

Weißgerber

Physikalische  
Arbeitsbücher 3

# Hans Joachim Schlichting

## Energie und Energieentwertung



Quelle & Meyer

# Physikalische Arbeitsbücher

Herausgegeben von  
Jörn Bruhn

3

Hans Joachim Schlichting

Energie  
und  
Energieentwertung

in Naturwissenschaft und Umwelt

Arbeitsbuch für Schüler  
der Sekundarstufen I und II

Quelle & Meyer Heidelberg

### **CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek**

*Schlichting, Hans Joachim:*

Energie und Energieentwertung in Naturwissenschaft und Umwelt/Hans Joachim Schlichting. – Heidelberg: Quelle und Meyer, 1983.

(Physikalische Arbeitsbücher; 3)

ISBN 3-494-01114-1

NE: GT

© Quelle & Meyer, Heidelberg 1983. Alle Rechte vorbehalten. Die Vervielfältigung und Übertragung auch einzelner Teile, Texte, Zeichnungen oder Bilder, wenn sie auch lediglich der eigenen Unterrichtsgestaltung dienen, sind nach dem geltenden Urheberrecht nicht gestattet. Ausgenommen sind die in §§ 53, 54 URG ausdrücklich genannten Sonderfälle, wenn sie mit dem Verlag vorher vereinbart wurden. Im Einzelfall bleibt für die Nutzung fremden geistigen Eigentums die Forderung einer Gebühr vorbehalten. Das gilt für Fotokopie genauso wie für die Vervielfältigung durch alle anderen Verfahren einschließlich Speicherung und jede Übertragung auf Papier, Transparente, Matrizen, Filme, Bänder, Platten und sonstige Medien.

Printed in Germany.

Satz und Druck: Schwetzinger Verlagsdruckerei, 6830 Schwetzingen.

# Inhalt

<b>Vorbemerkung</b> . . . . .	9
<b>I. Einleitung</b> . . . . .	11
1 <i>Wir leben von Energie</i> . . . . .	11
2 <i>Leben wir über unsere Verhältnisse?</i> . . . . .	11
<b>II. Energie</b> . . . . .	13
1 <i>Was ist Energie?</i> . . . . .	13
1.1 <i>Vorläufige Begriffsbestimmung</i> . . . . .	13
1.2 <i>Energieübertragung</i> . . . . .	15
1.3 <i>Erscheinungsformen der Energie</i> . . . . .	17
1.4 <i>Energieerhaltung</i> . . . . .	19
1.5 <i>Energieverbrauch</i> . . . . .	20
2 <i>Wie mißt man Energie?</i> . . . . .	22
2.1 <i>Definition der elektrischen Energie</i> . . . . .	22
2.2 <i>Energieumwandlungen</i> . . . . .	24
2.2.1 <i>Thermische Energie</i> . . . . .	24
2.2.2 <i>Innere Energie</i> . . . . .	26
2.2.3 <i>Übertragungs- und Speicherformen der Energie</i> . . . . .	27
2.2.4 <i>Ableitung weiterer Energiearten</i> . . . . .	28
<b>III. Energieentwertung</b> . . . . .	30
1 <i>Was ist Energieentwertung?</i> . . . . .	30
1.1 <i>Selbsttätige Vorgänge</i> . . . . .	31
1.2 <i>Energieentwertung und Energieaufwertung</i> . . . . .	34
1.3 <i>Bewertung von Energiearten</i> . . . . .	37
1.4 <i>Verallgemeinerung des Energieentwertungskonzepts</i> . . . . .	39
2 <i>Wie mißt man Energieentwertung?</i> . . . . .	40
2.1 <i>Definition der Energieentwertung</i> . . . . .	40
2.2 <i>Exergie</i> . . . . .	46
2.3 <i>Berechnung der Energieentwertung bei endlichen Systemen</i> . . . . .	48
2.4 <i>Umgebung als Wärmebad</i> . . . . .	49
2.5 <i>Energieumwandlungen</i> . . . . .	49
<b>IV. Herstellung von Nutzenergie</b> . . . . .	52
1 <i>Problemstellung</i> . . . . .	52
2 <i>Verluste bei Energieumwandlungen</i> . . . . .	54
2.1 <i>Energetischer Wirkungsgrad</i> . . . . .	54

2.2	Exergetischer Wirkungsgrad . . . . .	55
2.3	Energetische Amortisation . . . . .	56
3	<i>Energieverbrauch der Bundesrepublik Deutschland</i> . . . . .	56

**V. Energieumwandlungen** . . . . . 59

1	<i>Mechanische Energie in mechanische Energie</i> . . . . .	59
1.1	Energie des bewegten oder gestauten Wassers . . . . .	60
1.2	Energie der bewegten Luft . . . . .	61
2	<i>Elektrische Energie in mechanische Energie</i> . . . . .	62
3	<i>Thermische Energie in mechanische Energie</i> . . . . .	62
3.1	Wärmekraftmaschine . . . . .	62
3.2	Modelle verschiedener Wärmekraftmaschinen . . . . .	64
3.2.1	Gummiband-Wärmekraftmaschine . . . . .	64
3.2.2	Heißluftmotor . . . . .	65
3.2.3	Dampfmaschine . . . . .	66
3.2.4	Dampfturbine . . . . .	67
3.2.5	Wärmemotor . . . . .	68
4	<i>Chemische Energie in mechanische Energie</i> . . . . .	68
4.1	Osmosekraftmaschine . . . . .	68
4.2	Verdunstungskraftmaschine . . . . .	70
4.2.1	Trinkender Storch . . . . .	70
4.2.2	Minto-Rad . . . . .	71
4.3	Muskeltätigkeit . . . . .	72
5	<i>Mechanische Energie in elektrische Energie</i> . . . . .	73
6	<i>Thermische Energie in elektrische Energie</i> . . . . .	73
7	<i>Chemische Energie in elektrische Energie</i> . . . . .	74
8	<i>Lichtenergie in elektrische Energie</i> . . . . .	76
9	<i>Mechanische Energie in thermische Energie</i> . . . . .	77
10	<i>Elektrische Energie in thermische Energie</i> . . . . .	77
11	<i>Thermische Energie in thermische Energie</i> . . . . .	78
11.1	Wärmepumpe . . . . .	78
11.2	Kompressionswärmepumpe . . . . .	79
11.3	Kühlschrank als Wärmepumpe . . . . .	80
11.4	Heißluftmotor als Wärmepumpe . . . . .	80
11.5	Absorptionswärmepumpe . . . . .	81
12	<i>Chemische Energie in thermische Energie</i> . . . . .	81
13	<i>Lichtenergie in thermische Energie</i> . . . . .	82
13.1	Thermischer Flachkollektor . . . . .	82
13.2	Konzentrierende Kollektoren . . . . .	83

14	<i>Elektrische Energie in chemische Energie</i>	83
15	<i>Lichtenergie in chemische Energie</i>	85
<b>VI. Energietransporte</b>		86
1	<i>Mechanischer Energietransport</i>	86
2	<i>Thermischer Energietransport</i>	87
3	<i>Mechanische Transporte von Energieträgern</i>	88
4	<i>Elektrischer Energietransport</i>	89
5	<i>Chemischer Energietransport</i>	89
6	<i>Energietransport durch Strahlung</i>	90
7	<i>Energiestromdichte</i>	90
8	<i>Energietransportverluste</i>	91
<b>VII. Energiespeicherung</b>		92
1	<i>Chemische Energiespeicher</i>	93
1.1	<i>Fossile Bioenergiespeicher</i>	93
1.2	<i>Aktuelle Bioenergiespeicher</i>	94
1.3	<i>Wasserstoff als Energiespeicher</i>	94
1.4	<i>Batterien</i>	95
2	<i>Mechanische Energiespeicher</i>	95
2.1	<i>Lageenergiespeicher</i>	95
2.2	<i>Druckluftspeicher</i>	96
2.3	<i>Bewegungsenergiespeicher. Schwungradspeicher</i>	97
3	<i>Elektrische Energiespeicher</i>	98
4	<i>Thermische Energiespeicher</i>	99
4.1	<i>»Fühlbare Wärme«</i>	99
4.2	<i>»Latente Wärme«</i>	100
<b>VIII. Energievorkommen</b>		102
1	<i>Kosmischer Ursprung der Energie</i>	102
1.1	<i>Kosmische Energiequellen</i>	102
1.2	<i>Irdische Energiequellen</i>	103
2	<i>Sonnenenergie</i>	104
2.1	<i>Energetische Bedeutung des Sonnenscheins</i>	104
2.2	<i>Physikalische Beschreibung der Sonnenstrahlung</i>	105
2.3	<i>Solare Energiebilanz</i>	106
2.4	<i>Solarbetriebene Kreisläufe der Erde</i>	111

2.4.1	Der Wasserkreislauf: Wasserströmungen. Süßwasserproduktion durch Verdunstung . . . . .	113
2.4.2	Atmosphärische Kreisläufe: Windenergie. Wellenenergie . . . . .	114
2.4.3	Exkurs: Die Atmosphäre als Treibhaus . . . . .	115
2.4.4	Biologische Kreisläufe: Lebende Biomasse. Fossile Biomasse. Lebende Biomasse als Energiequelle? . . . . .	117
2.5	Weitere solare Energiequellen . . . . .	121
2.5.1	Sonnenlicht . . . . .	121
2.5.2	Sonnenwärme . . . . .	122
3	<i>Gezeitenenergie</i> . . . . .	122
4	<i>Geothermische Energie</i> . . . . .	123
5	<i>Kernenergie</i> . . . . .	124
5.1	Kernspaltung . . . . .	124
5.2	Kernverschmelzung . . . . .	127
<b>IX. Energiesysteme</b> . . . . .		128
1	<i>Energetik des Menschen</i> . . . . .	128
1.1	Energieumsatz bei verschiedenen Tätigkeiten . . . . .	129
1.2	Nahrungsmittelenergie . . . . .	132
1.3	Energie und Leistung . . . . .	132
1.4	Energie und Kraft . . . . .	134
1.5	Nahrungsmittelenergie und ihr Preis . . . . .	134
2	<i>Energetik der menschlichen Fortbewegung</i> . . . . .	135
2.1	Transportsystem Fahrrad . . . . .	136
2.1.1	Energetik des Radfahrens . . . . .	137
2.1.2	Messungen am Fahrrad . . . . .	140
2.2	Transportsystem Kraftfahrzeug . . . . .	140
2.2.1	Energetik des Kraftfahrzeugs . . . . .	141
2.2.2	Wirkungsgrad und Verbesserung des Leistungsoutputs . . . . .	144
2.3	Transportkosten . . . . .	145
2.3.1	Fußgänger und Radfahrer . . . . .	146
2.3.2	Auto und Fahrrad . . . . .	148
3	<i>Energiesystem Haushalt</i> . . . . .	150
3.1	Durchschnittlicher Energieverbrauch im Haushalt . . . . .	150
3.2	Energieentwertung bei der Raumheizung . . . . .	151
3.3	Einsparmöglichkeiten . . . . .	151
3.4	Indirekte Energieentwertungen im Haushalt . . . . .	153
<b>Literaturverzeichnis</b> . . . . .		154
<b>Sachregister</b> . . . . .		160

## Vorbemerkung

Das anhaltende öffentliche Interesse, das der Energieproblematik seit Jahren entgegengebracht wird, hat u. a. zur Folge gehabt, daß die neueren Schulbücher der Energie verhältnismäßig viel Platz einräumen. Diese Aktualisierung des Schulstoffs vermag u. E. jedoch nur wenig zu einem tieferen Verständnis der Energie und der mit ihr zusammenhängenden Probleme der wissenschaftlich technischen Welt beizutragen, u. a. deshalb, weil

- das Energiekonzept weitgehend unabhängig von seiner Bedeutung für das Alltagsleben eingeführt und
- auf *einen* Aspekt, den Erhaltungsaspekt, beschränkt wird, obwohl der Verbrauchs- bzw. Entwertungsaspekt der Energie im Alltag viel ausgeprägter vorzufinden ist.

Sieht man von den wenigen Ausnahmen ab, so spricht der erste Punkt die gängige Praxis an, die Energie als mechanische Größe aus anderen Größen nach dem Schema Kraft  $\rightarrow$  Arbeit  $\rightarrow$  Energie abzuleiten und zu verstehen. Dieser Umweg über andere Größen verzichtet nicht nur auf die Möglichkeit, an das auf vielen vertrauten Vorgängen und Phänomenen beruhende Alltagsverständnis der Energie anzuknüpfen und es entsprechend zu präzisieren, sondern lenkt davon sogar ab. Die Folge ist eine dem Verständnis der Energie abträgliche Interferenz zweier Energiebegriffe. Darüberhinaus konstruiert eine solche physikalische Behandlung der Energie eine weitere Differenz zur Alltagserfahrung: Die Energie wird als Erhaltungsgröße ausgegeben. Die in diesem Zusammenhang auftretende Frage, wieso es dann überhaupt eine Energiekrise geben könne, spielt demgegenüber auf jene Erfahrungen an, die die Energie in den Brennpunkt der gesellschaftspolitischen Auseinandersetzung gerückt hat:

- Demnach droht der Menschheit die Energie auszugehen.
- Energiequellen werden in zunehmendem Maße erschöpft.
- Nach neuen Energieträgern wird gesucht.
- Allenthalben wird dazu aufgefordert, nicht zu viel Energie zu verbrauchen, sparsam mit ihr umzugehen, energiebewußt zu leben usw.

Außerdem spricht die Erfahrung, daß Heizöl- und Autotanks leer werden, für verbrauchtes Gas und elektrische Energie monatlich bezahlt werden muß, nicht gerade gegen die Möglichkeit des Energieverbrauchs.

Will man die Diskrepanz zwischen dem, was man als Realität wahrnimmt, und der naturwissenschaftlichen Beschreibung derselben nicht noch am Beispiel der Energie vergrößern, so muß es darum gehen, deutlich zu machen, daß Energieerhaltung und Energieverbrauch sich nicht widersprechen müssen, son-

dem gewissermaßen komplementäre Aspekte derselben Erfahrungen darstellen.

In diesem physikalischen Arbeitsbuch werden auf der Grundlage alltäglicher Erscheinungen die Energie und als notwendige Ergänzung dazu die Energieentwertung als physikalische Größen eingeführt und für das Verständnis der Fragen herangezogen, die unter dem Begriff Energieproblematik (Energieversorgung, Energieverschwendung, Energiesparen usw.) diskutiert werden.

Dabei steht einerseits die exemplarische Vertiefung der durch diese Konzeption aufgeworfenen Probleme im Vordergrund. Andererseits soll aber auch ein Überblick über die wichtigsten Aufgaben und Fragen gegeben werden. Durch zahlreiche Querverweise im Text wird versucht, die vielfältigen Verbindungen zwischen den einzelnen Betrachtungen aufzuzeigen. Hinweise auf möglichst einfach zugängliche Literaturstellen sollen darüber hinaus Möglichkeiten zu Erweiterungen und Vertiefungen geben.

Problemstellungen, die über den physikalischen Rahmen hinausgehen, können im einzelnen nicht verfolgt werden. Es wird aber darauf geachtet, daß in Fällen, in denen eine rein physikalische Behandlung wesentliche Gesichtspunkte unterschlägt, Vertiefungen in der einen oder der anderen Richtung angedeutet werden, bzw. auf Vertiefungsmöglichkeiten durch Angabe geeigneter Literaturstellen hingewiesen wird.

Viele Anregungen zur vorliegenden Arbeit verdanke ich der Mitarbeit in der »Gruppe Didaktik der Physik« an der Universität Osnabrück. Wesentliche Ideen sind aus der gemeinsamen Arbeit mit meinem Kollegen U. BACKHAUS hervorgegangen. Ihm gilt mein besonderer Dank. Herrn Prof. BRUHN, dem Herausgeber der physikalischen Arbeitsbücher, sei für seine Anregungen zu diesem Buch gedankt.

Osnabrück, Sommer 1982

H. J. SCHLICHTING

# I. Einleitung

## 1 Wir leben von Energie

Die gewaltige technische und kulturelle Entwicklung, die die Menschheit seit der Steinzeit durchgemacht hat, ist zu einem großen Teil der Energie und ihrer Beherrschung durch den Menschen zu verdanken.

Indem es dem Menschen im Laufe seiner Geschichte gelang, in zunehmendem Maße Energiehilfsquellen zu erschließen und zur Befriedigung seiner wachsenden Bedürfnisse einzusetzen, konnte er sich weitgehend aus der unmittelbaren Abhängigkeit der Naturgewalten befreien.

- Durch die Beherrschung des Feuers wurde die Energie brennbarer Materialien verfügbar. In Form von Wärme stellte sie einen Schutz vor Kälte dar, und durch die Möglichkeit, Nahrungsmittel zuzubereiten (Kochen), wurde der Nahrungsmittelspielraum erweitert.
- Durch Haustierhaltung konnten Nahrungsmittel ohne die energieaufwendigen Jagden zur Verfügung gehalten werden.
- Außerdem war die Muskelenergie der Tiere zur Bearbeitung von Ackerland einsetzbar.
- Die Landwirtschaft kann als Möglichkeit angesehen werden, die für das Wachstum der Pflanzen notwendige Sonnenenergie systematisch auszunutzen.
- Durch Windmühlen, Segelschiffe, Wasserkraftwerke wurden Wasserenergie und Windenergie für verschiedene Zwecke, Landbewässerung, Fortbewegung, Antreiben von mechanischen Maschinen usw. verfügbar.
- Mit der Erschließung der Energie fossiler Brennstoffe, wie zunächst Kohle, später auch Erdöl, gelang der Sprung ins technische Zeitalter. U. a. die günstigen Eigenschaften dieser Energieträger haben es möglich gemacht, daß innerhalb kurzer Zeit fast alle Lebensbereiche des modernen Menschen durch diese Energiequelle bestimmt wurden.

Wir haben uns daran gewöhnt, ständig – im Vergleich zu unserem körperlichen Energieumsatz – große Energien einzusetzen, um unser Leben in der wissenschaftlich-technischen Welt möglichst angenehm zu gestalten.

## 2 Leben wir über unsere Verhältnisse?

Die Tatsache, daß beispielsweise der Durchschnittsbürger der BRD gewissermaßen ständig über etwa 240 Energiesklaven verfügen kann<sup>1</sup> – beim Durchschnittsamerikaner sind es sogar 480 – hat aber nicht nur positive Aspekte.

<sup>1</sup> Auf diese Zahl kommt man, wenn man ausrechnet, wieviel Menschen täglich 8 Stunden lang mit einer Leistungsabgabe von 75 W arbeiten müßten, um die durchschnittliche Leistung aufzubringen, die pro Kopf der Bevölkerung verbraucht wird.

- Man muß sich die Frage gefallen lassen, ob dieses Luxusleben angesichts der Armut und Hungersnot, in der unzählige Menschen insbesondere der Dritten Welt leben, noch guten Gewissens vertretbar ist.
- Die Menschen der Industrienationen haben sich in eine Abhängigkeit von der Energie begeben, wie sie totaler nicht sein kann. Man braucht sich nur auszumalen, was geschehen würde, wenn aus irgendwelchen (politischen oder sonstigen) Gründen die Öllieferungen in die BRD unterblieben: Wohnungen könnten nicht geheizt werden, Lebensmittel würden wegen fehlender Transportmittel beim Erzeuger verderben, zumindest in den Großstädten wäre eine Hungersnot die Folge, Fabriken würden stillstehen usw.
- Außerdem sind mit dem starken Energieverbrauch in den Industrienationen und der damit verbundenen Technisierung negative Wirkungen verknüpft, die die positiven Aspekte zunichte machen können und es bereits teilweise tun:  
 Öl- und Kohlekraftwerke, Hausbrand und Verkehr kurz, alle mit der Verbrennung fossiler Materialien zusammenhängenden Energieumwandlungen, sind mit der Emission von CO<sub>2</sub> verbunden. Eine zu starke Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre kann unabsehbare negative Folgen für das Klima auf der Erde haben. Auch die Kernkraft birgt Gefahren, die nicht zu vernachlässigen sind. Hingewiesen sei noch auf die mit der Technisierung einhergehende Umweltverschmutzung durch Giftstoffe, Wärme, Lärm, usw.
- Schließlich gibt es ein alle anderen Probleme der Energieversorgung relativierendes Problem: Der zunehmende, exponentiell wachsende Energieverbrauch führt in absehbarer Zeit zu einer Erschöpfung der bekannten fossilen und nuklearen Energiequellen. Wenn nicht vorher neue Energiequellen verfügbar werden oder das »Energieverhalten« drastisch verändert wird, sind katastrophenartige Folgen zwangsläufig.

Angesichts der Tatsache, daß solche Verhaltensänderungen ohne Preisgabe von Lebensqualität möglich erscheinen, muß die eingangs gestellte Frage bejaht werden. Eines der Hauptziele der vorliegenden Arbeit ist es, die sachlichen Voraussetzungen dafür zu liefern, die physikalisch technische Dimension der Energieprobleme zu erkennen. Erst auf dieser Grundlage können Lösungsansätze gefunden und diskutiert werden.

## II. Energie

*Vorbemerkung:* Im folgenden skizzieren wir eine Methode zur Einführung der Energie als Grundgröße, d. h. wir leiten die Größe der Energie nicht wie üblich aus anderen Größen ab, sondern entwickeln sie unmittelbar aus den Phänomenen (Begründung siehe SCHLICHTING et al. 1981, S. 50 ff.). Für den Fall, daß der Energiebegriff bereits vorliegt, kann dieses Kapitel übergangen werden.

### 1 Was ist Energie?

Für eine genauere Analyse der Energieprobleme reicht das vorwissenschaftliche Alltagsverständnis von der Energie nicht mehr aus. Daher soll im folgenden auf der Grundlage der Erscheinungen, an denen Energie beteiligt ist, ein (physikalischer) Energiebegriff gewonnen werden, der höheren Ansprüchen gerecht wird: Ein solcher Energiebegriff soll es z. B. ermöglichen, bei verschiedenen Vorgängen auftretende Energien miteinander zu vergleichen.

#### 1.1 Eine vorläufige Begriffsbestimmung

Im vorwissenschaftlichen Verständnis ist Energie zunächst einmal etwas, womit man etwas anfangen kann:

Energie erfüllt Hilfsfunktionen für den Menschen.
---

*Beispiele:* 1. Mit elektrisch betriebenen Vorrichtungen kann man Kaffeewasser erwärmen, eine E-Lok bewegen, eine Glühlampe zum Leuchten bringen, schweißen, also Eisen schmelzen, usw. 2. Mit Erdölprodukten kann man ein Auto bewegen, eine Heizungsanlage betreiben, eine Öllampe zum Leuchten bringen usw.

Man kann das an Hand eines Schemas (Matrix) verdeutlichen, in dem man in der waagerechten Zeile die verschiedenen Wirkungen wie erwärmen, bewegen, leuchten usw. einträgt und in der senkrechten Spalte die jeweiligen Vorrichtungen – wir wollen sie allgemein Energiesysteme nennen – aufführt. In den gemeinsamen Kästchen, die zu einem bestimmten Energiesystem (Spalte) und einer bestimmten Wirkung dieses Systems (Zeile) gehören, kann man dann entsprechende Erscheinungen eintragen (vgl. Tab. 1).

Tab. 1: Energiesysteme und ihre Wirkungen.

Wirkung Energie- system	erwärmen	bewegen	leuchten	schmelzen ...
elektrische Batterie	Zigarettenanzünder im Auto	Zeiger einer Quarzuhr	Taschenlampe	Schmelzsicherung im Radio ...
Mensch oder Tier	Händereiben	laufen, schwimmen	Glühwürmchen	Wachs in der warmen Hand ...
Sonne	Sand am Strand	Wolkenbewegung	Tageslicht	Butter in der Sonne ...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Durch die Tabelle wird nahegelegt, den verschiedenen, zu gleichen Wirkungen fähigen Systemen eine gemeinsame Eigenschaft zuzuschreiben. Diese gemeinsame Eigenschaft wird Energie genannt:

Diejenigen Systeme (Sonne, Mensch, Batterie usw.), die etwas erwärmen, verbrennen, zum Leuchten bringen, bewegen, verformen (usw.) können, besitzen Energie<sup>2</sup>.

*Versuche:* 1. Der dicke Teil eines sich verjüngenden Glasröhrchens wird mit konzentriertem Zuckerwasser gefüllt und am dicken Ende mit einer Cellophanfolie abgedichtet. Stellt man das Röhrchen in ein Glas mit Wasser, so sieht man, wie das Zuckerwasser im engen Teil der Röhre über den Wasserspiegel des Glases hinaus angehoben wird.

2. Eine handvoll Stahlwolle wird fest in ein Becherglas gedrückt und dann angefeuchtet. Das Glas wird über ein flaches Gefäß (Teller) mit Wasser gestülpt. Nach einiger Zeit beginnt die Stahlwolle zu rosten und das Wasser im Becherglas zu steigen.

3. Ein mit einigen cm<sup>3</sup> Methanol gefüllter Kolbenprober wird in ein Wasserbad (Dewargefäß) von 90°C gebracht. Die Temperatur des Wasserbades sinkt, das Methanol siedet, der mit einem Gewichtstück beschwerte Kolben wird hochgedrückt.

