

Heft 3

Herausgeber:
G. Falk und
F. Herrmann

1996

Konzepte eines zeitgemäßen Physikunterrichts

Ein moderner Physikkurs
für Anfänger
und seine Begründung



HERMANN SCHROEDEL VERLAG KG
Hannover · Dortmund · Darmstadt · Berlin

ISBN 3-507-76083-5

© 1979 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

794

Inhaltsverzeichnis

Übersicht	5
<i>G. Falk</i> Die begriffliche Struktur der Physik ✓	7
<i>G. Falk und F. Herrmann</i> Physikalische Grundlagen und didaktisches Konzept einer elementaren Einführung in die Physik	24
<i>F. Herrmann, W. Möller, D. Plappert</i> Ein moderner Physikkurs für Anfänger	32
<i>D. Plappert</i> Die Strukturgleichheit verschiedener physikalischer Gebiete gezeigt am Beispiel Hydraulik-Elektrizitätslehre ✓ nicht job	59
<i>D. Plappert</i> Die Analogie zwischen Drehimpulsstrom und elektrischem Strom	66
<i>F. Herrmann</i> Die Analogie zwischen Entropiestrom und elektrischem Strom	76
<i>F. Herrmann</i> Mechanik – Abriß einer Neudarstellung	80
<i>F. Herrmann</i> Konduktive und konvektive Energieträgerströme	88

Anschrift der Autoren:

Prof. Dr. G. Falk, Prof. Dr. F. Herrmann, Dr. W. Möller, D. Plappert,
Institut für Didaktik der Physik, Universität Karlsruhe,
Kaiserstr. 12, Physikhochhaus, 7500 Karlsruhe 1

Übersicht

In diesem Heft wird ein neuer Physik-Anfängerkurs vorgestellt und wissenschaftlich wie didaktisch begründet. Der Kurs ist ein Teilergebnis eines Projekts, das am Karlsruher Institut für Didaktik der Physik bearbeitet wird und dessen Ziel darin besteht, die Physik begrifflich-logisch aufzuarbeiten, um so eine fundierte Grundlage für didaktische Entscheidungen zu gewinnen und Konzepte für das Lernen und Lehren des Fachs Physik zu entwickeln. Teile dieser Untersuchungen wurden bereits in den ersten beiden Heften dieser Reihe vorgestellt. Unter den Aufsätzen der Hefte 1 und 2 waren jedoch nur wenige, bei denen die didaktische Aufarbeitung so weit gediehen war, daß sie dem Lehrer unmittelbar als Grundlage für den Unterricht hätten dienen können. In diesen Heften ging es vor allem darum, die Fundamente eines Neuaufbaus der Physik, einer „Allgemeinen Dynamik“, überhaupt vorzustellen.

Diese allgemeine Dynamik hat nicht nur den Vorteil, einen einheitlichen Aufbau von klassischer Physik und Quantenphysik zu ermöglichen, sie eignet sich gleichzeitig auch hervorragend zu einer Elementarisierung. Aus der Arbeit an einer solchen Elementarisierung ist in den letzten Jahren der hier vorgestellte Physikkurs für Anfänger hervorgegangen. Der Kurs selbst wird in Form eines Lehrbuchs für das 5. und 6. Schuljahr im Schroedel-Verlag erscheinen. Das vorliegende Heft hat deshalb auch die Funktion eines Lehrerbegleitheftes zu diesem Buch.

Eines der großen Probleme, denen sich der naturwissenschaftliche Unterricht gegenübersteht, besteht darin, daß infolge der Expansion der Forschung die physikalischen Erkenntnisse immer schneller zunehmen, so daß der Physikunterricht nicht mehr in der Lage ist, auch nur die wichtigsten davon zu vermitteln. Dieses Problem ist keineswegs neu. Es ist so alt wie die Naturwissenschaft selbst. Schon immer gab es viel mehr zu lernen als in das Gehirn eines Menschen hineingeht, und schon immer versuchte man, das Problem auf zwei verschiedene Arten zu lösen:

- Durch den Verzicht darauf, alles zu lernen – was unter anderem zur Spaltung der Wissenschaft geführt hat: Die Physik trennte sich von der Philosophie, die Chemie und die Elektrotechnik von der Physik, und heute sieht es so aus, als wollte sich die Physik in Elementarteilchen- und Festkörperphysik spalten.

- Der Fortschritt der Naturwissenschaften deckte nicht nur neue Tatsachen auf, die das Wissen über die Natur bereicherten, er brachte gleichzeitig neue begriffliche Hilfsmittel hervor, die es erlaubten, das Faktenmaterial trotz seiner Erweiterung aus wenigen Prinzipien heraus zu verstehen, so daß das Erlernen dieser Prinzipien genügte, um ein gewisses Bild des Ganzen zu bekommen.

Der hier vorgestellte Physikkurs versucht, hauptsächlich dem zweiten dieser Wege zu folgen, gleichzeitig allerdings einige traditionell liebge-wordene Dinge wegzulassen.

Die Aufsätze des vorliegenden Heftes wenden sich an den Physiklehrer, also den Fachphysiker. Das gilt vor allem für jene Teile, die der wissenschaftlichen Begründung des Kurses gewidmet sind. Der erste Aufsatz enthält eine Analyse der Physik und stellt einen neuen Aufbau vor, der den Anspruch erhebt, ein einheitliches, tragfähiges Begriffssystem für klassische und Quantenphysik abzugeben. In diesem Aufbau spielen mengenartige Größen und ihre Ströme die Rolle von Fundamentalbegriffen. Daß dieser Aufbau überdies den Vorteil hat, für eine Elementarisierung besonders geeignet zu sein, ohne daß wesentliche Abstriche an der Exaktheit gemacht werden müssen, wird im zweiten Aufsatz dargelegt. In ihm werden noch einmal die nach den allgemeindynamischen Einsichten einem Einführungsunterricht zugrunde zu legenden physikalischen Regeln zusammengestellt sowie didaktische Erwägungen über Bilder und Anschauungen erörtert, die im Anfänger entwickelt werden sollten, gleichgültig ob es sich um ein Kind oder um einen Erwachsenen handelt. Vor allem geht es dabei um das Bild, in den mengenartigen Größen Träger der strömenden Energie zu sehen und in den intensiven Größen die Beladungsmaße dieser Träger mit Energie.

Im dritten Aufsatz wird ein konkreter Physikkurs für das 5. und 6. Schuljahr, aufgeteilt in 18 Unterrichtseinheiten, im Detail vorgestellt. Jede der 18 Unterrichtseinheiten zerfällt in 3 Teile: Im ersten wird der Unterrichtsablauf geschildert; im zweiten werden die einzelnen Schritte des Unterrichtsablaufs begründet, insbesondere diejenigen, von denen man erwarten kann, daß sie dem Leser ungewohnt sind; im dritten werden Experimente beschrieben. Bei der Lektüre des Aufsatzes sollte deutlich werden, daß man im Anfängerunterricht mit wenigen Regeln sehr große Bereiche von Physik und Technik auf einem elementaren Niveau beschreiben kann.

Daß man das Verfahren der Beschreibung sehr unterschiedlicher Phänomene durch dieselben Regeln ausdehnen kann auf höhere Stufen des Physikunterrichts, zeigen die Aufsätze 4 bis 8.

In den Aufsätzen 4 bis 7 wird gezeigt, daß sich verschiedene Bereiche der Physik weitgehend analog aufbauen lassen: die Elektrizitätslehre, die Hydraulik, die Physik der Drehimpulsströme, die Wärmelehre und die Punktmechanik. Die Aufsätze sind so angelegt, daß jeweils eines der vier letztgenannten Gebiete mit der Elektrizitätslehre verglichen und zu ihr in Analogie gesetzt wird. Im vierten Aufsatz wird zunächst begründet, worauf diese Analogien beruhen, und warum gerade die Elektrizitätslehre als Referenz herangezogen wird. Dann wird die Analogie zwischen Hydraulik und Elektrizitätslehre konstruiert.

Der fünfte Aufsatz zeigt, daß eine weitgehende Strukturgleichheit besteht zwischen Phänomenen, bei denen Drehimpulsströme und solche, bei denen elektrische Ströme eine Rolle spielen. Es wird gezeigt, daß der in der herkömmlichen Physik fehlende Begriff des Drehimpulsstroms eine sehr anschauliche physikalische Größe ist.

Der sechste Aufsatz untersucht die Analogie zwischen Entropiestrom und elektrischem Strom.

Im siebten Aufsatz werden Impuls und Impulsstrom auf ähnliche Art eingeführt wie sonst elektrische Ladung und elektrischer Strom. Der Aufsatz hat damit eine Neugliederung der Mechanik zum Inhalt, die gegenüber der von Weg, Zeit, Kraft und Masse ausgehenden Newtonschen Darstellung entscheidende Vorteile hat.

Der achte Aufsatz behandelt eine für viele Zwecke wichtige Einteilung der Trägerströme in konduktive und konvektive Ströme. Außerdem wird auf den Unterschied zwischen dissipativen Transporten und Supratransporten eingegangen.

Die letzten Aufsätze (4 bis 8) sollen nicht, wie der im dritten Aufsatz vorgestellte Anfängerkurs, konkrete Vorschläge für einen Unterricht (in höheren Schulstufen) darstellen. Sie können dazu nur Anregungen geben. Die didaktische Aufarbeitung der Physik für die folgende Schulstufe ist noch nicht abgeschlossen. Sie wird auch Aspekte enthalten, die in keinem der Aufsätze dieses Hefes zur Sprache kommen. Von diesem seien hier drei genannt:

- *Qualitative* Beziehungen, wie sie im vorgestellten Kurs verwendet werden, werden zu *quantitativen* Beziehungen ausgebaut. Wie das geschehen kann, liegt oft auf der Hand.
- Die Beschränkung auf Vorgänge wird aufgegeben und der Begriff des *Zustands* in die Betrachtungen aufgenommen.
- Mit der Hinzunahme der physikalischen Größe *Information* werden Gebiete wie Optik, Akustik, Elektronik eingeschlossen.

Wir haben den Physikkurs, den wir hier vorstellen, am Staatlichen Gymnasium in Wörth/Rhein erproben können. Es wurden 400 Schüler in den Klassen 5 und 6 je 2 Jahre lang unterrichtet. Wir gingen so vor, daß jeder Lehrer eine Unterrichtseinheit mehrere Mal in größeren Zeitabständen wiederholte. Die Erfahrungen aller Lehrer aus einem Durchgang wurden jeweils im nächsten berücksichtigt. Im lebendigen Kontakt mit den Kindern entwickelten wir so die vorliegende Version des Kurses, die sich von der ersten weitgehend unterscheidet. Die wichtigsten Verbesserungen wurden dabei durch die Fragen der Kinder induziert.

Wir möchten an dieser Stelle der Schulleitung dafür danken, daß sie uns die Erprobung ermöglicht hat, und den Kollegen für die gute Zusammenarbeit. Unser besonderer Dank gilt jedoch den 400 Kindern.

Die begriffliche Struktur der Physik

1. Wissenschaft als begriffliche Fassung der Erfahrung

Wenn wir von der Physik als Wissenschaft sprechen, meinen wir einen Wissens- und Erfahrungsschatz über die Natur, den der Mensch im Lauf seiner Geschichte angesammelt und in den letzten 300 Jahren mit großem Erfolg systematisiert hat. Die „heutige Physik“ ist nichts weiter als das, was sich da bis heute an Wissen angesammelt hat. Dieses Wissen liegt jedoch nicht einfach als Ansammlung einzelner Erfahrungen vor, sozusagen als willkürlich zusammengeschauelter Haufen, der verwahrt und von Generation zu Generation weitergegeben wird, noch liegt es vor wie eine wohlgeordnete Bibliothek. Es wird vielmehr auf eine Weise verwahrt und weitergegeben, die viel kunstvoller ist als die beste Bibliothek, und die es außerdem erlaubt, es ständig präsent zu halten, es also davor zu bewahren, in den Bibliothekskeller abgeschoben und über kurz oder lang vergessen zu werden. Statt die Erfahrungen als Einzelfakten zu registrieren, werden ganze Bündel von Erfahrungen zusammengefaßt und durch ein kalkülartiges, begriffliches Verfahren festgehalten: Man erfindet Begriffe und verbindet diese nach Regeln so miteinander, daß sich in diesem Verbindungsschema all das niederschlägt, was man an den Erfahrungen für wesentlich, das heißt für unerwartet, bemerkenswert hält. Der Physiker nennt das eine *Theorie*.

Diese Art des Erfassens unseres Erfahrungsmaterials mit Hilfe von Begriffen und Operationsregeln für diese Begriffe, also durch eine Theorie, hat gegenüber auch dem ordentlichsten Stapeln entscheidende Vorteile:

- Große Bündel von Erfahrungen lassen sich in einfache, überschaubare Regeln komprimieren.
- Neue, das heißt bisher nicht gemachte Erfahrungen lassen sich aus den Regeln als Erwartungen deduzieren und in der Realität nachprüfen. Das ist gleichzeitig eine Zuverlässigkeitsprüfung der Theorie, nämlich ein ständiges Versichern, wie weit den aus ihr gefolgerten Erfahrungen zu trauen ist.

- Die Erfahrungen lassen sich auf diese Weise einfach weitergeben, und zwar dadurch, daß man ein formalisiertes System von Begriffen und Operationsregeln vermittelt.
- Schließlich lassen sich Erfahrungen auf diese Weise sogar quantitativ, das heißt mit einer Unterscheidungsschärfe fassen, die wir im täglichen Leben nicht gewöhnt sind.

Eine physikalische Theorie ist somit nichts anderes als eine Art Kurzschrift, in der das Buch unserer physikalischen Erfahrungen oder wenigstens Teile davon geschrieben sind. Dieses für die Wissenschaft typische Verfahren der Erfassung des Wissens der menschlichen Gemeinschaft ist übrigens, wie es scheint, nichts Einmaliges, sondern lediglich eine Art Fortentwicklung von Verfahren, mit denen der Mensch überhaupt Erfahrungen sich selbst bewußt und an seinesgleichen weitergebar macht. Eine Erfahrung wird erst dadurch bewußt, daß sie als Entscheidung unter einer Auswahl von Möglichkeiten erscheint. Man begreift eine Erfahrung meist erst dadurch „richtig“, daß sie eine Alternative zu einer anderen, sozusagen entgegengesetzten Erfahrung bildet. Das ist aber meist nur begrifflich möglich, denn die entgegengesetzte Erfahrung wird in der Realität ja gar nicht gemacht, sie wird nur als Möglichkeit gedacht, d.h. aus irgendwelchen Vorstellungen, also mehr oder weniger aus Begriffen abgeleitet. So wurde die Erhaltung der Energie erst zu einer bewußten Erfahrung und damit zu einem Gesetz, nachdem man ihr Gegenteil, nämlich die Konstruktion von *perpetua mobilia*, für denkbar hielt.

Wir wollen das Verfahren der begrifflichen Erfassung von Erfahrungen durch ein Beispiel verdeutlichen. Dieses Beispiel läßt sich als ein allerdings sehr vereinfachtes Modell einer physikalischen Theorienbildung ansehen. Wir denken uns dazu die Erfahrungen als eine Reihe von Zahlen gegeben, so daß jeder Erfahrung eine bestimmte ganze Zahl entspricht. Die Menge der Erfahrungen sei zum Beispiel die Zahlenmenge

$$1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 16, 17, 20, 24, 32, \dots \quad (1)$$

Das Problem der Theorienbildung, also der begrifflichen Fassung der Erfahrungen, entspricht

nun der Aufgabe, die Zahlen dieser Menge nicht wie in der Reihe (1) durch einzelnes Aufweisen zu bezeichnen, sondern durch eine Theorie. Das gelingt zum Beispiel recht einfach, wenn man sich auf die Teilmenge der ersten sechs Zahlen beschränkt. Eine kalkülmäßige Charakterisierung, also die Theorie, lautet dann: „Bilde von 1 ausgehend die ganzen Zahlen“. Bis zur Erfahrung 6 geht diese Theorie gut. Ihre weitere Voraussage, daß auch 7 eine richtige Erfahrung ist, trifft indessen nicht zu. Die Theorie ist an die Grenze ihrer Brauchbarkeit gestoßen. Damit erhebt sich die Frage nach einer besseren Theorie. Diese muß überall dort, wo die erste Theorie zu richtigen Resultaten geführt hat, also von 1 bis 6, dasselbe leisten wie die erste Theorie. Außerdem muß sie aber zu richtigen Resultaten bei der Fortsetzung der Zahlenreihe führen.

Als neue Theorie bietet sich an: „Bilde von 1 ausgehend, die ganzen Zahlen bis 6, sowie deren Produkte mit Potenzen von 2“. Wie man sieht, scheint diese Theorie zu stimmen, sie liefert alle hingeschriebenen Zahlen mit Ausnahme der Erfahrung 17. Eine simple Möglichkeit der Vervollständigung der Theorie bestünde nun darin, die 17 einfach zur Theorie hinzuzufügen. Ein solches Vorgehen würden wir indessen, anscheinend durch ein starkes begriffliches Bedürfnis gesteuert, als unbefriedigend empfinden und zweifellos eine Theorie vorziehen, die auch die 17 als Resultat eines begrifflichen Schemas liefert, selbst wenn sie es um den Preis einer Verkomplizierung tut. Eine derartige Theorie wäre zum Beispiel: „Nimm die Primzahlen, die sich in der Form $2^n + 1$ mit $n=0, 1, 2, \dots$ darstellen lassen, sowie deren Produkte mit beliebigen Potenzen von 2^n “.

Hier tritt offensichtlich ein neuer Begriff auf, nämlich der der Primzahl, der sicher eine Komplizierung darstellt. Immerhin liefert diese Theorie aber gerade die in (1) angegebenen Zahlen. Ob sie indessen auch die Zahlen der Reihe noch liefern würde, wenn die Reihe fortgesetzt wird, ist und bleibt ungewiß. Diese Frage läßt sich immer nur soweit entscheiden, wie die zu der Reihe (1) gehörigen Zahlen (=Erfahrungen) wirklich vorliegen.

Nun lassen sich die Zahlen der Reihe (1) auch durch eine scheinbar ganz andere, d.h. mit anderen, nämlich geometrischen Begriffen arbeitende Theorie gewinnen. Diese Theorie lautet folgendermaßen: „Gewinne diejenigen Einteilungen eines Kreises in kongruente Stücke, die sich unter ausschließlicher Ver-

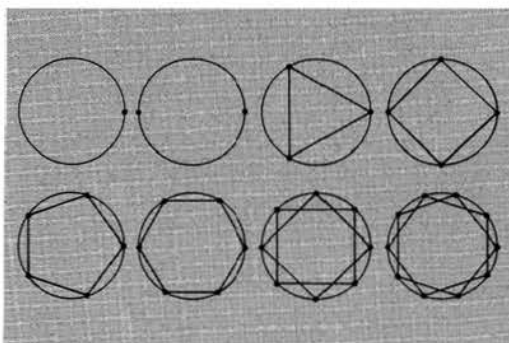


Abb. 1 Darstellung der Zahlenfolge (1) als Kreisteilungen mit Zirkel und Lineal

wendung von Zirkel und Lineal konstruieren lassen“. Die unter dieser Bedingung möglichen Kreisteilungen sind in Abb. 1 angegeben.

Der Mathematiker weiß, daß man so ebenfalls die Zahlen der Reihe (1) erhält und zwar in der Anzahl der Teilungspunkte des Kreisumfangs. Für die Zahlen 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, 24, ... ist das trivial, nicht jedoch für die 5 und damit für die daraus durch Verdopplung entstehende 10, und außerordentlich schwierig ist es zu zeigen, daß auch die 17 darunter vorkommt.

Das Beispiel zeigt, daß die Zahlen der Reihe (1) sich auf zwei begrifflich ganz verschiedene Weisen darstellen lassen. Soll man diese beiden Darstellungsweisen nun *verschiedene Theorien* nennen oder nur *begrifflich verschiedene Fassungen derselben Theorie*? Jeder Aussage der ersten begrifflichen Fassung läßt sich, wie eine genauere Analyse zeigt, eine Aussage der zweiten zuordnen und umgekehrt jeder der zweiten eine der ersten. Die beiden begrifflich verschiedenen Fassungen lassen sich somit umkehrbar-eindeutig aufeinander abbilden. Sie stehen zueinander in einem ganz ähnlichen Verhältnis wie jede von ihnen zu der Menge der „Erfahrungen“ (1). Da die eine nicht nur ebenso gut ist wie die andere, sondern sogar dasselbe tut wie die andere, wollen wir sie nicht zwei verschiedene Theorien nennen, sondern zwei verschiedene Darstellungen *derselben* Theorie. Diese Festsetzung hat zur Folge, daß eine Theorie unterschieden werden muß von den begrifflichen Mitteln, mit denen sie dargestellt wird. Das bedeutet zwar eine Erschwerung des Verständnisses dessen, was eine Theorie ist, aber dieser Nachteil wird voll kompensiert durch die Vorteile, die diese Auffassung für ein tieferes Verständnis der historischen Entwicklung der Physik bietet.

2. Der Unterschied zwischen der inneren Struktur einer Theorie und ihrer begrifflichen Fassung

Das letzte Beispiel zeigt, daß die begriffliche Fassung einer Theorie von ihrer inneren Struktur zu unterscheiden ist. Wie wir gesehen haben, läßt sich dieselbe Theorie mittels ganz unterschiedlicher Begriffe formulieren, nämlich einmal mit Hilfe der Begriffe „Primzahl einer bestimmten Form“ sowie „Produktbildung mit Potenzen von 2“, zum anderen mit den geometrischen Begriffen „Konstruktion mit Zirkel“ und „Konstruktion mit Lineal“. Die Mathematik kennt viele derartige Beispiele. Das ist leicht einzusehen, ja sogar zu erwarten, wenn man eine Theorie von Seiten ihres axiomatischen Aufbaus betrachtet. Mathematisch gesehen ist eine Theorie nichts anderes als eine Menge von Sätzen, von Theoremen. Denkt man sich nun eine Teilmenge der Sätze einer Theorie so ausgewählt, daß alle Sätze der Theorie sich aus denen der Teilmenge mit den (als gegeben vorausgesetzten) Mitteln des logischen Schließens herleiten lassen, so nennt man diese Teilmenge ein Axiomensystem der Theorie.

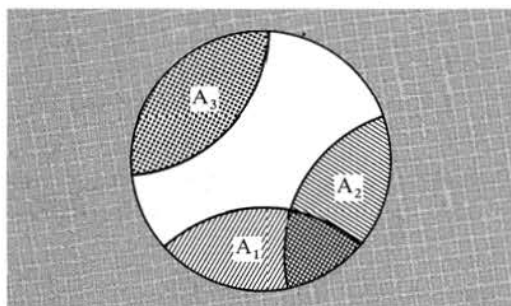


Abb. 2 Diagrammatische Darstellung einer Theorie als Punktmenge und ihrer Axiomensysteme bzw. ihrer Systeme von Fundamentalbegriffen durch Teilmengen

Abb. 2 veranschaulicht das diagrammatisch. Die Theorie sei durch die Menge der Punkte im Inneren eines Kreises dargestellt. Axiomensysteme der Theorie sind dann Teilmengen A_1 , A_2 , A_3 , die in Abb. 2 durch unterschiedliche Schraffur gekennzeichnet sind. Das Diagramm zeigt sofort die hier auftretenden Möglichkeiten: Es ist damit zu rechnen, daß dieselbe Theorie mittels recht unterschiedlicher Axiomensysteme erzeugt werden kann. Bedenkt man, daß die Sätze verschiedener Axiomensysteme im allgemeinen von unterschiedlichen begrifflichen Dingen handeln,

so entsprechen unterschiedliche Axiomensysteme begrifflich unterschiedlichen Aufbauweisen der Theorie.

In der Physik trat der Unterschied zwischen innerer Struktur einer Theorie und ihrer begrifflichen Fassung zum ersten Mal in Erscheinung bei der Entdeckung der Quantenmechanik. Nahezu gleichzeitig wurde diese Theorie als „Matrizenmechanik“ (Heisenberg, Born, Jordan) und als „Wellenmechanik“ (Schrödinger) gefunden. Die erste dieser Fassungen benutzt wesentlich den Begriff der „Matrix“ und die aus der Mathematik bekannten algebraischen Rechenoperationen für Matrizen, in der zweiten spielt dagegen der Begriff der „Wellenfunktion“ mit den vertrauten analytischen Operationen des Differenzierens und Integrierens eine grundlegende Rolle. Wegen der Verschiedenheit der Begriffe, in denen die Theorie formuliert war, glaubte man zunächst, verschiedene Theorien vor sich zu haben. Als sich jedoch herausstellte, daß beide Theorien in den seinerzeit entscheidenden Problemen dieselben Aussagen lieferten, verdichtete sich der Verdacht, daß es sich vielleicht um dieselbe Theorie handeln könne, nur in begrifflich unterschiedlichen Fassungen. Tatsächlich gelang es Schrödinger sehr bald, das zu beweisen. Seitdem spricht man nur noch von verschiedenen Darstellungen derselben Theorie „Quantenmechanik“, noch wichtiger aber: Seitdem weiß man, daß auch in der Physik zwischen einer Theorie, genauer der inneren Struktur einer Theorie und ihrer begrifflichen Fassung zu unterscheiden ist. Abb. 2 kann daher nicht nur dazu dienen, sich klarzumachen, was unterschiedliche Axiomensysteme einer mathematischen Theorie sind, sondern auch, was unterschiedliche begriffliche Aufbauweisen derselben Theorie in der Physik bedeuten.

3. Struktur-verwandte Theorien

Wenn man von der Physik einer bestimmten historischen Periode spricht, meint man stets den zeitgenössischen Stand der physikalisch-wissenschaftlichen Erfahrung, und zwar nicht einfach als Summe von Fakten, sondern in einer begrifflichen Fassung, als Theorie. Das gilt für die Physik des 18. Jahrhunderts ebenso wie für die des 19. Jahrhunderts oder die des 20., also die Physik unserer Zeit. In ihrer historischen Entwicklung besteht die Physik somit aus einer Aufeinanderfolge unterschiedlicher Theorien, d.h. unter-

schiedlicher Begriffssysteme, mit denen man jeweils die Erfahrungen über die Natur zu fassen suchte. Der Übergang von einer Theorie zur nächsten wurde und wird dabei meist als Einschnitt empfunden, als Bruch mit vergangenen Anschauungen, und so ist es kein Wunder, daß derartige Übergänge oft als wissenschaftliche Revolutionen, als Befreiung von Vorurteilen angesehen werden. Dennoch wird dabei leicht übersehen, daß die revolutionäre Seite des Übergangs gewöhnlich nur die begriffliche Fassung der Theorie betrifft, daß damit gleichzeitig jedoch eine erstaunliche Kontinuität der inneren Struktur der Theorie Hand in Hand geht. Da jede neue Theorie nämlich auch all jene Erfahrungen erfassen muß, die ihre Vorgängerin bereits richtig wiedergegeben hat, müssen neue und alte Theorie in einem inneren Verwandtschaftsverhältnis zueinander stehen, sie müssen gemeinsame innere Strukturzüge haben. Zwei historisch aufeinanderfolgende Theorien stehen deshalb in einem merkwürdigen Verhältnis zueinander: In ihrem begrifflichen Aufbau erscheint die neue Theorie leicht als Überwinderin, oft gar als Widersacherin der alten, ihrer inneren Struktur nach dagegen als ihre Tochter. Diese sich scheinbar widersprechenden Seiten des wissenschaftlichen Fortschreitens werden umso deutlicher, je besser die begriffliche wie auch die strukturelle Seite einer Theorie verstanden ist.

Als kalkülisierte Fassung eines Erfahrungsbestands präsentiert sich eine Theorie zunächst stets in irgendeiner begrifflichen Aufbauweise. Es ist daher im allgemeinen sehr schwierig, wenn nicht gar unmöglich, die innere Struktur einer Theorie sofort zu erkennen. Meist erfordert das eingehende Untersuchungen und relativ lange Entwicklungen; oft wird die Sachlage erst klar, wenn begrifflich andere Darstellungen derselben Theorie ans Tageslicht kommen. Dann wird im allgemeinen auch erst das faßbar, was wir die innere Struktur der Theorie nennen.

Von der inneren Struktur her gesehen besteht nun jede historische Weiterentwicklung, also jede Ersetzung der Theorie durch eine neue darin, daß gewisse Strukturzüge der alten weggelassen und dafür in logisch widerspruchsfreier Weise andere, neue Strukturzüge zugefügt werden. Das gilt für die stillen, stetigen Fortschritte ebenso wie für die spektakulären Schritte, die wissenschaftlichen Revolutionen. Von der inneren Struktur her gesehen sind diese zwei Arten des Fortschreitens deshalb kaum zu unterscheiden.

Anders sieht sich das dagegen von Seiten der begrifflichen Fassung der Theorie aus an. Da sind die beiden Arten des Fortschreitens deutlich unterschieden: Bleibt das Begriffssystem der Theorie im wesentlichen unangetastet und wird es nur ergänzt, so spricht man von einer stetigen Weiterentwicklung, wird es dagegen entscheidend abgeändert oder gar durch ein anderes ersetzt, so spricht man von einer wissenschaftlichen Revolution. Ob der Übergang von einer Theorie zu ihrer Nachfolgerin als Revolution empfunden wird oder als mehr oder weniger stetige Weiterentwicklung, hängt also von der begrifflichen Fassung der Theorie ab wie auch von der ihrer Nachfolgerin. Der Schritt wird als um so revolutionärer empfunden, je mehr man als Fundamentalbegriffe der älteren Theorie solche gewählt hatte, die durch die Strukturänderung betroffen werden. Umgekehrt wird derselbe Schritt umso stetiger erscheinen, je mehr beim Aufbau der älteren Theorie als Fundament bereits solche Begriffe gewählt worden sind, die von der Strukturänderung nicht oder nur wenig betroffen werden, die also auch in der neuen Theorie als Fundamentalbegriffe fungieren können. Man hat es daher im Prinzip in der Hand, denselben Entwicklungsschritt unserer physikalischen Erkenntnis durch Wahl der Fundamentalbegriffe mehr als Revolution oder mehr als stetiges Fortschreiten erscheinen zu lassen. Im zweiten Fall erscheint der Entwicklungsschritt dem Lernenden leichter begreifbar, da sozusagen nur minimales Umlernen erforderlich ist.

Auch die strukturelle Verwandtschaft zwischen Theorien läßt sich mit dem in Abb. 2 verwendeten diagrammatischen Verfahren beschreiben. Es leuchtet ein, daß zwei struktur-verbundene Theorien I und II durch Punktmenge mit nicht-leerem Durchschnitt dargestellt werden (Abb. 3).

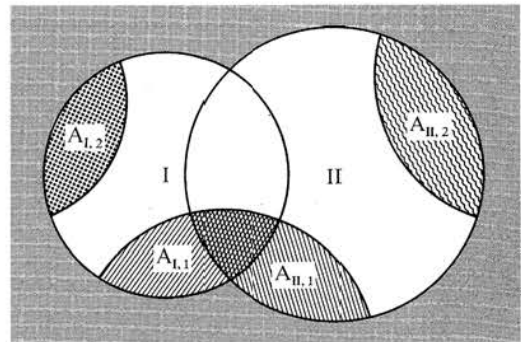


Abb. 3 Diagrammatische Darstellung zweier verwandter Theorien und ihrer unterschiedlichen Axiomensysteme bzw. Systeme von Fundamentalbegriffen

Die Punkte des Durchschnitts von I und II repräsentieren dabei diejenigen Aussagen, die beiden Theorien gemeinsam sind. Je größer dieser Durchschnitt ist, umso größer ist die Verwandtschaft zwischen den beiden Theorien. Nun läßt sich jede der Theorien auf verschiedene Axiomensysteme gründen, das heißt in begrifflich unterschiedliche Fassungen bringen, so I etwa auf $A_{I,1}$ oder $A_{I,2}$, die Theorie II entsprechend auf $A_{II,1}$ oder $A_{II,2}$. Hieraus folgt nun sofort, daß in den begrifflichen Fassungen $A_{I,2}$ und $A_{II,2}$ der Übergang von der Theorie I zur Theorie II wie ein Neuanfang, d.h. als „Revolution“ erscheinen muß, die alle Fundamentalbegriffe umstürzt. Benutzt man als Basis der Theorie I dagegen $A_{I,1}$, so läßt sich der Übergang I→II durch relativ kleine Änderungen erzielen, da bei dem Übergang ein erheblicher Teil von $A_{II,1}$, also ein Teil der Axiome und damit auch der Fundamentalbegriffe der Theorie I erhalten bleibt. Um nämlich aus $A_{I,1}$ die Menge $A_{II,1}$, das begriffliche Fundament für den Aufbau der Theorie II, zu erhalten, brauchen nur einige der Axiome aus $A_{I,1}$ durch neue ersetzt zu werden, nämlich durch diejenigen, die zwar $A_{II,1}$, nicht gleichzeitig aber auch $A_{I,1}$ angehören.

Ein berühmtes Beispiel eines Theorienpaares, das in dem hier erklärten Sinn struktur-verwandt ist, bilden die euklidische und die nicht-euklidische Geometrie. Ein anderes uns hier mehr am Herzen liegendes Beispiel sind klassische Physik und Quantenphysik, die allerdings meist nur unter dem spezielleren Gesichtswinkel der Verwandtschaft von klassischer Mechanik und Quantenmechanik gesehen werden. Um diese beiden Theorien und ihr Verhältnis zueinander geht es in den nachfolgenden Betrachtungen.

4. Die gewohnte Vormachtstellung der Mechanik und ihre didaktische Konsequenz

Wenn wir von der heutigen Physik sprechen, meinen wir die gegenwärtige begriffliche Fassung unseres Erfahrungsschatzes, also das, was man gern mit den Schlagworten „Quantenmechanik“ und „Relativitätstheorie“ bezeichnet. Zusammengefaßt dürften diese beiden Theorien wohl als die Repräsentanten des physikalischen Wissens unserer Zeit anzusehen sein. Daß sie zwei Theorien sind und nicht eine einzige, mag als nachteilig empfunden werden – es fehlt auch

nicht an Bemühungen, diesem Mangel abzuwehren – aber das ist im Augenblick von sekundärer Bedeutung. Wichtiger ist die Relation beider Theorien, insbesondere der Quantenmechanik zu dem, was wir „klassische Physik“ nennen, nämlich der Physik des 19. Jahrhunderts. Die diese Periode der Physik kennzeichnende Theorie ist im wesentlichen die *Newtonsche* Mechanik in der Form, die ihr Newton sowie die Mathematiker des 18. und 19. Jahrhunderts gegeben haben. Ergänzt zu denken ist die Mechanik um die *Maxwellsche* Theorie, die die elektromagnetische Wechselwirkung zwischen den als mechanische Massenpunkte gedachten Objekten beschreibt.

In den Jahrhunderten ihrer wissenschaftlichen Herrschaft war die Mechanik zu solch imponierender Größe entwickelt worden, daß man in ihr allerdings mehr sah als nur ein begriffliches Mittel, um die physikalische Erfahrung zu fassen. Nicht wenigen erschien sie und erscheint sie noch heute als die eigentliche Wirklichkeit, die tiefere Wahrheit über unsere Welt. Und als die Atomistik in der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts ihren wissenschaftlichen Siegeszug antrat, tat sie es wie selbstverständlich im Gewand der Mechanik. Die Atome waren unveränderliche Massenpunkte im Sinn der Mechanik, die sich, Kräfte aufeinander ausübend, im leeren Raum bewegen. Und als die Atome ihre Unzerstörbarkeit und damit die Unbegrenztheit ihres individuellen Lebens an elementarere Teilchen, wie Elektron und Proton, abtreten mußten, übernahmen diese „Elementarteilchen“ die Rolle der unveränderlichen Massenpunkte, aus denen alles besteht. Die Vorherrschaft der Mechanik stand so sehr außer Frage, daß es schien, als gäbe es gar keine andere Möglichkeit, die Natur zu verstehen, als wäre die Welt in ihrem tiefsten Grund eben Mechanik. An dieser Überzeugung haben paradoxerweise auch Relativitätstheorie und Quantenmechanik nicht viel geändert. Die eine hat zwar die Überzeugung von der Absolutheit von Raum und Zeit erschüttert, aber die übrigen Begriffe der Mechanik und die sie stützenden Überzeugungen unangetastet gelassen; und die andere sagt schon durch ihren Namen, wie sie gesehen wird, nämlich als Mechanik, wenn auch als modifizierte, „quantisierte“ Mechanik.

So gesehen scheint es fast, als wäre der Übergang von der Physik des 19. Jahrhunderts zur Quantenphysik des 20. gar keine wissenschaftliche Revolution gewesen. Äußert sich hier vielleicht die Kontinuität der inneren Struktur, wie die vorstehenden Überlegungen sie erwarten lassen? Wenn das der

Fall wäre, so ist nicht zu verstehen, warum die Theorien unseres Jahrhunderts demjenigen, der in der Begriffswelt der klassischen Mechanik aufgewachsen ist, so viel Schwierigkeiten bereiten. Tatsächlich ist hier nicht die Kontinuität der inneren Struktur der klassischen Theorie und ihrer Nachfolger im Spiel, sondern die Hartnäckigkeit liebgezwonnener philosophischer Überzeugungen, die in ihrer Naivität von Seiten der heutigen Physik indessen keine Stütze mehr finden.

Es besteht kein Zweifel, daß der Übergang von der klassischen Physik zur Quantenphysik von nunmehr drei Physikergenerationen als wissenschaftliche Revolution empfunden wird. Nach unseren Überlegungen muß das daran liegen, daß als Fundament der klassischen Physik vornehmlich Begriffe verwendet werden, die in der Quantenmechanik keine fundamentale Rolle mehr spielen, vielleicht gar nicht mehr vorkommen. Im Diagramm der Abb. 3 gesprochen, sind wir also gewohnt, die klassische Physik, das heißt die Theorie I mit Hilfe eines Begriffssystems zu fassen, das mehr der Teilmenge $A_{I,2}$ entspricht als der zweckmäßigeren Teilmenge $A_{I,1}$. Wenn es anders wäre, müßte der Übergang stetiger erscheinen als er es wirklich tut.

Für die Didaktik des Physikunterrichts hat das aber eine wichtige Konsequenz: Wird der gewohnte *Newtonsche* Aufbau der Mechanik als unabdingbar angesehen und ins Zentrum des Physikunterrichts gestellt, so errichtet der Unterricht selbst eine Hürde für ein einfaches Verständnis der Physik unseres Jahrhunderts. Die Bewältigung des Schritts von der klassischen zur heutigen Physik ist und bleibt dann mehr eine professionelle Aufgabe des einzelnen als die einer allgemeinen naturwissenschaftlichen Schulbildung. Unsere Überlegungen zeigen jedoch gleichzeitig einen Ausweg aus diesem Dilemma: Man sollte die Physik auf einem Begriffssystem aufbauen, das möglichst viele Begriffe enthält, die klassischer und heutiger Physik gemeinsam sind, im Diagramm der Abb. 3 also auf dem Durchschnitt der Mengen $A_{I,1}$ und $A_{II,1}$. Welches aber sind die Begriffe, die in diesem Durchschnitt liegen?

5. Begriffliche Fassungen der klassischen Physik

Jedem Physiker sind die Fundamentalbegriffe des Newtonschen Aufbaus der Mechanik so vertraut, daß sie hier einfach angeführt werden können. Die

Mechanik beruht auf der Grundidee, daß Bewegung — als wäre es gar nicht anders denkbar — *Bewegung individueller Körper* ist. Bewegung wird als stetige Aufeinanderfolge räumlicher Lagen, der *Orte desselben Körpers* begriffen. Diese Auffassung von Bewegung setzt voraus, daß der Körper in seinen verschiedenen Lagen als *derselbe* Körper wiedererkennbar, daß er ein *Individuum* ist. Die Fundamentalbegriffe des *Newtonschen* Aufbaus der Mechanik sind so gewählt, daß sie geradezu als begriffliche Fassung dieser Idee erscheinen:

- (1) Der Raum als die Gesamtheit der möglichen Orte r des Körpers,
- (2) Die Zeit t als Mittel zur Aufreihung der Orte des Körpers zu seiner Bahn,
- (3) Die Masse m als charakteristische Konstante des Körpers,
- (4) Die Kraft F als Ausdruck aller Möglichkeiten der Einwirkung der Außenwelt (d.h. all dessen, was nicht zu dem betrachteten Körper selbst zählt) auf den Körper, genauer auf die Bewegung des Körpers.

Der Aufbau der Mechanik vollzieht sich so, daß jedem dieser Begriffe eine Variable im Sinn der Mathematik zugeordnet wird: Raum und Kraft werden je durch ein Kontinuum von Tripeln reeller Zahlen repräsentiert, Zeit und Masse je durch ein 1-dimensionales reelles Kontinuum. Mit diesen Variablen werden nun andere, von r , t , m , F abhängige Variablen, d.h. andere physikalische Größen erklärt und typische Zusammenhänge zwischen diesen entweder aus ihrer mathematischen Bildung hergeleitet oder, wenn die Freiheit besteht, gerade so postuliert, daß sie reale Erfahrungen richtig wiedergeben. Mathematisch läuft das auf die Konstruktion von Differentialgleichungen 2. Ordnung, der Bewegungsgleichungen, hinaus, deren Lösungen die Bahnen der Körper repräsentieren. Das Verfahren ist so bekannt, daß wir nicht näher darauf einzugehen brauchen.

Obwohl in der klassischen Physik der Unterschied zwischen innerer Struktur einer Theorie und ihrer begrifflichen Fassung nie klar bewußt wurde, war er doch keineswegs völlig unbekannt. So wußte man, daß sich die Mechanik als Variationsproblem formulieren läßt, also auf eine Weise, in der ganz andere Begriffe fundamental sind als im *Newtonschen* Aufbau. Noch heute ist es üblich, in den Vorlesungen über klassische Mechanik verschiedene Darstellungsweisen der Mechanik vorzustellen, so die nach *Lagrange* und *Hamilton* benannten theoretischen Fassungen. Allerdings geschieht das meist mehr unter dem Gesichtswinkel, angepaßt

Lösungswege für bestimmte Problemtypen zu entwickeln als begrifflich unterschiedliche Aufbauweisen der Mechanik zu gewinnen. So sucht man vergeblich nach einer systematischen Behandlung der Frage, ob sich die gesamte Mechanik nicht direkt als *Hamiltonsche* Theorie, d.h. unter Verwendung der Begriffe *Ort*, *Impuls*, *Zeit* und *Energie* als Fundamentalbegriffe aufbauen läßt, anstatt erst den *Newtonschen* Aufbau zu vollziehen und dann unter Benutzung komplizierter mathematischer Methoden neue und in gewisser Weise allgemeinere Formen der Bewegungsgleichungen herzuleiten.

Zusammenfassend können wir also sagen: Wenn auch im Bewußtsein des Physikers die *Newtonsche* Aufbauweise der klassischen Mechanik so vorherrscht, daß sie geradezu mit der Mechanik identifiziert wird, gibt es doch deutlich unterschiedene Aufbauweisen der klassischen Mechanik, in denen jeweils andere Größen als Fundamentalbegriffe fungieren. Es wird sich zeigen, daß eine Aufbauweise den Vorzug verdient, die die Größen *Energie* und *Impuls* als Fundamentalbegriffe verwendet.

6. Begriffliche Fassungen der Quantenmechanik

Wie wir wissen, gibt es für die Quantenmechanik sozusagen von Geburt an verschiedene Aufbauweisen. Wie sehen die Fundamentalbegriffe dieser Aufbauweisen oder wenigstens der geläufigsten von ihnen, der „Wellenmechanik“, aus? Leider genügt es zur Beantwortung dieser Frage nicht, einfach ein Lehrbuch aufzuschlagen. Gewöhnlich steht nämlich das mathematische Werkzeug so dominierend im Vordergrund, daß der Blick auf das, worum es hier geht, verstellt wird. Nicht selten wird das mathematische Werkzeug sogar selbst zum sprachlichen Verständigungsmittel, die Sprache zum Jargon. Noch irritierender aber ist, daß die sprachlichen Wendungen, soweit sie nicht das mathematische Werkzeug betreffen, meist den Eindruck erwecken, als würde an der Grundidee der klassischen Mechanik, nämlich alle Naturvorgänge als *Bewegung kleiner Körper* zu begreifen, nicht gerüttelt. Es ist von Teilchen die Rede, die Lage und Impuls haben, so als wären es Körper im Sinne der *Newtonschen* Mechanik. Zwar wird versichert, daß Lage und Impuls nun keine Variablen mehr seien, sondern „Operatoren“, aber das bedeutet meist nicht viel mehr als wieder einen Hinweis auf

das mathematische Werkzeug. Selbst beim Mehrkörperproblem, bei dem endgültig klar wird, daß die Quantenmechanik die Idee des bewegten Individuums, die für den Newtonschen Aufbau der Mechanik eine so wichtige Rolle spielt, grundsätzlich in Abrede stellt, wird meist so schnell wie möglich wieder die Flucht in den mathematischen Apparat angetreten, nämlich in die Symmetrien der Wellenfunktion gegenüber Permutationen „identischer Teilchen“.

Jeder Physiker weiß jedoch, daß in keiner Darstellung der Quantenmechanik, gleichgültig wie klassisch ihr Vokabular sein mag, die in der klassischen Physik so zentrale Größe „Kraft“ vorkommt und mit ihr auch nicht die Größen „elektrische Feldstärke“ und „magnetische Feldstärke“. Unbezweifelbar steht in allen Darstellungen die Energie im Vordergrund. Das Hauptziel der rechnerischen Bemühungen ist die Bestimmung ausgezeichneter, quantisierter Werte der Energie eines Atoms, Moleküls, Kristalls, allgemein eines physikalischen Systems. Stets geht es um die „Eigenwerte“ der Energie des Systems. Daneben gelten die Bemühungen noch den Eigenwerten des Drehimpulses, manchmal noch denen des Impulses. Niemals aber geht es um Eigenwerte des Orts, der Geschwindigkeit, der Kraft, kurzum all jener Größen, die in der klassischen Physik die Rolle der Fundamentalbegriffe spielen.

Eine Sicht aus größerer Distanz, die den Wald auch trotz der vielen Bäume noch erkennen läßt, gewinnt man, wenn man die mathematischen Schritte als Behandlung von Aufgaben sieht, die aus einer der Theorie zugrundeliegenden Idee resultieren, so wie sich die mathematischen Schritte der klassischen Mechanik, nämlich die Aufstellung und Lösung von Differentialgleichungen 2. Ordnung, der Bewegungsgleichungen, aus der Idee des bewegten individuellen Körpers verstehen lassen. Die grundlegende Idee der Quantenmechanik ist die, alle Naturvorgänge als *Übergänge zwischen Zuständen* physikalischer Systeme zu verstehen. Der *Zustand* ist deshalb ein zentraler Begriff der Theorie. Er ist etwas Unveränderliches, etwas in jeder Hinsicht Festgelegtes. In einem Zustand hat jede physikalische Größe einen bestimmten, festen Wert. Es ist sinnlos, nach dem zeitlichen Verhalten oder dem Schicksal eines Zustands zu fragen. Der Zustand ist seiner Natur nach zeitlos oder, wenn man unbedingt die Zeit ins Spiel bringen will, zeitlich unbegrenzt; er spielt etwa die Rolle, die sonst gern dem zeitlich unveränderlichen, „ewigen“ Elementarteilchen zugeordnet wird. Ist ein System in einem Zustand, so passiert nichts an oder mit

ihm. Jeder Vorgang, jedes Geschehen ist ein *Übergang* von einem Zustand in einen anderen. Bei einem Übergang ändern sich mit dem Zustand die Werte physikalischer Größen.

Wenn man die Vorgänge in der Welt als Übergänge zwischen Zuständen verstehen will, liegt das primäre Anliegen zwangsläufig erst einmal darin, die an irgendwelchen Vorgängen beteiligten Zustände in die Hand zu bekommen. Diesem Ziel dienen die mathematischen Bemühungen der Quantenmechanik in erster Linie. Die Eigenwertprobleme sind nichts anderes als das Aufsuchen von Zuständen die an einer ins Auge gefaßten Klasse von Vorgängen, etwa den optischen Emissions- oder Absorptionsvorgängen eines in der Gasphase oder in fester Form vorliegenden Stoffs, beteiligt sind. Das geschieht dadurch, daß man angibt, welche Werte bestimmte physikalische Größen in den fraglichen Zuständen haben. Das ist der Sinn der „Quantenzahlen“. Die Größen, deren Werte mittels der Quantenzahlen angegeben werden, sind, wie schon gesagt: Energie immer, Drehimpuls meistens, Impuls manchmal; Ort, Geschwindigkeit, Kraft dagegen nie!

Irritierend mag in diesem Zusammenhang sein, daß in der bekanntesten Darstellung der Quantenmechanik Impuls und Ort mathematisch gleichberechtigt erscheinen. In ihr ist es jederzeit möglich, zwischen der sogenannten Orts- und der Impulsdarstellung hin- und herzuwechseln. Im elementaren Bereich äußert sich das darin, daß z.B. die Unschärferelation $\Delta x \Delta p_x \geq h/2$ in x und p_x symmetrisch ist. Das wiederum verführt dazu, die Unschärferelation wie folgt zu lesen: Die Unschärfe der Impulskomponente p_x wie auch des Orts x kann zwar beliebig klein gemacht werden, aber nicht gleichzeitig für beide Größen. Abgesehen davon, daß das Wort „gleichzeitig“, das ja in der Relativitätstheorie eine wichtige Rolle spielt, in diesem Zusammenhang leicht physikalisch falsche Assoziationen provoziert, verschleiert diese Interpretation der Unschärferelation einen wichtigen physikalischen Unterschied zwischen Impuls und Ort, der vom mathematischen Werkzeug allein her nicht zu begreifen ist. Während es nämlich im allgemeinen möglich ist, den Impuls eines physikalischen Systems beliebig scharf zu machen, ohne dabei den besonderen Charakter des Systems zu zerstören, ist es nicht möglich, seinen Ort scharf festzulegen, ohne dabei das System bis zur Unkenntlichkeit zu verändern. Das liegt daran, daß mit einer Verkleinerung von Δx eine Vergrößerung von Δp_x und damit eine unaufhaltsame Vergrößerung der Energie des Systems verbunden ist. In

Gegensatz zu beliebigem Verschärfen des Impulses bedeutet beliebige Verschärfung des Orts über alle Grenzen wachsende Energiezufuhr an das System, und das hat zur Folge, daß das System „aus den Nähten platzt“. Unter Verwendung des Zustandsbegriffs ist das alles sehr klar und einfach zu formulieren: Es gibt zwar Zustände mit scharfen Werten des Impulses, aber keine Zustände mit scharfen Werten des Orts. Physikalisch sind Impuls und Ort eben keineswegs gleichberechtigt.

7. Die mengenartigen Größen als begriffliches Fundament der Physik

Die Betrachtungen der letzten beiden Abschnitte bestätigen noch einmal den am Ende des 4. Abschnitts gezogenen Schluß: Will man klassische und heutige Physik möglichst als begriffliche Einheit erscheinen lassen, so sind die Fundamentalbegriffe des *Newtonschen* Aufbaus dazu nicht geeignet. Besser wäre es, als Fundamentalbegriffe Größen zu wählen, die sowohl in der klassischen Physik als auch in der Quantenphysik unseres Jahrhunderts eine zentrale Rolle spielen. Die bisherigen Betrachtungen machen es plausibel, daß die Größen *Energie*, *Impuls* und *Drehimpuls* dazugehören. Aber sind das schon alle, oder gibt es noch andere, und läßt sich die Physik wirklich auf ihnen als Fundament aufbauen?

Schon bei der Entdeckung und Begründung der Quantenmechanik hatte es sich als vorteilhaft erwiesen, an die *Hamiltonsche* Fassung der klassischen Mechanik anzuknüpfen. In ihr spielen mit Energie und Impuls gerade Größen eine zentrale Rolle, die auch in der Quantenmechanik zu den Fundamentalgrößen gehören, und daher ist der Übergang von der *Hamiltonschen* Form der Mechanik zur Quantenmechanik einfacher zu vollziehen als von anderen Darstellungen der klassischen Mechanik. Berühmte wissenschaftliche Vorbilder wie *Diracs* „Principles of quantum mechanics“ machen sich das in mehr oder weniger offensichtlicher Weise zunutze. Dennoch wollen wir diesen Weg nicht gehen, denn einmal führt er schnell in mathematische Details, zum zweiten aber – und das ist für uns wichtiger – nutzt er Vorstellungsgewohnheiten aus, die den Blick für das erschweren, was wir für die entscheidende Einsicht halten, nämlich: *Die mengenartigen, bilanzierbaren Größen sind es, die ein gemeinsames begriffliches Fundament von klassischer und moderner Physik abgeben.*

Hat man einmal erkannt, daß die zentrale Idee der Quantenphysik die ist, alle Naturvorgänge als Übergänge zwischen Zuständen zu begreifen, so liegt eigentlich nichts näher, als sich in der Geschichte der Physik nach analogen Beschreibungsweisen umzusehen. Man braucht nicht lange zu suchen, um zu erkennen, daß die *Thermodynamik* genau das Gewünschte tut. Auch sie beschreibt die Vorgänge in der Welt als Übergänge zwischen Zuständen, ja sie hat diese Beschreibungsweise überhaupt erfunden. Da das indessen zu einer Zeit geschah, als die Stetigkeit alles Naturgeschehens als selbstverständlich galt, wurden die in der Thermodynamik betrachteten Übergänge gewöhnlich in stetige Zustandsfolgen, in *Prozesse*, eingebettet. Für das gesamte Beschreibungsverfahren ist das jedoch unwichtig, es ist sogar eine unnötige Erschwerung. Entscheidend ist dagegen die Art und Weise, wie Zustand und Übergang in der Thermodynamik theoretisch gefaßt werden, nämlich: Der Zustand wird durch die Werte festgelegt, die bestimmte physikalische Standard-Größen in ihm haben, und der Übergang wird beschrieben durch die Differenzen der Werte der Standard-Größen in zwei Zuständen, im Endzustand und Anfangszustand des Übergangs. Diese Beschreibungsweise ist eine Art Buchführung, eine Bilanzierung physikalischer Größen, was wiederum nur dann sinnvoll ist, wenn diese physikalischen Größen *mengenartig* sind, wenn ein physikalisches System in jedem seiner Zustände also einen ganz bestimmten Betrag, eine bestimmte Menge jeder einzelnen dieser Größen enthält.

