben. Entropie kann erzeugt, aber nicht vernichtet werden.

5. Verallgemeinerung

Die Analogie zwischen Wasserkraftwerk und Wärmekraftwerk ist mehr als nur ein glücklicher Zufall. Jeder Energiewandler kann nämlich nach dem Schema der Tabelle 1 analysiert werden. Steht zur Fortsetzung der Unterrichtseinheit noch Zeit zur Verfügung, sollten unter stärkerer Beteiligung der Schüler Diagramme für weitere Energiewandler entwickelt werden. Dadurch wird einestils das Verständnis für den vorher behandelten Stoff vertieft, andererseits zeigt es, daß man in der Physik mit der Kenntnis weniger Grundgesetze sehr unterschiedliche Phänomene erklären kann.

Beispiele für die Flußdiagramme von drei weiteren Energiewandlern sind in Tabelle 2 dargestellt. Dabei bedeutet die Beschreibung eines weiteren Wandlers nicht einfach eine formale Übertragung der bekannten Regeln, sondern es gibt jedesmal Gelegenheiten, besondere Eigenschaften des Wandlers oder der neu hinzukommenden Energieform zu diskutieren.

Tabelle 2. Flußdiagramme von 3 Energiewandlern



Aufgaben mit Lösungen

1. Wieviel Entropie gibt ein flußwassergekühltes 1000 MWe-Kernkraftwerk in einer Stunde an den Fluß ab?

Lösung: $\Delta E = (T_2 - T_1) \Delta S \Rightarrow \Delta S = \frac{\Delta E}{T_2 - T_1}$

Mit $T_2 = (350 + 273) \text{ K}$, $T_1 = (30 + 273) \text{ K}$ und $E = 1000 \text{ MW} \cdot 1 \text{ h}$ wird $\Delta S \approx 10^{10} \text{ J/K}$.

2. Ein Kraftwerk kann im Prinzip rückwärts laufen. Eine solche Anlage heißt Wärmepumpe. Ein Stadtteil soll mit Hilfe einer Wärmepumpe mit der Wärme aus dem Wasser eines Flusses geheizt werden. Der Wasserstrom beträgt mindestens $2 \text{ m}^3/\text{s}$. Der Fluß soll um höchstens 1 K abgekühlt werden. Seine Temperatur beträgt im Winter etwa 5°C .

a) Wieviel Entropie kann man dem Fluß pro Sekunde entziehen?

b) Welchen elektrischen Energiestrom braucht man, um diese Entropie auf 80°C , die Temperatur des Heizungssystems, zu bringen?

c) Wie groß ist das Verhältnis des in das Heizungssystem gelieferten Wärmestroms zum verbrauchten elektrischen Energiestrom?

Lösung: a) $\frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{\Delta E}{T_1 \Delta t} = \frac{\Delta m}{\Delta t} c \frac{\Delta T}{T_1}$

m = Masse des Wassers
 c = spezifische Wärme des Wassers
 t = Zeit

Mit $\frac{\Delta m}{\Delta t} = 2 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$, $c = 4200 \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{kg}}$,

$\Delta T = 1 \text{ K}$, $T_1 \approx 278 \text{ K}$ wird $\frac{\Delta S}{\Delta t} \approx 3 \cdot 10^4 \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{s}}$.

b) Elektrischer Energiestrom $N = (T_2 - T_1) \cdot \frac{\Delta S}{\Delta t}$.

Mit $T_2 = 353 \text{ K}$ wird $N \approx 2,3 \text{ MW}$

c) $\frac{\Delta E_{\text{Wärme}}}{\Delta E_{\text{elektr.}}} = \frac{T_2 \Delta S}{(T_2 - T_1) \Delta S} = \frac{T_2}{T_2 - T_1} \approx 3,4$

3. Begründe die Aussage: Wärme strömt nicht von einem kälteren auf einen wärmeren Körper.

Lösung: T_1 = Temperatur des kälteren Körpers (Körper 1)

T_2 = Temperatur des wärmeren Körpers (Körper 2)

Wegen des Energiesatzes ist $T_1 \Delta S_1 = T_2 \Delta S_2 \Rightarrow \Delta S_2 = \frac{T_1}{T_2} \Delta S_1 < \Delta S_1$

Geht Energie vom einen auf den anderen Körper über, so muß sich also die Entropie ändern. Da die Entropie nicht abnehmen kann, kann also die Energie nur vom Körper 2 zum Körper 1 fließen, wobei die Entropie zunimmt.

4. Ein Wasserfall mit 5 m^3 Wasser pro Sekunde hat eine Höhe von 8 m . Wieviel Entropie wird pro Sekunde erzeugt? (Die Temperatur sei 20°C .)

$g \cdot h \Delta m = T \Delta S \Rightarrow \Delta S = \frac{g \cdot h \Delta m}{T} \Rightarrow \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{g \cdot h}{T} \cdot \frac{\Delta m}{\Delta t}$

Mit $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, $h = 8 \text{ m}$, $T = 293 \text{ K}$ und $\frac{\Delta m}{\Delta t} = 5000 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ wird $\frac{\Delta S}{\Delta t} \approx 1400 \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{s}}$

Diese Unterrichtseinheit wurde von Herrn Offermann in Ludwigsburg und Herrn Fleig in Karlsruhe-Neureut erprobt. Ich danke beiden Herren für die Mitteilung ihrer Erfahrungen.

Eine Einführung der Entropie – Thema eines Leistungskurses

Einleitung

Wenn man vor der Aufgabe steht, die Wissenschaft Physik nach Graden der Vermittlungswürdigkeit zu ordnen, bieten sich als Grundlage vor allem jene physikalischen Größen an, die sich als besonders tragfähig und anwendungsfähig erwiesen haben. An erster Stelle ist hier die Energie zu nennen. Ihre fundamentale Rolle bestreitet heute niemand mehr, wohl aber hält sich das Vorurteil, die Energie könne nur oder zumindest auf „natürliche“ Weise nur eingeführt werden auf dem historischen Weg über die Begriffe „Kraft“ und „Arbeit“. In den Aufsätzen von *F. Herrmann* und *M. Fleig* wurde gezeigt, daß es nicht nur einen anderen Weg gibt als den üblichen, sondern daß dieser sogar einfacher und deshalb besser ist. Gleichzeitig wird dabei klar, daß die Energie zwar beim Austausch in Formen auftritt, daß es aber keinen Sinn hat, die in einem System enthaltene Energie in Formen einzuteilen.

Eine zweite physikalische Größe von besonderer Tragfähigkeit und praktischer Bedeutung ist die Entropie. Obwohl ihre fundamentale Rolle nicht bestritten wird, tritt sie in den herkömmlichen Darstellungen der Physik so gut wie nicht auf. Meist wird sie nur als achtungsgebietende Unverständlichkeit vorgestellt, schnell mit ein paar beruhigend einleuchtenden Bemerkungen über „Unordnung“ oder „Wahrscheinlichkeit“ versehen und dann links liegen gelassen. Von ihrer breiten Anwendbarkeit ist weder in der Physik der Universität noch in der der Schule etwas zu spüren. Wieder ist der Grund für die Schwerverständlichkeit dieser so wichtigen Größe der historische Weg, auf dem sie in die Physik Eingang gefunden hat – zusammen mit dem Vorurteil, daß dies der einzig mögliche Weg sei, sie überhaupt zu verstehen.

Im vorliegenden Aufsatz wollen wir einen Weg aufzeigen, auf dem sich ein direktes und anschauliches Verständnis der Entropie gewinnen läßt. Der Weg ist etwas anders als der, den *F. Herrmann* in dem vorangegangenen Artikel vorgeschlagen hat, aber auch er ist so einfach, daß er im Physikunterricht der Oberstufe der Gymnasien beschritten werden kann. Vorausgesetzt wird dabei, daß die Energie bereits ein vertrauter Begriff ist. Wir sprechen deshalb von Energiebeträgen, Energieformen und Energieerhaltung als von etwas Bekanntem.

Interessant ist noch, daß der von *F. Herrmann* vorgeschlagene Weg zur Einführung der Entropie wie auch der vorliegende in mancher Hinsicht dem historisch ersten, nämlich von *Carnot* eingeschlagenen Weg zur begrifflichen Erfassung des Phänomens Wärme nahesteht. Dieser Weg basierte auf der Idee, die Wirkungsweise von Wärmekraftmaschinen durch das Bilanzieren einer Größe zu erfassen, die die Maschine durchströmt, so wie sich die Wirkung einer Wasserkraftmaschine fassen läßt durch die Bilanzierung des Wassers, das sie durchfließt. Wie man im Fall der Wasserkraftmaschine neben der Menge des die Maschine durchfließenden Wassers noch den Druck des Wassers am Eingang und am Ausgang der Maschine braucht, so bedarf es im Fall der Wärmekraftmaschine neben der fließenden Größe noch der Temperatur am Eingang und am Ausgang der Maschine. *Carnot* betrachtete den seinerzeit „Caloricum“ genannten „Wärmestoff“ als die Größe, auf die es dabei ankommt. Mit *Carnots* frühem Tod wurde der Weg abgebrochen und verschüttet. Man hielt *Carnots* Konzept für falsch, weil man mit der Entdeckung der Energie und ihrer allgemeinen Erhaltung erkannt zu haben glaubte, daß das Caloricum ein falscher Begriff war. Selbst Jahrzehnte später, als die Entropie entdeckt war, konnte oder wollte man darin nicht das alte Caloricum wiedererkennen.

Es ist müßig, darüber zu spekulieren, ob *Carnot* wirklich zur vollen Klarheit über die Wärme gelangt war, nämlich, daß Wärme nicht durch eine einzige Größe beschrieben werden kann, sondern daß dazu zwei physikalische Größen notwendig sind. Wenn man will, kann man aus *Carnots* Nachlaß herauslesen, daß er zwischen zwei Größen unterschied, die er „Chaleur“ und „Calorique“ nannte. Chaleur läßt sich als dasselbe ansehen, was wir heute die mit der Wärme gelieferte Energie nennen, und Calorique als das, was *Clausius* drei Jahrzehnte später Entropie getauft und als fundamentale Größe in die Physik eingeführt hat. Diese Bemerkung soll hier vor allem zeigen, wie sehr Zufälle in der historischen Bildung und Entwicklung physikalischer Begriffe mitspielen und wie fragwürdig es ist, sich auf historische Wege als die besonders „natürlichen“ oder gar „zwangsläufigen“ Wege des Verstehens zu berufen.

1. Das Problem des Wertes von Energie

Was bezahlt man eigentlich beim Energieverbrauch?

Daß das Wort „Stromrechnung“ den Unbefangenen auf eine falsche Fährte setzt, ist den Kindern unserer Zivilisation entweder bekannt oder leuchtet ihnen sofort ein. Die mit dem elektrischen Strom transportierte Ladung bekommt man gar nicht, sie durchfließt das Haus nur, denn alles was hereinfließt, strömt auch wieder hinaus. Man pflegt aber nur für etwas zu bezahlen, das man bekommt. Tatsächlich mißt der „Stromzähler“, wie seine Aufschrift sagt, auch gar nicht den Strom oder die elektrische Ladungsmenge, die ihn durchfließt, sondern die mit dem Strom gelieferte Energie. Man bezahlt also die Energie, die das Elektrizitätswerk ins Haus liefert.

Was für die elektrische Ladung gilt, daß nämlich alles, was ins Haus hineinströmt, auch wieder herausströmt, trifft aber auch für die Energie zu. Man behält die gelieferte Energie nicht, denn alle Energie, die ins Haus hereinfließt, strömt, wenn auch in anderer Form, wieder heraus. Der volle Betrag, den wir in Form elektrischer Energie etwa im Laufe eines Monats geliefert bekommen, wird wieder abgegeben, und zwar als Wärme an die Umwelt. Wenn es also stimmt, daß wir die Energie bezahlen, die uns das Elektrizitätswerk mit dem Strom liefert, so bezahlen wir etwas, das wir strenggenommen auch nicht bekommen, jedenfalls nicht behalten. Es ist aber ein wirtschaftliches Gesetz, daß man nur für einen Gegenwert bezahlt. Was ist hier eigentlich der Gegenwert? Die Energie kann es ebenso viel oder so wenig sein wie die elektrische Ladung, die uns ins Haus geliefert wird, denn Energie wie Ladung geben wir vollständig wieder ab.

Ein Vergleich mit der Energie, die wir in anderer als elektrischer Form geliefert bekommen, zeigt, daß es sich um ein allgemeines, keineswegs allein die elektrische Energieversorgung betreffendes Problem handelt. Die mit dem Öl oder der Kohle gelieferte Energie, die wir zum Heizen unserer Wohnung verwenden, fließt als Wärme voll in die Umgebung ab. Wir behalten auch hier weder das Öl noch die Energie, die wir mit dem Öl gekauft haben. Ebenso steht es mit der Energie, die wir im Benzin geliefert bekommen und die wir beim Betrieb unseres Autos voll an die Umwelt abgeben, als Wärme, als chemische Energie der Verbrennungsprodukte und als Bewegungsenergie, die aber schließlich auch wieder in Form von Wärme an die Umgebung abgegeben

wird. Der Gegenwert, für den wir bezahlen, ist also der, daß wir in der Gegend herumgefahren sind.