<sup>2</sup> Die hiermit verbundene Beschränkung auf Phänomene, die später mit »wertvoller Energie« bzw. »Exergie« beschrieben werden, erlaubt vorläufig von jenen Problemen abzusehen, die damit verbunden sind, daß Körper i. a. auch dann Energie besitzen, wenn sie nicht in der Lage sind, obige Wirkungen hervorzurufen.

4. Die Lötstelle zweier Drähte verschiedenen Materials wird erwärmt. An den freien Enden entsteht eine Thermospannung. Schaltet man mehrere solcher Thermoelemente hintereinander, so läßt sich ein Verbraucher (z. B. ein sehr empfindlicher Motor von der Fa. CFW<sup>3</sup>) betreiben.

5. Eine Lichtmühle wird in einen Lichtstrahl gestellt. Die Mühle dreht sich.

6. Eine Flasche, in die man ein Stück brennendes Papier wirft, wird mit einer Gummimembran abgedichtet. Die Flamme erlischt, die Membran wölbt sich in die Flasche hinein.

7. Hält man eine Glimmlampe an einen mit Wolle geriebenen Luftballon, so leuchtet die Glimmlampe auf.

8. Hände werden heiß, wenn man sie an einem Stück Styropor reibt.

9. Ein über eine Flasche gezogener Luftballon wird aufgeblasen, wenn man die Flasche in heißes Wasser stellt.

10. Die Benetzung des Kopfes eines »trinkenden Storches« (vgl. Kap. V, 4.2) führt zu einer Trinkbewegung des Storches.

11. Ein mit Wolle geriebener Luftballon wird dicht unter die Zimmerdecke gehalten. Er wird von der Decke angezogen und bleibt stundenlang dort haften.

12. Ein zwischen Kondensatorplatten u. ä. aufgehängter Ball aus Aluminiumfolie schwingt zwischen den Platten hin und her.

## 1.2 Energieübertragung

Zwischen manchen der betrachteten Vorgänge bestehen »Verkettungen« der folgenden Art: Ein System kann Energie erwerben, wenn man es mit einem anderen System in Verbindung bringt, das Energie besitzt.

*Beispiel:* Das zum Nachweis der Energie einer brennenden Kerze erwärmte Wasser besitzt nunmehr selbst Energie, denn es vermag einen dritten Gegenstand zu erwärmen, z. B. Alkohol zum Sieden zu bringen usw.

Auch die Uhrfeder besitzt Energie, nachdem sie aufgrund der Muskelenergie des Menschen gespannt wurde, denn sie ist jetzt in der Lage, die Uhrzeiger zu bewegen.

*Versuch:* Brennendes Gas bringt das Wasser im Kessel einer Spielzeugdampfmaschine zum Verdampfen. Der Dampf bringt den Kolben und dieser das Schwungrad der Dampfmaschine in Bewegung. Das Schwungrad betreibt einen Fahrraddynamo. Der Dynamo bringt eine Glühlampe zum Leuchten.

<sup>3</sup> Nähere Angaben zu den im folgenden genannten Firmen werden im Literaturverzeichnis gegeben.

Trennt man die auf diese Weise verbundenen (Energie-)Systeme an einer Stelle, unterbricht man also beispielsweise die Dampfleitung, so kommen alle energetischen Vorgänge zum Erliegen.

Es liegt auf der Hand, diese Beobachtungen so zu deuten, daß Energie von einem zum anderen System weitergegeben bzw. übertragen wurde: Indem das Gas verbrennt, also seine chemische Zusammensetzung ändert, gibt es (chemisch gespeicherte) Energie an das Wasser ab, was sich in einer Erwärmung bzw. in einem Übergang in den gasförmigen Zustand (Dampf) äußert. Der Dampf gibt seinerseits Energie an die Dampfmaschine ab, indem er diese in Bewegung setzt. Er wird dabei selbst abgekühlt und teilweise wieder zu Wasser kondensiert. Ein Teil der Bewegungsenergie der Dampfmaschine wird auf einen Dynamo übertragen, der dadurch elektrische Energie hervorzubringen vermag. Elektrische Energie wird schließlich in der am Dynamo angeschlossenen Glühlampe in Wärme und Licht verwandelt. Die Unterbrechung einer solchen Energiekette bringt den Energiefluß zum Stillstand.

Neben der Eigenschaft, charakteristisch für bestimmte Systeme zu sein, d. h. den Zustand eines Systems zu beschreiben, zeigt sich hier eine zweite Eigenschaft der Energie:

Energie kann von einem System zum anderen übertragen werden und dadurch den Zustand der beteiligten Systeme so verändern, daß das Energie abgebende System nicht mehr oder in vermindertem Maße die Eigenschaft besitzt, jene charakteristischen Wirkungen hervorzurufen, während das Energie aufnehmende System diese Eigenschaften dadurch erwirbt.

Entsprechend wird vielfach von Energiefluß und -strom geredet.

Für viele Systeme ist es charakteristischer, Energie weiterzugeben, zu transportieren, als Energie längere Zeit bei sich zu behalten, zu speichern. Normalerweise ist nur das Anfangsglied einer Energiekette als Energiespeicher bzw. -träger im eigentlichen Sinn anzusehen (z. B. Benzin, Kohle, Batterien).

*Versuche:* 1. Ein mit Wasser gefüllter, genügend hoch (etwa 2 m) gelagerter Behälter gibt über einen Schlauch Wasser auf ein mit der Achse eines Dynamos verbundenes Schaufelrad. Die an den Dynamo angeschlossene Glühbirne leuchtet auf.

2. Zwei in  $ZnJ_2$ -Lösung eintauchende Kohleelektroden sind über einen kleinen Ventilator miteinander verbunden. Bläst man auf den Propeller, so verfärbt der Indikator Stärke die Lösung blau-violett. Dann wird der Propeller

kurz angehalten, und mit dem Loslassen dreht er sich von allein in gleicher Richtung weiter (entsprechende Materialien sind bei der Fa. CFW erhältlich).

3. Der in einem Rundkolben mit Hilfe eines Bunsenbrenners erzeugte Dampf wird über ein zugespitztes Glasröhrchen auf eine mit einem kleinen Generator verbundene Turbine geleitet. Der an den Generator angeschlossene kleine Ventilator wird in Tätigkeit versetzt.

4. Das mit einem Hofmannschen Apparat erzeugte Knallgasgemisch wird in Seifenblasen gefüllt. Diese werden mit Hilfe eines glühenden Drahtes zur Explosion gebracht.

5. Der mit einem geriebenen Kunststoffstab geladene Kondensator wird über eine Glimmlampe entladen.

6. Die in einem aufgeblasenen Luftballon enthaltene Luft wird auf einen Propeller gelenkt, der einen Generator betreibt.

7. Eine Solarzelle, die mit einem kleinen (empfindlichen) Elektromotor (z. B. von der Fa. CFW) verbunden ist, wird Licht ausgesetzt. Der Motor treibt einen Propeller an.

8. Zwei der obigen Propellermotoren werden gegeneinandergeschaltet. Bläst man gegen den einen Propeller, so dreht sich auch der andere.

### 1.3 Erscheinungsformen der Energie

Es ist bereits von verschiedenen Energiearten gesprochen worden, je nachdem, durch welche spezielle Wirkung die Energie sich bemerkbar macht:

*Mechanische Energie* äußert sich durch eine mechanische Wirkung, z. B. Bewegung (Bewegungsenergie oder auch kinetische Energie), Schwingung (Schwingungsenergie), Schall (Schallenergie) oder eine mechanische Konstellation bzw. Lage (Lageenergie oder auch potentielle Energie).

*Elektrische Energie* macht sich durch elektrische Ströme oder Ladungen bemerkbar.

*Chemische Energie* läßt sich bestimmten chemischen Zusammensetzungen bzw. Umordnungen zuordnen.

*Lichtenergie* manifestiert sich in Leuchterscheinungen.

*Thermische Energie* äußert sich in Temperaturänderungen.

Diese Energiearten lassen sich im Prinzip alle ineinander umwandeln. In der Praxis sind dazu i. a. mehr oder weniger komplizierte Vorrichtungen notwendig. Einen Überblick über die möglichen Energieumwandlungen gibt die folgende Tabelle.

Da Energieumwandlungen in der Praxis häufig über leicht zu begehende Umwege (weitere Energiearten als Zwischenprodukt) erfolgen, sprechen wir beim direkten Weg von Energiedirektumwandlungen.

Tab. 2: Beispiele einiger Energiedirektumwandlungen.

Energiedirektumwandlung von \ in	mechanische Energie			elektrische Energie	chemische Energie	Lichtenergie	thermische Energie	
	potentielle Energie	kinetische Energie	Schallenergie					
mechanische Energie	potentielle Energie	einfache Maschinen (z. B. Kran)	Herunterfallen eines Steins		piezoelektrischer Effekt	strukturelle Phasenumwandlungen	Leuchtstab	Kompressionswärme
	kinetische Energie	Hochfliegen eines Steins	elastischer Stoß	Aufprall eines fallenden Gegenstandes	Generator	Anzünden eines Strichholzes	Feuerfunken	Reibungswärme
	Schallenergie	Hochwirbeln von Körpern durch Detonation	Vibrieren einer Membran	Frequenzänderung eines Tons	Mikrophon			Schallabsorption
elektrische Energie	Heben eines Körpers durch elektrostatische Abstoßung	Elektromotor	Lautsprecher	Transformator	Laden eines Akkumulators, Elektrolyse	Leuchtstoffröhre	Peltier-Effekt, Widerstandsheizung, Pyroelektrizität	
chemische Energie	Osmose, Verdunstung	Muskel	Explosion	galvanische Elemente Brennstoffzellen	Präreaktionen in Brennstoffzellen	Chemolumineszenz, Glühwürmchen	exotherme Reaktion (Verbrennung)	
Lichtenergie	Lichtdruck	Lichtmühle, Radiometer		Fotosolarzelle	Fotosynthese, Fotodissoziation	Fluoreszenz, Phosphoreszenz	Lichtabsorption	
thermische Energie	Heben eines Gewichts durch thermische Ausdehnung	Wärme, Kraftmaschine		Seebeckeffekt	endotherme chemische Reaktion	Glühlampe	Absorptionswärmepumpe	

*Aufgabe:* Die in den Kap. II, 1.1 und 1.2 beschriebenen Versuche sollen als Umwandlungen zwischen verschiedenen Energiearten klassifiziert werden. Beispielsweise ist der 1. Versuch in Kap. II, 1.1 vom Typ: chemische Energie  $\rightarrow$  potentielle (mechanische) Energie.

#### 1.4 Energieerhaltung

Die Transporteigenschaft der Energie legt es nahe, in Analogie zum Stofftransport bzw. Fließen einer Flüssigkeit die Energie als Erhaltungsgröße anzusehen, d. h. anzunehmen, daß Energie weder erzeugt noch vernichtet werden kann, also trotz der phänomenologischen Veränderungen während der Energieumwandlungen mengenmäßig erhalten bleibt.

Dem steht aber die bei vielen der obigen Versuche gemachte Beobachtung entgegen, daß die Wirkung der Energie, während des Transports bzw. nach den einzelnen Umwandlungen immer kleiner wurde. Vergleicht man die Leucht- und Wärmewirkung des brennenden Gases unter dem Kessel der Dampfmaschine mit dem kümmerlichen Glimmen einer leistungsschwachen Glühlampe (Durch eine stärkere Glühlampe wurde die Dampfmaschine abgewürgt!), so drängt sich der Schluß auf, daß die Energie abgenommen hat.

Andererseits läßt sich auch beobachten, daß an den verschiedensten Stellen der »Energieketten« offenbar Energie entweicht. Beim Versuch mit der Dampfmaschine spürt man die Wärme in der Umgebung der Anlage, man sieht den entweichenden Dampf usw. Die sich darin äußernde Energie des Gases ist natürlich für den weiteren Transport durch die Energiekette verloren.

Ob die Summe der in der Glühlampe ankommenden und auf dem Wege dahin »verlorengegangenen« Energie jedoch gerade gleich der Energie ist, die von der Gasflasche abgegeben worden ist, können wir allerdings auch weiterhin nur vermuten. Macht man jedoch diese Vermutung der Energieerhaltung zur Grundlage eines Meßverfahrens für die Energie, so zeigt sich, daß man mit der so zu einer quantitativen Größe präzisierten Energie innerhalb der gesamten Physik zu keinen Widersprüchen kommt.

Man definiert die Energie als Größe, die trotz aller phänomenologischen Veränderungen bei natürlichen Vorgängen erhalten bleibt:

Energie bleibt erhalten; sie kann weder erzeugt noch vernichtet werden.

Dieser Energieerhaltungssatz wird auch »Erster Hauptsatz der Thermodynamik« genannt.

*Ergänzung: Zur Anschaulichkeit der Energie.* Die Energie wird häufig als unanschauliche Größe bezeichnet (z. B. FEYNMAN et al. 1963, S. 4-1), eine Behauptung die mit

dazu beigetragen haben dürfte, daß die Energie eine so geringe Bedeutung innerhalb der Schulphysik besessen hat und im Grunde auch heute noch besitzt. Sind jedoch nicht ein gegen eine Wand fahrendes Auto, ein Waldbrand, eine Atombombenexplosion usw. sehr anschauliche Manifestationen von Energie? Läßt man das Argument gelten, die Energie stecke nur hinter diesen Erscheinungen, dann gibt es überhaupt keine anschaulichen physikalischen Begriffe. Selbst die »anschauliche« Masse ist dann auch nur »eine Quelle von Wirkungen, von Möglichkeiten, unsere Sinne zu beeinflussen« (JAMMER 1964, S. 117). Sie verbirgt sich sozusagen hinter den Körpern: Ein Stück Eisen *ist* eben keine Masse, sondern zeigt Wirkungen, die mit dem Begriff »Masse« umschrieben werden.

Aber auch die Tatsache, daß die Energie verschiedene Erscheinungsformen annehmen kann, muß nicht gegen ihre Anschaulichkeit sprechen. Haben wir uns nicht auch in vielen anderen Fällen daran gewöhnt, daß ein und derselbe »Gegenstand« verschiedene Erscheinungsformen annehmen kann? Ein eindrucksvolles Beispiel dafür ist das Wasser. Kaum jemand hat Schwierigkeiten in so verschiedenen Dingen, wie es Wasser, Schnee, Eis, Dampf usw. von ihrer Erscheinung her sind, ein und dieselbe Grundsubstanz zu sehen, nämlich Wasser in verschiedenen »Zuständen«.

Eine wichtige Strategie des menschlichen Denkens – nicht nur des wissenschaftlichen – besteht darin, die Vielzahl der Erscheinungen in Begriffen der in ihnen bewahrten Erhaltungsgrößen zu untersuchen. Anstatt den Vorgang des Verdampfens von Wasser so zu interpretieren, daß Wasser vernichtet wird und Dampf entsteht, sagt man: flüssiges Wasser geht in den dampfförmigen Zustand über. Daß die Postulierung der »Wassererhaltung« sinnvoll ist, merkt man daran, daß man bislang damit nirgends in Widersprüche geraten ist. Beispielsweise gewinnt man bei der »Vernichtung« des Dampfes (Kondensation), den man durch »Vernichtung« einer bestimmten Wassermenge erhalten hat, genau diese Wassermenge zurück.

Ganz analog verhält es sich mit der Energie: Sie ist das durch alle Veränderungen (aufgrund physikalischer Vorgänge) hindurch mengenmäßig Gleichbleibende.

## 1.5 Energieverbrauch

Der Hinweis, daß bislang keine Ausnahme zu diesem Energieerhaltungssatz festgestellt worden ist, läßt jedoch einige Fragen offen: Wieso kann es dann eine Energiekrise geben, die durch die Erschöpfung der Energiequellen, durch Energieverschwendung, ständig steigende Energiekosten gekennzeichnet ist? Worin kann dann das Energiesparen bestehen, zu dem allenthalben aufgerufen wird, was bedeutet Energieverbrauch?

Wie läßt sich dieser Widerspruch zwischen Energieerhaltung und Energieverbrauch lösen?

*Ergänzung:* Häufig hört und liest man, daß dieser Widerspruch in der Unvereinbarkeit des vorwissenschaftlichen (umgangssprachlichen) und physikalischen Energiebegriffs begründet sei. Der vorwissenschaftliche sei eben zu ungenau und daher besser durch den physikalischen zu ersetzen. Diese Argumentation ist u. E. nicht sehr überzeugend. Denn es ist nicht leicht einzusehen, warum die Erfahrung des Energieverbrauchs nicht eine angemessene physikalische Beschreibung besitzen sollte. Daher soll im folgenden gezeigt werden, daß der soeben identifizierte Widerspruch nur scheinbar ist, indem wir deutlich machen, daß Energieverbrauch und Energieerhaltung sich nicht widerspre-

chen, sondern zu einem die wirklichen Verhältnisse beschreibenden Ganzen zusammenfügen.

Aus anderen Bereichen des täglichen Lebens ist allen vertraut, daß Gegenstände durchaus verbraucht werden können, ohne deshalb inexistent zu werden.

*Beispiele:* 1. Im Haushalt wird ständig Wasser verbraucht: zum Wäschewaschen, zur Klospülung, zum Kartoffelkochen usw. Dennoch ist klar, daß das Wasser mengenmäßig erhalten bleibt. Das drückt sich am eindrucksvollsten darin aus, daß man vielfach nur das der Wasserleitung entnommene Trinkwasser mit einer Wasseruhr mißt und die Kosten für die Schmutzwasserbeseitigung nach dem Trinkwasserverbrauch berechnet. Das in die Kanalisation abgeführte Wasser ist in dem Sinne verbraucht, daß es nicht mehr dafür verwendet werden kann, wofür es verwendet wurde, als man es dem Leitungsnetz entnahm. Insofern besteht der Wasserverbrauch nicht in einer Wasservernichtung, sondern in einer Entwertung.

2. Ähnlich verhält es sich mit einer bestimmten Menge Mehl, wenn man damit einen Kuchen backt. Obwohl es mengenmäßig erhalten bleibt, wird es für den ursprünglichen Verwendungszweck, daraus einen Kuchen zu backen, unbrauchbar.

3. Auch ein Auto wird so gesehen »verbraucht«. Es verliert im Laufe der Zeit an Wert, indem es klappert, rostet, nicht mehr so gut fährt, reparaturanfällig wird und schließlich auf dem Schrottplatz landet: Dies alles, obwohl es von der Materialmenge her gesehen so gut wie unverändert bleibt.

Wie in diesen Beispielen wird »Verbrauch« meist *nicht* in der Bedeutung einer mengenmäßigen Vernichtung verwendet, sondern wird als eine Art Wertverlust bzw. Entwertung angesehen, die darin besteht, daß das »verbrauchte« Objekt hinsichtlich eines bestimmten Verwendungszwecks nicht mehr zu gebrauchen ist.

Die Übertragung dieser Argumentation auf die Energie wird in den folgenden Beispielen angedeutet.

*Beispiele:* 1. Läßt man heißes Wasser einige Zeit lang stehen, so kühlt es sich auf Umgebungstemperatur ab. Dieser Vorgang ist insofern mit einer Energieentwertung verbunden, als die dem Wasser ursprünglich z. B. mit einem Tauchsieder zugeführte Energie offenbar verschwunden ist: Sie wurde unwiderruflich an die Umgebung abgegeben. Daher ist mit ihr ohne weiteres nichts mehr anzufangen.

2. Mit dem eine bestimmte Höhe durchfallenden Wasser eines Wasserfalls kann man Turbinen betreiben und auf diese Weise über einen Generator elektrische Energie gewinnen. Bei Abwesenheit von Turbinen tritt eine Ener-

gieentwertung auf. Die mechanische Energie des Wasserfalls wird ungenutzt als Wärme an das Flußwasser bzw. letztlich an die Umgebung abgegeben.

3. Beim Autofahren wird ständig die im Benzin enthaltene Energie verbraucht bzw. entwertet. Ein Teil der chemischen Energie wird zwar in Bewegungsenergie verwandelt. Aber selbst wenn der Wagen eine bestimmte Bewegungsenergie besitzt, muß laufend chemische Energie nachgeliefert werden. Ansonsten käme der Wagen zum Stehen; weil insbesondere durch Rollreibung und Luftwiderstand die Bewegungsenergie als Wärme an die Umgebung abgegeben wird. Die Entwertung besteht darin, daß diese Energie nicht mehr zu gebrauchen ist.

Diese Beispiele zeigen:

Energetische Vorgänge sind von einem ständigen Verbrauch bzw. einer Entwertung von Energie begleitet die darin besteht, daß die Energie in eine Form überführt wird, mit der nichts Nützliches mehr gemacht werden kann.

*Ergänzung:* Dieser Satz von der Entwertung der Energie, in der gewohnten fachwissenschaftlichen Fassung auch 2. Hauptsatz der Thermodynamik genannt, tritt als notwendige Ergänzung zum Energiesatz hinzu. Im Lichte dieses Satzes wird im übrigen auch die Beschränkung der ursprünglichen vorläufigen Energiedefinition (S. 14) deutlich: Sie bezog sich strenggenommen nur auf »unverbrauchte«, wertvolle Energie (fachwissenschaftlich: Exergie (vgl. Kap. III, 2.2)), die selbsttätig jene Wirkungen hervorzubringen vermochte, die wir als Anzeichen für Energie gewertet haben. Verbrauchte oder entwertete Energie ist aber ohne weiteres nicht mehr zu solchen Wirkungen in der Lage.

## 2 Wie mißt man Energie?

*Vorbemerkung:* Um Energien quantitativ erfassen, also messen zu können, soll im folgenden ein entsprechendes Meßverfahren skizziert werden, das wesentlich auf den Eigenschaften der Erhaltung und der Mengenartigkeit der Energie aufbaut. Dazu wollen wir im einzelnen festlegen, wann eine Energie

- größer ist als eine andere (Ungleichheit),
- mindestens doppelt so groß ist wie eine andere (Vielfachheit),
- in welchen Einheiten die Energie gemessen werden soll (Einheit).

Mit diesen Angaben verfügt man über eine Meßvorschrift für mengenartige Größen.

### 2.1 Definition der elektrischen Energie

Den unterschiedlichsten Erscheinungsformen der Energie entsprechend gibt es mehrere Möglichkeiten, die Energie zu definieren. In der Praxis hat man sich allerdings auf jene Energieumwandlungen zu beschränken, bei denen vertraute

Größen wie Höhe, Temperatur, Auslenkung einer elastischen Feder, Geschwindigkeit, Masse, Umdrehungszahl eines Elektrizitätszählers variiert werden. Hat man erst einmal eine spezielle Energieart definiert, so läßt sich die Definition aller anderen Energiearten im Anschluß daran so vornehmen, daß der Energieerhaltungssatz erfüllt wird.

Wir wollen die Definition am Beispiel der elektrischen Energie demonstrieren, weil uns im Unterschied zu anderen Energiearten die elektrische Energie durch ihre Verwendung im Haushalt besonders vertraut ist; insbesondere dürfte der Zähler als Meßgerät für die elektrische Energie einem jeden bekannt sein und ähnlich unhinterfragt Verwendung finden wie eine Uhr zur Zeitmessung.

Kontrolliert man die elektrische Energieübertragung z. B. bei der Erwärmung von Wasser mit einem Tauchsieder durch die Zahl der Umdrehungen eines dazwischengeschalteten Elektrizitätszählers, so findet man daß die Drehzahl am Zähler um so größer ist, je größer die dadurch bewirkte Temperaturerhöhung ausfällt unabhängig von der Art des Tauchsieders. Damit ist gezeigt, daß die Drehzahl des Elektrizitätszählers ein Maß für die hindurchgeflossene Energie darstellt und insbesondere nicht vom speziellen Verbraucher abhängt.

Dadurch wird nahegelegt, die Ungleichheit zweier elektrischer Energiemengen folgendermaßen festzulegen:

Eine elektrische Energiemenge  $E_1$  ist größer als eine elektrische Energiemenge  $E_2$ , wenn durch  $E_1$  an demselben Zähler eine höhere Umdrehungszahl hervorgerufen wird als durch  $E_2$ .

Die Vielfachheit werde folgendermaßen festgelegt:

Eine elektrische Energie  $E_2$  ist mindestens doppelt so groß wie eine elektrische Energie  $E_1$ , wenn sie in einem Zähler mindestens die doppelte Umdrehungszahl hervorruft, wie  $E_1$  in demselben Zähler.

Die Einheit ist gemäß internationaler Übereinkunft das »Joule« (J). Gebräuchliche Zähler sind allerdings meistens in Kilowattstunden (kWh) geeicht ( $1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ Mill. J}$ ). Daher kommen wir im konkreten Fall zur folgenden Einheitenfestlegung:

Wenn durch den Zähler 1 kWh fließt, dreht er sich so oft, wie die Zählerkonstante angibt.