Es ist kein Zufall, daß diese Art Beschreibung der Natur gleichzeitig mit den beiden mengenartigen Größen Energie E und Entropie S Eingang in die Physik gefunden hat. Das Bilanzieren war dabei selbstverständlich, denn der 1. und 2. Hauptsatz sind ja nichts anderes als Aussagen über Bilanzen der Größen E und S bei beliebigen Vorgängen, d.h. bei *allen* Übergängen, die sich realisieren lassen. Von Anfang an empfand man deutlich, daß diese von der Thermodynamik entwickelte Art der Beschreibung eines Vorgangs eine besondere innere Stärke besitzt, daß sie gleichzeitig aber ganz anders war als die gewohnte, auf der Vorstellung der stetigen Bewegung individueller Körper beruhende mechanische Beschreibung der Welt. Zur Kennzeichnung dieses Unterschieds bürgerte sich das Wort „phänomenologisch“ ein. Es sollte ausdrücken, daß es sich zwar um eine besonders sichere, schwer angreifbare Beschreibungsweise handelt, der aber das genauere Detail, nämlich die Kenntnis der mit jedem Vorgang

nach Vorstellung der klassischen Mechanik verbundenen Bewegungsabläufe kleinster Teilchen, mangelt. Man hatte die Vorstellung, daß die phänomenologische Beschreibung nur den äußeren, allerdings sehr festgefügtten Rahmen absteckt, der dann durch die „eigentliche“, die mechanische Beschreibung der Details auszufüllen ist. Daß es sich dabei um nicht mehr als eine traditionelle philosophische Überzeugung handelt, brauchen wir nicht noch einmal zu betonen. Die Quantenmechanik zeigt zweifelsfrei, daß diese „phänomenologische“ Beschreibung der Naturvorgänge alles andere ist als ein der Ausfüllung bedürftiger Rahmen: Sie hat sich als weit tragfähiger erwiesen als das, womit sie einst ausgefüllt werden sollte.

Das unmittelbare Resultat unserer Überlegungen ist einigermaßen überraschend: Von der inneren Struktur her gesehen ist die Quantenmechanik nicht so sehr die Nachfolgerin der Mechanik, als vielmehr der Thermodynamik. Beide Theorien, Thermodynamik wie Quantenmechanik, beruhen auf demselben Beschreibungsprinzip der Naturvorgänge, nämlich der Beschreibung mittels der Begriffe Zustand und Übergang. Wenn es also darum geht, die Quantenphysik als stetige Fortentwicklung der klassischen Physik erscheinen zu lassen, wäre das thermodynamische Beschreibungsverfahren der natürliche Ausgangspunkt. Entgegen der historischen Tendenz, die Thermodynamik als Teil der Mechanik erscheinen zu lassen, sie gar als „statistische Mechanik“ zu begründen, wäre es vom Standpunkt einer begrifflich einheitlichen, kontinuierlichen Entwicklung der Physik daher konsequenter, umgekehrt die Mechanik in das thermodynamische Beschreibungsverfahren einzufügen, die Mechanik also als Spezialfall einer verallgemeinerten Thermodynamik, oder wie wir lieber sagen wollen, einer *allgemeinen Dynamik* erscheinen zu lassen. Kennzeichen dieser allgemeinen Dynamik ist es, Zustand und Übergang (=Zustandspaar), zum Zentrum der Beschreibung zu machen und Zustände wie Übergänge vollständig durch die Werte mengenartiger Größen und ihrer Bilanzen zu fassen. Mengenartig bedeutet dabei, wie wir noch sehen werden, daß die Größen im Raum verteilt sein und strömen können, nicht notwendig jedoch, daß sie einem allgemeinen Erhaltungssatz genügen. Daß es möglich ist, die Physik auf mengenartigen Größen aufzubauen, werden wir im folgenden deutlich machen. Daß es aber sogar auf eine sehr elementare und anschauliche Weise möglich ist, wird in den übrigen Aufsätzen dieses Heftes auseinandergesetzt.

8. Einige Regeln der allgemeinen Dynamik

Unsere Überlegungen machen verständlich, daß der Begriff der mengenartigen, bilanzierbaren Größe eine Basis für einen Aufbau der Physik abgibt, der sowohl die klassische Physik als auch die Physik unseres Jahrhunderts bis in ihre modernsten Entwicklungen hin einschließt. Damit bleibt natürlich die Aufgabe zu zeigen, wie das im einzelnen geschieht. Selbstverständlich kann das hier nur skizzenhaft geschehen. Bevor wir das tun, fassen wir die beiden Hauptregeln der allgemeinen Dynamik zusammen:

- (i) Grundlage der dynamischen Beschreibung sind allgemein-physikalische, d.h. system-unabhängige mengenartige Standard-Größen. Zu diesen zählen: Energie E , Entropie S , Menge (=Stoffmenge) n , Impuls $\mathbf{P}=(P_1, P_2, P_3)$, Drehimpuls $\mathbf{L}=(L_1, L_2, L_3)$, elektrische Ladung Q, \dots
- (ii) Ein physikalisches System, ein „Objekt“, wird nicht als gestaltlich-geometrisches Gebilde aufgefaßt, sondern als ein „Bündel“ der Standard-Größen. Die Wertekombinationen dieser Größen, die ja die Zustände des Systems festlegen, sind für das System charakteristisch.

Diese beiden Regeln gelten unverändert in der klassischen wie in der Quantenphysik. Im Diagramm der Abb. 3 ausgedrückt, gehören sie also dem Durchschnitt von $A_{I,1}$ und $A_{II,1}$ an. Je nachdem, ob man nun die klassische Physik oder die Quantenphysik entwickeln will, sind die Regeln (i) und (ii) um weitere zu ergänzen. Die Regeln (i) und (ii) wie auch ihre Stellung in der Physik bilden zwar nicht den Gegenstand, wohl aber den wissenschaftlichen Hintergrund und damit das Rückgrat des in diesem Heft entwickelten und erläuterten didaktischen Konzepts eines zeitgemäßen Physikunterrichts.

Zunächst hat die Regel (ii) eine wichtige Konsequenz, nämlich:

- (iia) Bei jedem Übergang ändern mindestens zwei physikalische Größen ihren Wert; oder anders ausgedrückt: Es gibt keinen Übergang, bei dem nur eine einzige Größe ihren Wert ändert.

Diese Feststellung ist eine unmittelbare Folge der Art und Weise, wie nach (ii) ein physikalisches System allgemein-dynamisch charakterisiert wird. Ein System ist danach gekennzeichnet durch die Kombinationen, in denen die Werte der Stan-

dard-Größen in den Zuständen des Systems auftreten, oder anders gewendet: Es ist der *Zusammenhang der Größen*, der für das System charakteristisch ist. Anstatt zum Beispiel die Masse eines Körpers anzugeben, wird der Körper dynamisch dadurch beschrieben, wie Energie und Impuls bei ihm zusammenhängen, d.h. welche Werte des Impulses mit welchen Werten der Energie kombiniert erscheinen. Das aber ist gleichbedeutend damit, daß bei jeder Änderung des Impulses auch die Energie eine Änderung erfährt. Wir haben uns dabei der Einfachheit halber auf translative Bewegungen beschränkt; falls der Impuls seine Richtung ändert, kann zwar die Energie konstant bleiben, aber dafür ändern sich dann mehr als eine Komponente des Impulses, also wieder mehr als eine einzige Größe. Die Grundannahme der allgemeinen Dynamik, physikalische Systeme mittels mengenartiger Größen und deren Verknüpfung zu beschreiben, erzwingt sozusagen trivialerweise den in (iia) behaupteten Tatbestand. Für die allgemeine Dynamik ist deshalb die Folgerung (iia) ebenso unvermeidlich-trivial wie es für die Idee, alles in Bewegung von Körpern aufzulösen, trivial ist, daß von Null verschiedene Werte der Geschwindigkeit unvermeidlich mit Ortsänderungen verknüpft sind.

Der in (iia) ausgesprochene Tatbestand hat für die *klassische Physik* nun eine einfache, allgemeingültige mathematische Beziehung zwischen den Änderungen der mengenartigen Standard-Größen zur Folge, die als *Gibbssche Fundamentalförmel* bekannt ist. Bei der (hier allein betrachteten) Erweiterung von (i) und (ii) zur klassischen Physik tritt zu (i) und (ii) die Annahme hinzu, daß die mengenartigen Standard-Größen – und mit ihnen alle physikalischen Größen – stetige Variablen im gewohnten Sinn der Mathematik und ihre Abhängigkeiten differenzierbare Funktionen dieser Variablen sind. Hiermit läßt sich die in (iia) ausgesprochene Feststellung wie folgt formulieren. Zunächst werden alle Übergänge eines Systems aus infinitesimalen Übergängen zusammensetzbar. Die einfachsten infinitesimalen Übergänge wiederum sind solche, in denen sich eine Minimalzahl mengenartiger Größen ändert, also genau zwei. Von denen wählt man als eine stets die Energie E des Systems. Die zweite der Größen sei jeweils mit X_1, X_2, X_3, \dots bezeichnet. Für die einfachsten infinitesimalen Übergänge, bei denen sich von den Größen X_1, X_2, \dots nur eine, etwa X_j , ändert, gilt gemäß (iia) dann $dE = \xi_j dX_j$, wobei ξ_j angibt, wie groß die mit dX_j verknüpfte Energieänderung ist. Da jeder infinite-

simale Übergang aus den einfachsten zusammengesetzt werden kann, gilt allgemein

$$dE = \xi_1 dX_1 + \xi_2 dX_2 + \xi_3 dX_3 + \dots \quad (2)$$

Da die Größen X_1, X_2, \dots mengenartige Variablen sind, nimmt (2) bei Verwendung der gewohnten mengenartigen Standard-Variablen Impuls P , Drehimpuls L , Entropie S , elektrische Ladung Q, \dots die Gestalt an

$$dE = v dP + \omega dL + T dS + \varphi dQ + \dots \quad (3)$$

Skalarprodukte wie $v dP$ und ωdL sind dabei die gewohnten Abkürzungen, so zum Beispiel

$$v dP = v_1 dP_1 + v_2 dP_2 + v_3 dP_3. \quad (4)$$

Beim Übergang von (2) nach (3) haben wir für die ξ_i bereits die Bezeichnungen verwendet, die in der Physik herkömmlich verwendet werden. So ist, wenn $X_1 = P_1$ eine Komponente des Impulses ist, die Größe $\xi_1 = v_1$ die korrespondierende Geschwindigkeitskomponente. Die Geschwindigkeit ist hier also nicht „Strecke durch Zeit“, sondern der Faktor, der angibt, mit welcher Energieänderung eine infinitesimale Änderung dP des Impulses P verknüpft ist. Analoges gilt für die übrigen „intensiven“ Größen $\omega, T, \varphi, \dots$.

Es sei ausdrücklich angemerkt, daß die *Gibbssche Fundamentalform* (2) bzw. (3) keineswegs Ausdruck der Energieerhaltung ist. Sie hat, wie die Art ihrer Begründung zeigt, nichts damit zu tun, daß die Größe E nicht erzeugt und vernichtet werden kann. Bei der Zerlegung der Übergänge in einfachste infinitesimale Übergänge, die einer paarweisen Zusammenfassung der mengenartigen Standard-Variablen entsprechen, hätte man statt der Energie E auch jede andere der mengenartigen Größen in dem Sinne auszeichnen können, daß sie ein allen Paaren gemeinsames Mitglied darstellt.

9. Ströme mengenartiger Größen

Die Erfahrung im Umgang mit Studenten der Physik, also Physikern zeigt, daß der Ausdruck „mengenartige Größe“ zwar im großen und ganzen die beabsichtigten Assoziationen schafft, im Detail aber doch oft Ungewissheit, ja Zweifel hinterläßt. Mehrere Gründe sind dafür verant-

wortlich, in erster Linie natürlich Sprach- und Vorstellungsgewohnheiten. Zwar gilt die einfache Merkregel, daß echt mengenartige Größen daran erkennbar sind, daß bei ihnen das Verb „haben“ durch das Verb „enthalten“ ersetzt werden kann, aber leider hilft diese Merkregel nicht in allen Fällen. Manchmal hilft sie deshalb nicht, weil der Student zögert oder sich gar weigert, das Wort „haben“ durch das vorstellungsmäßig schärfer fixierte Wort „enthalten“ zu ersetzen, obwohl er es bedenkenlos tun könnte. So ist es eine gewohnte Erfahrung, daß beim Impuls diese Ersetzung schwerfällt. Der Impuls eines Körpers ist nach landläufiger Vorstellung und Sprechweise des Physikers dem Körper „zugeordnet“. Die Vorstellung, daß er im Körper „enthalten“ sei, wird nur widerstrebend und ungläubig hingenommen. Andererseits wird das Volumen wie selbstverständlich in die Phalanx der mengenartigen Größen eingereiht, obwohl es, wie wir sehen werden, nicht dazu gehört.

Tatsächlich ist die Situation komplizierter, als daß sie sich durch eine einfache sprachliche Regel entscheiden ließ. Eine „echte“ mengenartige Größe hat die Eigenschaft, daß sie im Raum verteilt sein und strömen kann, daß es zu ihr also eine *Dichte* und einen *Strom* (mathematisch genauer, eine *Stromdichte*) gibt. So gibt es eine *Energiedichte* und einen *Energiestrom*, eine *Impulsdichte* und einen *Impulsstrom*, eine *Entropiedichte* und einen *Entropiestrom*, eine *Mengendichte* und einen *Mengenstrom* usw. Aber es gibt keine *Volumendichte* und keinen *Volumstrom*. Das Volumen V ist keine „echte“ mengenartige Größe. Daß es dennoch oft zweckmäßig ist, V als Größe eines Systems zu verwenden und unter die in der *Gibbsschen Fundamentalform* (2) auftretenden Variablen X_i einzureihen, steht auf einem anderen Blatt. Tut man es, so tritt in (4) der traditionell „Arbeit“ genannte Term $-p dV$ auf, in dem p den Druck bezeichnet. Wir kommen auf diese Frage zurück.

Vorerst ist einmal die *physikalische wie didaktische Wichtigkeit der Ströme* zu betonen. Wir sagten, daß es zu jeder echten mengenartigen Größe X_i einen Strom I_{X_i} gibt. Der Zusammenhang von mengenartiger Größe und ihrem Strom bildet die Basis einer für den praktischen Umgang mit den mengenartigen Größen unabdingbaren Anschauung: Eine mengenartige Größe X_i ist eine Art „Substanz“, die in einem physikalischen System, einem Objekt, enthalten ist und die von diesem Objekt auf andere Objekte überströmen oder umgekehrt von anderen Objekten als Strom

I_{X_i} geliefert werden kann. Diese Anschauung kann gar nicht plastisch und gegenständlich genug geformt werden! Sie dem Anfänger von vorn herein nahezubringen und sie in ihm zu festigen, stellt deshalb die didaktische Grundabsicht des ganzen vorliegenden Kurses dar.

Die Vorstellung der strömungsfähigen mengenartigen Größe erlaubt es auch, der Grundgleichung (2), der Gibbsschen Fundamentalform, eine sehr anschauliche Deutung zu geben, wenn alle in ihr auftretenden Variablen X_i echt mengenartig sind. Dividiert man nämlich Gl. (2) durch dt , so erhält man

$$\frac{dE}{dt} = \sum_i \xi_i \frac{dX_i}{dt}. \quad (5)$$

Denkt man sich nun die Änderungen dX_i der Größe X_i wie auch die Änderungen dE der Energie E durch Zustrom oder Wegstrom, kurzum durch den Strom I_{X_i} bewirkt, so sind die zeitlichen Änderungen dX_i/dt gleich dem Strom I_{X_i} und (5) lautet

$$I_E = \sum_i \xi_i I_{X_i}. \quad (6)$$

In Worten heißt diese Beziehung: Der gesamte Energiestrom ist eine Summe von Energieströmen $\xi_i I_{X_i}$, von denen jeder von einem X_i -Strom begleitet, oder anschaulicher gesprochen, „getragen“ wird. Die *Gibbssche Fundamentalform* läßt sich dann in die anschauliche Regel umformen:

Strömende Energie läßt sich in Formen $\xi_i I_{X_i}$ einteilen, wobei jede Energieform gekennzeichnet ist durch den Strom I_{X_i} , der die Energie begleitende Größe X_i .

Diese einfache und wirkungsvolle Regel, wonach die Energie in Formen eingeteilt werden kann, gilt, wie betont sei, nur für *strömende* Energie, nicht dagegen für gespeicherte, also in einem System enthaltene Energie. Dieser Hinweis ist deshalb notwendig, weil es eine in der Literatur weitverbreitete Usance ist, auch gespeicherte Energie mit Gewalt in Formen einteilen zu wollen. Das Vorbild hierfür ist natürlich wieder die Newtonsche Mechanik mit ihrer Zerlegung der Energie in kinetische und potentielle Energie. Daß eine derartige Zerlegung in den meisten, vor allen den physikalisch wichtigsten Fällen jedoch nicht möglich ist, läßt sich von Seiten der Mechanik und ihrer Denkgewohnheiten her nicht be- greifen.

10. Die Rolle der geometrischen Begriffe in der allgemeinen Dynamik

Der für wissenschaftliche wie für didaktische Zwecke fundamentale Zusammenhang zwischen den echt mengenartigen Größen und ihren Strömen weist den sonst von uns gern bevorzugten geometrischen Größen eine ganz andere Rolle zu als wir gewohnt sind: Geometrische Größen sind keine physikalischen Größen, sondern Mittel zur Benennung, zur „Namensgebung“ von physikalischen Systemen. Das wollen wir im folgenden auseinandersetzen. Treten, wie es geschehen kann und auch häufig geschieht, geometrische Größen in einer *Gibbsschen Fundamentalform* als Variablen auf, so spielen sie also streng genommen die Rolle von Provisoria. Das gilt wie wir sehen werden, sogar für das Volumen.

Zunächst gibt es zu geometrischen Größen wie Punkten, Kurven, Flächen offensichtlich weder Dichten noch Ströme. Der in manchen Darstellungen verwendete „Volumstrom“ ist eine allzu formale Bildung. Er wäre ein Strom, der nie allein auftreten könnte, sondern wie ein Anhängsel an einem Mengenstrom (Stoffmengenstrom) haftet. Außerdem gibt es für das Volumen V offensichtlich keine Dichte. Die vertrauteste geometrische Größe, der *Ort* oder die *Lage* r eines Körpers, ist ebenfalls klarerweise keine mengenartige Größe. Dennoch wird r gern wie eine physikalische Größe benutzt, nämlich dann, wenn man Prozesse im Auge hat, bei denen ein als Individuum betrachtetes Objekt, ein Körper oder ein Teil eines Körpers, eine *Verschiebung* dr , also eine *Ortsänderung* erfährt. Kostet die Verschiebung Energie, so läßt diese sich bekanntlich schreiben $-F dr$, wobei F gewohnheitsgemäß „die auf den Körper wirkende Kraft“ und $F dr$ „die von der Kraft F am Körper geleistete oder verrichtete Arbeit“ genannt werden. Da auch die mit der Verschiebung verknüpfte Energie die Gestalt ξdX hat, paßt sie in die Fundamentalform und wird deshalb auch gern in diese aufgenommen. Gl. (4) lautet dann

$$dE = v dP - F dr + \omega dL + T dS + \dots \quad (7)$$

In der Punktmechanik betrachtet man nur Prozesse, bei denen sich P und r ändern, die anderen Größen L, S, \dots dagegen konstant bleiben, so daß $dL = dS = \dots = 0$ ist. Für punktmechanische Vorgänge reduziert sich (7) also auf die einfache Gleichung

$$dE = v dP - F dr. \quad (8)$$

Wie ist diese Gleichung aber zu lesen? P und v sind offenbar Impuls und Geschwindigkeit des Körpers, und $v dP$ ist der mit dem Impulsbetrag dP gleichzeitig auf den Körper übertragene Energiebetrag. Die Größe r ist der Ort des Körpers, dr also die Änderung des Orts. Ist aber auch F eine Größe des Körpers? Wenn sie es wäre, so bestünde die ganze rechte Seite von (8) aus Größen des Körpers, und damit wäre E die Energie des Körpers. Nun ist aber F nach Aussage der Mechanik „die auf den Körper wirkende Kraft“. Danach gibt F die Wirkung von etwas anderem, d.h. eines anderen physikalischen Systems \mathcal{A} auf den Körper an, und daher kann F keine Größe des Körpers selbst sein.

Damit hängt die rechte Seite von (8) aber nicht nur von Größen des Körpers ab, sondern auch von Größen des Systems \mathcal{A} . Dann kann aber auch die auf der linken Seite von (8) erscheinende Energie E nicht einfach die Energie des Körpers sein. Aber die Energie welches physikalischen Systems ist E dann? Die Antwort ist nach der vorangegangenen Argumentation nicht schwer zu erraten: E muß die Energie des Gesamtsystems sein, das aus dem Körper und dem System \mathcal{A} besteht, das mittels F auf den Körper wirkt. Nach den Regeln der allgemeinen Dynamik äußert sich im Auftreten von F das Überströmen von Energie zusammen mit (mindestens) einer zweiten mengenartigen Größe vom System \mathcal{A} auf den Körper oder umgekehrt vom Körper auf das System \mathcal{A} . Diese zweite Größe muß der Impuls sein, denn wenn der Körper der Kraft F überlassen ist, ändert sich sein Impuls. Die Kraft F ist somit nichts anderes als Ausdruck eines Impulsstroms, der vom System \mathcal{A} auf den Körper fließt oder umgekehrt vom Körper auf das System \mathcal{A} . Ist F gegeben, so kennt man das System \mathcal{A} zwar nicht völlig, man weiß aber, wie es mit dem Körper Impuls austauscht.

Als ein einfaches Beispiel betrachten wir einen Körper im Schwerfeld der Erde. Dann ist $F = mg$, wobei g den Vektor der Erdbeschleunigung bezeichnet. Das System \mathcal{A} ist in diesem Fall die Erde mit ihrem Schwerfeld, und E ist die Energie des Systems „Körper+Erde mit Schwerfeld“. Die Gl. (8) lautet dann

$$dE = v dP - mg dr = v dP + mg dz; \quad (9)$$

darin ist z die vertikal nach oben weisende Ortskoordinate. Gl. (9) ist so zu lesen: Wird dem Körper der Impuls dP zugeführt, oder wird der Körper um dr verschoben, so ändert sich die

Energie E des Systems „Körper+Erde mit Schwerfeld“ um den durch (9) gegebenen Betrag.

Verschiebt man den Körper bei konstantem Impuls ($dP=0$), etwa beim Wert $P=0$, also den ruhenden Körper, vom Ort r_1 mit der Höhe z_1 zum Ort r_2 mit der Höhe z_2 , so muß dazu dem System der Energiebetrag

$$\Delta E = \int_{z_1}^{z_2} mg dz = mg(z_2 - z_1) \quad (10)$$

zugeführt werden. Diese Gleichung schreiben wir um in eine auf den ersten Blick etwas befremdlich wirkende Form, nämlich

$$\begin{aligned} \Delta E &= (g z_2) m + (g z_1) \cdot (-m) \\ &= (g z_2) \int_0^m dm_{r_2} + (g z_1) \int_m^0 dm_{r_1}. \end{aligned} \quad (11)$$

Der Energiebetrag ΔE erscheint hier als die Energie, die notwendig ist, um am Ort r_1 die Masse des Körpers vom Wert m auf den Wert Null abnehmen und am Ort r_2 vom Wert Null auf den Wert m zunehmen zu lassen, in moderner Ausdrucksweise, um die Masse m am Ort r_1 zu vernichten und am Ort r_2 zu erzeugen. Es sei ausdrücklich darauf aufmerksam gemacht, daß nicht von der Erzeugung oder Vernichtung des Körpers die Rede ist, sondern von der Erzeugung und Vernichtung einer mengenartigen physikalischen Größe, nämlich der Masse. Die Masse erscheint hier nicht, wie in der Mechanik üblich, als ein Charakteristikum, als eine Art Name des Körpers, sondern als eine Größe, die der Körper enthält, und die im Prinzip ihren Wert ändern kann. Man erkennt unschwer, daß diese Beschreibung verallgemeinerungsfähig und auf alle mengenartigen Größen ausdehnbar ist. Neben der Masse m ist das hier vor allem der Impuls P ; weitere mengenartige Größen lassen wir im Augenblick außer acht. Der Körper wird damit automatisch zu einem Bündel mengenartiger Größen. Was aber wichtiger ist: Seine Bewegung wird eine Folge von Vernichtungs- und Erzeugungsprozessen, von ständigem Vergehen und Werden. Alle mengenartigen Größen, die der Körper enthält, werden am Ort r , an dem er sich befindet, vernichtet und am Nachbarort $r + dr$ in gleichen oder anderen Beträgen wieder erzeugt.

Die Energieänderung, die das System „Körper + System, das auf ihn Kraft ausübt“ bei diesen Erzeugungs- und Vernichtungsprozessen erfährt, berechnet sich gemäß der Gleichung

$$dE = \sum_r v_r dP_r + \sum_r \Phi(r) dm_r. \quad (12)$$

Zunächst fällt auf, daß in dieser Gleichung, wie in (11), der Ort r nicht als physikalische Größe auftritt, sondern als Index zur Benennung aller Orte oder Volumelemente, die bei den fraglichen Prozessen mitspielen können. Jedes solches Volumelement, dessen „Name“ die Stelle r ist, repräsentiert ein System, das die mengenartigen Größen P_r , m_r hat und dessen intensive Größen v_r und $\Phi(r)$ sind. Daß wir nicht auch $\Phi(r)$ in der Form Φ_r schreiben, hat lediglich den Grund, daß diese Größe in der Physik ein wohlbekanntes Skalarfeld ist, nämlich das Gravitationspotential; im Fall des Erdfeldes ist

$$\Phi(r) = -g r.$$

Man erkennt, daß (11) aus (12) hervorgeht für folgende Prozesse: Alle $dP_r = 0$, ebenso alle $dm_r = 0$ außer an den Stellen r_1 und r_2 . Für diese Prozesse lautet (12)

$$dE = \Phi(r_1) dm_{r_1} + \Phi(r_2) dm_{r_2}. \quad (13)$$

Die Änderungen der Massenvariablen m_{r_1} und m_{r_2} erfolgen nun so, daß die Gesamtmasse erhalten bleibt, daß also

$$d(m_{r_1} + m_{r_2}) = 0. \quad (14)$$

Das in (13) eingesetzt, liefert

$$dE = [\Phi(r_2) - \Phi(r_1)] \cdot dm_{r_2}. \quad (15)$$

Integriert man diese Gleichung von 0 bis m , so resultiert die Gl. (11).

Auf den ersten Blick bedeutet die dynamisch konsequente Fassung (12) der provisorischen Fundamentalform (8) eine erhebliche Komplikation: Nicht nur wird die „natürliche“ Auffassung der Bewegung als stetiger geometrischer Konfigurationsablauf ersetzt durch eine „unanschauliche“ Folge von Vernichtungs- und Erzeugungsvorgängen, von Vergehen und Werden, es treten auch sehr viel mehr, streng genommen sogar unendlich viele Variablen auf, wo die herkömmliche Beschreibung mit wenigen auskommt. Dennoch bedeutet diese Komplikation nicht eine Erschwerung in jeder Hinsicht. Es gibt eine Reihe praktischer Probleme, bei denen die Energieform „Gravitationsenergie“ $\Phi(r) dm_r$ viel einfacher und durchsichtiger zu handhaben ist als die gewohnte Beschreibung der Mechanik, etwa bei der Bewegung von Flüssigkeiten. Was uns aber wichtiger erscheint, ist die Einfachheit der begrifflichen Anschauung, die die dynamische Beschreibung mit sich bringt: Man gewöhnt sich schnell daran, in jedem Einzelfall die physikalischen Systeme zu suchen, die bei einem Vorgang mit im Spiel sind, und ebenso versucht man sich ein Bild davon zu

machen, wie die mengenartigen Größen bei dem Vorgang zwischen den Systemen hin und her strömen. Außerdem hat man aber gar keine andere Wahl, wenn man die moderne Physik verstehen will. Denn was wir erläutert haben, ist die Beschreibung des Bewegungsvorgangs auf der Basis der allgemeinen Dynamik mit den Begriffen Zustand und Übergang. Diese Beschreibung hat ersichtlich den Vorteil, begrifflich den Beschreibungsverfahren sehr ähnlich zu sein, mit denen die Teilchenphysik unserer Tage ihre Vorgänge erfaßt. Das wird dem Leser vermutlich längst aufgefallen sein.

11. Die Größe „Volumen“

Die Übersetzung der provisorischen Fundamentalform (8) in die dynamisch konsequente Form (12) läßt außerdem verstehen, welche Rolle das Volumen in der allgemeinen Dynamik spielt. Die rechte Seite von Gl. (12) ist mathematisch eigentlich nicht definiert, denn es ist nicht erklärt, was eine Summe über einen kontinuierlichen Indizesbereich, hier das Kontinuum der Werte von r , bedeutet. Intuitiv ist allerdings klar, was gemeint ist: Man denkt sich den Raum in lauter Zellen eingeteilt, wobei die Größe r zur Numerierung der Zellen dient. Der Wert von r ist, wie wir schon sagten, der „Name“ der Zelle. Die Summen in (12) sind daher Summen über die Zellen, wobei P_r und m_r den Impuls und die Masse des in der Zelle mit der Nummer r enthaltenen physikalischen Systems bezeichnet. Ist die Zelle r „leer“, so bedeutet das $P_r = 0$, $m_r = 0$. Die mathematische Fassung dieses Tatbestands folgt bekannten Wegen. Hat die Zelle r das Volumen ΔV_r , so ist die in ΔV_r enthaltene Masse m_r gegeben durch $\hat{m}(r) \Delta V_r$; dabei ist $\hat{m}(r)$ die Massendichte am Ort r , genauer die mittlere Massendichte in der Zelle r . Entsprechend ist $P_r = \hat{P}(r) \Delta V_r$, worin $\hat{P}(r)$ die Impulsdichte am Ort r bezeichnet. Die in (12) auftretenden Änderungen dm_r der voneinander unabhängigen Massenvariablen m_r geschehen nicht etwa durch Änderung des Volumens ΔV_r , sondern allein durch Änderung der Massendichte $\hat{m}(r)$. Ebenso sind mit den Änderungen dP_r der voneinander unabhängigen Impulsvariablen P_r nur die Änderungen gemeint, die durch Änderungen der Impulsdichte $\hat{P}(r)$ zustandekommen. Gl. (12) ist mathematisch korrekter also zu schreiben

$$dE = \sum_r [v_r d\hat{P}(r) + \Phi(r) d\hat{m}(r)] \Delta V_r. \quad (16)$$

Wird die Zelleinteilung beliebig verfeinert, so geht die Summe in (16) gegen ein Integral. Für unsere Überlegungen ist das nicht von besonderem Interesse. Aus (16) ist auch so die Rolle des Volumens in der allgemeinen Dynamik abzulesen, nämlich daß das Volumen die Rolle der Systembenennung spielt, und daß die Anzahl der Volumina ΔV_r etwas über die Anzahl der unabhängigen Variablen des Gesamtsystems aussagt.

Um jedoch zu verstehen, wie das Volumen manchmal auch als physikalische Größe in die Gibbssche Fundamentalform eindringt und dort in der Energieform $-p dV$ auftritt, betrachten wir nicht, wie in (16), Vorgänge, bei denen Änderungen der räumlichen Impuls- und Masseverteilung im Spiel sind, sondern wir untersuchen Vorgänge, bei denen sich die räumliche Verteilung der Entropie- und Mengendichte ändern, wie z. B. bei der Kompression eines Gases. Auch diese Vorgänge lassen sich durch eine Gleichung schreiben, die ebenso gebaut ist wie (16), nämlich

$$dE = \sum_r [T_r dS_r + \mu_r dn_r] \\ = \sum_r [T(r) d\hat{s}(r) + \mu(r) d\hat{n}_r] \Delta V_r. \quad (17)$$

Hierin bedeuten $\hat{s}(r)$ die *Entropiedichte* und $\hat{n}(r)$ die *Mengendichte* am Ort r , das heißt in der Zelle r . $S_r = \hat{s}(r) \Delta V_r$ und $n_r = \hat{n}(r) \Delta V_r$ sind also die in der Zelle r enthaltene Entropie und Menge. Die Summe $\sum_r S_r = S$ ist die Gesamtentropie, entsprechend $\sum_r n_r = n$ die Gesamtmenge des Systems. Die Summe aller Volumina ΔV_r , für die $\hat{n}(r) \neq 0$ ist, heißt das *Gesamtvolumen* V des Systems. Wir nehmen an, daß das Gesamtvolumen endlich ist, daß $\hat{n}(r)$ – wie übrigens auch $\hat{s}(r)$ – in nur endlich vielen Zellen einen von Null verschiedenen Wert hat. Gl. (17) wenden wir nun an auf den Prozeß der Kompression eines Gases. Wir lassen dabei gleichzeitig zu, daß das Gas seine Entropie und seine Menge ändern kann. Abb. 4 zeigt diesen Prozeß einmal in gewohnter Beschreibung als Verkleinerung des Volumens V um den Betrag ΔV mittels eines bewegten Kolbens, zum anderen in der Beschreibung von Gl. (17). Das Gesamtvolumen V ist eine Summe der Volumina ΔV_r . Die Kompression um ΔV läuft darauf hinaus, daß in der Zelle 5 die Entropie vom Wert S_5 auf den Wert Null gebracht wird und ebenso die Menge vom Wert n_5 auf den Wert Null. Im Anfangszustand (a) haben die Entropiedichten wie auch die Mengendichten in al-

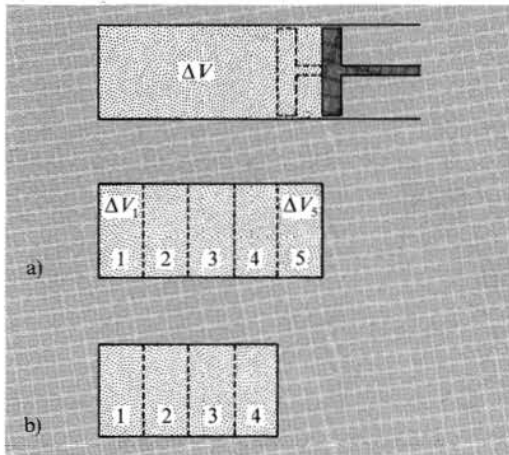


Abb. 4 Kompression eines Gases in konsequent dynamischer Darstellung: In der Zelle 5 werden alle mengenartigen Größen auf den Wert Null gebracht.

len Zellen denselben Wert, d.h. es ist $\hat{s}_1 = \dots = \hat{s}_5 = \hat{s}$ und $\hat{n}_1 = \dots = \hat{n}_5 = \hat{n}$, ebenso ist $T_1 = \dots = T_5 = T$ und $\mu_1 = \dots = \mu_5 = \mu$. Während des Prozesses mögen diese Gleichheiten weiterhin für die Zellen 1 bis 4 gelten. Außerdem mögen bei den Zustandsänderungen die Temperatur T und das chemische Potential μ konstant bleiben oder ihre Änderungen wenigstens so klein sein, daß sie als konstant betrachtet werden dürfen. Dann gilt für den Prozeß (a) \rightarrow (b)

$$\Delta E = E(b) - E(a) \\ = T \int_a^b \sum_{i=1}^4 dS_i + \int_a^b T_5 dS_5 \\ + \mu \int_a^b \sum_{i=1}^4 dn_i + \int_a^b \mu_5 dn_5 \\ = T \Delta S + \mu \Delta n + T S_5 + \mu n_5 \\ + \int_a^b T_5 dS_5 + \int_a^b \mu_5 dn_5. \quad (18)$$

Hierbei haben wir benutzt, daß $S = \sum_i S_i$ und daher

$$\Delta S = \sum_i \Delta S_i + \Delta S_5 = \sum_i \Delta S_i - S_5,$$

denn beim Prozeß (a) \rightarrow (b) wird die Entropie der Zelle 5 vom Wert S_5 auf den Wert Null geändert, so daß ΔS_5 gleich $-S_5$ ist. Entsprechend ist $\Delta n = \sum_i \Delta n_i - n_5$. Nun ist aber

$$\int_a^b [T_5 dS_5 + \mu_5 dn_5] = \int_a^b dE_5 = \int_{E_5}^0 dE_5 = -E_5.$$

Damit läßt sich (18) schreiben

$$\begin{aligned}\Delta E &= T\Delta S + \mu\Delta n - (E_5 - TS_5 - \mu n_5) \\ &= T\Delta S + \mu\Delta n - (\hat{e}_5 - T\hat{s}_5 - \mu\hat{n}_5)\Delta V_5 \\ &= T\Delta S + \mu\Delta n + (\hat{e}_5 - T\hat{s}_5 - \mu\hat{n}_5)\Delta V.\end{aligned}\quad (19)$$

Dabei haben wir ausgenutzt, daß im Anfangszustand die Werte der Dichten in allen Zellen gleich sind und außerdem $\Delta V = -\Delta V_5$ ist. Ist in Gl. (19) ΔV infinitesimal klein, so gilt

$$dE = TdS + \mu dn - pdV;\quad (20)$$

hierin ist p die Größe

$$p = -\hat{e} + T\hat{s} + \mu\hat{n}.\quad (21)$$

Das ist, wie wir hier nicht näher begründen wollen, tatsächlich der Druck des Systems.

Die Umformung der dynamisch konsequenten Fundamentalform (17) in die provisorische Fundamentalform (20) verläuft also im Prinzip ganz analog der Umformung von (12) in (8). Die relative Umständlichkeit dieser Umformung rührt daher, daß infinitesimale Prozesse in den Variablen der Form (20) nicht auch infinitesimale Prozesse in den Variablen der Form (17) sind; denn eine noch so kleine Änderung des Gesamtvolumens bedeutet stets, gewisse S_r und n_r von einem endlichen Wert auf den Wert Null oder umgekehrt vom Wert Null auf einen endlichen Wert zu bringen. Dynamisch gesehen ist die Änderung eines Volumens also nicht Ausdruck der Änderung des Wertes einer physikalischen Größe, sondern der Änderung der Anzahl von voneinander unabhängigen dynamischen Variablen des Systems. Obwohl die Verwendung des Volumens V als Variable und $-pdV$ als Energieform oftmals sehr praktisch sind, sind sie vom Standpunkt der allgemeinen Dynamik als Provisorium anzusehen. Stellt man, wie es in dem nachfolgend erläuterten Physikkurs geschieht, die Ströme mengenartiger Größen in den Vordergrund, so tritt das Volumen als eigenständige physikalische Größe nicht auf.

12. Resümee und didaktische Schlußfolgerungen

Die logische Unterscheidung zwischen begrifflichem Aufbau und innerer Struktur der Physik und die Relation dieser beiden im Hinblick auf die historischen Entwicklungsstufen macht klar, wie die Voraussetzungen aussehen, von denen die Didaktik dieses Faches auszugehen hat. Im wesentlichen bietet sich eine einfache Alternative:

Entweder folgt man im begrifflichen Aufbau der historischen Vorgehensweise mit der Konsequenz, daß beim Übergang von klassischer Physik zur Quantenphysik ein begrifflicher Bruch stattfindet, dessen Überwindung de facto auf das Erlernen eines zweiten, nämlich quantenphysikalischen Begriffssystems hinausläuft, oder man legt den Aufbau von vornherein so an, daß der Übergang von klassischer Physik zur Quantenphysik nicht als wissenschaftliche Revolution, sondern als Weiterentwicklung, in mancher Hinsicht sogar als Ergänzung des Begriffssystems erscheint.

Der Fachphysiker sollte möglichst beide Wege kennen, bzw. kennenlernen, weil er damit ein intimeres Verhältnis zu seiner Wissenschaft und seinem Beruf bekommt. Ein Physikunterricht jedoch, der sich vornehmlich an den Nicht-Physiker richtet, muß sich notgedrungen für einen der beiden Wege entscheiden. Da hat nun die zweite Alternative entscheidende Vorteile:

- Das Beschreibungsverfahren, nämlich Vorgänge durch Bilanzieren mengenartiger Größen zu fassen, ist ohne Wechsel in den Grundregeln einheitlich auf alle Gebiete der Physik anwendbar, es schließt sogar die Chemie ein.
- Die Mengenartigkeit einer Größe erlaubt eine einfache, konkrete Anschauung von der Größe als einer Art Substanz und bildet so einen gefühlsmäßigen, nicht nur mathematisch-formalen Zugang zu ihrer quantitativen Fassung.
- Das Bild fließender Ströme vermittelt ein intuitives Verständnis für das, was physikalische Wechselwirkung heißt. Überdies kräftigt es eine konkrete Anschauung von der Mengenartigkeit der dabei ausgetauschten Größen.
- Das dynamische Beschreibungsverfahren ist formal so einfach, daß keine Zugeständnisse an wissenschaftlicher und begrifflicher Strenge gemacht werden müssen.
- Das Beschreibungsverfahren ist unmittelbar und ohne Wirklichkeitsfremde Idealisierungen auf die Vorgänge unseres täglichen Lebens und der es beherrschenden biologischen und technischen Prozesse anwendbar.

Das alles sind Vorzüge, die für den Lernenden stark ins Gewicht fallen. Hat er einmal an einer Größe, etwa der Energie, die Methode begriffen und ihre überraschende Wirksamkeit kennengelernt und hat er gemerkt, daß man mit einer

einzig Größe nicht auskommt, so bietet die Ausdehnung auf weitere Größen keine prinzipielle Schwierigkeit. Methodisch hat er ja nichts Neues zu lernen. Das Verfahren verlangt keine größere Abstraktionsfähigkeit als der herkömmliche Physikunterricht, im Gegenteil sogar weniger, denn es ist von einer Einfachheit, die unter Wahrung logischer Strenge kaum zu überbieten ist.

Nicht einfach ist es allerdings für denjenigen, der *umlernen* muß, der sich in den Begriffen und Vorstellungen der herkömmlichen klassischen Physik, nämlich der Mechanik und Elektrodynamik, eingerichtet hat. Das dynamische Verfahren wird ihm ähnliche, allerdings auch nicht mehr Schwierigkeiten machen, wie er sie von der Thermodynamik her gewöhnt ist. Es ist eine bekannte Tatsache, daß diese Theorie einem in mechanischen Bildern denkenden Physiker Schwierigkeiten macht. Das äußert sich z.B. darin, daß er bei jeder sich bietenden Gelegenheit auf die kinetische Theorie auszuweichen sucht und das sogar dort tut, wo es mit erheblichen Komplikationen verbunden ist. Diese Erfahrung läßt leider nicht viel Hoffnung: Die wissenschaftliche Stärkung und ständige Übung unserer ohnehin intuitiv begünstigten Tendenz, alle Vorgänge als Bewegung irgendwelcher Teilchen begreifen zu wollen, macht einen Wechsel zu der dynamischen Grundauffassung allem Anschein nach schwer. Allein schon der Begriff der mengenartigen Größe ist in der Newtonschen Physik mit so viel sachlichen und psychologischen Schwierigkeiten behaftet, daß er sich nur mit größter Mühe bilden läßt. Wer sieht z.B. in der Kraft immer und unter allen Umständen nichts als einen Strom von Impuls, so daß im Interesse einer plastischen Anschauung das Wort Kraft besser durch das Wort *Impulsstrom* ersetzt werden sollte? Ja, wer glaubt überhaupt, ernsthaft so sprechen und denken zu dürfen? Und doch würden große Teile der Newtonschen Mechanik einfacher und durchsichtiger, wenn man dem Impuls die Vorrangstellung einräumen würde, die ihm nach unserer heutigen Erkenntnis gebührt. Das wird im Aufsatz von *F. Herrmann* „Mechanik – Abriß einer Neudarstellung“ gezeigt.

Sogar von der Energie läßt sich im Rahmen der *Newtonschen* Mechanik eine Anschauung greifbarer Mengenartigkeit nur mit Schwierigkeit und gegen den mathematischen Kalkül bilden. Wie soll denn ein Kurvenintegral $\int F dr$, und sei es auch in seiner einfachsten Form $F \Delta r$, das dazu noch „die am Körper verrichtete Arbeit“ genannt wird, zur Vorstellung führen, daß es sich dabei um eine mengenartige Größe handelt, die irgendwo steckt, irgendwo enthalten ist? Würde nicht jeder annehmen, daß, wenn sie schon irgendwo steckt, sie in dem Körper sein müßte, an dem die „Arbeit verrichtet“ wurde. Tatsächlich ist das manchmal auch der Fall, nämlich dann, wenn die Arbeit zur Beschleunigung des Körpers führt. Führt sie jedoch nur zur Änderung der Lage, genauer der Höhe des Körpers über dem Erdboden, so steckt sie nicht im Körper, sondern im Gravitationsfeld. Stattdessen spricht man dann aber von der potentiellen Energie oder der Lageenergie *des Körpers*.

Wer würde, wenn er sich schon einmal zu der Anschauung von der Energie als einer mengen- oder substanzartigen Größe durchgerungen hat, die irgendwo zu suchen ist, diese „potentielle Energie des Körpers“ dann nicht im Körper vermuten? Das aber ist de facto wieder falsch. Glaubt jemand im Ernst, daß sich ein festes Vertrauen in die einfache Vorstellung der Mengen- oder Substanzartigkeit der Energie einstellt, wenn diese Vorstellung in dem Begriffssystem, in dem man operiert, zu einer solchen Kette von Verwirrungen führt? Für die *Newtonsche* Mechanik war die Energie historisch keine mengenartige Größe, sondern eines der „ersten Integrale der Bewegungsgleichungen“, und das bleibt sie in dieser Theorie im Grunde, wie sehr man sich auch um ein anders klingendes Vokabular bemüht. Deutlicher als lange Erläuterungen es könnten, wird das demonstriert durch einen Blick auf die sprachlichen Jonglierübungen mit dem Wort „Arbeit“ und die Arten ihres „Verrichtet-Werdens“ in den verschiedenen Versuchen, den herkömmlichen Physikunterricht unter Betonung des Energiebegriffs elementar darzustellen.

Physikalische Grundlagen und didaktisches Konzept einer elementaren Einführung in die Physik

I. Physikalische Grundlagen

1. Ströme als Grundkonzept

Klassische und moderne Physik, aber auch unterschiedliche Gebiete der Physik offenbaren eine auffallende Einheitlichkeit, wenn man als Fundamentalbegriffe mengenartige Größen verwendet (vgl. den vorstehenden Aufsatz). Vorgänge bestehen dann darin, daß sich an jedem physikalischen System die in ihm enthaltenen Beträge der mengenartigen Größen ändern. Das Wort mengenartig bedeutet, daß die Größe als eine Art Substanz gedacht werden darf, daß sie an unterschiedlichen Stellen im Raum sein kann, kurz daß es eine *Dichte* zu ihr gibt, und daß sie strömen kann, es also einen *Strom* der Größe gibt. Beispiele solcher Größen sind: Energie E , Impuls P , Drehimpuls L , Menge (Stoffmenge) n , elektrische Ladung Q , Entropie S , ... In jedem Zustand eines Systems hat jede der Größen einen festen Wert. Spürbar und damit beobachtbar ist eine Größe an einem System jedoch nur dann, wenn sie ihren Wert *ändert*. Einem Beobachter zugänglich sind also nur *Zustandsänderungen*. Man spricht dann auch von *Übergängen* zwischen Zuständen, allgemein von *Vorgängen*.

Nun besteht zwischen den Veränderungen mengenartiger Größen und Strömen eine enge Beziehung. Für eine Größe, die einem Erhaltungssatz genügt, wie etwa die Energie, ist das evident und besonders leicht einzusehen: Ändert sich der Wert der Energie E eines Systems, nimmt zum Beispiel der Wert von E zu, so muß ein anderes System den Änderungsbetrag liefern. Es fließt ein *Energiestrom* von dem anderen System in das betrachtete. Für eine mengenartige Größe, die keinem generellen Erhaltungssatz genügt, wie etwa die Entropie, wird bei Veränderungen der Größe ein solcher Strom zwar nicht erzwungen, aber es ist stets möglich, zumindest als Gedankenexperiment, sich die Änderung über einen zu- oder wegfließenden Strom der Größe bewerkstelligt zu denken. In jedem Fall

lassen sich also *Vorgänge* und *Ströme der mengenartigen Größen* in engste Verbindung bringen: Die anschauliche Vorstellung eines Stroms induziert zwangsläufig die Vorstellung von der Größe als einer Art Substanz; umgekehrt werden Zustandsänderungen physikalischer Systeme besonders anschaulich durch die Vorstellung zugeströmter oder weggeströmter Beträge mengenartiger Größen.

2. Energieform = Energie + Träger

Zunächst bringen wir noch einmal einige für den Umgang mit Größen wichtige physikalische Gesichtspunkte ins Bewußtsein, die bei einem sachgemäßen Aufbau eines Physikkurses im Auge zu behalten sind. In erster Linie handelt es sich dabei um die Regel:

Bei einem physikalischen Vorgang treten stets mindestens zwei Ströme mengenartiger Größen auf – oder negativ gewendet: Es gibt keinen Vorgang, bei dem nur eine einzige mengenartige Größe strömt. (1)

Wie in dem vorangegangenen Aufsatz gezeigt wurde, ist dieser wichtige Grundsatz kein merkwürdiges Geheimnis der Natur, sondern eine zwangsläufige Folge des Beschreibungsverfahrens der allgemeinen Dynamik. Er ist lediglich eine andere Formulierung der Regel, wonach bei einem Prozeß eines physikalischen Systems mindestens zwei Größen ihren Wert ändern (Regel (ii) im Abschnitt 8 des Aufsatzes von G. Falk).

Eine unmittelbare Folge der obigen Regel ist, daß Energie nie allein strömen kann, daß es sozusagen keine „reine“ Energie gibt. *Strömende Energie wird immer von (mindestens) einer zweiten mengenartigen Größe begleitet*. Diese zweite Größe wollen wir, um eine kräftige Anschauung zu fördern, den jeweiligen *Träger der Energie* nennen. Die obige Regel hat damit die wichtige Konsequenz:

Strömende Energie braucht }
immer einen Träger. } (2)

Die als Träger fungierende zweite Größe definiert physikalisch das, was man gemeinhin gern die *Form* nennt, unter der die Energie bei dem betrachteten Vorgang auftritt. Wir haben damit das nächste Resultat, das eigentlich eine Definition ist:

Strömende Energie zusammen mit dem Strom eines bestimmten Trägers, d.h. einer bestimmten zweiten mengenartigen Größe nennen wir eine Energieform. } (3)

Eine Energieform ist somit durch ein Größenpaar charakterisiert, nämlich die Energie E und die zweite, von uns Träger genannte mengenartige Größe X_i , symbolisch (E, X_i) . Beispiele von Energieformen sind:

Bewegungsenergie:	(Energie, Impuls)	$= (E, P)$	} (4)
Rotationsenergie:	(Energie, Drehimpuls)	$= (E, L)$	
elektrische Energie:	(Energie, Ladung)	$= (E, Q)$	
Wärme:	(Energie, Entropie)	$= (E, S)$	
chemische Energie:	(Energie, Menge)	$= (E, n)$	
Gravitationsenergie:	(Energie, Masse)	$= (E, m)$	

Der anschauliche Inhalt dieser Beispiele ist evident. Das Wort Bewegungsenergie sagt aus, daß ein Energiestrom zusammen mit einem Impulsstrom gemeint ist, etwa in folgendem Zusammenhang: Wird ein Körper aus der Ruhe in Bewegung versetzt, so besteht das Anschieben darin, daß ein Strom von Energie zusammen mit einem Strom von Impuls in den Körper fließt. Analog besteht das Anwerfen eines Schwungrads darin, daß ein Energiestrom zusammen mit einem Drehimpulsstrom, oder, wie wir auch sagen, ein Strom von Rotationsenergie in das Schwungrad fließt. Daß man mit elektrischer Energie stets Energie meint, die zusammen mit elektrischer Ladung strömt, ist sogar dem Nichtphysiker eine vertraute Assoziation. Schwieriger, weil ungewohnter, ist dagegen die Vorstellung, daß Wärme nichts anderes ist als ein von einem Entropiestrom getragener Energiestrom. Was aber jeder Physiker weiß, ist, daß man von Wärme nur sprechen darf, wenn sie von einem Körper auf einen anderen fließt, daß es dagegen falsch ist, von der in einem Körper enthaltenen Wärme zu

sprechen. Die chemische Energie macht dagegen mehr Schwierigkeiten. Nur zu leicht verbindet sich mit diesem Wort zu unrecht das Gefühl, es handele sich dabei um die in dem jeweiligen Stoff steckende Energie. Andererseits ist aber evident, daß man von chemischen *Vorgängen* immer nur dann spricht, wenn die Menge irgendwelcher Stoffe wieder hinausfließt. Der Energiestrom, der rungsversorgung eines Lebewesens oder die Treibstoffversorgung eines Motors aus einem Strom von Stoffen, der in das Lebewesen bzw. den Motor hinein- und als ein Strom anderer Stoffe wieder hinausfließt. Der Energiestrom, der damit gleichzeitig geliefert wird, ist ein Strom chemischer Energie, das heißt *Energie zusammen mit der Größe Menge*, in der Regel sogar mit mehreren unabhängigen Mengen-Variablen n_1, n_2, \dots . Die chemische Energie wurde bereits in Heft 2 der *Konzepte eines zeitgemäßen Physikunterrichts* behandelt. Außerdem wird sie Gegenstand eines der folgenden Hefte dieser Reihe sein.