Die Beispiele, deren Zahl sich leicht vermehren läßt, zeigen, daß es nicht einfach die Energie sein kann, die wir bezahlen. Zwar kostet die jeweils aufgenommene Energie Geld, aber für die gleiche Menge Energie in der Form, in der wir sie abgeben, würden wir keinen Pfennig bezahlen. Mit ihr können wir nichts anfangen, sie ist nichts „wert“. Wieviel wir bezahlen, richtet sich offenbar danach, welchen Wert die Energie hat. Energie, die wir in Form elektrischer Energie, chemischer Energie oder sonst einer Form erhalten, hat demnach einen größeren Wert als die gleiche Menge Energie, die wir an die Umgebung als Wärme abgeben. Größerer Wert heißt dabei, daß man mit dieser Energie mehr anfangen kann.

Orientierung über den Wert von Energie

Jeder, der weiß, daß Energiemengen gleich welcher Form sich in derselben Einheit, etwa Joule = Wattsekunde (Ws), Kilowattstunde ($kWh = 3,6 \cdot 10^6$ Ws), Kalorie ($cal = 4,18$ Ws, $Mcal = 1,16$ kWh) messen lassen, wird auf den ersten Blick meinen, diese gemeinsame Einheit der Energiemenge müsse auch die Basis eines Preisvergleichs zwischen den verschiedenen Formen gelieferter Energie bilden. Ein (von den Schülern möglichst selbst durchzuführender) Vergleich der Preise für verschiedene Formen gelieferter Energie zeigt indessen, daß das keineswegs so ist:

Elektrische Energie (Großverbraucher):	7,8 Pfg/kWh
Benzin (Verbrennen von 1 l liefert ca. 11 Mcal = 12,8 kWh für ca. 90 Pfg.):	7,0 Pfg/kWh
Diesel-Öl (1 l → 10 Mcal = 11,6 kWh, für ca. 83 Pfg.):	6,5 Pfg/kWh
Heiz-Öl (1 l → 10 Mcal = 11,6 kWh für ca. 27 Pfg.):	2,3 Pfg/kWh
Erdgas (1 m ³ bei Normaldruck → 8,3 Mcal = 9,7 kWh für ca. 32 Pfg.):	3,3 Pfg/kWh
Kohle (1 kg → 8 Mcal = 9,3 kWh für ca. 20 Pfg.):	2,3 Pfg/kWh

Im Preis für Benzin und Diesel-Öl sind ungefähr 4 Pfg/kWh Verkehrssteuer enthalten, so daß auch für diese Energieformen eigentlich 3 bzw. 2,5 Pfg/kWh herauskommen.

Was ist der Grund für den Preisunterschied? Eine ganze Reihe von Erklärungen liegt auf der Hand.

Die Leichtigkeit, mit der sich der jeweilige Brennstoff verdampfen und zünden läßt, um die energieliefernde Reaktion einzuleiten, könnte ein Grund sein. So läßt sich Benzin viel leichter verdampfen und zünden als Dieselöl oder gar Kohle. Auch das Entstehen unerwünschter Reaktionsprodukte, wie von SO_2 bei der Verbrennung von Öl und Kohle, könnte ein Grund sein für den unterschiedlichen Preis. Diese Gründe können vielleicht die relativ kleinen Preisunterschiede zwischen Öl, Gas und Kohle erklären, nicht aber den großen Unterschied des Preises dieser Energieformen zu dem der elektrischen Energie. Läge bei einem derartig großen Preisunterschied nicht der Gedanke nahe, mit einem Diesellaggregat seinen elektrischen Strom selbst zu erzeugen? Wenn das günstiger wäre, als den elektrischen Strom direkt zu beziehen, wäre die Eigenerzeugung von elektrischem Strom sicher weit verbreitet; wahrscheinlicher wäre es allerdings, daß das Elektrizitätswerk die Kilowattstunde elektrischer Energie billiger verkaufen würde.

Die Frage nach dem Wert von Energie wird klarer, wenn man die Lieferung von Energie in Form von Wärme betrachtet. Fassen wir dazu einmal die durch eine Dampfheizung gelieferte Wärme von 100°C ins Auge und vergleichen sie mit der von einer (etwas kühlen) Warmwasserheizung gelieferten Wärme von 30°C . Wärmeenergie von 100°C ist offensichtlich wertvoller als die gleiche Menge Wärmeenergie von 30°C , denn man kann mit der 100° -Wärme mehr anfangen als mit der von 30°C . So kann man mit 100° -Wärme Speisen garkochen, mit 30° -Wärme dagegen nicht. Mit 100° -Wärme läßt sich eine Dampfmaschine betreiben, mit 30° -Wärme nicht. Allgemein lassen sich mit der 100° -Wärme andere Gegenstände durch einfache Berührung auf beliebige Temperaturen zwischen der Umgebungstemperatur und 100°C bringen, mit der 30° -Wärme dagegen nur auf Temperaturen bis zu 30°C . Ganz offensichtlich ist Energie in Form von Wärme im Sinn des Mehr-anfangen-könnens um so wertvoller, je höher die Temperatur ist, mit der die Wärme auftritt.

Elektrische Energie hat einen höheren Wert als Wärme jeder Temperatur

Ist die elektrische Energie vielleicht deshalb wertvoller als die bei der Verbrennung, also der chemischen Reaktion von Gas, Öl oder Kohle mit Sauerstoff, gelieferte Energie, weil elektrisch höhere Temperaturen herstellbar sind als mit chemischen Verbrennungsprozessen? Auf welche Temperaturen lassen sich Körper elektrisch überhaupt aufhei-

zen, gibt es dafür eine obere Grenze? Ein Metallstück zum Beispiel läßt sich zunächst aufheizen, indem man einen Strom hindurchschickt und durch Wärmeisolation verhindert, daß das Metall Wärme nach außen abgibt. Im Prinzip läßt sich das machen, bis das Metall verdampft. Verhindert man die Expansion des Metaldampfs dadurch, daß man ihn in ein festes Volumen einschließt, läßt sich die elektrische Aufheizung weiter fortsetzen, denn der Metaldampf hat eine elektrische Leitfähigkeit infolge der in ihm enthaltenen Metall-Ionen. Mit steigender Temperatur wird die Zahl dieser Ionen ebenso wie die der freien Elektronen immer größer, bis schließlich eine elektrische Entladung einsetzt. Dadurch wird die Temperatur weiter gesteigert. So geht es fort, wenn nur das experimentelle Problem gelöst wird, das Volumen und die Abgabe bzw. Abstrahlung von Wärme an die Umgebung begrenzt zu halten. Ein modernes Beispiel für die Erzeugung von Temperaturen von 10^7 bis 10^8°C mittels elektrischer Energie bilden die Experimente zur Fusion von Deuterium (=schwerer Wasserstoff) zu Helium. In der Skala der Temperatur ist die elektrische Energie also deshalb besonders wertvoll, weil sich mit ihr (zumindest im Prinzip) beliebig hohe Temperaturen herstellen lassen. Besser ist es zu sagen: Elektrische Energie ist wertvoller als Wärme jeder (endlichen) Temperatur.

Temperaturgrenzen von Verbrennungsvorgängen

Wie steht es mit den Brennstoffen Gas, Öl, Kohle, lassen sich auch bei ihrer Verbrennung beliebig hohe Temperaturen erzeugen? Aus Erfahrung mag der eine oder andere wissen, daß es heiße und weniger heiße Flammen gibt. Zum Schweißen beispielsweise, wozu die Schmelztemperatur von Eisen, also 1500°C , lokal wesentlich überschritten werden muß, um trotz der Wärmeableitung in das umgebende Material ein Aufschmelzen zu erreichen, eignen sich, wie man weiß, nur bestimmte Gase. Zu diesen gehört Azetylen (=Äthin, C_2H_2), das in Luft mit einer Flammentemperatur von etwa 2000°C verbrennt. Die Flammen anderer Gase, wie z.B. Wasserstoff, der in Luft mit ca. 1700°C verbrennt, sind dagegen nicht heiß genug, jedenfalls nicht, wenn der Sauerstoff allein durch die zuströmende Luft zugeführt wird. Führt man dem Wasserstoff reinen Sauerstoff zu, erhält man eine Flammentemperatur von ca. 2300°C . Ist das eine obere Grenze der bei der Verbrennungsreaktion



erreichbaren Temperatur? Oder lassen sich durch technische Tricks vielleicht weit höhere oder gar

beliebig hohe Verbrennungstemperaturen erreichen? Tatsächlich muß es eine obere Grenze für die durch die direkte Verbrennung von H_2 und O_2 zu H_2O erreichbare Temperatur geben, wenn die Reaktionswärme dazu benutzt wird, die Reaktionsprodukte aufzuheizen. Das zeigt folgende Überlegung.

Wenn 1 Mol H_2 -Gas und ein halbes Mol O_2 -Gas bei Zimmertemperatur zu 1 Mol gasförmigem H_2O verbrennen, wird eine Energie von $57,6 \text{ kcal/Mol} = 2,4 \cdot 10^5 \text{ Ws/Mol}$ „frei“. Zunächst bedeutet diese Feststellung nicht, daß 1 Mol H_2 und $\frac{1}{2}$ Mol O_2 zusammengebracht, sich in jedem Fall zu 1 Mol H_2O verbinden. Wenn nämlich H_2 - und O_2 -Moleküle zu H_2O zusammentreten können, so kann umgekehrt H_2O auch in H_2 und O_2 zerfallen. Die Reaktion (1) beschreibt nur die Mengenregel, nach der sich die Moleküle ineinander umwandeln. Wieviele H_2 - und O_2 -Moleküle auf der einen Seite und wie viele H_2O -Moleküle auf der anderen vorhanden sind, bestimmt das vor der Temperatur abhängige Gleichgewicht der Reaktion (1). Bei Zimmertemperatur liegt das Gleichgewicht ganz auf der Seite des H_2O , während es sich mit steigender Temperatur mehr und mehr zugunsten von H_2 und O_2 verschiebt. Bringt man also H_2 -Gas und O_2 -Gas im Mengenverhältnis 2 zu 1 zusammen, so hängt die Menge des sich bildenden H_2O von der Temperatur ab. Die Reaktionsprodukte sind somit übriggebliebenes H_2 und O_2 sowie gebildetes H_2O . Die bei der H_2O -Bildung „frei“ werdende Energie wird, wenn sie nicht nach außen abgegeben wird, zur Aufheizung der Reaktionsprodukte benutzt. Je heißer diese aber werden, um so weniger H_2O bildet sich aus H_2 und O_2 , da sich, wie gesagt, das Gleichgewicht mit steigender Temperatur auf die Seite von H_2 und O_2 verschiebt. Das hat zur Folge, daß die erreichbaren Temperaturen begrenzt sind.

Eine obere Grenze für die Verbrennungstemperatur, die allerdings weit über dem wirklich Erreichbaren liegt, läßt sich gewinnen, wenn man das Gleichgewicht einmal außer acht läßt und annimmt, daß jedes Mol Wasserstoff sich mit einem halben Mol Sauerstoff zu einem Mol Wasser verbindet. Als Reaktionsprodukt tritt dann nur Wasserdampf auf. Bezeichnet c_v die Wärmekapazität pro Mol des Wasserdampfs bei konstantem Volumen, so ist, wenn das Aufheizen bei konstantem Volumen erfolgt $c_v(\tau_{\text{End}} - \tau_{\text{Anf}}) = 2,4 \cdot 10^5 \text{ Ws/Mol}$. Als Temperatur τ kann dabei eine beliebige Skala benutzt werden, es muß nur c_v auch in ihr angegeben sein. Benutzt man die Kelvin- oder die Celsius-Skala, so liegt der Wert von c_v für Wasserdampf zwischen den Werten $30 \text{ Ws/(Mol} \cdot \text{K)} \lesssim c_v$

$\lesssim 55 \text{ Ws/(Mol} \cdot \text{K)}$. Die untere Grenze ist die Wärmekapazität von H_2O -Dampf bei Siedetemperatur, die obere bei einigen tausend Grad Celsius. Setzt man für c_v einen mittleren Wert von $50 \text{ Ws/(Mol} \cdot \text{K)}$ ein, so resultiert für die Temperatursteigerung $T_{\text{End}} - T_{\text{Anf}} \approx 5000^\circ\text{C}$. Das ist, wie gesagt, eine obere Grenze, die in Wirklichkeit nicht erreicht wird. Wenn diese Grenze vielleicht auch groß erscheint, ist sie doch sehr klein gegen elektrisch erreichbare Temperaturen. Schließlich noch ein paar Bemerkungen:

- Gewöhnlich erfolgt die Verbrennung, also die Reaktion (1), nicht bei konstantem Volumen, also in einem geschlossenen Gefäß, sondern im Freien, oder anders gesagt, bei konstantem Druck, nämlich dem Druck der Atmosphäre. Dann ist statt c_v die Wärmekapazität pro Mol bei konstantem Druck c_p einzusetzen. Da $c_p = c_v + 8,31 \text{ Ws/(Mol} \cdot \text{K)}$, erniedrigt sich die berechnete obere Grenze der Temperatursteigerung auf $T_{\text{End}} - T_{\text{Anf}} \approx 4200^\circ\text{C}$.

- Neben der Reaktion (1) gibt es auch noch die Reaktion



Der Wasserdampf H_2O kann nicht nur in H_2 und O_2 zerfallen, sondern auch in H_2 und OH . Auch das Gleichgewicht der Reaktion (2) verschiebt sich mit steigender Temperatur auf die Seite von H_2 und OH . Je höher die Temperatur steigt, um so weniger H_2O ist vorhanden und um so weniger Energie aus der Reaktion (1) steht zum Aufheizen der Reaktionspartner zur Verfügung. Eine kompliziertere Rechnung, die sowohl das Gleichgewicht der Reaktion (1) als auch das der Reaktion (2) berücksichtigt, liefert als obere Grenze der Temperaturerhöhung $T_{\text{End}} - T_{\text{Anf}} \lesssim 2700^\circ\text{C}$. Schließlich gibt es auch noch die Dissoziationsreaktionen $H_2 \rightleftharpoons H + H$ und $O_2 \rightleftharpoons O + O$ sowie $OH \rightleftharpoons O + H$. Sie wirken sich ebenfalls hemmend auf eine Temperaturerhöhung aus, spielen aber erst bei Temperaturen über 2500°C eine spürbare Rolle.