Mit dieser Einführung ist die quantitative Basis dafür gegeben, in eindeutiger Weise von elektrischer Energie reden und mit ihr umgehen zu können. Ein Verständnis der elektrischen Energie muß sich dagegen in Auseinandersetzung mit den bereits vorhandenen Anschauungen und durch weiteren Umgang mit der Energie durch Benutzung des festgelegten Maßes ergeben. Verständnis heißt zunächst einmal, ein Gefühl für die Größenordnungen der bei typischer Vorgängen umgesetzten Mengen elektrischer Energie zu erlangen. Das kann beispielsweise dadurch geschehen, daß man typische Hilfsfunktionen elektrischer Energie hinsichtlich ihres Energieverbrauchs untersucht:

*Aufgabe:* Welcher Energie bedarf es, um mit einem Tauchsieder das Kaffeewasser zu bereiten, mit einem Fön die Haare zu trocknen, ein Konzert im Radio zu hören, ein Zimmer mit dem Staubsauger zu säubern, mit dem Geschirrspüler eine Runde Geschirr zu spülen?

*Versuch:* Durch einfache Versuche läßt sich bei elektrischen Geräten die Vermutung bestätigen, daß die Energieaufnahme proportional zur Betriebszeit ist. Die Proportionalitätskonstante ist die Leistung, eine zur Charakterisierung des Energieflusses (Energie/Zeit) geeignete Gerätekonstante.

## 2.2 Energieumwandlungen

Die Beschränkung der bisherigen Betrachtung auf die elektrische Energie ergibt sich aus dem Vorhandensein eines Meßverfahrens. Fragt man entsprechend der Vorstellung der Energieerhaltung, was aus der elektrischen Energie wird, während (und/oder nachdem) die Hilfsfunktionen erfüllt werden (worden sind), so kommt man zu weiteren Energiearten, die sich nunmehr mit Hilfe der elektrischen Energie quantifizieren lassen.

### 2.2.1 Thermische Energie

Ruft man mit Hilfe eines Tauchsieders eine Temperaturerhöhung in einer bestimmten Wassermenge hervor, so kann diese Temperaturerhöhung als Ausdruck des erhöhten Energieinhalts des Wassers angesehen werden: Elektrische Energie  $\Delta E_{el}$  ist in thermische Energie  $\Delta E_{th}$  des Wassers umgewandelt worden. Wegen der Energieerhaltung kann man demnach definieren:

$$\Delta E_{th} = \Delta E_{el}. \quad (1)$$

Durch Messung der dabei übertragenen Energie  $\Delta E_{el}$  und der Temperaturerhöhung  $\Delta \vartheta$  stellt man (in einem weiten Bereich) eine Proportionalität zwischen  $\Delta E_{el}$  und  $\Delta \vartheta$  fest, so daß gilt:

$$\Delta E_{th} = C \cdot \Delta \vartheta. \quad (2)$$

Die Definition der thermischen Energie (1) ist zwar eine Festlegung. Sie ist aber die einzige, die mit dem Prinzip der Energieerhaltung verträglich ist. Anschaulich kann man den Vorgang daher so verstehen, daß die auf elektrischem Wege über den Tauchsieder in das Wasser hineingeflossene Energie jetzt im Wasser »steckt« und in der Temperaturerhöhung zum Ausdruck kommt.

*Ergänzung:* Das was hier als thermische Energie definiert worden ist, hat bereits lange vor der Aufstellung des Energieprinzips unter der Bezeichnung Wärme oder Fluidum Caloricum als Erhaltungsgröße eine Rolle gespielt. So unzutreffend die Wärmestoffvorstellung im allgemeinen auch sein mag, bei Mischungsversuchen verhält sich die Wärme bzw. die thermische Energie tatsächlich wie eine Erhaltungsgröße.

*Versuch:* Mischt man zwei gleiche Mengen Wasser der Temperatur  $\vartheta_1$  und  $\vartheta_2$ , so ermittelt man eine Mischtemperatur

$$\vartheta_m = \frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{2} . \quad (3)$$

Mit dem gemessenen Wert von  $\vartheta_m$  zeigt man, daß die Gesamtänderung der Energie

$$\Delta E_{th} = \Delta E_{th}^1 + \Delta E_{th}^2 = 0$$

ist. Denn das heiße Wasser mit der Temperatur  $\vartheta_1 > \vartheta_2$  gibt die Energie

$$\Delta E_{th}^1 = -C(\vartheta_1 - \vartheta_m) = -C \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2)/2$$

an das kalte Wasser der Temperatur  $\vartheta_2$  ab, welches dadurch einen Energiezuwachs von

$$\Delta E_{th}^2 = C(\vartheta_m - \vartheta_2) = C \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2)/2 = -\Delta E_{th}^1$$

erfährt.

Die Proportionalitätskonstante  $C$  ist die sog. Wärmekapazität des Wassers. Sie ist proportional zur Masse  $m$  des Wassers

$$C = c \cdot m, \quad (4)$$

wobei  $c$  die spezifische Wärmekapazität darstellt, welche die Energiemenge angibt, die das Wasser pro Masseneinheit und Temperaturdifferenz aufzunehmen vermag.  $c$  charakterisiert demnach das thermische Energiespeichervermögen des Wassers und erlaubt, die thermische Energie von beliebigen Wasser-

massen beliebiger Temperatur zu berechnen. Jedes System läßt sich dementsprechend durch eine je spezifische Wärmekapazität charakterisieren.

### 2.2.2 Innere Energie

Setzt man die Erwärmung des Wassers weiter fort, so wird man bei einer Temperatur von etwa 100°C etwas qualitativ Neues beobachten: Die Temperatur steigt nicht mehr; dafür verdampft jetzt das Wasser. Alle weiterhin zugeführte elektrische Energie  $\Delta E_{el}$  wird offenbar nicht mehr in thermische Energie umgewandelt, sondern fließt jetzt in einen neuen »Kanal«. Man kann feststellen, daß der Wasserverlust  $\Delta m$ , d. h. die Masse des entstehenden Dampfes, proportional zu  $\Delta E_{el}$  ist; und es liegt daher nahe, eine neue Energieart, die »Dampfenergie«  $\Delta E_D$ , zu definieren:

$$\Delta E_D = \Delta E_{el} \sim \Delta m. \quad (5)$$

Man hätte aber auch die Möglichkeit, durch Auffangen des Dampfes (bei konstantem Druck) das Volumen des Dampfes als Maß für die Dampfenergie zu wählen. Auch hier würde man eine Proportionalität zur zugeführten elektrischen Energie feststellen:

$$\Delta E_D = \Delta E_{el} \sim \Delta V. \quad (6)$$

Da man sich leicht klarmachen kann, daß die Energie nicht nur dem Dampfentstehung dient, also dazu, die Flüssigkeitsmoleküle auseinanderzubringen, sondern auch dazu, dem entstehenden Dampf das von diesem beanspruchte größere Volumen  $\Delta V$  durch Verdrängung der Luft zu verschaffen, liegt es nahe, die Dampfenergie  $\Delta E_D$  folgendermaßen zu definieren:

$$\Delta E_D = \lambda \cdot \Delta m + p_0 \cdot \Delta V. \quad (7)$$

Dabei sind die Konstanten  $\lambda$  und  $p_0$  die Verdampfungswärme und der Luftdruck.

Genaugenommen fließt also die Dampfenergie  $\Delta E_D$  in mindestens zwei Kanäle, einen inneren und einen äußeren.

Würde man die Erwärmung des Wassers in einem geschlossenen Gefäß mit genügend druckfesten Wänden durchführen, so könnte man eine Temperaturerhöhung auch über 100°C hinaus feststellen, was auf eine weitere Zunahme der thermischen Energie hindeutet. Ab einer sehr hohen Temperatur würde man schließlich die chemische Aufspaltung des Wassers in Wasserstoff und Sauerstoff beobachten können, womit ein weiterer, ein chemischer Kanal für die vom Wasser aufgenommene Energie geöffnet würde.

Der Verdampfungs-, thermische und chemische Kanal hängen offenbar eng zusammen. Die in ihnen lagernde Energie wird daher pauschal »Innere Energie« genannt.

### 2.2.3 Übertragungs- und Speicherformen der Energie

Während die eindeutige Zerlegung der inneren Energie i. a. Schwierigkeiten bereitet, ist die Bestimmung der Energieart, die vom System aufgenommen bzw. abgegeben wird, meist unproblematisch:

Fließt ein elektrischer Strom durch das System, und gibt der Strom dabei einen Teil seiner Energie an das System ab, so hat das System elektrische Energie aufgenommen. Mechanische Energie wird dem System zugeführt, wenn es (z. B. ein Gas) komprimiert wird.

Die auf diese Weise ausgetauschten Energien faßt man unter dem Begriff Arbeit  $W$  zusammen.

Wird hingegen der Energieaustausch dadurch realisiert, daß man das System mit einem anderen durch Berührung oder durch Strahlung in thermischen Kontakt bringt, so findet ein Austausch von Wärme  $Q$  statt.

Bei chemischen Reaktionen liegt insofern ein Sonderfall vor, als dabei i. a. nicht nur der Energiezustand, sondern auch die Stoffmenge des Systems verändert wird.

Zusammenfassend wird die Zunahme  $\Delta E$  der inneren Energie  $E$  eines Systems folgendermaßen dargestellt:

$$\Delta E = Q + W, \quad (8)$$

wenn man unter  $Q$  die dem betrachteten System in Form von Wärme und unter  $W$  die in Form von Arbeit zugeführten Energien versteht. (Bei Energieabnahme erhält  $\Delta E$  ein negatives Vorzeichen). Gl. (8) ist die übliche thermodynamische Fassung des Energiesatzes.

Man kann i. a. zwar sicherstellen, ob ein System Energie in Form von Wärme  $Q$  oder in Form von (mechanischer, elektrischer, chemischer) Arbeit  $W$  aufnimmt oder abgibt.

Aus der besonderen Form des Energieaustausches kann aber weder geschlossen werden, wie die Energie im System gespeichert wird, noch kann aus den speziellen Speicherarten der Energie gefolgert werden, in welcher Form die Energie ausgetauscht wird.

*Weiterführende Literatur:* Zur Problematik der Speicher- und Übertragungsformen der Energie siehe z. B. JUNG 1976, FARWIG et al. 1979, SCHÜRMAN et al. 1976.

#### 2.2.4 Ableitung weiterer Energiearten

Im Prinzip können weitere Energiearten nach demselben Schema im Anschluß an die elektrische Energie definiert werden. Allerdings hat man es im Unterschied zur Definition der thermischen Energie mit praktischen Schwierigkeiten zu tun, die vor allem darin bestehen, daß sich die elektrische Energie nicht vollständig in den gewünschten Kanal, z. B. der potentiellen Energie, einschleusen läßt. Ein Teil der Energie geht durch Reibung verloren, d. h. diese Energie wird letztlich als Wärme an die Umgebung abgegeben. Da sie dabei normalerweise keine Temperaturerhöhung bewirkt, entzieht sie sich sehr leicht der Beobachtung, was eine fehlerhafte Energiebilanzierung zur Folge haben kann.

*Ergänzung:* Zwar lassen sich diese Verluste im Prinzip vermeiden, mit den Geräten einer Schulsammlung hat man normalerweise aber keine Chance, sie unter die Grenze eines akzeptierbaren Meßfehlers zu bringen. U. E. sollte auch gar nicht versucht werden, die Verluste zu verstecken, denn in ihnen macht sich massiv das bereits an anderen Stellen beobachtete Prinzip von der Entwertung der Energie bemerkbar.

Damit man zu brauchbaren Ergebnissen kommt, sollten die Energieverluste bei den Energieumwandlungen durch einen Faktor  $\eta$ , einen sogenannten Wirkungsgrad, in Rechnung gestellt werden (vgl. Kap. IV, 2). Wie das aussehen könnte, sei hier kurz am Beispiel der Umwandlung von elektrischer Energie mit einem Elektromotor in potentielle (Höhen-)Energie  $\Delta E_{\text{pot}}$  skizziert.

*Versuch:* Hebt man den Körper mit einem Elektromotor in einem konstanten Drehzahlbereich, so stellt man fest, daß die dem Körper zugeführte Energie proportional ist zur Hubhöhe  $\Delta h$ :

$$\Delta E_{\text{pot}} = \eta \cdot \Delta E_{\text{el}} = \eta \cdot G \cdot \Delta h. \quad (9)$$

Die Proportionalitätskonstante  $G$  ist gleich der Gewichtskraft des Körpers. Den Wirkungsgrad  $\eta$  kann man nun auf folgende Weise bestimmen.

Wandelt man die potentielle Energie  $\Delta E_{\text{pot}}$  in thermische um, was wiederum verlustfrei geschehen kann (LANGENSIEPEN 1977), so gelangt man zu einer zweiten Bestimmungsgleichung von  $\Delta E_{\text{pot}}$ ,

$$\Delta E_{\text{pot}} = \Delta E_{\text{th}},$$

woraus sich  $\eta = \Delta E_{\text{th}}/\Delta E_{\text{el}}$  ergibt.

Führt man außerdem Umwandlungen von potentieller Energie in elektrische Energie durch (am besten mit dem gleichen Elektromotor, den man nunmehr als Generator arbeiten läßt), so hat man unter Berücksichtigung des oben

ermittelten Wirkungsgrades  $\eta$  die Möglichkeit, einen vollständigen Umwandlungszyklus der Art

$$\overbrace{\Delta E_{\text{pol}} \rightarrow \Delta E_{\text{th}} \leftarrow \Delta E_{\text{el}}}$$

auch quantitativ zu realisieren. Im Grunde läßt sich die Berechtigung für die Benutzung der Größe Energie nur durch Überprüfung der Konsistenz der Energiedefinition, d. h. durch eine Realisation aller denkbaren Umwandlungszyklen innerhalb der Physik, nachweisen.

*Anmerkung:* Nachdem dieses bereits in den Anfangsjahren der Energie insbesondere von Joule für die klassischen Energiearten mit kaum zu übertreffender Exaktheit durchgeführt worden ist, verläuft heute die Argumentation vielfach genau umgekehrt: Weil der Energiesatz gilt, ist genau das und das zu erwarten. In diesem Sinn ist die Entdeckung des Neutrinos beim  $\beta$ -Zerfall u. a. dem unverbrüchlichen Glauben an den Energiesatz zu verdanken.

Tab.: Maßeinheiten von Energie und Leistung

Joule	Kilopondmeter*	Kalorie*	Erg*	Kilowattstunde	1 kg-Steinkohlen- äquivalent	Elektronenvolt
[J]	[kpm]	[cal]	[erg]	[kWh]	[kg SKE]	[eV]
1	0,102	0,239	$10^7$	$0,278 \times 10^{-6}$	$0,341 \times 10^{-7}$	$6,241 \times 10^{18}$

Watt	Pferdestärke*
[W]	[PS]
1	0,00134

\* veraltete Einheiten, manchmal noch in der Literatur vorzufinden

### III. Energieentwertung

#### 1 Was ist Energieentwertung?

*Vorbemerkung:* Das Ziel, die Verbrauchs- bzw. Entwertungseigenschaft der Energie zu einem quantitativen Konzept zu verschärfen, mit dem es möglich ist, die Entwertung, die während eines energetischen Prozesses auftritt, zu messen, macht es erforderlich, dem Begriff der Energieentwertung eine präzise, von der jeweiligen Situation unabhängige Bedeutung zu geben. Dazu erscheint es zunächst einmal notwendig, das, was bislang unter Energieentwertung verstanden wird, von subjektiven Merkmalen zu befreien.

Die auffällige Eigenschaft der Energie, ständig verbraucht zu werden, kann als Wertabnahme bzw. Entwertung der Energie angesehen werden. Denn mit verbrauchter bzw. entwerteter Energie können keine Hilfsfunktionen mehr erfüllt werden.

*Beispiel:* Jemand möchte Tee aufgießen. Er läßt das aufgekochte (100°C heiße) Wasser jedoch so lange stehen, bis es sich auf 40°C abgekühlt hat. Jemand möchte baden und füllt seine Wanne mit kochendem Wasser. Er wartet ebenfalls bis das Wasser sich auf 40°C abgekühlt hat, bevor er in die Wanne steigt.

Man ist geneigt, die Abkühlung des Teewassers als Entwertung aufzufassen, die Abkühlung des Badewassers hingegen als Aufwertung, obwohl in beiden Fällen objektiv dasselbe passiert ist. Man kann sich jedoch leicht klarmachen, daß derjenige, der über das 100°C heiße Wasser verfügt, besser dran ist. Er kann nämlich im Prinzip beides: Tee aufgießen und baden. Denn das 40°C warme Wasser entsteht ohne sein Zutun durch Abkühlung von selbst aus dem 100°C heißen Wasser. Dieser Abkühlung entspricht insofern eine Entwertung, als man mit dem nunmehr 40°C warmen Wasser nur noch baden kann, da die Umkehrung erfahrungsgemäß nicht gilt: 40°C warmes Wasser erwärmt sich *nicht* von selbst auf 100°C. Im Gegenteil, es kühlt sich womöglich weiter ab, so daß man schließlich nicht einmal mehr baden kann.

Da die Entwertung sich auf eine Änderung der Qualität der thermischen Energie des Wassers bezieht, handelt es sich um eine Energieentwertung.

*Beispiel:* Ein fahrendes Auto dem keine (chemische) Energie (z. B. in Form von Benzin) mehr zugeführt wird, kommt nach einer gewissen Zeit zum Stehen.

Auch wenn z. B. in einer gefährlichen Situation das Abbremsen als etwas Wertvolles angesehen werden kann, liegt es nahe, das Stehenbleiben bzw. Abbremsen als den Energie entwertenden Prozeß anzusehen: Denn während ein fahrendes Auto von selbst stehenbleibt, der Stillstand also im Prinzip von

selbst eintritt, gilt das Umgekehrte nicht: Ein Auto setzt sich *nicht* von selbst in Bewegung.

Wie aus diesen und weiteren Beispielen hervorgeht, kommt die Energieentwertung dadurch zustande, daß ein Vorgang von selbst in einer bestimmten Richtung abläuft und von einem Anfangszustand ausgehend einen bestimmten Endzustand erreicht.

Da die Umkehrung nicht von selbst stattfindet, der Anfangszustand also nicht ohne weiteres aus dem Endzustand erreicht werden kann, hat die den Vorgang antreibende Energie etwas unwiderruflich eingebüßt, was man mit Energieentwertung umschreibt:

Ein Vorgang (Prozeß, Zustandsänderung) ist mit Energieentwertung verbunden, wenn aus dem Endzustand nicht ohne weiteres der Anfangszustand wieder hergestellt werden kann.<sup>4</sup>

### 1.1 Selbsttätige Vorgänge

Die Energieentwertung ist offenbar mit der Eigenschaft natürlicher Vorgänge verknüpft, von selbst nur in einer Richtung abzulaufen. Solche Prozesse nennt man selbsttätig:

Zustandsänderungen heißen selbsttätig, wenn sie ablaufen können, ohne daß andere Prozesse stattfinden, d. h. ohne daß eine andere Zustandsänderung zurückbleibt.

*Anmerkung:* Diese Definition trägt u. a. der Tatsache Rechnung, daß bei vielen Vorgängen die Aufmerksamkeit nicht nur auf die auffälligen Veränderungen gerichtet werden muß, sondern auch auf die mit diesen ursächlich zusammenhängenden unauffälligen Veränderungen.

Durch diese Einsicht werden wir beispielsweise gezwungen, unsere obige Aussage, daß sich warmes Wasser von selbst abkühlt, zu präzisieren. Denn da die Abkühlung mit einer Energieabnahme verbunden ist, muß aufgrund des Energieerhaltungssatzes an einer anderen Stelle eine gleichgroße Energiezunahme auftreten. Man überzeugt sich leicht davon, daß die umgebende Luft (kurz: die Umgebung) eine entsprechende Erwär-

<sup>4</sup> Für den Vergleich von Energiewerten kommt es nur auf die Zustände vor bzw. nach dem Prozeß an; das ist die einzige »Spur«, die der Vorgang hinterläßt. Wir gebrauchen jedoch im folgenden die Begriffe Zustandsänderung, Prozeß und Vorgang synonym.

mung aufweist, von der man nur deshalb nichts merkt, weil wegen der Größe der Umgebung eine Temperaturerhöhung nicht meßbar ist.<sup>5</sup> Nicht die Abkühlung des warmen Wassers ist selbsttätig, sondern die Abkühlung des Wassers zusammen mit der »Erwärmung« der Umgebung. Davon überzeugt man sich beispielsweise, wenn man das Wasser in einer Thermosflasche aufbewahrt. Da in diesem Fall (innerhalb genügend kleiner Zeiträume) eine Wechselwirkung mit der Umgebung ausgeschlossen werden kann, beobachtet man auch keine Abkühlung.

Die Einbeziehung der Umgebung (allgemein: aller am jeweiligen Prozeß beteiligten Systeme) gebietet sich auch noch durch folgenden Sachverhalt: Nicht immer beobachtet man die selbsttätige Abkühlung eines thermischen Systems. Manchmal erwärmt sich ein System von selbst (z. B. ein Gefäß mit kaltem Wasser an einem warmen Sommertag). Ob in einem gegebenen Fall Abkühlung oder Erwärmung eintreten, hängt nämlich davon ab, ob das thermische System wärmer oder kälter als die Umgebung ist.

Die Ablaufrichtung selbsttätiger Prozesse richtet sich nach der Temperatur des Systems und der Umgebung. Stehen die Temperaturen fest, so gibt es aber nur eine bestimmte selbsttätige Ablaufrichtung des Wärmeleitungsprozesses. Die Umkehrung eines selbsttätigen Prozesses tritt niemals von selbst ein: Man hat beispielsweise nie beobachten können, daß sich Wasser von Umgebungstemperatur von selbst (an der Umgebung) erwärmt oder abkühlt. Es gilt demnach:

Selbsttätige Zustandsänderungen sind unumkehrbar (irreversibel) in dem Sinne, daß sie nicht rückgängig gemacht werden können, ohne daß eine andere Veränderung zurückbleibt.  
Jeder selbsttätige Prozeß ist mit einer Energieentwertung verbunden.

Auf den ersten Blick scheint die Realität den hier gemachten Aussagen zu widersprechen. Macht man nicht ständig die Erfahrung, daß auch in Abwesenheit einer kalten Umgebung Erwärmungen auftreten?

*Beispiele:* Ein Topf mit Wasser wird auf einer heißen Herdplatte erwärmt, Autos werden nicht nur abgebremst, sondern beschleunigt, Wasser regnet nicht nur aus den Wolken ab, sondern sammelt sich dort auch wieder an.

Sieht man jedoch genauer hin, so zeigt sich, daß der Ablauf dieser Prozesse entgegen ihrer natürlichen Richtung nicht alles ist, was in der Welt passiert: Gleichzeitig mit ihnen laufen andere Prozesse in ihrer natürlichen Richtung ab, z. B. Verbrauch von elektrischer Energie, Verbrauch von chemischer Energie, Verbrauch von Sonnenenergie.

<sup>5</sup> Die Umgebung gehört zur Klasse der Wärmebäder oder -reservoirs. Das sind solche thermischen Systeme, die trotz Wärmeaufnahme oder -abgabe keine merkliche Temperaturänderung erleiden.

Die Umkehrungen der selbsttätigen Prozesse sind keine selbsttätigen Prozesse, weil gleichzeitig weitere Zustandsänderungen zurückbleiben. Zutreffender wäre es daher, davon zu sprechen, daß die Prozesse durch andere zurückgespult werden, d. h.:

Die Umkehrung eines selbsttätigen Prozesses kann erzwungen werden durch den Ablauf eines anderen selbsttätigen Prozesses in natürlicher Richtung.

Da der selbsttätige Ablauf eines Vorgangs in natürlicher Richtung mit einer Energieentwertung verbunden ist, muß die Umkehr des Vorgangs mit dem Rückgängigmachen der Entwertung, also einer entsprechenden Energieaufwertung einhergehen. Diese Folgerung ist auch anschaulich klar, da der zurückgespulte Vorgang erneut (unter Energieentwertung) ablaufen kann. Auch der selbsttätig ablaufende Gesamtvorgang, der aus einem gegebenen selbsttätigen Vorgang und der Umkehrung eines anderen selbsttätigen Vorgangs zusammengesetzt ist, ist mit einer (wenn auch eventuell verschwindend kleinen) Energieentwertung verbunden.

*Anmerkung:* Setzt man im folgenden die Additivität der Entwertung voraus, so ergibt sich daraus, daß die mit dem in natürlicher Richtung ablaufenden Teilprozeß des Gesamtvorgangs verknüpfte Energieentwertung, die auftreten würde, wenn er allein abliefe, nicht kleiner sein darf als die durch den zurückgespulten Prozeß bedingte Energieaufwertung.

Damit wird es möglich, die Größe unterschiedlich stark ausgeprägter Energieentwertungen miteinander zu vergleichen.

Von den mit zwei selbsttätigen Zustandsänderungen verbundenen Energieentwertungen ist diejenige größer, die zu dem Prozeß gehört, der den anderen zurückspulen, d. h. dazu veranlassen kann, entgegen der natürlichen Richtung abzulaufen.