Die Gravitationsenergie ist aus Gründen einer eingefahrenen Gewohnheit vielleicht die schwierigste Energieform, und zwar deshalb, weil der Name traditionell in einem begrenzteren Sinn gebraucht wird, nämlich als die Energie, die aufgewendet werden muß, um einen Körper aus einem Zustand endlicher Massendichte in einen Zustand mit der Massendichte Null zu bringen, also in einen Zustand, in dem die Masse über den ganzen Raum verteilt ist. Hier ist das Wort Gravitationsenergie nicht nur für diesen speziellen Vorgang gebraucht, sondern allgemein für Vorgänge, bei denen sich Massenverteilungen ändern, bei denen also die Größe Masse von einem Ort zu einem anderen Ort strömt, entweder durch Bewegung von Körpern fester Gestalt oder durch Strömungsvorgänge kontinuierlicher Medien. Bei diesen Vorgängen strömt die Energie immer zusammen mit der Größe Masse.

3. Beladung eines Trägerstroms mit Energie

Nach den bisherigen Betrachtungen bestehen Vorgänge darin, daß Ströme mengenartiger Größen X_1, X_2, \dots zwischen den an den Vorgängen beteiligten Systemen fließen. Jeder X_j -Strom trägt dabei einen Energiestrom. Ist der X_j -Strom Null, so ist auch der von ihm getragene Energie-

strom Null. Somit gilt für jeden X_j -Strom eine Beziehung der Gestalt

$$\text{Von } X_j\text{-Strom getragener Energiestrom} \\ = \text{Beladungsmaß} \times X_j\text{-Strom} = \xi_j I_{X_j}. \quad (5)$$

Die Größe ξ_j hat dieselbe Dimension wie die Größe (Energiestrom/ X_j -Strom) = E/X_j . Wir nennen ξ_j das *Beladungsmaß* des X_j -Stroms mit Energie. Trägt der X_j -Strom viel (wenig) Energie, so hat ξ_j einen großen (kleinen) Wert. ξ_j gibt also an, mit wieviel Energie der X_j -Strom beladen ist. Das liefert eine anschauliche Vorstellung der Größe ξ_j .

Ein vertrautes Beispiel der Beziehung (5) ist die wohlbekannte Gleichung

$$\text{elektrischer Energiestrom (elektrische Leistung)} \\ = \text{Spannung} \times \text{Ladungsstrom (Stromstärke)} \\ = UI_Q. \quad (6)$$

Sie gibt an, wie groß der von einem Strom elektrischer Ladung, also einem Q -Strom getragene Energiestrom ist. Die Spannung ist somit nichts anderes als das Beladungsmaß des elektrischen Stroms mit Energie: Bei doppelter Spannung trägt derselbe Q -Strom den doppelten Energiestrom.

Ein anderes Beispiel der Relation (5), das zwar inhaltlich, aber nicht als formale Beziehung bekannt ist, ist das folgende:

$$\text{Bewegungsenergiestrom} \\ = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Impulsstrom} \\ = v_x I_{P_x} + v_y I_{P_y} + v_z I_{P_z}. \quad (7)$$

Daß diese Beziehung richtig ist, läßt sich schnell einsehen. Wird ein Körper beschleunigt, so wird Impuls auf ihn übertragen, ihm also ein Impulsstrom zugeführt. Gleichzeitig wird dabei Energie auf den Körper übertragen, ihm also auch ein Energiestrom zugeführt. Dieser Energiestrom ist gleich der zeitlichen Änderung der kinetischen Energie des Körpers, so daß

$$\text{Bewegungsenergiestrom} \\ = \frac{d}{dt} \left(\frac{m}{2} v^2 \right) = v \frac{d(mv)}{dt} = v \frac{dP}{dt}. \quad (8)$$

Das ist bereits die behauptete Beziehung (7), denn dP/dt ist gleich dem dem Körper zugeführten Impulsstrom. Die Geschwindigkeit v erscheint hier nicht als kinematische, aus Längen- und Zeitmessungen gewonnene Größe, sondern als das Energie-Beladungsmaß eines Impulsstroms. Es ist bemerkenswert, daß, wie (7) und (8) zeigen, der von einem Körper aufgenommene

Impulsstrom einen Energiestrom trägt, der allein von der momentanen Geschwindigkeit des Körpers abhängt, nicht dagegen davon, ob es sich um einen Körper großer oder kleiner Masse handelt.

Entsprechende Überlegungen zeigen, daß Änderungen des Rotationszustands eines Körpers, etwa eines Schwungrads, der zu (7) analogen Beziehung genügen

$$\text{Rotationsenergiestrom} \\ = \text{Winkelgeschwindigkeit} \times \text{Drehimpulsstrom} \\ = \omega_x I_{L_x} + \omega_y I_{L_y} + \omega_z I_{L_z}. \quad (9)$$

Auch die Winkelgeschwindigkeit ω spielt somit die Rolle eines Beladungsmaßes: Sie gibt an, mit wieviel Energie ein Drehimpulsstrom beladen ist.

Vergleicht man die bisherigen Beispiele mit den Ausführungen in den Abschnitten 8 und 9 des Aufsatzes von G. Falk, so folgt:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Jedes Beladungsmaß } \xi_j \text{ ist identisch mit} \\ \text{einer intensiven Größe, also mit einer} \\ \text{Komponente der Geschwindigkeit } v, \text{ der} \\ \text{Winkelgeschwindigkeit } \omega, \text{ mit dem} \\ \text{elektrischen Potential } \varphi, \text{ der absoluten} \\ \text{Temperatur } T, \text{ dem chemischen Potential} \\ \mu, \text{ dem Gravitationspotential } \Phi. \end{array} \right\} \quad (10)$$

Die in der Wärmelehre sonst mit so viel formalem Ballast vermittelte thermodynamische oder absolute Temperatur T ist demnach auch nichts anderes als ein Beladungsmaß, und zwar ein Beladungsmaß das angibt, mit wieviel Energie ein Entropiestrom beladen ist. Es ist:

$$\text{Wärmestrom} \\ = \text{absolute Temperatur} \times \text{Entropiestrom} \\ = T I_S. \quad (11)$$

Daß die absolute Temperatur T hier als Beladungsmaß eines Entropiestroms mit Energie erscheint, macht sofort ihre Sonderrolle unter allen sonstigen „Temperaturen“ verständlich, wie sie mit Hilfe der Ausdehnung von Körpern, der Spannung, oder der Magnetisierung festgelegt werden. Die Einsicht, daß die absolute Temperatur ein Beladungsmaß ist, vermittelt einen einfachen anschaulichen Zugang zum Begriff der absoluten Temperatur und läßt andere Temperaturen, wie etwa die Celsius-Temperatur, als physikalische Provisoria erkennen.

Im Fall eines chemischen Energiestroms, also eines von einem Mengenstrom, das heißt einem Strom der Größe n getragenen Energiestroms heißt das Beladungsmaß „chemisches Potential“.

Es gilt

chemischer Energiestrom

= chemisches Potential \times Mengenstrom

$$= \mu \cdot I_n. \quad (12)$$

Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, daß das chemische Potential μ der Beladungsfaktor nur des Mengenstroms, d.h. des n -Stroms ist, nicht dagegen des Stoff-Stroms. Wenn nämlich ein Stoff strömt, so bedeutet das, daß nicht nur die Menge, also die Größe n strömt, sondern gleichzeitig auch Entropie, d.h. die Größe S , sowie Masse m , Impuls P und Drehimpuls L (meist „Spin“ der Atome oder Moleküle des Stoffs genannt) strömen. Ein strömender Stoff ist also ein ganzes Bündel von X_j -Strömen, und der Strom der Menge n ist davon nur ein einziger. Das chemische Potential des Stoffs ist der Beladungsfaktor nur dieses n -Stroms.

Der Gravitationsenergiestrom schließlich ist der von einem Massestrom getragene Energiestrom, als Formel geschrieben

Gravitationsenergiestrom

= Gravitationspotential \times Massestrom

$$= \Phi \cdot I_m. \quad (13)$$

Die Beispiele demonstrieren mit großer Deutlichkeit die formal sehr einfache und einheitliche Regel (5), die für Ströme jeder Energieform gilt, gleichgültig in welchem Gebiet der Physik sie auftreten. Gleichzeitig erhält man eine wirksame und korrekte Anschauung von den intensiven physikalischen Größen: Sie sind Beladungsmaße, d.h. sie geben an, wie die verschiedenen Trägerströme mit Energie beladen sind.

4. Die Einordnung der Teilgebiete der Physik in das Konzept der mit Energie beladenen Trägerströme

Die Vorstellung, daß strömende Energie von bestimmten strömenden Größen, den Energieträgern, gemäß (5) getragen wird, läßt erwarten, daß der gesamte bei einem Vorgang fließende Energiestrom gegeben ist durch die Summe der von den einzelnen Trägerströmen getragenen Energieströme, daß also gilt

$$\text{gesamter Energiestrom} = I_E = \sum_j \xi_j I_{X_j}. \quad (14)$$

Das ist tatsächlich die Gl.(6) des vorstehenden Aufsatzes von *G.Falk*. Wie dort gezeigt wird, ist

diese Gleichung eine Folge der *Gibbschen Fundamentalform*

$$dE = \sum_j \xi_j dX_j. \quad (15)$$

Diese Gleichung beschreibt, wie für ein System mit den unabhängigen Variablen X_j die Änderungen dE der Energie E des Systems mit den Änderungen dX_j der Größen X_j zusammenhängt. Sind die Größen X_j mengenartig, so lassen sich die Änderungen dX_j stets dadurch bewirken, daß Ströme I_{X_j} in das System fließen, so daß dann von (15) auf (14) geschlossen werden kann. Man dividiert dazu (15) durch dt und denkt sich jede Änderung dX_j/dt durch den Zufluß eines X_j -Stroms, d.h. durch $I_{X_j} = dX_j/dt$ realisiert.

Wie ordnen sich nun die herkömmlichen Teilgebiete der Physik in die Systematik der durch Trägerströme getragenen Energie ein? Die Antwort liegt auf der Hand: Die traditionellen Teilgebiete der Physik sind jeweils dadurch definiert, daß in ihnen nur ganz bestimmte Trägerströme auftreten.

Die *Mechanik freier Massenpunkte* ist z.B. dadurch gekennzeichnet, daß in ihr nur Impulse und Impulsströme auftreten und die von diesen getragenen Energieströme. Die Beschleunigung eines Körpers ist die Zufuhr von Energie zusammen mit Impuls durch einen energietragenden Impulsstrom. Die Masse des beschleunigten Körpers drückt sich dabei dadurch aus, wieviel Energie der Körper mit einem bestimmten Impulsbetrag aufnimmt. Bei Stoßvorgängen fließen Impuls- und Energieströme zwischen den Stoßpartnern. Die grundlegende Beziehung für all diese Vorgänge ist die Gl.(14) bzw. (15), wobei die Größen X_j nun die Impulse und die ξ_j die Geschwindigkeiten der Körper sind, und zwar gibt es sovielen unabhängige Impulse und Geschwindigkeiten wie es sich unabhängig bewegende Körper gibt.

In der *Mechanik starrer Körper* treten neben Impulsen und Impulsströmen noch Drehimpulse und Drehimpulsströme auf. Entsprechend reduziert sich (14) so, daß auf der rechten Seite nur unabhängige Impuls- und Drehimpulsströme auftreten, die jeweils mit ihren Beladungsmaßen, d.h. mit den Geschwindigkeiten und Winkelgeschwindigkeiten multipliziert werden.

Die *Elektrizitätslehre* wird durch das Auftreten von Ladungen und Ladungsströmen charakterisiert. Treten daneben noch Impulse und Impulsströme auf, so enthalten (14) bzw. (15) die Prozesse der Mechanik geladener Massenpunkte.

Die *Wärmelehre* ist dadurch gekennzeichnet, daß in (14) bzw. (15) Entropie und Entropieströme sowie Mengen und Mengenströme auftreten. Das schließt übrigens gleichzeitig die der *Chemie* zugerechneten Prozesse ein, bei denen sich Stoffmengen verändern, also Stoffe sich ineinander umwandeln. In der traditionellen Wärmelehre wird das nicht sofort sichtbar, da scheinbar nicht Mengen sondern Volumina auftreten. Im Abschnitt 11 des Aufsatzes von *G. Falk* wird jedoch gezeigt, daß das nur eine provisorische Formulierung der Fundamentalform (15) bedeutet, die in eine dynamisch konsequente Formulierung umgeformt werden kann, in der Mengen und Mengenströme auftreten.

Während in den meisten dieser Gebiete der Physik traditionell begrifflich recht verschiedene Darstellungen üblich sind, erscheinen sie hier formal alle von derselben Struktur: Immer handelt es sich um Ströme mengenartiger Größen, nur eben unterschiedlicher Größen, die als Träger der Energie fungieren. Der formale Umgang mit diesen Größen und ihren Strömen ist unabhängig von der besonderen Art der Größe, so daß die Grundregeln in allen Teilgebieten der Physik dieselben sind. Sogar die *Chemie* wird dabei eingeschlossen.

Es sei übrigens nicht verschwiegen, daß es Gebiete der Physik gibt, in denen zwar auch mit Energie beladene Trägerströme auftreten und die somit auch in die Systematik der Trägerströme eingereiht werden könnten, deren Besonderheit aber dadurch nicht Rechnung getragen würde. Wir meinen vor allem die *Optik*, insbesondere die optischen Abbildungen. Wie gesagt, gibt es auch hier von Trägerströmen getragene Energieströme, aber diese stehen nicht im Zentrum des Interesses, vielmehr geht es um die Übertragung und den Transport der Größe *Information*.

II. Das didaktische Konzept

5. Die didaktische Priorität der Vorstellung vom Trägerstrom

Die mengenartige Größe und ihr Strom sind sozusagen zwei Seiten derselben Medaille. Die Größe ohne den Strom wäre nicht echt mengenartig, der Strom ohne die Größe, die in ihm strömt, gar nicht vorstellbar. Physikalisch bilden mengenartige Größe und Strom daher eine Ein-

heit, keine besitzt einen Vorrang vor der anderen. Didaktisch jedoch fällt dem Strom eine Vorzugsrolle zu. Da es das Wesen aller Naturwissenschaft ist, die Beobachtung zum Fundament und ihren obersten Richter zu machen, und da nur Vorgänge, also *Zustandsänderungen* unmittelbar beobachtbar sind, ist es unvermeidlich, die Wertänderungen der physikalischen Größen und damit die Ströme in den Vordergrund zu rücken. Die didaktische Leitidee des Kurses ist es deshalb, *physikalische Vorgänge als Ströme mengenartiger Größen zu begreifen und zu beschreiben*.

In diesem Kurs spielt der Begriff des Stroms deshalb eine ähnlich fundamentale Rolle wie der Begriff der Bewegung des Individuums im herkömmlichen Physikunterricht: *Alle Vorgänge werden anschaulich als Strömungen irgendwelcher Größen begriffen*. Der Umgang mit Strömen läßt dabei wie von selbst von dem, was da strömt, die Vorstellung einer Art Substanz entstehen, so daß die mengenartige Größe schließlich als die Abstraktion dieser Substanz erscheint. Dieses Bild im Lernenden zu formen, ist genau die Absicht des Kurses, denn dieses Bild trägt durch die ganze Physik.

Der zweite wichtige Gesichtspunkt ist die Regel (1) bzw. ihre anschaulichere Konsequenz (2), daß *strömende Energie stets von einer anderen mengenartigen Größe getragen wird*. In dieser Formulierung von (1) wird unter den mengenartigen Größen eine Rangfolge insofern festgelegt, als der Energie eine ausgezeichnete Rolle zufällt. Diese Auszeichnung nimmt zwar nicht die Natur vor, sie ist aber von großer praktischer Wichtigkeit im Hinblick auf diejenigen Prozesse, die uns Menschen besonders interessieren. Daß dabei die Energie eine besondere Rolle spielt, braucht heute nicht mehr betont zu werden (im Gegenteil, es bedarf eher des Hinweises, daß die Energie nicht unter allen Umständen im Zentrum des Interesses steht). Die Vorstellung der mengenartigen Größen als *Träger der Energie* drängt sich geradezu als Ausgangspunkt didaktischer Überlegungen auf, zumal diese Vorstellung, wie ausdrücklich betont sei, trotz ihrer Bildhaftigkeit nicht etwa ein Zugeständnis ist, das auf Kosten der wissenschaftlichen Exaktheit geht, sondern daß sie ein physikalisch voll tragfähiges Bild ist. Seine volle Anschaulichkeit erhält dieses Bild allerdings erst dadurch, daß in ihm die sonst etwas farblos wirkenden und der Anschauung nicht immer leicht zugänglichen intensiven Größen die *Belastungsmaße* werden, von denen jedes angibt, mit wieviel Energie sein Trägerstrom beladen ist.

Die Vorstellung der strömenden mengenartigen Größe als Träger der Energie ist von solch überzeugender Einfachheit und Eindringlichkeit, daß seine didaktische Priorität kaum einer Begründung bedarf. Mit dieser Vorstellung stellt sich nicht nur eine klare Anschauung von dem ein, was ein Energietransport ist, sondern vor allem auch eine sehr wirkungsvolle Sicht der an den Vorgängen beteiligten Gebilde, der *physikalischen Systeme*. Sie erscheinen in diesem Bild entweder als *Umladestationen* (Umlader), in denen Energie von einem Träger auf einen oder mehrere andere Träger umgeladen wird, oder als *Speicher*, in denen Energie und eventuell auch die Trägergrößen gespeichert werden, oder schließlich als *Übertrager* (Transportvorrichtungen), die an bestimmte Träger gebundene Energie übertragen. Diese Einteilung der physikalischen Systeme in drei Typen ist natürlich nicht exklusiv; ein reales System ist weder genau ein Umlader, noch ein Speicher oder eine Transportvorrichtung, im Grunde ist es alles drei, nur eben in der Regel eines besonders ausgeprägt. So sind alle Leitungen wie elektrische Kabel, Rohrleitungen, Pipelines, Adern vornehmlich Transportvorrichtungen, denn von Verlusten abgesehen, bei denen sie als Umlader wirken, da sie dabei Energie von dem eigentlichen Träger auf erzeugte Entropie umladen, besteht ihre Hauptfunktion darin, an einen bestimmten Träger gebundene Energie zu transportieren, zu übertragen. Ebenso ist eine Maschine, ein Auto, ein Lebewesen in erster Linie ein Umlader, obwohl alle diese Gegenstände in gewissem Sinn, wenn auch im Nebeneffekt, Speicher oder Übertrager sind.

6. Propädeutik der Trägerströme

Die physikalische Feststellung, daß Vorgänge aufs engste mit Strömen verknüpft sind, findet ihr Äquivalent in der täglichen Erfahrung, daß sehr viele der Vorgänge, die für unser Alltagsleben von Bedeutung sind, offensichtlich mit einem ständigen Strom irgendwelcher Dinge verknüpft sind. So hängt unser Leben von der regelmäßigen Zufuhr von Nahrung ab, unser Auto ist, wenn es fahren soll, an die ständige Zufuhr von Benzin gebunden, unser Haushalt an die Zufuhr von Brennstoff und Elektrizität. Diese Ströme erfolgen vielfach intermittierend, also nicht stetig, geschweige denn stationär, aber es ist nicht schwer, bei Betrachtung hinreichend großer Zeitintervalle

den Strom nicht nur als stetig, sondern sogar als stationär zu betrachten. Gäbe es nicht schon die erste didaktische Entscheidung, dem Strombegriff die Priorität zuzuerkennen, wäre hier eine Entscheidung nötig, nämlich die, ob bei der Beschreibung dem getrennten Einzelobjekt und seinen Bewegungen die primäre Rolle gebührt und der Strom lediglich ein Gänsemarsch von Einzelobjekten ist, oder ob umgekehrt dem stetigen Strom die Primärrolle zufällt und das bewegte Einzelobjekt nur ein singulärer Strom ist, der in jedem Augenblick nur an einziger Stelle im Raum von Null verschieden, sonst aber überall Null ist. Für uns ist, wie gesagt, diese Entscheidung längst zu Gunsten des Strombegriffs gefallen, so daß für uns das sich bewegende Einzelobjekt ein singulärer und damit etwas komplizierter Grenzfall des Stroms ist. Immerhin zeigt die Betrachtung, daß und wie die die herkömmliche Physik beherrschende Vorstellung der Bewegung des Individuums mit dem Strombegriff zusammenhängt: Die beiden Betrachtungsweisen sind sozusagen die entgegengesetzten Grenzfälle realer Bewegungsvorgänge, der eine die Bewegung des einzelnen, isolierten Körpers, der andere die strömende Bewegung kontinuierlicher Materie.

Eine weitere wichtige didaktische Entscheidung ist jedoch, wie der Begriff des Trägerstroms im Elementarunterricht eingeführt werden soll. Zunächst ist es ausgeschlossen, die Ströme der verschiedenen mengenartigen Trägergrößen dem Anfänger an den Kopf zu werfen. Da es aber nötig ist, ein Gefühl für den Strombegriff zu vermitteln, bleibt nichts anderes übrig, als unter einem Strom zunächst einmal einen strömenden Stoff zu verstehen: den Ölstrom einer Pipeline oder einer Ölheizung, den Benzinstrom vom Tank zum Motor eines Autos, den von einem Lebewesen aufgenommenen Nahrungsstrom, den Luftstrom des Windes, den Wasserstrom eines Flusses. Diese materiellen Stoffströme spielen zunächst einmal als propädeutische Hilfsmittel zur Bildung einer klaren und festen Anschauung die Rolle der Träger strömender Energie. Mit dem Wort „Träger der Energie“ wird also nicht gleich das bezeichnet, was für den Physiker der Energieträger ist, nämlich eine mengenartige physikalische Größe, sondern, in der Sprache des Physikers, ganze Bündel dieser Energieträger, nämlich konkret aufweisbare Stoffströme: Brennstoffströme, Wasserströme, Lichtströme. Meist ist in dem Bündel mengenartiger Größen, das den Stoff repräsentiert, allerdings eine dieser Größen für den Energietransport hauptsächlich verantwortlich,

so daß die Identifizierung des Trägers mit dem Stoff auch inhaltlich nicht allzu gravierend ist.

Nur die Energie selbst wird gleich als abstrakte Vorstellung angestrebt: Energie ist etwas, eine „Substanz“, die alle Ströme, die notwendig sind, um Maschinen zu betreiben, Häuser zu heizen, Lebewesen am Leben zu erhalten, gemeinsam haben. Der strömende Stoff trägt diese für den Betrieb notwendige Substanz zum Empfänger und gibt sie dort ab. Jeder Stoff hat mehr oder weniger von dieser Substanz, aber ob er sie an einen Empfänger abgibt, ist eine andere Frage. Ein Wasserstrom, der mit hohem Druck in eine Turbine strömt und sie mit niedrigem Druck wieder verläßt, gibt von der Energie, die er trägt, in der Turbine etwas ab, während ein Wasserstrom, der ein Lebewesen durchströmt, so gut wie keine Energie abgibt. In einer Vielzahl von Beispielen wird diese Vorstellung der mit einem Stoffstrom transportierten Substanz „Energie“ entwickelt und angewandt.

Am Anfang des Unterrichts steht somit der *Energietransport*, d.h. die strömende, von einem Träger getragene Energie, nicht dagegen das physikalische Objekt, das System, also jene Gebilde, die Energie aufnehmen oder abgeben, die somit die Rolle von Energieempfänger oder Energiequelle spielen. Quelle und Empfänger sind immer nur in Bezug auf einen gegebenen Energietransport erklärt, sie sind Anfang und Ende des Transports. Diese Rangfolge von Transport und physikalischem System erlaubt es, mehrere Fliegen mit einem Hieb zu schlagen:

- Zunächst wird ganz selbstverständlich und nahezu unmerklich der aus der Energieerhaltung folgenden Notwendigkeit Rechnung getragen, daß jeder Empfänger gleichzeitig Quelle eines anderen Transports ist und ebenso jede Quelle gleichzeitig Empfänger eines dritten Transports. Empfänger oder Quelle sein, ist also keine feste Eigenschaft eines Systems, es ist nur eine Eigenschaft bezüglich eines bestimmten Energietransports.
- An einem Energietransport interessiert in erster Linie nur der Teil des Energiestroms, der im Empfänger abgeladen wird. Das ist insbesondere von Bedeutung für geschlossene Trägerströme, also Träger-Kreisläufe, bei denen der Trägerstrom im Empfänger nicht alle von ihm getragene Energie abgibt, sondern nur einen Teil davon. Für den Transport von Bedeutung ist dabei zunächst nur der abgegebene Teil.

- Wie von selbst stellt sich gefühlsmäßig die physikalisch tragfähige Assoziation ein, daß nur strömende Energie eindeutig in Energieformen eingeteilt werden kann und nach dem jeweiligen Träger unterschieden wird.
- Der abstrakte physikalische Systembegriff, der ohne den Begriff des Zustands nicht einfach und klar zu fassen ist, wird zunächst vermieden zu Gunsten der einfachen Alternative „Quelle-Empfänger“, die eine wirksame Orientierung ermöglicht.
- Das Bild des von einem Träger von der Quelle zum Empfänger getragenen Energiestroms gibt Anlaß zu einem einfachen Darstellungsschema, das wie ein grafischer Kalkül wirkt. Dieses Schema, das übrigens das einzige formale Hilfsmittel im Kurs ist, veranschaulicht gleichzeitig auf sehr suggestive Weise die dynamisch gleiche Struktur äußerlich recht verschieden aussehender Energieumsetzungen durch das gleiche grafische Bild. So wird die strukturelle Verwandtschaft scheinbar völlig unterschiedlicher Vorgänge auf sehr elementare, bildhafte Weise evident.

7. Die Einführung physikalischer Größen

Schließlich noch ein Wort zur Einführung der physikalischen Größen, in erster Linie der Energie. Die Energie tritt in dem umrissenen didaktischen Entwurf von Anfang an als abstrakte, im Sinn des Physikers also vollwertige physikalische Größe auf, während die anderen mengenartigen Größen, wie die Menge, der Impuls, die Entropie den propädeutischen Umweg über die konkreten Stoffströme nehmen und demgemäß erst später eingeführt werden. Dennoch treffen die nachfolgenden Argumente nicht nur für die Energie zu, sondern auch für die anderen Größen.

Zu den grundlegenden Glaubenssätzen des Physikers gehört die Regel, daß *eine physikalische Größe durch eine Meßvorschrift definiert* ist. Es geht hier nicht um diese Regel selbst, sondern um eine ihrer Auswirkungen im Physikunterricht, nämlich um die wie ein Prinzip gehandhabte Gewohnheit, die Einführung einer physikalischen Größe grundsätzlich als *identisch* zu erklären mit der quantitativen Bestimmung ihrer Werte. So gehört es zur traditionellen Gewohnheit, die Energie als „Kraft mal Weg“ zu definieren. Ganz wörtlich ist das allerdings nicht zu nehmen, denn

niemand versteht das Wort „definieren“ in diesem Zusammenhang so, daß die Energie mit dieser Erklärung vollständig charakterisiert wäre (sonst wäre „Energie“ ja nichts anderes als eine sprachliche Abkürzung des 3-Wort-Gebildes „Kraft mal Weg“). Tatsächlich meint man, daß unter bestimmten Bedingungen, nämlich wenn es um die Verschiebung eines Objekts geht, die Wertänderungen der Größe „Energie“ dieses Objekts oder eines mit ihm wechselwirkenden anderen Objekts gleich den Werten der Größe „Kraft mal Weg“ sind. Die Größe Energie als begriffliches Konzept ist damit aber keineswegs festgelegt, schon deshalb nicht, weil sie in dieser Meßvorschrift ja nur unter bestimmten, einschränkenden Bedingungen auftritt. Zu ihrer Festlegung müßte man daher zumindest noch wissen, mit welchen physikalischen Größen sie unter anderen Bedingungen zusammenhängt und wie diese Zusammenhänge lauten. Aber selbst das liefert noch nicht notwendig das volle Konzept der Größe Energie, insbesondere ihre Mengenartigkeit.

Die Geschichte des Energiebegriffs ist hierfür geradezu ein Musterbeispiel. In *Newtons* „Principia“ spielt die Energie so gut wie keine Rolle, obwohl „Kraft mal Weg“ *Newton* durchaus bekannt war, er also „die“ Meßvorschrift für die Energie besaß. Selbst der mathematische Ausbau der Mechanik im 18. Jahrhundert, in dessen Verlauf die Energie als außerordentlich nützlich, die Übersicht erhöhendes Hilfsmittel zur Gewinnung mechanischer Theoreme erkannt wurde, führte nicht dazu, in ihr eine mengenartige Größe zu sehen, deren Erhaltung sich so ausdrückt, daß sie zwischen den an den Vorgängen beteiligten Systemen hin und her strömt. Erst die Bewältigung des Problems der Wärme in der Mitte des vorigen Jahrhunderts gab der Energie jene Mengenartigkeit, die uns heute als ihr wesentlichstes Charakteristikum erscheint.

Es ist ein Vorurteil, wenn man glaubt, das für die physikalische Forschung manchmal durchaus sinnvolle, stets aber langwierige, häufig sich sogar über Generationen hinziehende Verfahren in den Unterricht tragen zu müssen, aus Meßdaten versuchsweise eine Größe zu konzipieren und erst

danach zu fragen, ob und wie dieser Größe vielleicht eine Vorstellung von grundlegender physikalischer Bedeutung unterlegt werden kann. Tatsächlich geht ja auch der forschende Physiker als Einzelperson anders vor: Er folgt einer Idee, einer zunächst oft vagen Vorstellung und versucht, diese unter Zuhilfenahme von Meßdaten bis zur quantitativen Fassung zu verschärfen.

Wir versuchen, diese Einsichten bewußt auszunutzen, indem wir das Konzept der Größe Energie, also die Vorstellung dieser Größe als eine Art Substanz, die jeder Körper, jeder Stoff, jedes Gebilde enthält, als erstes einführen und so zeitlich und damit auch inhaltlich trennen von der Frage, wie sich die Werte dieser Größe im Einzelfall bestimmen lassen, welche Meßverfahren also im Einzelfall zur Festlegung der Werte führen. Der Weg, eine physikalische Größe in zwei sukzessiven Schritten einzuführen, nämlich zuerst den Schritt „Idee der Größe und ihre Handhabung zur Naturbeschreibung“ zu vollziehen und dann den zweiten, später erfolgenden Schritt „Bestimmung der Werte der Größe“, ist für die mengenartigen Größen besonders einfach. Mit dem Bild der Mengen- oder Substanzartigkeit einer Größe läßt sich leicht operieren, auch wenn man die Werte der Größe in jedem Einzelfall nicht genau kennt. Der zweite Schritt aber, und das ist ein didaktisch ganz entscheidender Vorteil, wird am besten dann vollzogen, wenn der Lernende selbst ein Bedürfnis zur quantitativen Verschärfung der Größe erkennen läßt. Die für die Physik so wichtige Rolle des Quantitativen wird damit zur Selbstverständlichkeit und nicht eine aufgezwungene, nur zu oft als Merkwürdigkeit empfundene Eigenart des Fachs Physik. Die Zerlegung einer Größe in ihre Idee und ihre Messung, eine Zerlegung, die übrigens nicht auf die mengenartigen Größen allein beschränkt ist (vgl. dazu den Aufsatz von *G. Job* in Heft 2 dieser Reihe „Das chemische Potential im Physik- und Chemie-Elementarunterricht“) erlaubt es außerdem, Physik bereits mit Verständnis in einem Alter oder mit einem Vorbildungsgrad zu betreiben, in dem zwar intuitives Vergleichen und auch quantitative Bilanzieren möglich ist, jeder mathematische Kalkül jedoch als Zumutung wirken würde.

Ein moderner Physikkurs für Anfänger

In diesem Aufsatz wird der Ablauf eines Physikkurses für Anfänger skizziert, der auf den Überlegungen der vorangegangenen Aufsätze aufbaut. Dieser Kurs wurde erprobt mit 400 Kindern am Staatlichen Gymnasium Wörth am Rhein. Jeder Schüler ist dem Kurs 2 Jahre lang gefolgt, nämlich im 5. und 6. Schuljahr. Der Kurs ist so angelegt, daß er für den Physikunterricht mit 2 Stunden pro Woche 2 Schuljahre lang ausreicht.

Der Kurs ist leicht ausbaufähig, so daß er sich für den Physikunterricht jeder Altersstufe eignet, und zwar bis hinauf zum Studium. Für den Physikunterricht der Mittelstufe ist dieser Ausbau leicht, er liegt oft auf der Hand. Anregungen und Hinweise darauf können den fünf letzten Aufsätzen dieses Heftes entnommen werden.

Der Aufsatz ist in 18 Abschnitte gegliedert, von denen jeder einer Unterrichtseinheit entspricht. Jeder dieser 18 Abschnitte besteht aus 3 Teilen. Im ersten Teil wird der Ablauf der Unterrichtseinheit skizziert. Im zweiten werden Begründungen und Kommentare zu Details der Einheit gegeben, die sich an den Lehrer als Fachphysiker wenden. Im dritten Teil werden Demonstrations- und Schülerversuche beschrieben.

Bei der Auswahl der Versuche wurde Wert darauf gelegt, daß den Schülern die Geräte aus ihrem Alltagsleben bekannt sind. Es sollen also möglichst wenig Apparate benutzt werden, die es nur in Physiksammlungen gibt. Die Kinder sollen sehen, daß sich die Physik mit ihrer Umgebung befaßt und nicht ein Gedankengebäude ist, das in erster Linie nur sich selbst genügt. Die Wahl von Geräten aus dem Alltagsleben, wenn möglich aus dem Kaufhauskatalog, hat außerdem den Vorteil, daß diese entweder billig sind oder daß die Schule oder der Lehrer sie sowieso besitzt.

Dem Leser, der schnell einen zusammenhängenden Eindruck des Kurses allein, ohne Begründungen und Kommentare, haben möchte, empfehlen wir, zunächst nur den ersten Teil jedes der 18 Abschnitte zu lesen.

Abb. 1 zeigt, in welchem Maße man von der hier gewählten Anordnung der Unterrichtseinheiten abweichen kann. Voraussetzung für eine beliebig herausgegriffene Unterrichtseinheit X sind alle die Unterrichtseinheiten, die von X aus durch

Wege erreicht werden können, die nur aus nach oben verlaufenden Linien bestehen. So wird etwa für die Unterrichtseinheit 12 der in den Unterrichtseinheiten 1 bis 7 behandelte Stoff vorausgesetzt. Man entnimmt der Abb. 1, daß bis zur Unterrichtseinheit 7 weder Unterrichtseinheiten weggelassen, noch die Anordnung geändert werden sollte (abgesehen von der Möglichkeit der Vertauschung der Unterrichtseinheiten 5 und 6). Ab Unterrichtseinheit 7 sind verschiedene Wege möglich. So sieht man, daß man die Unterrichtseinheiten 8 und 9 weglassen und gleich bei Unterrichtseinheit 10 fortfahren kann; von da ab wird die Zahl der Wahlmöglichkeiten noch größer.

1. Energietransporte: Energie und ihre Träger

Unterrichtsablauf

Für viele nützliche Tätigkeiten wird Treibstoff oder eine Art Treibstoff benötigt. Zum Autofahren wird Benzin gebraucht, zum Heizen Kohle oder Heizöl, zum Wäschewaschen mit der Waschmaschine Elektrizität. Je länger man die Tätigkeit ausübt, desto mehr Treibstoff braucht man. Für den Treibstoff oder Brennstoff muß man im allgemeinen bezahlen, er ist wertvoll.

Ein und dieselbe Arbeit oder Tätigkeit kann oft mit verschiedenen Treibstoffen verrichtet werden. So kann man mit dem *Auto* verreisen, dann braucht man Benzin; oder mit der *Bahn*, dann braucht man Elektrizität; oder *zu Fuß*, dann braucht man Nahrung. Wenn wir einen Treibstoff kaufen, kommt es also nicht auf die spezielle Natur des Treibstoffs an. Alle Treibstoffe haben vielmehr etwas gemeinsam. In Treibstoffen scheint etwas drinzustecken, das allen gemeinsam ist. Man nennt es *Energie*.

Wenn man also Treibstoff oder Brennstoff kauft, kommt es einem nur auf die Energie an, die er enthält. Man bezahlt für die Energie, die man mit ihm bekommt. Energie ist eine Ware. Da man die Energie mit dem Treibstoff bekommt, nennen wir den Treibstoff den *Energieträger*.

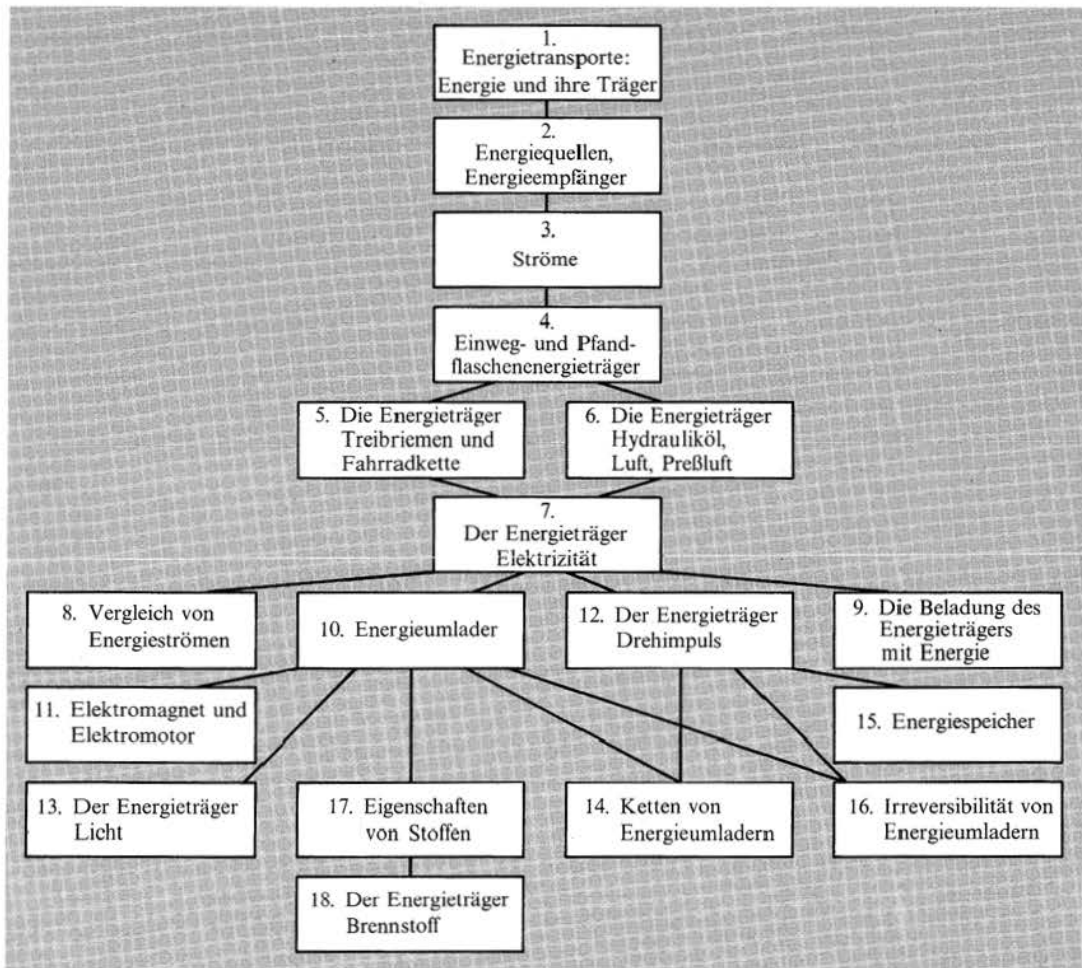


Abb. 1 Logischer Zusammenhang der Unterrichtseinheiten. Voraussetzung für die Behandlung einer Unterrichtseinheit X sind alle die Unterrichtseinheiten, die man von X aus auf nach oben laufenden Wegen erreicht.

Wenn es beim Kauf des Treibstoffs nur auf die Energie ankommt, sollte es vernünftiger sein, nur die Energie zu kaufen, ohne den Energieträger. Die Erfahrung hat gezeigt, daß das unmöglich ist. Energie ohne Energieträger gibt es nicht.

Man braucht für viele Tätigkeiten Energie und damit gezwungenermaßen Treibstoff, das heißt einen Energieträger. Nicht alle Stoffe aber, die man für eine Tätigkeit braucht und für die man bezahlen muß, sind Energieträger. Zum Bauen eines Hauses braucht man Energie, aber auch Sand, Kies, Zement und Steine. Der Mensch braucht zum Leben Energie, aber er braucht auch Wasser und Vitamine. Ein Auto braucht zum Fahren Energie, aber es braucht auch Schmieröl und Reifen.

Wenn man Energie kauft, muß man eine Möglichkeit der Abrechnung haben. Man muß wissen, wieviel Energie man etwa mit 1 l Heizöl bekommt. Die Energie braucht also eine Maßeinheit. Diese Maßeinheit heißt „Joule“. Im Unterricht werden Tabellen diskutiert, die angeben, wieviel Energie man mit verschiedenen Lebensmitteln und mit verschiedenen Brennstoffen bekommt.

Bemerkungen

Schon bevor die Kinder an der Schule Physikunterricht haben, gehört das Wort Energie zu ihrem aktiven Wortschatz. Allerdings deckt sich der Inhalt, den das Wort in der Umgangssprache der Kinder hat, nur in geringem Maß mit seinem

physikalischen Inhalt. Das Ziel der ersten Unterrichtseinheit ist eine Verschärfung des Begriffs Energie und eine Abgrenzung gegen andere als die physikalischen Bedeutungen.

Dieses Ziel, die Bildung eines neuen Begriffs, erreicht man nicht durch „Angabe einer Meßvorschrift“. Um das einzusehen, genügt es, eine physikalische Größe zu betrachten, von der man selbst noch keinen Begriff hat. Solche Größen gibt es ja in großer Zahl. Für jeden Nichtelementarteilchenphysiker liefert die Elementarteilchenphysik eine Fülle davon. Man stelle sich vor, der Begriff Strangeness solle dadurch gebildet werden, daß die Meßvorschrift beschrieben wird, d.h. ein Beschleunigerexperiment und die Auswertung einer Blaskammeraufnahme durch einen Computer. Es gibt sicher viele Beispiele, die manch einem noch näher liegen. Kann sich jemand, der keine Erfahrung im Umgang mit der Entropie hat, einen Begriff von dieser Größe bilden mit Hilfe der „Meßvorschrift“ $\Delta S = \int_{\text{rev}} dQ/T$?

Das dürfte nicht leicht sein. Die Meßvorschrift ist de facto der letzte Schritt bei der Bildung des Begriffs einer physikalischen Größe. Vorher müssen zwei andere Schritte getan werden:

Der erste Schritt besteht darin, daß der Lernende eine große Zahl von Beziehungen kennenlernt, gleichgültig ob qualitative oder quantitative, durch die die neue Größe an bekannten Begriffen verankert wird.

Danach oder gleichzeitig lernt er Werte der Größe an einer großen Zahl von Systemen kennen, und zwar Werte, die eine möglichst große Skala aufspannen, sozusagen „Stützwerte“ sind.

Erst danach wird der neue Begriff dadurch verschärft, daß man Meßvorschriften, nicht nur eine einzige Meßvorschrift, angibt, die es dem Lernenden gestatten, selbst den Wert der Größe zu bestimmen. Jede quantitative Beziehung zu anderen Größen stellt ja eine Meßvorschrift dar.

Daß die „Definition durch eine Meßvorschrift“ nicht der entscheidende Schritt bei der Begriffsbildung sein kann, sieht man daran, daß es Größen gibt, von denen jedermann einen Begriff hat, deren Meßvorschrift er aber nicht kennt, oder mindestens nicht benutzt. Dies ist der Fall für die Größe, mit der die meisten Menschen am häufigsten operieren: der Wert einer Ware. Eine Ware hat, genauso wie sie meist Gewicht, Volumen und Entropie hat, auch Wert. Die erste Voraussetzung der Begriffsbildung — Kenntnis

vieler Beziehungen zu anderen Größen — ist hier erfüllt. Jeder kennt etwa die folgenden Beziehungen:

- Je größer der Wert des Vermögens eines Menschen ist, desto höher ist sein Ansehen.
- Je mehr Vermögen jemand hat, desto höhere Kredite werden ihm eingeräumt.
- Der Wert einer Menge Flaschenweins ist um so größer, je größer die Menge ist. Für kleine Mengen ist der Wert proportional zur Zahl der Flaschen, für große nicht mehr (Mengenrabatt). Bei gegebener Menge ist der Wert abhängig von der Qualität des Weins, die in komplizierter Weise von mehreren anderen Größen abhängt (Jahrgang, Wetter, Anbaugebiet, Markenname).

Die zweite Voraussetzung, die Kenntnis vieler Stützwerte, ist bei der Größe Warenwert ebenfalls erfüllt. Die meisten Bundesbürger wissen, daß 100 Milliarden Mark dem Staatshaushalt der Bundesrepublik entsprechen, daß 10000 DM der Wert eines Autos oder von 3 Monatsgehältern eines Lehrers ist und daß 3 DM der Wert einer Packung Zigaretten ist.

Die Meßvorschrift für den Wert einer Ware — Anbieten auf dem Markt und Einpendelnlassen von Angebot und Nachfrage — wird nur von wenigen Menschen ausgeführt, vielen wird das Verfahren der Wertfeststellung sogar unbekannt sein.

Man kann auch leicht sehen, in welcher Lage man sich befindet, wenn nur die erste der beiden Voraussetzungen erfüllt ist, die zweite dagegen nicht. Viele Physiker befinden sich in dieser Lage, wenn es um die Größe Drehimpuls geht: man kennt etwa die Beziehungen $M = dL/dt$, $L = \theta \cdot \omega$, $E_{\text{kin}} = L^2/2\theta$, $L = r \times P$, aber man käme wahrscheinlich in Verlegenheit, wenn man einen für einen beliebigen Zustand eines Systems typischen Drehimpulswert nennen sollte.

Die Schüler unseres Physikkurses sollen bezüglich der Energie zunächst die beiden ersten Schritte der Begriffsbildung gehen: (1) Kenntnis vieler Beziehungen zwischen der Energie und anderen Begriffen; (2) Kenntnis von Stützwerten für die Energie und den Energiestrom.

Eigenschaften der Energie, die in der ersten Unterrichtseinheit klarwerden sollten, sind, in der Sprache des Physikers:

- Energie ist mengenartig, d.h. sie verhält sich wie eine Substanz, sie kann gelagert und transportiert werden.

- Energie ist wertvoll, man braucht sie für viele nützliche Tätigkeiten wie Verreisen oder Heizen.
- Energie braucht stets einen Träger, dieser ist mengenartig.
- Nicht alles was mengenartig und wertvoll ist, ist Energie oder Energieträger, zum Beispiel Vitamine oder Zement.

Im vorhergehenden Aufsatz wurde erklärt, daß unter einem Energieträger im Sinn der Physik die den Energiestrom begleitende mengenartige Größe X_i zu verstehen ist. Gewöhnlich wird aber ein Energiestrom begleitet von einem ganzen Bündel (X_1, \dots, X_n) mengenartiger Größen. Dieses Bündel charakterisiert den strömenden Stoff. Von diesem Bündel ist häufig nur eine einzige Größe für den Energietransport zuständig. Im Anfänger-Physikunterricht bezeichnen wir als Energieträger meist nicht die einzelne für den Energietransport zuständige physikalische Größe, sondern das ganze Bündel, d.h. den strömenden Stoff. So sagen wir nicht, in einem Zentralheizungsrohr ströme Energie mit dem Energieträger Entropie, sondern mit dem Energieträger Wasser, oder in einer Pipeline ströme Energie nicht mit dem Energieträger Menge (=Stoffmenge*), sondern mit dem Energieträger Erdöl. Es gibt Ströme, bei denen keine der Größen X_i Energieträger ist, etwa das Wasser, das der Mensch trinkt oder der Sand, der zur Baustelle gebracht wird. Hier sagen wir Wasser und Sand seien keine Energieträger.

2. Energiequellen, Energieempfänger

Unterrichtsablauf

Jeder Energiestrom kommt irgendwo her und geht irgendwo hin. Er geht in das Gerät, das eine gewünschte Arbeit leistet und dazu Energie braucht. Wir nennen es *Energieempfänger*. Die Stelle, von der die Energie kommt, nennen wir *Energiequelle*.

So ist der Automotor Energieempfänger, die zugehörige Quelle ist der Benzintank. Der Heizkör-

* Die im Normenblatt (DIN 1301) mit Stoffmenge bezeichnete Größe n wird hier Menge genannt. Die Begründung dafür findet der Leser im 1. Aufsatz von Heft 2 der „Konzepte eines zeitgemäßen Physikunterrichts“.

per einer Zentralheizung ist Energieempfänger, die zugehörige Quelle ist der Heizkessel.

Es werden viele Beispiel für solche Quelle-Empfänger-Paare besprochen, und in jedem Fall wird der Energieträger benannt. Die Paare haben alle dieselbe Struktur, sie können deshalb alle auf dieselbe Art symbolisch dargestellt werden, Abb. 2.

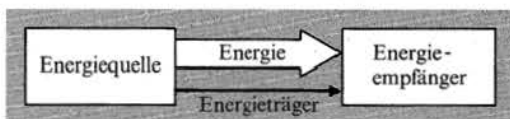


Abb. 2 Alle Anordnungen aus Energiequelle und Energieempfänger haben dieselbe Struktur.

Die fünf verschiedenen Heizungen der Abb. 3 sehen sich sehr ähnlich, wenn man sie auf diese Art darstellt. Aber auch die Energieversorgung eines Automotors oder des Gasherds wird durch dasselbe Schema wiedergegeben.

Bei der Untersuchung der verschiedensten Energietransporte bemerken die Schüler, daß zu jedem Energieträger eine bestimmte Transportvorrichtung gehört: zur Elektrizität ein Kabel, zu Gas, Benzin oder Heizöl ein Rohr. An der Transportvorrichtung kann man in gewissen Grenzen schon den Energieträger erkennen. Tabelle 1 gibt einige Beispiele.

Tabelle 1 Vier Beispiele für Energietransporte

Energiequelle	Energieempfänger	Energieträger	Transportvorrichtung
Gasflasche	Gasherd	Gas	Rohr
Batterie	Birnen	elektr. Strom	Kabel
Benzintank	Automotor	Benzin	Rohr
Kohlehaufen	Ofen	Kohle	Eimer

Bemerkungen

In dieser Unterrichtseinheit äußert sich zum ersten Mal die in der *Gibbsschen Fundamentalform* begründete Strukturgleichheit von Phänomenen, bei denen verschiedene Energieformen wirksam sind. Alle Energietransporte lassen sich durch ein und dasselbe Schema beschreiben. Diese Symbolik wird später erweitert. Sie ist die einzige, die die Schüler kennenlernen. Die übliche Symbolik

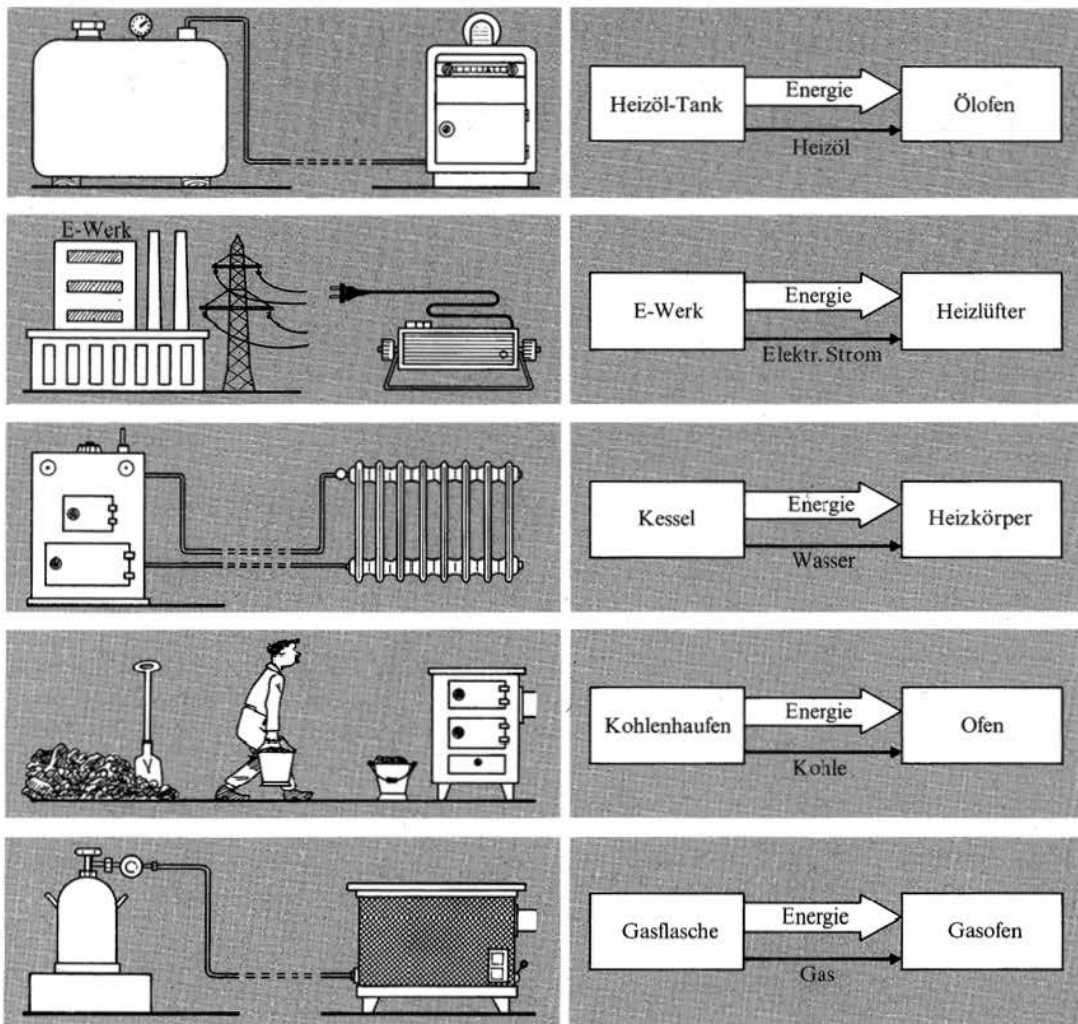


Abb. 3 In symbolischer Darstellung sehen sich die fünf verschiedenen Heizungen sehr ähnlich.

für elektrische Stromkreise wird nicht eingeführt, da sie einen viel engeren Anwendungsbereich hat.