- Erfolgt die Verbrennung in umgebender Luft, so müssen mit der Energie, die durch die Verbrennung geliefert wird, nicht nur die Reaktionspartner aufgeheizt werden, sondern auch die von der Flamme mitgerissene Luft. Das erniedrigt die Endtemperatur noch weiter. So kommt es schließlich zu der beobachteten Flammentemperatur.

Es sei noch angemerkt, daß die hier diskutierte Fragestellung nach einer oberen Grenze für die bei einer Verbrennung erreichbare Temperatur einen

guten Ausgangspunkt bildet für eine genauere, auch experimentelle Beschäftigung mit den Wärmekapazitäten von Stoffen in der Gasphase wie in der kondensierten Phase. Die oben benutzten Zahlenwerte für die Wärmekapazitäten lassen sich, zumindest näherungsweise, von den Schülern selbst erarbeiten.

Vorläufige Wertordnung der verschiedenen Energieformen

Unsere Betrachtungen zeigen, daß der Wert der mit den Brennstoffen Gas, Öl und Kohle gelieferten Energie kleiner ist als der Wert von Wärme mit einer Temperatur, die höher ist als die durch die Verbrennung maximal erzielbare Temperatur. Mit dem Kriterium der maximal erzielbaren Temperatur können wir eine vorläufige Wertordnung der verschiedenen Energieformen vornehmen. An oberster Stelle steht die elektrische Energie; mit ihr lassen sich im Prinzip beliebig hohe Temperaturen erreichen. Chemisch gelieferte Energie hat im allgemeinen einen geringeren Wert, da es für jede chemische Reaktion eine obere Grenze der erreichbaren Maximaltemperatur gibt. Von Energien, die durch zwei verschiedene chemische Reaktionen geliefert werden, hat diejenige den höheren Wert, mit der sich die höhere Temperatur erzeugen läßt. Der Wert von Wärme ist um so höher, je höher die Temperatur ist. Erhitzt man also durch Verbrennung von Kohle in einem Dampfkessel den Dampf, so stellt der erhitzte Dampf eine um so wertvollere Energie dar, je höher seine Temperatur ist.

Es bleibt noch, die gewohnten mechanischen Energieformen in die Wertskala einzustufen, nämlich die Bewegungsenergie, die Rotationsenergie und die Verschiebungsenergie. Alle drei sind mit der elektrischen Energie gleichwertig. Sie lassen sich reversibel, nämlich vollständig umkehrbar, in elektrische Energie umformen. Es ist allerdings nicht einfach, diese Behauptung experimentell nachzuweisen, da nicht zu große, handliche elektrische Motoren und Generatoren erhebliche Irreversibilitäten, also schlechte Wirkungsgrade haben.

2. Die Entropie als quantitatives Maß für den Wert von Energie

Das Analogon „Wert von Milch“

Als Beispiel einer vertrauten Handelsware, die ähnlich wie die Energie zu unterschiedlichen Preisen

angeboten wird, betrachten wir die Milch. Ein für jedermann einleuchtendes (wenn auch etwas vereinfachtes) Bild von Milch ist, daß sie aus Sahne und Wasser besteht. Der Preis für verschiedene Sorten Milch richtet sich nach der verschiedenen Zusammensetzung der Milch aus diesen beiden Bestandteilen. Milch mit einem höheren Anteil an Sahne ist „wertvoller“ und daher im allgemeinen teurer als Milch mit einem geringeren Anteil. Als besonders einfach bietet sich die Definition an:

$$\text{Wert der Milch} = \frac{\text{Menge der Sahne}}{\text{Menge des Wassers}} \quad (3)$$

Schüttet man Wasser in Milch eines nach (3) bestimmten Wertes, so wird der Wert der Milch kleiner. Der durch (3) definierte Wertmaßstab ist so festgelegt, daß reine Sahne den Wert Unendlich und reines Wasser den Wert Null erhalten.

Der Wertmaßstab (3) ist nicht zu verwechseln mit dem Preis, den man für Milch einer bestimmten Zusammensetzung, also eines bestimmten Wertes (3) zu bezahlen hat. Das kann schon deshalb nicht sein, weil reine Sahne nach (3) zwar den Wert Unendlich hat, aber durchaus einen endlichen Preis kostet. Der Preis ist deshalb eine Funktion des Wertes (3), die für große Werte (3) gegen eine endliche Zahl geht (Abb. 1). Außerdem hängt der Preis nicht nur von dem durch (3) definierten Wert der Milch ab, sondern auch noch von anderen Faktoren, wie dem Milchangebot und der Nachfrage nach Milch bestimmter Sorten. Der Preis kann deshalb von Ort zu Ort verschieden sein und sich mit der Zeit ändern, je nachdem, ob fettreiche oder sahnearme Milch bevorzugt wird (Abb. 1). Der durch (3) definierte Wert der Milch hat nichts zu tun mit wirtschaftlichen Faktoren. Er ist eine „phy-

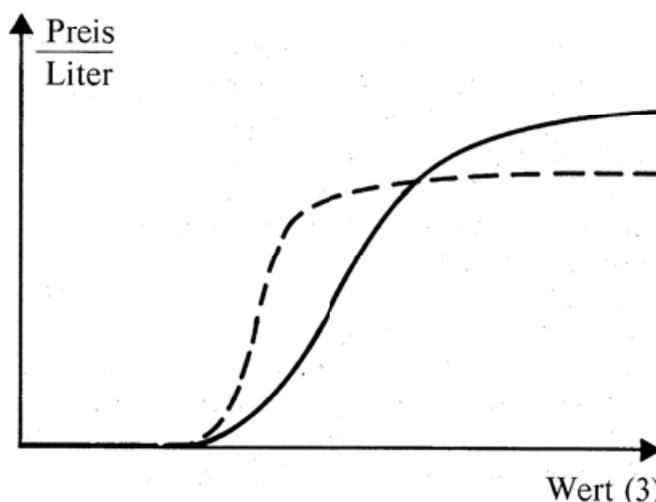


Abb. 1 Preis der Milch als Funktion des durch (3) definierten Wertes. Die beiden Kurven geben den Preis an für zwei unterschiedliche Nachfragesituationen.

sikalische“ Größe, deren Betrag nur von der Menge der Sahne und des Wassers abhängt, die die Milch enthält.

Der Wert von Wärme, absolute Temperatur

Wie zwischen dem durch die jeweiligen wirtschaftlichen Faktoren mitbedingten Preis und dem durch (3) erklärten „absoluten“ Wert von Milch zu unterscheiden ist, müssen wir auch einen Unterschied machen zwischen dem Preis von Energie und dem, was wir ihren physikalischen oder „absoluten“ Wert nennen. Um die Analogie zur Milch möglichst eng zu machen, betrachten wir die Energieform Wärme. Von ihr wissen wir, daß sie um so wertvoller ist, je größer die Temperatur ist, mit der sie auftritt. Mit welcher Art Thermometer bei dieser Feststellung die Temperatur gemessen wird, das heißt welches Temperaturmaß τ man benutzt, ist dabei völlig gleichgültig. Es wäre didaktisch sogar von Vorteil, wenn man als Temperatur τ nicht die Celsius-Skala benutzen würde, sondern eine ungewohnte Größe, deren Werte nicht linear mit der Celsius-Skala zusammenhängen. Das Temperaturmaß τ muß nur die Eigenschaft haben, daß Wärme mit einem höheren τ -Wert auch wertvoller ist als Wärme, die einen kleineren τ -Wert hat.

Die Analogie zur Milch gründet sich darauf, daß Wärme eine Energieform ist, daß in ihr neben der Energie also noch eine weitere Größe mitwirkt. Diese Größe erhält den Namen *Entropie*, und sie wird bezeichnet mit S . So wie Milch daraus besteht, daß zwei Dinge geliefert werden, nämlich Sahne und Wasser, besteht Wärme aus der Lieferung von zwei physikalischen Größen, nämlich Energie und Entropie. Die Analogie sieht dann so aus: Es entsprechen sich

Milch – Wärme, Sahne – Energie, Wasser – Entropie.

Entsprechend (3) definieren wir den Wert der Wärme durch

Wert von Wärme

$$= \frac{\text{Menge der gelieferten Energie } \Delta E}{\text{Menge der gelieferten Entropie } \Delta S} \quad (4)$$

Der Wert von Wärme ist also um so größer, je kleiner die mit einer bestimmten Menge Energie ΔE gelieferte Entropiemenge ΔS ist. Da elektrische Energie einen höheren Wert hat als Wärme jeder endlichen Temperatur, hat sie den Wert Unendlich. In der Analogie zur Milch entspricht elektrische Energie also reiner Sahne (ohne Wasser).

Der durch (4) definierte Wert der Wärme ist ein Maß für die Zusammensetzung der Wärme aus Energie und Entropie. Diese Zusammensetzung hängt ab von der Temperatur der Wärme. Je höher die Temperatur der Wärme ist, um so weniger Entropie ist mit einer bestimmten Menge Energie verknüpft. Mißt man die Temperatur in irgendeiner beliebigen Skala τ , so ist also

$$\text{Wert von Wärme} = f(\tau). \quad (5)$$

Bei gegebener Temperaturskala τ läuft die Frage nach dem Wert (4) der Wärme also darauf hinaus, die Funktion $f(\tau)$ zu bestimmen. Die durch die Werte von $f(\tau)$ selbst definierte Temperatur heißt die *absolute Temperatur* T . Es ist also

$$\text{Wert der Wärme} = \text{absolute Temperatur } T, \quad (6)$$

oder mit (4) in Formelschreibweise

$$T = \frac{\Delta E}{\Delta S}. \quad (7)$$

Die absolute Temperatur ist nichts anderes als das, was wir mit (4) als den Wert der Wärme definiert haben. Da Wärme Energie zusammen mit Entropie ist, so wie Milch Sahne zusammen mit Wasser, stellt die absolute Temperatur das Verhältnis von Energiemenge und Entropiemenge dar, die mit der Wärme geliefert werden. Die Bestimmung des Wertes von Wärme und die Bestimmung der absoluten Temperatur dieser Wärme sind dieselbe Aufgabe.

Was man mit Wärme einer gegebenen Temperatur anfangen kann, hängt nicht nur von der Temperatur der Wärme ab, sondern auch von der Temperatur der Umgebung, in der man lebt. Da unsere mittlere Umgebungstemperatur 15°C ist, kann man mit Wärme dieser Temperatur gar nichts anfangen, sondern nur mit Wärme höherer oder tieferer Temperatur. Auf den ersten Blick überraschen mag dabei, daß man auch mit Wärme tieferer als der Umgebungstemperatur etwas anfangen kann, aber das zeigt jeder Kühlschrank. Der durch (4) definierte Wert der Wärme ist also nicht unmittelbar ein Ausdruck des Anfangen-Könnens, also des Preises von Wärme. Der Wert (4) der Wärme ist unabhängig von der Umgebung, er ist „absolut“, denn er hängt nur ab von der Temperatur der Wärme selbst. Wie bei der Milch zwischen dem physikalischen oder „absoluten“ Wert (3) und dem von weiteren wirtschaftlichen Faktoren abhängigen Preis zu unterscheiden ist, hat man auch einen Unterschied zu machen zwischen dem physikalischen Wert (4) der Wärme und dem Preis, den man für Wärme eines bestimmten Wertes, also einer bestimmten Zusammensetzung aus Energie und Entropie, zu bezahlen hat. Der Preis hängt

im allgemeinen nicht nur vom Wert ab, sondern auch noch von anderen Größen, wie von der jeweiligen Umwelt oder der Verfügbarkeit von Materialien, die bestimmte Temperaturen ohne Korrosion aushalten. Die Umwelt ist für den Preis der Wärme sogar entscheidend, denn Wärme der Umgebungstemperatur kostet nichts, sie ist nicht nur im Überfluß vorhanden, wir können uns ihrer nicht einmal erwehren.

Es ist ähnlich wie mit der Luft, die uns auf der Erdoberfläche mit einem Druck von einer Atmosphäre umgibt. Sowohl für Luft höheren Drucks, also komprimierte Luft, als auch für Vakuum, genauer für Luft kleineren Drucks als Atmosphärendruck, haben wir einen Preis zu zahlen. So ist auch für Wärme nicht nur höherer, sondern auch tieferer Temperatur als der Umgebungstemperatur ein Preis zu zahlen, und zwar ein um so höherer Preis, je mehr die Temperatur der Wärme nach oben oder unten von der Umgebungstemperatur abweicht. Der Preis der Wärme ist deshalb eine nicht-monotone Funktion des physikalischen Wertes (4); er hängt ab von der Umgebungstemperatur, ob man also in den Tropen ist oder in arktischen Zonen (Abb. 2). Außerdem geht er für große Werte (4) gegen eine endliche Zahl, nämlich gegen den Preis für elektrische Energie.