*Beispiel:* Temperatúrausgleich. Wir betrachten folgende Prozesse  $\alpha$  und  $\beta$  mit gleichen Körpern unterschiedlicher Temperatur (z. B. gleiche Mengen Wasser).  $\alpha$ : Temperatúrausgleich zwischen  $25^{\circ}\text{C}$  und  $75^{\circ}\text{C}$  (Abb. 1 a),  $\beta$ : Temperatúrausgleich zwischen  $0^{\circ}\text{C}$  und  $100^{\circ}\text{C}$  (Abb. 1 b). Daß  $\beta$  mit einer größeren Energieentwertung verbunden ist als  $\alpha$ , kann man folgendermaßen zeigen (Abb. 1 c): Geht man vom Anfangszustand von  $\beta$  und vom Endzustand von  $\alpha$

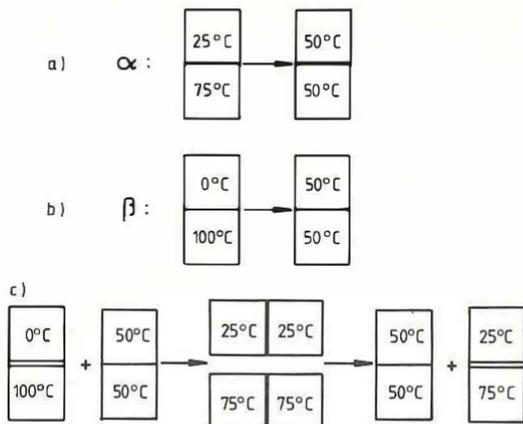


Abb. 1: a) Prozeß  $\alpha$ : Temperaturnausgleich zwischen gleichen Körpern mit den Anfangstemperaturen  $\vartheta_h = 75^\circ\text{C}$  und  $\vartheta_k = 25^\circ\text{C}$ .  
 b) Prozeß  $\beta$ : Temperaturnausgleich zwischen gleichen Körpern mit den Anfangstemperaturen  $\vartheta_h' = 100^\circ\text{C}$  und  $\vartheta_k' = 0^\circ\text{C}$ .  
 c)  $\beta$  kann  $\alpha$  zurückspulen.

aus, so kann man, wenn man zunächst Ausgleich stattfinden läßt zwischen  $0^\circ\text{C}$  und  $50^\circ\text{C}$  und zwischen  $50^\circ\text{C}$  und  $100^\circ\text{C}$  und anschließend *einmal* zwischen  $25^\circ\text{C}$  und  $75^\circ\text{C}$ , den Endzustand von  $\beta$  und den Anfangszustand von  $\alpha$  herstellen, ohne eine weitere Veränderung in der Welt zurückzulassen.  $\beta$  hat also während seines Ablaufs  $\alpha$  zurückgespult und die mit  $\alpha$  einhergehende Energieentwertung rückgängig gemacht.

## 1.2 Energieentwertungen und Energieaufwertungen

An dieser Stelle kann der scheinbare Widerspruch zwischen Energieknappheit und Energieerhaltung aufgeklärt werden. Die Tatsache, daß ein selbsttätiger Prozeß ablaufen kann, ohne daß außerdem noch etwas passiert, (z. B. Tauchsieder im See verbraucht Energie, ohne den See merklich zu erwärmen) als auch einen anderen selbsttätig ablaufenden Vorgang umzukehren vermag (z. B. Tauchsieder im Topf mit Wasser erwärmt das Wasser und spult den Vorgang: »Abkühlen des Wassers auf Umgebungstemperatur« zurück), ist als Hinweis auf den unterschiedlichen Grad der Entwertung zu deuten: Die Entwertung ist im ersten Fall offenbar größer als im zweiten Fall, weil hier von dieser Entwertung noch eine Aufwertung abzuziehen ist. Der unterschiedliche Grad der Energieentwertung besteht in der unterschiedlich starken Möglichkeit, selbsttätig ablaufender Energieumwandlungen, andere selbsttätige Ener-

gieumwandlungen rückgängig zu machen und damit den menschlichen Bedürfnissen angemessene Energieaufwertungen zu bewirken.

Energieverschwendung beruht nicht auf dem Vernichten, sondern auf der überflüssigen, (d. h. nicht zu möglichst großen Energieaufwertungen genutzten) Entwertung von Energie.

Der menschliche Gebrauch von Energie stellt sich nicht als Energiekonsum dar, sondern als Möglichkeit, gewisse Energieumwandlungen, z. B. das Verbrennen von Öl oder das Fließen von elektrischem Strom zu veranlassen, für menschliche Bedürfnisse wichtige Vorgänge immer wieder zurückzuspulen, also in die Lage zu versetzen, selbsttätig abzulaufen, um dabei Wärme, Bewegung, Schall, Licht usw. in den verschiedensten Formen zu produzieren. Dementsprechend besteht die Nützlichkeit von (energiewandelnden) Maschinen darin, entsprechende Rückspulvorgänge zu veranlassen.

*Beispiele:* 1. Ein Elektroherd stellt Temperaturunterschiede her auf Kosten des »Verbrauchs« elektrischer Energie.

2. Bei einem Heizungssystem werden Temperaturunterschiede durch Wärmeleitung hergestellt.

3. Eine Batterie erzeugt elektrische Energie aufgrund des Ablaufs einer chemischen Reaktion.

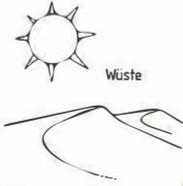
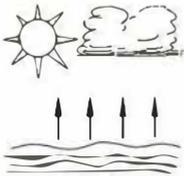
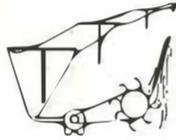
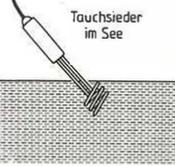
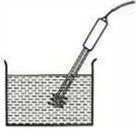
4. Einen Wasserfall kann man benutzen, um viele Prozesse zurückzuspulen: Man kann mit ihm z. B. elektrische Energie erzeugen und ihn zum Hochpumpen anderen Wassers verwenden (Speicherkraftwerk).

Grundlage allen Geschehens und Lebens ist die Tatsache, daß mit Energieentwertung verbundene Vorgänge bei ihrem Ablauf »Umwege machen«, d. h. andere (bereits abgelaufene) selbsttätige Prozesse zurückspulen und auf diese Weise die mit letzteren verknüpfte Energieentwertung rückgängig machen.

*Beispiele:* 1. Die heiße und gerichtete Sonnenstrahlung wird zum Teil nicht direkt als diffuse kalte Strahlung in den Weltraum zurückgeworfen, sondern bewirkt zwischendurch z. B.

- die Herstellung organischer Substanzen durch Fotosynthese,
- die Entstehung von Temperaturdifferenzen auf der Erde,
- die Verdunstung von Wasser und damit die Wolkenbildung.

Tab. 3: Mit Energieentwertung verbundene Vorgänge – von diesen angetriebene Vorgänge mit Energieaufwertung.

<p>1 a</p> 	<p>»Heiße« Sonnenstrahlung fällt auf die Erde und wird (ungenutzt) als »kalte« Strahlung in den Weltraum zurückgeworfen.</p>	<p>Die Sonnenstrahlung bringt Wasser zum Verdunsten. Dadurch sammelt sich Wasser in großen Höhen (Wolkenbildung). Prozeß 2 a) zurückgespult.</p> 
<p>2 a</p> 	<p>Das Wasser fällt ungenutzt in ein tiefer gelegenes Becken und erwärmt sich dabei ein wenig.</p>	<p>Das fallende Wasser treibt über ein Schaufelrad einen Generator an, erwärmt sich dafür aber viel weniger. 3 a) wird zurückgespult, weil statt einer kleinen Erwärmung elektrische Energie erzeugt wird.</p> 
<p>3 a</p> 	<p>Ein Tauchsieder in einem großen See erwärmt das Wasser nur sehr wenig.</p>	<p>Eine kleine Wassermenge wird dagegen in gleicher Zeit stark erwärmt. 4 a) wird zurückgespult, weil (als abgekühlt gedachtes) kaltes Wasser erwärmt wird.</p> 
<p>4 a</p> 	<p>Heißes Wasser kühlt sich stark ab.</p>	<p>Kaffee wird im Wasserbad erwärmt. 4 a) wird zurückgespult, weil die Abkühlung des Wassers eine Erwärmung des Kaffees bewirkt.</p> 

2. Organische Substanzen zerfallen zum Teil nicht direkt, sondern auf dem Umweg der »Herstellung« von Kohle.

3. Temperaturdifferenzen gleichen sich nicht direkt aus, sondern bewirken Druckunterschiede und als Folge davon die Entstehung von Winden.

4. Regenwasser fällt nicht sofort in die Ozeane, sondern zum Teil erst auf Berge, so daß die weitere Bewegung genutzt werden kann.

### 1.3 Bewertung von Energiearten

Aus dem alltäglichen Umgang mit der Energie weiß man, daß manche Energiearten vielfältig andere dagegen nur für einzelne Zwecke verwendbar sind. Dem liegt folgender Sachverhalt zugrunde:

Nicht jede Energieart kann in jede andere Energieart in beliebigem Ausmaß umgewandelt werden.

*Aufgabe:* Es soll ein Verfahren beschrieben werden,

a) auf welche Weise elektrische Energie in thermische und

b) thermische in elektrische Energie umgewandelt werden kann.

Darüberhinaus soll abgeschätzt werden, in welchem Ausmaß diese Umwandlungen gelingen.

Es liegt nahe, die Energiearten selbst in eine wertmäßige Rangfolge einzuordnen und zwar in der Weise, daß der betrachteten Energieart ein umso höherer Wert zugeordnet wird, je weniger Beschränkungen hinsichtlich der Umwandlung dieser Energieart in andere Energiearten bestehen.

Elektrische und mechanische Energie (bzw. Arbeit) haben demzufolge den höchsten Wert. Sie sind unbeschränkt umwandelbar in jede andere Energieart und im Idealfall (reversible Prozeßführung) auch ineinander. Demgegenüber besitzen die Energiearten thermische Energie (bzw. Wärme) einen geringeren Wert, weil sie nicht in beliebigem Ausmaß in andere Energiearten umgewandelt werden können: Ihr Wert hängt von der jeweiligen Temperatur des Wärme abgebenden (thermischen) Systems ab und zwar in der Weise, daß der Wert umso höher ist, je höher die Temperatur ist. Praktisch wertlos ist die thermische Energie der jeweiligen Umgebung. Mit ihr ist ohne weiteres nichts mehr anzufangen.

*Aufgabe:* Man mache sich die letzte Aussage an Hand von Beispielen (Wärmeübertragung) klar.

An sich nimmt die chemische Energie eine Mittelposition in dieser Werteskala ein. Da bei chemischen Prozessen prinzipiell ein (häufig allerdings sehr

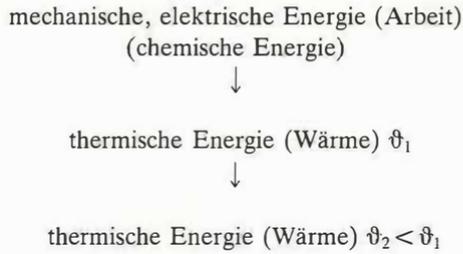


Abb. 2: Schematische Darstellung der quantitativen Rangfolge der Energiearten.

geringer) Anteil der auftretenden Energie als Wärme frei wird, ist die chemische Energie nicht ganz so wertvoll wie die elektrische, aber im Bereich gewöhnlicher Temperaturen meist wertvoller als thermische Energie.

Wertvollere Energiearten zeichnen sich dadurch aus, daß sie selbsttätig *in beliebigem Ausmaß* unter Energieentwertung in weniger wertvolle Energiearten übergehen können. Umgekehrt ist es jedoch unmöglich, eine minderwertigere Energieart in beliebigem Ausmaß in eine höherwertigere umzuwandeln, weil damit insgesamt eine Energieaufwertung verbunden wäre. Nach dem oben Gesagten kann man eine solche Umkehrung aber dadurch erzwingen, daß man gleichzeitig einen selbsttätigen Vorgang unter Umwandlung höherwertiger Energiearten in minderwertige Energiearten ablaufen läßt.

*Beispiel:* Wärmekraftmaschine und Wärmepumpe stellen Vorrichtungen dar, mit denen derartige Rückspulvorgänge realisiert werden können. Eine Wärmekraftmaschine (ausführliche Beschreibung siehe Kap. III, 2.5 und V, 3) nutzt die mit einem Wärmeleitungsvorgang zwischen einem heißen und einem kalten Wärmebad (i. a. die Umgebung) verbundene Energieentwertung aus, um die mit einem Dissipationsprozeß<sup>6</sup> (z. B. Stehenbleiben einer Turbine) verbundene Energieentwertung rückgängig zu machen (z. B. Antreiben der Turbine) und eine entsprechende Energieaufwertung (Entstehung mechanischer Energie) zu betreiben. Mit anderen Worten: Die vom heißen Wärmebad zur Umgebung fließende Wärmeenergie wird zu einem Teil in mechanische Energie aufgewertet. Es muß aber noch mindestens so viel der thermischen Energie an die Umgebung abgegeben werden, daß die damit verbundene Energieentwertung ausreicht, die Aufwertung in mechanische Energie auszugleichen. Eine Wärmepumpe nutzt die mit der Dissipation mechanischer Energie (in einem zu erwärmenden System) verbundene Energieentwertung aus, um die durch einen Wärmeleitungsvorgang zwischen diesem System und einem Wär-

<sup>6</sup> Dissipation, Dissipationsvorgänge oder -prozesse bezeichnen im folgenden Prozesse, bei denen hochwertige Energie an ein Wärmebad, meist an die Umgebung abgegeben wird.

mebad (i. a. die Umgebung) bewirkte Energieentwertung rückgängig zu machen und damit eine entsprechende Energieaufwertung zu bewirken. Diese Aufwertung besteht darin, daß Wärme von der (kalten) Umgebung auf ein warmes System (z. B. Heizkörper) übergeht. Sie wird durch die Entwertung der die Pumpe betreibenden mechanischen Energie ausgeglichen.

#### 1.4 Verallgemeinerungen des Energieentwertungskonzepts

*Vorbemerkung:* Mit der bisher erreichten Schärfe des Begriffs der Energieentwertung besitzt man bereits ein Konzept, mit dem sich viele Probleme der Energieproblematik einordnen und verstehen lassen. Bevor wir auf eine weitere Verschärfung des Begriffs zu sprechen kommen, soll wenigstens skizziert werden, daß das Konzept allgemeiner anwendbar ist, als es zunächst den Anschein hat. Überlegungen zur Verallgemeinerung der Entwertung insbesondere im wirtschaftlichen Bereich nimmt z. B. GEORGESCU-ROEGEN (1971) auf der Grundlage des mit dem Energieentwertungskonzept äquivalenten Entropiekonzepts vor (vgl. Kap. III, 2.2). Einen leicht verständlichen Überblick über die dort angeschnittenen Probleme insbesondere im Hinblick auf die Erhaltung unserer Umwelt gibt SCHÜTZE (1980).

Das Energieentwertungskonzept kann für die Beschreibung von Vorgängen herangezogen werden, die auf den ersten Blick gar nicht als energetische identifiziert werden.

Beispielsweise läßt sich das Zerfallen einer Sandburg, das Rosten und schließliche Zerfallen eines Autos ebenfalls dem Energieentwertungsprinzip unterordnen. Das Zerfallen der Sandburg ist u. a. auf die Entwertung elektrostatischer und potentieller (mechanischer) Energie zurückzuführen: Mit dem Trocknen des Sandes werden anziehende elektrostatische Kräfte gelöst, viele Sandkörner fallen herunter und geben ihre potentielle Energie an die Umgebung ab. Das Rosten ist eine chemische Reaktion, bei der hochwertige chemische Energie an die Umgebung übergeht.

Aber auch Verunreinigungs- bzw. Mischungsvorgänge, wie z. B. das Verschmutzen von Trinkwasser, können als Energieentwertungsprozesse aufgefaßt werden, denn um einen Verschmutzungsprozeß rückgängig zu machen, bzw. die damit verbundene Entwertung aufzuheben, müssen andere selbsttätige Prozesse, z. B. die Verdampfung und anschließende Kondensation des nunmehr reinen Wassers ablaufen, die mit der Entwertung von Energie verbunden sind.

Auf diese Weise kann man so gut wie alle Entwertungsvorgänge in der Umwelt, die ursprünglich lediglich als Analogon für den Verbrauch bzw. die Entwertung der Energie angesehen worden sind, selbst als Energieentwertungsvorgänge verstehen.

## 2 Wie mißt man Energieentwertung

### 2.1 Definition der Energieentwertung

Den Ausgangspunkt für eine Quantifizierung stellt die aus dem Rückspulkonzept ableitbare Möglichkeit dar, die mit verschiedenen Vorgängen verbundenen Energieentwertungen dadurch zu vergleichen, daß man demjenigen zweier Prozesse die größere Energieentwertung zuschreibt, der den jeweils anderen zurückspulen und damit die durch ihn hervorgerufene Entwertung rückgängig machen kann. Dadurch wird die Einführung des folgenden Meßverfahrens nahegelegt:

#### 1. Ungleichheit der Energieentwertung

Ein selbsttätiger Prozeß  $\alpha$  ist mit einer größeren Energieentwertung  $V(\alpha)$  verbunden als ein selbsttätiger Prozeß  $\beta$ , wenn  $\alpha$  den Prozeß  $\beta$  zurückspulen und damit die mit  $\beta$  verbundene Entwertung  $V(\beta)$  rückgängig machen kann:

$$V(\alpha) \geq V(\beta).$$

#### 2. Vielfachheit der Energieentwertung

Ein selbsttätiger Prozeß  $\alpha$  ist mit einer mindestens doppelt so großen Energieentwertung  $V(\alpha)$  verbunden wie ein selbsttätiger Prozeß  $\beta$ , wenn  $\alpha$  den Prozeß  $\beta$  zweimal zurückspulen kann:

$$V(\alpha) \geq 2 V(\beta).$$

Wenn man allen Energieentwertungen Zahlen zuordnen will, muß man über die Aussagen der oben behandelten Beispiele hinausgehend voraussetzen, daß alle selbsttätigen Prozesse in der beschriebenen Weise miteinander verglichen werden können:

Von zwei beliebigen Prozessen muß mindestens einer den anderen zurückspulen können. M. a. W.: Die Energieentwertung aufgrund mindestens einer der zwei Prozesse muß in der Lage sein, die mit dem anderen Prozeß verbundene Energieentwertung rückgängig zu machen, also eine entsprechende Energieaufwertung zu bewirken.

Daß die Natur sich tatsächlich so verhält, kann man sich an vielen Beispielen klarmachen. Hier sollen nur einige genannt werden (BACKHAUS 1982, S. 74 ff.):

*Beispiele:* 1. Die mit Dissipationsvorgängen (also Vorgängen, bei denen hochwertige Energie an ein Wärmebad, meist an die Umgebung abgegeben wird) verbundenen Energieentwertungen können sich gegenseitig aufheben. So stellen beispielsweise ein ungenutzter Wasserfall und eine zur Ruhe kommende Turbine Dissipationsvorgänge dar. Die durch den Wasserfall bewirkte Energieentwertung kann die Energieentwertung aufgrund der zur Ruhe kommenden Turbine aufheben, indem der Wasserfall die Turbine betreibt.

2. Die mit Dissipationsvorgängen verbundene Energieentwertung kann aber auch dazu genutzt werden, die mit einem Temperatenausgleich verbundene Energieentwertung aufzuheben; beispielsweise dadurch, daß man einen an der Umgebung abgekühlten Topf mit heißem Wasser mit einem Tauchsieder erneut erwärmt.

3. Umgekehrt kann aber auch die Energieentwertung aufgrund von Temperatenausgleichsvorgängen die mit Dissipationsvorgängen verbundene Energieentwertung rückgängig machen:

- Verrichtung von Arbeit mit Wärmekraftmaschinen (siehe Kap. V, 3.1),
- Entstehung von Winden durch Temperaturdifferenzen in der Atmosphäre (siehe Kap. VIII, 2.4),
- Emporsteigen von Wasserdampf durch Sonneneinstrahlung (siehe Kap. VIII, 2.4)
- Entstehung von Konvektionsströmen durch Temperaturunterschiede.

4. Die Energieentwertungen aufgrund von Temperatenausgleichsvorgängen können sich gegenseitig aufheben:

- Erwärmung eines Körpers durch Abkühlung eines anderen,
- Abkühlung eines Körpers unter Umgebungstemperatur durch Abkühlung eines vorher erwärmten anderen Körpers (Prinzip der Absorptionswärmepumpe, siehe Kap. V, 11).

5. Die bei chemischen Reaktionen auftretende Energieentwertung kann die Entwertung aufgrund von Dissipationsvorgängen aufheben:

- Verrichtung von Arbeit durch Verbrennungsmotoren,
- Explosion von Sprengkörpern,
- Verrichtung von Arbeit durch »Entladung« einer Batterie.

6. Mit der Energieentwertung bei chemischen Reaktionen können aber auch Energieentwertungen, die mit Wärmeausgleichsvorgängen einhergehen, rückgängig gemacht werden; beispielsweise bei allen mit Wärmetönung verbundene Reaktionen (z. B. Verbrennung von Kohle, Öl usw.).

Für die Erfüllung menschlicher Hilfsfunktionen unter Einsatz von Energie ist es wichtig festzustellen, daß die mit jedem selbsttätigen Prozeß verbundene Energieentwertung zur Gewinnung (Energieaufwertung) mechanischer Energie genutzt und umgekehrt die Entwertung mechanischer Energie herangezogen

gen werden kann, jede Energieentwertung aufgrund eines anderen Prozesses aufzuheben, bzw. den entsprechenden Prozeß zurückspulen.

Im Hinblick auf eine weitere Verschärfung der Begriffsbildung betrachten wir das folgende Beispiel des »Herunterfallens eines Gewichtstücks« genauer:

*Beispiel:* Herunterfallen eines Gewichtstücks. Sei  $\alpha$  der Prozeß »Herunterfallen (und Liegenbleiben) eines Gewichtstücks der Masse  $m_\alpha = 1$  kg aus einer Höhe von 1 m« (Abb. 3 a). Der Prozeß  $\beta$  unterscheide sich von  $\alpha$  nur durch die kleinere Masse  $m_\beta = 0,4$  kg (Abb. 3 b).

a) Beide Prozesse sind offenbar mit Energieentwertung verbunden: Sie laufen selbsttätig ab, niemals aber von allein in der umgekehrten Richtung.

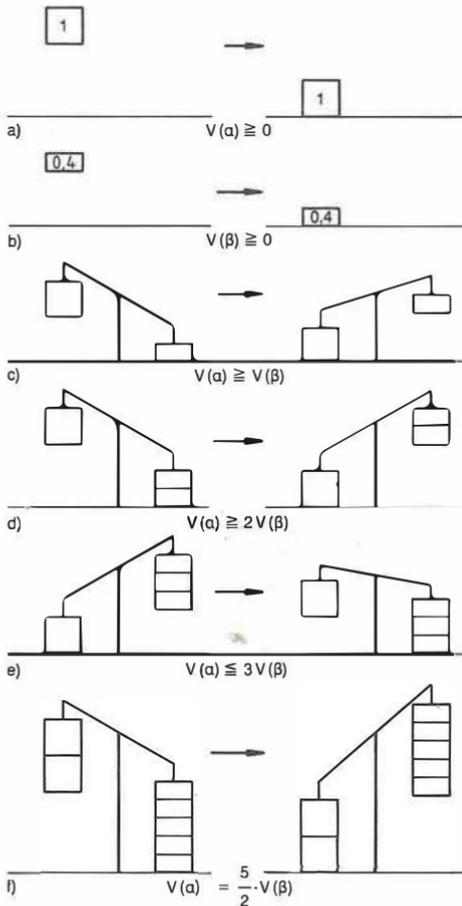


Abb. 3: Vergleich zweier mit verschiedenen Prozessen verbundener Energieentwertungen (Erläuterungen im nebenstehenden Text).

- b) Mit Hilfe eines Hebels sieht man, daß Prozeß  $\alpha$  den Prozeß  $\beta$  zurückspulen kann,  $\alpha$  also mit größerer Energieentwertung einhergeht (Abb. 3 c).
- c) Bei Verwendung eines ungleicharmigen Hebels erkennt man, daß  $\alpha$  gar nicht ganz ablaufen muß, um das kleine Gewichtsstück zu heben, daß man  $\alpha$  also noch weiter nutzen kann. Genauere Untersuchung zeigt, daß mit dem großen Gewichtsstück das kleinere sogar zweimal gehoben werden kann,  $\alpha$  also eine mindestens doppelt so große Energieentwertung bewirkt wie  $\beta$  (Abb. 3 d).
- d) Der nächste Schritt zeigt nun umgekehrt, daß das große Gewichtsstück gehoben werden kann, wenn das kleine dreimal herunterfällt, daß die Energieentwertung aufgrund von  $\alpha$  weniger als dreimal so groß ist wie die von  $\beta$  (Abb. 3 e).
- e) Weitere Vergleiche führen zu dem Ergebnis, daß die Energieentwertung aufgrund von  $\alpha$  genau  $\frac{1}{2}$  mal so groß ist wie die von  $\beta$  (Abb. 3 f).