Die Begriffe Energiequelle und Energieempfänger sind definiert in bezug auf einen bestimmten Transport. So ist der Heizkessel der Zentralheizung Energiequelle für den Energietransport vom Heizkessel zu den Heizkörpern, aber Energieempfänger für den Transport vom Öltank zum Heizkessel. Daß ein und dasselbe Gerät sowohl Quelle als auch Empfänger ist, wird in dieser Unterrichtseinheit jedoch nicht betont und nicht diskutiert. Dies ist das Thema einer späteren Unterrichtseinheit.

Ein wesentliches Ziel der Unterrichtseinheit ist ferner, daß die Schüler eine große Zahl techni-

scher Geräte sowie nichttechnischer Energiequellen und -empfänger kennenlernen. Wie weit die Funktionsweise dieser Geräte behandelt wird, hängt von der Zeit ab, die der Lehrer dafür einsetzen kann. Mindestens lernen die Schüler aber die allen besprochenen Einrichtungen gemeinsame Struktur kennen. Sie lernen wie eine Zentralheizung aufgebaut ist, wozu Batterien und Kraftwerke da sind, wie eine Ölheizung funktioniert, was ein Heizlüfter tut, wozu es Gasflaschen gibt.

Experimente

Energietransporte. Eine Lampe wird an einen Akku angeschlossen; ein Gaskocher wird an eine Propangasflasche angeschlossen. Die Verbindung

zwischen Quelle und Empfänger soll möglichst lang sein, möglichst quer durch das Klassenzimmer gehen. Quelle, Empfänger und Transportvrichtung erscheinen damit nicht als eine kompakte Anordnung, und die im Schema wiedergegebene Struktur wird sichtbar. Man stellt über Quelle und Empfänger Pappkartons mit der Aufschrift „Energiequelle“ bzw. „Energieempfänger“.

Der Heizungskeller der Schule wird besichtigt.

Anordnungen aus Energiequelle und Energieempfänger im Auto. Im Auto des Lehrers werden die Anordnung Benzintank-Motor und Akku-Anlasser besichtigt. Für die Untersuchung des Autos gibt es aber später noch andere Anlässe.

3. Ströme

Unterrichtsablauf

Diese Unterrichtseinheit ist sehr kurz. Es geht darin um die Einführung eines Begriffs, der die sprachliche Beschreibung von Energietransporten vereinfacht: um den Begriff *Strom*. Es werden Beispiele für Ströme gesucht: Menschenströme, Autoströme, elektrische Ströme, Wasserströme. Von einem Strom spricht man, wenn sich viele Dinge oder viel Stoff 1. in Bewegung befinden und 2. denselben Weg nehmen. Der neue Begriff wird auf die Übertragung von Energie und Energieträgern angewendet. Von der Energiequelle zum Energieempfänger fließt ein Energiestrom und ein Energieträgerstrom.

Die Stärke von zwei Strömen kann man vergleichen, indem man die Beträge vergleicht, die in einer bestimmten Zeit an einer Stelle vorbeiströmen.

Bemerkungen

Diese Unterrichtseinheit ist nötig, weil viele Schüler mit dem Wort *Strom* nur den elektrischen Strom assoziieren und dabei das Wort so gebrauchen als sei der Strom selbst etwas mengenartiges: „Strom ist in der Steckdose“. Außerdem lernen die Schüler, daß das Wort *Strom* auf „quantisierte“ Ströme, wie etwas Menschenströme, genauso angewendet werden kann wie auf anscheinend kontinuierliche, also etwa Wasserströme. Die Erfahrung hat gezeigt, daß die Schüler bei dieser Erweiterung ihrer Vorstellung keine Schwierigkeiten haben.

Man könnte Strom auch von vornherein durch eine Meßvorschrift definieren, nämlich als „Betrag der mengenartigen Größe dividiert durch die Zeit“ (genaugenommen erklärt man so nicht das Phänomen *Strom*, sondern die physikalische Größe *Stromstärke*).

In der ersten Erprobungsphase war dieser Weg beschritten worden. Er hat sich aber als zu schwierig herausgestellt, und zwar nicht nur wegen der algebraischen Fertigkeiten, die dazu erforderlich sind. Fragte man nämlich danach, wo bei einem sich verengenden Fluß die Stromstärke größer ist, an der engen oder an der breiten Stelle, so erhielt man sehr oft die Antwort, an der engen, wo das Wasser schneller fließt. Offenbar wurde unter *Stromstärke* etwas verstanden, das dem physikalischen Begriff *Stromdichte* näher verwandt ist.

Experimente

Vergleich einiger Ströme. Es werden verschiedene Ströme betrachtet und verglichen, etwa Ströme von Kreidestücken, die man von Hand zu Hand geben läßt, oder Autoströme, die man durchs Fenster hindurch beobachtet.

Erzeugung eines Energiestroms. Knäckebrötscheiben werden von Hand zu Hand gegeben, und zwar eine Scheibe pro Sekunde. Ein Metronom schlägt den Takt. Es wird festgestellt, daß 130 kJ pro Sekunde strömen.

4. Einweg- und Pfandflaschen-Energieträger

Unterrichtsablauf

Es wird festgestellt, daß der Energieträger im Empfänger nicht verschwindet. Der Energieträger, oder das was von ihm übrigbleibt, wenn er im Empfänger seine Energie abgegeben hat, verläßt den Empfänger wieder: Beim Automotor die Abgase, beim Zentralheizkörper das abgekühlte Wasser. Wir sagen: Der Energieträger *lädt im Empfänger seine Energie ab*.

Nachdem er seine Energie abgeladen hat, kann zweierlei mit ihm geschehen. Es gibt Energieträger, die „weggeworfen“ werden, genauso wie man Einweg-Sprudelflaschen wegwirft, nachdem man sie leergetrunken hat. Solche Energieträger nennen wir *Einwegflaschen-Energieträger*. Hierzu

gehört zum Beispiel das Benzin. Aus ihm werden durch das Abladen der Energie im Automotor Abgase, die ins Freie abgegeben werden.

Es gibt eine andere Art Energieträger, nämlich solche, die zur Quelle zurückfließen, nachdem sie ihre Energie im Empfänger abgeladen haben, ähnlich wie Pfandflaschen, die zum Abfüllwerk zurückgebracht werden. Hierzu gehört zum Beispiel das Wasser der Zentralheizung. Es fließt nach dem Abladen der Energie im Heizkörper zum Heizkessel zurück. Diese Energieträger nennen wir *Pfandflaschen-Energieträger*.

Die Schemata können nun vervollständigt werden (Abb. 4): Bei Einwegflaschen-Energieträgern kommt aus dem Empfänger auf der linken Seite ein Pfeil heraus, der nach unten abbiegt. Bei Pfandflaschen-Energieträgern läuft dieser Pfeil zurück zur Quelle.

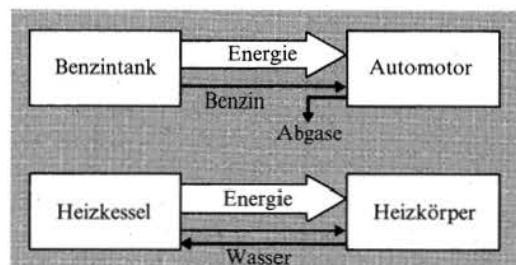


Abb. 4 Das Benzin, das vom Benzintank zum Automotor fließt, ist ein Einwegflaschen-Energieträger. Das Wasser der Zentralheizung ist ein Pfandflaschen-Energieträger.

Pfandflaschen-Energieträger bilden einen Stromkreis. Sie werden in der Quelle mit Energie beladen und im Empfänger entladen. Bei Pfandflaschen-Energieträgern sind Quelle und Empfänger durch zwei Leitungen verbunden, bei Einwegflaschen-Energieträgern nur durch eine.

Bemerkungen

Das wichtigste Anliegen dieser Unterrichtseinheit ist die Differenzierung zwischen Energie und Energieträger. Ist der Energieträger nämlich eine unsichtbare, dem Schüler noch nicht vertraute Größe, wie etwa die elektrische Ladung, so kommt es leicht zu Interferenzen: Energie und Energieträger werden verwechselt oder als dasselbe angesehen („Elektrizität ist Energie“). Es muß deshalb von vornherein, d.h. bevor die schwierigen Energieträger behandelt werden, klar sein, daß es unterschiedliche Kreisläufe gibt, daß Energie und Energieträger verschiedene Wege gehen. Die Frage, wozu man beim elektrischen Energietransport zwei Leitungen braucht und ob in Hin-

und Rückleitung gleichviel Strom fließt, stellt sich dann gar nicht erst.

In dieser Unterrichtseinheit wird auch etwas geübt, was auf den ersten Blick gar nicht sichtbar ist: Der Umgang mit Erhaltungsgrößen. Es wird unterstellt, daß der Energieträger etwas ist, das erhalten bleibt. Er muß aus dem Empfänger wieder herauskommen, und zwar vollständig, nicht nur ein Teil von ihm. Diese Vorstellung ist natürlich in hohem Maße durch die verwendeten Bilder induziert. Ein Energieträger *trägt* ja die Energie nur, also verschwindet er nicht wenn er sie abläßt.

Daß der wirkliche Energieträger, d.h. die für den Energietransport zuständige physikalische Größe manchmal gar keine Erhaltungsgröße ist, ist belanglos, solange im Unterricht der Energieträger noch nicht bei seinem richtigen physikalischen Namen benannt worden ist. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn im Empfänger chemische Reaktionen stattfinden. Der Energieträger Menge ist zwar keine Erhaltungsgröße, aber bei chemischen Reaktionen gilt die Erhaltung der Masse mit großer Genauigkeit, so daß auch hier der Energieträger den Empfänger wieder vollständig verläßt, wenn man ihn durch seine Masse charakterisiert.

5. Die Energieträger Fahrradkette und Treibriemen

Unterrichtsablauf

Wenn man Energie von einem Motor auf eine Kreissäge übertragen will, kann man einen Treibriemen benutzen. Der Treibriemen ist der Energieträger. Er läuft zwischen Quelle und Empfänger hin und zurück, so daß er einen Stromkreis bildet. Es handelt sich also um einen Pfandflaschen-Energieträger. Andere Anwendungen von Treibriemen, Keilriemen, Seilen und Ketten werden diskutiert: das Fahrrad, die Drahtseilbahn, alte Nähmaschinen, der Antrieb von Wasserpumpe und Lichtmaschine beim Auto.

Bemerkungen

Hier wird wieder ein Energieträger nicht mit dem Namen der Größe benannt, die den Energietransport charakterisiert, nämlich „Impuls“, sondern mit dem Namen eines Gegenstandes, nämlich „Treibriemen“. Die Stromkreise des Treibriemens und des Impulses sind übrigens nicht identisch.

Der Riemen strömt so wie man es sieht. Der Impuls dagegen strömt im gespannten Teil des Riemens in eine Richtung und über die Befestigungen von Quelle und Empfänger durch die Erde zurück (siehe dazu auch den vorletzten Aufsatz in diesem Heft).

Ketten und Riemen sind nach der Zentralheizung das zweite Beispiel für Pfandflaschen-Energieträger. In der folgenden Unterrichtseinheit kommt noch als drittes Beispiel die Hydraulik hinzu. Sie alle haben unter anderem die Funktion, auf die Einführung der unsichtbaren Pfandflaschen-Energieträger elektrische Ladung und Drehimpuls vorzubereiten.

Außerdem gestatten sie es, eine große Zahl technischer Geräte in die Reihe der Energiequellen und Energieempfänger aufzunehmen, nämlich alle die, bei denen sich etwas dreht. Das ist ein Provisorium, solange der Drehimpuls als Energieträger noch nicht eingeführt wurde.

Experimente

Energietransport mit einer Schnur. Eine Spielzeugdampfmaschine oder ein kleiner Elektromotor treibt eine Spielzeugkreissäge an über eine sehr lange, quer durch das Klassenzimmer laufende Schnur. Es ist eindrucksvoll nur die Schnur zu betrachten: Man erkennt kaum daß sie sich bewegt, trotzdem strömt Energie hindurch. Man kann diesen Energietransport auch zu einem Einwegflaschen-Energietransport machen, indem man nur einen Faden um jedes der beiden Räder herumlegt und beim Empfänger immer neue Schnur nachliefert. Der Faden häuft sich bei der Quelle an.

Keilriemenantrieb im Auto. Dies ist wieder eine Gelegenheit, das Auto des Lehrers zu besichtigen und die darin befindlichen Treibriemenstromkreise ausfindig zu machen. Außerdem können, falls vorhanden, Geräte aus der Sammlung, bei denen eine Energieübertragung durch Riemen oder Ketten stattfindet, vorgeführt werden, etwa die Vakuumpumpe.

6. Die Energieträger Hydrauliköl, Luft, Preßluft

Unterrichtsablauf

In dieser Unterrichtseinheit werden Baumaschinen und landwirtschaftliche Maschinen untersucht. Wir beginnen mit einer Maschine, die mit

Luft angetrieben wird, die ihre Energie also mit dem Energieträger Luft bekommt: Mit dem Preßlufthammer. Preßluft tritt noch an vielen anderen Stellen als Energieträger auf: Bei den Türöffnern von Straßenbahnwagen, bei der LKW-Bremse. Schnellbewegte Luft ist der Energieträger, der die Energie auf eine Windmühle oder ein Segelschiff abläßt, der den Staub in den Staubsauger trägt. Luft ist hier immer ein Einwegflaschen-Energieträger.

Einem System, das Energie mit einem Pfandflaschen-Energieträger überträgt, begegnen wir bei fast allen modernen Baumaschinen und bei vielen landwirtschaftlichen Maschinen: der Hydraulik. Ausgewählte Maschinen werden ausführlich besprochen.

Bemerkungen

Diese Unterrichtseinheit ist wichtig, da die Schüler die Funktionsweise vieler technischer Geräte und Maschinen kennenlernen: Bagger mit Hydropumpe, Hydromotor, Zylindern, Kolben und Ölkreisläufen, Preßlufthammer mit Kompressor.

Das Verständnis der Hydraulik ist besonders wichtig, da sie fast ein exaktes Abbild von elektrischen Stromkreisen darstellt (siehe dazu auch den 4. Aufsatz in diesem Heft), und zwar nicht nur in der physikalischen Struktur, sondern auch äußerlich. Quelle und Empfänger sind wie bei der Elektrizität durch zwei flexible Leitungen verbunden.

Experimente

Energieträger Preßluft. Ein Kolbenprober und eine Fahrradluftpumpe, die durch einen Schlauch miteinander verbunden sind, stellen das Modell eines Preßlufthammers mit Kompressor dar (Abb. 5).

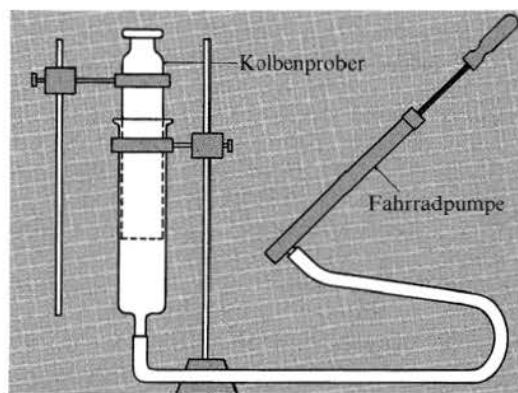


Abb. 5 Modell eines Preßlufthammers (Kolbenprober) mit Kompressor (Fahrradluftpumpe)

Energieträger bewegte Luft. Ein Staubsauger wird als Gebläse verwendet. Dazu wird das Rohr an der Austrittsöffnung der Luft angeschlossen. Nicht alle Staubsauger können so betrieben werden. Geeignet ist zum Beispiel der Allzwecksauger von *Quelle*. Der Luftstrom überträgt Energie auf ein kleines Windrad über Entfernungen bis zu 1 m.

Energieträger Wasser. Ein Hydraulikkreislauf wird aufgebaut aus einer Wasserpumpe (Vorsatzgerät für elektrische Handbohrmaschine), einer Wasserturbine aus der Schulsammlung (z.B. von *Leybold*) und zwei langen Schläuchen (Abb. 6).

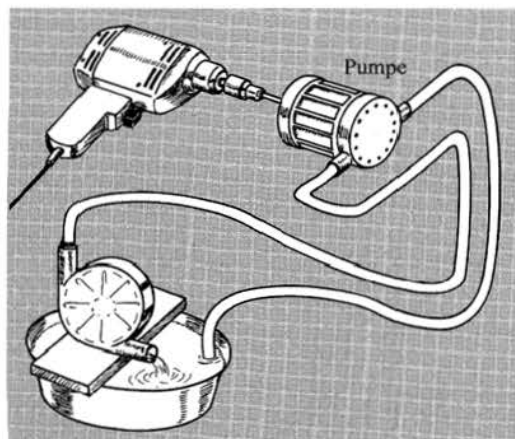


Abb. 6 Mit dem Energieträger Wasser wird Energie von einer Pumpe zu einer Turbine übertragen.

7. Der Energieträger Elektrizität

Unterrichtsablauf

Wir beginnen mit der genaueren Untersuchung eines Energieträgers, von dem bisher nur andeutungsweise die Rede war: der Elektrizität. Ihre Transportvorrichtung ist ein Kabel. Ein Kabel ist aus zwei Drähten zusammengesetzt. Die Elektrizität ist also ein Pfandflaschen-Energieträger. Elektrische Energiequellen und -empfänger und Kabel werden untersucht. Stromkreise werden aufgebaut. Ob ein Gegenstand die Elektrizität leitet oder nicht, hängt vom Stoff ab, aus dem er gemacht ist. Wasser leitet den elektrischen Strom erst, nachdem man Salz hineingetan hat.

Der Mensch braucht Energie, aber er ist darauf eingerichtet, sie mit ganz bestimmten Energieträgern aufzunehmen: mit der Nahrung. Bekommt

er sie mit dem falschen Energieträger, so ist die Energie schädlich, sie stört oder zerstört normale Funktionen des Körpers. So ist es sehr gefährlich, wenn er Energie mit dem Energieträger Elektrizität bekommt.

Glühlampen werden untersucht, mehrere Empfänger werden parallel geschaltet.

Auch bei der Fahrradbeleuchtung ist die Elektrizität Pfandflaschen-Energieträger, obwohl es nicht so aussieht.

Die Stärke des elektrischen Stroms wird mit dem Amperemeter gemessen. Man trennt dazu die Leitung an der Stelle, an der die Stromstärke gemessen werden soll, durch und steckt die beiden neuentstandenen Drahtenden in die Buchsen des Amperemeters. Die Elektrizität muß jetzt durchs Amperemeter hindurchfließen.

Wenn man die Stromrechnung bezahlt, bezahlt man nicht für den elektrischen Strom oder die Elektrizität, sondern für die Energie, genauso wie man bei der Fernheizung nicht für das Wasser, sondern für die Energie bezahlt.

Bemerkungen

Den Energieträger, um den es hier geht, und dessen physikalischer Name elektrische Ladung ist, nennen wir Elektrizität. Wir haben uns für diesen Namen entschieden, nachdem wir zwei andere Möglichkeiten ausgeschlossen haben.

Die erste besteht darin, den Energieträger, wie in der Physik üblich, elektrische Ladung zu nennen. In der Anfangszeit der Erprobung haben wir das getan und damit sehr schlechte Erfahrungen gemacht. Es ergaben sich zwei Arten von Verwechslungen: einmal deshalb, weil wir davon sprachen, daß der Energieträger mit Energie *beladen* ist. Die Energie erscheint also als Ladung des Energieträgers. Bei Benutzung des Worts elektrische Ladung würde somit die sprachliche Situation entstehen, daß die „Ladung beladen“ ist. Außerdem entstanden Verwechslungen bei der Diskussion des Akkus, und zwar auch bei sehr guten Schülern: Es wurde erwartet, daß ein geladener Akku mit elektrischer Ladung geladen ist, und nicht, wie es richtig ist, mit Energie.

Die zweite Möglichkeit hätte darin bestanden, den Energieträger „Elektronen“ zu nennen. Dies hätte aber im Widerspruch zu unserer Absicht gestanden, die Quantisierung von physikalischen Größen, also die Atomistik, im Anfängerunterricht aus dem Spiel zu lassen. Es wäre ganz sicher ungeschickt gewesen, diese nur aus semantischen

Gründen einzuführen an einer Stelle, wo überhaupt kein Zwang dazu besteht. Wenn mit der Atomistik begonnen wird, dann dort, wo man ihre Zweckmäßigkeit leicht einsieht, nämlich bei chemischen Reaktionen.

Der Inhalt dieser Unterrichtseinheit ist dem der entsprechenden Kapitel der meisten Anfängerkurse sehr ähnlich. Allerdings spielt bei uns die Elektrizität eine weniger zentrale Rolle. Sie ist ein Energieträger, der gleichberechtigt neben anderen steht.

Es wurde bereits angemerkt, daß die Elektrizität hier so spät auftritt, damit keine Interferenzen zwischen elektrischem Strom und Energiestrom entstehen.

Die Messung der Stromstärke des Energieträgers wird behandelt, da sie für die Unterrichtseinheit 9 gebraucht wird. Dort wird die Stärke von Energieströmen mit der Stärke von Energieträgerströmen in Zusammenhang gebracht. Bei den bisher behandelten Energieträgern, die alle eine sehr große Anschaulichkeit hatten und zum Teil sogar sichtbar waren, ist der Vergleich von Stromstärken ohne Probleme: Ein Wasserstrom etwa ist größer, wenn 50 l in der Sekunde strömen, als wenn 5 l in der Sekunde strömen. Für die Elektrizität haben wir aber keine Maßeinheit kennengelernt. Es muß deshalb die Möglichkeit geben, die Stärke des Stroms direkt zu messen. Eine Alternative hätte darin bestanden, das Coulomb als Maß für die Ladung einzuführen. Damit hätte man aber von den beiden Einheiten Coulomb und Ampere die für den praktischen Gebrauch unwichtigere eingeführt.

Experimente

Experimente werden hier nicht beschrieben, da die zu dieser Unterrichtseinheit passenden allgemein bekannt sind. Selbstverständlich bietet sich diese Unterrichtseinheit besonders für Schülerexperimente an.

8. Vergleich von Energieströmen

Unterrichtsablauf

Die Frage, ob ein Elektroherd mehr oder weniger Energie verbraucht als eine Glühlampe führt dazu, den Energieverbrauch durch Vergleich zu bestimmen, nämlich dadurch, daß man Energiemengen in gleichen Zeiten, im allgemeinen in einer

Sekunde, vergleicht. Auf diese Art vergleicht man die Stärke von Energieströmen. Sie wird in Watt gemessen: 1 J in 1 s ist 1 W.

Die Energieströme vieler Geräte werden miteinander verglichen. Dabei ergibt sich die Regel, daß man zum Heizen viel Energie braucht, daß elektronische Geräte dagegen wenig brauchen.

Der Energiestrom, der im Mittel durch den Menschen fließt, ist etwa 100 W, also so groß wie der durch eine Glühlampe. Von der Sonne bekommen wir pro m^2 etwa 1 kW.

Strömt Energie mit dem Energieträger Elektrizität, so kann man die Energiestromstärke mit dem Wattmeter messen.

Bemerkungen

Wichtigstes Ziel der Unterrichtseinheit ist es, eine Idee von der Größenordnung verschiedener Energieströme zu vermitteln. Die Schüler lernen technische Geräte zu beurteilen. Sie lernen, daß man biologische Systeme auf dieselbe Art beschreibt wie technische.

Üblicherweise wird die Größe Energiestrom mit einem speziellen Namen bezeichnet: Leistung. Dieser Name wird hier vermieden, da er viel weniger aussagekräftig ist. Leistung könnte eine Eigenschaft des Gerätes sein. Leistung könnte auch eine intensive Größe sein. Das Wort Energiestrom dagegen erklärt die Größe, von der die Rede ist, sehr genau: der Strom der mengenartigen Größe Energie. Die Schüler kennen die Wörter Energie und Strom und verbinden mit beiden eine klare Vorstellung. Daher ist für sie der Energiestrom nichts neues.

Experimente

Messung von Energieströmen mit dem Wattmeter. Mit dem Wattmeter werden Energieströme gemessen, die in verschiedene elektrische Geräte fließen. Bei einem Heizlüfter wird der Wert des Energiestroms im Fall, daß nur der Ventilator läuft, verglichen mit dem Wert bei laufender Heizung. Das Wattmeter sollte nicht vier getrennte Anschlüsse haben, oder, noch schlimmer drei, sondern wie jeder Strommesser zwei: einen Eingang und einen Ausgang. Auf der einen Seite fließt die Energie durch einen normalen zweipoligen Stecker hinein, auf der anderen Seite fließt sie durch eine Steckdose wieder heraus. Das Verfahren der Messung ist dasselbe wie bei anderen Strommessungen: Der Strom, hier der Energiestrom, wird einfach durch das Meßgerät hindurchgeschickt.

9. Die Beladung des Energieträgers mit Energie

Unterrichtsablauf

Das Bild vom Energieträger beinhaltet die Vorstellung, daß der Energiestrom um so stärker ist, je stärker der Energieträgerstrom ist. Dieser Sachverhalt wird diskutiert und formuliert. Man kann aber feststellen, daß der Energiestrom nicht von der Stärke des Energieträgerstroms allein abhängt. Strömen im Rohr des Heizkörpers einer Zentralheizung 50 l in 1 h, so kann damit ein kleiner oder ein großer Energiestrom verbunden sein. Analoges gilt für alle anderen Energieträger. Mit einem elektrischen Strom von 0,5 A kann man viel Energie transportieren, nämlich wenn man an die Steckdose eine 100 W-Lampe anschließt, oder wenig, wenn man an eine Flachbatterie eine 2 W-Lampe anschließt.

Der Energieträger kann also *mehr oder weniger stark mit Energie beladen sein*.

Nahrungsmittel können mehr oder weniger stark mit Energie beladen sein: Ißt man 100 g Zucker, so nimmt man mehr Energie auf, als wenn man 100 g Salat ißt.

Wasser kann mehr oder weniger stark mit Energie beladen sein: Warmes Wasser transportiert mehr Energie als kaltes. Je höher die Temperatur, desto mehr Energie ist auf den Wasserstrom geladen.

Einen Luftstrom kann man stärker mit Energie beladen, indem man den Druck erhöht.

Der Energiestrom durch eine Fahrradkette ist umso größer, je mehr Energie auf den Kettenstrom geladen ist, d.h. je stärker die Kette durch das Treten gespannt wird.

Der elektrische Strom ist umso stärker mit Energie beladen, je höher die elektrische Spannung ist.

Die Maßeinheiten °C, bar und Volt werden eingeführt.

Bemerkungen

Diese Unterrichtseinheit ist anspruchsvoll. In den Worten des Physikers ist ihr Ziel die Erkenntnis, daß ein Energiestrom stets durch *zwei* Variablen bestimmt ist. Sie ist schwieriger als die bisherigen Unterrichtseinheiten. Die Schüler operieren zum ersten Mal mit nicht-mengenartigen Größen. Außerdem wird zum ersten Mal die Abhängig-

keit einer Größe von *zwei* anderen untersucht. Bei der Betrachtung der Abhängigkeit von der einen ist die andere konstant zu halten. Formuliert werden die Ergebnisse in „je-desto-Sätzen“, also etwa: „Der Energiestrom ist desto größer, je mehr Energie auf den elektrischen Strom geladen ist, d.h. je höher die elektrische Spannung ist“.

In qualitativer Form liegt damit die Aussage der *Gibbsschen Fundamentalform* vor:

$$dE = \zeta_i dX_i.$$

Tabelle 2 faßt noch einmal zusammen, welche Namen den in der *Gibbsschen Fundamentalform* auftretenden Größen im Unterricht gegeben werden, um die beabsichtigten Vorstellungen zu induzieren.

Tabelle 2

	E	ζ	X
für den Physiker	Energie	intensive Größe	extensive Größe
für den Schüler	Energie	Beladungsmaß des Energieträgers	Energieträger

Von den intensiven Größen, die zu den bisher betrachteten Energieträgern gehören, d.h. chemisches Potential, Zugspannung, Temperatur, elektrische Spannung und Druck werden nur die drei letzten als meßbare Größen eingeführt, da nur sie im alltäglichen Leben eine Rolle spielen. Das chemische Potential kennen die Kinder schon seit der ersten Unterrichtseinheit in versteckter Form, nämlich in Gestalt der Kilojoule-Tabelle („100 g Butter enthalten 3200 kJ“).

Bei einer etwas vertieften Behandlung kann man auch erkennen, daß es nicht Temperatur oder Druck selbst sind, die die Beladung des Energieträgers bestimmen, sondern Differenzen der Werte dieser Größen zwischen Ein- und Ausgang des Empfängers oder, bei Pfandflaschen-Energieträgern, zwischen den beiden Leitungen.

Experimente

Der Energiestrom hängt von der Stärke des Energieträgerstroms ab. In die Zuleitung eines Heizlüfters wird ein Amperemeter und ein Wattmeter eingebaut. Elektrischer Strom und Energiestrom werden für die verschiedenen Stellungen des Schalters des Heizlüfters abgelesen und miteinander verglichen.

Ein Spiel, bei dem ein Energiestrom durch einen Wasserstrom simuliert wird. In einem Spiel wird die Abhängigkeit des Energiestroms vom Energieträgerstrom und von der Beladung des Energieträgerstroms simuliert. Eine Schülerschlange transportiert Wasser von einem Behälter in einen anderen, indem Becher gefüllt und durch die Schlange hindurchgereicht werden. Das Wasser stellt die Energie, die Becher stellen den Energieträger dar. Man kann den Wasserstrom dadurch verändern, daß man die Becher langsamer oder schneller durchgibt, also den Wasserträgerstrom verändert, oder dadurch, daß man die Becher mehr oder weniger füllt, also die Beladung der Wasserträger mit Wasser verändert.

Der Energiestrom hängt vom Druck ab. Mit einer Fahrradpumpe pumpt ein Schüler einen Fahrradreifen auf, dabei macht er zwei Hübe pro Sekunde. Dann pumpt er, wieder mit zwei Hüben pro Sekunde, ins Freie. Den unterschiedlichen Energiestrom spürt er in den Armen.

Der Energiestrom hängt von der elektrischen Spannung ab. In die Zuleitung einer 100 W-Glühlampe, die an die Steckdose angeschlossen wurde, wird ein Watt- und ein Amperemeter eingebaut. Energiestrom und elektrischer Strom werden abgelesen. Die gleichen Messungen werden gemacht mit einem 2 W-Lämpchen, das an eine Taschenlampenbatterie angeschlossen wird. Die Lampen sollen so ausgewählt werden, daß die elektrische Stromstärke in beiden Fällen möglichst gleich groß ist.

10. Energieumlader

Unterrichtsablauf

Ausgehend von der Frage, woher eine Energiequelle ihre Energie bekommt, untersuchen wir systematisch möglichst viele Quellen, die Energie mit dem Energieträger Elektrizität abgeben, also den Akku, den Fahrraddynamo, die Solarzelle, die Taschenlampenbatterie, das Kraftwerk. Bei jeder Quelle wird getrennt die Frage gestellt, woher sie ihre Energie bekommt. Man stellt fest, daß es zweierlei Quellen gibt: solche, die die Energie enthalten und beim Gebrauch leerwerden, wie der Akku und die Taschenlampenbatterie, und solche, die während der Benutzung die Energie mit einem anderen Energieträger bekommen, wie das Kraftwerk, der Dynamo und die Solarzelle. Die einen nennen wir *Energiespeicher*,

die anderen *Energieumlader*. Wir befassen uns hier zunächst mit Energieumladern.

Als typischer Energieumlader wird ein Gerät betrachtet, das schon oft im Unterricht benutzt wurde: der Staubsauger, den wir als Gebläse verwenden. Bisher diente er manchmal als Energieempfänger – die Energiequelle war dann das Kraftwerk – und manchmal als Energiequelle, wobei der Energieempfänger ein Windrad war. Wir zeichnen die Schemata dieser beiden Energietransporte untereinander (Abb. 7). Im oberen Bild ist das Gebläse Empfänger, im unteren Quelle. Es liegt auf der Hand, wie man beide Bilder zu einem einzigen zusammenfaßt. Wir sagen, das Gebläse sei ein Energieumlader, denn es *lädt die Energie von einem Energieträger auf einen anderen um*, nämlich vom elektrischen Strom auf den Luftstrom.

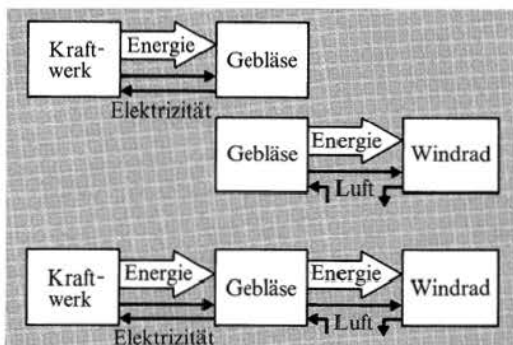


Abb. 7 Im oberen Bild ist das Gebläse Empfänger, im mittleren Quelle. Im unteren Bild sind beide Funktionen zusammengefaßt: das Gebläse ist ein Energieumlader.

Es werden anschließend verschiedene Energieumlader diskutiert. Einige Beispiele sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3 Beispiele für Energieumlader

Name des Umladers	Energieträger, mit dem die Energie	
	hineinströmt	herausströmt
Wasserkraftwerk	Wasser	Elektrizität
Elektromotor	Elektrizität	Treibriemen
Heizkessel	Heizöl	Wasser
Kompressor	Dieselöl	Luft

Bei jedem wird die Frage beantwortet: Von welchem Energieträger auf welchen Energieträger wird die Energie umgeladen? Es werden mög-

lichst viele Energieumlader vorgeführt. Falls die Schüler die Entdeckung machen, daß manche Energieumlader aus anderen Energieumladern zusammengesetzt sind, wie etwa das Wasserkraftwerk aus Turbine und Generator, bitten wir sie noch um etwas Geduld. Wir wollen, bevor wir Umlader hintereinanderschalten, noch einen neuen Energieträger kennenlernen.

Bemerkungen

Die Schemata, die hier benutzt werden, sind stark vereinfacht, man könnte sogar sagen, sie verzerren die Wirklichkeit. Zum einen ist nämlich der Energietransport mit Verlusten behaftet, wir tun aber so, als käme die ganze Energie, die die Quelle verläßt, auch beim Empfänger an. Zum zweiten hat jeder Umlader einen Wirkungsgrad, der kleiner ist als eins, er hat also nicht nur einen Ausgang für die Energie, sondern mindestens zwei. Bei vielen Umladern ist der „Verlust“-Energiestrom sogar viel größer als der gewünschte Energiestrom, etwa beim Automotor, bei der Solarzelle oder bei der Glühlampe. Trotzdem sprechen wir von diesen Verlusten im Augenblick noch nicht. Da man nicht alles gleichzeitig machen kann, beginnen wir mit dem für uns zunächst wichtigsten: dem Energiestrom, der gewünscht wird. In der Unterrichtseinheit 16 wird dann unser vereinfachtes Energieschema vervollständigt.

Noch ein Wort zum Sprachgebrauch: In der Anfangszeit der Erprobung haben wir statt des Wortes „Umlader“ dem allgemeinen Gebrauch folgend das Wort Energiewandler benutzt. Dabei wurde uns klar, welche suggestive Kraft von einem Wort ausgehen kann. Obwohl wir die Funktion des Gerätes (Wandler bzw. Umlader) eindeutig als ein Umladen beschrieben hatten, wurden von unaufmerksamen Schülern immer wieder Fehler gemacht, für die der folgende Satz ein typisches Beispiel ist: „Der Dynamo wandelt Drehimpuls in Elektrizität um“. Wir hatten nicht von Energieformen gesprochen, die ineinander umgewandelt werden, um nicht den Eindruck entstehen zu lassen, es gebe verschiedene physikalische Größen Energie. Dafür hatten wir uns nun einen noch schwererwiegenden Fehlschluß eingehandelt, nämlich daß ein Energieträger in einen anderen verwandelt wird. Der Grund dafür war mangelnde Konsequenz in der Bezeichnungsweise. Wir haben daher das Wort Wandler ganz aus dem physikalischen Vokabular der Schüler gestrichen.

Experimente

Der Energieumlader Gebläse (= umgekehrter Staubsauger). Die Energie wird vom elektrischen Strom auf den Luftstrom umgeladen. Der Luftstrom treibt ein Windrad an.

Der Energieumlader Windkraftwerk. Die Energie wird vom Luftstrom auf den elektrischen Strom umgeladen. Ein Spielzeugmotor wird als Dynamo verwendet. An seiner Welle wird eine Luftschraube befestigt. Als Quelle für den Luftstrom wird der Staubsauger verwendet. An dem Dynamo wird ein Lämpchen zum Nachweis des Energiestroms angeschlossen.

Der Energieumlader Solarzelle. Die Energie wird vom Licht auf den elektrischen Strom umgeladen. An eine Solarbatterie wird ein kleiner Elektromotor angeschlossen. Falls die Sonne nicht scheint, nimmt man den Schreibprojektor als Lichtquelle.

Der Energieumlader Wasserkraftwerk. Die Energie wird vom Wasserstrom auf den elektrischen Strom umgeladen. An eine kleine Wasserturbine (z. B. die Turbine von *Leybold*) wird ein Fahrraddynamo oder ein Spielzeugmotor, der als Dynamo läuft, angeschlossen. Die Turbine wird mit Wasser aus der Wasserleitung betrieben. Zum Nachweis dient wieder ein Birnchen.

11. Elektromagnet und Elektromotor

Unterrichtsablauf

Wir wollen uns einen wichtigen Energieumlader etwas näher ansehen, den Elektromotor. Er lädt Energie von der Elektrizität auf einen Treibriemen um. Um ihn zu verstehen, müssen wir uns mit Magneten beschäftigen. Permanentmagnete sind den Schülern von der Grundschule her bekannt. Ihre wichtigsten Eigenschaften werden in einem Schülerpraktikum erarbeitet. Dann lernen die Schüler Elektromagnete kennen. Jeder baut selbst einen Elektromagnet aus einer Büroklammer und Kupferdraht. Anwendungen von Elektromagneten werden diskutiert.

Ein Magnet hebt Eisengegenstände hoch. Dazu wird Energie gebraucht. Woher bekommt der Magnet die Energie? Der Permanentmagnet bekommt sie in der Fabrik mit (beim Magnetisieren), der Elektromagnet bekommt sie von der elektrischen Energiequelle. Nimmt die Energie

des Magneten ab, wenn er etwas angezogen hat? Der Versuch zeigt, daß ein Hufeisenmagnet, der ein Stück Eisen festhält, kein zweites Stück Eisen oder keine Nägel mehr anzieht. Die Energie ist aufgebraucht. Um das Eisenstück vom Magnet wegzubringen, braucht man Energie. Der Magnet kann danach wieder Eisen anziehen, er hat seine Energie zurückbekommen.

Wir bauen aus zwei Stabmagneten eine magnetische Kupplung, Abb. 8a. Mit ihr kann man Energie durch eine Glasscheibe oder Holzplatte hindurch übertragen. Wir haben aber keine Lust zu drehen, d.h. mit der Hand Energie zu liefern. Wir ersetzen deshalb den einen Stabmagnet durch zwei oder drei Elektromagnete, Abb. 8b, die wir der Reihe nach ein und wieder ausschalten, so daß sich der Stabmagnet dreht. Die Energie kommt jetzt nicht mehr vom Experimentator, sondern von der Energiequelle, die die Elektromagnete versorgt. Wir haben damit einen Elektromotor gebaut. Ein richtiger Motor unterscheidet sich hiervon nur dadurch, daß das Umschalten von der sich drehenden Welle selbst besorgt wird.

Bemerkungen

Diese Unterrichtseinheit lief bei der Erprobung gut, obwohl es hier eine Schwierigkeit gibt: Die Energiebeträge, die beim Anheben eines Eisenteils umgesetzt werden, sind sehr klein, von der Größenordnung eines hundertstel Joule. Sie sind von derselben Größenordnung wie die Energiebeträge, die nötig sind, um den Magnet selbst von einer Stelle zu einer anderen zu bringen, oder um

unsere Hand zum Magnet zu bewegen, und es könnte unnatürlich erscheinen, daß man über die Energie des Magneten spricht, nicht aber über die Energie, die man braucht um den Magnet selbst zu heben. Deshalb empfiehlt sich folgendes Vorgehen. Immer wenn man einen Versuch macht, sagt man: „Stellt euch vor, der Magnet ist riesengroß, er hebt einen Eisenklotz von einer Tonne einen Meter hoch; seht ihr, daß man dazu Energie braucht? Wir machen den Versuch hier im ganz kleinen.“

An dieser Stelle scheint für den Physiker eine Bemerkung zum Problem der Lokalisierung von Energie und Energieströmen am Platze. Wir sagen, der Magnet *habe* die Energie, aber jeder Physiker weiß, daß die Energie nicht im Magnet, sondern außerhalb, in seinem Feld steckt. Wir sagen auch, der elektrische Strom trage die Energie von der Quelle zum Empfänger, lade sie im Empfänger ab und fließe ohne Energie zurück. Jeder Physiker weiß, daß die Energie nicht in den Drähten, sondern außerhalb fließt. Die Energiestromdichte ist durch das Poynting-Vektorfeld gegeben, das praktisch nur außerhalb der Drähte von Null verschieden ist. Die durch unsere sprachlichen Wendungen induzierte Vorstellung, die die Energie bzw. den Energiestrom in ein materielles Gebilde *hineinverlagert* halten wir für vertretbar, da sie später beim fortgeschrittenen Schüler oder beim Studenten ohne Schwierigkeit korrigiert werden kann. In der Mechanik ist eine analoge Vorgehensweise traditionell üblich, ohne daß das bisher Bedenken ausgelöst hätte. Man sagt ein Körper *habe* potentielle Energie, obwohl die potentielle Energie nicht dem Körper, son-

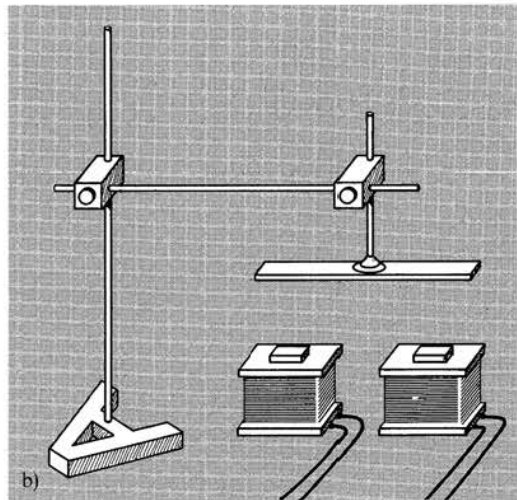
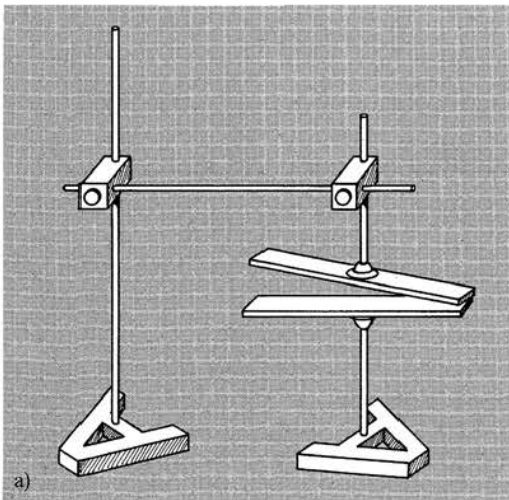


Abb. 8 Energie wird mit Magneten übertragen. (a) Magnetkupplung. (b) Einer der Permanentmagnete wird durch Elektromagnete ersetzt.

dem dem Schwerefeld zukommt. Für uns hat die einfache Sprechweise den Vorteil, das Bild vom Energieträger sehr konkret zu machen, und das ist zunächst das Wichtigste.

Experimente

Schülerexperimente mit Permanentmagneten.

Die Schüler bauen Elektromagnete. Eine Büroklammer wird aufgebogen. Um das eine Ende werden etwa 50 Windungen isolierten Kupferdrahtes von etwa 1/10 mm Durchmesser gewickelt. Schließt man diesen Elektromagnet an eine Flachbatterie an, so zieht er eine andere Büroklammer an.

Magnetisieren einer Stricknadel. Beim Magnetisieren steckt man Energie in ein Stück Eisen hinein.

Ein Permanentmagnet gibt seine Energie ab. Ein Hufeisenmagnet zieht ein großes Stück Eisen an, dann hält man ihn in einen Haufen Nägel. Es bleibt kein Nagel mehr hängen.

Vorführung eines großen Elektromagneten aus der Sammlung.

Vorführung eines magnetischen Rührwerks.

Magnetkupplung. Zwei Stabmagnete aus der Sammlung werden um eine senkrechte Achse drehbar gelagert und so übereinander montiert wie es Abb. 8a zeigt. Dreht man einen der beiden Magnete, so dreht sich der andere mit. Dabei wird Energie von dem einen auf den anderen übertragen.

Handgesteuerter Elektromotor. Der untere Stabmagnet des vorigen Versuchs wird nun durch Elektromagnete ersetzt, Abb. 8b. Diese werden in zyklischer Reihenfolge ein- und wieder ausgeschaltet. Man kommt dabei sehr schnell aus dem Takt. Man läßt das Umschalten von mehreren Schülern ausprobieren.

12. Der Energieträger Drehimpuls

Unterrichtsablauf

Wir wollen Energie übertragen von einem Motor zu einer Kreissäge. Bisher haben wir dazu einen Treibriemen benutzt. Es geht aber auch einfacher: Man verbindet Motor und Säge direkt durch eine Welle. Welches ist hier der Energieträ-

ger? Die Welle selbst kann es nicht sein, sie strömt nicht von der Quelle zum Empfänger. Der Energieträger ist unsichtbar, wie Luft oder wie Elektrizität. Wir wollen untersuchen, ob der Energieträger ein Einwegflaschen- oder ein Pfandflaschen-Energieträger ist. Wir verbinden einen kleinen batteriebetriebenen Elektromotor durch eine Welle mit einer Spieluhr, Abb. 9. Ob Energie bei der Spieluhr ankommt, erkennt man daran, ob sie Musik macht. Mit nur einer Verbindung macht die Spieluhr keine Musik, es wird keine Energie übertragen. Wir müssen noch eine zweite Verbindung herstellen: Die Gehäuse müssen miteinander verbunden werden. Der unbekannte Energieträger muß also ein Pfandflaschen-Energieträger sein. Stellen wir Motor und Spieluhr auf den Tisch, so läuft die Spieluhr mit anscheinend nur einer Verbindung. Die Rückleitung ist hier der Tisch, genauso wie bei der Fahrradbeleuchtung die Rückleitung des elektrischen Stroms der Fahrradrahmen ist.

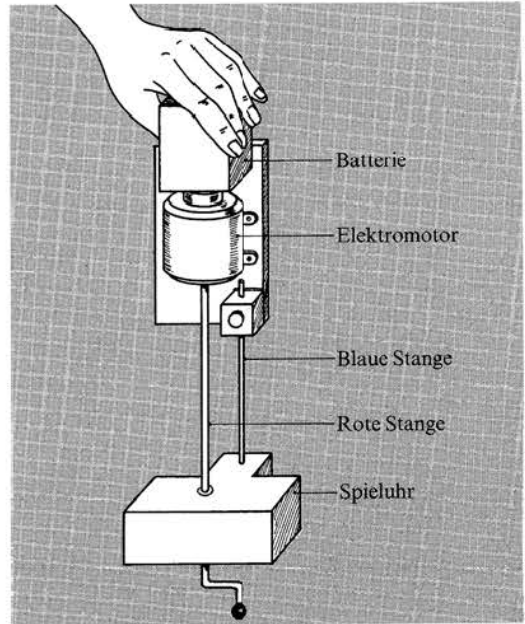


Abb. 9 Energiequelle (Elektromotor) und Energieempfänger (Spieluhr) müssen durch zwei Stangen miteinander verbunden sein.

Wir nennen den neuen Energieträger *Drehimpuls*. Er tritt überall da auf, wo Energie mit einer sich drehenden Welle übertragen wird. Ein Elektromotor läßt also die Energie von der Elektrizität auf den Drehimpuls um. Wir zeigen noch in anderen Versuchen, daß der Drehimpuls eine Rückleitung braucht.

Genau wie nicht alle Materialien die Elektrizität leiten, leitet auch nicht jeder Stoff den Drehimpuls. Drehimpuls fließt nur durch feste, steife Materialien, wie Holz oder Eisen, aber nicht durch Gummi oder Papier.

Bemerkungen

Die Größe Drehimpuls wird gewöhnlich als eine schwierige Größe angesehen. Dafür gibt es zwei Gründe: Bei der üblichen Einführung als Produkt aus Masse, Abstand (Ortsvektor) und Geschwindigkeit werden diejenigen Eigenschaften des Drehimpulses, die am leichtesten zu begreifen sind, nicht deutlich: seine Mengenartigkeit und die Tatsache, daß er einem Erhaltungssatz genügt. Ähnlich wie bei der Energie erscheint bei der traditionellen Einführung die Drehimpulserhaltung als das Resultat eines komplizierten Zusammenspiels von Masse, Abstand und Geschwindigkeit. Führt man dagegen den Drehimpuls so ein wie es hier geschildert wurde, nämlich als einen neuen, selbständigen Energieträger, so erscheint die Mengenartigkeit als Selbstverständlichkeit, denn alle Energieträger sind mengenartig. Auf die Erhaltung des Drehimpulses braucht gar nicht hingewiesen zu werden; sie wird von den Schülern erwartet.

Der zweite Grund dafür, daß der Drehimpuls den Ruf einer schwierigen Größe hat, ist berechtigter. Der Drehimpuls ist ein axialer Vektor. Da aber in unserer Einführung nur eine Komponente dieses Vektors betrachtet wird, spielt der Vektorcharakter des Drehimpulses hier keine Rolle.

Damit ist, in dieser Einführung wenigstens, der Drehimpuls begrifflich von derselben Schwierigkeit, oder besser Leichtigkeit, wie die elektrische Ladung. Die Frage nach der Richtung des Drehimpulsstroms durch eine Welle ist übrigens genauso zu beantworten wie die Frage nach der Richtung des elektrischen Stroms in einem Draht: durch Definition. Die Diskussion von Stromrichtungen finden Schüler aber langweilig; man sollte sie deshalb damit verschonen. Mit einer Fortsetzung der Behandlung des Drehimpulses befaßt sich der 5. Aufsatz dieses Heftes.

Es ist wichtig, daß die Schüler erkennen, daß der Drehimpuls eine Rückleitung braucht. Solange man diese nicht sieht, könnte man schließen, hier liege ein Energietransport ohne Energieträger vor. Die Notwendigkeit einer Rückleitung zeigt aber, daß es außer der Energie noch etwas anderes gibt, das zwischen Quelle und Empfänger ausgetauscht wird.

Experimente

Energieübertragung von einem Elektromotor zu einer Spieluhr. Dieser Versuchsaufbau erfordert eine gute mechanische Werkstatt, die die meisten Schulen nicht haben. Er ist aber so lehrreich und überraschend, daß er trotzdem beschrieben werden soll. Ein Spielzeugmotor mit Untersetzungsgetriebe und ein kleiner Akku werden auf eine Platte montiert. Dies ist die Energiequelle. Eine Spieluhr ist der Energieempfänger. Beide können durch eine lange rote Welle miteinander verbunden werden. Die Welle der Spieluhr reicht über die Spieluhr hinaus, so daß man die ganze Anordnung an dieser Welle festhalten kann. Die Grundplatten von Energiequelle und Energieempfänger können ebenfalls miteinander verbunden werden. Es empfiehlt sich, für diese zweite Verbindung eine blaue Stange zu nehmen, die, bis auf die Farbe, genauso wie die rote Welle aussieht. Die Verbindungen haben also dieselben Farben wie Hin- und Rückleitung eines elektrischen Stromkreises.

a) Wenn man nur die rote Verbindung herstellt, also nicht die Gehäuse miteinander verbindet, und die Anordnung am Motor festhält, so dreht sich die ganze Spieluhr, aber sie macht keine Musik, sie bekommt also keine Energie.

b) Hält man die Anordnung an der Spieluhr fest, so dreht sich der ganze Motor, die Spieluhr bekommt keine Energie.

c) Verbindet man die Gehäuse mit Hilfe der blauen Stange, so wird Energie übertragen, die rote Welle dreht sich.

d) Hält man die ganze Anordnung am überstehenden Ende der roten Welle fest, so drehen sich Motor, Spieluhr und blaue Stange um die feststehende rote Welle herum. Man sieht daran, daß keine der beiden Verbindungen ausgezeichnet ist.