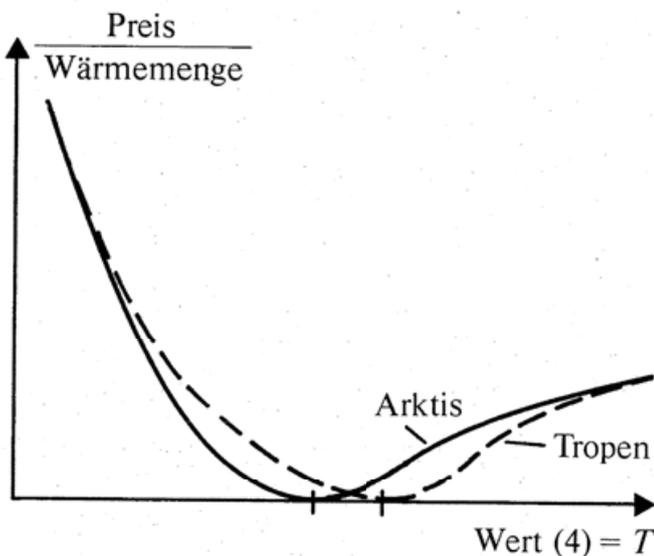


Abb. 2 Preis von Wärme als Funktion ihres Wertes (4) für eine tropische (gestrichelt) und eine arktische Umgebung (ausgezogen). Für tiefe Temperaturen steigt der Preis etwa proportional $1/T$. Das ist nach (4) verständlich (obwohl nicht auf den ersten Blick), da für zwei Wärmemengen gleicher Energie die Temperaturen sich umgekehrt verhalten wie Entropiemengen ($T_2/T_1 = \Delta S_1/\Delta S_2$) und die Differenz $\Delta S_1 - \Delta S_2$ ein ungefähres Maß ist für die Kosten, um die Wärmemenge $T_2 \Delta S_2$ von T_1 abzukühlen.

Dimension und Einheit von Entropie und absoluter Temperatur

Wie läßt sich nun die absolute Temperatur, also der Wert (4) der Wärme bestimmen? Welchen Wert (4) hat beispielsweise Wärme von 100°C einerseits und Wärme von 30°C andererseits? Während klar ist, in welcher Einheit die Energie zu messen ist, haben wir bisher über die Entropie noch keine andere Vereinbarung getroffen, als daß sie das Analogon des Wassers in der Milch ist. So wie die Forderung, die Menge von Wasser zu messen, nicht festlegt, durch welche physikalische Größe und in welcher Einheit das geschehen soll, ob etwa durch das Gewicht oder durch die Teilchenzahl, ist auch mit dem Konzept der Entropie ihr Maß noch nicht festgelegt. Ja, sogar ihre Dimension ist noch verfügbar und könnte willkürlich festgesetzt werden. Diese Freiheit im Maß der Entropie S hat, da das Maß der Energie E festliegt, nach (7) eine entsprechende Freiheit der Festlegung der absoluten Temperatur T zur Folge; auch bei ihr haben wir noch Dimension wie Einheit frei in der Hand. Würde man zum Beispiel festsetzen, daß T keine Dimension haben soll, müßte man der Entropie dieselbe Dimension geben wie der Energie. Gibt man dagegen der Entropie S eine eigene Dimension und als Einheit etwa „Cn“ (als Abkürzung für Carnot), so hat die Temperatur T die Dimension „Energie/Entropie“ und die Einheit Ws/Cn . Gibt man dagegen, wie es historisch geschah, der Temperatur T eine eigene Dimension und die Einheit K , so hat die Entropie die Dimension „Energie/Temperatur“ und die Einheit Ws/K .

Als logische Schwierigkeit wird man vermutlich empfinden, daß in der Gl. (7) zwei neue Größen auftreten, die gleichzeitig festgelegt werden sollen, nämlich T und ΔS . Gl (7) läßt sich deshalb nicht ansehen als Definition einer dritten Größe durch zwei bereits bekannte, durch Meßvorschriften festgelegte Größen (wie es z.B. bei der Definition des Widerstands durch Spannung und Strom ist). Die Lösung des Problems erfolgt in zwei Schritten: Zunächst wird ein Maß für die Entropie dadurch festgelegt, daß man bei einer beliebigen festen Temperatur Energiemengen mißt; denn bei fester Temperatur ist die Entropiemenge der Energiemenge proportional. Im zweiten (durch den Carnot-Prozeß bewerkstelligten) Schritt geht es dann darum, die in zwei Wärmemengen verschiedener Temperatur enthaltene Energie zu vergleichen, wenn die beiden Wärmemengen dieselbe Entropiemenge enthalten. Der Quotient der Energiemengen ist dann der Quotient der absoluten Temperaturen der beiden Wärmemengen.

Zunächst zum ersten Schritt. Wegen der noch vorhandenen Freiheit in der Festlegung der Entropie können wir definitiv festlegen, welche Menge Entropie ΔS mit einer bestimmten Energiemenge, etwa 1 Ws, in Wärme einer bestimmten Temperatur, zum Beispiel Wärme von 100 °C geliefert wird. Um das Gemeinte klarzumachen, setzen wir entgegen der physikalischen Gewohnheit fest:

$$T(100^\circ\text{C}) = \frac{1 \text{ Ws}}{1 \text{ Cn}} = 1 \frac{\text{Ws}}{\text{Cn}} \quad (8)$$

Damit ist die Einheit Cn der Entropie als die Entropiemenge festgelegt, die in Wärme von 100 °C zusammen mit 1 Ws Energie geliefert wird. Die Einheit der absoluten Temperatur ist dann Ws/Cn, und siedendes Wasser unter Normaldruck hat die absolute Temperatur 1 Ws/Cn.

Statt die Einheit Cn der Entropie durch (8) zu definieren, hätten wir auch eine eigene Einheit G (etwa als Abkürzung von „Groß-Kelvin“) für T festsetzen können durch

$$T(100^\circ\text{C}) = 1 \text{ G} \quad (9)$$

Unter Normaldruck siedendes Wasser hat dann die absolute Temperatur 1 G, und die mit 1 Ws Energie von Wärme mit 1 G gelieferte Menge von Entropie beträgt 1 Ws/G. Es ist also $\text{Cn} = \text{Ws}/\text{G}$.

Unsere Festsetzung ist, um das definitivische Vorgehen deutlich zu machen, von der in der Physik üblichen verschieden. Um aber den Anschluß an die gesetzlichen Einheiten zu gewinnen, wollen wir auch diese angeben. Danach ist die Einheit K der absoluten Temperatur so festgesetzt, daß

$$T(100^\circ\text{C}) = 373,15 \text{ K} \quad (10)$$

Die Einheit der Entropie ist demgemäß Ws/K, und es gilt: Wärme von 100 °C liefert pro Ws Energie die Entropiemenge $(1/373,15) \text{ Ws}/\text{K}$.

Die von uns lediglich zur logischen Übung eingeführte Einheit Cn der Entropie ist also nur ein 373,15tel der Einheit Ws/K. In der Physik wird als Einheit der Entropie auch Cl („Clausius“) = $1 \text{ cal}/\text{K} = 4,18 \text{ Ws}/\text{K}$ verwendet. Hier verwenden wir als Einheiten K und Ws/K.

Die Bestimmung der absoluten Temperatur. Carnot-Prozeß

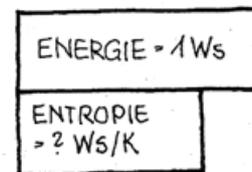
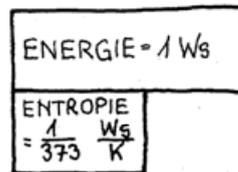
Nachdem nun die Dimensionen und Einheiten aller Größen festgelegt sind, besteht keine weitere Freiheit mehr. Die absolute Temperatur der Warmwasserheizung von 30 °C muß somit einen bestimmten

Wert haben. Unsere Frage lautet daher:
 $T(30^\circ\text{C}) = \text{wieviel K?}$

Wir wissen, daß $T(30^\circ\text{C}) < T(100^\circ\text{C}) = 373,15 \text{ K}$. Eine bestimmte Energie- und damit Wärmemenge von 30 °C hat also mehr Entropie als dieselbe Energie- bzw. Wärmemenge von 100 °C. Man kann das wie folgt veranschaulichen:

Wärme von 100 °C

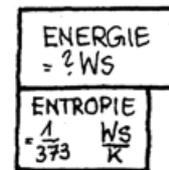
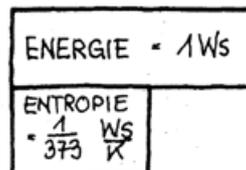
Wärme von 30 °C



Nimmt man also in beiden Fällen, von der Dampfheizung wie von der Warmwasserheizung, eine Wärmemenge von 1 Ws, so geht es um die Frage, wieviel Entropie mit der 30° Wärme geliefert wird. Diese Frage läßt sich nur beantworten, wenn man ein Mittel hat, Entropiemengen zu vergleichen. Man kann die Frage aber auch so stellen:

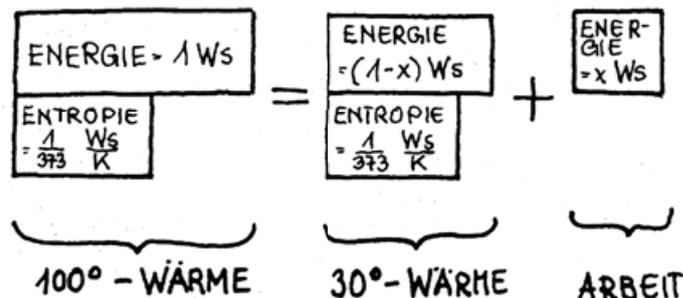
Wärme von 100 °C

Wärme von 30 °C



Man fragt also nach dem Verhältnis einer 100°-Wärmemenge und einer 30°-Wärmemenge, die *dieselbe Menge Entropie* haben. Wenn man annimmt, daß man Energiemengen messen kann, so läßt sich diese Frage beantworten, wenn man weiß, wann zwei Wärmemengen unterschiedlicher Temperatur dieselbe Menge Entropie enthalten. Diese Frage beantwortet nun eine von Carnot ersonnene Konstruktion, der Carnot-Prozeß.

In der bildlichen Darstellung von Wärme als Kombination einer Menge Energie mit einer Menge Entropie läßt sich die gestellte Aufgabe wie folgt beschreiben:



Eine bestimmte Wärmemenge von $T=373,15\text{ K}$ (also 100°C), hier vom Betrag 1 Ws , soll in eine 30° Wärmemenge von $(1-x)\text{ Ws}$ transformiert werden, und zwar so, daß die Entropie dabei konstant bleibt. Bei diesem Prozeß bleiben $x\text{ Ws}$ übrig als Energie ohne Entropie, also als höchstwertige Energie, die traditionell „Arbeit“ genannt wird. Die Aufgabe wird gelöst von einer „Wärme-kraft-maschine“, deren prinzipielle Wirkungsweise in Abb. 3 dargestellt ist.

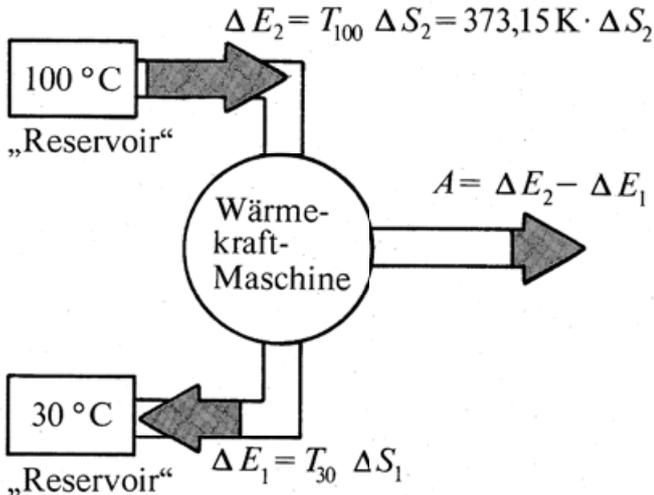


Abb. 3 Wirkungsweise einer Wärmekraft-Maschine

Die Maschine erhält von der 100° -Heizung Wärmeenergie vom Betrag ΔE_2 . Mit dieser Energie bekommt die Maschine gleichzeitig den Entropiebetrag ΔS_2 . An die 30° -Heizung gibt die Maschine den Energiebetrag ΔE_1 ab zusammen mit dem Entropiebetrag $\Delta S_1 = \Delta E_1/T_{30}$. Die in der Aufgabe gestellte Forderung, daß bei der Transformation von 100° -Wärme in 30° -Wärme die Entropie konstant bleiben soll, ist nur dann erfüllt, wenn $\Delta S_1 = \Delta S_2$. Den Differenzbetrag $A = \Delta E_2 - \Delta E_1$ der als Wärme aufgenommenen und abgegebenen Energie gibt die Maschine als Energie ohne Entropie, also als Arbeit ab. Die Energieerhaltung fordert, daß

$$A = \Delta E_2 - \Delta E_1 = T_{100} \Delta S_2 - T_{30} \Delta S_1. \quad (11)$$

Ist, wie es unserer Absicht entspricht, $\Delta S_1 = \Delta S_2$, so ist

$$A = (T_{100} - T_{30}) \Delta S_2 = \frac{T_{100} - T_{30}}{T_{100}} \Delta E_2, \quad (12)$$

oder als „Wirkungsgrad“, nämlich als Quotient von gewünschter Energiemenge A und aufzuwendender Energiemenge ΔE_2 geschrieben,

$$\frac{A}{\Delta E_2} = 1 - \frac{T_{30}}{T_{100}} = 1 - \frac{T_{30}}{373,15\text{ K}}. \quad (13)$$

Für die gesuchte Temperatur T_{30} erhält man so

$$T_{30} = 373,15 \cdot \left(1 - \frac{A}{\Delta E_2}\right) \text{ K}. \quad (14)$$

Die Messung der Energiebeträge A und ΔE_2 liefert somit die absolute Temperatur T_{30} einer Warmwasserheizung von 30°C .