Dieses Ergebnis läßt sich offenbar verallgemeinern:

Für Prozesse wie  $\alpha$  und  $\beta$  ist die Energieentwertung  $V$  proportional zur dissipierten Energie  $\Delta E_{th}$ , d. h. proportional zur Erhöhung der thermischen Energie der Umgebung:  $V \sim \Delta E_{th}$ .

Weitere Beispiele, insbesondere solche, die auch in Schülerversuchen durchgeführt werden können, findet man bei BACKHAUS (1982, S. 88 ff.).

Dieses Beispiel macht besonders deutlich, daß mit einem gegebenen Prozeß jeder andere mit stärkerer Energieentwertung verbundene Prozeß zurückgespult werden kann, wenn man ersteren nur oft genug ablaufen läßt. Bei einem quantitativen Vergleich, einer Messung, wird also versucht, einen Vergleichsprozess so oft wie möglich zurückzuspuhlen:

Die mit einem Prozeß  $\alpha$  verbundene Energieentwertung  $V(\alpha)$  ist dann bestimmt, wenn die mit einem Vergleichsprozess  $\beta$  verbundene Energieentwertung  $V(\beta)$  mit Hilfe von  $\alpha$  so oft rückgängig gemacht wird, daß die dadurch bedingte Energieaufwertung gerade die Energieentwertung  $V(\alpha)$  aufhebt. Die Messung von  $V(\alpha)$  läuft also auf die Bestimmung des aus  $\alpha$  maximal zu ziehenden Nutzens (Energieaufwertung) hinaus.

Die Energieentwertung des herunterfallenden Gewichtsstücks kommt dadurch zustande, daß dessen potentielle Energie an ein Wärmebad (z. B. die

Umgebung) abgegeben wurde, ohne daß eine Temperaturerhöhung (was einer Energieaufwertung entspräche) stattfand. Die Größe der Energieentwertung hängt aber von der jeweiligen Temperatur des Wärmebads (bzw. der Umgebung) ab, und zwar in der folgenden Weise:

Die Energieentwertung aufgrund (isothermer) Dissipation mechanischer Energie ist umso größer, je niedriger die Temperatur ist, bei der sie stattfindet.

Ließe der Prozeß nämlich in einem Wärmebad höherer Temperatur ab, so wäre es im Prinzip möglich, zwischen dem Wärmebad höherer Temperatur und einem solchen niedrigerer Temperatur einen Wärmeleitungsprozeß laufen zu lassen. Da dieser aber selbsttätig und infolgedessen unter Energieentwertung abläuft, ist die Entwertung aufgrund der Dissipation bei der niedrigeren Temperatur um die Entwertung aufgrund der Wärmeleitung größer.

Aufgrund des oben beschriebenen Dissipationsprozesses konnten wir folgende Eigenschaften der Größe Energieentwertung ausmachen:

1. Die Energieentwertung  $V$  ist proportional zur isotherm dissipierten Energie  $\Delta E_{th}$ :

$$V \sim \Delta E_{th} \quad (17)$$

2. Die Energieentwertung  $V$  ist umso größer, je niedriger die Temperatur  $\vartheta$  ist, bei der die Dissipation stattfindet:

$$V = c(\vartheta)\Delta E_{th} \quad (18)$$

wobei  $c(\vartheta)$  eine monoton fallende Funktion der Temperatur  $\vartheta$  darstellt. Aufgrund von Untersuchungen an idealen Gasen ergibt sich, daß

$$c(\vartheta) = c/T,$$

wobei  $c$  eine Konstante und  $T$  die absolute Temperatur ist.

Eine Begründung dafür, daß hier die absolute Temperatur  $T$  eingeführt wird, findet man bei BACKHAUS et al. (1981, S. 290).

Die Energieentwertung bezieht sich also auf Prozesse, bei denen die Energieabnahme eines beteiligten Systems mit einer gleichgroßen Energiezunahme eines anderen beteiligten Systems verbunden ist. Sie ist für einen Teilprozeß, bei dem die Energie nur abnimmt (z. B. Abnahme der Energie eines mechanischen Systems durch Herunterfallen eines Gewichtstücks) oder nur zunimmt

(z. B. Zunahme der thermischen Energie eines sich erwärmenden Körpers), bislang nicht definiert worden. Da das Augenmerk aber meist auf die Abnahme oder Zunahme der Energie eines bestimmten Systems gerichtet wird, entsteht der Wunsch, sich die Energieentwertung zusammengesetzt vorzustellen aus Entwertungen, die dem einen (z. B. Energieabnahme des mechanischen Systems) und dem anderen Teilprozeß (Energiezunahme des thermischen Systems) zugeordnet werden könnte:

$$V(\text{Dissipation}) = V(\text{Energieabnahme des mechanischen Systems}) \\ + V(\text{Energiezunahme der Umgebung}),$$

$$V = V_{\text{mech}} + V_{\text{th}}$$

Um eine solche Zerlegung mit der bisherigen Begriffsbildung in Einklang bringen zu können, müssen wir eine passende Erweiterung des bisherigen Entwertungskonzepts vornehmen:

Zwischen mechanischen Systemen kann Energie beliebig häufig hin- und her übertragen werden, ohne daß sich etwas anderes ändert als die Energie des jeweils betrachteten mechanischen Systems. Daß dieses in Wirklichkeit nur mehr oder weniger gut gilt, bedeutet, daß reale »mechanische« Systeme auch immer »thermische« Systeme sind, weil sich Reibungseinflüsse niemals vollständig ausschließen lassen. Die Entwertung der mechanischen Energie kann demnach einzig und allein darin bestehen, daß die Energie abnimmt. Es liegt daher nahe zu vereinbaren, daß die Energieentwertung  $V_{\text{mech}}$  aufgrund der Energieabnahme- $\Delta E_{\text{mech}}$ <sup>7</sup> eines mechanischen Systems proportional zu dieser Energieabnahme ist:

$$V_{\text{mech}} = a \cdot \Delta E_{\text{mech}}, \quad (19)$$

wobei  $a$  eine für alle mechanischen Prozesse gleiche Konstante ist.

In dem diese Energie aufnehmenden thermischen System passiert jedoch mehr: Neben der Energiezunahme tritt eine Temperaturzunahme auf. Die diesem Vorgang entsprechende Teilentwertung  $V_{\text{th}}$  läßt sich jedoch leicht aus der Differenz der Gesamtentwertung  $V$  und der »mechanischen« Teilentwertung  $V_{\text{mech}}$  bestimmen:

$$V_{\text{th}} = V - V_{\text{mech}} = \frac{c}{T} \Delta E_{\text{th}} - a \Delta E_{\text{mech}} = \left( \frac{c}{T} + a \right) \Delta E_{\text{th}}$$

<sup>7</sup> Wir erinnern hier an die früher (Kap. II, 2.2.3) getroffene Vereinbarung, Energieabnahmen negativ, Energiezunahmen positiv zu rechnen.

Beim letzten Schritt wurde benutzt, daß  $\Delta E_{th} = -\Delta E_{mech}$ . Die Energieentwertung des Gesamtvorgangs kann dementsprechend auch folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$V = a \cdot \Delta E_{mech} + \left( \frac{c}{T} + a \right) \Delta E_{th}. \quad (20)$$

Während die Festlegung dieses Ausdrucks für die Energieentwertung weitgehend aufgrund von Erfahrungen erfolgte, kann man über die Konstanten  $a$  und  $c$  nach Gesichtspunkten der Zweckmäßigkeit entscheiden.

## 2.2 Exergie

*Entropie.* Die Erfahrungen, die zum Konzept der Energieentwertung führten, werden in der Fachwissenschaft üblicherweise durch die Entropieänderung

$$\Delta S = Q/T \quad (21)$$

beschrieben ( $Q$  ist die vom jeweiligen System (reversibel) aufgenommene Wärme). Legt man die Konstanten in Gl. (20) in der Weise fest, daß  $a = 0$  und  $c = 1$  gesetzt wird, so folgt:

$$V_{mech} = 0 \text{ und } V_{th} = \Delta E_{th}/T.$$

Das ist mit Gl. (21) identisch, wenn die Energiezunahme  $\Delta E_{th}$  durch Wärmeaufnahme  $Q = \Delta E_{th}$  zustandekommt.

Die Quantifizierung der Energieentwertung durch die Entropie hat aber Nachteile. Insbesondere ist die Entwertung aufgrund mechanischer Teilprozesse gleich Null. Damit ist aber der Wert der mechanischen Energie ebenfalls gleich Null im Widerspruch zu unseren qualitativen Vorüberlegungen, (Kap. III, 1.3) in denen wir der mechanischen Energie den höchsten Wert zugeordnet hatten.

Auch die Konsequenz, daß die Energiezunahme eines thermischen Systems mit einer Entwertung verbunden wäre, ist für unsere Belange unzweckmäßig.

Daher halten wir die Entropieänderung als Konkretisierung dessen, was wir unter Energieentwertung verstehen, für weniger geeignet.

Die folgende Festlegung der Konstanten  $a$  und  $c$  ist günstig:

$$a = -1, c = T_u. \quad (22)$$

( $T_u$  ist die absolute Temperatur des am Energieaustausch beteiligten Wärmebads, meist der Umgebung. Im folgenden gilt  $T_u \leq T$ ).

Demnach ist die Energieabnahme  $-\Delta E_{mech}$  eines mechanischen Systems mit einer Energieentwertung

$$V_{mech} = -\Delta E_{mech} > 0 \quad (23)$$

verbunden. Sie ist gleich der Energie, die das mechanische System eingeübt hat. Nach dem Energieerhaltungssatz muß der Energieabnahme eines Systems eine gleichgroße Energiezunahme mindestens eines anderen Systems entsprechen. Ist dies ein Wärmebad der Temperatur  $T$ , so ist mit dessen Energiezunahme  $\Delta E_{th} = -\Delta E_{mech}$  eine Energieentwertung (bzw., da die Entwertung negativ ist, eine Energieaufwertung)

$$V_{th} = (1 - T_u/T)\Delta E_{mech} = -(1 - T_u/T)\Delta E_{th} < 0 \quad (24)$$

verbunden, die bei Betrachtung des Gesamtgeschehens in Rechnung gestellt werden muß. Die gesamte Energieentwertung beträgt demnach:

$$V = V_{mech} + V_{th} = (T_u/T)\Delta E_{th} > 0. \quad (25)$$

Die Wahl der Konstanten (22) hat zur Folge, daß die Größe der Energieentwertung die Dimension der Energie erhält. Es liegt daher nahe, die bislang aufgeschobene Festlegung der Einheit der Energieentwertung folgendermaßen vorzunehmen:

Die Einheit der Energieentwertung ist wie die Einheit der Energie 1 Joule.

Die Energieabnahme  $-\Delta E_{mech}$  eines mechanischen Systems äußert sich in der Abgabe der (mechanischen) Arbeit  $W = |\Delta E_{mech}|$ . Man kann sich nun die damit verbundene Energieentwertung  $V_{mech}$  dadurch zustande gekommen denken, daß die abgegebene Arbeit  $W$  einen Wert  $\varepsilon_W$  besitzt, den sie mit sich fortträgt:

$$\varepsilon_W = -|V_{mech}| = |\Delta E_{mech}| = W. \quad (26)$$

(Das zweite Gleichheitszeichen gilt aufgrund von Gl. (23)).

Die Größe  $\varepsilon$  ist mit der insbesondere in der technischen thermodynamischen Literatur gebräuchlichen Größe Exergie identisch (vgl. z. B. BAËHR 1981). Wir werden diesen Ausdruck synonym mit »Wert der Energie« verwenden.

In entsprechender Weise kann die Energieentwertung aufgrund einer Energieabnahme  $-\Delta E_{th}$  eines thermischen Systems so interpretiert werden, daß die abgegebene Wärme  $Q = |\Delta E_{th}|$  gemäß Gl. (24) den Wert bzw. die Exergie

$$\varepsilon_Q = -|V_{th}| = (1 - T_u/T)|\Delta E_{th}| = (1 - T_u/T) \cdot Q < Q \quad (27)$$

besitzt und daher mit sich führt.

Im Falle der Energieaufnahme tritt natürlich eine Wertzunahme bzw. eine negative Entwertung auf. Hat man es insbesondere wie im obigen Beispiel der Dissipation mechanischer Energie mit einer Abgabe von (mechanischer) Arbeit  $W$  eines Systems und der Aufnahme von Wärme  $Q = W$  eines anderen Systems zu tun, tritt wegen des höheren Wertes (bzw. der größeren Exergie) von  $W$  insgesamt eine Entwertung auf (siehe Gl. (25)).

Diese Quantifizierung der Energieentwertung bzw. (bei Betrachtung der ausgetauschten Energiearten  $W$  und  $Q$ ) des Wertes der Energie (Exergie) ist in völliger Übereinstimmung mit den früher (Kap. III, 1.3) angestellten Überlegungen zur Bewertung der Energie. Wie dort bereits qualitativ erarbeitet, besitzt die mechanische (bzw. wie man völlig analog zeigen kann, auch die elektrische) Arbeit den höchsten Wert, während die Wärme je nach der Temperatur des Wärme abgebenden Systems mehr oder weniger wertvoll ist. Wie man sich anhand von Gl. (27) klarmacht, ist sie bei niedrigen Temperaturen ( $T < 370$  K) von relativ geringem Wert; bei der zugrunde gelegten Umgebungstemperatur ist sie völlig wertlos<sup>8</sup>. Unter Verwendung des Exergiebegriffs lassen sich Energieentwertungen als Exergieverbrauch bzw. Exergieverlust beschreiben. Der früher formulierte Erfahrungssatz von der Entwertung der Energie läßt sich nun auch so ausdrücken:

Die gesamte Exergie der bei einem Prozeß ausgetauschten Energien kann nicht zunehmen.

### 2.3 Berechnung der Energieentwertung bei endlichen Systemen

Der Einfachheit halber haben wir uns bislang auf Wärmebäder (bzw. Wärmereservoirs) bezogen. Die Überlegungen lassen sich aber in einfacher Weise auf endliche Systeme übertragen, indem man die ausgetauschten Energiemengen als Summe sehr kleiner Energiemengen, (bei denen auch in diesen Systemen näherungsweise keine Temperaturänderung auftritt), zusammengesetzt denkt.

*Beispiel:* Abkühlen von 1 l Wasser der Temperatur  $T$  an der Umgebung der Temperatur  $T_u$ : Insgesamt wird die Wärme  $Q = C_w(T - T_u)$  an die Umgebung abgegeben. Kleine Portionen  $dQ = C_w dT$  werden bei jeweils etwa konstanter Temperatur übertragen und haben jeweils eine Teilentwertung  $dV = (1 - T_u/T) \cdot C_w \cdot dT$  zur Folge, insgesamt also

$$V = \int dV = -C_w \cdot \int_T^{T_u} (1 - T_u/T) dT = C_w \{ (T - T_u) - T_u \cdot \ln(T/T_u) \}.$$

<sup>8</sup> Vereinbarungsgemäß (vgl. Kap. II, 2.2.3) sehen wir näherungsweise auch die chemische Energie als hochwertige Energie bzw. »reine« Exergie an.

## 2.4 Umgebung als Wärmebad

Die Umgebung spielt bei der Bewertung der Energie eine wichtige Rolle. Sie ist dasjenige Wärmebad, in dem sich schließlich die entwertete Energie ansammelt. Einmal an die Umgebung abgegebene Energie ist für immer »verloren«.

Nun gibt es bekanntlich thermische Systeme, z. B. kalte Körper einer Temperatur  $T < T_u$ , die die Umgebung veranlassen können, Wärme abzugeben. In der Tat ist in einem solchen Fall der Prozeß der Erwärmung des Körpers mit Energieentwertung verbunden und daher im Prinzip zu Energieaufwertungen in der Lage, also als Energiequelle geeignet. Es gibt beispielsweise ernsthafte Vorschläge, Eisberge in unsere Breiten zu schleppen und als Wasser- und Energiereservoir einzusetzen. Auch ein solcher Vorgang läßt sich durch Vorzeichenwechsel in Gl. (27) beschreiben. Diese Änderung entspricht der Vertauschung der Rolle des normalerweise Wärme abgebenden thermischen Systems und der Umgebung. Solange das thermische System Wärme von der Umgebung empfängt, fungiert es als »Umgebung«, obwohl es diese Rolle i. a. sehr schnell wieder an die Umgebung abgeben muß, weil es normalerweise kein Wärmebad ist, sondern ein endliches System, das im Verlaufe des Prozesses seine Temperatur derjenigen der Umgebung angleicht.

Die Existenz solcher Systeme der Temperatur  $T < T_u$  (z. B. Gefriergut einer Tiefkühltruhe) ist übrigens i. a. einem Kühlprozeß zu verdanken, der durch Entwertung von Energie betrieben werden mußte (vgl. Prinzip der Wärmepumpe bzw. des Kühlschranks, Kap. V, 11). Insofern würde man bei der Abkühlung keine Energie gewinnen, sondern allenfalls einen Teil der für die Kühlung aufgewendeten Energie zurückerhalten.

Problematischer für die Anwendung der Größe der Energieentwertung (bzw. der Exergie) ist allerdings die Tatsache, daß die Umgebungstemperatur i. a. weder räumlich (Sahara – Grönland) noch zeitlich (Sommer – Winter) konstant ist. Da von wenigen Ausnahmen abgesehen, i. a. für das jeweils betrachtete Problem eine ganz bestimmte Umgebung maßgebend ist, ergeben sich in der Praxis weniger Probleme als theoretisch denkbar. In Einzelfällen, beispielsweise dann, wenn man die Möglichkeit hat, sowohl Grundwasser einer Temperatur von  $10^\circ\text{C}$  oder Außenluft einer Temperatur von  $0^\circ\text{C}$  als Umgebung zu wählen, muß man natürlich eine Entscheidung treffen.

## 2.5 Energieumwandlungen

Energieumwandlungen, d. h. Übergänge einer Energieart in eine andere, lassen sich nunmehr so beschreiben, daß die Entwertung, die mit dem Verschwinden der einen Energieart verbunden ist, eine Aufwertung bewirkt, die sich im Entstehen einer anderen Energieart äußert. Da nach dem Prinzip der Entwer-

tung der Energie insgesamt keine Aufwertung resultieren darf, ist klar, daß im Prinzip vollständige Umwandlungen nur zwischen gleichwertigen Energiearten möglich sind, zum Beispiel: Umwandlung von mechanischer in elektrische Energie.

Bei der Umwandlung einer höherwertigen in eine geringerwertige Energieart genügt im Prinzip die Entwertung einer geringeren Menge an höherwertiger Energie, um die mit der Entstehung der geringerwertigen Energieart verbundene Aufwertung zu ermöglichen (Prinzip der Wärmepumpe (WP), siehe unten). Demgegenüber müßte man bei der Umwandlung einer geringerwertigen in eine höherwertige Energieart eine größere Menge an geringerwertiger Energie entwerten als in höherwertige Energie aufgewertet werden kann (Prinzip der Wärmekraftmaschine (WKM), siehe unten).

*Beispiel:* Wärmekraftmaschine. Die WKM ist eine Vorrichtung, die Wärme  $Q$  (der Exergie  $\epsilon_Q = (1 - T_u/T)Q$ ) aus einem Wärmebad der Temperatur  $T$  aufnimmt und unter Beteiligung der Umgebung der Temperatur  $T_u < T$  hochwertige Arbeit  $W'$  (der Exergie  $\epsilon_{W'} = W'$ ) abgibt. Im Idealfall kann die mit der Zunahme der Energie  $\Delta E'_{\text{mech}}$  des mechanischen Systems verbundene Energieaufwertung gleich der mit der Abnahme der thermischen Energie  $-\Delta E_{\text{th}}$  verbundenen Energieentwertung werden. M. a. W.: Der Wert  $\epsilon_{W'}$  der (mechanischen) Arbeit  $W'$  kann maximal gleich dem Wert  $\epsilon_Q$  der Wärme  $Q$  sein:

$$\begin{aligned} \epsilon_{W'} &= \epsilon_Q, \\ W' &= Q(1 - T_u/T) < Q; \end{aligned} \quad (28)$$

d. h. es entsteht weniger Arbeit, als Wärme investiert wurde. Der Rest der ursprünglich von der WKM aufgenommenen Wärme  $Q$  wird bei der Temperatur  $T_u$  als wertlose Wärme  $Q' = Q - W'$  an die Umgebung abgegeben (Abb. 4).

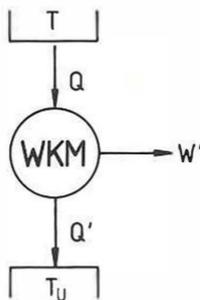


Abb. 4: Prinzip einer Wärmekraftmaschine (WKM) (Erläuterungen siehe Text).

*Beispiel:* Wärmepumpe. Die WP ist eine Vorrichtung, die hochwertige (z. B. mechanische) Arbeit  $W'$  (der Exergie  $\varepsilon_W = W'$ ) aufnimmt und unter Beteiligung der Umgebung der Temperatur  $T_u$  geringerwertige Wärme  $Q$  (der Exergie  $\varepsilon_Q = (1 - T_u/T)Q$ ) bei der Temperatur  $T > T_u$  abgibt. Im Idealfall kann die Energieaufwertung aufgrund der Zunahme der Energie  $\Delta E_{th}$  des Wärmebads der Temperatur  $T$  gleich der Energieentwertung aufgrund der Abnahme der Energie  $-\Delta E'_{mech}$  eines mechanischen Systems werden. M. a. W.: Der Wert  $\varepsilon_Q$  der Wärme  $Q$  kann maximal gleich dem Wert  $\varepsilon_{W'}$  der Arbeit  $W'$  sein:

$$\varepsilon_Q = \varepsilon_{W'},$$

$$(1 - T_u/T)Q = W';$$

Auflösung nach  $Q$  liefert:

$$Q = W'/(1 - T_u/T) > W'; \quad (29)$$

d. h., es kann von der WP mehr Wärme  $Q$  abgegeben werden als Arbeit  $W'$  aufgenommen wurde. In Umkehrung des Prinzips der WKM, bei der Wärme an die Umgebung abgegeben werden mußte, nimmt die WP zusätzlich Wärme  $Q'$  aus der Umgebung auf (Abb. 5).

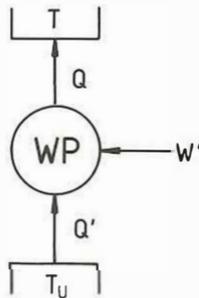


Abb. 5: Prinzip einer Wärmepumpe (WP) (Erläuterungen siehe Text).

## IV. Herstellung von Nutzenergie

### 1 Problemstellung

Damit die für den Menschen wichtigen Prozesse immer wieder ablaufen können, müssen sie immer wieder rückgängig gemacht werden. Nach den in Kap. III entwickelten Vorstellungen geschieht das dadurch, daß die mit dem Ablauf dieser Prozesse einhergehende Energieentwertung (Exergieabnahme) aufgehoben, also eine entsprechende Energieaufwertung bewirkt wird. Energieaufwertungen treten nach dem Prinzip der Energieentwertung aber nur auf, wenn an anderer Stelle mindestens gleichgroße Energieentwertungen stattfinden. Man kann daher sagen:

Mit Energieentwertungen können Energieaufwertungen betrieben werden.

Im konkreten Fall sieht das so aus, daß man ein geeignetes System (Energiespeicher, -quelle, -träger) veranlaßt, durch Abgabe von hochwertiger Energie, die durch den Ablauf des jeweiligen Prozesses entwertete Energie zu ersetzen. Das System verliert also hochwertige Energie und erleidet eine entsprechende Energieentwertung, die mindestens so groß ist wie die durch die Ersetzung der entwerteten Energie bedingte Energieaufwertung.

*Beispiele:* 1. Durch Verbrennung verliert z. B. Erdgas ständig wertvolle Energie (Energieentwertung). Läßt man diesen Prozeß so ablaufen, daß wenigstens ein Teil der entstehenden Wärme nicht an die (kalte) Umgebung sondern an einen Topf mit (warmen) Wasser abgegeben wird, so hat die mit der Abgabe der Energie durch das Gas verbundene Energieentwertung eine Energieaufwertung zur Folge, die sich in der Zunahme der thermischen Energie des Wassers (Temperaturzunahme) äußert.

2. Entsprechendes gilt, wenn die Abnahme elektrischer Energie in einem Stromkreis (Entwertung elektrischer Energie) dazu veranlaßt wird, die thermische Energie einer Glühwendel so zu erhöhen (Energieaufwertung), daß Licht abgestrahlt werden kann.

3. Auch die mit der Abnahme der chemischen Energie des Benzins verbundene Energieentwertung, kann durch einen Motor so geführt werden, daß wertvolle Bewegungsenergie (Energieaufwertung) entsteht, die die aufgrund von Reibung entwertete Bewegungsenergie ersetzt und das Fahrzeug in Bewegung hält.

4. Schließlich kann die Energieentwertung aufgrund des Ausstoßens von Luft beim Atmen, (der Luftstrom kommt sehr schnell zum Stillstand), Schwin-

gungsenergie auf die Stimmbänder übertragen (Energieaufwertung) und Laute hervorbringen.