Energieübertragung auf einen Dynamo. Das wichtigste Ergebnis des oben beschriebenen Versuchs, nämlich daß der Drehimpuls eine Rückleitung braucht, kann man auch mit einer einfacheren Versuchsanordnung erhalten. Man lötet an die Anschlüsse eines kleinen Dynamos (= Spielzeugmotor) ein Birnchen. Die Welle des Dynamos wird nun in das Bohrfutter einer elektrischen Handbohrmaschine geklemmt. Läßt man die Bohrmaschine laufen, so dreht sich der ganze Dynamo mit, er gibt keine Energie an das Lämpchen ab. Erst wenn man das Gehäuse des Dynamos festhält leuchtet das Lämpchen.

Energieübertragung auf einen Kompressor. An eine elektrische Handbohrmaschine schließt man über eine etwa 50 cm lange Verlängerungswelle einen Kompressor an, der als Zusatzgerät zur Antriebsmaschine im Handel ist. Sind Antriebsmaschine und Kompressor nur durch die Welle verbunden, so dreht sich der Kompressor mit der Welle mit, es wird keine Energie übertragen. Als Indikator für die Energieübertragung zieht man über die Luftaustrittsöffnung des Kompressors einen Luftballon. Nur wenn Energie übertragen wird, wird der Luftballon aufgeblasen. Verbindet man die Gehäuse von Kompressor und Bohrmaschine, so bläht sich der Luftballon auf. Stellt man die Verbindung dadurch her, daß man die beiden Geräte mit den Händen festhält, so spürt man den Drehimpulsstrom in Händen und Armen.

13. Der Energieträger Licht

Unterrichtsablauf

Dem Energieträger Licht sind wir schon flüchtig begegnet. Wir wollen ihn jetzt besser kennenlernen. Energiequellen sind die Sonne und Lampen, Empfänger sind Solarzellen, Sonnenkollektoren und die Blätter der Pflanzen. Als Transportvorrichtung sind alle durchsichtigen Stoffe geeignet, auch Vakuum. Licht, das von einer Lampe ausgeht, kann man vergleichen mit Wasser, das man in alle Richtungen spritzt. Wenn man einen Wasserstrom vollständig an eine bestimmte Stelle leiten will, nimmt man ein Rohr. Wenn man Licht vollständig an eine bestimmte Stelle leiten will, nimmt man einen Lichtleiter. Man kann Wasser auch mit einer Spritze recht weit bringen, ohne daß es zerstreut wird. Ebenso kann man Licht mit einem Reflektor oder mit Linsen recht weit bringen, ohne daß es zerstreut wird.

Es gibt Licht, das man nicht sehen kann. Daß es dieses Licht wirklich gibt, sieht man daran, daß es Energie transportiert. Mit einem Infrarotstrahler kann man Gegenstände erwärmen.

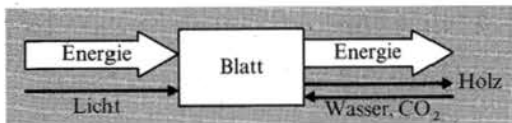


Abb. 10 Die Blätter der Bäume laden Energie um von Licht auf Holz.

Die Blätter der Pflanzen sind Energieumwandler, die Energie vom Licht umladen auf pflanzliche Substanzen, z.B. Holz. Sie brauchen dazu noch Wasser und CO₂, Abb. 10.

Die Solarzelle lädt Energie vom Licht auf die Elektrizität. Die Glühlampe ist die Umkehrung dazu. Der Sonnenkollektor lädt Energie vom Licht aufs Wasser.

Bemerkungen

Daß Licht hier als gesonderter Energieträger erscheint, liegt daran, daß in diesem Kurs die Entropie nicht auftritt. Hätte man die Entropie als Energieträger eingeführt, so wäre das Licht nur eine von mehreren Möglichkeiten des Entropietransports. Licht ist insofern schwieriger als die bisher behandelten Energieträger, als Licht erzeugt und vernichtet werden kann. Die Vernichtung ist allerdings auch nur in unserer Darstellung möglich: Die Entropie des Lichts kann natürlich nicht vernichtet werden. Aber sie kann zum Beispiel mit einem Wasserstrom abtransportiert werden, wie es im Sonnenkollektor geschieht. Sie läuft mit der Energie durch den Wandler hindurch. Licht ist also ein Einwegflaschen-Energieträger, der in unserer Darstellung im Empfänger restlos verschwindet, im Gegensatz zu anderen Einwegflaschen-Energieträgern, die sich in irgendwelche Abfallstoffe oder Abgase verwandeln.

Die Energieform Wärme tritt in diesem Kurs versteckt auf als Energie, die mit warmem Wasser transportiert wird, mit warmer Luft oder mit Licht. Es würde Verwirrung stiften, wenn wir diese drei Energietransporte unter einem einzigen Namen, nämlich „Wärme“, zusammenfaßen, abgesehen davon, daß wir Energieformen sowieso nicht beim Namen nennen wollten. Wir benutzen deshalb das Wort Wärme genauso wie wir die Wörter Hitze oder Kälte benutzen, d.h. wir denken dabei nicht an eine bestimmte physikalische Größe. Die Wörter warm und kalt dagegen beziehen sich auf Temperaturen.

Es ist nicht beabsichtigt, mit dieser Unterrichtseinheit die Optik, oder auch nur einen Teil davon, abzudecken. Die Optik, deren Hauptinteresse in der Untersuchung von Abbildungen besteht, tritt in diesem Kurs nicht auf. Die zentrale physikalische Größe der Optik ist nicht die Energie, sondern die Information. Mit der Informationsübertragung wird sich die Fortsetzung dieses Kurses befassen.

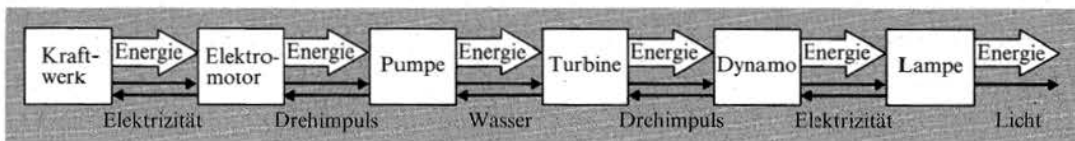


Abb. 11 Umladerkette mit den Energieträgern Elektrizität, Drehimpuls, Wasser, Drehimpuls, Elektrizität, Licht

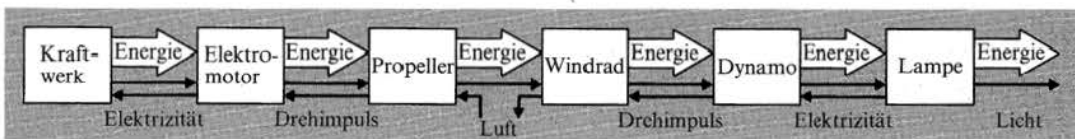


Abb. 12 Umladerkette mit den Energieträgern Elektrizität, Drehimpuls, Luft, Drehimpuls, Elektrizität, Licht

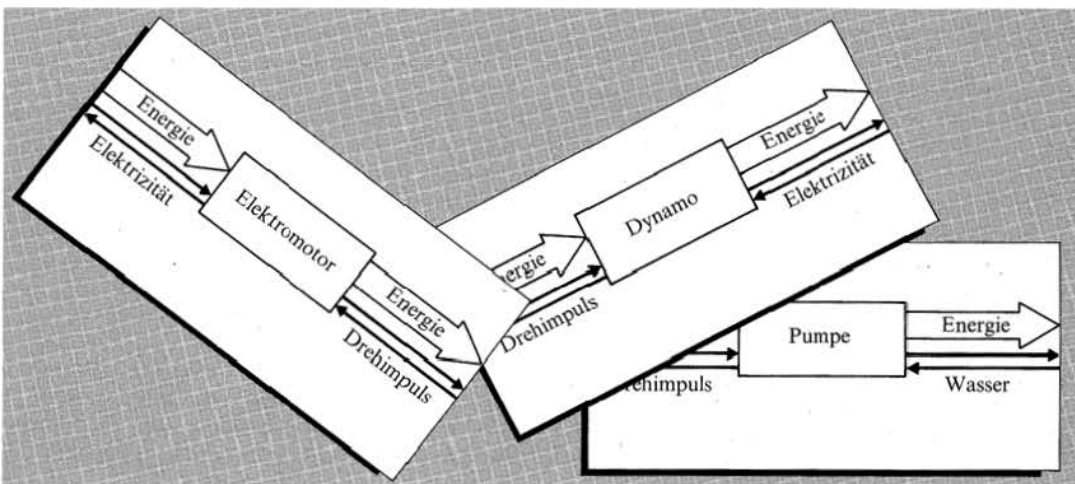


Abb. 13 Die Kästchen können zu Umladerketten zusammengelegt werden. So entsteht aus einem Elektromotor und einer Wasserpumpe eine elektrische Wasserpumpe.

Experimente

Vorführung einer Solarzelle.

Wasserkochen mit Sonnenlicht.

Vorführung eines Sonnenkollektors.

Untersuchung einer Pflanze, die man ins Dunkle gestellt hat.

Erwärmen eines Gegenstandes mit einem Infrarotstrahler.

14. Ketten von Energieumladern

Unterrichtsablauf

Die Zeit ist längst reif dafür, daß wir Energieumlader hintereinander schalten. Wir haben das in einer früheren Unterrichtseinheit schon gemacht,

aber jetzt soll ein Spiel daraus werden, möglichst viele Energieumlader hintereinander zu schalten. Wir bauen noch einmal den Wasserkreislauf auf, treiben mit der Turbine einen Dynamo an und schließen an den Dynamo eine Lampe an. Das Schema dieser Kette zeigt Abb. 11. Oder es wird eine Kette mit Gebläse (= Staubsauger) und Windrad aufgebaut, Abb. 12.

Wir zeichnen Umladerkästchen, schneiden sie aus und legen sie zu Umladerketten hintereinander, Abb. 13. Zwei Kästchen dürfen nur dann aneinander gelegt werden, wenn der Trägerstrom am Ausgang des einen derselbe ist wie der Trägerstrom am Eingang des anderen.

Wir stellen fest, daß es zu jedem Umlader eine Umkehrung gibt. Abb. 14 zeigt ein Beispiel. Manchmal können beide Funktionen sogar von ein und demselben Gerät wahrgenommen werden: Ein Fahrraddynamo kann auch als Motor laufen. Der Motor einer Legolokomotive kann

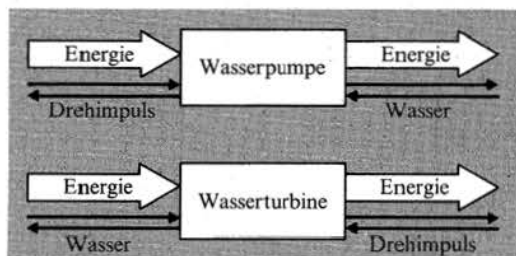


Abb. 14 Das Schema der Wasserpumpe ist die Umkehrung des Schemas der Wasserturbine.

als Dynamo benutzt werden, eine Waschmaschinenpumpe kann als Turbine laufen, ein Propeller als Windrad verwendet werden.

Wenn wir solche Umladerketten zusammensetzen, kann es vorkommen, daß anscheinend sinnlose Anordnungen zustande kommen, etwa die der Abb. 15: Erst wird vom Drehimpuls auf die Elektrizität umgeladen und dann wieder zurück. Können wir die Energie nicht gleich auf dem Drehimpuls lassen?

Wir erkennen bald, daß diese Kette durchaus nicht sinnlos ist. Sie ist vorteilhaft, wenn man Energie über lange Strecken übertragen will. Der Drehimpuls ist dazu ungeeignet. Wir laden ihn deshalb auf die Elektrizität um und beim Empfänger wieder zurück auf den Drehimpuls. Die elektrische Energieversorgung durch das Netz ist ein Beispiel für diese Anordnung. Aber auch in jedem Auto wird diese Umladerkette angewendet, um Energie vom Automotor zum Scheibenwischer und zu anderen Elektromotoren im Auto zu transportieren. Ein analoges Verfahren wird beim Bagger verwendet. Die Energie wird vom Drehimpuls auf das Hydrauliköl geladen, zum Empfänger, etwa den Rädern oder Ketten des Baggers, transportiert und dort mit einem Hydromotor zurück auf den Drehimpuls geladen.

Es folgen Denksportaufgaben: Es wurde vergessen, in einen Umladerkasten den Namen des Umladers hineinzuschreiben, Abb. 16. Wie heißt der Umlader? Zusammengesetzte Umlader wie etwa die elektrische Wasserpumpe oder das Wasserkraftwerk werden in ihre Bestandteile zerlegt.

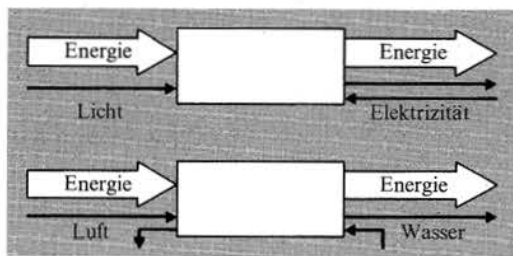


Abb. 16 Welche Energieumlader gehören zu diesen Bildern?

Bemerkungen

In dieser Unterrichtseinheit werden die Früchte langer Vorbereitungen geerntet. Fast alles bisher behandelte kommt zur Anwendung und ordnet sich in ein einfaches Schema ein. Diese Unterrichtseinheit sollte ausführlich behandelt werden, denn sie macht Spaß, und sie ist nützlich. Es gibt viele interessante Versuche, und es gibt einfache logische Spielereien, z.B. das Zusammenlegen der Umladerkästchen auf dem Schreibprojektor. Die Unterrichtseinheit bringt aber auch ein Verständnis für Strukturen wie z.B. das der Energieübertragung mit dem elektrischen Strom, das man kaum bekommt, wenn man – wie es sonst üblich ist – alle Elemente einzeln behandelt, geordnet nach „physikalischen Phänomenen“: Den Motor bei der magnetischen Wirkung des elektrischen Stroms, den Dynamo bei der Induktion, die Energieübertragung beim Ohmschen Widerstand.

Experimente

Umladerketten. Kraftwerk – Elektromotor – Pumpe – Turbine – Dynamo – Lampe; Kraftwerk – Elektromotor – Gebläse – Windrad – Dynamo – Lampe; Dampfkessel – Dampfmaschine – Dynamo – Elektromotor – Dynamo – Lampe.

Ein Fahrraddynamo kann als Motor verwendet werden. Man läßt den Dynamo am Fahrrad montiert, schließt ihn an eine Quelle mit etwa 10 V Wechselstrom an. Er treibt das Rad des Fahrrades an.

Energieübertragung mit dem elektrischen Strom. Die Turbine treibt einen Dynamo an. Vom Dynamo führt eine lange Leitung in die entgegengesetzte

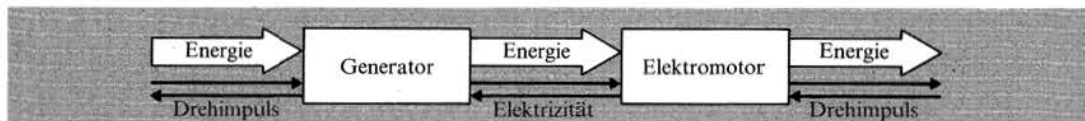


Abb. 15 Diese Anordnung aus Generator und Elektromotor verwendet man, wenn Energie über längere Strecken transportiert werden soll.

setzte Ecke des Klassenraums. Dort wird ein kleiner Motor angeschlossen. Diese Anordnung zeigt deutlich, daß es unzweckmäßig wäre, Energie über lange Strecken mit Achsen zu übertragen.

Ein Fahrraddynamo treibt einen anderen an. Das Rädchen eines Dynamos treibt direkt das Rädchen des zweiten Dynamos an. Dies scheint wieder eine sinnlose Anordnung zu sein. Aber auch für sie gibt es eine nützliche Anwendung: Als „Umformer“ (dieser Versuch gelingt nicht mit jedem Fahrraddynamo).

Ein Elektromotor läuft als Dynamo. Auf einem Lego-Schienenkreis für Netzbetrieb befinden sich zwei elektrische Lokomotiven. Das Netzgerät ist nicht angeschlossen. Schiebt man die eine Lokomotive mit der Hand, so fährt die zweite Lokomotive mit, ohne daß sie von der ersten berührt wird. Der Motor der ersten, geschobenen Lokomotive arbeitet als Generator. Dieses Spiel funktioniert auch mit manchen anderen Gleichstrom-Modellisenbahnfabrikaten.

Eine Waschmaschinenpumpe läuft als Pumpe. Man treibt sie am besten per Hand mit einer Handbohrmaschine, die eine Übersetzung hat, an.

Eine Waschmaschinenpumpe läuft als Turbine. Man schließt sie an die Wasserleitung an. Man sorgt dafür, daß das hineinströmende Wasser einen Strahl bildet. Waschmaschinenpumpen findet man auf dem Sperrmüll oder beim Schrotthändler.

15. Energiespeicher

Unterrichtsablauf

Es gibt Energiequellen, die keinen Eingang für die Energie haben. Sie werden mit der Zeit leer. Man braucht sie erstens, um Energie an einen Ort zu bringen, zu dem kein Kabel oder keine sonstige Leitung führt, z.B. in der Armbanduhr. Man braucht sie zweitens, um Energie aufzuheben, damit man sie zu einer Zeit hat, zu der sonst keine, oder nicht genug Energie zur Verfügung steht. Beispiele hierfür sind der Autoakku und der Nachtspeicherofen.

Wir diskutieren möglichst viele Energiespeicher in beliebiger Reihenfolge, z.B. Taschenlampenbatterie, Akku, Heizöltank, Gasflasche, Preßluft-

flasche, Uhrfeder, Schwungrad, Elektroboiler, Nachtspeicherofen, Pumpspeicherwerk, Leuchtfarbe.

Das Schema eines Energiespeichers, des Akkus, zeigt Abb. 17.

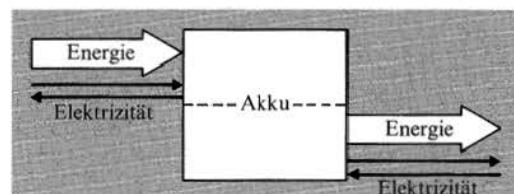


Abb. 17 Schema des Energiespeichers Akku. Der Eingang links oben dient zum Laden, der Ausgang rechts unten zum Entladen.

Bei jedem Speicher fragen wir danach, welches der Energieträger beim Laden, und welches der Energieträger beim Entladen ist. Wir stellen fest, daß es Speicher gibt, bei denen der Energieträger mitgespeichert wird, etwa das Schwungrad oder der Benzintank, und solche, bei denen der Energieträger nicht mitgespeichert wird, etwa der Akku oder der Aufziehmotor.

Außerdem stellen wir bei jedem Speicher die Frage, woran man erkennt, ob er voll oder leer ist. Wir wollen das feststellen, ohne Energie herauszunehmen, also nicht, indem wir ausprobieren, ob Energie drin ist. Beim Akku zum Beispiel sieht man es an der Säurekonzentration oder an der elektrischen Spannung, beim Benzintank am Füllstand oder am Gewicht.

Manche Speicher haben ein Leck. Sie laufen von allein leer. Ein Schwungrad zum Beispiel bleibt nach einigen Sekunden oder Minuten stehen. Wir geben zu jedem Speicher die Zeit an, in der er von allein leerläuft.

Zu möglichst vielen Speichern werden Versuche gemacht: Die Speicher werden gefüllt, geleert, es wird untersucht woran man erkennt, ob sie voll sind.

Bemerkungen

Die Begriffe Energiespeicher und Energieumlader legen keine Klasseneinteilung von Geräten im mathematischen Sinn fest. Tatsächlich kann man oft gar nicht entscheiden, ob ein Gerät Speicher oder Umlader ist. Einige der Geräte, die wir als Speicher bezeichnet haben, laden nämlich Energie von einem Energieträger auf einen anderen um, nur mit einer zeitlichen Verzögerung, etwa die Taschenlampenbatterie. Und in manchen Ge-

räten, die wir als Umlader bezeichnet haben, wird Energie gespeichert, d.h. zeitlich verzögert abgegeben, z.B. in einem Kraftwerk. Aber auch jeden Automotor könnte man als Speicher bezeichnen: Im ersten Takt nimmt er Energie auf, und im dritten Takt, also zeitlich verzögert, gibt er die Energie wieder ab. Wir machen die Einteilung in Speicher und Umlader, indem wir nach der Verwendung des Gerätes fragen. Ist die zeitliche Verzögerung der Energieabgabe beabsichtigt, so ist das Gerät ein Speicher. Auf jeden Fall messen wir dieser Einteilung keine grundsätzliche Bedeutung bei, sie ist physikalisch belanglos.

Das wichtigste praktische Ziel dieser Unterrichtseinheit besteht darin, daß Schüler eine ganze Klasse neuer Geräte kennen- und beschreiben lernen.

Das wichtigste Ziel im Hinblick auf das Verständnis der Physik ist die Feststellung, daß man den Energieinhalt eines physikalischen Systems stets an mehreren physikalischen Größen erkennt. Damit wird der erste Schritt zur Fortsetzung des in diesem Kurs verfolgten Konzepts getan. Bisher wurden nur *Energietransporte*, d.h. Prozesse betrachtet. Zu deren Behandlung braucht man nicht, um es in den Worten des Physikers auszudrücken, die Energie als Funktion der anderen Variablen des betrachteten Systems und damit die Zustände des Systems zu kennen; es genügt die Kenntnis der *Gibbschen Fundamentalform*. Später, in höheren Klassen, werden *Zustände* untersucht. Dabei wird sich die Frage stellen: Wie hängt die Energie eines Systems ab etwa von seiner Temperatur, seinem Druck oder seiner Geschwindigkeit?

Mit der Frage nach der Leckrate der Speicher ist beabsichtigt, den Schülern Mut zum Abschätzen zu machen. Wie lange läuft ein Schwungrad, 1 Sekunde, 1 Minute, 1 Stunde, 1 Tag oder 1 Jahr? Wie lange bleibt die Luft in einer Preßluftflasche, 1 Tag, 1 Jahr, 10 Jahre, 100 Jahre?

Experimente

Schwungrad. Das Schwungrad aus der Sammlung wird mit Hilfe einer elektrischen Handbohrmaschine „geladen“. Es ist zweckmäßig, dazu an die Bohrmaschine eine käufliche Gummischeibe (normalerweise als Halterung für Polierpapier) zu montieren.

Akku. An einem vollen und einem leeren Akku wird das Säureprüfgerät ausprobiert. Der leere Akku wird an ein Ladegerät angeschlossen, da-

mit die Schüler sehen, daß man auch beim Laden zwei Leitungen braucht (der Energieträger wird nicht mitgespeichert). Man kann einen Akku selbst bauen, indem man in ein Becherglas zwei kleine Bleiplatten hängt und Schwefelsäure hingießt. Dieser Akku kann während einer Unterrichtsstunde geladen und dann über ein Birnchen entladen werden.

Preßluftreservoir. Als Preßluftreservoir nehmen wir das Ersatzrad eines Autos. Es wird geladen mit einer käuflichen Autoluftpumpe (an der sich auch ein Manometer befindet). Man entlädt es, indem man eine Spielzeugdampfmaschine damit antreibt.

Aufziehaut, Schwungradauto, Gewichtsuhr, Leuchtfarbe ...

16. Irreversibilität von Energieumladern

Unterrichtsablauf

Wir betrachten eine elektrische Handbohrmaschine oder einen elektrischen Küchenmixer etwas genauer während er läuft und stellen fest, daß sich seitlich am Gerät Schlitze befinden aus denen Luft herausströmt. Sieht man durch die Schlitze in das Gerät hinein, so entdeckt man einen Ventilator. Dieses Gebläse wird zum Kühlen des Motors gebraucht. Aus den Schlitzen kommt also Energie heraus, die wir nicht benötigen. Der Elektromotor hat zwei Energieausgänge. Sein Schema zeigt Abb. 18. Den unteren Ausgang nennen wir den *Kühlausgang*. Die Energie, die hier herauskommt, ist für uns verloren. Wenn man den Energiestrom, der mit dem gewünschten Energieträger, dem Drehimpuls, herauskommt durch den hineinfließenden Energiestrom teilt, erhält man den Wirkungsgrad.

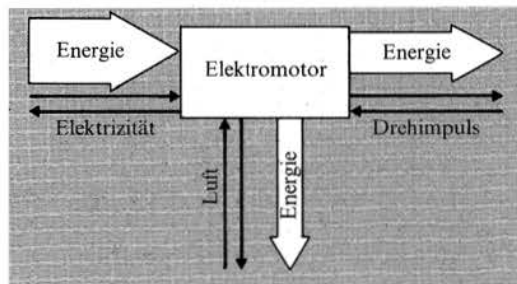


Abb. 18 Der Elektromotor hat zwei Energieausgänge. Der nach unten weisende Pfeil stellt den „Kühlausgang“ dar. Die Energie, die hier herauskommt ist unbrauchbar.

Haben andere Energieumlader auch einen Kühlausgang? Wir untersuchen Dampfmaschine, Verbrennungsmotor und Stirlingmotor und finden, daß jede Maschine einen Ausgang für unbrauchbare Energie hat. Bei jedem dieser Umlader stellen wir die Frage: Was passiert wenn wir den Kühlausgang verschließen? Wie groß ist der Wirkungsgrad?

Bei den betrachteten Umladern geht Energie verloren. Läßt sich bei der Umkehrung dieser Umlader vielleicht Energie gewinnen? Wir lassen einen Elektromotor als Dynamo laufen. Strömt jetzt Energie zum Kühlausgang *hinein*? Nein, auch der Dynamo muß gekühlt werden. Sein Schema ist in Abb. 19 dargestellt. Es ist also nicht genau die Umkehrung des Elektromotorschemas. Hätten wir nämlich *alle* Energiepfeile einfach umgekehrt, so hätten wir das Schema der Abb. 20 erhalten.

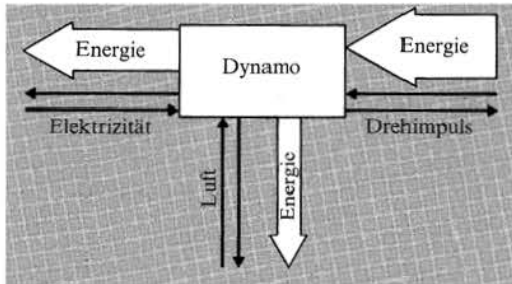


Abb. 19 Das Schema des Dynamos ist nicht die Umkehrung des Elektromotor-Schemas, denn auch der Dynamo hat einen zweiten Ausgang, nicht einen zweiten Eingang.

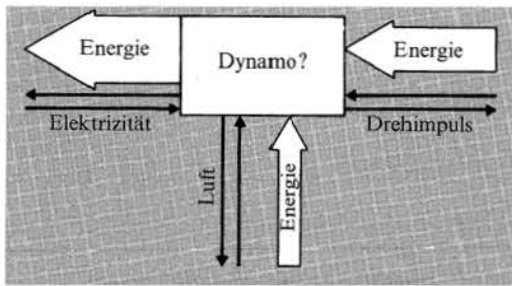


Abb. 20 So sieht die exakte Umkehrung des Elektromotor-Schemas aus. Einen Dynamo mit diesem Schema gibt es aber nicht.

Jeder Energieumlader hat also Verluste. Schalten wir viele Umlader hintereinander, so können diese Verluste sehr groß werden. Wir bauen noch einmal die Umladerkette Kraftwerk-Elektromotor-Pumpe-Turbine-Dynamo-Lampe (siehe Abschnitt 14) auf und sehen nach, wieviel Energie vorn hinein- und wieviel hinten herausströmt. Der Elektromotor braucht 600 W, das Birnchen

bekommt noch 3 W. Der Rest ist verlorengegangen. Der Wirkungsgrad der ganzen Kette beträgt also nur $3\text{ W}/600\text{ W}=0,005$. Die brauchbare Energie nimmt durch häufiges Umladen immer mehr ab.

Wir zeigen in einem Experiment, daß Wasser, wenn man es transportiert und dabei oft umlädt, auch immer weniger werden kann. Trotzdem sind wir überzeugt, daß man das fehlende Wasser, wenn man nur sorgfältig genug sucht, irgendwo anders wiederfinden könnte. Bei der Energie ist es genauso: Auch wenn am Ende der Kette nur noch ein Bruchteil der am Anfang hineingesteckten Energie ankommt, sind wir überzeugt, daß die fehlende Energie nicht aus der Welt verschwunden ist. Sie muß an irgendeiner anderen Stelle aus der Kette herausgeflossen sein.

Bemerkungen

Die beiden wichtigsten Ergebnisse dieser Unterrichtseinheit sind:

- Energiewandler sind irreversibel, Energie verschwindet durch Lecks und wird unbrauchbar;
- die Energie bleibt erhalten.

Das wichtigere Ergebnis ist das erste. Es ist die Form des zweiten Hauptsatzes, in der er für praktische Anwendungen am bedeutsamsten ist. Mit dieser Erkenntnis werden die Umladerketten, die wir früher gezeichnet haben, realistisch. Es mag ungewohnt erscheinen, daß hier die „Abwärme“ eines Elektromotors in denselben Topf geworfen wird wie die Abwärme eines Kraftwerks. Man könnte einwenden, die erste könne ja durch geeignete Konstruktion des Motors beliebig klein gemacht werden, die zweite dagegen nicht. Bei der Art, wie wir das Kraftwerk betrachten, nämlich als Umlader von Kohle auf Elektrizität, ist aber auch die Abwärme des Kraftwerks nicht naturnotwendig. In dem Kasten, der diesen Umlader darstellt, könnte sich ebenso gut ein Gerät befinden, das die Kohle nicht erst verbrennt, das also nicht dem *Carnot*-Wirkungsgrad unterliegt, sondern die Energie von der Kohle auf die Elektrizität umlädt ohne den Umweg über die Wärme zu gehen, also etwa eine Brennstoffzelle.

Das zweite Ergebnis dieser Unterrichtseinheit, nämlich daß die Energie irgendwo bleibt, auch wenn wir nicht so genau wissen wo, ist nichts wesentlich Neues, denn während des ganzen Kurses wurde die Energieerhaltung bereits als eine Selbstverständlichkeit betrachtet. Trotzdem kommt es hin und wieder vor, daß ein

Schüler die Konstruktion eines Perpetuum Mobile vorschlägt, etwa einen Motor, der über eine Achse einen Dynamo antreibt, und der seine elektrische Energie vom Dynamo selbst bekommt. Wir erklären diesem Schüler nicht, wie es häufig geschieht, seit 200 Jahren versuchen die Menschen ohne Erfolg solche Maschinen zu konstruieren usw. Diese Antwort scheint die Kinder wenig zu befriedigen. Wir erklären ihnen die Unmöglichkeit der Maschine anders: „Stell dir vor, der Dynamo hat gerade 10 J abgegeben, diese fließen nun zum Motor, der lädt sie um auf den Drehimpuls, dann fließen sie zurück zum Dynamo, der lädt sie wieder zurück auf die Elektrizität.“ Der Schüler sagt dann gewöhnlich: „Ja, das meinte ich.“ Darauf sagt der Lehrer: „Stell dir nun vor, beim Umladen geht jedesmal 1 J verloren ...“. Wichtig an dieser Erklärung ist, daß sie nicht in abstrakten Worten geführt wird, sondern daß man von einem ganz bestimmten Energiepaket spricht. Ein Schüler wird nie auf die Idee kommen, daß 1 Joule aus dem Nichts entsteht.

Daß Energie nicht nur beim Umladen auf einen anderen Energieträger, sondern auch auf dem Transportweg verlorengeht, kann kurz angesprochen werden. Die ausführliche Behandlung dieses Themas soll aber erst zu einem späteren Zeitpunkt geschehen, zusammen mit der Einführung des Begriffes Widerstand.

Experimente

Untersuchung eines Elektromotors. Elektromotoren haben einen Kühlausgang.

Untersuchung von Benzinmotoren. Kleine Benzinmotoren haben Kühlrippen, große meist einen Wasserkühler. Die Schüler sehen sich den Kühlkreislauf des Autos an einem Auto auf dem Lehrerparkplatz an. Man läßt einen kleinen Benzinmotor im Klassenzimmer laufen und stellt fest, daß die Kühlrippen warm werden.

Untersuchung des Stirling-Motors (falls in der Sammlung vorhanden). Man läßt den Motor bei niedriger Stromstärke (Rotglut der Heizung) laufen. Schaltet man nun die Wasserkühlung ab, so bleibt der Motor nach kurzer Zeit (weniger als 1 Minute) stehen.

Untersuchung einer Dampfmaschine mit Kondensator. Schaltet man die Kühlung des Kondensators ab, so bleibt die Maschine nach einiger Zeit stehen. Dabei gleichen sich die Drucke in Kessel und Kondensator an. (Leider gibt es kaum Schulen, die eine Dampfmaschine mit Kondensator in der Sammlung haben.)

Wirkungsgrad einer Energietransportkette. Energie wird über die aus Kraftwerk-Elektromotor-Pumpe-Turbine-Dynamo-Lampe bestehende Kette transportiert, und der Wirkungsgrad wird berechnet.

Wirkungsgrad einer Wassertransportkette. In einem Spiel mit Wasser lernen die Schüler, daß Wassertransport auch einen schlechten Wirkungsgrad hat, wenn man den Wasserträger oft wechselt. Es werden mehrere Mannschaften zu etwa 10 Schülern gebildet. Jede Mannschaft bekommt 500 ml Wasser. Es ist das Ziel, möglichst viel davon über einen vorgeschriebenen Weg zu transportieren. Dieser Weg besteht aus mehreren Teilen. Von der ersten zur zweiten Station wird das Wasser in der hohlen Hand transportiert, von der zweiten zur dritten Station durch einen Schlauch, der nicht dicht ist, von der dritten zur vierten mit einer Spritzflasche durch die Luft, von der vierten zur fünften durch ein Eisenrohr, unter dem Bunsenbrenner stehen, so daß ein Teil des Wassers verdampft (das Wasser muß mit einer Pipette in das Rohr gespritzt werden, sonst kühlt das Rohr zu stark ab), von der fünften zur sechsten Station mit einem Schwamm. Der Wirkungsgrad dieser Wassertransportkette ist etwa so klein wie der der Energietransportkette im vorigen Versuch. In einem Punkt scheint die Analogie nicht korrekt zu sein: Beim Wassertransport geht mehr beim Transportieren als beim Umladen verloren. Man erklärt den Schülern bei der Gelegenheit, daß Energie auch beim Transport verlorengeht.

17. Eigenschaften von Stoffen

Unterrichtsablauf

Manche Energieträger verändern sich sehr stark, wenn sie ihre Energie abladen. Aus Benzin und Heizöl werden Abgase, aus Holz und Kohle werden Asche und Rauch. Solche Energieträger nennt man Brennstoffe. Bemerkenswert ist, daß ein Umlader, der Energie von einem Brennstoff auf irgendeinen anderen Energieträger umlädt, außer dem Brennstoff noch Luft braucht. Die Luft ist genauso notwendig wie der Brennstoff. Genaugenommen ist also nicht der Brennstoff allein der Energieträger, sondern Brennstoff und Luft zusammen. Im Umlader läuft eine Stoffumwandlung ab: Aus Brennstoff und Luft werden Abgase. Diese Stoffumwandlung nennt man Verbrennung.

Wir wollen Verbrennungsvorgänge genauer untersuchen: Welche Stoffe werden gebraucht, damit eine Verbrennung stattfindet, welche entstehen dabei? Ist das Abgas eines Automotors einfach die Luft, die in den Motor hineinströmt? Hält man an den Auspuff eines laufenden Automotors eine kalte Glasplatte, so bildet sich ein flüssiger Niederschlag. Was für ein Stoff ist diese Flüssigkeit? Um diese Fragen beantworten zu können, müssen wir uns klarmachen, woran man unterschiedliche Stoffe erkennt, und wie man ähnliche Stoffe voneinander unterscheidet.

Es werden viele verschiedene Stoffe untersucht. Bei jedem wird festgestellt, in welchen Eigenschaften er sich von anderen Stoffen unterscheidet. Dabei entsteht eine Liste von Eigenschaften:

Aggregatzustand

Farbe

durchsichtig (leitet Licht) – undurchsichtig

leitet Elektrizität – leitet sie nicht

magnetisch – nicht magnetisch

hart (leitet den Drehimpuls) – weich

schwimmt in Wasser – schwimmt nicht in Wasser

guter Wärmeleiter – schlechter Wärmeleiter
Geruch

brennbar – nicht brennbar

in Wasser löslich – in Wasser nicht löslich

zusammendrückbar – nicht zusammendrückbar

plastisch – elastisch

dünnflüssig – zäh.

Mit den Eigenschaften der Liste kann man zwar sehr viele Stoffe voneinander unterscheiden, eindeutig charakterisieren kann man aber keinen Stoff damit. Zwei Stoffe können in allen bekannten Eigenschaften übereinstimmen, und trotzdem verschiedene Stoffe sein. Die Chemiker haben deshalb unzählige, zum Teil sehr eigenartige Verfahren erfunden, um unterschiedliche Stoffe zu unterscheiden, um Stoffe zu identifizieren. Ein Beispiel ist das Lackmuspapier. Mit ihm kann man entscheiden ob eine Flüssigkeit eine Säure ist oder nicht.

Die Eigenschaften eines gegebenen Stoffes sind nicht unveränderlich. Ändert man Temperatur oder Druck, so ändern sich auch manche Stoffeigenschaften. Wenn die Temperatur zunimmt, werden feste Stoffe flüssig, zum Beispiel Eis, Zucker, Blei, Glas. Der Übergang geschieht bei den meisten Stoffen bei einer bestimmten Temperatur, der Schmelztemperatur. Wenn die Temperatur zunimmt und die Siedetemperatur erreicht,

werden flüssige Stoffe gasförmig: Wasser geht bei 100°C in unsichtbaren Wasserdampf über. Flüssige Luft verdampft bei etwa -200°C. Wenn die Temperatur zunimmt,

- leitet ein Kupferdraht die Elektrizität schlechter;
- ändern Flüssigkristalle ihre Farbe;
- wird Plastik weich;
- wird Schmieröl dünnflüssiger;
- wird Salz besser löslich.

Wenn der Druck abnimmt, wird flüssiges Butan gasförmig. Das sieht man bei Wegwerffeuerzeugen.

Bei Verbrennungsvorgängen spielen Gase eine besondere Rolle. Deshalb werden die Eigenschaften einiger Gase genauer untersucht: Luft, Sauerstoff, Stickstoff, Kohlendioxid, Propan und Wasserstoff. In den meisten Eigenschaften unserer Liste stimmen diese Gase überein: Sie sind alle durchsichtig, farblos, unmagnetisch, schlechte Wärmeleiter, schlechte Elektrizitätsleiter und so weiter. Trotzdem gibt es Eigenschaften, in denen sie sich voneinander unterscheiden. Eins von ihnen unterscheidet sich im Geruch: Propan hat einen eigenartigen Geruch, die anderen sind geruchlos. Einige unterscheiden sich in der Brennbarkeit: Wasserstoff und Propan brennen, Stickstoff und Kohlendioxid nicht, diese Gase ersticken sogar eine Flamme. Sauerstoff selbst brennt nicht, aber er fördert die Verbrennung.

Wie kann man Wasserstoff und Propan voneinander unterscheiden? Einmal ist die Farbe der Flammen nicht dieselbe. Eine andere Möglichkeit besteht darin, zwei Luftballons mit je einem der Gase zu füllen. Der Wasserstoffballon steigt nach oben, der Propanballon fällt zur Erde, Wasserstoff ist leichter als Luft. Diese Methode können wir auch anwenden, um zwischen Stickstoff und Kohlendioxid zu unterscheiden: Beide Ballons sinken zur Erde, aber der Kohlendioxid-Ballon etwas schneller, Kohlendioxid ist schwerer als Stickstoff. Dieser Unterschied ist aber sehr gering, und der Test ist nicht sehr zuverlässig. Deshalb benutzen wir zur Unterscheidung zwischen Kohlendioxid und Stickstoff eine andere Methode, den Kalkwassertest. Läßt man Kohlendioxid durch Kalkwasser hindurchperlen, so wird dieses milchig trüb. Bei Stickstoff, und auch bei den anderen Gasen passiert das nicht. Mit diesem Test kann man erkennen, daß das Gas, das aus einer Sprudelflasche entweicht, Kohlendioxid ist. Aus Leitungswasser und Kohlendioxid aus einer Gasflasche stellen wir Sprudel her.

Bemerkungen

In dieser und der folgenden Unterrichtseinheit werden Themen behandelt, die üblicherweise zur Chemie gezählt werden. Es ist aber nicht das erste Mal, daß in diesem Kurs Themen der Chemie auftauchen. Die Verbrennung wurde bereits in der ersten Unterrichtseinheit angesprochen. Als Energieträger, mit dem die Energie in einen Verbrennungsmotor hineinströmt, wurde allerdings nur das Benzin genannt. Der Sauerstoff wurde noch nicht erwähnt, um die Betrachtungen der ersten Unterrichtseinheit, die ja nicht dem Aufstellen von Stoffbilanzen dienen, sondern der Einführung des Energiebegriffs und dem Aufstellen von Energiebilanzen, nicht zu kompliziert zu gestalten. Die Stoffbilanzen sollen nun in den Unterrichtseinheiten 17 und 18 aufgestellt werden. Dazu ist es zunächst nötig, Klarheit darüber zu bekommen, wodurch Stoffe charakterisiert sind. Insbesondere müssen die Schüler die Gase Luft, Sauerstoff, Stickstoff, CO_2 , Propan und Wasserstoff unterscheiden lernen, denn diese spielen bei den wichtigsten Verbrennungen eine entscheidende Rolle.

Es wäre bequemer für den Lehrer, mit Verbrennungen zu beginnen, bei denen der Brennstoff und das Oxid Feststoffe sind. Die Bilanzen lassen sich dann leichter aufstellen. Trotzdem wurde hier gleich mit der Verbrennung von Gasen (Propan und Wasserstoff) und Flüssigkeiten (Heizöl, Benzin) zu gasförmigen Oxiden begonnen, da diese in den praktischen Anwendungen die weitaus größere Rolle spielen.

Die Untersuchung von Stoffeigenschaften, die Gegenstand der Unterrichtseinheit 17 ist, kann je nach der Zeit, die dem Lehrer zur Verfügung steht, sehr kurz oder sehr ausführlich gehalten werden. So kann man bei einem Stoff entweder einfach danach fragen, ob er in Wasser schwimmt oder nicht, oder man kann bis zur Behandlung des spezifischen Gewichts gehen. Ebenso kann man die Temperatur- und Druckabhängigkeit entweder am Beispiel einer einzigen Eigenschaft zeigen, oder man kann mit Experimenten viele Eigenschaften vieler Stoffe auf ihre Temperatur- bzw. Druckabhängigkeit untersuchen.

Außer Luft werden alle Gase aus käuflichen Flaschen genommen. Auf ihre Herstellung aus anderen Stoffen, also ihre chemische Darstellung, wird nicht eingegangen, genauso wie wir die Elektrizität zunächst einfach aus der Taschenlampenbatterie genommen haben, ohne danach zu fragen, wie diese arbeitet.

Experimente

Untersuchung von Stoffeigenschaften. Es werden Eigenschaften von einigen Stoffen untersucht (z.B. Aggregatzustand, Farbe, Transparenz, elektrische Leitfähigkeit, Magnetismus, Härte, Dichte, Wärmeleitfähigkeit, Geruch, Brennbarkeit, Löslichkeit, Kompressibilität, Zähigkeit).

Untersuchung der Änderung von Stoffeigenschaften als Funktion der Temperatur, zum Beispiel des Widerstands eines Kupferdrahtes, der Zähigkeit von Schmieröl, der Löslichkeit von Salz in Wasser.

Schmelzen und Verdampfen. Schmelzen, verdampfen und kondensieren von Wasser, schmelzen und verdampfen von Kerzenwachs, schmelzen von Lötzinn; vorführen von flüssiger Luft, verdampfen der Luft.

Genauere Untersuchung der Eigenschaften von Gasen. Die Gase Luft, Sauerstoff, Stickstoff, CO_2 , Propan und Wasserdampf werden genauer untersucht.

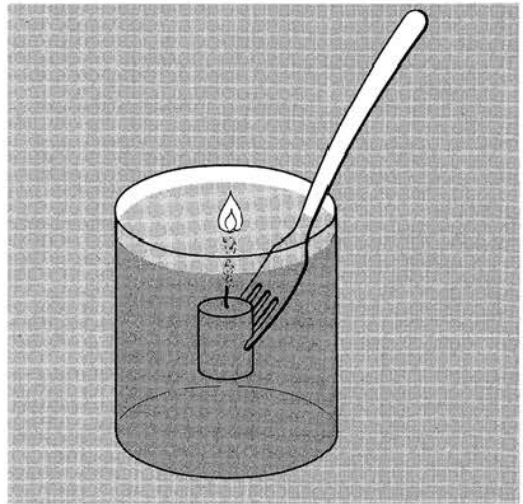


Abb.21 Die Flamme einer Kerze wird in einem mit CO_2 gefüllten Glas erstickt. Die Wachsämpfe brennen an der CO_2 -Oberfläche noch einen Augenblick weiter.

a) *Brennbarkeit:* Aus der Gasflasche fließt ein schwacher Gasstrom durch ein Glasröhrchen ins Freie. Es wird versucht das Gas mit einem Streichholz anzuzünden. Wasserstoff und Propan brennen, Stickstoff und CO_2 nicht, im Sauerstoffstrom flammt das Streichholz auf (Vorsicht!). Man füllt CO_2 aus der Gasflasche in ein Becherglas und senkt eine kurze brennende Kerze, die man mit einem Draht oder mit einer Gabel hält, in das Becherglas ab, Abb. 21. Die Flamme folgt

der Kerze nicht mit in das Becherglas, sondern bleibt in Höhe des oberen Randes des Becherglases stehen, und geht kurz danach aus. CO_2 erstickt also eine Flamme.

b) *Gewicht*: Das Experiment mit der Kerze im Becherglas zeigt bereits, daß CO_2 schwerer ist als Luft. Die Gase werden in Luftballons abgefüllt. Der mit Wasserstoff gefüllte steigt hoch, Wasserstoff ist also leichter als Luft. Die Ballons mit Propan und CO_2 fallen schneller zur Erde als der mit Luft gefüllte. CO_2 und Propan sind schwerer als Luft.

c) *Geruch*: Propan hat einen charakteristischen Geruch, die anderen Gase sind geruchlos.

d) *Trübung von Kalkwasser*: Man läßt die Gase durch Kalkwasser hindurchperlen. Bei CO_2 wird das Wasser milchig trüb.

e) *Löslichkeit in Wasser*: Eine Sprudelflasche wird mit Leitungswasser halb gefüllt. Dann wird CO_2 hineingeleitet. Verschließt man nun die Flasche mit dem Daumen und schüttelt, so entsteht ein Unterdruck. Im Wasser hat sich CO_2 gelöst. Man läßt nun CO_2 unter leichtem Überdruck durch das Wasser hindurchperlen. Es entsteht Sprudel. Das Wasser hat einen säuerlichen Geschmack. Schüttelt man die Flasche jetzt, so entsteht ein Überdruck, aus dem Wasser entweicht CO_2 .

18. Der Energieträger Brennstoff

Unterrichtsablauf

Die Brennbarkeit von Stoffen wird genauer untersucht. Etwas Benzin, das man in eine Metallschale gießt, brennt sofort, wenn man ein brennendes Streichholz in die Schale legt. Heizöl dagegen oder Kerzenwachs lassen sich so nicht anzünden. Ein brennendes Streichholz wird gelöscht, wenn man es in Heizöl taucht. Man gießt Heizöl in die Metallschale und erhitzt es mit einem Bunsenbrenner, so daß es zu verdampfen beginnt. Der Heizöldampf brennt sofort, wenn man ein Streichholz hineinhält. Genauso kann man auch Kerzenwachs anzünden. Was brennt, ist in allen drei Fällen – beim Benzin, beim Heizöl und beim Wachs – der verdampfte Stoff. Die Funktionsweise einer Kerze wird diskutiert.

Damit eine Verbrennung stattfinden kann, braucht man

1. Brennstoff,
2. Luft.

Öfen brauchen Brennstoff, nämlich Holz, Kohle, Heizöl oder Gas, und Luft.

Der Brennstoff einer Kerze ist das Wachs. Auch die Kerze braucht Luft. Stellt man eine Kerze in einen geschlossenen Behälter, so geht sie nach einiger Zeit aus, die Luft ist verbraucht.

Ein Benzinmotor braucht Benzin und Luft. Das Benzin wird im Motor verbrannt, es ist der Brennstoff. Leitet man statt Luft CO_2 oder Stickstoff in den Vergaser, so geht der Motor aus.

Mensch und Tiere brauchen Nahrungsmittel und Luft. Die Nahrungsmittel sind der „Brennstoff“. Allerdings läuft die Verbrennung im Körper ohne Flamme ab.

Wir hatten gesehen, daß Sauerstoff die Verbrennung fördert. Eine Verbrennung läuft mit Sauerstoff schneller ab als mit Luft. Luft scheint ein Gemisch aus Sauerstoff und einem nicht brennbaren Gas zu sein. Das nicht brennbare Gas kann kein CO_2 sein, sonst müßte Luft, die man in Kalkwasser leitet, einen Niederschlag hervorrufen. Das nicht brennbare Gas ist Stickstoff. Luft besteht zu 20% aus Sauerstoff und zu 80% aus Stickstoff. Wir stellen Luft künstlich her durch Mischen von Sauerstoff und Stickstoff aus Gasflaschen. Mit diesem Gemisch wird ein Verbrennungsmotor, eine Kerze oder eine Maus versorgt. Das Wesentliche für die Verbrennung ist der Sauerstoff der Luft.

Raketen fliegen in Höhen, in denen es keine Luft mehr gibt. Sie müssen deshalb sowohl den Brennstoff (etwa Wasserstoff) als auch den Sauerstoff mitnehmen.

Bei der Verbrennung entstehen neue Stoffe. An einem kalten Gegenstand, den man an den Auspuff eines laufenden Automotors oder über eine Propangas- oder Wasserstoffflamme hält, bildet sich ein Wasserniederschlag.

Wasser ist ein Verbrennungsprodukt.

Leitet man die Abgase eines Automotors, oder die „Luft“, die ein Mensch ausatmet, durch Kalkwasser hindurch, so tritt der für CO_2 charakteristische weiße Niederschlag auf.

CO_2 ist ein Verbrennungsprodukt.

Wir können nun das Schema für den Energieum-lader Flamme zeichnen, Abb. 22. Zu diesem gibt es eine Umkehrung: Die Blätter der Pflanzen, Abb. 10. Die Pflanzen bekommen die Energie, die sie zu ihrem Aufbau brauchen, von der Sonne. Beim Wachsen entsteht Sauerstoff, CO_2 und Wasser werden verbraucht. Mensch und Tiere dagegen verbrauchen Sauerstoff und erzeugen CO_2 und Wasser. Die Energie, die Mensch und Tiere verbrauchen, kommt, eventuell über Zwischenschritte, von den Pflanzen und damit auch von der Sonne.

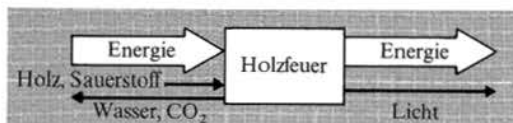


Abb. 22 Die Flamme eines Holzfeuers läßt Energie von Holz auf Licht um. Sie ist die Umkehrung zu den Blättern der Bäume, Abb. 10.

Bemerkungen

Die Verbrennung und ihre Umkehrung wird qualitativ behandelt, d.h. es werden nur Ausgangs- und Endstoffe angegeben. Daß die Stoffe in bestimmten Proportionen miteinander reagieren, wird nicht betont, sondern als selbstverständlich unterstellt. Für einen Energiewandler, in dem eine Verbrennung stattfindet, steht der Strom des verbrauchten Brennstoffs in einem ganz bestimmten Verhältnis zum Strom des verbrauchten Sauerstoffs und zu den Strömen der Verbrennungsprodukte. Dies wird von den Schülern genauso erwartet wie die Tatsache, daß der Brennstoffstrom in einem ganz bestimmten Verhältnis zum Energiestrom steht („100 g Schokolade haben so und soviel Kilojoule“). Daß das Verhältnis zwischen zwei Strömen variierbar sein kann, ist der kompliziertere Fall, den die Schüler in Unterrichtseinheit 9 kennengelernt haben (ein Energieträgerstrom kann verschieden stark mit Energie beladen sein).