In der eben vorgeführten Carnotschen Überlegung bleibt allerdings die Frage, wie man feststellt, wann die von der Maschine abgegebene Entropiemenge ΔS_1 gleich ist der aufgenommenen Entropiemenge ΔS_2 . Auch darauf hat Carnot eine Antwort gegeben. Er verlangt nämlich, daß die Maschine *Kreisprozesse* durchläuft. Ein Kreisprozeß ist eine Zustandsfolge, bei der der Endzustand identisch ist mit dem Anfangszustand. Alle physikalischen Größen der Maschine haben deshalb am Ende eines Kreisprozesses denselben Wert wie am Anfang. Den Gesamtbetrag einer Größe, den die Maschine während eines Kreisprozesses aufnimmt, muß sie also auch wieder abgeben, und sie muß noch mehr abgeben, wenn der Betrag der Größe sich im Innern der Maschine beim Kreisprozeß vermehrt. Das gilt für die Energie wie für die Entropie. Nimmt die Maschine in einem Kreisprozeß den Energiebetrag ΔE_2 auf, so muß sie, da die Energie einem Erhaltungssatz genügt, sich also nicht vermehren kann, denselben Betrag als $A + \Delta E_1$ wieder abgeben. Nun nimmt die Maschine während eines Kreisprozesses den Betrag ΔS_2 an Entropie auf und gibt den Betrag ΔS_1 ab. Muß dann $\Delta S_1 = \Delta S_2$ sein? Wenn die Entropie einem Erhaltungssatz genügt, muß in der Tat $\Delta S_1 = \Delta S_2$ sein, aber das Problem ist, ob die Entropie überhaupt einem Erhaltungssatz genügt, ob also Entropie nur ausgetauscht oder auch erzeugt und vernichtet werden kann.

Eine Wärmekraftmaschine wie in Abb. 3 heißt allerdings nur dann eine Carnot-Maschine oder eine Maschine, die einen Carnot-Prozeß ausführt, wenn $\Delta S_1 = \Delta S_2$ ist, wenn sie also so arbeitet, daß die Entropie dabei nur ausgetauscht, nicht aber erzeugt oder vernichtet wird.

Die Konsequenzen von Entropieerzeugung und Entropievernichtung

Unabhängig von der Frage, ob und wann eine Wärmekraftmaschine wie in Abb. 3 einen Carnot-Prozeß ausführt, also so arbeitet, daß die Entropie erhalten bleibt, erhebt sich das Problem nach dem allgemeinen Verhalten der Entropie. Erfüllt die Entropie etwa einen Erhaltungssatz wie die Energie,

oder befolgt sie andere charakteristische Regeln? Um diese Frage zu diskutieren, ist es zweckmäßig, unterschiedliche Annahmen über die Entropie zu machen und deren logische Folgen zu untersuchen. Ein Vergleich mit der Erfahrung läßt dann Rückschlüsse zu auf allgemeine Regeln für die Entropie.

1. *Annahme*: Entropie kann generell nur ausgetauscht, nicht aber erzeugt oder vernichtet werden. Die Entropie erfüllt dann ebenso einen allgemein gültigen Erhaltungssatz wie die Energie. Jeder zwischen den Temperaturen 100°C und 30°C ablaufende Kreisprozeß hätte dann $\Delta S_1 = \Delta S_2$ zur Folge und lieferte demgemäß für den Wirkungsgrad $A/\Delta E_2$ nach (11) einen ganz bestimmten Wert, nämlich den Wert (13). Die Transformation von 100°-Wärme in 30°-Wärme müßte, da die Entropie erhalten bleibt, gleichgültig wie die Maschine aussieht, die die Transformation bewirkt, nur auf eine einzige Weise möglich sein und stets denselben Teil der Wärme ΔE_2 in Energie ohne begleitende Entropie, also in Arbeit A , verwandeln.

2. *Annahme*: Entropie kann ausgetauscht und erzeugt, dagegen nicht vernichtet werden. Für jeden Kreisprozeß einer Wärmekraftmaschine bedeutet das $\Delta S_1 \geq \Delta S_2$. Aus (11) folgt damit, daß A höchstens gleich dem in (12) ausgerechneten Wert sein kann. Da eine Maschine nicht mehr Energie abgeben kann als sie aufnimmt, folgt

$$0 \leq A \leq A_{\max} = \left(1 - \frac{T_{30}}{373,15 \text{ K}}\right) \Delta E_2. \quad (15)$$

Bei der Transformation von 100°-Wärme in 30°-Wärme kann somit Arbeit nur bis zu einem Maximalbetrag A_{\max} gewonnen werden, der gleich ist dem Betrag von A , der unter der 1. Annahme der Entropieerhaltung als einzig möglicher Wert von A resultiert. Für Wärmekraftmaschinen, die zwischen zwei Temperaturen arbeiten, gibt es somit einen maximalen Wirkungsgrad $A_{\max}/\Delta E_2$, der nur von den beiden Temperaturen abhängt, nicht aber von der Bauweise der Maschine. Da auch $A=0$ möglich ist, kann 100°-Wärme voll in 30°-Wärme umgewandelt werden.

3. *Annahme*: Entropie kann ausgetauscht und vernichtet, dagegen nicht erzeugt werden. Für jeden Kreisprozeß einer Wärmekraftmaschine bedeutet das $\Delta S_1 \leq \Delta S_2$ und für A analog zu (15)

$$\left(1 - \frac{T_{30}}{373,15 \text{ K}}\right) \cdot \Delta E_2 \leq A \leq \Delta E_2. \quad (16)$$

Bei der Transformation von 100°-Wärme in 30°-Wärme müßte also immer Arbeit A auftreten, und zwar mindestens so viel wie für den Fall der Entropieerhaltung ausgerechnet wurde. Es gäbe einen minimalen Wirkungsgrad für Wärmekraftmaschinen, der gleich dem Carnot-Wirkungsgrad (13) ist. 100°-Wärme wäre zwar voll in Arbeit ($A = \Delta E_2$) verwandelbar, nicht aber voll in 30°-Wärme. Arbeit, also Energie ohne Entropie, könnte in Kreisprozessen nicht in Wärme, also Energie mit Entropie umgewandelt werden.

4. *Annahme*: Entropie kann sowohl erzeugt als auch vernichtet werden. A kann dann alle Werte von Null bis ΔE_2 annehmen. 100°-Wärme könnte durch eine Kreisprozesse ausführende Maschine sowohl voll in Arbeit ($A = \Delta E_2$) als auch voll in 30°-Wärme verwandelt werden. Umgekehrt könnte auch Arbeit voll in Wärme verwandelt werden.

2. Hauptsatz

Die Annahmen und ihre Folgen sind nun mit der Erfahrung zu vergleichen. Die reale Möglichkeit, durch Reibung Wärme zu erzeugen, weist die 1. und 3. Annahme als unzutreffend nach. Man braucht an eine Wärmekraftmaschine nur eine ebenfalls Kreisprozesse ausführende „Reibungsmaschine“ anzuhängen, um jeden Betrag von A in 30°-Wärme zu verwandeln. Somit besteht nur die Möglichkeit, daß die 4. oder die einschneidendere 2. Annahme die Erfahrung richtig beschreibt.

Nun sind die unter der 2. Annahme realisierbaren Vorgänge eine Teilmenge der unter der 4. Annahme möglichen Vorgänge. Jeder Vorgang, der der 2. Annahme genügt, genügt deshalb auch der 4. Es besteht zwar im Prinzip die Möglichkeit, daß es auch Vorgänge gibt, die der 4. Annahme genügen, nicht aber der 2. Tatsächlich genügen aber alle bis heute bekannten Vorgänge der 2. Annahme, so daß wir allen Grund haben zu glauben, daß diese Annahme zutrifft, und daß sie ein allgemeines Naturgesetz darstellt, die weitergehende 4. Annahme jedoch nicht zutrifft. Wir können diesen Glauben zwar nicht endgültig beweisen, aber eine erdrückende Wahrscheinlichkeit spricht für ihn. Diese Situation hat zur Aufstellung des mit der 2. Annahme identischen 2. Hauptsatzes geführt, nämlich, daß *Entropie nur ausgetauscht und erzeugt, aber nicht vernichtet werden kann*. Unmittelbare logische Folgen dieses Hauptsatzes sind:

- Für jede Wärmekraftmaschine, die zwischen zwei gegebenen Temperaturen T_2 und T_1 arbeitet, etwa zwischen der Kesseltemperatur (T_2) und der Temperatur des Kühlwassers oder der Umwelt (T_1), gibt es für die dabei gewinnbare Arbeit einen maximalen Wirkungsgrad $A_{\max}/\Delta E_2$, der allein von den beiden Temperaturen abhängt und der gegeben ist durch den „Carnot-Faktor“ $(T_2 - T_1)/T_2$. Selbst im günstigsten Fall muß also Wärme vom Betrag $(T_1/T_2)\Delta E_2$ an das Kühlwasser abgegeben werden.
- Vorgänge, bei denen keine Entropie erzeugt wird, die Entropie also einem Erhaltungssatz genügt, lassen sich umkehren, sie sind *reversibel*. Vorgänge mit Entropieerzeugung sind dagegen nicht umkehrbar, sie sind *irreversibel*. Eine zwischen zwei Temperaturen arbeitende Wärmekraftmaschine führt demgemäß einen Carnot-Prozeß ($\Delta S_1 = \Delta S_2$) aus, wenn sie reversibel arbeitet.
- Mit einer Wärmekraftmaschine, die den maximalen Wirkungsgrad hat, die also eine Carnot-Maschine ist, läßt sich durch Bestimmung von $A_{\max}/\Delta E_2$ die absolute Temperatur T jedes Wärme liefernden Systems messen.
- Wärme kann ohne äußere Energiezufuhr zwar von höherer Temperatur zu tieferer Temperatur übergehen, nicht aber umgekehrt.
- Will man Wärme der kleineren Temperatur T_1 in Wärme der höheren Temperatur T_2 transformieren, so ist dazu Zufuhr von Energie ohne begleitende Entropie, also von Arbeit erforderlich, und zwar mindestens vom Betrag $A = (T_2 - T_1)/T_1 \times$ Wärmemenge der Temperatur T_1 (Prinzip der Wärmepumpe und des Kühlschranks).

3. Schlußbemerkungen

Um die Entropie in die Reihe der vertrauten Größen zu rücken, haben wir bisher nur den ersten, allerdings wichtigsten Schritt getan. Will man ein Gefühl für die vielseitige Verwendbarkeit dieser Größe gewinnen und sie wirklich handhaben können, muß man ihre Wirksamkeit an möglichst vielen verschiedenen Beispielen erproben. Die Analogie zwischen der Entropie in der Wärme und dem Wasser in der Milch leistet dabei eine gute Hilfestellung, aber sie ist natürlich eine Krücke, die man nur so lange braucht, wie man sich noch nicht

sicher bewegen kann. Dennoch sollte man vor dieser Analogie keine Angst haben. Sie bedeutet keinen Mangel an Strenge. Es ist gut, sich die Entropie eines Körpers, allgemein eines physikalischen Systems so vorzustellen wie eine im Körper enthaltene Menge eines Stoffs – so wie Carnot sich sein „Caloricum“ dachte. Je wörtlicher diese Vorstellung genommen wird, um so besser ist das Bild, das man von der Entropie gewinnt. Daß dieser Stoff keinem Erhaltungssatz genügt, sondern erzeugt, jedoch nicht vernichtet werden kann, macht der menschlichen Phantasie nicht allzuviel Schwierigkeit; man vergegenwärtige sich nur, wie wenig Vorstellungsschwierigkeiten der ständig Hirse erzeugende Hirsetopf im Märchen bereitet.

Um die Entropie in ihren Anwendungen zu üben, also Energie- und Entropiebilanzen typischer Vorgänge im Detail zu verfolgen und, wenn es geht, sogar quantitativ aufzustellen, führen wir noch einige Beispiele an. Es sind gleichzeitig Beispiele dafür, daß die traditionelle Tendenz, mit dem Begriff der Wärme allein auszukommen und die Entropie zu umgehen, zu Unzulänglichkeiten und mangelndem Durchblick führt, ein Thema, das im nachfolgenden Aufsatz von *W. Ruppel* ausführlich behandelt wird.

- Das uns so vertraute Aufheizen eines Körpers oder „Systems“, etwa der Luft in einem Zimmer, besteht darin, daß dem System Energie zugeführt wird und seine Entropie S dabei um dS zunimmt. Wird die gesamte Entropiemenge dS , um die sich die Entropie des Systems erhöht, dem System von außen zugeführt, so erfolgt die Aufheizung durch (reversible) Zufuhr von Wärme. Der andere Extremfall, in dem die gesamte Entropiemenge dS bei der Energiezufuhr erzeugt wird (maximale Irreversibilität), liegt beim elektrischen Heizen vor. Dazwischen liegen all die Fälle, in denen ein Teil der Entropiemenge dS zugeführt und der restliche Teil erzeugt wird. Sie werden realisiert, wenn ein System mit höherer Temperatur ein System mit tieferer Temperatur erwärmt.