Aus diesem Grund ist die Menschheit auch nicht an irgendwelcher Energie interessiert, die überall (z. B. in der Umgebung) reichlich vorhanden ist, sondern an wertvoller Energie (Exergie), deren Entwertung (Verbrauch) ausgenutzt werden kann, jene für den Menschen nützlichen Wirkungen hervorzubringen.

Offenbar genügt nicht das bloße Vorhandensein wertvoller Energie. So nützt einem nachts das Sonnenlicht, das nur tagsüber vorhanden ist, überhaupt nichts. Die wertvolle Energie muß zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort verfügbar sein.

Darüberhinaus muß die Energie in einer geeigneten Form vorliegen, zumindest aber auf einfache Weise in eine solche Form gebracht werden können. Denn mit der im Sonnenschein reichlich vorhandenen Exergie kann man ohne weiteres weder ein Radiogerät spielen lassen noch ein Kraftfahrzeug betreiben.

Für die Energieversorgung spielen daher *Speicherung*, *Transport* und *Umwandlung* eine große Rolle. In der Praxis hat sich ein entsprechendes Versorgungsmuster herausgebildet, das weitgehend auf der guten Speicherbarkeit und Transportierbarkeit chemischer Energieträger wie Kohle und Öl sowie der guten Transportierbarkeit und Umwandelbarkeit elektrischer Energie beruht. Dieses Muster stammt noch aus einer Zeit, in der vor allem Öl grenzenlos verfügbar zu sein schien. Es kann heute, da die Begrenzung insbesondere der Ölvorkommen sichtbar geworden ist, nicht unhinterfragt bleiben:

Solange nämlich hochwertige Energie auch für Hilfsfunktionen eingesetzt wird, die mit geringerwertigerer Energie zu erfüllen wären, müssen Energieentwertungen in Kauf genommen werden, die nicht zu größtmöglichen Energieaufwertungen herangezogen werden. Die darin zum Ausdruck kommende mangelhafte Anpassung zwischen der Qualität der zur Verfügung stehenden und der für die jeweilige Hilfsfunktion benötigten Energie trägt nicht unerheblich zu der Energieverschwendung bei, die allgemein bei der Herstellung von Nutzenergie auftritt.

## 2 Verluste bei Energieumwandlungen

Bevor konkrete Beispiele der Nutzenergieherstellung besprochen werden können, benötigt man noch eine Größe, mit der sich die dabei auftretenden Verluste erfassen lassen und mit deren Hilfe beurteilt werden kann, inwieweit die Verluste zumindest im Prinzip hätten vermieden werden können: den *Wirkungsgrad* einer Energieumwandlung.

Von Energieverlusten spricht man ganz allgemein, wenn die Energiemenge, die man aufgrund einer bestimmten Energieumwandlung erhält, geringer ist als die Energiemenge, aus der sie gewonnen wurde. Vermeidbar sind solche Verluste, die lediglich aufgrund unzulänglicher, im Prinzip verbesserungswürdiger Energiewandler auftreten. Unvermeidlich sind sie dann, wenn sie auch im Idealfall nicht zu verhindern sind: So ist jede Umwandlung von minderwertiger Energie in höherwertigere Energie mit Verlusten verbunden, die prinzipiell nicht ausgeschlossen werden können (siehe Kap. III, 2.5).

### 2.1 Energetischer Wirkungsgrad

Üblicherweise erfaßt man die Güte einer Energieumwandlung dadurch, daß man das Verhältnis aus Nutzen (d. h. der gewünschten Energieart  $E_g$ ) und Aufwand (d. h. der eingesetzten Energieart  $E_c$ ) bildet:

$$\eta = \text{Nutzen/Aufwand} = E_g/E_c \quad (30)$$

Dieser *energetische Wirkungsgrad*  $\eta$  ist jedoch nur zur Charakterisierung von Umwandlungen zwischen gleichwertigen Energiearten geeignet, weil hier die vollständige Umwandelbarkeit unterstellt wird. Davon kann i. a. jedoch nicht ausgegangen werden. Während  $\eta$  bei der Umwandlung einer minderwertigeren in eine höherwertigere Energieart zu einer Unterbewertung der Umwandlungsgüte führt, wird sie im umgekehrten Fall durch  $\eta$  überbewertet.

*Beispiel:* Der Wert  $\eta = 1$  im Falle einer elektrischen Widerstandsheizung suggeriert, daß bei dieser Umwandlung von elektrischer in thermische Energie ein Maximum an Effektivität bzw. Verlustfreiheit erreicht wird. Daß dem nicht so ist, macht man sich folgendermaßen klar: Um 1 kWh Wärme an ein zu heizendes Zimmer abzugeben, benötigt die elektrische Widerstandsheizung 1 kWh an elektrischer Arbeit: Diese hochwertige Energie wird bei Zimmertemperatur unter enormem Wertverlust dissipiert. Stattdessen hätte man sie dazu ausnutzen können, eine Wärmepumpe zu betreiben, um beispielsweise Grundwasser auf Zimmertemperatur zu erwärmen. Indem mit Hilfe der Wärmepumpe versucht wird, Energieentwertungen möglichst zu vermeiden, gelingt es nämlich, ein Mehrfaches der verbrauchten elektrischen Energie W

als Wärme  $Q$  zu gewinnen, die an das zu heizende Zimmer abgegeben wird. Im Idealfall (Carnot-Prozeß) beträgt die Wärmemenge  $Q$  (gemäß Gl. (29)):

$$Q_{\max} = W/(1 - T_u/T_z) = 29,3 \text{ kWh.} \quad (31)$$

(Dabei werden die Grundwassertemperatur  $T_u = 283 \text{ K}$  ( $\triangleq 10^\circ\text{C}$ ) und die Zimmertemperatur  $T_z = 293 \text{ K}$  ( $\triangleq 20^\circ\text{C}$ ) zugrundegelegt.)

Daraus folgt, daß die elektrische Widerstandsheizung nicht maximal günstig, sondern äußerst ungünstig ist, weil mit ihr bei weitem nicht so viel erreicht wird, wie hätte erreicht werden können.

*Aufgabe:* Wie ist der Wirkungsgrad  $\eta_{\text{OH}} = 0,9$  für eine Ölheizung einzuschätzen?

## 2.2 Exergetischer Wirkungsgrad

Dieses Ergebnis legt es nahe, einen Wirkungsgrad  $\eta^*$  so zu definieren, daß der tatsächliche Nutzen (hier: die an das Zimmer abgegebene Wärme  $Q$ ) am maximal möglichen Nutzen (hier: die Wärme  $Q_{\max}$ , die unter Einsatz einer idealen Wärmepumpe bei Benutzung eines bestimmten Wärmereservoirs an das Zimmer hätte abgegeben werden können) gemessen wird. Oder, von seiten des Aufwands gesehen, daß der Quotient aus minimalem Aufwand (hier: die für den Heizzweck minimal aufzubringende Arbeit  $W_{\min}$ ) und tatsächlichem Aufwand (hier: die tatsächlich aufgebrauchte Arbeit  $W$ ) gebildet wird:

$$\eta^* = \frac{\text{tatsächlicher Nutzen}}{\text{maximaler Nutzen}} = \frac{\text{minimaler Aufwand}}{\text{tatsächlicher Aufwand}}, \quad (32 \text{ a})$$

$$\eta_{W \rightarrow Q}^* = Q/Q_{\max} = W_{\min}/W, \quad (32 \text{ b})$$

$$\eta_{Q \rightarrow W}^* = W/W_{\max} = Q_{\min}/Q, \quad (32 \text{ c})$$

wobei die Indizierungen  $W \rightarrow Q$  bzw.  $Q \rightarrow W$  die Umwandlung von Arbeit in Wärme bzw. Wärme in Arbeit kennzeichnen. Indem dieser *exergetische Wirkungsgrad* nicht Energien, sondern Exergien vergleicht, erfaßt er die Effektivität einer Energieumwandlung unter Berücksichtigung des jeweiligen Wertes der beteiligten Energiearten. Im Unterschied zum energetischen Wirkungsgrad  $\eta$  kann der Maximalwert 1 beim exergetischen Wirkungsgrad  $\eta^*$  prinzipiell nicht überschritten werden. Er stellt den Idealfall einer verlustfreien Energieumwandlung dar. Größere Abweichungen von  $\eta^* = 1$  machen daher auf im Prinzip vermeidbare Verluste aufmerksam. Bei Umwandlungen zwischen gleichwertigen Energiearten fallen energetischer und exergetischer Wirkungsgrad zusammen.

*Weiterführende Literatur:* BAEHR (1981, S. 142ff.).

### 2.3 Energetische Amortisation

Der exergetische Wirkungsgrad ist eine wichtige Größe, um die Effektivität verschiedener Energiesysteme zu vergleichen. In den Fällen, in denen der Energie- bzw. Exergieaufwand zur Herstellung und Unterhaltung des jeweiligen Energiesystems von gleicher Größenordnung ist wie die Energie bzw. Exergie, die während der Lebensdauer des Systems (z. B. Kraftwerk, Solarzellen, Öltanker, Stauseen, Bleibatterien) umgewandelt, transportiert oder gespeichert wird, hat man diesen bei der Bildung des exergetischen Wirkungsgrads gemäß Gl. (32) entsprechend zu berücksichtigen.

Ist der Energieaufwand für Herstellung und Unterhaltung eines Energiewandlers größer als die Energie, die dieser in seiner Lebenszeit zu liefern in der Lage ist, so ist er natürlich auch dann unrentabel, wenn die Energie (z. B. Sonnenenergie) kostenlos zur Verfügung steht. In der Tat ist darin einer der Gründe zu suchen, weshalb es alternative Energien auch heute noch schwer haben: Obwohl sie kostenlos sind, stehen die energetischen Herstellungskosten noch in einem ungünstigen Verhältnis zur jemals lieferbaren Energie. Das hat seine Ursache vor allem darin, daß diese Energien i. a. nur mit relativ kleiner Energiestromdichte (Leistung pro Fläche) vorkommen, so daß relativ große Flächen in die Energiegewinnung einbezogen werden müssen, um hinreichend große Leistungen zu erhalten. Das ist aber meist mit großen Mengen zum Teil hochwertiger Materialien, (deren Produktion viel Energie erfordert), verbunden.

Aber auch ein exergetischer Wirkungsgrad, der die energetischen Herstellungskosten mit berücksichtigt, reicht häufig immer noch nicht aus, die wirtschaftliche Effektivität eindeutig zu beurteilen, u. a. weil Energiepreise vielfach mehr durch politisch-wirtschaftliche als durch physikalische Randbedingungen bestimmt sind.

## 3 Energieverbrauch der Bundesrepublik Deutschland

Ein eindrucksvolles Beispiel für Energieverluste bei der Herstellung von Nutzenergie findet man in den Energiebilanzen der Industrienationen vor. Im folgenden betrachten wir den Energieverbrauch der Bundesrepublik Deutschland unter dem Nutzungsaspekt.

Der Primärenergieverbrauch der Bundesrepublik betrug im Jahre 1978 11,4 EJ ( $11,4 \times 10^{18} \text{ J}$ )<sup>9</sup>. Demnach wird rund um die Uhr eine Leistung von 367 000

<sup>9</sup> Eine Tabelle der gebräuchlichsten Energie- und Leistungseinheiten befindet sich auf S. 29.

MW abgegeben. Bei einer Bevölkerungszahl von 60 Mill. verbraucht also ein Bundesbürger im Durchschnitt 6 kW. Das ist etwa so viel wie wenn jeder ständig 100 Glühbirnen à 60 W für sich leuchten ließe. Geht man davon aus, daß ein Mensch pro Tag (24 Std) 8 Stunden lang 75 W zu leisten vermag (siehe Tab. 10), so steht im Prinzip jedem Bundesbürger das Leistungsvermögen von 240 Energiesklaven rund um die Uhr zur Verfügung.

Die meisten Menschen der Erde sind indessen nicht in dieser beneidenswerten Situation.

1972 verfügten demgegenüber die Menschen in den Entwicklungsländern – das sind mehr als die Hälfte der Menschheit – über nur 330 W/Kopf. Wegen der schnell wachsenden Bevölkerung in diesen Ländern dürfte sich die Situation heute kaum verbessert haben. An vielen dieser Menschen ist die Entwicklung der letzten 5000 Jahre offenbar spurlos vorübergegangen, denn im Schnitt hat der Weltenergieverbrauch ständig zugenommen, und er wächst weiterhin exponentiell.

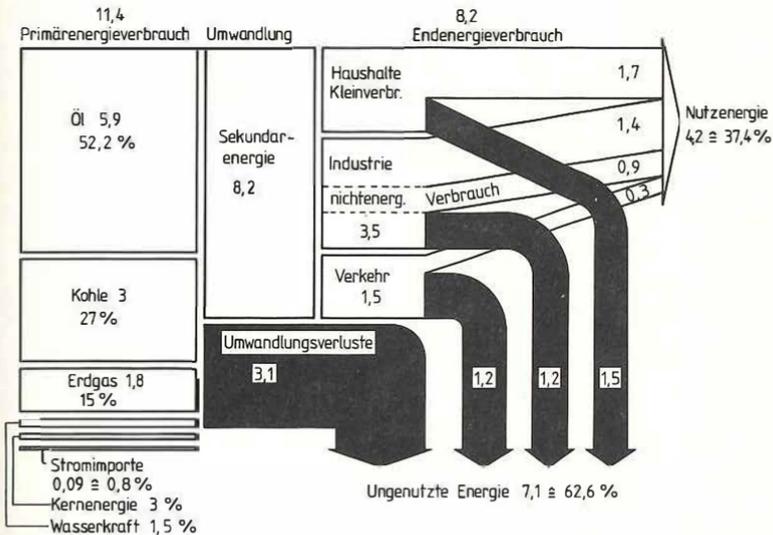


Abb. 6: Energieflußdiagramm für die Bundesrepublik Deutschland in EJ (1 EJ =  $10^{18}$ J).

Welche energetischen Kosten die Bereitstellung der Energie verursacht bzw. wie groß die Umwandlungs-, Transport- und Speicherverluste innerhalb der bundesrepublikanischen Energiewirtschaft ausfallen, entnimmt man der Abb. 6: Von der ursprünglich eingesetzten Primärenergie (Öl, Gas, Kohle usw.) gehen bereits 30% durch die Umwandlung in die Sekundärenergie (Ben-

zin, Heizöl, Stadtgas, Elektrizität usw.) unwiderruflich verloren (Wirkungsgrad: 70%). Besonders ausgeprägt sind die Verluste bei Wärmekraftwerken. Ihre Ursachen werden in Kap. V, 3.1 untersucht. Von den 26% der Primärenergie, die in den Kraftwerken verfeuert werden, gehen 66% als Abwärme verloren (Wirkungsgrad 34%). Bei Berücksichtigung des Kraftwerkseigenbedarfs und der Leitungsverluste innerhalb der Stromnetze kommt man sogar nurmehr auf einen Gesamtwirkungsgrad von 29,1%. Damit ist der verlustreiche Weg der Energie aber noch nicht zu Ende. Beim Endenergieverbrauch geht noch einmal fast die Hälfte (48%) ungenutzt an die Umgebung über, so daß von den ursprünglich eingesetzten 11,4 EJ nurmehr 4,3 EJ (37,4%) tatsächlich genutzt werden.

Überträgt man die in Kap. III angestellten Überlegungen zu Energieverbrauch und -entwertung auf diesen Befund, so erscheint der Schluß zulässig, daß eine bessere Anpassung zwischen verfügbaren Energiearten und gewünschten Hilfsfunktionen Einsparungen in größerem Maßstab zulassen müßten.

## V. Energieumwandlung

Es gibt zahlreiche Möglichkeiten, Energie einer gegebenen Energieart in Energie einer anderen Energieart umzuwandeln (siehe Tab. 2). Unter Umwandlung wollen wir die Abnahme der Energie einer gegebenen Art und das Zunehmen der Energie einer anderen Art verstehen. Da die Energieabnahme einer *Energieentwertung*, die Energiezunahme aber der Rückgängigmachung einer solchen Entwertung, also einer *Aufwertung* entspricht, wird im folgenden zuweilen auch dieses Begriffspaar zur Kennzeichnung von Energieumwandlungen herangezogen. Ein Energiewandler ist demnach eine Vorrichtung, die die Entwertung einer gegebenen Energieart zur Aufwertung einer anderen Energieart veranlaßt.

### 1 Mechanische Energie in mechanische Energie

Diese Energieumwandlung ist in zahlreichen Geräten und Maschinen des Alltags verwirklicht, meist als Zwischenglied einer mehr oder weniger langen Umwandlungskette.

*Beispiel:* 1. Die Drehbewegungsenergie (Rotationsenergie) eines Staubsauger-Windrads wird in Bewegungsenergie eines Luftstroms umgewandelt.

2. Die Drehbewegungsenergie eines Krans (beim Aufrollen eines eine Last hebenden Seils) wird in potentielle Energie der Last transformiert.

3. Beim Herunterfallen eines Steins geht die potentielle Energie des Steins in Bewegungsenergie desselben über.

Für die Energieversorgung interessant sind natürliche mechanische Energieträger, die man durch geeignete Maßnahmen veranlassen kann, einen Teil ihrer Energie für menschliche Hilfsfunktionen abzugeben. Dazu gehören Wind, bewegtes oder aufgestautes Wasser, Meereswellen und Gezeiten, die teilweise (Wind und Wasser) in der Geschichte der menschlichen Energieversorgung eine große Rolle gespielt haben und als sogenannte erneuerbare (regenerative) Energiequellen auch in Zukunft wieder gewisse Chancen haben.

*Aufgabe:* Wie groß ein entsprechender Beitrag dieser Energiequellen zur allgemeinen Energieversorgung ausfallen könnte, läßt sich aufgrund der in Kap. VIII, 2.4.1/2 ermittelten Leistungspotentiale abschätzen.

Normalerweise wird die mechanische Energie dieser ungezähmten Naturkräfte (im Mittel) im gleichen Maße entwertet (Abgabe wertloser Wärme an die Umgebung) wie sie u. a. infolge der Sonneneinstrahlung (vgl. Kap. VIII, 2.4) entsteht. Die Nutzung besteht im Prinzip darin, daß man die Energieentwertung veranlaßt, entsprechende Energieaufwertungen zu bewirken. Indem

ein geeignetes drehbares System (Windrad, Wasserrad usw.) durch den natürlichen Wind-, Wasserstrom usw. in eine Drehbewegung versetzt wird, entsteht Rotationsenergie, die ihrerseits in dem Maße wie sie entsteht, meist zugunsten der Erzeugung elektrischer Energie verbraucht bzw. entwertet wird.

### 1.1 Energie des bewegten oder gestauten Wassers

Durch den Wasserkreislauf (vgl. Kap. VIII, 2.4.1) in größere Höhen transportiertes Wasser besitzt potentielle Energie. Besteht die Möglichkeit, das Wasser die Höhe  $h$  durchfallen zu lassen, so wird die Energiemenge  $E_{\text{pot}} = mgh$  verfügbar. Solche Wasser(ge)fälle sind entweder von Natur aus vorhanden oder man erstellt sie durch geeignete Stauvorrichtungen. Der Wirkungsgrad dieser Energiewandler ist erwartungsgemäß groß. Bei größeren Anlagen beträgt er 90% und mehr. In vielen Fällen ist es vorteilhafter, die mit fließendem Wasser verbundene Strömungs-(Bewegungs-)Energie direkt anzuzapfen.

Eine durch die Fläche  $A$  strömende Wassersäule der Länge  $l$  enthält die Bewegungsenergie

$$E_w = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot l \cdot v^2,$$

wobei  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$  die Dichte des Wassers und  $v$  die Fließgeschwindigkeit darstellt. Dem entspricht eine Energiestromdichte  $S$  (Leistung  $P$  pro Flächeneinheit  $A$ ) von

$$S = P/A = \frac{1}{2} \rho \cdot v^3.$$

*Beispiel:* Die Energiestromdichte eines Baches, dessen Geschwindigkeit im Bereich  $v = 1 \text{ m/s}$  bis  $v = 10 \text{ m/s}$  liegt, nimmt daher Werte von  $S = 0,5 \text{ kW/m}^2$  bis  $S = 500 \text{ kW/m}^2$  an. Die Drehgeschwindigkeit  $v'$  (relativ zum Ufer) eines Schaufelrads nimmt im Leerlauf (im Idealfall der Reibungsfreiheit) den Wert der Fließgeschwindigkeit des Baches  $v$  an. Wenn das Schaufelrad Arbeit verrichten soll (z. B. Hochwinden einer Last), muß es sich langsamer drehen, damit das relativ zu den Schaufeln vorbeiströmende Wasser, das mit einer Geschwindigkeit  $v_{\text{rel}} = v - v'$  auf die Schaufeln auftrifft, pro Zeiteinheit  $\Delta t$  den Impuls  $\Delta p$ , d. h. die Kraft

$$F = \Delta p / \Delta t = m \cdot v_{\text{rel}} / \Delta t = \rho \cdot A' \cdot v_{\text{rel}}^2$$

ausüben und damit die Leistung

$$P = F \cdot v' = \rho \cdot A' v_{\text{rel}}^2 \cdot v'$$

auf das Schaufelrad übertragen kann. (Die effektive Fläche  $A'$  hängt mit  $A$  durch einen von der Schaufelform abhängigen Parameter  $c$  zusammen:  $A' = cA$ ). Die Leistungsübertragung ist maximal bei  $dP/dv' = 0$ , also wenn  $v' = v/3$ . Dann ist

$$P_{\max} = c \cdot A \cdot \rho \cdot 4 \cdot v^3/27.$$

*Aufgabe:* Berechnung des maximalen und des exergetischen Wirkungsgrads (Der energetische Wirkungsgrad betrage z. B. 20%).

Bei Gezeitenkraftwerken wird abwechselnd der Flutstrom und der Ebbestrom ausgenutzt. Das Herzstück des Wasserkraftwerks (wie übrigens auch der Wind- und Wärmekraftwerke (vgl. Kap. V, 3.2)) ist die Turbine, die durch die Strömungen in Drehung versetzt wird.

## 1.2 Energie der bewegten Luft

Auch beim Anzapfen der Windenergie geht es um die Herstellung der Drehbewegung eines drehbaren Systems (Windrad, Propeller, Windturbine) mit Hilfe eines strömenden Mediums (Wind). Energiedichte und Energiestromdichte des Windes lassen sich daher mit denselben Formeln berechnen wie beim Wasserstrom. Wegen der fast 800mal so kleinen Dichte der Luft ( $\rho = 1,29 \text{ kg/m}^3$ ) ergeben sich bei vergleichbaren Strömungsgeschwindigkeiten um diesen Faktor kleinere Energiedichten. Da neben der Geschwindigkeit die effektive Auffangfläche der Turbinen bzw. Repeller ausschlaggebend ist, muß unter vergleichbaren Bedingungen ein Windkraftwerk sehr viel größer und damit materialaufwendiger sein als ein Wasserkraftwerk.

*Weiterführende Literatur:* Die Windenergie und ihre Nutzbarmachung haben in jüngster Zeit vor allem im Zusammenhang mit dem Bau von Windkraftanlagen (z. B. GROWIAN an der deutschen Nordseeküste) erneute Aktualität erlangt, was sich sowohl in der fachwissenschaftlichen (z. B. JARASS 1981) als auch in der unterrichtsbezogenen und fachdidaktischen Literatur niedergeschlagen hat. Zur Vertiefung der obigen Ausführungen sei z. B. auf PELKA et al. (1978), OBERMAIR (1981), INGLIS (1979) verwiesen. Über den Bau von Windmühlen in der Schule kann man sich z. B. bei BORSCH et al. (1981) informieren. Dort ist außerdem ein umfangreiches Literaturverzeichnis angegeben.

Für einen Überblick über die Gewinnung von Energie aus den Gezeiten und Meereswellen sei FRICKE et al. (1979) empfohlen.

## 2 Elektrische Energie in mechanische Energie

*Elektromotor.* Läßt man einen elektrischen Strom z. B. durch einen zwischen den Polen eines Hufeisenmagneten drehbar gelagerten Leiter (Spule) fließen, so wird dieser in Drehbewegung versetzt. Die dabei auftretende Entwertung elektrischer Energie wird durch die Entstehung mechanischer Energie (Energieaufwertung) wenigstens teilweise wieder aufgehoben. Im Prinzip ist diese Umwandlung gleichwertiger Energiearten sogar vollständig möglich.

*Versuch:* Bestimmung des Wirkungsgrads eines Elektromotors (s. auch ERNST 1978).

## 3 Thermische Energie in mechanische Energie

### 3.1 Wärmekraftmaschine

Die Wärmekraftmaschine (WKM) ist eine der wichtigsten Vorrichtungen zur Umwandlung von Wärme  $Q$  in (zunächst mechanische) Arbeit  $W$ . Die dadurch bedingte Energieaufwertung kann man folgendermaßen erklären: Der mit Energieentwertung einhergehende selbsttätige Wärmeübergang von einem heißen (Temperatur  $T$ ) zu einem kalten (Temperatur  $T_u$ ) Wärmebad wird gezwungen, die Energieentwertung, die mit dem Zur-Ruhe-Kommen einer Bewegung (z. B. Abbremsung einer Turbine) verbunden ist, aufzuheben und die Bewegung aufrechtzuerhalten.