Die wichtigsten Ergebnisse dieser Unterrichtseinheit sind:

- Das Verbrennen einer Kerze, das Verbrennen von Benzin im Automotor und die Atmung von Mensch und Tier sind Vorgänge desselben Typs.

- In den Blättern der Pflanzen findet der umgekehrte Vorgang statt.
- Die Energie, die Pflanzen und Tiere verbrauchen, kommt von der Sonne.

Experimente

Eine Kerze braucht Luft zur Verbrennung. Man stellt eine brennende Kerze in ein Becherglas und deckt das Glas zu. Die Kerze erlischt nach kurzer Zeit. Die Luft ist verbraucht.

Zu dem folgenden Versuch wird ein kleiner Benzinmotor gebraucht. Geeignet ist ein Mofamotor. So ein Motor hat den Vorteil, billig zu sein. Allerdings muß er noch auf ein Gestell montiert und mit einer Anwerfvorrichtung versehen werden. Steht dafür keine Werkstatt zur Verfügung, so kann man auch ein ganzes Mofa, einen Benzinrasenmäher oder eine Benzinwasserpumpe (die man in jedem Versandhaus bestellen kann) mit in den Klassenraum nehmen. Die Auspuffgase sollten, solange nicht gerade sie untersucht werden, durch einen Schlauch zum Fenster hinausgeleitet werden.

Ein Benzinmotor braucht Luft zur Verbrennung. Der Motor wird statt mit Luft mit CO_2 oder Stickstoff versorgt: Er geht aus.

Luft wird künstlich hergestellt. Mit Plastiktüten werden 4 Teile Stickstoff und 1 Teil Sauerstoff abgemessen und in eine andere Plastiktüte umgefüllt. Mit dieser künstlichen Luft wird der Benzinmotor versorgt. Er läuft normal. In einen Behälter, der mit dieser Luft gefüllt ist, wird eine Kerze gestellt. Sie brennt auch normal, d.h. sie geht nicht sofort aus, wie in CO_2 , und sie flammt nicht auf, wie in Sauerstoff.

Wasser ist ein Verbrennungsprodukt. Über eine Propangasflamme und an einen Autoauspuff wird eine kalte Glas- oder Metallplatte gehalten. In beiden Fällen schlägt sich auf der Platte Wasser nieder. Der Versuch gelingt noch besser, wenn man statt der Glasplatte einen mit Eiswasser gefüllten Behälter nimmt.

CO_2 ist ein Verbrennungsprodukt. Die Abgase des Benzinmotors und die ausgeatmete Luft eines Menschen werden durch Kalkwasser geleitet. In beiden Fällen wird das Wasser trüb, Abgase und Atemluft enthalten CO_2 .

Die Strukturgleichheit verschiedener physikalischer Gebiete gezeigt am Beispiel Hydraulik-Elektrizitätslehre

1. Einleitung

Den mengenartigen Größen beim Aufbau der Physik eine fundamentale Rolle zuzuschreiben, rechtfertigt sich aus zwei Gründen: *Einfachheit* und physikalische *Tragfähigkeit* dieser Größen als fundamentale Begriffe. Die Einfachheit wurde in dem im dritten Aufsatz vorgestellten Physikkurs für Anfänger deutlich. Das Ziel der letzten Aufsätze dieses Heftes ist es vor allem, die Tragfähigkeit zu demonstrieren. Die die Rolle von Energieträgern spielenden mengenartigen Größen behalten nicht nur für Fortgeschrittene ihre Bedeutung, sondern sind auch in weiterführenden Physikkursen von didaktischem Vorteil.

Die nächsten vier Aufsätze beschränken sich darauf zu zeigen, daß und wie sich einige Gebiete der Physik in den dynamischen Aufbau einfügen, nämlich die Hydraulik, die Mechanik rotierender starrer Körper, die Wärmelehre und die *Newtonschen* Axiome mit ihren Folgerungen. Von besonderem didaktischen Gewicht ist dabei, daß die dynamische Beschreibung von Vorgängen in allen Gebieten dieselbe ist, da die Grundregeln unabhängig sind von der Art der betrachteten Vorgänge.

Die Elektrizitätslehre spielt in den Aufsätzen eine bevorzugte Rolle. Das liegt daran, daß sie traditionell das einzige Gebiet der Physik ist, in dem von Anfang an eine mengenartige Größe und ihr Strom im Vordergrund stehen. Ihre gewohnte Darstellung unterscheidet sich daher kaum von der hier vorgeschlagenen dynamischen Aufbauweise. Außerdem ist die elektrische Ladung ein Beispiel dafür, daß eine abstrakte Größe für den Schüler sehr schnell eine klare Anschaulichkeit gewinnen kann.

Als erstes Beispiel betrachten wir die Analogie zwischen Elektrizitätslehre und Hydraulik. Die von Energietransporten mit Hilfe inkompressibler Flüssigkeiten handelnde Hydraulik hat in den letzten Jahrzehnten erheblich an technischer Bedeutung gewonnen. Baumaschinen, landwirtschaftliche Maschinen, Lokomotiven, hydraulische Kupplungen und Getriebe machen von hydraulischen Vorgängen Gebrauch. Die Hydraulik sollte deshalb in einem modernen Physikkurs nicht fehlen. Normalerweise werden zwar Wasserströme

behandelt, aber nur, um die Begriffe elektrische Stromstärke und elektrische Spannung zu veranschaulichen. Wenn der Wasserstromkreis dabei als ein vereinfachtes Modell des elektrischen Stromkreises erscheint, wird dem Schüler meist nicht klar, ob es sich um eine ernstzunehmende Analogie zwischen elektrischem Strom und Wasserstrom handelt oder um eine Zufälligkeit. Wohl in den seltensten Fällen wird er gewahrt, daß es dabei um eine weitreichende physikalische Gemeinsamkeit aller Ströme geht.

2. Analogien zwischen physikalischen Systemen

Von einer Analogie zwischen physikalischen Systemen spricht man dann, wenn sich die physikalischen Größen eines Systems auf die eines anderen Systems so abbilden lassen, daß charakteristische Beziehungen der Größen erhalten bleiben. Der einfachste Fall einer solchen Analogie ist der zwischen Systemen, die die gleiche Anzahl unabhängiger Energieträger haben, sich aber in einer einzigen Träger-Größe unterscheiden. Das erste System habe die Größe X_1 , das zweite die davon verschiedene Größe X'_1 , während X_2, X_3, \dots in beiden Systemen dieselben Größen seien. Die beiden Systeme heißen dann analog, wenn bei der Ersetzung von X_1 durch X'_1 , jede Beziehung zwischen X_1 und den dynamischen Größen des ersten Systems in eine richtige Beziehung des zweiten Systems übergeht. Es ist klar, daß und wie dieser Typ von Analogie auf Systeme fortgesetzt werden kann, die sich in mehr als einem Energieträger unterscheiden. Darauf näher einzugehen, erübrigt sich.

3. Die Analogie zwischen elektrischer Ladung Q und Menge n

Die Analogie zwischen Elektrizitätslehre und Hydraulik beruht darauf, daß die elektrische Ladung Q auf die Menge n abgebildet wird. Im Anfängerun-

terricht haben wir die Flüssigkeit selbst als Energieträger bezeichnet, nicht eine mengenartige physikalische Größe. Das war jedoch nur ein Zugeständnis an den Anfänger. Flüssigkeiten sind wie alle Stoffe Systeme, das heißt ganze Bündel mengenartiger Größen. Strömendes Wasser stellt einen Impulsstrom, einen Massestrom, einen Mengenstrom, einen Entropiestrom dar. Jeder dieser Ströme trägt Energie nach Maßgabe seines Beladungsfaktors. Der gesamte vom Wasser getragene Energiestrom ist also die Summe der durch die einzelnen Träger getragenen Energieströme. Im allgemeinen wird es nun so sein, daß unter den Energieströmen einer oder zwei dominieren. Im Fall der Hydraulik ist der dominierende Energiestrom derjenige, der vom Mengenstrom getragen wird, also der Energiestrom μI_n .

Um zu zeigen, daß die Menge n der dominierende Energieträger für die Hydraulik ist, betrachten wir eine typische Energiequelle der Hydraulik, nämlich die Wasserpumpe. Der für den Energietransport entscheidende Energieträger ist derjenige, dessen Beladungsfaktor beim Durchgang durch die Pumpe die größte Änderung erfährt. Die Temperatur T des Wassers, der Beladungsfaktor des Entropiestroms, ändert sich beim Durchströmen der Pumpe nicht. Dasselbe gilt für die Geschwindigkeit v des Wassers, den Beladungsfaktor des Impulses. Entropie und Impuls kommen daher als Energieträger nicht in Betracht. Auch die Masse m des Wassers scheidet als Energieträger aus, da Pumpen auch horizontal betrieben werden können, so daß der Beladungsfaktor der Masse, das Gravitationspotential an Aus- und Eingang der Pumpe denselben Wert hat. Übrig bleibt der Beladungsfaktor des Mengenstroms, das chemische Potential μ des Wassers. Tatsächlich ändert sich der Wert des chemischen Potentials beim Durchgang durch die Pumpe. Das ist an der Änderung des Drucks erkennbar. Chemisches Potential und Druck hängen bei konstanter Temperatur für inkompressible Flüssigkeiten nämlich folgendermaßen zusammen

$$\Delta\mu = \frac{1}{\hat{n}} \Delta p. \quad (1)$$

Ändert sich bei einer inkompressiblen Flüssigkeit der Druck um Δp , während die Temperatur T konstant bleibt, so ändert sich das chemische Potential um $\frac{1}{\hat{n}} \Delta p$, wobei $\hat{n} = \frac{n}{V}$ die Mengendichte ist. Für den Leser, dem diese Beziehung nicht vertraut ist, sei hingewiesen auf die Artikel von W. Stöbel und F. Herrmann in Heft 2 der Reihe *Konzepte eines zeitgemäßen Physikunterrichts*.

Die Abbildung der elektrischen Ladung Q auf die Menge n hat die Abbildung des elektrischen Potentials φ auf das chemische Potential μ zur Folge, so daß für die Analogie zwischen Elektrizitätslehre und Hydraulik gilt:

$$Q \blacklozenge n, \quad \varphi \blacklozenge \mu.$$

Im Gegensatz zur elektrischen Ladung Q gilt zwar für die Menge n kein allgemeiner Erhaltungssatz, bei den in der Hydraulik betrachteten Mengenströmen ist die Menge n jedoch eine Erhaltungsgröße. In der Hydraulik gilt also eine Kontinuitätsgleichung und infolgedessen wie in der Elektrizitätslehre der 1. Kirchhoffsche Satz: Die Summe der Ströme, die in einem Knoten eines elektrischen bzw. hydraulischen Netzes zusammenfließen, hat den Wert Null.

Da sich elektrisches und chemisches Potential entsprechen, gilt auch der 2. Kirchhoffsche Satz: Die Summe der elektrischen Spannungen bzw. der Differenzen des chemischen Potentials jeder Masche eines elektrischen bzw. hydraulischen Netzes hat den Wert Null.

In der Pumpe wird also der die Pumpe durchfließende Mengenstrom I_n mit Energie beladen, gemäß $I_E = \Delta\mu I_n$. Dabei ist $\Delta\mu$ die Differenz des chemischen Potentials des Wassers zwischen Ein- und Ausgang der Pumpe. Diese Gleichung ist analog der Beziehung für den elektrischen Energiestrom $I_E = \Delta\varphi I_Q = U I_Q$. Sie gibt an, wieviel Energie auf den elektrischen Strom I_Q geladen wird, der eine elektrische Energiequelle durchfließt, oder wieviel Energie der Strom abläßt, wenn er einen Energieempfänger durchfließt. Die Differenz des elektrischen Potentials $\Delta\varphi$ ist die Differenz des Beladungsfaktors des elektrischen Stroms von Ein- und Ausgang. Für Elektrizitätslehre und Hydraulik gelten also die analogen Beziehungen

$$I_E = \Delta\varphi I_Q \blacklozenge I_E = \Delta\mu I_n. \quad (2)$$

Wie Gl. (1) zeigt, bedeuten Druckänderungen Änderungen des chemischen Potentials. Setzt man Gl. (1) in Gl. (2) ein, so läßt sich der vom Strom einer inkompressiblen Flüssigkeit getragene Energiestrom schreiben

$$I_E = \Delta p \frac{1}{\hat{n}} I_n. \quad (3)$$

Da $\frac{I_n}{\hat{n}}$ die Dimension der Größe „Volumen pro Zeit“ hat, spricht man herkömmlich vielfach gern von „Volumenstrom“. Diese Sprechweise ist jedoch mehr verwirrend als hilfreich, da es zum Volumen keinen Strom gibt (vgl. den Aufsatz von G. Falk).

4. Stromschemata

Mit den im physikalischen Anfängerunterricht eingeführten Schemata für Energieumlader und Energiespeicher wollen wir im folgenden in knapper Form einige typische analoge Systeme darstellen.

Energieumlader

Abb. 1 zeigt die Schemata der Energieumlader Dynamo und Pumpe. Beide laden Energie ab vom Drehimpuls. Ein weiteres Beispiel für analoge Energieumlader sind Elektromotor und Turbine. Beide laden Energie auf den Drehimpuls.

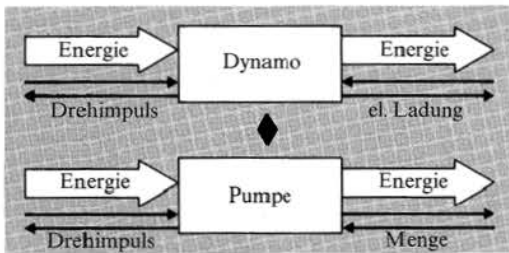


Abb. 1 Schemata der Energieumlader Dynamo und Pumpe. Beide laden Energie ab vom Drehimpuls.

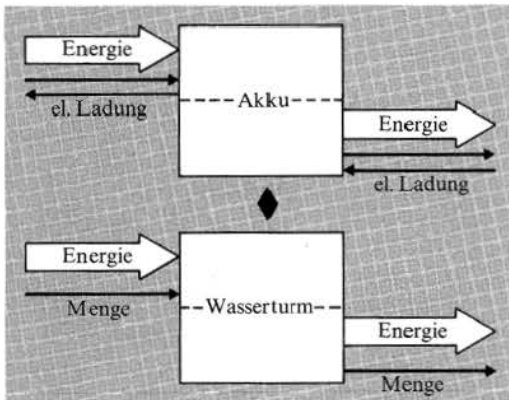


Abb. 2 Schemata der Energiespeicher Akkumulator und Wasserturm

Energiespeicher

Abb. 2 zeigt die Schemata der Energiespeicher Akkumulator und Wasserturm. Es sei darauf hingewiesen, daß nicht wie in vielen Schulbüchern dargestellt, der Akku das Analogon der Wasserpumpe ist, sondern daß auf der einen Seite die Energieumlader Dynamo und Pumpe, auf der anderen die Energiespeicher Akku und Wasserturm einander entsprechen. In Abschnitt 8 wird ein

„Wasserakku“ vorgestellt, der dem elektrischen Akku bis in viele Details ähnelt.

5. Widerstand

In der Elektrizitätslehre ist der *Widerstand* R_Q eines Systems definiert durch $R_Q = U/I_Q$. Dabei ist I_Q die Stärke des Stroms, der durch das System fließt, und $U = \Delta\varphi$ die Differenz des elektrischen Potentials zwischen Ein- und Ausgang des Systems. Entsprechend wird der Widerstand R_n in der Hydraulik definiert durch $R_n = \Delta\mu/I_n$, wobei I_n der durch das System fließende Mengenstrom und $\Delta\mu$ die Differenz des chemischen Potentials zwischen dem in das System hineinfließenden und aus dem System herausfließenden Mengenstrom ist. Es besteht also die Analogie

$$R_Q = \frac{U}{I_Q} \quad \blacklozenge \quad R_n = \frac{\Delta\mu}{I_n} \quad (4)$$

Setzt man Gl. (4) in Gl. (2) ein, so erhält man

$$I_E = R_Q I_Q^2 \quad \blacklozenge \quad I_E = R_n I_n^2 \quad (5)$$

Ist der Widerstand eines Systems unabhängig von der Stromstärke, also $U \propto I_Q$ bzw. $\Delta\mu \propto I_n$, so spricht man von einem *Ohmschen* Widerstand. Beispiele für Systeme mit *Ohmschem* Widerstand sind in der Elektrizitätslehre Metalldrähte, in der Hydraulik Rohre, in denen die Flüssigkeit laminar strömt. Für sie gilt das *Hagen-Poiseuillesche* Gesetz:

$$\Delta\mu = \frac{8\pi\eta}{\hat{n}^2} \frac{l}{A^2} I_n = \varrho \frac{l}{A^2} \quad (6)$$

Dabei sind η die Zähigkeit, \hat{n} die Mengendichte der Flüssigkeit, l die Länge und A der Querschnitt des Rohres.

Für den Widerstand von Metalldrähten bzw. Rohren gilt

$$R_Q = \varrho_Q \frac{l}{A} \quad \blacklozenge \quad R_n = \varrho_n \frac{l}{A^2} \quad (7)$$

Diese Ausdrücke haben eine ähnliche Gestalt. Beide Widerstände sind proportional der Länge l . Die verschiedene Abhängigkeit von der Querschnittsfläche A kann folgendermaßen verstanden werden: Der entropieerzeugende Effekt beim Fließen des elektrischen Stromes durch den Metalldraht ist über den ganzen Querschnitt des Drahtes gleichmäßig verteilt. Die Wasserströmung hingegen erfährt Reibung hauptsächlich in der Umgebung der Rohrwandung. Würde das Wasserrohr mit Sand gefüllt, so würde der Reibungseffekt gleichmäßig auf die ganze Querschnittsfläche des

Rohres verteilt, der Widerstand des Rohres wäre dann, wie im elektrischen Fall, umgekehrt proportional der Querschnittsfläche A .

Die spezifischen Widerstände ϱ_Q und ϱ_n ändern sich mit der Temperatur. Der spezifische Widerstand ϱ_Q wächst mit steigender Temperatur, der spezifische Widerstand ϱ_n nimmt dagegen ab, da die Zähigkeit der meisten Flüssigkeiten bei steigender Temperatur sinkt.

Der Widerstand der meisten Systeme ist nicht unabhängig von der Stromstärke. Für solche Systeme kann der Zusammenhang zwischen Differenz des Beladungsfaktors und Stromstärke nicht durch eine einzige Zahl beschrieben werden. Er wird üblicherweise durch $U-I_Q$ bzw. $\Delta\mu-I_n$ -Kennlinien dargestellt. Abb. 3 zeigt stellvertretend je ein Beispiel einer solchen Kennlinie.

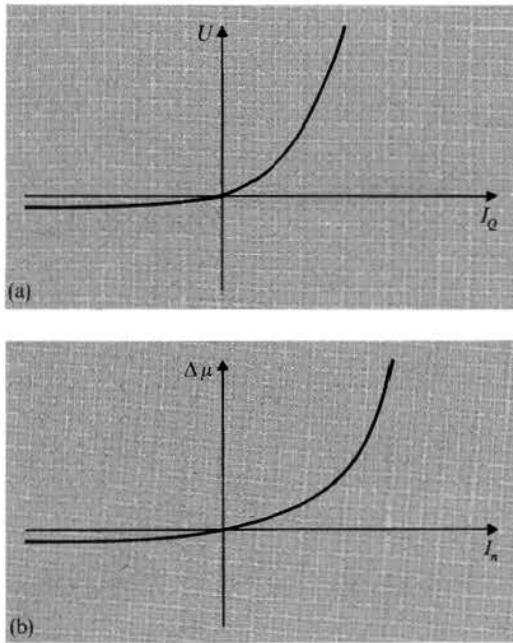


Abb. 3 Kennlinie einer Diode (a) und eines hydraulischen Sperrventils (b)

6. Induktion

Das Phänomen der Induktion eines Stromkreises gibt es sowohl in der Elektrizitätslehre als auch in der Hydraulik: Wasserstrom und elektrischer Strom besitzen eine gewisse Trägheit gegenüber Änderungen ihrer Stromstärke. Die sich als Trägheit äußernde elektrische Induktion beruht nicht auf der mechanischen Trägheit der Ladungsträger,

sondern auf dem mit dem elektrischen Strom verknüpften Magnetfeld, in dem Energie gespeichert ist. Wird die Stärke des elektrischen Stroms vergrößert, muß sein Magnetfeld und damit dessen Energie vergrößert werden. Diese Energie liefert der elektrische Strom. Während er zunimmt, spürt er deshalb einen zusätzlichen Widerstand. Umgekehrt spürt der Strom beim Verringern der Stromstärke einen zusätzlichen Antrieb.

Analoges gilt für Stoffströme: Ein Flüssigkeitsstrom besteht aus einem Mengenstrom und einem Impulsstrom, der gleich (Impuls pro Menge) \times Mengenstrom ist. Wird die Stärke des Mengenstroms, der durch ein Rohr fließt, dadurch vergrößert, daß die Geschwindigkeit der Flüssigkeit vergrößert wird, so ändert sich die kinetische Energie der Flüssigkeit. Der Mengenstrom spürt deshalb beim Vergrößern seiner Stromstärke einen zusätzlichen Widerstand. Umgekehrt muß beim Verkleinern der Stärke des Mengenstroms die in der Flüssigkeit gespeicherte Energie verkleinert werden, der Mengenstrom spürt deshalb einen zusätzlichen Antrieb. Die magnetische Energie einer elektrischen Leitung ist also analog der kinetischen Energie der Flüssigkeit in einer hydraulischen Leitung.

Formelmäßig läßt sich die Trägheit beider Ströme durch folgende Gleichungen ausdrücken:

$$U = -L_Q^* \dot{I}_Q \quad \blacklozenge \quad \Delta\mu = -L_n^* \dot{I}_n. \quad (8)$$

Wird an einer elektrischen Leitung die elektrische Spannung U bzw. an einer hydraulischen Leitung die chemische Potentialdifferenz $\Delta\mu$ angelegt, so wächst der durch die Leitung fließende Strom um so schneller an, je kleiner die Induktivität L^* der Leitung ist. Der in (8) behauptete Zusammenhang zwischen $\Delta\mu$ und \dot{I}_n läßt sich, wie wir hier nicht ausführen wollen, aus der Eulerschen Gleichung für inkompressible Flüssigkeiten herleiten.

Beim Unterbrechen des Stromkreises verhalten sich elektrischer Strom und Wasserstrom analog. Wird der Stromkreis unterbrochen, so treibt die im elektromagnetischen Feld, bzw. die in der Flüssigkeit gespeicherte Energie den Strom an. An der Unterbrechungsstelle können dadurch so hohe Werte der elektrischen Spannung bzw. des chemischen Potentials und damit des Drucks entstehen, daß Funken überspringen bzw. die Rohre platzen. Um beim Abschalten großer Ströme zu große Werte der elektrischen Spannung bzw. zu große Werte des Drucks zu vermeiden, werden in beiden Fällen den Schaltern Kondensatoren parallel geschaltet. Abb. 4 zeigt ein Beispiel aus der Hydraulik.

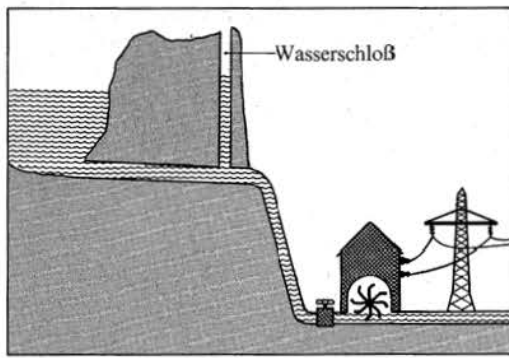


Abb. 4 Um beim Abschalten eines Wasserkraftwerks mit langer Zuleitung zu große Druckstöße zu vermeiden, wird vor der Fallstrecke ein hydraulischer Kondensator, das sogenannte Wasserschloß eingebaut. Das ist das hydraulische Analogon der Entstörung elektrischer Unterbrecherkontakte mit Hilfe von Kondensatoren.

7. Kondensator und Spule

Kondensator und Spule bilden innerhalb der Elektrizitätslehre analoge Systeme. Das sieht man am einfachsten ein, wenn man Spannung und Strom aufeinander abbildet. Die in einem Kondensator und in einer Spule gespeicherte Energie hängt nämlich mit der elektrischen Spannung U bzw. der elektrischen Stromstärke I_Q zusammen gemäß

$$E_{\text{Speicher}} = \frac{1}{2} C_Q U^2 \quad \blacklozenge \quad E_{\text{Speicher}} = \frac{1}{2} L_Q^* I_Q^2. \quad (9)$$

Dabei sind C_Q die Kapazität und U die Spannung des Kondensators, L_Q^* die Induktivität und I_Q die Stärke des elektrischen Stroms durch die Spule. Die Gln. (9) gelten nur für Systeme, deren Kapazität C_Q nicht von der Spannung U bzw. deren Induktivität L_Q^* nicht von der Stromstärke I_Q abhängen. Vertauscht man Spannung U und elektrische Stromstärke I_Q sowie Kapazität und Induktivität, wird aus dem Kondensator eine Spule, aus der Spule ein Kondensator. Ein aus Kondensator und Spule bestehender Schwingkreis geht bei der Analogie somit in sich über.

Da Kondensator und Spule Analoga in der Hydraulik haben, besteht die Korrespondenz (9) auch zwischen den hydraulischen Analoga von Kondensator und Spule:

$$E_{\text{Speicher}} = \frac{1}{2} C_n (\Delta\mu)^2 \quad \blacklozenge \quad E_{\text{Speicher}} = \frac{1}{2} L_n^* I_n^2. \quad (10)$$

Dabei bedeuten C_n die Kapazität eines hydraulischen Kondensators, $\Delta\mu$ die chemische Potentialdifferenz zwischen seinen „Platten“. Entsprechend ist L_n^* die Induktivität einer „hydraulischen Spule“

und I_n der Mengenstrom, der sie durchfließt. Die Gln. (10) gelten wie (9) für alle Systeme, deren Kapazität C_n nicht von der chemischen Potentialdifferenz und deren Induktivität L_n^* nicht von der Stärke des Mengenstroms I_n abhängen.

Ein vertrautes Beispiel eines hydraulischen Kondensators ist das Pumpspeicherwerk. Seine beiden „Platten“ werden vom oberen und unteren Wasserreservoir gebildet.

Eine „hydraulische Spule“ ist jeder Wasserschlauch. Seine Induktivität L_n^* erhält man gemäß Gl. (10) aus der kinetischen Energie der Flüssigkeit, die sich im Schlauch befindet:

$$L_n^* = \frac{\hat{m} l}{\hat{n}^2 A_0}. \quad (11)$$

Dabei sind \hat{m} , \hat{n} Massendichte und Mengendichte der Flüssigkeit, l die Länge und A_0 die Querschnittsfläche des Schlauchs. Wie Gl. (11) zeigt, hängt die Induktivität eines hydraulischen Leiters, im Gegensatz zur Induktivität eines elektrischen Leiters, nicht davon ab, ob der Leiter räumlich gestreckt oder zu einer Spule gewickelt ist. Der Grund hierfür ist, daß die Energie beim elektrischen Leiter im magnetischen Feld gespeichert ist, beim hydraulischen Leiter dagegen in der Flüssigkeit.

Hydraulischer Kondensator und hydraulische Spule können, wie im elektrischen Fall, einen Schwingkreis bilden. Ein Beispiel ist ein mit Wasser gefülltes U -Rohr: Die beiden wassergefüllten Schenkel stellen einen hydraulischen Kondensator dar, gleichzeitig aber auch eine hydraulische Spule, da das waasergefüllte Rohr, wie jeder hydraulische Leiter, eine Induktivität hat.

Für das Parallel- und Hintereinanderschalten von Kondensatoren gelten in der Elektrizitätslehre wie in der Hydraulik dieselben Regeln:

Hintereinanderschalten:

$$\frac{1}{C_{\text{gesamt}}} = \sum_i \frac{1}{C_i}, \quad L_{\text{gesamt}}^* = \sum_i L_i^*. \quad (12)$$

Parallelschalten:

$$C_{\text{gesamt}} = \sum_i C_i, \quad \frac{1}{L_{\text{gesamt}}^*} = \sum_i \frac{1}{L_i^*}. \quad (13)$$

Die Kondensatoren der Elektrizitätslehre wie der Hydraulik haben einen unendlich großen Widerstand für Gleichstrom. Ihr Wechselstromwiderstand dagegen beträgt für einen Wechselstrom der Frequenz ω :

$$R_Q = \frac{1}{\omega C_Q} \quad \blacklozenge \quad R_n = \frac{1}{\omega C_n}. \quad (14)$$

Auch die Wechselstromwiderstände für elektrische und hydraulische Spulen sind analog:

$$R_Q = \omega L_Q^* \quad \blacklozenge \quad R_n = \omega L_n^* \quad (15)$$

Elektrische und hydraulische Kondensatoren wie Spulen verhalten sich analog, wenn sie über einen Ohmschen Widerstand entladen werden. Spannung wie Stromstärke nehmen dabei exponentiell ab. Die charakteristischen Abklingzeiten betragen:

Für Kondensatoren

$$\tau = R_Q C_Q \quad \blacklozenge \quad \tau = R_n C_n, \quad (16)$$

für Spulen

$$\tau = \frac{L_Q}{R_Q} \quad \blacklozenge \quad \tau = \frac{L_n}{R_n}. \quad (17)$$

Hydraulische Leitungen haben wie elektrische Leitungen eine gewisse Kapazität und Induktivität. Die Kapazität einer hydraulischen Leitung wird bestimmt durch die Elastizität des Rohres und der Kompressibilität der Flüssigkeit, ihre Induktivität durch die molare Masse der Flüssigkeit, dem Querschnitt und der Länge des Rohres.

8. Akkumulator

Für viele Anwendungen ist es wünschenswert, Energiespeicher zu haben, deren Beladungsfaktoren unabhängig sind von der im Speicher enthaltenen Energie.

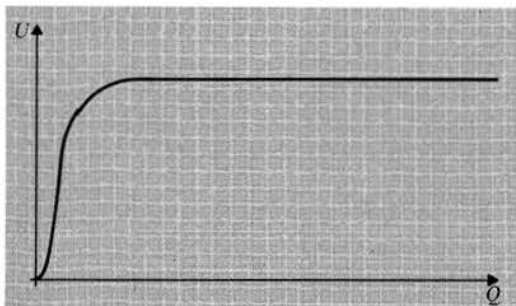


Abb. 5 Der Zusammenhang zwischen der Leerlaufspannung U und der elektrischen Ladungsmenge Q , von der Energie in einem Akkumulator abgeladen wurde

Wie Abb. 5 zeigt, ist der Akkumulator ein Energiespeicher, dessen Leerlaufspannung weitgehend unabhängig ist von der in ihm gespeicherten Energie. Die Konstanz der Leerlaufspannung beruht auf einem chemischen Gleichgewicht im Akku. Zumindest in Gedanken läßt sich ein „Wasserakku“ konstruieren, dessen chemisches Potential ebenfalls

durch ein chemisches Gleichgewicht konstant gehalten wird. Abb. 6 zeigt den schematischen Aufbau eines solchen Akkus.

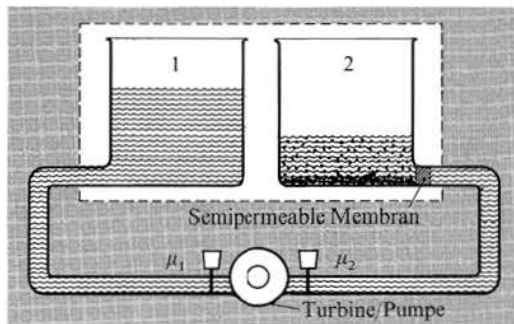


Abb. 6 „Wasserakku“: Es besteht eine chemische Potentialdifferenz des Wassers zwischen dem Gefäß, in dem sich reines Wasser befindet, und dem Gefäß, in dem Zucker im Wasser gelöst ist. Mit dieser chemischen Potentialdifferenz läßt sich eine Turbine betreiben.

Der Wasserakku ähnelt einer *Pfefferschen* Osmosezelle. In Gefäß 1 befindet sich reines Wasser, in 2 eine gesättigte Zuckerlösung mit festem Zucker als Bodenkörper. Gefäß 2 wird durch eine semipermeable Membran von Gefäß 1 getrennt, die nur Wasser, nicht aber Zucker passieren läßt. Das chemische Potential des reinen Wassers ist größer als das des Wassers, in dem Zucker gelöst ist. Infolgedessen besteht zwischen den Gefäßen 1 und 2 ein Unterschied des chemischen Potentials des Wassers. Diese Differenz der chemischen Potentiale führt zu einem Wasserstrom von 1 nach 2, wenn die beiden Gefäße durch ein Rohr verbunden werden. Um die Zuckerkonzentration in 2 auch bei zuströmendem Wasser konstant zu halten, befindet sich in 2 als Bodenkörper fester Zucker. Verringert sich nämlich die Zuckerkonzentration der Zuckerlösung, so geht so lange Zucker in Lösung, bis die Sättigungskonzentration des Zuckers wiederhergestellt ist. Das Gleichgewicht zwischen festem und gelöstem Zucker sorgt also dafür, daß die Differenz $\Delta\mu$ des chemischen Potentials des Wassers zwischen 1 und 2 konstant gehalten wird. Ist der gesamte Bodensatz gelöst, „bricht“ die Potentialdifferenz $\Delta\mu$ des Wassers zusammen, der Akku ist leer.

Mit diesem Wasserakku könnte eine Turbine betrieben werden. Ist er leer, könnte er dadurch geladen werden, daß die Turbine als Pumpe betrieben wird, die Wasser von 2 nach 1 pumpt. Dann strömt reines Wasser von 2 nach 1, während der Zucker von der Membran zurückgehalten wird. Die Zuckerkonzentration in 2 bleibt dabei konstant, es fällt Zucker in fester Form aus. Dieser Wasserakku ist nur ein Gedankenmodell, denn die

in ihm eine wichtige Rolle spielenden Diffusionsvorgänge laufen für reale Experimente viel zu langsam ab.

9. Transformatoren

Für elektrischen Strom und Wasserstrom gibt es Systeme, die Beladungsfaktor und Energieträgerstromstärke so ändern, daß ihr Produkt konstant, der Energiestrom also unverändert bleibt. In der Elektrizitätslehre heißen solche Systeme Transformatoren oder Umformer, in der Hydraulik Getriebe. Abb. 7 zeigt verschiedene Transformatoren der Elektrizitätslehre, Abb. 8 solche der Hydraulik.

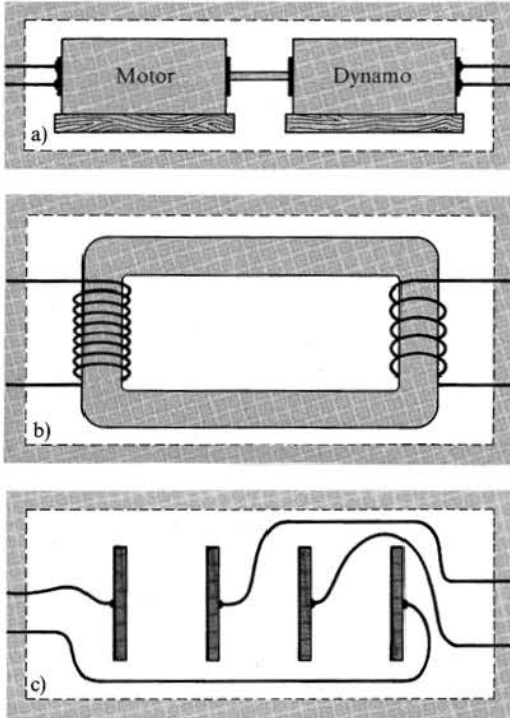


Abb. 7 Elektrische Transformatoren: (a) zeigt einen Transformator für Gleichstrom, einen sogenannten Umformer, der aus einem Motor und einem Dynamo besteht. (b) zeigt einen magnetischen Transformator und (c) einen Transformator, der aus vier Kondensatorplatten besteht. Die Kondensatorplatten des Sekundärkreises befinden sich zwischen denen des Primärkreises.

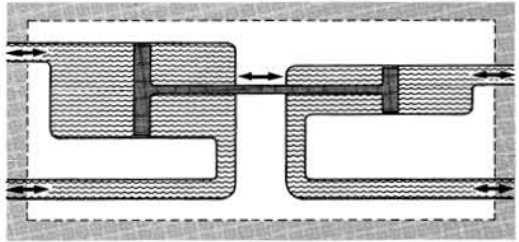
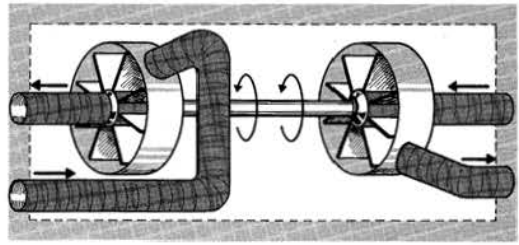


Abb. 8 Hydraulische Transformatoren. Oben: Mit Turbinen des Primärkreises wird die Kreiselpumpe des Sekundärkreises angetrieben. Unten: Zwei Kolben mit verschiedenen Querschnittsflächen in Primär- und Sekundärkreislauf sind starr miteinander verbunden.

Hier mag noch ein Beispiel zeigen, daß die Analogie zwischen Elektrizitätslehre und Hydraulik auch zum Verständnis praktischer Fragen nützlich ist.

Wir betrachten dazu das Problem, elektrische wie auch hydraulische Übertragungen von Energie im Hinblick auf Verluste zu optimieren. Um die „Strömungsverluste“ möglichst gering zu halten, liegt es gemäß Gl. (5) nahe, den Trägerstrom möglichst klein zu machen, demgemäß die Spannung bzw. die chemische Potentialdifferenz und damit den Druck möglichst hoch. Damit tritt jedoch bei zunehmender Spannung bzw. zunehmendem Druck in der „Undichtigkeit“ der Übertragungsleitung eine andere Verlustquelle in Konkurrenz mit den Strömungsverlusten. Im elektrischen Fall äußert sie sich als Sprühentladung bzw. Überschlag, in der Hydraulik dagegen wörtlich als Undichtigkeit oder Anfälligkeit der Leitung gegen Brüche. Man wird also die Spannung bzw. den Druck gerade so wählen, daß die Summe der beiden Verlustquellen möglichst klein ist.

Die Analogie zwischen Drehimpulsstrom und elektrischem Strom

1. Einleitung

Die physikalische Größe Drehimpuls L wird in der Unterrichtseinheit 12 des im 3. Aufsatz dieses Hefts vorgestellten Physikkurses als der Energieträger eingeführt, mit dem zusammen Energie durch rotierende Wellen strömt. Der Drehimpuls wird auf diese Weise elementar und anschaulich eingeführt. Der vorliegende Aufsatz soll zeigen, daß die Vorstellung vom Drehimpuls als Energieträger in einem Physikkurs für Fortgeschrittene brauchbar bleibt und daß dort Drehimpulsstrom und elektrischer Strom weitgehend mit denselben Regeln behandelt werden können. Ferner soll der Aufsatz zeigen, daß mit der Vorstellung vom Drehimpuls als Energieträger auch die im traditionellen Physikunterricht im Vordergrund stehenden Beziehungen, wie etwa der Zusammenhang zwischen Drehimpuls und Winkelgeschwindigkeit, behandelt werden können.

Im traditionellen Physikunterricht wird man den Begriff des Drehimpulsstroms vergeblich suchen. Auch von den Strömen anderer mengenartiger Größen ist keine Rede, mit Ausnahme des Stroms elektrischer Ladung. Dies liegt nicht daran, daß für die anderen mengenartigen Größen die Vorstellung eines Stroms weniger sinnvoll wäre als für die elektrische Ladung, sondern daran, daß die Mengenartigkeit der anderen Größen, insbesondere von Impuls und Drehimpuls nicht erkannt wurde. Die Mengenartigkeit einer Größe bedeutet ja, daß die Größe im Raum verteilt ist, daß es also von ihr eine Dichte gibt und daß sie strömen kann, daß es also zu ihr einen Strom gibt.

Jede mengenartige Größe eines Systems, die einem Erhaltungssatz genügt, kann ihren Wert nur dadurch ändern, daß sie zu- oder wegströmt.

2. Merkmale des Drehimpulsstroms

Akzeptiert man die Vorstellung des Drehimpulsstroms, so stellt man bald fest, daß der Drehimpulsstrom eine ebenso anschauliche Bedeutung bekommt wie der elektrische Strom. Einen ersten

Eindruck davon gibt die Unterrichtseinheit 12 im 3. Aufsatz dieses Hefts. Das folgende Beispiel zeigt, daß der Drehimpulsstrom sogar anschaulicher sein kann als der elektrische Strom.

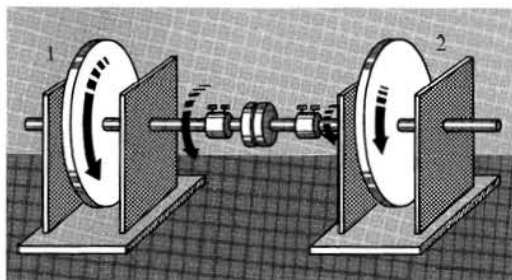


Abb. 1 Schwungrad 1 sei in Rotation versetzt, Schwungrad 2 in Ruhe. Werden die Scheiben der Rutschkupplung, die sich an den Wellen der beiden Schwungräder befinden, aneinander gepreßt, so beginnt Schwungrad 2 sich zu drehen; Schwungrad 1 wird dabei abgebremst: Es fließt Drehimpuls durch die Welle von einem Schwungrad zum anderen.

Wird das Schwungrad 1 in Abb. 1 in Rotation versetzt, so „lädt man es mit Drehimpuls“. Je mehr Drehimpuls das Schwungrad enthält, desto schneller dreht es sich. Wird das nicht-rotierende Schwungrad 2 über eine Rutschkupplung mit der Welle des Schwungrads 1 verbunden, so beginnt auch Schwungrad 2 sich zu drehen. Schwungrad 1 wird dabei abgebremst: Es fließt Drehimpuls durch die Welle vom Schwungrad 1 ins Schwungrad 2. Der Drehimpuls fließt solange, bis beide Schwungräder dieselbe Winkelgeschwindigkeit haben.

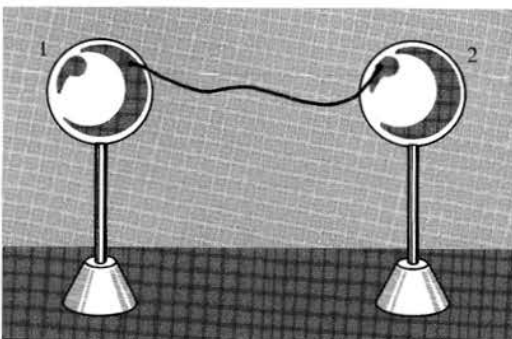


Abb. 2 Kugel 1 sei elektrisch geladen, Kugel 2 ungeladen. Werden die Kugeln durch einen Widerstandsdraht miteinander verbunden, so beginnt Kugel 2 sich zu laden; Kugel 1 wird dabei entladen: Es fließt elektrische Ladung durch den Draht von einer Kugel zur anderen.

Abb. 2 gibt den analogen elektrischen Versuch wider. Die Metallkugel 1 wird mit elektrischer Ladung geladen, die Metallkugel 2 bleibt ungeladen. Beide Kugeln werden durch einen Widerstandsdraht verbunden. Es fließt elektrische Ladung durch den Draht von der Kugel 1 zur Kugel 2 solange, bis beide Kugeln dasselbe Potential haben.

Der Versuch mit den Schwungrädern ist in einem Punkt anschaulicher als der mit den Metallkugeln: Der Vorgang des „Entladens“ von Schwungrad 1 und des „Ladens“ von Schwungrad 2 ist ohne Meßgerät zu beobachten, da die Winkelgeschwindigkeit, der Beladungsfaktor des Drehimpulses, direkt zu sehen ist. Im elektrischen Beispiel dagegen sind für den Anfänger ungewohnte Meßgeräte erforderlich.

Das folgende Experiment veranschaulicht das Strömen von Drehimpuls durch Wellen. Statt einer Welle wird dabei jedoch eine lange Spiralfeder verwendet. Eine Feder eignet sich für diesen Versuch besser, weil die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Drehimpulses in einer Feder sehr viel kleiner ist als in einer Welle. Eine kleine Menge Drehimpuls wird durch kurzes, schnelles Drehen des einen Endes der Feder in die Feder gebracht. Das Ausbreiten des Drehimpulses durch die Feder kann man beobachten, denn der Drehimpuls befindet sich immer an der Stelle der Feder, die sich mit der größten Geschwindigkeit dreht. Sind auf der Feder in verschiedenen Abständen Markierungen angebracht, so wird das Strömen des Drehimpulses besonders deutlich. Auf dieses Experiment werden wir noch zurückkommen.

Vom elektrischen Strom hat der Anfänger erfahrungsgemäß sehr bald eine Anschauung, obwohl man zu elektrischer Ladung und elektrischem Strom nur einen indirekten Zugang hat. Da der Vorgang des Be- und Entladens eines Schwungrads mit Drehimpuls, ja sogar der Zustand des Beladenseins, ohne Meßgerät zu sehen ist, ist es noch leichter, eine Anschauung vom Drehimpulsstrom zu induzieren, als eine solche vom elektrischen Strom.

3. Die Messung von Drehimpulsströmen

Im Gegensatz zur elektrischen Ladung Q ist der Drehimpuls L ein Vektor. L steht für drei voneinander unabhängige mengenartige Größen, die

drei Komponenten des Drehimpulses L_x, L_y, L_z . Zu jeder Komponente gibt es einen Strom $I_{L_x}, I_{L_y}, I_{L_z}$. Diese drei Ströme sind die Komponenten des Vektors Drehimpulsstrom $I_L = \{I_{L_x}, I_{L_y}, I_{L_z}\}$. Dieser Vektor wird normalerweise *Drehmoment* M genannt. Die bekannte Gleichung $M = dL/dt$ ist nichts weiter als die Kontinuitätsgleichung für den Drehimpuls. *Drehimpulsstrom und Drehmoment sind nur verschiedene Namen derselben physikalischen Größe.* Drehimpulsströme können also ebenso gemessen werden wie Drehmomente. Im folgenden beschränken wir uns der Einfachheit halber auf eine Komponente des Drehimpulsstroms.

In manchen Fällen gelingt es, die Stärke von Drehimpulsströmen ohne Meßgerät zu vergleichen. Will man beispielsweise wissen, welcher von zwei Motoren den größeren Drehimpulsstrom liefert, in gewohnter Ausdrucksweise, das größere Drehmoment hat, hält man die Wellen der Motoren mit der Hand fest. Derjenige Motor, dessen Welle schwerer zu halten ist, liefert den größeren Drehimpulsstrom.

Um Drehimpulsströme zu messen, bedarf es einer Größe, die sich in charakteristischer Weise mit der Stärke des Drehimpulsstroms ändert. Außerdem muß sie möglichst leicht zu beobachten sein. Der Torsionswinkel α bei der Torsion eines zylindrischen Stabes erfüllt diese Bedingungen. Gleichung (1) zeigt, wie der Torsionswinkel α mit dem Drehmoment, also dem Drehimpulsstrom zusammenhängt:

$$I_L = \frac{\pi}{2} G \frac{r^4}{l} \alpha. \quad (1)$$

Hierbei ist r der Radius und l die Länge des Torsionsstabes. Der Torsionsmodul G ist eine charakteristische Größe des Materials, aus dem der Stab besteht. Wie Gl.(1) zeigt, ist der Torsionswinkel α proportional dem Drehimpulsstrom I_L .

Die Torsion und nicht, wie man zunächst vermuten könnte, die Umdrehungsgeschwindigkeit einer Welle ist also ein Maß für die Größe des Drehimpulsstroms, der durch die Welle fließt: *Durch tordierte, aber nicht rotierende Wellen fließt Drehimpuls.* Da die Winkelgeschwindigkeit gleich Null ist, ist der Drehimpulsstrom nicht mit Energie beladen, durch die Welle fließt keine Energie. *Durch rotierende, aber nicht tordierte Wellen fließt weder Drehimpuls noch Energie,* denn wo

kein Energieträger fließt, fließt auch keine Energie. *Energie strömt also nur durch tordierte rotierende Wellen.*

In dem in Abschnitt 2 beschriebenen Experiment über die Ausbreitung von Drehimpuls durch eine Feder ist die Stärke des Drehimpulsstroms an jeder Stelle der Feder an der Torsion der Feder, genauer an der Zunahme des Torsionswinkels längs der Feder zu erkennen.

Ein Meßgerät für den Drehimpulsstrom durch Wellen, das die Proportionalität von Torsionswinkel und Drehimpulsstrom ausnützt, ist in Abb. 3 dargestellt. Es ist im Aufbau unkompliziert und läßt sich mit einfachen Mitteln herstellen.

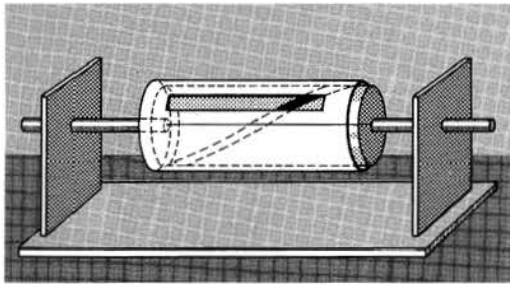


Abb. 3 Ein Meßgerät für die Stärke von Drehimpulsströmen durch Wellen: Die Torsion eines Drahtes und damit die Stärke des Drehimpulsstromes wird angezeigt durch das Verdrehen zweier ineinander laufender Zylinder. Der eine ist an der linken Welle befestigt, der andere an der rechten. Der Draht verläuft im Innern und verbindet linke und rechte Welle. Der Strich auf dem inneren Zylinder kann durch ein Fenster im äußeren Zylinder gesehen werden. Die Lage des Strichs zeigt die Stärke des Drehimpulsstromes an.

Bei der Messung von Drehimpulsströmen im Unterricht kann die Tatsache, daß Drehimpulsstrom und Energie dieselbe Dimension haben, zu Schwierigkeiten führen. Um Verwechslungen der beiden verschiedenen physikalischen Größen zu vermeiden und um gleichzeitig die eigenständige Bedeutung der physikalischen Größe Drehimpuls zu unterstreichen, geben wir der Maßeinheit des Drehimpulses Js den Namen Euler (E). Es gilt also $1\text{Js} = 1\text{E}$. Der Drehimpulsstrom hat somit die Einheit 1E/s . Die Winkelgeschwindigkeit hat die Maßeinheit 1rad/s . Es ist also auch $1\text{rad/s} = 1\text{J/E}$.

Um eine Vorstellung von der Größe der Maßeinheiten zu geben, sind in Tab. 1 für verschiedene Beispiele die Werte von Drehimpuls, Drehimpulsstrom und Winkelgeschwindigkeit angegeben.

Tabelle 1

	Drehimpuls	
System Erde—Sonne (Bahndrehimpuls)	$3 \cdot 10^{40}$ E	
System Mond—Erde (Bahndrehimpuls)	$3 \cdot 10^{33}$ E	
Erde (Eigendrehimpuls)	$7 \cdot 10^{33}$ E	
Brummkreis	4 E	
Photon (Spin)	$6,6 \cdot 10^{-34}$ E	
Elektron (Spin)	$3,3 \cdot 10^{-34}$ E	
	Drehimpulsstrom*	Winkelgeschwindigkeit
starker Schiffsmotor	$2 \cdot 10^6$ E/s	15 rad/s
Kraftfahrzeugmotor	80 E/s	400 rad/s
Spielzeugmotor	$6 \cdot 10^{-3}$ E/s	30 rad/s

* Angegeben sind die Drehimpulsströme der Motoren bei maximaler Energiestromabgabe.

4. Einführung des Drehimpulses über den Drehimpulsstrom

Fließt in einer Welle ein Drehimpulsstrom I_L , so fließt während der Zeit $\Delta t = t_2 - t_1$ der Drehimpuls

$$\Delta L = \int_{t_1}^{t_2} I_L dt \quad (2)$$

durch die Welle hindurch. Ist der Drehimpulsstrom im Zeitintervall Δt konstant, so vereinfacht sich Gl. (2) zu

$$\Delta L = I_L \Delta t. \quad (3)$$

Fließt der Drehimpuls nicht in einem geschlossenen Stromkreis, sondern häuft er sich in irgendeinem System, etwa einem Schwungrad, an, so bedeutet ΔL die Änderung des Drehimpulsinhalts dieses Schwungrads. Gl. (2) bzw. (3) kann also zur Bestimmung der Änderung des Drehimpulsinhalts eines Systems herangezogen werden. Insbesondere kann man auch den Gesamtdrehimpuls eines Schwungrads bestimmen: Man bremst es ab bis zum Stillstand, mißt während des Abbremsens den Drehimpulsstrom, der aus dem Schwungrad herausfließt, als Funktion der Zeit und bestimmt den Drehimpuls nach Gl. (2). Man kann

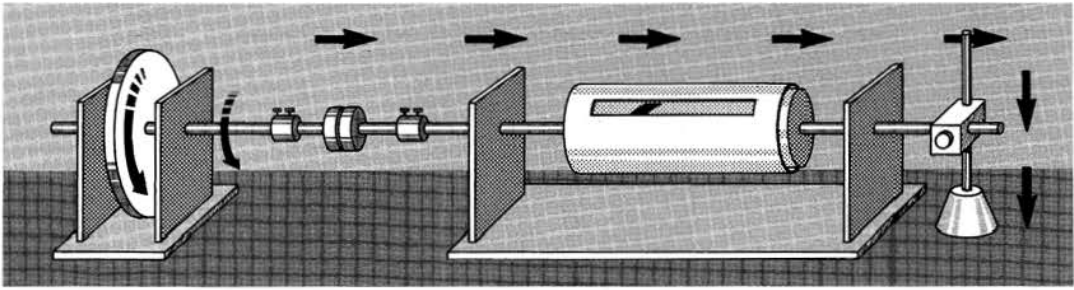


Abb. 4 Das rotierende Schwungrad wird über eine Rutschkupplung abgebremst. Der durch die nichtrotierende Welle fließende Drehimpulsstrom wird mit dem Meßgerät aus Abb. 3 gemessen. Die geraden schwarzen Pfeile bezeichnen den Drehimpulsstrom, nicht den Drehimpuls.

auf einfache Weise dafür sorgen, daß sich Gl. (2) auf Gl. (3) reduziert: Man bremst das Schwungrad wie in Abb. 4 mit einer Bremse mit konstantem Anpreßdruck ab. Dann ist der Drehimpulsstrom, der durch die Bremse fließt, weitgehend unabhängig von der Winkelgeschwindigkeit.