- Die Frage, wie die Temperatur T eines Systems sich ändert, wenn es „erwärmt“ wird, läßt sich mit Kenntnis der dem Erwärmungsprozeß zugeordneten Wärmekapazität (spezifische Wärme) des Systems beantworten. Das Wort „Erwärmen“ wird traditionell als „Zufuhr von Energie“ verstanden, eine Wärmekapazität demgemäß als ein Zusammenhang zwischen zugeführter Energie und Temperaturerhöhung aufgefaßt. Dabei muß man jedoch sorgfältig unterscheiden zwischen dem zugeführten Ener-

giebetrag und dem Teil davon, der zur Erhöhung dE der Energie E des Systems verwandt wird. Nur, wenn der ganze zugeführte Energiebetrag zur Erhöhung dE der Energie E des Systems verwendet wird, ist die Wärmekapazität gleich dE/dT . Allgemein sind Wärmekapazitäten Angaben darüber, wie die Entropie S eines Systems mit der Temperatur zunimmt. Jede Wärmekapazität ist nämlich ein Ausdruck der Form $T \partial S(T, \dots) / \partial T$, wobei die Punkte für irgendwelche konstant zu haltenden Variablen stehen.

- Wenn bei der Energieaufnahme eines Systems dieses von seinen (als unabhängig gewählten) mengenartigen Größen allein seine Entropie S ändert, so besteht zwischen den Änderungen dE der Energie E des Systems und den Änderungen dS der Entropie S des Systems die Beziehung $dE = T dS$. Wächst z.B. die Energie E des Systems proportional mit T an, ist also $E = CT + \text{const.}$, so nimmt die Entropie S wegen $dE = C dT = T dS$ proportional $C \ln(T/T_0)$ zu. S wächst also wesentlich langsamer als E mit der Temperatur T . Die Konstante $C = T dS/dT$ ist die Wärmekapazität des Systems.
- Beim Übergang von Wärme höherer Temperatur T_2 in Wärme tieferer Temperatur T_1 , gleichgültig ob durch Wärmeleitung, Strahlung oder sonst wie, erzwingt die Energieerhaltung die Beziehung $T_2 \Delta S_2 = T_1 \Delta S_1$. Hieraus ergibt sich die Zunahme der Entropie, nämlich $\Delta S_1 - \Delta S_2 = (T_2/T_1 - 1) \Delta S_2$.
- Licht, auch Sonnenlicht, ist ein Transport von Energie und Entropie, also Wärme. Sonnenlicht ist Wärme der Temperatur $T \approx 6000$ K. Wärme dieser Temperatur (wie überhaupt Wärme von $T \gtrsim 800$ K) ist „sichtbar“. Das Sonnenlicht liefert der Erde mit jeder Wattsekunde an Energie den Entropiebetrags $(1/6000)$ Ws/K. Die von der Erde im Zeitmittel *abgegebene* Strahlung ist ein Strom von Wärme der Temperatur 250 K (das folgt aus der Energieerhaltung und dem Stefan-Boltzmann-Gesetz). Die Entropie wird also auf der Erde durch Erzeugung um den Faktor $6000/250 = 24$ gegenüber der ankommenden Entropie erhöht.
- Bei chemischen Reaktionen, wie etwa der durch (1) beschriebenen Verbrennung von H_2 und O_2 zu H_2O , pflegt man die Reaktionswärme ΔH (thermodynamisch „Reaktionsenthalpie“, wenn die Reaktion bei konstantem Druck vor sich geht) anzugeben. Für die genannte Reaktion

beträgt sie bei $T = 400$ K: $\Delta H(H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O) = 242,9 \cdot 10^3$ Ws/Mol. Diese Angabe ist ebenso unvollständig, als wenn man bei Wärme nur die gelieferte Energiemenge angäbe, nicht aber die Temperatur oder die mit der Wärme gelieferte Entropiemenge. Tatsächlich gelten die folgenden Bilanzen: Beim Übergang von 1 Mol H_2 und $\frac{1}{2}$ Mol O_2 bei $T = 400$ K und $p = 1$ bar in 1 Mol dampfförmiges H_2O derselben Temperatur $T = 400$ K und desselben Drucks $p = 1$ bar ändern sich die Enthalpie ($H = E + pV$) und die Entropie um die Beträge

$$\begin{aligned} \Delta H &= H(H_2 + \frac{1}{2} O_2, T = 400 \text{ K}, p = 1 \text{ bar}) \\ &\quad - H(H_2O, T = 400 \text{ K}, p = 1 \text{ bar}) \\ &= 242,9 \cdot 10^3 \text{ Ws/Mol}, \\ \Delta S &= S(H_2 + \frac{1}{2} O_2, T = 400 \text{ K}, p = 1 \text{ bar}) \\ &\quad - S(H_2O, T = 400 \text{ K}, p = 1 \text{ bar}) \\ &= 47,2 \text{ Ws/(Mol} \cdot \text{K)}. \end{aligned} \quad (17)$$

Bemerkenswert daran ist, daß die Entropie des Zustands, in dem nur Wasserdampf vorhanden ist, um den angegebenen Betrag *kleiner* ist als die Entropie des Zustands, in dem H_2 und O_2 getrennt vorliegen. Wegen der Unmöglichkeit, Entropie zu vernichten, muß die Reaktionsentropie ΔS an ein anderes System, etwa die Umgebung, abgegeben werden. Geschieht das bei $T = 400$ K, so ist mit diesem Entropiebetrags die Wärmemenge $T \Delta S = (400 \text{ K}) \cdot (47,2 \text{ Ws/Mol} \cdot \text{K}) = 18,9 \cdot 10^3$ Ws/Mol an die Umgebung abzugeben. Als Nicht-Wärme, also etwa elektrische Energie, läßt sich bei der Reaktion maximal somit der Betrag gewinnen:

$$\begin{aligned} \Delta H - T \Delta S &= (242,9 - 18,9) \cdot 10^3 \text{ Ws/Mol} \\ &= 224 \cdot 10^3 \text{ Ws/Mol}. \end{aligned} \quad (18)$$

Das sind etwa 92% der Reaktionswärme. Um diesen Energiebetrag voll als elektrische Energie zu erhalten, muß die Reaktion allerdings ohne Entropieerzeugung, also reversibel, ablaufen. Anderenfalls muß außer dem in (17) angegebenen Entropiebetrags ΔS auch noch die erzeugte Entropie abgegeben werden, was eine zusätzliche Abgabe von Energie in der Form von Wärme verlangt, um die sich der im günstigsten Fall als Nicht-Wärme verfügbare Energiebetrag (18) vermindert. Einen reversiblen Reaktionsablauf erreicht man relativ gut in einer Brennstoffzelle. Ließe man die gleiche Reaktion nicht bei 400 K ablaufen, sondern bei 1200 K, so ändern sich die Zahlen in

$$\begin{aligned} \Delta H - T \Delta S &= (249 - 67,3) \cdot 10^3 \text{ Ws/Mol} \\ &= 181 \cdot 10^3 \text{ Ws/Mol}. \end{aligned}$$

Maximal, also bei reversibler Reaktionsführung, können dann nur etwa $\frac{3}{4}$ der Reaktionswärme als elektrische Energie gewonnen werden. Das hat seinen Grund vor allem darin, daß wenn eine bestimmte Menge Entropie bei höherer Temperatur abgegeben wird, diese mehr Energie mit sich nimmt, als wenn sie bei tieferer Temperatur abgegeben wird.

Die Beispiele machen deutlich, daß die Bilanz der Entropie in fast allen physikalischen Problemen eine wichtige Rolle spielt. Überall kann die Entropie angesehen werden als ein Maß des Wertes der Energie. Wird Entropie erzeugt, so hat das eine Entwertung, oder wie man auch sagt, eine *Dissipation* von Energie zur Folge, die nur um den Preis rückgängig zu machen ist, daß „Abfall-Energie“ abgegeben wird, die die Entropie mitnimmt. Diese Abfall-Energie wird an ein System abgegeben, das als „Abfalleimer“ dient. Meist spielt unsere irdische Umwelt die Rolle dieses Abfalleimers, manchmal,

wie im Fall der von der Erde emittierten Strahlung, der Weltraum.

Mancher Leser mag enttäuscht sein, nichts von den Dingen zu finden, die gewohntermaßen, besonders in popularisierenden Darstellungen mit dem Begriff Entropie verknüpft werden, nämlich Unordnung, Wahrscheinlichkeit und Einseitigkeit des Zeitablaufs. Der Grund ist, daß man auf diesem Weg die Entropie nicht so in die Hand bekommt, daß man mit ihr arbeiten kann. Diese Begriffe haben ihre Berechtigung, wenn es darum geht, mehr das Transzendenzbedürfnis des Lesers anzusprechen als ihn mit der konkreten Arbeitsweise der Physik und ihren Anwendungen vertraut zu machen. Wollte man ernsthaft auf Fragen eingehen wie die nach der wissenschaftlichen Bedeutung des Wahrscheinlichkeitsbegriffs oder der Zeitrichtung, brauchte man weit mehr Raum als wir hier zur Einführung der Entropie und ihrer praktischen Verwendung aufgewendet haben.

Entropie und Wärme*

Einleitung

In den vorausgegangenen Aufsätzen wurde als eine unter zahlreichen Energieformen TdS =(absolute Temperatur)·d(Entropie) eingeführt und als „Wärme“ bezeichnet. Das Thema dieser Arbeit ist, ob TdS tatsächlich genau unter allen Umständen dem entspricht, was man herkömmlich Wärme nennt. Nennt man also jede Energieänderung eines Systems in der Form TdS Wärme? Läßt sich ferner umgekehrt jede „Wärme“ als eine Energieänderung TdS eines Systems schreiben? Wir werden sehen, daß beide Fragen mit nein zu beantworten sind. Wenn TdS und der herkömmliche Begriff „Wärme“ aber nicht identisch sind, stellt sich die Frage, welcher Begriff der bessere ist, nämlich der für das Verständnis von physikalischen, chemischen und technischen Vorgängen geeignetere und bei der Beschreibung von Naturvorgängen tragfähigere. Die Antwort wird zugunsten von TdS ausfallen.

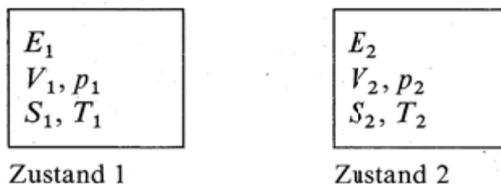
Da die Energieänderung in der Form TdS an die Variablenänderung dS geknüpft ist, fixiere der Leser seine Aufmerksamkeit hauptsächlich auf die Änderung dS der Entropie S . Damit dient dieser Aufsatz dem Ziel, den Umgang mit der Entropie statt mit der Wärme nahelegen und den Gewinn an physikalischem Verständnis bei Verwendung der Entropie statt der Wärme zu zeigen.

Die Probleme werden stets an Beispielen diskutiert werden, jedoch so, daß die Verallgemeinerungen auf der Hand liegen.

1. Prozesse

Zum Verständnis unseres Themas wesentlich ist die Unterscheidung zwischen „Prozessen“ und der „Realisierung von Prozessen“. In diesem Abschnitt beschäftigen wir uns mit Prozessen, im nächsten Abschnitt mit deren Realisierung.

Wir betrachten ein System in zwei verschiedenen Zuständen, und zwar das System „Gas mit fester Teilchenzahl“. In einem Zustand haben die Größen des Systems, also hier die Energie E , das Volumen V , der Druck p , die Entropie S und die Temperatur T bestimmte Werte. Es ist also im Zustand 1 und Zustand 2:



Man beachte, daß die Zustände 1 und 2 Zustände desselben Systems sind. Das heißt nicht, daß das Gas in den beiden Zuständen dasselbe sein muß in dem Sinne, daß das Gas jedesmal aus denselben individuellen Einzelmolekülen bestünde. Sogar die Frage der Individualität der Gase in den beiden Zuständen ist thermodynamisch sinnlos. Ein Sy-

stem ist nur dadurch festgelegt, wie die Werte aller physikalischen Größen an ihm zusammenhängen.

Eine Zustandsänderung des Systems bezeichnet man als *Prozeß*. Die Änderung dE der Energie E unseres Systems ist mit der Änderung dS und dV der unabhängig voneinander variablen Größen verknüpft durch

$$dE = TdS - pdV.$$

Wir betrachten jetzt einen speziellen Prozeß des Systems „Ideales Gas mit fester Teilchenzahl“, und zwar einen isothermen Prozeß, bei dem also $T = \text{const}$. Da das System ein ideales Gas ist, ist $p = NkT/V$, wobei N die Teilchenzahl darstellt. Da es sich um ein *ideales* Gas handelt, läßt sich ferner aussagen, daß bei einem isothermen Prozeß $dE = 0$. Faßt man nämlich E auf als $E = E(T, V)$, so ist

$$dE(T, V) = \frac{\partial E(T, V)}{\partial T} dT + \frac{\partial E(T, V)}{\partial V} dV.$$

In dieser Gleichung verschwindet auf der rechten Seite bei einem isothermen Prozeß wegen $dT = 0$ der erste Term. Für ein ideales Gas verschwindet

* Die Gedanken dieses Aufsatzes sind eingehender und ausführlicher dargestellt und eingeordnet in den begrifflichen Aufbau der gesamten Thermodynamik in Falk-Ruppel, „Energie und Entropie“, Springer-Verlag, 1976.

auch der zweite Term rechts, da der zuerst von *Gay-Lussac* und *Joule* ausgeführte Versuch der freien Expansion zeigt, daß für ein ideales Gas gilt $\partial E(T, V)/\partial V=0$, bei ihm also die Energie bei konstanter Temperatur nicht vom Volumen abhängt.