Der Wirkungsgrad  $\eta$ , mit dem diese Umwandlung gelingt, wird dadurch begrenzt, daß die Energieaufwertung nicht größer werden kann als die mit dem Wärmeübergang an das kalte Wärmebad (Umgebung) verbundene Energieentwertung (siehe Gl. (28)):

$$\eta = W/Q < 1 - T_u/T.$$

Realisiert wird ein solcher Vorgang durch verschiedene Vorrichtungen (z. B. Dampfturbine, Ottomotor, Heißluftmotor), in denen eine kontinuierliche Bewegung aufgrund einer durch abwechselnde Erwärmung und Abkühlung hervorgerufenen abwechselnden (zyklischen) Ausdehnung und Zusammenziehung einer Arbeitssubstanz (z. B. Luft, Wasser) hervorgerufen wird.

Der Erfindung der WKM ist übrigens die rasante Industrialisierung der letzten 150 Jahre zu verdanken: Dadurch, daß die Umwandlung von Wärme in Arbeit gelang, konnten die in den fossilen Brennstoffen (zunächst Kohle) äußerst konzentriert vorkommenden Energien auch zu anderen Hilfsfunktionen als der Erwärmung genutzt werden. Erstaunlich ist, daß auch heute noch,

da die fossilen Brennstoffe zur Neige gehen, dieser Weg zur Gewinnung von Arbeit beschritten wird. Denn, da die chemische Energie fast ebenso wertvoll ist wie mechanische und elektrische Energie, bedeutet der mit großer Energieentwertung verbundene Umweg über die thermische Energie eine enorme Energieverschwendung. Auch die besten Wärmekraftwerke holen heutzutage nur 40% an elektrischer Arbeit aus der eingesetzten chemischen Energie; 60% gehen als wertlose Wärme an die Umgebung über. Obwohl man die direkte Umwandlung von chemischer in mechanische Arbeit (siehe Kap. V, 4) und in elektrische Arbeit (siehe Kap. V, 7) praktisch beherrscht, sind chemomechanische Energiewandler noch relativ weit von einem wirtschaftlichen Einsatz entfernt, während chemoelektrische Energiewandler bereits in bestimmten Bereichen Anwendung finden.

Solange jedoch von einem allgemeinen Einsatz entsprechender Direktwandler nicht ausgegangen werden kann, hat man die Umwandlung von chemischer in mechanische oder elektrische Arbeit so zu beurteilen, als ob nur relativ geringwertige Wärme, nämlich solche, die bei einer verhältnismäßig niedrigen Temperatur anfällt, zur Verfügung stünde. Im Prinzip könnte man zwar höhere Temperaturen und damit höherwertige Wärme erzeugen, wodurch eine bessere Energieausnutzung möglich wäre. Die in der Praxis verwendeten Materialien verkraften jedoch keine höheren Temperaturen.

Bei Wärmekraftwerken, die mit Kernenergie betrieben werden, liegt eine ähnliche Sachlage vor: Man kennt heute kein praktikierbares Verfahren, Kernenergie anders als über den Umweg der Wärme zu nutzen. Die Dampftemperaturen müssen wegen der zusätzlichen radioaktiven Belastung der Materialien noch niedriger sein als bei fossil betriebenen Kraftwerken.

*Beispiel:* Ein Wärmekraftwerk, das bei einer oberen Kesseltemperatur von  $T = 773 \text{ K}$  ( $\cong 500^\circ\text{C}$ ) und einer Umgebungstemperatur von  $T_u = 293 \text{ K}$  ( $\cong 20^\circ\text{C}$ ) arbeitet, erziele einen (energetischen) Wirkungsgrad  $\eta = 40\%$ . Da dieser Wirkungsgrad nur Energiebeträge vergleicht, wird eine im Prinzip vollständig mögliche Umwandlung unterstellt und damit die tatsächliche Leistung des Kraftwerks unterschätzt. Der in Kap. IV, 2 eingeführte exergetische Wirkungsgrad  $\eta^*$ , der die tatsächlich gewonnene Arbeit  $W$  an der maximal aus einer gegebenen Wärmemenge  $Q$  gewinnbaren Arbeit  $W_{\max}$  mißt, ist daher angemessener. Demnach ergibt sich mit

$$\eta^* = W/W_{\max} = \frac{0,4 Q}{(1 - T_u/T)Q} = 0,64$$

immerhin eine 64%ige Energieausnutzung.

Bei Kernkraftwerken wird ein niedrigerer Wirkungsgrad von  $\eta^* = 50\%$  erreicht.

Die aus der Wärme gewonnene mechanische Energie wird in der Regel in dem Maße wie sie entsteht (Drehung einer Turbine) zur Erzeugung elektrischer Energie wieder verbraucht, die ihrerseits unmittelbar ins elektrische Versorgungsnetz eingespeist wird. Da die menschliche Gesellschaft nicht nur hochwertige elektrische Arbeit benötigt, sondern in sehr viel größerem Umfang Wärme, die bei relativ niedriger Temperatur ( $T < 373 \text{ K}$  ( $\triangleq 100^\circ\text{C}$ )) (z. B. von einem Heizkörper) abgegeben wird, liegt es nahe, dem Kraftwerk diese sog. Niedertemperaturwärme, die sich gemäß Gl. (28) ohnehin nur mit sehr niedrigem Wirkungsgrad in Arbeit aufwerten ließe, über isolierte Rohrleitungssysteme direkt der Nutzung zuzuführen. Da sich auf diese Weise der Gesamtwirkungsgrad des Kraftwerks u. U. erheblich steigern ließe, werden entsprechende Projekte dieser sog. Wärme-Kraft-Kopplung im Rahmen von Energiesparmaßnahmen diskutiert, geplant und in geringem Umfang bereits verwirklicht. Betrachtet man allerdings den exergetischen Gesamtwirkungsgrad, der u. a. die Wärmeverluste auf dem Transport durch die Rohrleitungen sowie die energetischen Kosten für die Herstellung der aufwendigen Rohrsysteme mit einbezieht, so erscheint die Wärme-Kraft-Kopplung nicht mehr allgemein überlegen.

*Weiterführende Literatur:* z. B. BECKURTS et al. 1976.

### 3.2 Modelle verschiedener Wärmekraftmaschinen

Um mit verschiedenen Möglichkeiten der systematischen Gewinnung mechanischer aus thermischer Energie vertraut zu machen, betrachten wir einige WKM-Modelle, die sich mit einfachen Mitteln darstellen und untersuchen lassen.

#### 3.2.1 Gummiband-Wärmekraftmaschine

Die Tatsache, daß sich gespanntes Gummi bei Erwärmung zusammenzieht und bei Abkühlung ausdehnt, prädestiniert Gummi als Arbeitssubstanz für eine WKM.

*Versuch:* QUAST et al. (1976 a) beschreiben eine einfache Gummiband-WKM, die aus einem Rad mit gespannten Gummispeichen besteht, das sich vertikal leicht um eine Achse drehen kann. Ein Wärmestrahler (z. B. eine starke Lampe) diene als Wärmereservoir, die Zimmerluft als Kühler.

Bestrahlt man die Speichen einseitig, so zieht sich das Gummi auf dieser Seite zusammen und zieht die Achse aus dem Zentrum heraus. Die auf diese Weise bedingte Gleichgewichtsstörung (Übergewicht der nichtbestrahlten Seite) führt zu einer Drehung des Rades. Dadurch bewegt sich das erwärmte Gummi aus dem Strahlungsbereich der Lampe hinaus und kühlt sich ab. Gleichzeitig wird aber durch die Drehung kaltes Gummi in den Strahlungsbe-

reich der Lampe hereingedreht. Deshalb bleibt der Schwerpunkt verschoben und bewirkt letztlich eine kontinuierliche Drehung des Rades. Heftet man an die Achse des Rades einen Faden an, der über eine feste Rolle mit einem kleinen Körper verbunden ist, so wird bei Einschalten der Lampe der Körper gehoben und damit ein Teil der Wärmestrahlung in potentielle Energie umgewandelt.

An diesem einfachen Modell läßt sich eindrucksvoll zeigen, daß das Rad sich nur dreht, wenn es einseitig bestrahlt wird. Bei zentraler Bestrahlung dreht es sich ebensowenig, wie wenn es gar nicht bestrahlt würde, weil in diesem Fall der Kühler, der das Gummi immer wieder entspannt, fehlt.

Bei Erhöhung der Strahlungsleistung (z. B. durch Aufstellen eines stärkeren Strahlers) dreht sich das Rad schneller, bzw. hebt schwere Körper; d. h. durch Erhöhung der Arbeitmitteltemperatur bei Konstanzhaltung der Kühlertemperatur erhöht sich der Wirkungsgrad.

*Anmerkung:* Wegen der relativ niedrigen Temperaturdifferenz zwischen Arbeitssubstanz und Kühler (Zimmerluft) ist der Wirkungsgrad der Gummiband-WKM gemäß Gl. (28) natürlich sehr klein. Sie hat u. a. deshalb keine technische Bedeutung erlangt.

*Weiterführende Literatur:* Hinweise für die Konstruktion einer einfachen Version dieser WKM entnimmt man der Arbeit von QUAST et al. (1976 a). Eine etwas vorteilhaftere aber schwierigere Konstruktion nach ARCHIBALD wird von STONG (1971, S. 122) beschrieben. MULLEN et al. (1975, S. 349) stellen eine für Schulexperimente konstruierte ARCHIBALD'sche Gummiband-WKM vor und analysieren diese quantitativ thermodynamisch.

### 3.2.2 Heißluft-Motor

Im Unterschied zum Verbrennungsmotor (Benzin-, Diesel-, Gasmotor), deren Behandlung im Unterricht sich i. a. wegen Lärm- und Abgasentwicklung auf Funktionsmodelle beschränken muß, läßt sich der Heißluftmotor unmittelbar als Experimentiergerät einsetzen. Er wird von mehreren Lehrmittelfirmen angeboten. Seine Arbeitsweise ist einfach zu durchschauen. Er besteht aus einem Zylinder, der unten (z. B. durch Heißwasser oder eine Flamme) dauernd heiß und oben durch Kühlwasser dauernd kalt gehalten wird. Ein luftdicht abschließender Arbeitskolben wird durch die heiß gewordene Luft hochgehoben und durch die abgekühlte niedergesaugt bzw. durch den äußeren Atmosphärendruck niedergedrückt. Daß die Luft abwechselnd an die heißen oder kalten Wände gelangt, besorgt ein Verdrängungskörper. Dessen Bewegungen sind mit denen des Kolbens so koordiniert, daß er nach oben geht, wenn der Kolben durch die sich abkühlende Luft nach unten gesogen wird. Dadurch wird die abgekühlte Luft an den Seiten des Verdrängungskörpers vorbei in den unten frei werdenden Raum gedrückt. Dort erwärmt sie sich, dehnt sich aus und drückt den Kolben wieder nach oben usw. Durch ein Schwungrad wird die Hin- und Herbewegung in eine geglättete Drehbewegung umgeformt.

Der Heißluftmotor ist eine echte Wärmekraftmaschine. Anders als der Verbrennungsmotor, der durch explosionsartig verlaufende Innenverbrennung geeigneter i. a. fossiler Brennstoffe Bewegungsenergie gewinnt, kommt der Heißluftmotor mit Wärme aus, die lediglich aus einer Quelle mit einer höheren Temperatur  $T$  als diejenige der Umgebung (Kühltemperatur  $T_U$ ) sein muß. Einfache Messungen, insbesondere solche zur Bestimmung des Wirkungsgrads, werden von QUAST et al. (1976 b, S. 418) beschrieben.

*Anmerkung:* Der Heißluftmotor läßt sich ebenfalls als Modell für Kältschrank und Wärmepumpe benutzen, siehe Kap. V, 11.

Obwohl die Erfindung des Stirling-Heißluftmotors aus der gleichen Zeit (Ende des vorigen Jahrhunderts) stammt wie die des Verbrennungsmotors, ist der Siegeszug letzterem vorbehalten geblieben. Der Heißluftmotor hat eine ungleich geringere praktische Bedeutung erlangt. Da durch die exponentielle Zunahme der Verbreitung des Verbrennungsmotors insbesondere als Antrieb für Kraftfahrzeuge die ursprünglich vernachlässigbaren Geräusch- und Abgasemissionen heute fast unerträglich werden, hat der Stirlingmotor in letzter Zeit als potentielle Alternative zum »Explosionsmotor« erneute Aktualität erlangt.

*Weiterführende Literatur:* Einen ausführlichen Bericht über verschiedene Alternativen zum herkömmlichen Automobil-Motor insbesondere einen sowohl technischen als auch umweltorientierten Vergleich zwischen Verbrennungs- und Stirlingmotor findet man bei WILSON (1978, S. 27); eine detaillierte, leicht verständliche Darstellung des Stirlingmotors gibt WALKER (1973, S. 80).

### 3.2.3 Dampfmaschine

Die wohl älteste Realisierung einer WKM stellt die Dampfmaschine dar. Obwohl sie heute vor allem wegen ihres hohen Gewichts und eines sehr ungünstigen Wirkungsgrads durch andere WKM'n weitgehend verdrängt wurde, hat sie sich auf dem Spielzeug- und Modellmarkt bis heute behaupten können.

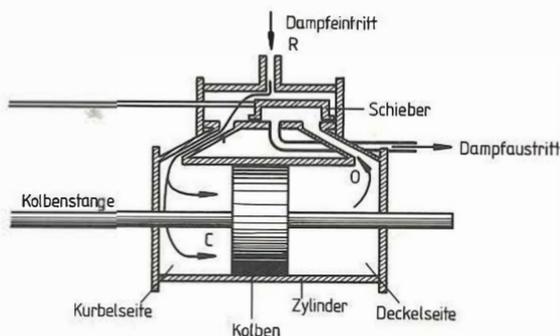


Abb. 7: Schematische Darstellung zur Funktionsweise einer Dampfmaschine.

Das Arbeitsprinzip ist einfach: Der im Kessel erzeugte Dampf wird durch die sogenannte Steuerung dem Zylinder abwechselnd von der einen Seite und der anderen Seite des Kolbens zugeführt, wodurch dieser in eine Hin- und Herbewegung versetzt wird, die über ein Gestänge die Drehbewegung eines Schwungrads bewirkt. Die auf diese Weise (Abnahme der inneren Energie des Dampfes) erzeugte Rotationsenergie kann nunmehr in der üblichen Weise (z. B. Betreiben eines Generators) weiter »verarbeitet« werden. Die Wirkungsweise der Steuerung läßt sich aufgrund von Abb. 7 verstehen: Bei dieser Stellung des Schiebers wird der Kolben durch den von R nach C strömenden Dampf nach rechts gedrückt. Dadurch wird gleichzeitig der von früher rechts des Kolbens befindliche Dampf durch die Öffnung O hinausgedrückt, und zwar entweder ins Freie (Hochdruckmaschine) oder in einen Kondensator (Niederdruckmaschine), wo er kondensiert und anschließend erneut verdampft werden kann. Wenn der Kolben rechts ist, wird der Schieber verschoben. Jetzt dringt der Dampf in den rechten Kolbenraum usw.

*Weiterführende Literatur:* Ausführliche Messungen zur Ermittlung des energetischen Wirkungsgrads (aufgrund derer sich der exergetische Wirkungsgrad leicht berechnen läßt), wird von BERGE (1981 u. 1982) am Beispiel einer Spielzeugdampfmaschine vorgenommen. Ein einfach herzustellendes, originelles Versuchsmodell einer Dampfmaschine, die allerdings nur zu qualitativen Untersuchungen taugt, wird von DORST (1971) beschrieben.

### 3.2.4 Dampfturbine

Im Prinzip arbeitet die Dampfturbine ähnlich wie die Flügel einer Windmühle: Ein bewegtes Gas (hier: Wasserdampf) trifft so auf die Turbine auf, daß das Gas möglichst viel von seiner Bewegungsenergie verliert (Energieentwertung) und die Turbine möglichst viel Drehbewegungsenergie (Rotationsenergie) gewinnt (Energieaufwertung). Im stationären Fall gleicht diese Energieaufwertung gerade die Energieentwertung aus, die darin besteht, daß die Turbine ständig Energie z. B. durch Betreiben eines Generators verliert.

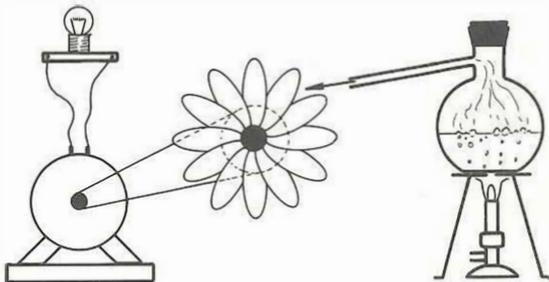


Abb. 8: Schema einer Dampfturbine, die einen Generator betreibt.

*Versuch:* Das Modell eines mit Turbinen ausgestatteten Wärmekraftwerks läßt sich mit einfachen Mitteln herstellen. Im einfachsten Fall benutzt man einen mit einem Propeller ausgestatteten Elektrogenerator (z. B. von der Firma CFW), auf den man den aus einer Düse austretenden Wasserdampf auftreffen läßt (Abb. 8). Das Leuchten einer angeschlossenen Glühlampe oder die Bewegung eines Elektromotors zeugen unmittelbar von den sich anschließenden Energieumwandlungen.

*Weiterführende Literatur:* Eine unterrichtsbezogene Darstellung entsprechender Versuche, in denen auch der technische Aspekt thematisiert wird, findet man bei OBERLIESEN (1971); siehe auch MUCKENFUSS (1978).

Das Energieentwertungs-aufwertungsgeschehen läßt sich anschaulich demonstrieren:

- a) Der aus einer Düse ausströmende Dampf verliert sich schnell ohne eine merkliche Wirkung zu hinterlassen (Energieentwertung).
- b) Eine sich drehende Turbine kommt mehr oder weniger schnell zum Stillstand (Energieentwertung).
- c) Stellt man die Turbine in den Dampfstrahl, so wird dieser gezwungen, die Turbine in Bewegung zu halten (Energieaufwertung).

### 3.2.5 Wärmemotor

Unter diesem Namen ist seit kurzem eine WKM im Handel<sup>10</sup>, die die Biegung von Bimetall bei Erwärmung ausnutzt. Der Wärmemotor besteht aus einem drehbar gelagerten Rad aus schwarzen Bimetallstreifen. Setzt man dieses Rad einseitig Wärmestrahlung aus, so verbiegen sich die Bimetallstreifen, verändern den Schwerpunkt des Rades und versetzen es in Bewegung. Dadurch verlassen auf der einen Seite verbogene Streifen den Strahlungsbereich, kühlen sich ab und werden wieder gerade. Auf der anderen Seite geraten in gleichem Maße Streifen in den Strahlungsbereich hinein, absorbieren Wärme, verbiegen sich usw.

## 4 Chemische Energie in mechanische Energie

### 4.1 Osmosekraftmaschine

Gibt man Zucker oder Salz in Wasser, so stellt man nach einiger Zeit fest, daß das Wasser süß oder salzig schmeckt, der Zucker oder das Salz sich also gleichmäßig im Wasser gelöst haben. Selbst wenn man z. B. Salzwasser geringer Konzentration und Salzwasser höherer Konzentration zusammen gießt, stellt

---

<sup>10</sup> PHYWE

sich bald eine Salzlösung homogener Konzentration ein. Solche Lösungsvorgänge laufen offenbar selbsttätig ab und sind daher mit einer Energieentwertung verbunden. Das sieht man daran, daß eine Zurückspulung des Lösungsvorgangs und damit eine Aufhebung der Entwertung nur durch Verbrauch von (z. B. thermischer) Energie möglich ist, wenn man z. B. das Wasser verdampft und anschließend vom zurückbleibenden Zucker oder Salz getrennt wieder kondensiert. Nach den Überlegungen von Kap. III müßte es möglich sein, auch die mit Lösungsvorgängen verbundene Entwertung für eine Energieaufwertung auszunutzen.

*Versuch* (s. Kap. II, 1.3): Ein am unteren Ende mit Cellophan abgedichtetes Glasröhrchen wird mit konzentriertem Zuckerwasser gefüllt und in ein Wasserglas getaucht. Nach kurzer Zeit steigt das Zuckerwasser im Röhrchen hoch. Das Cellophan ist nur für das Wasser durchlässig, nicht aber für den gelösten Zucker. Daher kann der selbsttätige Vorgang der Verdünnung der Lösung und die damit verbundene Entwertung nur dadurch verwirklicht werden, daß das reine Wasser gegen die Schwerkraft in das Glasröhrchen eindringt. Die mit dem Ansteigen der Wassersäule einhergehende Energieaufwertung (Entstehung von potentieller Energie) könnte im Prinzip genutzt werden.

In der Tat wird ernsthaft erwogen, den Lösungs- bzw. Verdünnungsvorgang, der bei der Einmündung von Süßwasser führenden Flüssen ins salzwasserhaltige Meer zur Energiegewinnung heranzuziehen (vgl. Kap. VIII, 2.4.1). Immerhin entspricht die Energieentwertung, die mit dieser Salzwasserverdünnung verbunden ist, der Energieentwertung, die auftritt, wenn derselbe Fluß über einen gut 200 m hohen Wasserfall ins Meer stürzte (entsprechende Modellrechnung siehe FRICKE et al. 1979). In einer entsprechenden Anlage würde man das (wie in dem obigen Glasröhrchen) aufgestaute Wasser über einen Überlauf zum Betreiben einer Turbine ausnutzen.

Auf eine ähnliche Weise ließen sich auch die Salzkonzentrationsunterschiede zwischen Oberflächenschichten und tieferen Schichten der Meere zur Energiegewinnung ausnutzen. Die höhere Salzkonzentration in der Oberflächenschicht kommt durch Verdunstung von Wasser zustande.

Die Energiegewinnung aufgrund der Osmose ist allerdings vor allem wegen der teuren Membranen, die die Salzteilchen aufhalten, noch nicht konkurrenzfähig.

*Weiterführende Literatur:* Die Osmose läßt sich übrigens quantitativ ähnlich elementar beschreiben wie das Verhalten idealer Gase. Siehe dazu z. B. FALK 1976, S. 214.

## 4.2 Verdunstungskraftmaschine

Als Voraussetzung für die oben beschriebene Ausnutzung der Osmose ist die Verdunstung anzusehen. Die höhere Salzkonzentration in der Oberflächenschicht der Meere kommt dadurch zustande, daß ständig Wasser verdunstet. Da das verdunstende, sich in den Wolken ansammelnde Süßwasser letztlich die zum Meer fließenden Flüsse speist, ist diese Verdunstung auch Voraussetzung für die Verdünnungsvorgänge beim Einmünden der Flüsse ins Meer. Die Entwertung aufgrund der Verdunstung läßt sich selbst als eine Art Verdünnungsvorgang verstehen. Sie kommt dadurch zustande, daß flüssiges (d. h. auf kleinem Raum konzentriertes) Wasser dazu tendiert, sich gleichmäßig in der Luft zu verteilen. Die für diese Verteilung von Wasserteilchen vor allem gegen Oberflächenspannung und Schwerkraft notwendige Energie wird dadurch verfügbar, daß die mit der Verdunstung verbundene Entwertung eine Aufwertung von thermischer Energie der Umgebung ermöglicht.

*Versuch:* Die Abnahme der thermischen Energie der Umgebung spürt man beispielsweise sehr deutlich durch die Abkühlung der Handfläche, auf der man Parfüm verdunsten läßt.

Daß diese Entwertung auch direkt dazu ausgenutzt werden kann, mechanische Energie zu erzeugen (Aufwertung), läßt sich in der Natur beobachten. Pflanzen, insbesondere sehr hohe Bäume, nutzen die Verdunstung, Wasser und damit Nährstoffe in die höchsten Spitzen zu »pumpen«.

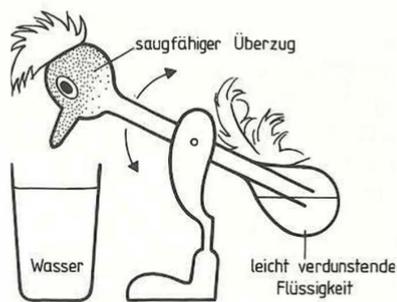
Dadurch, daß die von den Wurzeln bis in die Blätter reichenden dünnen Wassersäulen in den Kapillaren vor allem durch Oberflächenspannung zusammengehalten werden, muß bei der Verdunstung, (d. h. der Abtrennung der oberen Moleküle der Wassersäule), die ganze Wassersäule um ein entsprechendes Stück hochgezogen werden. Auch die dazu nötige Höhenenergie ist der Aufwertung von thermischer Energie der Umgebung aufgrund der mit der Verdunstung einhergehenden Entwertung zu verdanken. Die angenehme Kühle, die an einem heißen Sommertag beispielsweise von einer ausgewachsenen Buche ausgeht, ist ein sichtbares Zeichen für diesen Vorgang. Die Verdunstungsrate läßt sich durch Sonnenbestrahlung noch erheblich vergrößern.