Mit dem in Abb. 4 dargestellten Versuchsaufbau läßt sich auch demonstrieren, daß Winkelgeschwindigkeit und Drehimpuls eines Schwungrads proportional zueinander sind, daß also gilt

$$L = \Theta \omega. \quad (4)$$

Der Proportionalitätsfaktor Θ zwischen Drehimpuls und Winkelgeschwindigkeit heißt Trägheitsmoment. Das Trägheitsmoment hängt einerseits von der Masse des Schwungrads ab, berücksichtigt aber andererseits die räumliche Verteilung der Masse. Gl. (4) tritt hier nicht, wie in vielen Schulbüchern, als Definitionsgleichung des Drehimpulses auf, sondern als empirisch gefundener Zusammenhang zwischen den Größen Drehimpuls und Winkelgeschwindigkeit für spezielle Systeme. Mit Gl. (4) läßt sich ohnedies der Drehimpuls nicht allgemein definieren, denn alle Elementarteilchen mit Spin haben Drehimpuls, obwohl sie weder Trägheitsmoment noch Winkelgeschwindigkeit haben.

Die Beziehung

$$L = r \times P, \quad (5)$$

mit der in vielen Hochschulsbüchern der Drehimpuls als vom Impuls abgeleitete Größe eingeführt wird, spielt hier keine größere Rolle als (4). Das Produkt $r \times P$ ist nämlich gar nicht immer gleich dem Drehimpuls L : Bewegt sich ein Körper auf einer Kreisbahn, so ist, wenn wie in Abb. 5 der Ortsvektor r nicht vom Kreismittelpunkt aus gerechnet wird, $r \times P$ nicht der Drehimpuls dieses Systems. $r \times P$ ist nur dann gleich dem Drehimpuls L , wenn r vom Schwerpunkt des Systems aus

gemessen wird. Außerdem gilt Gl. (5) wie Gl. (4) nicht für den Eigendrehimpuls von Elementarteilchen.

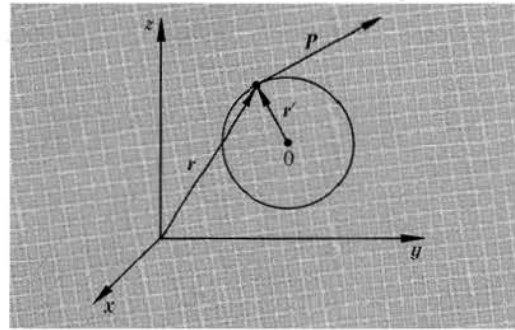


Abb. 5 Ein Körper mit dem Impuls P rotiert um den Punkt O . Nicht $r \times P$, sondern $r' \times P$ ist gleich dem Drehimpuls L .

5. Folgen der allgemeinen Erhaltung des Drehimpulses

Für den Drehimpuls gilt wie für die elektrische Ladung ein Erhaltungssatz. Wie für den elektrischen Strom gibt es auch für den Drehimpulsstrom eine *Kontinuitätsgleichung*

$$I_L = \frac{dL}{dt}. \quad (6)$$

Damit gilt für den Drehimpulsstrom auch der 1. Kirchhoffsche Satz: Die Summe der in einem Punkt zusammenfließenden Drehimpulsströme hat immer den Wert Null.

Ein stationärer, d.h. zeitlich konstanter Drehimpulsstrom fließt, wie ein stationärer elektrischer Strom, auf einem geschlossenen Weg. Analog den elektrischen Stromkreisen gibt es also *Drehimpulsstromkreise*. Diese sind jedoch nicht immer leicht zu erkennen. Abb. 6 zeigt verschiedene

Stromkreise. Bei einigen von ihnen nimmt der Drehimpulsstrom einen unerwarteten Weg. Da die Erde den Drehimpuls gut leitet, wird sie überall, wo es möglich ist, als Drehimpulsleiter verwendet. Wie Abb. 6 zeigt, sind nicht nur feste und steife Materialien gute Drehimpulsleiter, sondern auch elektrisches Feld, Magnet- und Gravitationsfeld.

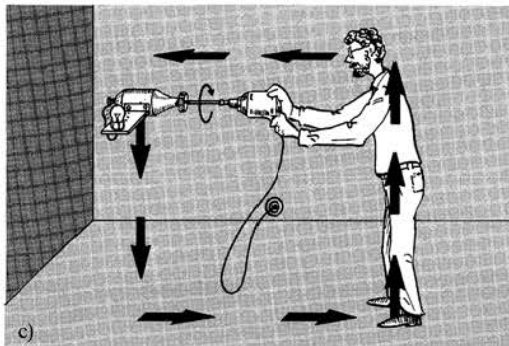
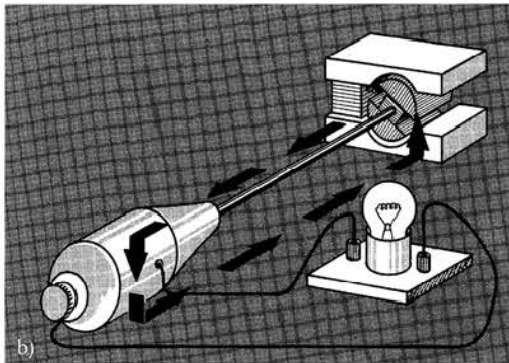
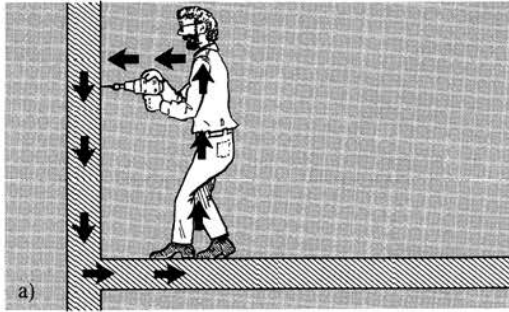


Abb. 6 Verschiedene Drehimpulsstromkreise: In (a) fließt der Drehimpuls von der Bohrmaschine durch den Bohrer in die Wand und von dort über den Boden durch den Menschen wieder in die Bohrmaschine zurück. In (b) fließt der Drehimpuls durch die Welle vom Motor zum Dynamo. Von dort über die Erde wieder zurück zum Motor. Sowohl im Motor als auch im Dynamo fließt der Drehimpuls über das Magnetfeld: im Motor vom Gehäuse auf die Welle, im Dynamo von der Welle zum Gehäuse. In (c) fließt der Drehimpuls über das Gravitationsfeld vom Dynamo in die Erde.

Es stellt sich nun noch die Frage nach der Richtung des Drehimpulsstromes, der etwa durch eine Welle fließt. „Lädt“ man über eine Welle ein Schwungrad auf (Abb. 7a), so daß dessen Drehimpuls zunimmt, d.h. $dL/dt > 0$, so fließt wegen Gl. (6) ein positiver Drehimpulsstrom durch die Welle ins Schwungrad. Wird das Schwungrad durch dieselbe Welle „entladen“ (Abb. 7b), so ist der Drehimpulsstrom durch die Welle wegen Gl. (6) negativ. Die Richtung des Drehimpulsstromes muß sich auch an einer Eigenschaft der Welle selbst ablesen lassen. Die Welle unterscheidet sich in den beiden betrachteten Fällen dadurch, daß der Torsionswinkel entgegengesetzt ist. Die Torsion ist in der Abbildung durch die „Stäbchen“ angedeutet, die durch die Mitte der Welle laufen, und im Falle der untordierten Welle alle in einer Ebene liegen. Abb. 7c zeigt noch den Fall, daß das Schwungrad mit einer von rechts kommenden Welle „geladen“ wird. Vergleicht man mit Abb. 7a, so erkennt man, daß die Welle hier entgegengesetzt tordiert ist, was damit übereinstimmt, daß hier der Drehimpuls von der entgegengesetzten Seite ins Schwungrad fließt.

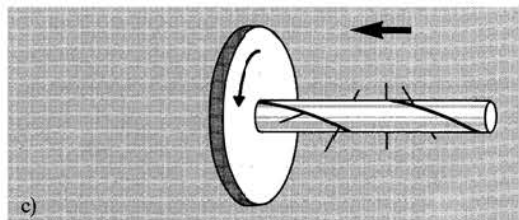
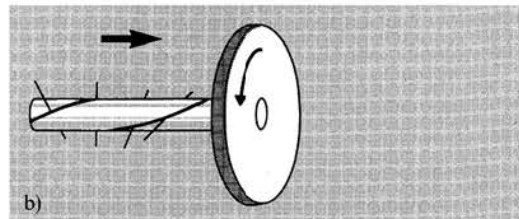
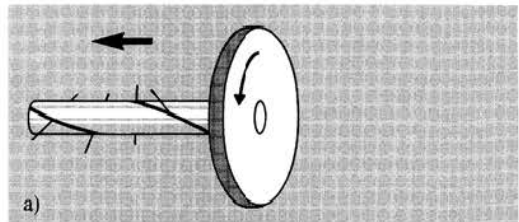


Abb. 7 An der Torsion einer Welle kann man erkennen, in welche Richtung der Drehimpulsstrom durch eine Welle fließt. In (b) und (c) ist die Welle in der gleichen Richtung tordiert; der Drehimpulsstrom hat dieselbe Richtung. In (a) ist die Welle entgegengesetzt tordiert; der Drehimpulsstrom hat die entgegengesetzte Richtung.

Diese Betrachtungen zeigen, daß man mit Hilfe der Torsion einer von einem Drehimpulsstrom durchflossenen Welle eindeutig eine Stromrichtung zuordnen kann, wenn man vorher festgelegt hat, ob eine zeitliche Änderung des Drehimpulses eines Systems dL/dt größer oder kleiner Null ist, ob der Drehimpuls des Systems zu- oder abnimmt. Dies geschieht durch die Festlegung, was man unter positiven Drehimpuls zu verstehen hat. Das unterliegt jedoch der Willkür der Wahl des Koordinatensystems. Im elektrischen Fall gibt es diese Willkür nicht, da es eindeutige, vom Beobachter unabhängige Kriterien dafür gibt zu entscheiden, ob eine Ladung positiv oder negativ ist. Siehe hierzu auch den vorletzten Aufsatz dieses Heftes.

Unter der Richtung des elektrischen Stromes wird oft nicht die Strömungsrichtung der mengenartigen Größe elektrische Ladung verstanden, die durch die Kontinuitätsgleichung

$$\frac{dQ}{dt} = I_Q \quad (7)$$

eindeutig festliegt, sondern die Stromrichtung der die elektrische Ladung tragenden Teilchen, der Ladungsträger. Ladungsträger, etwa Elektronen oder eine bestimmte Sorte von Ionen, sind aber ganze Bündel mengenartiger Größen. Unter diesen Größen befindet sich auch die Menge n . Als Richtung des Teilchenstromes bezeichnet man üblicherweise die Richtung des zugehörigen Mengenstromes. Da manche Teilchen negativ, andere positiv geladen sind, gibt es Teilchenströme, bei denen der Mengenstrom *dieselbe Richtung* hat wie der elektrische Strom, etwa ein Strom positiver Ionen, und solche, bei denen Mengenstrom und elektrischer Strom entgegengesetzt fließen, etwa ein Elektronenstrom. Wenn man also die elektrische Stromrichtung über eine Teilchenstromrichtung festlegen will, muß man zusätzlich festlegen, an welche Teilchensorte diese Definition geknüpft ist: So ist die elektrische Stromrichtung bei Defektelektronen dieselbe wie die Mengenstromrichtung. Bei Elektronen ist die elektrische Stromrichtung entgegengesetzt der Richtung des Mengenstromes. Die sogenannte „technische Stromrichtung“ ist also die Richtung des elektrischen Stromes, die sogenannten „physikalischen Stromrichtungen“ dagegen sind die Richtungen von mit elektrischen Strömen verknüpften Teilchenströmen.

Analog zu den elektrischen Ladungsträgern gibt es auch *Drehimpulsträger*: Alle Elementarteilchen mit Spin haben Drehimpuls, sind also Drehim-

pulsträger. Wie die elektrischen Ladungsträger positive oder negative Ladung haben, haben Drehimpulsträger positiven oder negativen Drehimpuls. Ladungsträger und Drehimpulsträger unterscheiden sich aber in einer wichtigen Eigenschaft: Elektrische Ladungsträger tragen immer nur Ladung mit einem bestimmten Vorzeichen. So haben Elektronen immer negative Ladung. Als Drehimpulsträger aber können Elektronen positiven oder negativen Drehimpuls haben.

Im Physikunterricht der Schule sollte die Frage nach der Richtung der Ströme keine große Rolle spielen. Es zeigt sich, daß die Frage nach der Stromrichtung von den Schülern nicht gestellt wird, solange die strömenden, mengenartigen Größen und nicht irgendwelche Ladungsträger oder Drehimpulsträger im Vordergrund stehen.

6. Energietransporte mit dem Energieträger Drehimpuls

Im Gegensatz zur Elektrizitätslehre, die von Energietransporten mit dem Energieträger elektrische Ladung handelt, hat das Gebiet, das sich mit Energietransporten durch den Energieträger Drehimpuls beschäftigt, keinen eigenen Namen. Es spielt im traditionellen Physikunterricht keine Rolle, obwohl rotierende Wellen im technischen Alltag vielverwendete Transportvorrichtungen für Energie sind. Aufgrund der *Gibbsschen Fundamentalform* haben beide Gebiete, die Elektrizitätslehre und die Physik der Drehimpulsströme, dieselbe Struktur und können auf die im 4. Aufsatz beschriebene Weise aufeinander abgebildet werden. Wir betrachten hier diejenige Analogie zwischen Systemen, die außer den Energieträgern elektrische Ladung Q und Drehimpuls L alle anderen Energieträger gemeinsam haben. Zwei derartige Systeme heißen analog, wenn bei der Ersetzung von Q durch L jede Beziehung zwischen Q und den dynamischen Größen des ersten Systems in eine richtige Beziehung des zweiten Systems übergeht. Die Abbildung von elektrischer Ladung auf Drehimpuls hat die Abbildung des Beladungsfaktors elektrisches Potential φ auf den Beladungsfaktor Winkelgeschwindigkeit ω zur Folge, so daß gilt

$$\begin{aligned} Q &\blacklozenge L, \\ \varphi &\blacklozenge \omega. \end{aligned}$$

Es sei noch einmal darauf hingewiesen, daß wir uns hier der Einfachheit halber auf eine Komponente des Drehimpulses beschränken.

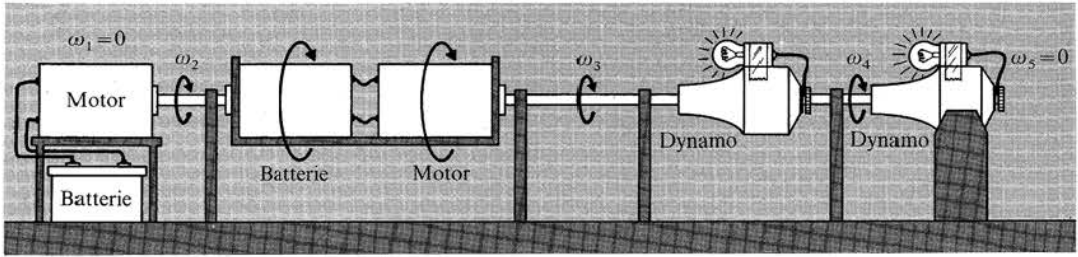


Abb. 8 Zwei Motoren und zwei Dynamos sind hintereinander geschaltet. Die Differenzen der Winkelgeschwindigkeiten addieren sich.

Für den Energiestrom, den ein elektrischer Strom bzw. ein Drehimpulsstrom beim Durchströmen eines Systems aufnehmen oder abgeben, gelten die Beziehungen

$$I_E = \Delta\varphi I_Q = UI_Q \quad \blacklozenge \quad I_E = \Delta\omega I_L \quad (8)$$

Darin sind $\Delta\varphi$ die Differenz des elektrischen Potentials und $\Delta\omega$ die Differenz der Winkelgeschwindigkeiten zwischen Ein- und Ausgang der Systeme. Statt $\Delta\omega$ steht in (8) oft nur ω , nämlich dann, wenn am Eingang oder Ausgang $\omega=0$ ist. Mit Gl. (8) können wir, wie Tab. 2 zeigt, die Energieströme berechnen, die die in Abschnitt 3 aufgeführten Energiequellen liefern.

Tabelle 2: Energieströme der Motoren aus Tab. 1

Schiffsmotor	30 MW
Automotor	32 kW
Spielzeugmotor	0,2 W

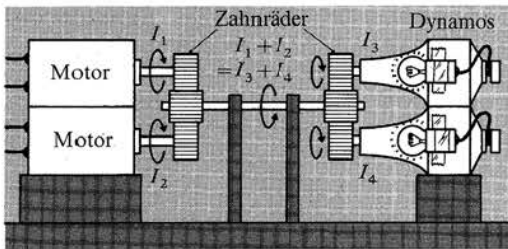


Abb. 9 Zwei Motoren und zwei Dynamos sind parallel geschaltet. Die Drehimpulsströme addieren sich.

Die Kirchhoffschen Sätze gelten in beiden Gebieten: Beim Hintereinanderschalten von Systemen addieren sich die elektrischen Spannungen bzw. die Differenzen der Winkelgeschwindigkeiten, beim Parallelschalten die Ströme. Abb. 8 und 9 zeigen, wie man Systeme, durch die ein Drehimpulsstrom fließt, parallel und hintereinander schalten kann.

7. Analoge Energieumlader und Energiespeicher für elektrischen Strom und Drehimpulsstrom

Unter Verwendung der im 3. Aufsatz eingeführten Symbolik wollen wir im folgenden in knapper Form Beispiele für Systeme geben, deren Schemata analog sind.

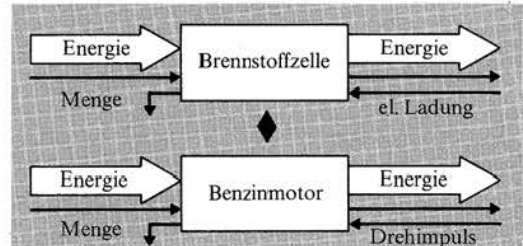


Abb. 10 Die Schemata der analogen Energieumlader Brennstoffzelle und Benzinmotor. Beide Energieumlader laden Energie von Mengenströmen ab.

Energieumlader

Abb. 10 zeigt die Schemata der Energieumlader Brennstoffzelle und Benzinmotor. Sie laden Energie von einem Mengenstrom auf einen Q - bzw. L -Strom um.

Weitere Beispiele für analoge Energieumlader sind:

- *Elektrischer Ofen und Bremsen*: Sie laden Energie von einem Q - bzw. L -Strom auf einen Strom erzeugter Entropie um.
- *Seebeckelement und Wärmekraftmaschine*: Sie laden Energie von einem Entropiestrom auf einen Q - bzw. L -Strom um.
- *Peltierelement und Wärmepumpe*: Sie laden Energie von einem Q - bzw. L -Strom auf einen Strom von Entropie um, die, mindestens zum Teil, nicht erzeugt wurde.

Energiespeicher

Abb. 11 zeigt die Schemata von zwei analogen Energiespeicherpaaren. Im Kondensator und Aufziehmotor wird im Gegensatz zur elektrisch geladenen Kugel und zum Schwungrad der Energieträger, mit dem die Speicher geladen werden, nicht mitgespeichert.

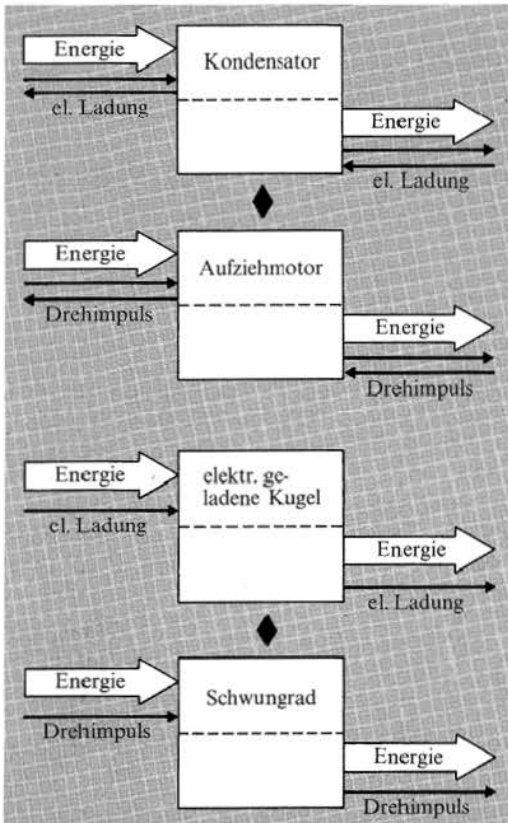


Abb. 11 Schemata von analogen Energiespeichern: Im ersten Fall wird die Energie ohne den Energieträger, im zweiten mit dem Energieträger gespeichert.

8. Der Drehimpuls widerstand

Für den Drehimpulsstrom kann, wie für den elektrischen Strom, der Widerstand eines Systems definiert werden durch

$$R_Q = \frac{U}{I_Q} \quad \blacklozenge \quad R_L = \frac{\Delta\omega}{I_L} \quad (9)$$

Dabei ist I_Q die Stärke des elektrischen Stroms, der durch das System fließt, und $U = \Delta\varphi$ die

Differenz des elektrischen Potentials zwischen Ein- und Ausgang des Systems. Entsprechend ist I_L die Stärke des Drehimpulsstroms, der durch das System fließt und $\Delta\omega$ die Differenz der Winkelgeschwindigkeiten zwischen Ein- und Ausgang des Systems. Setzt man (9) in (8) ein, so erhält man

$$I_E = R_Q I_Q^2 \quad \blacklozenge \quad I_E = R_L I_L^2 \quad (10)$$

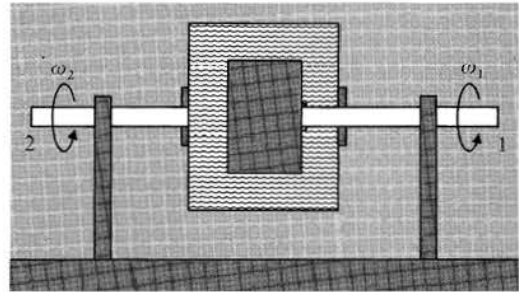


Abb. 12 Eine einfache Flüssigkeitskupplung: An einem Ende der Welle 1 ist ein in einer Flüssigkeit drehbarer Zylinder angebracht. Beginnt Welle 1 sich zu drehen, so setzt sich mit der Flüssigkeit der ganze Flüssigkeitsbehälter und die an ihm angebrachte Welle 2 in Bewegung. Die Differenz der Winkelgeschwindigkeiten der beiden Wellen hängt bei konstantem Drehimpulsstrom vom Widerstand R_L der Kupplung ab.

Viele Drehimpulsleiter, so alle Systeme, die aus festen und steifen Materialien bestehen, und alle Felder haben den Widerstand $R_L = 0$. Durch sie fließt Drehimpuls, ohne daß er beim Strömen Energie abläßt. Ein Drehimpulsleiter mit Widerstand ist die *Flüssigkeitskupplung*. Abb. 12 zeigt eine mögliche Konstruktion. Daß Drehimpuls von der einen Welle auf die andere Welle der Kupplung fließt, liegt an der Reibung der Flüssigkeit. Die Stärke des Drehimpulsstromes, der durch die Kupplung fließt, hängt ab von der Zähigkeit der Flüssigkeit, der Differenz der Winkelgeschwindigkeiten der Wellen und der Geometrie der Kupplung. Der Widerstand R_L ist dabei umso größer, je geringer die Zähigkeit der Flüssigkeit ist. Die Zähigkeit ist also ein Maß für die spezifische Drehimpulsleitfähigkeit einer Substanz.

Ein interessantes Beispiel für den Drehimpuls widerstand ist die Rutschkupplung. Wie Abb. 13 zeigt, hat die $\Delta\omega$ - I_L -Kennlinie einer Rutschkupplung zwei verschiedene Bereiche. Nimmt der Drehimpulsstrom vom Wert Null ausgehend zu, so bleibt die Differenz der Winkelgeschwindigkeiten Null bis zu einem Wert I_L . Der Widerstand hat in diesem Bereich den Wert Null. Macht man

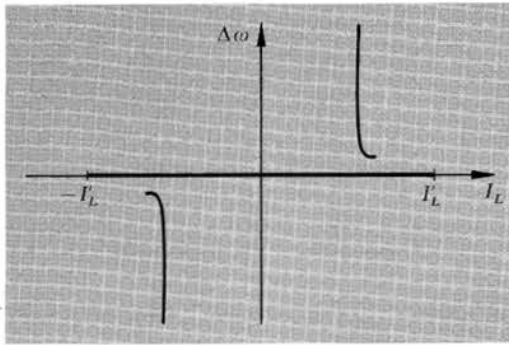


Abb. 13 $\Delta\omega$ - I_L -Kennlinie einer Rutschkupplung

den Versuch, den Drehimpulsstrom über den Wert I_L hinauszusteigern, so entsteht eine Winkelgeschwindigkeitsdifferenz. Der durch die Kupplung fließende Drehimpulsstrom nimmt dabei ab. Sein Wert bleibt gleich, auch wenn die Differenz der Winkelgeschwindigkeiten vergrößert wird. Die $\Delta\omega$ - I_L -Kennlinie in Abb. 13 gilt für einen bestimmten Anpreßdruck der Kupplungsscheiben. Wird der Anpreßdruck vergrößert, so verschieben sich die senkrechten Äste der Kennlinie nach außen, beim Verkleinern des Anpreßdrucks nach innen.

Das Verändern des Anpreßdrucks und damit die Variation des durch die Kupplung fließenden Drehimpulsstromes wird zum Anfahren von Kraftfahrzeugen ausgenutzt. Daß der durch die reibende Kupplung fließende Drehimpulsstrom nicht abhängt von der Differenz der Winkelgeschwindigkeiten, ist vielen Autofahrern bekannt. Rutscht die Kupplung, so ist die Beschleunigung des Autos davon unabhängig, ob durch Gasgeben die Drehzahl des Motors vergrößert wird oder nicht. Da bei konstantem Anpreßdruck der Kupplungsscheiben durch die reibende Kupplung immer ein konstanter Drehimpulsstrom fließt, eignen sich Rutschkupplungen im Prinzip zum Bau von „drehimpulsstromstabilisierten“ Energiequellen, Energiequellen also, die einen Drehimpulsstrom liefern, dessen Stärke nicht abhängt von der jeweiligen Winkelgeschwindigkeit der Welle der Energiequelle.

9. Kapazität und Induktivität

Das *Trägheitsmoment* Θ eines Schwungrads entspricht der Kapazität C_Q eines Kondensators:

$$C_Q = \frac{U}{Q} \quad \blacklozenge \quad C_L = \frac{\Delta\omega}{L} = \Theta. \quad (11)$$

Für die gespeicherte Energie gelten die Beziehungen

$$E_{\text{Speicher}} = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C_Q} \quad \blacklozenge \quad E_{\text{Speicher}} = \frac{1}{2} \frac{L^2}{C_L}. \quad (12)$$

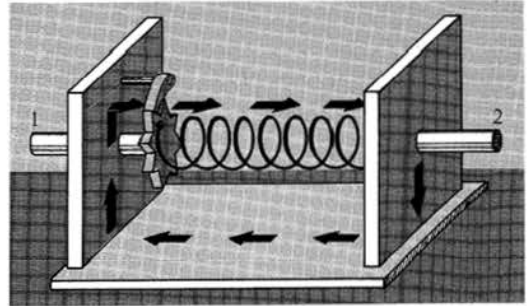


Abb. 14 Wie in einem Uhrwerk fließt der Drehimpulsstrom im Kreis. Die Sperrhaken an beiden Wellen verhindern das Entspannen der Feder, lassen aber das Spannen der Feder zu.

Ein interessantes Beispiel eines Energiespeichers ist die Uhrfeder. Sie bekommt die Energie mit dem Energieträger Drehimpuls, ohne daß jedoch Drehimpuls in ihr gespeichert wird. Daß durch eine gespannte Uhrfeder ein Drehimpulsstrom fließt, wollen wir der Einfachheit der zeichnerischen Darstellung halber statt für eine Uhrfeder für eine Spiralfeder zeigen. Abb. 14 zeigt eine Spiralfeder, die an zwei Wellen befestigt ist. An beiden Wellen ist ein Zahnrad mit einem Sperrhaken angebracht, so daß sich jede Welle nur in einer Richtung drehen läßt, und zwar die eine entgegengesetzt zur anderen. Wird etwa Welle 1 gedreht, so bleibt Welle 2 in Ruhe, d.h. der mit Energie beladene Drehimpulsstrom, der durch Welle 1 in die Feder hineinfließt, strömt durch den Sperrhaken ohne Energie wieder heraus. Die Energie bleibt in der Feder stecken. Je weiter Welle 1 gedreht ist, um so mehr Energie befindet sich in der Feder, um so stärker ist die Feder tordiert. Da die Torsion der Feder ein Maß ist für die Stärke des durch die Feder fließenden Drehimpulsstroms, ist dieser Drehimpulsstrom um so stärker, je mehr die Feder gespannt ist.

Dieser Drehimpulsstrom fließt stationär im Kreis herum. In Abb. 14 ist der Weg des Drehimpulsstromes eingezeichnet: Er fließt durch die Feder an dem einen Sperrhaken in die Halterung, durch die Halterung zum anderen Sperrhaken und von dort wieder in die Feder. Obwohl ein Drehimpulsstrom fließt, hat das System selbst den Drehimpuls Null, denn es dreht sich weder die Feder noch irgendein anderes Teil der Anordnung. Um

die gespeicherte Energie zu berechnen, denken wir uns die Spiralfeder durch einen Torsionsstab ersetzt. Nach Gl. (1) ist dann

$$E_{\text{Speicher}} = I_L \alpha = \frac{1}{2} L_L^* I_L^2 \quad \text{mit} \quad L_L^* = \frac{4}{\pi} \frac{l}{G r^4}. \quad (13)$$

wobei l die Länge und r der Radius des Stabes ist. Der Torsionsmodul G ist eine charakteristische Größe des Materials, aus dem der Stab besteht.

Die in einem tordierten Stab gespeicherte Energie hängt, wie die im Magnetfeld einer elektrischen Spule gespeicherte, ab vom Quadrat der Stromstärke. Es entsprechen sich also Torsion und Induktion. Für die gespeicherte Energie im Magnetfeld einer Spule bzw. in einem tordierten Stab gelten die Beziehungen

$$E_{\text{Speicher}} = \frac{1}{2} L_Q^* I_Q^2 \quad \blacklozenge \quad E_{\text{Speicher}} = \frac{1}{2} L_L^* I_L^2, \quad (14)$$

wobei L_Q^* die Induktivität der Spule und L_L^* die Tordierbarkeit des Stabes ist.

Der Drehimpulsstromkreis eines aufgezogenen Uhrwerks entspricht einem elektrischen supraleitenden Stromkreis: In beiden fließt der Strom dissipationsfrei. Die mit dem Strom gespeicherte Energie bleibt im System solange gespeichert, bis sie durch Verringern der Stromstärke dem System entnommen wird.

10. Getriebe

Das Getriebe ist das Drehimpuls-Analogon des Transformators. Getriebe und Transformator werden dazu benutzt, das Verhältnis von Energieträgerstrom zu Beladungsfaktor eines Energietromes zu verändern. Für die beiden Geräte gilt

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_{Q_2}}{I_{Q_1}} \quad \Delta \omega_1 = \frac{I_{L_2}}{I_{L_1}}. \quad (15)$$

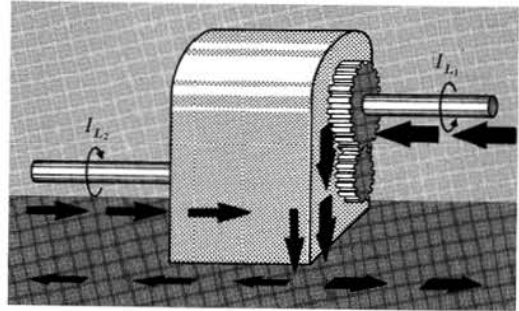
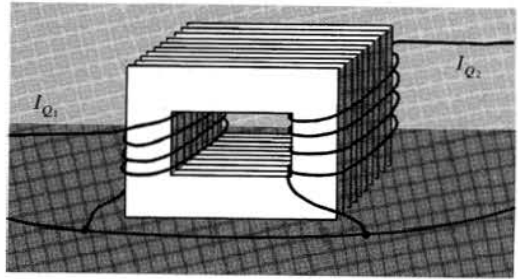


Abb. 15 Der Transformator, dessen Primär- und Sekundärstromkreis miteinander verbunden sind, entspricht dem Getriebe: In beiden hat ein Anschluß des Primär- und Sekundärstromkreises dasselbe Potential bzw. dieselbe Winkelgeschwindigkeit.

Auf den ersten Blick sieht es so aus, als unterscheiden sich Getriebe und Transformator in einer wichtigen Eigenschaft: Der Transformator hat vier Anschlüsse, das Getriebe scheint nur zwei Anschlüsse, die beiden Wellen, zu haben. Das Getriebe hat jedoch noch einen weiteren Eingang, das Gehäuse. Es ist damit analog zu einem Transformator, für den je ein Pol von Primär- und Sekundärwicklung miteinander verbunden sind (Abb. 15). Das Analogon zu einem Transformator, bei dem keine elektrische Verbindung zwischen Primär- und Sekundärkreis besteht, kann man sich zwar auch vorstellen, es hat aber technisch keine Bedeutung.

Die Analogie zwischen Entropiestrom und elektrischem Strom

Einleitung

Die in den beiden vorhergehenden Aufsätzen von D. Plappert gezeigte Analogie zwischen physikalischen Größen, Beziehungen, Erscheinungen und Geräten, die auf der Strukturgleichheit der Energieformen $U dQ$, ωdL und μdn beruht, soll nun auf eine weitere Energieform ausgedehnt werden: auf die Wärme $T dS$ (T = Temperatur, S = Entropie). Wie im vorigen Aufsatz werden wir uns meistens an der elektrischen Energie $U dQ$ (U = Spannung, Q = elektrische Ladung) orientieren.

Da die Entropie bereits ausführlich in zwei Aufsätzen von Heft 1 der *Konzepte eines zeitgemäßen Physikunterrichts* behandelt wurde, können die folgenden Ausführungen relativ kurz gehalten werden.

Die Besonderheit der Phänomene, die mit der Wärme zusammenhängen, besteht darin, daß die dabei betrachtete mengenartige Größe S dieselbe ist, die bei den bisher untersuchten Analogien immer dann auftrat, wenn irreversible Prozesse im Spiel waren. Hier wird deshalb die Entropie in zwei verschiedenen Rollen auftreten. Entropieströme, die ein System verlassen, können zerlegt werden in einen Anteil, der in das System bereits hineingeflossen ist, und einen, der im System erzeugt wurde.

1. Der Wärmestrom

Ändert sich die Entropie S eines physikalischen Systems um dS , so ändert sich gleichzeitig seine Energie E um dE . Für den Zusammenhang zwischen den beiden Änderungen gilt

$$dE = T dS. \quad (1)$$

Man sagt, das System ändere seine Energie in Form von Wärme. Division von Gl. (1) durch dt liefert eine andere Formulierung desselben Sachverhalts:

$$\frac{dE}{dt} = T \frac{dS}{dt}. \quad (2)$$

Wird in dem betrachteten System keine Entropie erzeugt, so kann sich die Entropie nur durch

Aufnahme oder Abgabe ändern, so daß die Entropieänderung dS/dt gleich dem Entropiestrom I_S und die Energieänderung dE/dt gleich dem Energiestrom I_E durch die Grenzen des Systems ist:

$$\frac{dS}{dt} = I_S, \quad (3)$$

$$\frac{dE}{dt} = I_E. \quad (4)$$

Mit (3) und (4) wird aus (2)

$$I_E = T I_S. \quad (5)$$

An dieser Beziehung sieht man, daß beim Wärmeaustausch die Entropie der Energieträger ist und die absolute Temperatur die Rolle des Beladungsmaßes des Energieträgers mit Energie spielt. Je höher die absolute Temperatur eines gegebenen Entropiestroms ist, desto mehr Energie transportiert er.

Bei manchen Systemen, die zwei „Anschlüsse“ für den Entropiestrom haben, fließt ein Entropiestrom zu dem einen Anschluß auf einer Temperatur T_1 hinein, zum anderen ein Strom derselben Stärke auf einer anderen Temperatur T_2 heraus. Der Nettoenergiestrom aus dem System heraus ist dann

$$I_E = (T_2 - T_1) I_S = \Delta T I_S. \quad (6)$$

Gl. (6) ist das Analogon zu

$$I_E = (\varphi_2 - \varphi_1) I_Q = U I_Q, \quad (7)$$

d.h. der Gleichung, die die Stärke des elektrischen Energiestroms beschreibt, der durch ein aus zwei Drähten bestehendes Kabel fließt.

2. Reversible Energieumlader

Wir stellen zunächst reversible thermische Energieumlader* reversiblen elektrischen Umladern gegenüber. Dabei werden zuerst Quellen elektrischer und thermischer Energie einander gegenübergestellt, dann Empfänger. Die Begriffe

* Was üblicherweise Energiewandler genannt wird, bezeichnen wir als Energieumlader. Diese Bezeichnungswiese wurde in Abschnitt 10 des 3. Aufsatzes begründet.

Quelle und Empfänger beziehen sich, wie bisher, immer auf einen bestimmten Energieträger. So ist eine Quelle von Energie mit dem Energieträger Entropie ein Gerät, das Energie auf die Entropie drauflädt, auch wenn es die Energie gleichzeitig anderswoher mit einem anderen Energieträger bekommt.

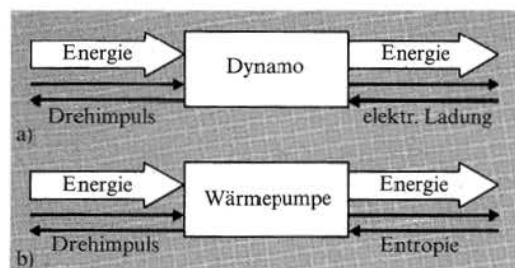


Abb. 1 Die Schemata von Dynamo (a) und Wärmepumpe (b) unterscheiden sich nur im Energieträger, mit dem die Energie aus dem Umlader herausströmt.

In Abb. 1 a ist das Schema eines Dynamos dargestellt. Der Dynamo bekommt Energie mit dem Energieträger Drehimpuls, er gibt sie ab mit dem Energieträger elektrische Ladung. Nach dem im 4. Aufsatz (D. Plappert, Die Strukturgleichheit verschiedener physikalischer Gebiete gezeigt am Beispiel Elektrizitätslehre-Hydraulik) aufgestellten Regeln über die Analogiebildung ergibt sich daraus rein formal die in Abb. 1 b schematisch dargestellte analoge thermische Maschine. Auch diese Maschine bekommt Energie mit dem Energieträger Drehimpuls. Außerdem fließt ein Entropiestrom auf der niedrigen Temperatur T_1 hinein und auf der hohen Temperatur T_2 wieder heraus. Es handelt sich also um eine Wärmepumpe.

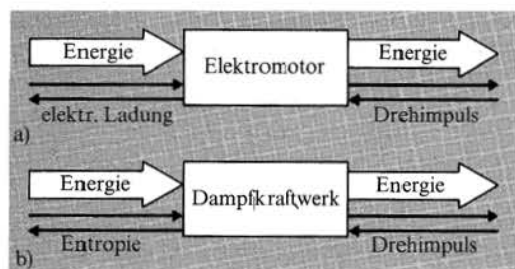


Abb. 2 Die Schemata von Elektromotor (a) und Dampfkraftwerk (b), bestehend aus Dampferzeuger, Turbine und Kondensator, unterscheiden sich nur im Energieträger, mit dem die Energie in den Umlader hineinströmt.

Abb. 2 zeigt die Schemata von elektrischen und thermischen Energieempfängern. In Abb. 2a ist der Elektromotor dargestellt. Die analoge thermische Maschine, deren Schema Abb. 2b zeigt, mag

dem Leser zunächst unbekannt vorkommen. Tatsächlich repräsentiert dieses Schema einen Teil eines Dampfkraftwerks, nämlich die Anordnung Kessel-Turbine-Kondensator. Das sieht man, wenn man Abb. 3 betrachtet, in der ein Dampfkraftwerk, immer noch schematisch, dargestellt ist. Der Übersichtlichkeit wegen wurde ein Kraftwerk mit Primär- und Sekundärkreislauf gewählt. Die Systemgrenze, die dem Kasten der Abb. 2b entspricht, läuft durch den Wärmetauscher zwischen Primär- und Sekundärkreislauf, den Dampferzeuger, und durch den Wärmetauscher „Kondensator“ hindurch. Hätte man die Systemgrenze anders gelegt, etwa so wie die gestrichelte Linie in Abb. 3, hätte sich ein komplizierteres Schema ergeben, denn durch die beiden Rohre, die jetzt die Systemgrenze durchstoßen, fließt außer dem Entropiestrom noch ein Mengenstrom. Daß man dem Schema der Abb. 2b nicht so leicht ansieht, daß es einen Teil eines Dampfkraftwerks darstellt, liegt daran, daß in einem wirklichen Dampfkraftwerk die beiden Entropieleitungen nicht so sauberlich nebeneinander hergeführt werden, wie die beiden Zuleitungsdrähte eines Elektromotors.

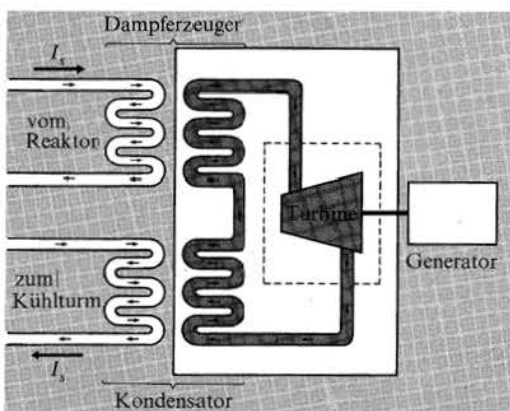


Abb. 3 Schema eines Dampfkraftwerks mit Primär- und Sekundärkreislauf. Legt man die Systemgrenze so wie die durchgezogene Linie, so fließen durch die Grenze keine Mengenströme, das Schema dieses Systems ist das der Abb. 2b. Legt man die Grenze wie die gestrichelte Linie, so ergibt sich ein komplizierteres Schema.

Der Energiestrom, der in die Empfänger der Abb. 2a bzw. 2b hineinfließt, ist wieder gegeben durch die Gl. (6) und (7). Gl. (6) ist im Gegensatz zu Gl. (7) nur in wenigen Lehrbüchern zu finden. Man kann aber aus Gl. (6) eine Beziehung ableiten, die man in vielen Physikbüchern findet: Die Beziehung, die den Zusammenhang zwischen Wirkungsgrad η einer reversibel laufenden Wärmekraftmaschine und den Temperaturen T_2 und

T_1 der hinein- bzw. herausfließenden Entropieströme beschreibt. Definiert ist dieser Wirkungsgrad als

$$\eta = \frac{\text{abgegebener Rotationsenergiestrom}}{\text{hineinfließender Wärmestrom}}$$

Der Zähler ist durch Gl. (6) gegeben, der hineinfließende Wärmestrom ist $T_2 I_S$. Damit wird

$$\eta = \frac{(T_2 - T_1) I_S}{T_2 I_S} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \quad (8)$$

Gewöhnlich wird für die Herleitung dieser wichtigen Beziehung viel mehr Aufwand betrieben.

Unsere Analogie-Betrachtungen legen nun eine Frage nahe, auf die man sonst nicht so leicht gestoßen wäre: Müßte man nicht den Wirkungsgrad eines Elektromotors entsprechend definieren, d. h.

$$\eta_{\text{Elektromotor}} = \frac{(\varphi_2 - \varphi_1) I_Q}{\varphi_2 I_Q} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\varphi_2} \quad (9)$$

Man sieht sofort, daß dieser Ausdruck keinen eindeutigen Sinn haben kann. Da der Nullpunkt des elektrischen Potentials beliebig gewählt werden kann, ließe sich nämlich allein durch eine Nullpunktverschiebung von φ erreichen, daß $\eta_{\text{Elektromotor}}$ jeden beliebigen Wert annimmt. Es ist deshalb nicht überraschend, daß die in Gl. (9) definierte Größe technisch irrelevant ist. Beim thermischen Wirkungsgrad, Gl. (8), steht im Nenner die Energie, für die man zu bezahlen hat, die also möglichst klein sein soll. Im elektrischen Fall bezahlt man aber genau für den Teil, der auch umgesetzt wird, also für den Zähler. Den Wirkungsgrad eines Elektromotors definiert man also zweckmäßigerweise anders, nämlich

$$\eta' = \frac{(\omega_2 - \omega_1) I_L}{(\varphi_2 - \varphi_1) I_Q}$$

Dieser ist bei einem reversibel arbeitenden Motor gleich Eins. Daß man im thermischen Fall für $T_2 dS$ und nicht für $(T_2 - T_1) dS$ bezahlt, liegt daran, daß man sich die auf der Temperatur T_2 hineinfließende Entropie durch Erzeugung verschafft, etwa durch Verbrennen von Kohle, und nicht aus der Umgebung aufnimmt.

Bei den in diesem Abschnitt besprochenen Quellen war der hineinfließende, bei den Empfängern der herausfließende Energieträger der Drehimpuls. Die Diskussion läuft genauso, wenn man stattdessen Energieströme mit einem beliebigen anderen Energieträger nimmt, etwa der Menge n oder dem Impuls P . In Abb. 4 und 5 sind die verallgemeinerten Schemata der reversiblen Ener-

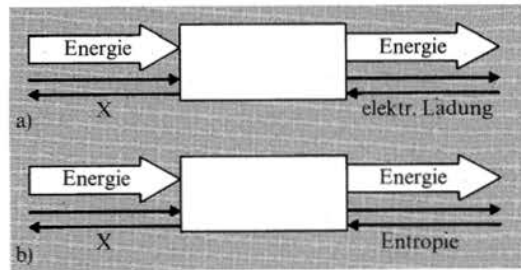


Abb. 4 Quellen für Energie mit dem Energieträger elektrische Ladung (a) und Entropie (b).

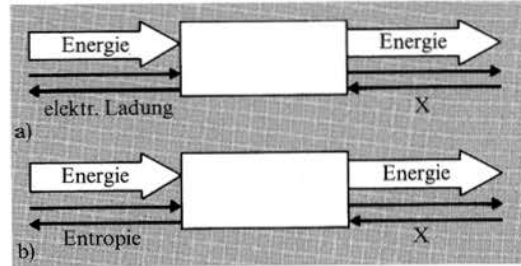


Abb. 5 Empfänger für Energie mit dem Energieträger elektrische Ladung (a) und Entropie (b).

gieumlader, bei denen einer der beteiligten Energieträger die elektrische Ladung oder die Entropie ist, dargestellt.

3. Irreversible Energieumlader

Viele Energieumlader, bei denen einer der beiden Energieträger Entropie oder elektrische Ladung ist, werden durch die Schemata der Abb. 4 und 5 nur schlecht oder gar nicht beschrieben. Häufig wird nämlich in Umladern so viel Entropie erzeugt, daß der vom Strom I_S der erzeugten Entropie getragene Energiestrom $T I_S$ gegen die anderen Energieströme nicht vernachlässigt werden kann. Manchmal ist diese Entropieerzeugung beabsichtigt, manchmal nicht. Wir beginnen wieder mit der Betrachtung der Quellen.

Die meisten Wärmequellen sind so gebaut, daß die ganze Entropie, mit der die Energie die Quelle verläßt, *erzeugte* Entropie ist. Das ist der Fall bei allen Heizungen, in denen etwas verbrannt wird, aber auch bei allen elektrischen Widerstandsheizungen. In Abb. 6 ist das Schema einer Widerstandsheizung (Abb. 6a) dem einer elektrisch angetriebenen Wärmepumpe (Abb. 6b) gegenübergestellt. (Diese Wärmepumpe erhält man, indem man einen Elektromotor, Abb. 2a, und eine Wärmepumpe, Abb. 1b, hintereinanderschaltet.)

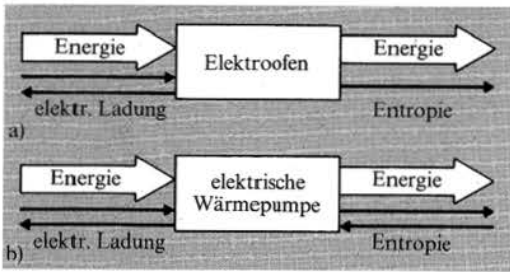


Abb. 6 Im Elektroofen (a) wird Entropie auf hoher Temperatur erzeugt, die Wärmepumpe (b) nimmt Entropie auf niedriger Temperatur auf und gibt denselben Betrag auf hoher Temperatur wieder ab.

Die Energiebilanz für die Widerstandsheizung lautet

$$UI_Q = T_2 I_S,$$

die der reversibel arbeitenden Wärmepumpe

$$UI_Q = (T_2 - T_1) I_S.$$

T_2 ist in beiden Fällen die Temperatur, bei der die Heizung die Wärme abgibt, $T_2 I_S$ der abgegebene Wärmestrom. Im ersten Fall ist der abgegebene Wärmestrom

$$T_2 I_S = UI_Q. \quad (10)$$

Im Fall der reversiblen Maschine, der Wärmepumpe, ist er

$$T_2 I_S = UI_Q + T_1 I_S, \quad (11)$$

er ist also um den Summanden $T_1 I_S$ größer als bei der Widerstandsheizung. Umformung von Gl. (11) liefert

$$T_2 I_S = \frac{T_2}{T_2 - T_1} UI_Q.$$

Die Leistungsziffer $T_2/(T_2 - T_1)$ gibt an, wieviel mehr Energie der gewünschten Form die Wärmepumpe abgibt als eine Widerstandsheizung. Der Faktor ist um so größer, je kleiner der Unterschied ist zwischen der Temperatur T_1 , bei der die Entropie aufgenommen wird, also etwa der Außenluft, und der Temperatur T_2 , bei der sie abgegeben wird, also der Zimmertemperatur.

4. Energiespeicher

Wie man Energiespeicher schematisch darstellt, wurde in Abschnitt 15 des 3. Aufsatzes in diesem Heft beschrieben. Die meisten Wärmespeicher werden durch das Schema der Abb. 7a, die meisten Speicher elektrischer Energie durch das

Schema der Abb. 7b dargestellt. Die Struktur der beiden Schemata ist verschieden: Die Speicher elektrischer Energie speichern im Gegensatz zu den Wärmespeichern den Energieträger nicht mit. Elektrische Ladung läßt sich schlecht speichern wegen der starken Abstoßung gleichnamiger Ladungen. Auch im Kondensator wird in diesem Sinn keine elektrische Ladung gespeichert, denn die Gesamtladung des Kondensators ist, auch wenn er geladen ist, Null. Der Energieträger Entropie dagegen wird gewöhnlich mitgespeichert, etwa in Nachtspeicheröfen oder in Latentwärmespeichern.

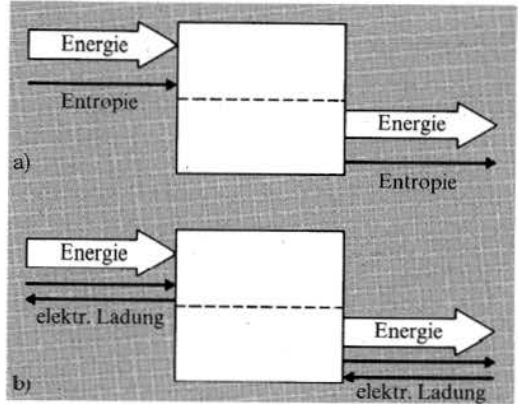


Abb. 7 Wärmespeicher (a) und Speicher elektrischer Energie (b).

Sieht man von diesem Unterschied ab, so kann man eine Analogie zwischen bestimmten Typen von Speichern elektrischer Energie und bestimmten Typen von Wärmespeichern feststellen: Der Akku entspricht dem Latentwärmespeicher, der elektrische Kondensator dem Nachtspeicherofen. In den beiden ersten läuft nämlich beim Laden und Entladen bei konstanter intensiver Variable U bzw. T eine Reaktion ab (auch ein Phasenübergang ist eine Reaktion). Im Kondensator und im Nachtspeicherofen dagegen wächst der Wert der intensiven Variable in dem Maß, wie der Speicher gefüllt wird. Beim Kondensator ist der Zusammenhang zwischen gespeicherter Energie E_{Speicher} und intensiver Variable gegeben durch

$$E_{\text{Speicher}} = C_{\text{el}} \frac{U^2}{2},$$

beim Nachtspeicherofen gilt

$$E_{\text{Speicher}} = C_w \Delta T.$$

(C_{el} = Kapazität des Kondensators, C_w = Wärmekapazität.)