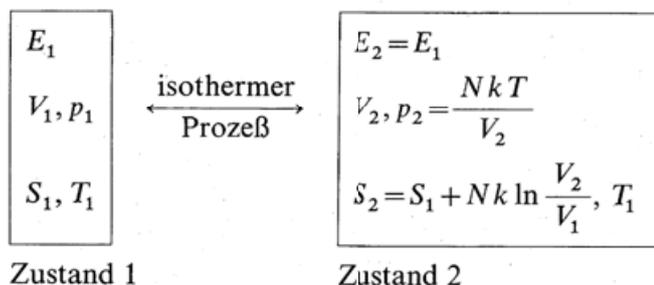
Ein isothermer Prozeß des Systems „Ideales Gas mit fester Teilchenzahl“ wird damit beschrieben durch

$$0 = TdS - NkT \frac{dV}{V}.$$

Die Integration dieser Gleichung liefert für die Differenz $S_2 - S_1$ der Entropie in den Zuständen 1 und 2, in denen $V=V_1$ bzw. $V=V_2$ vorgegeben ist,

$$S_2 - S_1 = Nk \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

Man hat also für das System „Ideales Gas mit fester Teilchenzahl“:



Man beachte, daß bisher nur von Systemen, Zuständen und Prozessen die Rede war. Nicht die Rede war bisher davon, *wie* ein Prozeß ausgeführt wird, ob dabei Wärme oder Arbeit dem System zugeführt oder von ihm abgegeben wird. Die thermodynamische Beschreibung eines Prozesses enthält hierüber auch keine Aussagen. Sie gibt lediglich die Verknüpfung von Variablenänderungen des Systems an, hier von dE mit dS und dV . Es ist also gleichgültig, wie diese Größenänderungen experimentell ausgeführt werden.

2. Realisierung von Prozessen

Erst die *Realisierung* von Prozessen gibt Auskunft darüber, *wie* die Größenänderung bei einem Prozeß bewerkstelligt wird. Wie wir sehen werden, hängt die Frage, ob TdS bei einem Prozeß Wärme genannt wird, aufs engste mit der Frage nach der Realisierung eines Prozesses zusammen. Wir erörtern diese Frage an dem Beispiel des isothermen Prozesses des Systems „Ideales Gas mit fester Teil-

chenzahl“, wobei wir zwei Extremfälle der Realisierung dieses Prozesses diskutieren, die *reversible* und die *total irreversible* Realisierung.

Reversible Realisierung

Bei der reversiblen Realisierung werden die Energiebeträge TdS und $-pdV$ mit der „Umgebung des Systems“ *ausgetauscht*. Wir benutzen das Wort „austauschen“ als Abkürzung für „aufnehmen oder abgeben“. Die Umgebung des Systems ist ein anderes System als dasjenige System, dessen isotherme Expansion wir im Auge haben. Die Umgebung ist nicht notwendig die räumliche Umgebung des Systems, sie ist überhaupt kein geometrischer Begriff. Sie ist vielmehr die Bezeichnung für dasjenige System, mit dem das ideale Gas wechselwirkt, mit dem es also Größen austauscht. Bei der isothermen Expansion ist die Umgebung einmal ein „Wärmereservoir“. Das ist eine Vorrichtung, die Entropie abgeben kann, ohne ihre Temperatur dabei zu ändern. Aus dem Wärmereservoir nimmt das ideale Gas bei der reversibel realisierten isothermen Expansion den Entropiebetrag dS und damit den Energiebetrag TdS auf. dS und TdS werden mit der Umgebung *ausgetauscht*. Entsprechend wird der Energiebetrag $-pdV$ an die Umgebung abgegeben. Das bedeutet, daß das expandierende Gas über einen Kolben und ein Gestänge (in beliebiger Entfernung vom Gas) etwa ein Gewicht hebt, eine Feder spannt, ein anderes Gas komprimiert oder eine Motorwelle dreht. Diese Anordnungen bilden ebenfalls einen Teil der Umgebung.

TdS und $-pdV$ werden bei der reversiblen Realisierung des Prozesses mit der Umgebung ausgetauscht, wie in Abb. 1 oben links dargestellt und darunter in abstrahierter Form wiederholt. *Der bei einer reversiblen Realisierung eines Prozesses ausgetauschte Energiebetrag TdS wird allgemein als Wärme bezeichnet.*

Wesentlich bei der reversiblen Realisierung eines Prozesses ist, daß die Entropieänderung des Systems *ausschließlich auf Austausch* mit der Umgebung beruht. Während die Entropieänderung $S_2 - S_1$ des Systems positiv oder negativ sein kann ($S_2 - S_1 > 0$ bei isothermer Expansion eines idealen Gases, $S_2 - S_1 < 0$ bei isothermer Kompression), ist die Summe der Entropieänderung von System + Umgebung bei reversibler Prozeßrealisierung konstant. Diese Verallgemeinerung auf beliebige Prozesse von beliebigen Systemen ist ebenfalls in der Abb. 1 eingetragen.

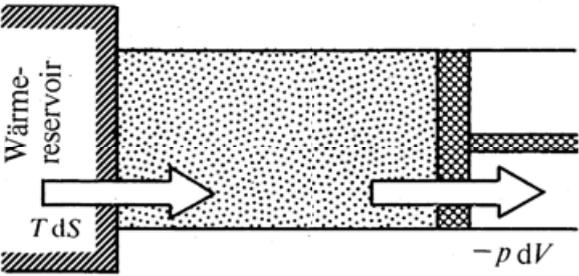
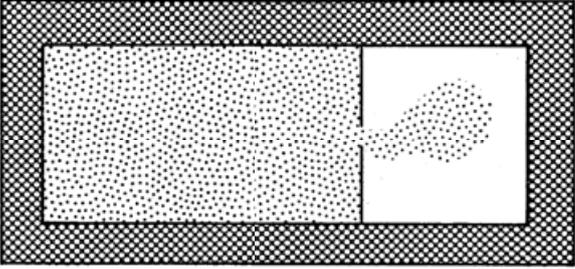
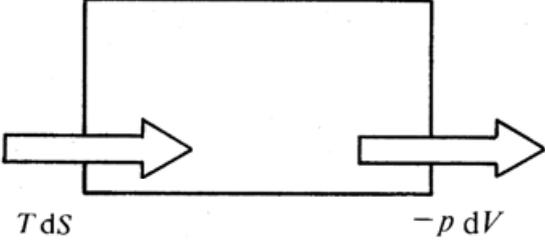
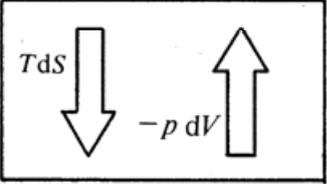
reversibel	irreversibel
Prozeß: Isotherme Expansion eines idealen Gases mit fester Teilchenzahl	
	
	
Entropiebilanz beliebiger Prozesse	
$S_2 + S_{2, \text{Umgebung}} = S_1 + S_{1, \text{Umgebung}}$	$S_2 + S_{2, \text{Umgebung}} > S_1 + S_{1, \text{Umgebung}}$
Entropiebilanz von Kreisprozessen	
$S_2 = S_1, V_2 = V_1, \dots$ $S_{2, \text{Umgebung}} = S_{1, \text{Umgebung}}$	$S_2 = S_1, V_2 = V_1, \dots$ $S_{2, \text{Umgebung}} > S_{1, \text{Umgebung}}$

Abb. 1 Verschiedene Realisierungen desselben Prozesses

Die übliche Formulierung $dS = \frac{dQ_{\text{rev}}}{T}$

ist damit so zu lesen, daß

bei reversibler Realisierung:

$$T dS = T dS_{\text{ausgetauscht}}$$

oder einfach

bei reversibler Realisierung:

$$dS = dS_{\text{ausgetauscht}}$$

In der Abb. 1 ist schließlich noch die speziell für einen Kreisprozeß folgende Entropiebilanz angegeben. Bei einem Kreisprozeß, unabhängig davon, ob reversibel realisiert oder nicht, haben alle Größen des Systems, also auch die Entropie, am Ende des Prozesses denselben Wert wie am Anfang. Bei einem reversibel realisierten Kreisprozeß hat auch die Entropie der Umgebung denselben Wert wie zu Beginn des Prozesses.

Total irreversible Realisierung

Bei einer irreversiblen Realisierung eines Prozesses wird Entropie nicht nur mit der Umgebung ausgetauscht, sondern auch *erzeugt*. Im Extremfall der total irreversiblen Realisierung wird überhaupt keine Entropie ausgetauscht, sondern nur erzeugt (Abb. 1 rechte Seite).

Um den Entropieaustausch des idealen Gases mit der Umgebung bei der Expansion zu unterbinden, werde es „adiabatisch“ abgeschlossen, d.h. in entropieundurchlässige Wände, einen Styropor-Kasten eingeschlossen. Der adiabatische Abschluß ist nichts weiter als die experimentelle Ausführung der Realisierungsanweisung $dS_{\text{ausgetauscht}} = 0$. „Adiabatisch“ ist also keine Prozeßvorschrift wie „isotherm“ ($dT=0$) oder „isentrop“ ($dS=0$). Soll ein Expansions- oder Kompressionsprozeß unter adiabatischem Abschluß z.B. reversibel realisiert sein,

so ist wegen des adiabatischen Abschlusses ($dS_{\text{ausgetauscht}}=0$) und der reversiblen Realisierung ($dS_{\text{erzeugt}}=0$) überhaupt $dS=0$. Es handelt sich dann also um einen isentropen Prozeß. Leider ist es verbreitet, die Wörter „adiabatisch“ und „isentrop“ ohne Unterscheidung zu gebrauchen, was sicher darauf beruht, daß vor allem bei der Durchrechnung thermodynamischer Übungsaufgaben fast immer mehr oder weniger stillschweigend eine reversible Prozeßrealisierung angenommen wird.

Der synonyme Gebrauch von „adiabatisch“ und „isentrop“ führt in die Irre, sobald man, wie wir hier, auch irreversibel realisierte Prozesse unter adiabatischem Abschluß betrachtet. Während beim reversibel realisierten Expansions- oder Kompressionsprozeß unter adiabatischem Abschluß das Gas Kompressionsenergie $-p dV$ mit der Umgebung austauscht, wobei sich seine Energie E ändert, gibt das Gas bei irreversibler Realisierung des Expansionsprozesses unter adiabatischem Abschluß dabei keine Kompressionsenergie $-p dV$ nach außen ab. Das Gas in der Abb. 1 rechts oben strömt durch ein Loch in Vakuum. Dabei nimmt die Energie E des Gases in der Form $-p dV$ ab. (Man wende nicht ein, das Gas leiste doch gegen den Druck $p=0$ Arbeit, also sei $-p dV=0$; die Größe p bezeichnet vielmehr den Druck des Gases, also $p>0$). Gleichzeitig nimmt die Entropie des Gases zu, so daß die Energie des Gases in der Form $T dS$ zunimmt. Das System tauscht keine Energie mit der Umgebung aus. Da das System ein ideales Gas ist, ist mit $dE=0$ auch $T=\text{const}$. Es handelt sich also um einen isothermen Prozeß des idealen Gases, der unter adiabatischem Abschluß irreversibel realisiert ist. Niemand käme auf die Idee, daraus zu folgern, „adiabatisch“ und „isotherm“ seien synonyme Begriffe. Deren Gleichsetzung ist ebenso unzulässig wie die von „adiabatisch“ und „isentrop“.

Die Energieänderung des Systems in den Formen $T dS$ und $-p dV$ bleibt bei der irreversiblen Realisierung „intern“. Das ist durch die beiden senkrechten Pfeile rechts in der Abb. 1 dargestellt. Die Entropieänderung des Systems beruht bei der total irreversiblen Realisierung des Prozesses ausschließlich auf *Erzeugung* von Entropie; es wird dabei keine Entropie mit der Umgebung ausgetauscht. Bei einem beliebigen irreversibel realisierten Prozeß, bei dem neben dem Austausch von Entropie mit der Umgebung stets Entropie erzeugt wird, ist ganz allgemein die Entropie von System und Umgebung insgesamt am Ende des Prozesses größer als am Anfang. Speziell bei einem Kreisprozeß, bei dem ja $S_2=S_1$ ist, ist darum bei irreversibler

Realisierung $S_{2, \text{Umgebung}} > S_{1, \text{Umgebung}}$. Das heißt nicht, daß die Entropie in der Umgebung erzeugt worden wäre. Sie kann ebensogut im System erzeugt worden sein, ist dann aber beim Kreisprozeß, der ja $S_2=S_1$ erzwingt, an die Umgebung abgegeben worden.

Für einen irreversibel realisierten Prozeß ist die Gleichung üblich

$$dS > \frac{dQ_{\text{irr}}}{T}$$

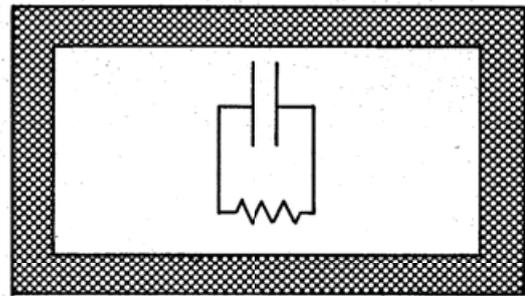
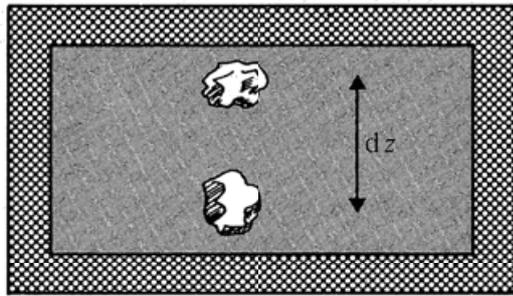
Hierbei bedeutet dQ_{irr} wieder $T dS_{\text{ausgetauscht}}$. Der Index irr zeigt also nur an, daß die Ungleichung sich auf eine *irreversible Realisierung* des Prozesses bezieht. In der Formulierung der ausgetauschten und erzeugten Entropiemengen ist diese Gleichung so zu lesen, daß für die gesamte Entropieänderung dS des Systems, nämlich die Summe aus ausgetauschter und erzeugter Entropie, gilt, daß für einen Prozeß

bei irreversibler Realisierung:	$T dS > T dS_{\text{ausgetauscht}}$
oder einfach	
bei irreversibler Realisierung:	$dS > dS_{\text{ausgetauscht}}$

Das mit der erzeugten Entropie verknüpfte $T dS_{\text{erzeugt}}$ wird in dem Beispiel der irreversibel realisierten isothermen Expansion eines Gases üblicherweise nicht Wärme genannt. Man könnte daher die Vermutung haben, $T dS_{\text{ausgetauscht}}$ würde allgemein als Wärme bezeichnet, $T dS_{\text{erzeugt}}$ dagegen nie. Diese Vermutung, die auch daraus folgt, daß man in der Ungleichung $T dS > dQ_{\text{irr}}$ die rechte Seite Wärme nennt, ist nun leider nicht richtig. Der Gebrauch des Wortes Wärme ist so verworren und hat sich historisch so wenig im Einklang mit dem Kalkül der Thermodynamik entwickelt, daß das Wort „Wärme“, ganz im Gegensatz zur „Entropie“, mehr ein Hindernis als ein Hilfsmittel beim Verständnis der Thermodynamik ist. Das wird sich aus den folgenden Betrachtungen ergeben.

3. Reibungswärme und Joulesche Wärme

Die Abb. 2 zeigt links einen in einer viskosen Flüssigkeit im homogenen Schwerfeld der Erde mit konstanter Geschwindigkeit unter adiabatischem Abschluß fallenden Körper. Verschiebungsenergie des Schwerfelds wird in Energie der Form $T dS$ umgewandelt, so daß für den gezeigten Prozeß des



System:

Körper + Flüssigkeit + Schwerfeld

Kondensator + Widerstand

Prozeß:

$$dE = -mg dz + T dS = 0$$

$$dE = V dQ + T dS = 0$$

Bei total irreversibler Prozeßrealisierung:

$T dS_{\text{erzeugt}} = mg dz$ nennt man
Reibungswärme

$T dS_{\text{erzeugt}} = -V dQ$ nennt man
Joulesche Wärme

Abb. 2 Reibungswärme und Joulesche Wärme als Beispiele für die Verwendung des Wortes Wärme bei total irreversiblen Prozeßrealisierungen

Systems „Körper + Flüssigkeit + Schwerfeld“ gilt, daß

$$dE = -mg dz + T dS = 0.$$

Der Entropiebetrag

$$dS = \frac{mg}{T} dz$$

wird *erzeugt*. Trotzdem bezeichnet man $T dS$ als *Reibungswärme*.

Genauso verhält es sich mit der Jouleschen Wärme. Die Abb. 2 zeigt rechts einen geladenen Kondensator, der sich unter adiabatischem Abschluß durch einen Widerstand entlädt. Der Prozeß des Systems „Kondensator + Widerstand“ lautet

$$dE = U dQ + T dS = 0.$$

U ist die Spannung am Kondensator und dQ die irgendeinen Leitungsquerschnitt passierende Ladungsmenge. Der Entropiebetrag

$$dS = -\frac{U}{T} dQ$$

ist wieder *erzeugt* ($dS > 0$), aber das zugehörige $T dS$ nennt man *Joulesche Wärme*, obwohl, wie im Falle der Reibungswärme, keine ausgetauschte Entropie im Spiele ist. Es sei noch einmal ausdrücklich darauf hingewiesen, daß Reibungswärme und

Joulesche Wärme nicht etwa das dQ_{irr} in der Gleichung $T dS > dQ_{\text{irr}}$, sondern das $T dS$ auf der *linken* Seite dieser Gleichung darstellen, das im Fall der freien Expansion gerade nicht Wärme genannt wird!

Die Joulesche Wärme gibt Anlaß zu einer Bemerkung zur *Messung der Entropie*. Die Gleichungen $T dS = dQ_{\text{rev}}$ und $T dS > Q_{\text{irr}}$ suggerieren die Auffassung, daß nur reversibel realisierte Prozesse zur Entropiemessung geeignet seien. Tatsächlich bietet sich aber gerade die Erzeugung Joulescher Wärme, also ein total irreversibel realisierter Prozeß, dem Experimentator zur Messung von Entropiedifferenzen an. Integriert man nämlich in der letzten Gleichung das erzeugte dS und mißt man $U(t)$, $T(t)$ und $-dQ(t)/dt = I(t)$ in Abhängigkeit von der Zeit t , so erhält man für die Entropiedifferenz $S_2 - S_1$ zwischen zwei Zuständen 1 und 2

$$S_2 - S_1 = + \int_1^2 \frac{U}{T} dQ = \int_{t_1}^{t_2} \frac{U(t) I(t)}{T(t)} dt.$$

Bei der praktischen Messung wird man natürlich statt des Kondensators eine Batterie verwenden und nur den Widerstand adiabatisch abschließen, also thermisch isolieren. Unter dem Widerstand ist dabei nicht nur der Heizdraht zu verstehen, sondern das ganze geheizte Objekt. S ist dann die Entropie dieses Objekts.

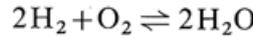
4. Chemische Reaktionen

Können wir jetzt eine Antwort darauf geben, was Wärme genannt wird, wobei auch Reibungswärme und Joulesche Wärme berücksichtigt werden? Zur Beantwortung denken wir uns die Entropie S als Funktion der Temperatur T , des Volumens V und eventueller weiterer Variablen ausgedrückt. Dann lautet ihr totales Differential, multipliziert mit T ,

$$T dS(T, V, \dots) = T \frac{\partial S}{\partial T} dT + T \frac{\partial S}{\partial V} dV + \dots$$

Unsere Betrachtungen haben gezeigt: Bei *reversibler* Realisierung eines Prozesses, wenn also dS ausgetauscht wird, wird das gesamte $T dS$, nämlich die Summe aller Terme der rechten Seite dieser Gleichung, herkömmlich Wärme genannt, bei *irreversibler* Realisierung eines Prozesses hingegen *nur der erste Term* auf der rechten Seite, $T(\partial S/\partial T)dT$. Bei der isothermen Expansion des idealen Gases ist dieser Term Null und nur der zweite Term auf der rechten Seite von Null verschieden. Daher spricht man dort bei irreversibler Realisierung nicht von Wärme. Im Falle der Reibungswärme und Jouleschen Wärme dagegen ist S eine Funktion nur von T , so daß $T dS$ mit dem ersten Term auf der rechten Seite identisch ist. Somit wird in diesem Fall das gesamte $T dS$ Wärme genannt, obwohl dS erzeugt ist.

Eine wichtige Anwendung der hier genannten Gebrauchsanweisung für die übliche Verwendung des Wortes Wärme stellen die chemischen Reaktionen dar. Bei ihnen treten neben T und V als weitere Variablen die Teilchenzahlen N_i der einzelnen Reaktionspartner hinzu. Beispielsweise bei der Knallgasreaktion



ändert sich die Gesamtteilchenzahl bei Ablauf der Reaktion von links nach rechts um den Faktor $2/3$.

Hat man insgesamt n Reaktionspartner und läßt man die chemische Reaktion unter adiabatischem Abschluß und bei konstantem Volumen, also bei $dV=0$, ablaufen, handelt es sich um eine total irreversible Realisierung des Prozesses

$$dE = T dS + \sum_{i=1}^n \mu_i dN_i = 0.$$

Die Energie nimmt, wie Abb. 3 zeigt, in der Form $T dS$ zu, gleichzeitig aber in der Form der Summe der chemischen Energie aller Reaktionspartner (μ_i =chemisches Potential, N_i =Teilchenzahl des i -ten Reaktionspartners) ab. Diese Abnahme ist analog der Energieabnahme in den Formen Kompressionsenergie, Verschiebungsenergie und elektrische Energie bei den bisher betrachteten Beispielen total irreversibel realisierter Prozesse. Bei allen diesen Prozessen nimmt aber die Energie in der Form

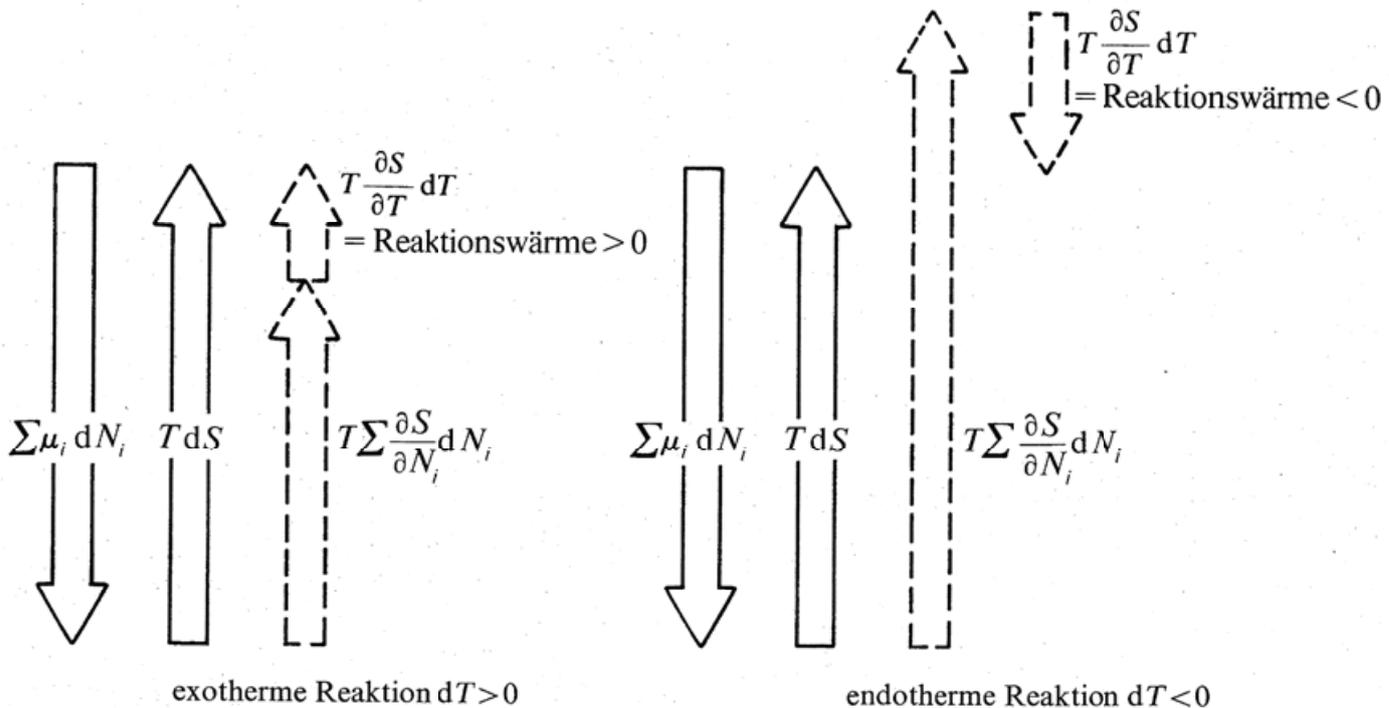


Abb. 3 Darstellung der Reaktionswärme

TdS zu, das wir im Falle der chemischen Reaktion schreiben als

$$TdS(T, N_1, \dots, N_n) \\ = T \frac{\partial S}{\partial T} dT + T \frac{\partial S}{\partial N_1} dN_1 + \dots + T \frac{\partial S}{\partial N_n} dN_n.$$

Wieder nur den *ersten Term* auf der rechten Seite nennt man *Reaktionswärme*. Dieser Term kann positiv oder negativ sein, je nachdem, wie groß die Entropieerhöhung in Abhängigkeit von der Teilchenzahländerung aller Reaktionspartner ist. Da $T > 0$ und allgemein $\partial S / \partial T > 0$ ist, zeigt sich eine positive Reaktionswärme in einem $dT > 0$ (exotherme Reaktion) und eine negative Reaktionswärme in einem $dT < 0$ (endotherme Reaktion). Der Anteil von TdS , der auf der Temperaturabhängigkeit von S beruht, hat also bei exothermen Reaktionen positives Vorzeichen. Bei endothermen Reaktionen dagegen hat der erste Anteil negatives Vorzeichen.

Exotherme chemische Reaktionen sind bei Zimmertemperatur häufiger als endotherme Reaktio-

nen. *Berthelot* und *Thomson* sahen daher in einer positiven Reaktionswärme ein Maß für den Antrieb zu einer chemischen Reaktion. Später erkannte man dieses Prinzip als falsch. Das richtige Maß ist, wie unsere Betrachtungen zeigen, nicht die Reaktionswärme, sondern TdS oder noch besser dS , die beide stets positiv sind.

Der Leser mag nach der Lektüre dieses Artikels über die Begriffe Wärme und Entropie womöglich noch mehr verwirrt sein als vorher. Das ist sicher nicht der Zweck dieses Aufsatzes. Wenn der Leser aber den Eindruck gewonnen hat, daß seine Verwirrung von der historisch bedingten Verwendung des Wortes Wärme in Physik, Chemie und Technik herrührt und nicht von der Größe Entropie, ist diese Verwirrung heilsam. Er wird dann Klarheit suchen dort, wo er sie findet, nämlich in den physikalischen Größen wie S und T , und in dem Kalkül der Thermodynamik, der nur physikalische Größen und ihre Verknüpfungen wie TdS kennt, aber keinen davon verschiedenen Begriff Wärme.