Mechanik – Abriß einer Neudarstellung

1. Einleitung

Das letzte der physikalischen Gebiete, von dem wir zeigen wollen, daß es weitgehend analog zu anderen Bereichen behandelt werden kann, ist die Mechanik. Wieder liegt der Grund der Strukturgleichheit mit anderen physikalischen Gebieten in der *Gibbsschen Fundamentalform*. Die Mechanik wird durch mehrere Terme der *Gibbsschen Fundamentalform* repräsentiert: $v dP$, ωdL und $ghdm$. Diejenigen Gesetze, die im traditionellen Aufbau der Mechanik die Axiome sind, hängen nur mit dem Term $v dP$ zusammen, also der Energieform Bewegungsenergie. Um diesen Term geht es auch im vorliegenden Aufsatz. Die Behandlung der Mechanik nach denselben Prinzipien wie die Thermodynamik und die Elektrizitätslehre stellt einen starken Bruch zum traditionellen Aufbau der Physik dar. Wir haben sie ans Ende dieser Analogie-Reihe gestellt, damit sich der Leser in den drei vorhergehenden Aufsätzen zunächst mit der Methode dieses Aufbaus vertraut machen konnte. Man wird aber am Ende feststellen, daß es ziemlich gleichgültig ist, in welcher Reihenfolge die hier behandelten vier Teilgebiete angeordnet werden.

Die folgende Diskussion hat die Mechanik zum Gegenstand. Sie umfaßt aber nicht alle Inhalte, die üblicherweise in der Mechanik behandelt werden. Das wäre im Rahmen eines kurzen Aufsatzes ausgeschlossen. Wegen der großen Rolle, die die Mechanik in der traditionellen Physik spielt, haben wir geplant, einer ausführlicheren Behandlung der Mechanik ein ganzes Heft dieser Schriftenreihe zu widmen. Dieses Heft soll dann auch die didaktische Aufarbeitung dieser neuen Mechanik zum Inhalt haben.

Der vorliegende Aufsatz ist eine Darstellung für einen Leser, der die Mechanik bereits kennt, und der sie auf die übliche Art kennengelernt hat, nämlich ausgehend von Weg, Zeit und Kraft über die Newtonschen Axiome.

Der wichtigste Teil des Aufsatzes besteht in der Behandlung von Impulsströmen. Bevor mit deren Diskussion begonnen werden kann, muß die Größe Impuls eingeführt und der Impulssatz behandelt sein. Es wird daher zunächst kurz eine

Möglichkeit der Einführung von Impuls und Impulssatz vorgestellt. Für die darauf folgende Behandlung der Impulsströme ist es aber nicht nötig, daß der Impuls gerade auf diese Art eingeführt wird. Wichtig ist nur, daß der Impuls bekannt ist als eigenständige, mengenartige Größe, als etwas, das ein Körper enthält, also nicht etwas, das man ihm nur „zuordnet“.

2. Impuls und Impulssatz

Definition des Impulses

Ein Körper, der sich bewegt, hat Schwung, oder wie der Physiker sagt, Impuls. In qualitativen Stoßversuchen auf der Luftkissenbahn zeigt man, daß

- der Impuls eines Körpers um so größer ist, je größer seine Masse ist und je größer seine Geschwindigkeit ist;
- sich der Impuls eines Körpers auf Kosten des Impulses eines anderen ändern kann;
- daß der Impuls ein Vorzeichen hat, daß es also negative und positive Impulswerte gibt (negativer und positiver Impuls kann sich kompensieren).

Wenn ein Körper der Masse m und der Geschwindigkeit v den Impuls P hat, so haben zwei Körper der Masse m und der Geschwindigkeit v doppelt so viel Impuls, allgemein

$$P \sim m.$$

Diese Proportionalität braucht keinen Beweis, denn wir suchen ja kein neues Naturgesetz, wir konstruieren eine neue Größe. Wir werden nachträglich sehen, ob die so konstruierte Größe vernünftige Eigenschaften hat, ob für sie einfache Gesetze gelten. Es wird nun eine Vereinbarung gesucht, die uns gestattet zu erkennen, wann zwei Impulse gleichgroß sind. Diese Vereinbarung lautet so: Mit jedem der Körper K_1 und K_2 , deren Impulse verglichen werden sollen, stoße man einen Vergleichskörper K_3 der Masse m und Anfangsgeschwindigkeit $v=0$, und zwar so, daß der Körper K_1 bzw. K_2 nach dem Stoß ruht, gleich-

gültig ob der Stoß elastisch oder inelastisch erfolgt. Die Impulse von K_1 und K_2 sind dann gleich, wenn der Körper K_3 nach den Stößen mit K_1 und K_2 dieselbe Geschwindigkeit hat. In Versuchen auf der Luftkissenbahn zeigt man, daß die Impulse P_1 und P_2 der Körper K_1 und K_2 dann gleich sind, wenn $m_1 v_1 = m_2 v_2$. Mit $P \sim m$ folgt daraus

$$P \sim mv. \quad (1)$$

Um zu erreichen, daß Körper K_1 bzw. K_2 nach dem Stoß in Ruhe ist, muß man das Ausmaß der Inelastizität des Stoßes regelbar machen. Das erreicht man zum Beispiel so, wie es die Abb. 1 zeigt. Um eine definierte Geschwindigkeit zu erhalten, bedient man sich einer „geschwindigkeitsstabilisierten“ Energiequelle, genauso wie man in der Elektrizitätslehre spannungstabilisierte Energiequellen benutzt. So eine Quelle stellt ein Gerät dar, das einen Faden so aufwickelt, daß die Geschwindigkeit des Fadens unabhängig von der Belastung ist. Später werden wir, in Analogie zum stromstabilisierten Netzgerät eine „impulsstromstabilisierte“ Energiequelle benutzen. Das ist wieder ein Gerät, das einen Faden aufwickelt, aber, wie wir sehen werden so, daß im Faden, unabhängig von der Geschwindigkeit, immer dieselbe Spannung herrscht. Wir wählen nun die Maßeinheit des Impulses so, daß aus der Proportionalität (1) eine Gleichung wird:

$$P = mv.$$

Den Impuls eines Körpers kann man also ausrechnen, wenn man Masse und Geschwindigkeit des Körpers kennt.

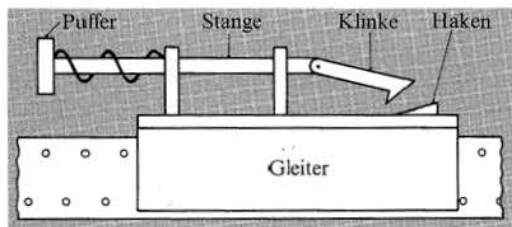


Abb. 1 Gleiter für Luftkissenbahn, der über den Puffer Stöße variabler Inelastizität ausführen kann. Bei einem Stoß wird die Feder zusammengedrückt, und die Stange bewegt sich zunächst nach rechts. Sie wird dann von der Feder wieder nach links gedrückt, aber nur so weit wie es die Klinke, die in den Haken einrastet, gestattet. Der Haken kann in Längsrichtung des Gleiters verschoben werden.

Der Impulssatz

In einer Reihe von Experimenten wird nun eine wichtige Eigenschaft des Impulses beobachtet: Impuls kann nicht erzeugt oder vernichtet wer-

den. Nimmt der Impuls eines Körpers zu, so nimmt gleichzeitig der Impuls eines anderen Körpers oder anderer Körper um denselben Betrag ab. Wir können nun unsere Meßvorschrift für den Impuls verallgemeinern: Man übertrage den zu messenden Impuls auf einen „Probekörper“ der Masse m_p , der sich vor der Impulsübertragung in Ruhe befindet und messe dessen Geschwindigkeit v_p nach der Impulsübertragung. Daraus ergibt sich der zu messende Impuls zu $P = m_p v_p$. Die Masse m_p des Probekörpers wählt man so groß, daß für seine Geschwindigkeit immer gilt $|v_p| \ll c$.

Daß diese Vorschrift einen Impuls zu messen, besser ist als die, Masse und Geschwindigkeit des Körpers einzeln zu bestimmen, erkennt man, wenn der Körper eine sehr große Geschwindigkeit hat, eine Geschwindigkeit, die nicht mehr klein gegen die Lichtgeschwindigkeit c ist. Der nach obiger Vorschrift gemessene Impuls ist immer noch eine Erhaltungsgröße. Hätte man dagegen an der Definition $P = mv$ festgehalten, so hätte man eine Größe definiert, die keinem Erhaltungssatz genügt.

3. Der Impulsstrom

Der Impulsstrom durch eine Feder

Beim Stoß zwischen zwei Körpern nimmt der Impuls des einen um einen bestimmten Betrag ab und der des anderen um denselben Betrag zu. Wir interpretieren dieses Verhalten, indem wir sagen, von dem einen zum anderen Körper fließe ein Impulsstrom I_p . Der Prozeß der Impulsübertragung soll nun genauer untersucht werden. Häufig macht man Stoßversuche so, daß die Zeit des Impulsaustausches sehr kurz ist, daß man also nur Anfangs- und Endzustand beobachten kann, um die Aufmerksamkeit auf die Bilanzen von Energie und Impuls zu lenken. Wenn wir uns für den Ablauf des Prozesses der Impulsübertragung interessieren, ist dieses Vorgehen unzumutbar. Es ist dann besser, die Impulsübertragung auf ein großes Zeitintervall auseinanderzuziehen, um das Verhalten bestimmter Größen auch zwischen Anfangs- und Endzustand beobachten zu können. Experimentell erreicht man das dadurch, daß man zwischen die beiden stoßenden Körper (etwa zwei Gleiter auf der Luftkissenbahn) eine weiche Feder schaltet, Abb. 2.

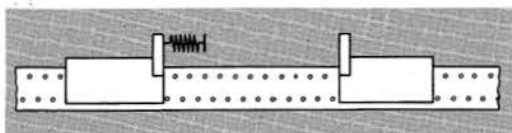


Abb. 2 Um den Stoßvorgang zeitlich auseinanderzuziehen, wird an einem der Stoßpartner eine weiche Feder angebracht.

Die Beobachtung zeigt, daß die Feder während des Stoßvorgangs ausgelenkt ist. Der Impulsstrom hängt also irgendwie mit dem Zustand der Feder zusammen. Für diesen Zusammenhang sind zunächst zwei Alternativen denkbar:

- Der Impulsstrom hängt von der Größe x , der Auslenkung der Feder, ab. Jedem Wert der Auslenkung entspricht ein bestimmter Wert des Impulsstroms.
- Der Impulsstrom hängt nicht von der Auslenkung selbst ab, sondern von deren zeitlicher Änderung.

Der Ablauf unseres Experiments ist so, daß es nicht leicht ist, zwischen diesen beiden Alternativen zu entscheiden, denn während der Impulsübertragung sind sowohl die Auslenkung x als auch ihre Zeitableitungen von Null verschieden. Das Experiment ist also zu kompliziert.

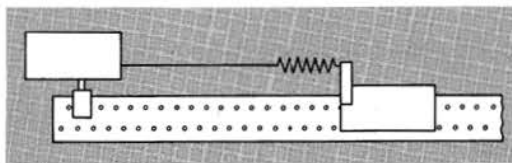


Abb. 3 Impulsübertragung bei konstanter Auslenkung der Feder. Der Kasten am linken Ende der Bahn ist eine impulsstromstabilisierte Energiequelle.

Wir vereinfachen deshalb die Bedingungen des Experiments: Der Impuls wird bei konstanter Auslenkung x übertragen, Abb. 3. Dazu benutzen wir das in Abschnitt 2 erwähnte Gerät, das eine Zugspannung konstanter Stärke liefert, eine Zugspannung die unabhängig ist von der Geschwindigkeit, mit der der Faden aufgerollt wird. Dieses Gerät wird am Ende der Luftkissenbahn befestigt. Über eine Feder wird es mit dem Gleiter verbunden, dessen Impulsänderung gemessen werden soll. Der „Stoß“ ist jetzt also ein Stoß zwischen Gleiter und Erde. Man beobachtet,

- daß bei konstanter Auslenkung der Feder der Impuls zunimmt;

- daß die Impulszunahme zeitlich konstant ist, $\frac{dP}{dt} = \text{const}$;
- daß bei größerer Auslenkung die Impulszunahme größer ist.

Wir haben damit das wichtige Ergebnis, daß die Auslenkung einer Feder ein Maß für den Impulsstrom ist, der durch sie hindurchfließt. Die Feder kann als Impulsstrommeßgerät benutzt werden. Sie braucht nur noch geeicht zu werden. Dazu könnte man nun eine Reihe von Experimenten der Art machen, wie sie gerade beschrieben wurden, jedes mit einer anderen Zugspannung. Man bekäme dann eine Zuordnung zwischen der Auslenkung x der Feder und der Impulsänderung dP/dt des Körpers, und damit des Impulsstroms I_P durch die Feder in den Körper. Man kann diese Eichung aber auch anders machen: Mit dem Experiment der Abb. 3 bestimmt man den Wert des Impulsstroms I_{P_0} für eine einzige Auslenkung x_0 . Der Rest der Eichung geschieht in einem Experiment, das viel einfacher ist.

Das Hookesche Gesetz

Wir haben gesehen, daß durch eine Feder, die um einen festen Betrag ausgelenkt ist, ein Impulsstrom fließt, und daß dessen Stärke nur vom Wert x der Auslenkung abhängt, nicht aber vom Bewegungszustand der Feder. Durch eine ausgelenkte Feder fließt also auch dann ein Impulsstrom, wenn die Feder ruht. Deswegen ist die Eichung auch an der ruhenden Feder ausführbar.

Wir verwenden dazu noch eine Regel, die für alle Ströme von Erhaltungsgrößen gilt (und die in der Elektrizitätslehre unter dem Namen „erstes Kirchhoffsches Gesetz“ bekannt ist): An einer Verzweigung ist die Summe aller Stromstärken gleich Null.

Für Federn bedeutet das, daß der Impulsstrom in zwei hintereinandergeschalteten Federn gleich groß ist, Abb. 4a, und daß der Impulsstrom in zwei parallel geschaltete Federn gleich der Summe der Impulsströme ist, die in den beiden Federn einzeln fließen, Abb. 4b.

Um nun eine Feder F_0 zu eichen, beschaffen wir uns zunächst eine ganze Reihe Federn F_i , die genauso gebaut sind wie F_0 . Für jede von ihnen gilt, daß ihre Auslenkung den Wert x_0 hat, falls der Impulsstrom den Wert I_{P_0} hat. Wir können nun Vielfache $n \cdot I_{P_0}$ des Impulsstroms I_{P_0} durch

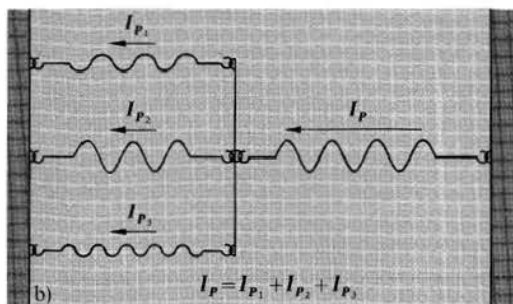
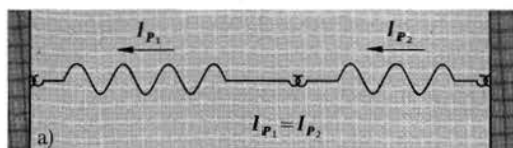


Abb. 4 Für Impulsströme gelten Gesetze, die zu den Kirchhoffschen Gesetzen analog sind.

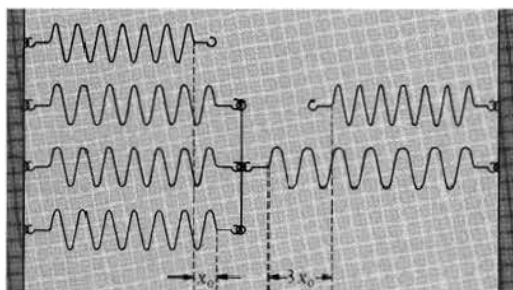


Abb. 5 Durch eine um x_0 ausgelenkte Feder fließt der Impulsstrom I_{P_0} . Durch drei parallel geschaltete um x_0 ausgelenkte Federn fließt $3I_{P_0}$. Dieser Impulsstrom bewirkt bei der rechten Feder die Auslenkung $3x_0$.

F_0 fließen lassen, indem wir n Federn F_i parallel schalten, alle zusammen zu F_0 in Reihe schalten und so stark spannen, daß jede der Federn F_i um x_0 ausgelenkt ist, Abb. 5.

Wir glauben, daß das Verfahren hinreichend erläutert ist, und daß es dem Leser klar ist, wie man durch Kombinieren der Federn F_i auch alle Zwischenwerte von I_P konstruieren kann.

Diese Experimente haben nun ein überraschendes Ergebnis. In einem großen Bereich gilt:

$$x \sim I_P.$$

Diese Proportionalität nennt man das *Hookesche Gesetz*.

Impulsstrom und Kraft, das zweite Newtonsche Axiom

Wir haben im vorigen Abschnitt eine Meßvorschrift für den Impulsstrom angegeben. Diese ist identisch mit der Meßvorschrift, mit der traditio-

nell oft die Kraft definiert wird. Das bedeutet aber, daß Kraft und Impulsstrom identisch sind. Kraft ist nichts weiter als ein anderer Name für Impulsstrom:

$$F \equiv I_P.$$

Mit dieser Identifizierung bekommt das zweite *Newtonsche Axiom* $F \equiv I_P = dP/dt$ einen sehr einfachen Inhalt: Der Impuls eines Körpers kann sich nur durch Zu- oder Abfluß ändern. Das zweite *Newtonsche Axiom* ist also nichts anderes als der Impulssatz, ausgedrückt in Form einer Kontinuitätsgleichung. Eine Kontinuitätsgleichung gilt aber für jede Erhaltungsgröße.

Geschlossene Impulsstromkreise

Eine Konsequenz unserer Betrachtungen war, daß durch gespannte Federn Impuls fließt. Damit fließt natürlich Impuls auch durch gespannte Seile oder durch unter Spannung stehende Stangen und andere Körper. Das bedeutet, daß stationäre mechanische Gebilde, wie sie in der Statik betrachtet werden, von Impulsströmen durchflossen werden. Da sich nirgends Impuls anhäuft, und der Impuls nirgends abnimmt, müssen diese Ströme Kreisströme sein. Die Behandlung der Statik würde den Rahmen dieses Aufsatzes sprengen. Es soll hier deshalb nur ein besonders einfacher Impulsstromkreis besprochen werden: Ein unverzweigter Stromkreis, Abb. 6.

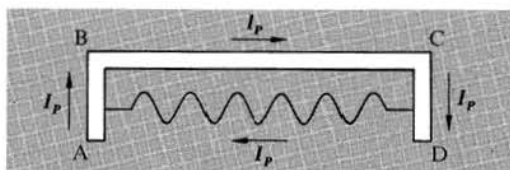


Abb. 6 Geschlossener Impulsstromkreis

In der Stange zwischen B und C fließt der Impuls von links nach rechts, in der Feder von rechts nach links. Daß der Impulsstrom in der Stange die entgegengesetzte Richtung hat wie in der Feder, erkennt man daran, daß in der Stange eine Druckspannung, in der Feder aber eine Zugspannung herrscht. Fließt der Impuls quer zu seiner eigenen Richtung, wie in den beiden Querstangen AB und CD, so herrscht in dem Körper eine Scherspannung.

Da die Anordnung symmetrisch ist, könnte man annehmen, der Impulsstrom müsse „aus Symmetriegründen“ überall gleich Null sein. Dieser

Schluß ist aber falsch. Die Situation ist hier dieselbe wie im elektrischen Fall: Da die strömende Größe zweierlei Vorzeichen fähig ist, hat man die Freiheit, die Stromrichtung willkürlich festzulegen. Das sieht man besonders gut, wenn man die Anordnung der Abb. 7 betrachtet, bei der zwischen Körper A und Körper B ein Impulsstrom fließt und bei der Impulsänderungen auftreten. Man kann den Prozeß auf zwei Arten beschreiben: entweder indem man sagt, positiver Impuls fließe von rechts nach links oder indem man sagt, negativer Impuls fließe von links nach rechts. Man legt nun eine dieser beiden Richtungen als Stromrichtung fest, etwa die, die der Flußrichtung von positivem Impuls entspricht. Dann hat man es so gemacht wie im elektrischen Fall. Auch hier kann man einen bestimmten Ladungsstrom beschreiben indem man entweder sagt: negative Ladung fließt von links nach rechts oder positive Ladung von rechts nach links. Man hat sich entschieden, als Stromrichtung die Richtung zu wählen, die der Beschreibung mit der positiven Ladung entspricht.

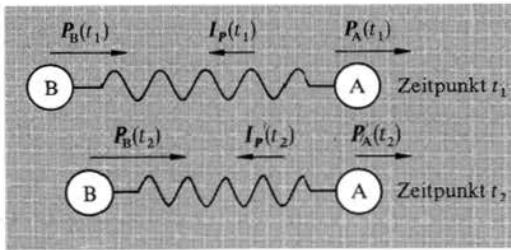


Abb. 7 Über die gespannte Feder wird zwischen Körper A und Körper B Impuls ausgetauscht. Bezeichnet man einen nach rechts weisenden Impulsvektor als positiv, so kann man den Impulsstrom beschreiben entweder als positiven Impuls, der von rechts nach links strömt, oder als negativen Impuls der von links nach rechts strömt.

Beim Impuls hat man nun noch eine weitere Wahlfreiheit, und zwar in jedem Experiment aufs neue: die Richtung, die man als positive Impulsrichtung (nicht Stromrichtung) bezeichnet, also die Wahl des Koordinatensystems. Meist nennt man einen nach rechts weisenden Vektor positiv, und einen nach links weisenden negativ. Im elektrischen Fall brauchte man die analoge Festlegung nur ein einziges Mal zu treffen. Die Anode (definiert durch den Stoff aus dem sie besteht) einer Batterie ist positiv, die Kathode negativ*.

* Wenn wir in einer Welt lebten, in der Materie und Antimaterie gemischt auftreten, könnten wir nicht mehr entscheiden, ob eine Anode positiv oder negativ ist, und wir wären in derselben Situation, in der wir beim Impuls sind.

Das dritte Newtonsche Axiom

Die herkömmliche Formulierung des dritten Newtonschen Axioms lautet etwa:

„Wirkt ein Körper A auf einen Körper B mit der Kraft F , so greift B an A mit der gleichgroßen, aber entgegengesetzt gerichteten Kraft $-F$ an.“

Wir wollen diesen Satz übersetzen, so daß sich eine Aussage über den Impulsstrom ergibt. Dazu ist nicht nur das Wort Kraft durch das Wort Impulsstrom zu ersetzen, sondern auch Verben und Präpositionen müssen übersetzt werden, denn man sagt: Ein Körper übt auf einen anderen eine Kraft aus, aber ein Impulsstrom fließt von einem Körper zu einem anderen. Das dritte Newtonsche Axiom lautet also:

„Fließt ein Impulsstrom von einem Körper A zu einem Körper B, so ist die Stärke des Stroms, der A verläßt, gleich der Stärke des Stroms, der bei B ankommt.“

In dieser Form sieht man, daß das dritte wie das zweite Newtonsche Axiom Ausdruck des Impulssatzes ist.

Kräftegleichgewicht

Auf analoge Weise soll nun der Satz vom Kräftegleichgewicht übersetzt werden. Aus dem Satz

„Ein frei beweglicher Massenpunkt befindet sich im Gleichgewicht, wenn die Summe aller auf ihn wirkenden Kräfte gleich Null ist.“

wird

„Der Impuls eines frei beweglichen Massenpunktes ändert sich nicht, wenn die Summe aller in ihn hineinfließenden Impulsströme gleich Null ist.“

An dieser Formulierung ist sehr unschön, daß ein Strom durch einen Punkt fließen soll. Schuld daran ist natürlich der Massenpunkt, den es in Wirklichkeit nicht gibt. Man kann übrigens feststellen, daß jeder Widerspruch, den man entdeckt, wenn man eine Aussage über Kräfte in eine Aussage über Impulsströme übersetzt, bereits ein Widerspruch in der Formulierung mit den Kräften ist, hier aber wegen der geringen Anschaulichkeit des Kraftbegriffs nicht so stark ins Auge fällt.

Eine bessere Formulierung des Satzes vom Kräftegleichgewicht lautet etwa so:

„Die Stärke des Impulsstroms, der von einer Seite in eine beliebige Fläche hineinströmt, ist gleich der Stärke des Impulsstromes der auf der anderen Seite der Fläche wieder herausströmt.“

Dies ist wieder nur eine spezielle Aussage des Impulssatzes.

Die Rolle der Newtonschen Axiome

Wir haben gesehen, daß das zweite und dritte *Newtonsche* Axiom nicht mehr sind als Folgerungen aus dem Impulssatz. Für das erste *Newtonsche* Axiom als Spezialfall des zweiten gilt das natürlich erst recht. Die *Newtonschen* Axiome zusammen sind äquivalent zum Impulssatz der Mechanik. Betrachtet man andere Zweige der Physik, so sieht man, daß es hier ähnliche Grundgesetze gibt, etwa den Ladungserhaltungssatz oder den Drehimpulserhaltungssatz. In Darstellungen der Physik spielen diese aber eine viel unbedeutendere Rolle als die *Newtonschen* Axiome, also der Impulssatz. Nur Energiesatz (als erster Hauptsatz) und Entropiesatz (als zweiter Hauptsatz) haben eine vergleichbare Bedeutung. Der Ladungserhaltungssatz dagegen wird meist nicht eines einzigen Wortes gewürdigt, obwohl man natürlich von ihm Gebrauch macht. Wir schlagen vor, diese Ungleichheit oder Unsymmetrie in der Darstellung der Physik soweit abzubauen, daß mindestens die Größen Impuls, Drehimpuls, Entropie, elektrische Ladung und Menge (Stoffmenge) gleichberechtigt erscheinen.

Selbstverständlich gibt es noch andere Erhaltungsgrößen, etwa die Baryonenzahl oder die Leptonenzahl. Deren Behandlung wird man aber im Elementarunterricht viel weniger Zeit widmen, weil sie in der „Physik des Alltags“ nicht von Bedeutung sind.

Energietransport mit dem Energieträger Impuls

Ein physikalisches System kann seine Energie ändern, indem es gleichzeitig seinen Impuls ändert. Für den Zusammenhang zwischen der Änderung dE der Energie und der Änderung dP des Impulses gilt

$$dE = v dP,$$

wobei v die Geschwindigkeit des Körpers ist. Man sagt, die Energie des Körpers ändere sich in Form von Bewegungsenergie.

Durch einen Treibriemen oder durch ein gespanntes, sich bewegendes Seil fließt ein Strom von Bewegungsenergie

$$I_E = v I_P. \quad (2)$$

Der Impuls ist hier der Energieträger und die Geschwindigkeit spielt die Rolle des Beladungsmaßes des Impulsstroms mit Energie.

Die Herleitung der Gl. (2) erfolgt etwas anders als etwa die Herleitung der Gleichung

$$I_E = UI_Q. \quad (3)$$

(U ist die elektrische Spannung, I_Q der elektrische Strom.) Um auf Gl. (3) zu kommen, beginnt man mit $I_E \sim I_Q$, was aus der Mengenartigkeit von E und Q folgt. Gl. (3) ist dann einfach die Definitionsgleichung des Beladungsmaßes U des Energieträgers.

Gl. (2) dagegen kann man nicht als Definitionsgleichung der Geschwindigkeit benutzen, da die Geschwindigkeit jedem Schüler aus der alltäglichen Erfahrung bereits bekannt ist. Hier muß man also *beweisen*, daß die Geschwindigkeit das Beladungsmaß des Impulsstromes mit Energie ist.

Man wird dazu ungefähr folgendermaßen vorgehen: Daß $I_E \sim I_P$ ist, sieht man leicht daran, daß durch zwei Treibriemen, in denen die gleiche Spannung herrscht, durch die also der gleiche Impulsstrom fließt, und die gleich schnell laufen, doppelt so viel Energie fließt wie durch einen einzigen (Abb. 8):

$$I_E \sim I_P.$$

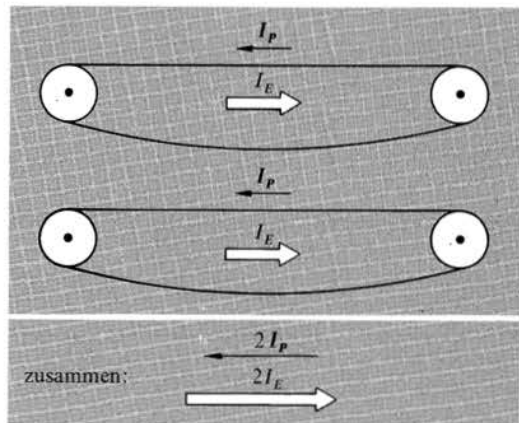


Abb. 8 Durch zwei Treibriemen, die gleich schnell laufen und unter der gleichen Spannung stehen, fließt zweimal so viel Impuls und zweimal so viel Energie wie durch einen einzigen.

Man diskutiert nun Hebel, Flaschenzüge und Getriebe, und findet, daß etwa für eine Anordnung wie sie Abb. 9 zeigt,

$$v_1 I_{P_1} = v_2 I_{P_2}$$

gilt. Diese Gleichung besagt, daß man ein und denselben Energiestrom von einem kleinen oder einem großen Impulsstrom tragen lassen kann. Der kleine Impulsstrom muß nur stärker mit Energie beladen sein als der große. Das Beladungsmaß ist die Geschwindigkeit. Es gilt also

$$I_E \sim v I_P.$$

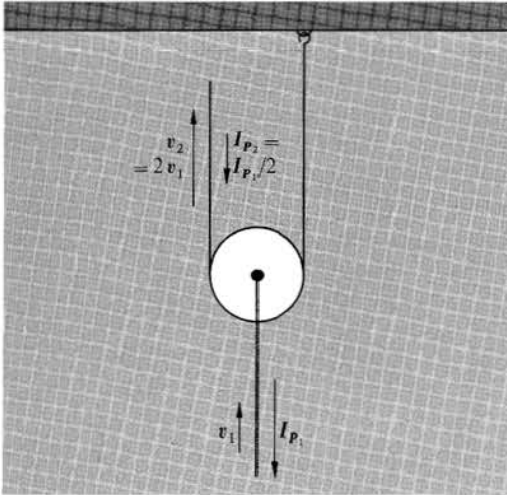


Abb. 9 Bei Hebeln und Flaschenzügen gilt $v I_P = \text{const.}$

Wenn die Maßeinheiten geeignet gewählt werden, kann man schreiben

$$I_E = v I_P.$$

Das Joule ist gerade so gewählt, daß I_E in J/s herauskommt, wenn man v in m/s und P in kg m/s mißt.

In einer statischen, d.h. ruhenden Anordnung von unter mechanischer Spannung stehenden Stangen oder Seilen, etwa einem Hochspannungsmast, fließen zwar Impulsströme, aber wegen $v=0$ keine Energieströme, wie es auch zu erwarten ist. So eine Anordnung ist analog zu einem supraleitenden elektrischen Stromkreis, in dem elektrische Ladung fließen kann, ohne daß Energie transportiert wird.

Das Schema einer Anordnung aus Energiequelle und Energieempfänger, bei der Energie mit dem Energieträger Impuls übertragen wird, ist in

Abb. 10 dargestellt. Die Quelle ist hier ein Elektromotor, der Empfänger eine Kreissäge. Übertragen wird die Energie mit einem Treibriemen.

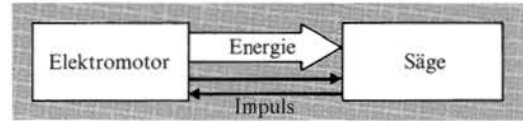


Abb. 10 Wird Energie mit einem Treibriemen übertragen, so ist der Impuls Energieträger.

Der Impuls fließt durch den gespannten Teil des Riemen in die eine Richtung, etwa von Quelle zu Empfänger, und über die Gehäuse, die Befestigungen und die Erde zurück zur Quelle (nicht durch den ungespannten Teil des Riemen!).

Wir wollen noch Energie- und Impulsstrom in der Anordnung der Abb. 11 verfolgen: Ein Klotz wird von einer Seilwinde über eine raue Fläche gezogen. An der Berührungsfläche entsteht Wärme. Der Impuls fließt hier von der Seilwinde durch das Seil in den Klotz, und über die Berührungsfläche durch die Erde zurück zur Seilwinde. Die Energie fließt mit dem Impuls durch das Seil, durch den Klotz bis zur Berührungsfläche, wird hier auf Entropie umgeladen, die an der Berührungsfläche erzeugt wird, und fließt in verschiedene Richtungen ab.

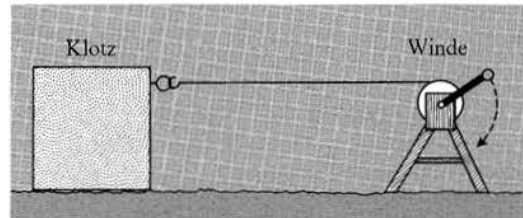


Abb. 11 Der Impuls strömt durch das Seil von der Winde zum Klotz und durch die Erde zurück zur Winde. Die Energie strömt von der Winde durch das Seil zum Klotz. An der Berührungsfläche zwischen Klotz und Erde wird Entropie erzeugt. Mit der Entropie fließt die Energie in verschiedene Richtungen ab.

Diese Deutung der Vorgänge, die im Experiment der Abb. 11 ablaufen, ist einfach und anschaulich. Die Deutung unter Verwendung des Wortes Kraft ist schwieriger und wirft die bekannten Fragen auf: „Ist die Kraft im Seil nicht gleich Null, der Klotz zieht doch an der Winde genauso stark wie die Winde am Klotz?“, oder „ist nicht die Kraft auf den Klotz gleich Null, am Klotz ziehen doch zwei gleich große Kräfte in entgegengesetzter Richtung?“.

4. Schlußfolgerungen

Zusammenfassend wollen wir die Vorteile einer Darstellung der Mechanik, in der man nicht von der Kraft zum Impuls kommt, sondern vom Impuls zum Impulsstrom, aufzählen:

- (1) Das Wort Impulsstrom hat gegenüber dem Wort Kraft den Vorteil, daß es ausdrückt, daß eine mengenartige Größe strömt. Für mengenartige Größen und ihre Ströme haben wir eine sehr gute Anschauung.
- (2) Die Aussage der *Newtonschen* Grundgesetze wird sehr einfach, fast selbstverständlich.
- (3) Der Aufbau der ganzen Physik wird einfacher: Die *Newtonschen* Grundgesetze spielen in der Mechanik dieselbe Rolle wie etwa die Ladungserhaltung in der Elektrizitätslehre.
- (4) Trugschlüsse, die mit dem dritten Newtonschen Axiom oder dem Satz über das Kräftegleichgewicht zusammenhängen, können nicht mehr entstehen.

Konduktive und konvektive Energieträgerströme

Energietransporte kann man in verschiedene Kategorien einteilen. Üblicherweise werden für Transporte mit unterschiedlichen Energieformen unterschiedliche Kriterien der Klassifizierung angewendet. So unterscheidet man beim Wärmetransport zwischen Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung, beim elektrischen Energietransport zwischen Normal- und Supraleitung. Diesen Einteilungen sieht man zunächst keine Systematik an, die sich auf Energietransporte mit jedem beliebigen Energieträger anwenden ließe. Tatsächlich ist es aber nicht schwer, zu einer Systematik zu gelangen. Dazu ist es zunächst nötig, daß wir unsere bisherige Vorstellung von einem Energietransport als einem kombinierten Strom von Energie und Energieträger erweitern und präzisieren.

1. Energietransporte als Bündel von Strömen mengenartiger Größen

Jeder Energiestrom ist mit dem Strom einer weiteren mengenartigen Größe, des Energieträgers, verknüpft: Beim Transport elektrischer Energie fließt außer Energie noch elektrische Ladung, beim Transport von Wärme fließt außer Energie noch Entropie, beim Transport chemischer Energie fließt außer Energie noch Menge. Bei jedem realen Transport ist jedoch damit zu rechnen, daß neben der Energie nicht nur eine einzige mengenartige Größe strömt, sondern im allgemeinen mehrere, ein ganzes Bündel solcher Größen, von denen zunächst jede als Energieträger in Betracht kommt.

Daß es strömende mengenartige Größen gibt, die nicht Energieträger sind, mag zunächst überraschen, verknüpft doch die *Gibbssche Fundamentalform* den Strom jeder mengenartigen Größe X_i mit der Energie:

$$dE = \sum_i \xi_i dX_i.$$

Daß eine Größe X_i nicht Energieträger ist, kann zwei Ursachen haben:

(1) Die zugehörige intensive Größe ist gleich Null. In unserer Sprechweise ist der Energieträger dann nicht mit Energie beladen, er ist leer. Das ist z. B.

der Fall für die Menge bei der Energieübertragung durch Licht. Die Menge gehört zwar zu dem strömenden Größenbündel „Licht“, sie ist aber nicht Energieträger, da das chemische Potential des Lichts gleich Null ist.

(2) Der Energietransport geschieht über zwei Leitungen oder Verbindungen, wie etwa der elektrische Transport durch ein aus zwei Drähten bestehendes Kabel, oder der Energietransport vom Heizkessel zu einem Zentralheizungskörper durch zwei Rohre.

Wenn der Strom einer bestimmten Größe X_i in der Hin- und Rückleitung gleich stark beladen ist, wenn also der Wert von ξ_i in Hin- und Rückleitung derselbe ist, resultiert keine Netto-Energieübertragung. So gehören zu dem strömenden Größenbündel „Elektronen“ die elektrische Ladung Q , die Menge n und die Entropie S . Für den Energiestrom durch das Kabel schreiben wir deshalb

$$I_E = (\varphi_2 - \varphi_1) I_Q + (\mu_2 - \mu_1) I_n + (T_2 - T_1) I_S,$$

wobei sich die mit 1 indizierten Größen auf den einen und die mit 2 indizierten auf den anderen Draht beziehen. Die Werte des chemischen Potentials μ und die der Temperatur T sind aber in den beiden Leitungen normalerweise dieselben: $\mu_1 = \mu_2$ und $T_1 = T_2$. Sowohl Entropie- als auch Mengenstrom sind also in Hin- und Rückleitung gleich stark mit Energie beladen, sie liefern keinen Beitrag zum Gesamtenergiestrom und es gilt

$$I_E = (\varphi_2 - \varphi_1) I_Q.$$

Wir sagen, nur die elektrische Energie sei Energieträger.

2. Dissipative Energietransporte

Unter dissipativen Energietransporten versteht man Energietransporte, bei denen auf dem Transportweg Entropie erzeugt wird. Da ein Teil der transportierten Energie auf die erzeugte Entropie umgeladen wird, ändert sich bei einem solchen Transport zwangsläufig der Beitrag einer der an-

deren mengenartigen Größen zum Gesamtenergiestrom.

Der elektrische Energietransport durch ein (nichtsupsraleitendes) Kabel ist ein entropieerzeugender oder dissipativer Transport. Wird auf dem Transportweg der Entropiestrom I_S erzeugt, so wird vom Energieträger elektrische Ladung ein Energiestrom vom Betrag TI_S auf den Entropiestrom umgeladen. T ist hier die Temperatur des Drahtes. Der Energiestrom, den die elektrische Ladung trägt, nimmt um diesen Betrag ab. Da der elektrische Strom selbst überall im Draht denselben Wert hat, kann diese Abnahme nur durch die Abnahme des elektrischen Potentials zustande kommen:

$$TI_S = (\varphi_2 - \varphi_1) I_Q = UI_Q.$$

Zwischen den Drahtenden entsteht also die Spannung $U = \varphi_2 - \varphi_1$. Man kann diesen Sachverhalt folgendermaßen interpretieren: Da der elektrische Strom mit einer Spannung zwischen den Drahtenden verknüpft ist, und insbesondere der elektrische Strom dann gleich Null ist, wenn auch die Spannung gleich Null ist, kann man sagen, die Spannung sei die „Ursache“, der „Antrieb“ des Stroms. Der Strom will eigentlich gar nicht fließen, weil er dann Entropie erzeugen muß, und das tut er nicht gern, oder, in anderen Worten, weil ihm der Draht einen Widerstand entgegen setzt. Deshalb bedarf es des Antriebs elektrische Spannung.

Bei jedem dissipativen Strom gibt es eine intensive Größe ξ_i , deren Wert sich entlang des Transportwegs ändert, die also am Anfang und am Ende des Wegs unterschiedliche Werte ξ_{i1} und ξ_{i2} hat. In jedem Fall kann man, wie oben die elektrische Spannung, diese Differenz $\Delta \xi_i = \xi_{i2} - \xi_{i1}$ als Antrieb des Stroms der zugehörigen mengenartigen Größe X_i interpretieren. Wenn an den Strom von X_i Ströme anderer Größen X_j und der Strom der Energie gekoppelt sind, ist $\Delta \xi_i$ auch der Antrieb all dieser anderen Ströme.

Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, daß die Darstellung von $\Delta \xi$ als Antrieb eines Stroms I_X nur eine Sprechweise, ein Bild ist. Die physikalische Aussage „wenn der Strom zunimmt, dann nimmt auch die Spannung zu“ sagt nichts darüber, ob der Strom die Ursache der Spannung ist („ein elektrischer Strom verursacht an einem Widerstand einen Spannungsabfall“) oder ob die Spannung die Ursache des Stroms ist („die elektrische Spannung zwischen den Enden des Widerstands verursacht einen Strom durch den Widerstand“).

3. Konduktive und konvektive Ströme

Obwohl sich die Beladungsmaße ξ mehrerer Größen X längs des Transportwegs ändern können, der Energietransport also mehrere Antriebe haben kann, gibt es in vielen Fällen mit praktischer Bedeutung nur *einen* Antrieb. Ist das der Fall, so ist unter den zu einem Energietransport gehörigen Strömen der Größen X_j eine Größe X_i ausgezeichnet: diejenige, deren Beladungsmaß ξ_i sich auf dem Transportweg ändert. $\Delta \xi_i$ ist der Antrieb von I_{X_i} , und I_{X_i} nimmt alle anderen Ströme I_{X_j} mit. Man sagt, der Strom I_{X_i} sei ein *konduktiver* Strom, die Ströme I_{X_j} seien *konvektive* („mitgenommene“) Ströme.

So ist im Beispiel des elektrischen Energietransports durch einen Draht der elektrische Strom ein konduktiver Strom, die Ströme der Menge n und der Entropie S der Elektronen sind konvektive Ströme.

Beim Strom von warmem Wasser durch ein waagrechtes* Zentralheizungsrohr ist der Antrieb eine Differenz des Drucks zwischen den Rohrenden und damit eine Differenz der chemischen Potentiale. Folglich ist hier der Mengestrom ein konduktiver, der Entropiestrom dagegen ein konvektiver Strom.

Bei einem Wärmestrom durch die Wand eines geheizten Hauses ist der Antrieb ein Temperaturunterschied. Folglich ist hier der Entropiestrom ein konduktiver Strom.

In allen Fällen, die in unserem Zusammenhang von Interesse sind, ist der Energiestrom ein konvektiver Strom, denn er wird immer von einem Energieträgerstrom mitgenommen. Für den Energiestrom selbst gibt es keinen Potentialunterschied. Diese Aussage ist allerdings nur beschränkt gültig, denn selbstverständlich hat auch die Energie ein Potential: das Gravitationspotential. Allerdings ist dessen Wirkung nur merklich bei sehr großen Energiedichten, nämlich bei Strömen von Ruhenergie, und damit von Masse. Diese haben wir in der *Gibbsschen Fundamentalform* als gesonderten Term behandelt.

* Bei einem senkrechten Rohr im Schwerfeld kann es passieren, daß trotz eines Druckunterschieds zwischen den Rohrenden kein Strom fließt, der Druckunterschied ist sogar nötig, um den Zustand der Stromlosigkeit aufrecht zu erhalten. Daran sieht man, daß der Druck, und damit das chemische Potential, hier nicht die geeignete Größe zur Beschreibung ist. Tatsächlich ist auch die zur Menge gehörige intensive Größe nicht der Druck, sondern das gravito-chemische Potential.

Jeder Energieträger kann sowohl konduktiv als auch konvektiv strömen. Für die vier Größen elektrische Ladung, Entropie, Menge und Impuls sollen dazu einige Beispiele angegeben werden.

Der elektrische Strom

Mit einem Elektronenstrom durch einen normalleitenden Draht sind die Ströme I_Q , I_n , I_S und I_P verknüpft. Der Antrieb ist die elektrische Spannung, so daß I_Q ein konduktiver Strom ist. I_n , I_S und I_P sind konvektive Ströme.

Bei einem Bandgenerator wird elektrische Ladung von einem Gummiband mitgenommen. Der elektrische Strom I_Q ist hier ein konvektiver Strom. I_Q fließt sogar seinem eigenen Antrieb entgegen. Auch im Innern von galvanischen und Solarzellen wird elektrische Ladung von einem Mengenstrom gegen das elektrische Potentialgefälle mitgenommen.

Wenn ein Gewitter entsteht, fließt ebenfalls ein konvektiver elektrischer Strom: Elektrische Ladung wird von Wassertropfchen mitgenommen.

Der Entropiestrom

Wie bereits diskutiert, ist der Entropiestrom durch ein Zentralheizungsrohr ein konvektiver, der Entropiestrom durch eine Hauswand ein konduktiver Strom.

Konvektive Entropieströme spielen in der Natur eine große Rolle. Sie bestimmen in hohem Maße den Wärmehaushalt der Erde. In den warmen Gegenden wird Wasser verdampft und dabei mit Entropie beladen. Der Wasserdampf wird mit den Passatwinden, d.h. einem Mengenstrom, angetrieben durch einen Druckunterschied, in kältere Gegenden transportiert. Hier kondensiert das Wasser – es regnet –, und dabei wird die Entropie vom Wasser an die kalte Umgebung abgegeben. Ohne dieses Phänomen wären die Temperaturunterschiede zwischen warmen und kalten Regionen und damit auch zwischen Sommer und Winter viel größer.

Der Mengenstrom

Ein konduktiver Mengenstrom liegt immer vor, wenn ein Materiestrom durch eine Pumpe bewirkt wird. Zum Erdölstrom durch eine Pipeline gehört also ein konduktiver Mengenstrom. Zu jedem Diffusionsvorgang gehört aber auch ein

konduktiver Mengenstrom: Menge fließt vom hohen chemischen Potential zum niedrigen.

Ein konvektiver Mengenstrom liegt dagegen vor, wenn Erdöl mit Schiffen transportiert wird, oder wenn Elektronen durch einen nichtsupraleitenden Draht fließen.

Der Impulsstrom

Konduktive Impulsströme sind eine sehr verbreitete Erscheinung. Wahrscheinlich ist das aber dem Leser, der die Mechanik auf herkömmliche Art gelernt hat, nicht bewußt. Deshalb beschreiben wir hier eine Anordnung, bei der ein konduktiver Impulsstrom eine Rolle spielt, die etwas künstlich erscheinen mag, die es aber gestattet, mit den Mitteln der herkömmlichen Mechanik zu argumentieren.

Ein Körper, dessen untere Begrenzungsfläche eben ist, soll auf einer ebenen waagrechten Unterlage gleiten können (Abb. 1). Zwischen Körper und Unterlage befindet sich zur Schmierung ein Ölfilm. Der Körper sei angestoßen worden, so daß er den Impuls $P_0 = m v_0$ hat. Wir wollen den Vorgang des Abbremsens des Körpers durch die Reibung auf der Unterlage betrachten. Der Impuls des Körpers ist am Anfang des Bremsvorganges P_0 , am Ende gleich Null. Der Impuls P_0 muß also beim Bremsen abgefließen sein, und zwar durch den Ölfilm zur Unterlage. Bei diesem Abfließen wird Entropie erzeugt, der Impulsstrom ist also dissipativ. Der Impuls strömt vom Körper, der eine Geschwindigkeit $0 \leq v \leq v_0$ hat, zur Unterlage, die die Geschwindigkeit Null hat. Nun ist v die zum Impuls gehörige intensive Variable, also das Beladungsmaß des Impulsstroms mit Energie. Der Geschwindigkeitsunterschied zwischen Körper und Unterlage ist also der Antrieb des Impulsstroms zwischen Körper und Unterlage. Der Impulsstrom ist damit konduktiv.

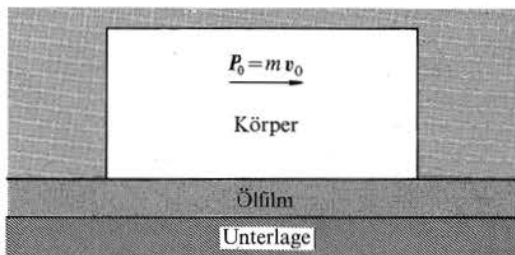


Abb. 1 Ein Körper mit dem Anfangsimpuls $P_0 = m v_0$ wird durch die Reibung mit der Unterlage gebremst. Dabei fließt ein Impulsstrom vom Körper durch den Ölfilm in die Unterlage.

Konvektive Impulsströme dürften dem Leser vertraut sein. Der Impuls, der durch den Regen transportiert wird, strömt konvektiv, denn der Antrieb der mit konstanter Geschwindigkeit fallenden Regentropfen ist kein Geschwindigkeitsunterschied zwischen Wolke und Erde, sondern ein Unterschied im Gravitationspotential.

4. Nichtdissipative Energietransporte

Bei nichtdissipativen Energietransporten wird auf dem Transportweg keine Entropie erzeugt.

Daß von einem Strom keine Entropie erzeugt wird, kann einen einfachen Grund haben: Der strömende Stoff fließt im Vakuum. Er hat keine Gelegenheit zur Wechselwirkung und damit zur Dissipation. Zu dieser Art nichtdissipativer Energieströme gehören etwa

- Körper, die sich im Vakuum bewegen;
- Elektronen in einer Elektronenröhre;
- Licht im Vakuum.

Als ungewöhnlich empfindet man es, wenn ein Energietransport dissipationsfrei durch ein materielles Medium oder durch Rohre hindurchläuft.

Solche Transporte nennt man Supraströme. Zu ihnen gehört

- supraflüssiges Helium; es strömt dissipationsfrei durch Rohre;
- Elektronen in Supraleitern;
- der Impulsstrom durch ein ruhendes gespanntes Seil.

Den Transporten mit Supraströmen ist gemeinsam, daß bei ihnen der Mengenstrom I_n gleich Null ist. Man kann sie sich entstanden denken aus dissipativen Transporten, indem man die Temperatur so weit senkt, daß die Teilchen kondensieren zu einem einzigen sehr großen Teilchen. Menge und Mengenstrom nehmen dabei sehr stark ab. Die Elektronen, die für die Leitung in einem Supraleiter verantwortlich sind, bilden, genauso wie die Heliumatome von supraflüssigem Helium, ein einziges Teilchen. Analoges gilt übrigens auch für eine kohärente elektromagnetische und für eine kohärente Schallwelle. Streng genommen müßte man diese also auch als Supraströme bezeichnen. Äquivalent zu der Aussage, daß die Teilchen zu einem einzigen Teilchen kondensieren ist die Aussage, die Teilchen verlieren ihre Entropie. In Supraströmen sind also sowohl Mengen- als auch Entropiestrom gleich Null (Siehe zu diesen Fragen auch den Aufsatz von G. Falk, in Heft 2 der *Konzepte eines zeitgemäßen Physikunterrichts*).

G. Falk, F. Herrmann

Konzepte eines zeitgemäßen Physikunterrichts

Die Schriftenreihe umfaßt bisher folgende Hefte:

**Heft 1: Thermodynamik – nicht Wärmelehre sondern
Grundlage der Physik**

1. Teil: Energie und Entropie

ISBN 3-507-76081-9 56 Seiten (erschienen 1977)

Inhalt:

F. Herrmann

Energie und Energieformen

M. Fleig

Einführung der Energie
in der Sekundarstufe I

F. Herrmann

Entropie in der Schule

G. Falk

Eine Einführung der Entropie –
Thema eines Leistungskurses

W. Ruppel

Entropie und Wärme

**Heft 2: Thermodynamik – nicht Wärmelehre sondern
Grundlage der Physik**

2. Teil: Das Größenpaar Menge und chemisches Potential

ISBN 3-507-76082-7 80 Seiten (erschienen 1978)

Inhalt:

I. Die Größe „Menge“

G. Falk

Was ist eigentlich Atomistik? –
oder:

Die physikalische Größe „Menge“

W. Möller

Die allgemeine Gasgleichung

P. Würfel

Die Menge von Licht

II. Die Größe „chemisches Potential“

W. Stöbel

Chemische Energie und
chemisches Potential

F. Herrmann

Chemische Energie in der Schule?

G. Job

Das chemische Potential im Physik- und
Chemie-Elementarunterricht

Mit diesem zweiten Heft wird das Generalthema des ersten fortgesetzt, nämlich zu zeigen, daß die traditionell zur Thermodynamik gerechneten Begriffe zu den Fundamenten der ganzen Physik gehören. Im ersten Heft ging es um die beiden Größen **Energie** und **Entropie**, hier geht es um die Größen **Stoffmenge**, oder kurz Menge, und **chemisches Potential**.

**Heft 3: Ein moderner Physikkurs für Anfänger
und seine Begründung**

ISBN 3-507-76083-5 92 Seiten

Weitere Hefte in Vorbereitung