### 4.2.1 Trinkender Storch

Eine technische Variante einer Verdunstungskraftmaschine ist vor einigen Jahren einer größeren Öffentlichkeit in Form eines im Unterricht leicht selbst zu bauenden Spielzeugs (KLUGE 1970, S. 104) zugänglich gemacht worden.

Der »trinkende Storch« besteht i. w. aus einem hantelartigen, drehbar gelagerten Glaskörper (Abb. 9). Die obere Glaskugel ist mit der unteren durch ein Glasrohr verbunden, das in eine leicht siedende Flüssigkeit (z. B. Petroläther,

Abb. 9: Schematische Darstellung des »trinkenden Storches«.



Freon, Propan) eintaucht. Über der Flüssigkeit in der unteren Kugel und in der oberen Kugel befindet sich der Dampf der Flüssigkeit unter einem der jeweiligen Temperatur entsprechenden Dampfdruck. Wird der zum Teil zu einem Schnabel geformte filzartige Überzug der oberen Kugel mit Wasser getränkt, so tritt anschließend eine Verdunstung des Wassers ein. Die für die Verdunstung nötige Energie wird der Umgebung entnommen. Dadurch tritt eine Abkühlung vor allem der oberen Glaskugel ein. Die Folge ist, daß der Siedepunkt der Flüssigkeit unterschritten wird, und ein Teil des Dampfes kondensiert. In der oberen Kugel entsteht ein Unterdruck gegenüber dem Druck des Dampfes in der unteren Kugel. Deshalb steigt die Flüssigkeit im Rohr hoch, verlagert den Schwerpunkt entsprechend, so daß der Storch vornüberkippt und mit dem Filzschnabel in ein Wasserglas eintaucht. Dadurch wird das untere Ende des Glasrohrs frei, ein Druckausgleich findet statt, und die Flüssigkeit fließt unter Rückverlagerung des Schwerpunktes in die untere Kugel zurück. Der Storch richtet sich auf und präsentiert seinen feuchten Kopf erneut der »trockenen« Umgebung. Der Vorgang kann sich wiederholen.

Unter der Bezeichnung »thermomotorische Schaukel« ist eine solche Verdunstungskraftmaschine bereits 1874 von BERNADI beschrieben worden (siehe REIS 1876, S. 436). BERNADI konstruierte ebenfalls ein »thermomotorisches Rad«, das durch Verbinden dreier solcher Schaukeln entsteht. Indem jeweils ein Teil der nassen Kugeln der trockenen Umgebung ausgesetzt ist und für den Antrieb des Rads sorgt, wird ein anderer Teil der Kugeln in einem Wasserbad wieder angefeuchtet, so daß eine kontinuierlich arbeitende Verdunstungskraftmaschine vorliegt.

*Weiterführende Literatur:* Z. B. KLUGE 1970, S. 104, PLUMB (1973), GAINES (1959), MILLER (1958), KOLB (1966), BERGE (1982).

#### 4.2.2 Minto Rad

Beim »trinkenden Storch« oder beim »thermomotorischen Rad« kann man den Verdunstungsantrieb auch dadurch unterstützen oder sogar ersetzen, daß man dem System Wärme zuführt. Erwärmt man nämlich die untere Glaskugel des

Storchs oder läßt die Kugeln des »thermometrischen Rads« durch ein warmes Wasserbad gehen, so erhält man ebenfalls eine Schwing- oder im Falle des »thermomotorischen Rads« eine Drehbewegung als Manifestation mechanischer Energie, ohne daß eine Verdunstung stattfindet. Die die Energieaufwertung kompensierende Energieentwertung wird in diesem Fall durch einen Wärmeausgleichsprozeß übernommen: Durch die Erwärmung der unteren Kugeln wird in ihnen der Dampfdruck erhöht. Dadurch wird Flüssigkeit in die höhergelegenen, einer kälteren Umgebung ausgesetzten Glaskugeln gedrückt. Die Folge ist, daß das Rad »exzentrisch« wird und zu drehen beginnt: Abgekühlte Kugeln treten in das Wasserbad ein, erwärmte treten aus. Während die erwärmten Kugeln sich an der kälteren Umgebung abkühlen und einen Unterdruck entstehen lassen, erwärmen sich die abgekühlten Kugeln und erhöhen den Dampfdruck: der Vorgang wiederholt sich.

*Weiterführende Literatur:* Eine solche WKM kann bereits zwischen Wärmereservoirern geringer Temperaturunterschiede arbeiten und ist daher kürzlich von MINTO (1975) zur Nutzung der in vielfältiger Form vorliegenden Niedertemperaturwärme (z. B. Temperaturunterschiede zwischen Licht- und Schattenbereiche) vorgeschlagen worden. Anregungen zum Bau und zur Behandlung des MINTO-Rads im Unterricht werden von SCHWARZER et al. (1980) gegeben.

### 4.3 Muskeltätigkeit

Die Muskeln sind Gewebe der belebten Natur. Man kann sie als Maschinen auffassen, die chemische Energie direkt in mechanische Energie umsetzen. Der verlustreiche Umweg über thermische Energie, wie er in der Wärmekraftmaschine beschritten wird, kann auf diese Weise vermieden werden. Der Wirkungsgrad kann daher auch Werte zwischen 50 und 100% annehmen, wie sie von technischen Maschinen schwerlich erreicht werden (vgl. MANNHERZ et al. 1976, S. 203). Bei Berücksichtigung aller weiteren Verluste, die bei menschlichen Tätigkeiten auftreten, kommt man vielfach immer noch auf ein Verhältnis von 1 : 4 zwischen abgegebener mechanischer Arbeit und in Form von Lebensmitteln zugeführter chemischer Energie.

Wir können hier auf die Funktionsweise der Muskeln nicht eingehen (siehe dazu z. B. ebd., sowie SCHMIDT et al. 1977). Nur soviel sei gesagt: Durch eine u. a. aufgrund der Zufuhr von chemischer Energie sich ändernde chemische »Umgebung« zahlreicher feinsten Stränge werden Kontraktionen bewirkt, die in ihrem Zusammenwirken zu Muskelkontraktionen führen und die Verrichtung von Arbeit erlauben.

Die Idee, dieses vielversprechende Prinzip auch technisch zu verwirklichen, hat die Wissenschaftler seit langem beschäftigt. So fand man bereits 1954 heraus, daß ein gewisses Gel sich insofern wie ein Muskel verhält, als es sich zusammenzieht und dabei ein Gewicht hebt, wenn man es in eine geeignete

chemische Lösung eintaucht. Taucht man es danach in eine andere Lösung, so entspannt es wieder (KATCHALSKY et al. 1954). Inzwischen hat man eine vergleichbare Substanz in Form eines Collagenbandes entwickelt, mit dem sich eine mechanochemische Turbine konstruieren läßt, die so ruhig wie eine elektrische Uhr arbeitet. Diese Maschine besteht i. w. aus zwei schräg zueinander orientierten drehbar gelagerten Spindeln, die spiralförmig mit einem Endlosband Collagen umwickelt sind. Die umwickelten Spindeln tauchen in eine Salzlösung ein, welche auf das Collagenband eine zusammenziehende Wirkung hat, die zu einer Rotation der Spindeln führt. Gleichzeitig wird dafür gesorgt, daß das Band durch ein Wasserbad gezogen wird, in dem das Salz herausgelöst und die ursprüngliche Bandlänge wieder hergestellt wird. Auf diese Weise wird auf der einen Spindelseite immer frisches Collagen aufgespult, das sodann in Salzwasser eintaucht und sich zusammenzieht, während auf der anderen Seite Salzwasser getränktes Collagen abgespult und zwecks Entsalzung in das Wasserbad eingeleitet wird. Bis heute hat diese Maschine allerdings keine technische Bedeutung erlangen können. Eine ausführliche Bauanleitung für eine mechanochemische Modellanlage, die Leistungen in Milliwatt abzugeben in der Lage ist, wird von STONG (1973, S. 112) vorgelegt.

## 5 Mechanische Energie in elektrische Energie

*Elektrogenerator (Dynamo).* Bewegt man einen (stromlosen) Leiter zwischen den Polen eines Hufeisenmagneten, so wird in dem Leiter ein elektrischer Strom hervorgerufen (Induktion). Die für die Bewegung des Leiters im Magnetfeld verbrauchte mechanische Energie (Energieentwertung) wird auf diese Weise zumindest zum Teil durch die Entstehung elektrischer Energie (Energieaufwertung) wiedergewonnen. Da es sich hier um die Umkehrung des elektromotorischen Prinzips (Kap. V, 2) handelt, läßt sich ein Generator im Prinzip auch als Elektromotor verwenden.

## 6 Thermische Energie in elektrische Energie

Wenn man zwei verschiedene Metalle miteinander in Berührung bringt, so tritt in der Berührschicht eine sog. Kontaktspannung auf (SEEBECK-Effekt, 1822). Biegt man die freien Enden zweier sich berührender Metallstäbe zu einem offenen Ring, so bildet sich zwischen ihnen aufgrund ihrer unterschiedlichen Ladungen ein elektrisches Feld aus. Bringt man auch die freien Enden in Berührung, so entsteht auch hier eine Kontaktspannung. Da beide Spannungen gegeneinander geschaltet sind, fließt im Ring kein Strom. Erst wenn man die beiden Berührstellen ungleich temperiert (z. B. dadurch, daß die eine mit einer Bunsenbrennerflamme erwärmt, die andere auf Umgebungstemperatur

gehalten wird), fließt ein Strom. Die damit verbundene Energieaufwertung (Entstehung von elektrischer Energie) ist letztlich der Entwertung der thermischen Energie (z. B.) einer Flamme zu verdanken: Thermische Energie wird in elektrische Energie umgewandelt.

Diese Energieumwandlung ist ähnlich wie andere Direktumwandlungen faszinierend, weil sie den Umweg der Wärmekraftmaschine vermeidet und ohne bewegliche Teile Wärmeflüsse unmittelbar zu »verstromen« vermag. Ihr Nachteil ist der niedrige Wirkungsgrad.

*Beispiel:* Man erreicht mit dem Thermoelementpaar Kupfer-Konstantan bei einer Thermokraft (d. h. Thermospannung pro Temperatureinheit) von  $40 \mu\text{V/K}$ , einer Erwärmung auf  $T = 973 \text{ K}$  ( $\triangleq 700^\circ\text{C}$ ) und einer Umgebungstemperatur (Eiswasser)  $T_U = 273 \text{ K}$  ( $\triangleq 0^\circ\text{C}$ ) einen Wirkungsgrad  $\eta = 0,2\%$ . Dem entspricht ein exergetischer Wirkungsgrad (vgl. Kap. IV, 2.2) von  $\eta^* = W/W_{\text{max}} = 0,002/(1 - T_U/T) = 0,0028$  entsprechend  $0,28\%$ .

In den letzten Jahren ist es jedoch gelungen, insbesondere durch Verwendung von speziellen Werkstoffen (z. B. Wismuttellurid)  $\eta^*$  um den Faktor 100 zu verbessern (JUSTI 1973), so daß man auch bei niedrigen Temperaturen (z. B. Wärmegewinnung durch Sonnenkollektoren) eine zumindest für spezielle Anwendungen befriedigende Energieausbeute erzielt. Die Wirtschaftlichkeitsüberlegungen ähneln denen der Solarzellen.

*Versuche:* Für schulische Zwecke bietet die Firma PHYWE einen Thermogenerator an, der bei einer Temperaturdifferenz von z. B.  $40^\circ\text{C}$  eine Spannung von  $2 \text{ V}$  liefert. Damit lassen sich kleinere elektrische Verbraucher sozusagen mit Warmwasser betreiben. Das Gerät kann auch bei Einspeisung von elektrischer Energie als Wärmepumpe betrieben werden (Peltier-Effekt).

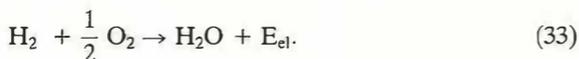
## 7 Chemische Energie in elektrische Energie

Diese Umwandlung wird heute noch weitgehend mit Hilfe von Wärmekraftmaschinen über den Umweg: chemische  $\rightarrow$  mechanische  $\rightarrow$  elektrische Energie realisiert. Die entsprechende Energiedirektumwandlung wird bereits seit langem in Form von galvanischen Elementen genutzt. Solche Batterien sind jedoch in erster Linie Energiespeicher relativ geringer Energiemengen, die – nachdem sie erschöpft sind – entweder unbrauchbar geworden sind oder neu aufgeladen werden müssen. Sie eignen sich daher nicht für die großtechnische Energieversorgung. Es wird allerdings erwartet, daß die kontinuierliche Direktumwandlung chemischer in elektrische Energie in Zukunft so weit entwickelt werden könnte, daß diese Nachteile entfallen. Bei einer solchen Reaktion werden einem galvanischen Element kontinuierlich chemische »Brennstoffe« zugeführt.

*Versuch* (siehe Abb. 10): Entfernt man durch Öffnen des Schalters S 1 die elektrische Energiequelle und verbindet die beiden Elektroden durch Schlie-

ßen von S<sub>2</sub>, so stellt man fest, daß ein Strom fließt. In dem Maße wie dadurch am Außenwiderstand R<sub>2</sub> elektrische Energie abgegeben wird, beobachtet man ein Abnehmen der Gasvorräte über den Elektroden.

Die in der Abnahme des Wasserstoffs und Sauerstoffs zum Ausdruck kommende Energieentwertung sorgt für eine Energieaufwertung in Form von dabei entstehender elektrischer Energie:



Auf diese Weise wird der zwangsläufig verlustreiche Weg über die thermische Energie (Verbrennung) vermieden. Nun unterscheidet sich diese Vorrichtung im Prinzip noch nicht von den Batterien (Akkumulatoren): Wenn der Wasserstoff und der Sauerstoff verbraucht sind, müssen sie durch Zufuhr von elektrischer Energie wieder erzeugt werden. Führt man die Gase jedoch in dem Maße zu, wie sie bei der Erzeugung elektrischer Energie aufgebraucht werden, so hat man es im Prinzip mit einem sog. *Brennstoffelement* oder einer *Brennstoffzelle* zu tun, die wie ein Kraftwerk chemische Energie verbraucht und elektrische Energie liefert, den Umweg des Wärmekraftwerks aber vermeidet.

Eine gebrauchsfertige Brennstoffzelle unterscheidet sich von dieser Modellanordnung zwar nur in technischen Details. Aber an diesen Details hapert bis heute noch die Wirtschaftlichkeit für großtechnische Anwendungen. Allerdings sind in jüngster Zeit große Fortschritte gemacht worden, so daß in den USA ernsthaft Vorschläge diskutiert werden, u. a. die Stromversorgung von Einfamilienhäusern durch 15 kW-Einheiten durchzuführen und Kleinkraftwerke von 26 MW Leistung zu installieren. Als Energiequelle soll Erdgas dienen, das zusammen mit Luftsauerstoff zu einer ähnlichen elektrischen Energie liefernden chemischen Reaktion in der Lage ist, wie sie hier am Beispiel des Wasserstoffs und Sauerstoffs skizziert wurde.

Da chemische und elektrische Energie nahezu gleichwertig sind, ist im Prinzip eine vollständige Direktumwandlung möglich. In der Praxis lassen sich jedenfalls höhere Wirkungsgrade als bei der Umwandlung in Wärmekraftmaschinen erreichen. Neben diesem Vorteil kommt der Vorteil der extremen Umweltfreundlichkeit der Brennstoffzellen hinzu.

*Weiterführende Literatur:* Weitere Angaben u. a. auch zu anderen Typen von Brennstoffzellen entnehme man z. B. GUTBIER 1974; JUSTI 1973; EULER 1974.

## 8 Lichtenergie in elektrische Energie

Neben der Möglichkeit, Sonnenenergie über den Umweg von Wärme (z. B. mit konzentrierenden Kollektoren betriebene Wärmekraftwerke) in eine wertvolle Energieart umzuformen, eröffnen die *Solarzellen* die Möglichkeit, Sonnenenergie direkt zur Erzeugung von elektrischem Strom, d. h. zur Gewinnung von elektrischer Energie zu nutzen.

Der Umwandlung von Licht in elektrischen Strom liegt die bereits 1839 von BEQUEREL gemachte Erfahrung zugrunde, daß manche Stoffe die mit Licht bestrahlt werden, eine elektrische Spannung aufweisen und daher einen elektrischen Strom zum Fließen bringen können. Allerdings gelang es erst in den letzten Jahrzehnten, geeignete Stoffe (z. B. Silizium, Kadmiumsulfid) zu finden und zu präparieren, die es ermöglichen, dem fotoelektrischen Strom Energie in praktisch nutzbarer Menge zu entnehmen. Bislang waren die Herstellungskosten für die Solarzellen jedoch so hoch, daß ihre Bedeutung vor allem auf spezielle Anwendungen (Belichtungsmesser, fotoelektronische Schaltelemente, kleinere Solargeneratoren in nichtelektrifizierten Gegenden, Energieversorgung von Satelliten usw.) beschränkt blieb. In jüngster Zeit sind jedoch enorme Kostensenkungen möglich geworden, so daß es innerhalb der nächsten 20 Jahre für möglich gehalten wird, Solargeneratoren für bis zu 1,- DM/W (bei Spitzenleistung) zu produzieren (BUHS 1981, S. 43). Legt man den heutigen Preis für elektrische Energie (etwa 0,2 DM/kWh) zugrunde, so würde sich ein solcher Generator innerhalb von 5000 Stunden intensiver Sonneneinstrahlung bezahlt machen, was selbst in unseren Breiten in wenigen Jahren der Fall sein dürfte. Bei dieser Entwicklung spielt die Silizium-Solarzelle eine überragende Rolle: Der technologische Stand ist bereits sehr hoch. Silizium ist (z. B. im Sand) praktisch unbegrenzt verfügbar. Der technologisch mögliche maximale Wirkungsgrad von 16% ist nahezu erreicht.

Andere Typen erreichen teilweise zwar höhere Wirkungsgrade, scheitern aber vor allem an den hohen Materialkosten.

*Versuche:* Silizium-Solarzellen bzw. kleinere Solarzellengeneratoren stehen seit einigen Jahren bereits relativ kostengünstig für Schulexperimente zur Verfügung. So bietet z. B. die Firma NEVA Solarzellen an, mit denen u. a. Motoren und Glühlampen betrieben, Akkumulatoren aufgeladen sowie in Verbindung mit geeigneten Meßgeräten Beleuchtungsstärken von der Intensivität der Sonneneinstrahlung bis zur Intensivität der Vollmondstrahlung gemessen werden können. Versuche mit Solarzellen werden z. B. von SÜDBECK (1973) und BROCKMEYER (1979) beschrieben. Mit Hilfe des fotometrischen Abstandsgesetzes wird die Proportionalität zwischen Kurzschlußstromstärke und Beleuchtungsstärke gezeigt. Durch Messung der Leerlaufspannung bei einer zweiten Zelle erhält man die Leerlaufspannung in Abhängigkeit der Beleuchtungs-

stärke. Außerdem werden die Temperaturabhängigkeit der Leerlaufspannung, spektrale Empfindlichkeit und Strom-Spannungskennlinien der Solarzellen sowie Leerlaufspannung und Kurzschlußstromstärke bei Parallel- und Hintereinanderschaltung mehrerer Silizium-Zellen gemessen.

*Weiterführende Literatur:* Z. B.: SELDERS 1977, SELDERS et al. 1979, BUHS 1981.

## 9 Mechanische Energie in thermische Energie

Reibung ist der klassische Fall einer solchen Energieumwandlung. Sie tritt u. a. überall dort auf – erwünscht und unerwünscht – wo Bewegungen für menschliche Hilfsfunktionen hervorgerufen werden.

Nehmen wir das Beispiel der Fortbewegung mit einem Auto: Erwünscht ist hier die Reibung insofern, als ohne sie überhaupt keine Fortbewegung möglich wäre: Die Räder eines Autos würden sich durchdrehen wie auf einer idealen Eisschicht. Unerwünscht ist sie deshalb, weil die für die Fortbewegung aufgebrauchte Energie durch Reibung (mit der Erdoberfläche und der Luft) verlorengeht: Die chemische Energie, die verbraucht (bzw. entwertet) wird, um ein Auto in einem gleichförmigen Bewegungszustand zu halten, dient letztlich ausschließlich zur Aufhebung der durch Reibung bedingten Energieentwertung.

## 10 Elektrische Energie in thermische Energie

Dieser Umwandlungstypus ist ebenfalls zweischneidig: Er begleitet jeden elektrischen Energietransport und führt energiewirtschaftlich gesehen zu großen Verlusten. Andererseits ist diese Umwandlung für viele Anwendungen, bei denen es um eine schnelle und bequeme Herstellung von thermischer Energie geht, von großer Bedeutung. Man denke nur an die Verbreitung des Elektroherds, des Warmwasserbereiters und des Heizofens im Haushalt. Auf dem Hintergrund unseres Energieentwertungskonzepts erweisen sich aber gerade diese Anwendungen als äußerst problematisch: Hier wird hochwertige Energie (reine Exergie) für Zwecke verwendet, bei denen man mit relativ minderwertiger Energie auskäme. Verschärfend hinzu kommt, daß die elektrische Energie mit einem relativ geringen Kraftwerkswirkungsgrad (z. B.  $\eta = 0,4$ ) aus hochwertiger chemischer Energie gewonnen werden mußte. Obwohl elektrische Energie vollständig in thermische Energie, also mit einem energetischen Wirkungsgrad  $\eta = 1$ , umgewandelt werden kann, liegt daher eine Energieverschwendung vor.

*Beispiel:* Für die Raumheizung mit aufrechtzuerhaltender Zimmertemperatur  $T_Z = 293 \text{ K}$  ( $\triangleq 20^\circ\text{C}$ ), Außentemperatur  $T_U = 283 \text{ K}$  ( $\triangleq 10^\circ\text{C}$ ) ergibt sich ein exergetischer Wirkungsgrad (Kap. IV, 2.2)

$$\eta^* = W_{\min}/W = 1 - T_U/T_Z = 0,03,$$

$W_{\min}$  ist die im Idealfall aufzuwendende elektrische Arbeit und  $W$  die tatsächlich aufgewandte Arbeit.

Für Nachtspeicherheizungen, in denen elektrische Energie verbraucht wird, die aufgrund schwankenden Energiebedarfs ohnehin verloren wäre, stellt sich das Problem wirtschaftlich gesehen etwas anders dar, obwohl auch hier die Möglichkeit, die Energie für Bedarfsspitzen zu speichern, in Betracht gezogen werden sollte (siehe auch Kap. VII, 2).

Anders zu beurteilen ist die Herstellung thermischer Energie aus elektrischer Energie, wenn hohe Temperaturen erzeugt werden müssen, also hochwertige thermische Energie benötigt wird.

*Beispiel:* Soll ein Körper (z. B. bei der Stahlherstellung, beim Elektroschweißen) auf eine Temperatur  $T_S = 1500 \text{ K}$  gebracht werden, so ergibt sich immerhin ein exergetischer Wirkungsgrad von

$$\eta^* = W_{\min}/W = 1 - T_U/T_S = 0,81.$$

## 11 Thermische Energie in thermische Energie

### 11.1 Wärmepumpe

Der Gedanke, das riesige Reservoir thermischer Energie, das durch die Umgebung (Außenluft, Erdreich, Grund- und Oberflächenwasser) repräsentiert wird, zu nutzen, erscheint auf den ersten Blick ebenso bestechend wie abwegig: bestechend, weil die Energie gleichsam kostenlos vor der Tür lagert, abwegig, weil eine Nutzung, beispielsweise das Heizen eines Zimmers, voraussetzte, daß Wärme vom kalten zum warmen Körper zu fließen hätte, in unserem Beispiel von der kalten Umgebung ins warme Zimmer. Ein solcher Vorgang steht aber im krassen Gegensatz zur Erfahrung, wonach nur das Umgekehrte ständig stattfindet.

Eine Umkehrung des Wärmeübergangs vom Warmen zum Kalten käme einer Energieaufwertung gleich, die nur durch eine hinreichend große Energieentwertung zu betreiben wäre.

Eine Realisation einer solchen Möglichkeit stellt die Wärmepumpe (WP) dar, mit der es gelingt, durch Verbrauch hochwertiger Energie, den selbsttätigen Wärmeübergang von warm auf kalt zurückzuspulen, d. h. unter weiterer

Abkühlung eines kalten Körpers einen warmen Körper noch mehr zu erwärmen. Heizt man also beispielsweise einen Raum statt mit einer elektrischen Widerstandsheizung mit einer zwischen einem Heizkörper der Temperatur  $T_H$  und der Außenluft der Temperatur  $T_u$  arbeitenden WP, so wird vom Heizkörper mehr Wärme  $Q$  an den Raum abgegeben als an elektrischer Arbeit  $W$  verbraucht wurde, nämlich gemäß Gl. (28) bis zu

$$Q = W/(1 - T_u/T_H) > W.$$

*Beispiel:* Ein Heizkörper soll mit Hilfe einer Wärmepumpe auf einer Temperatur von  $T_H = 313 \text{ K}$  ( $\cong 40^\circ\text{C}$ ) gehalten werden. Die Umgebungstemperatur betrage  $T_u = 283 \text{ K}$  ( $\cong 10^\circ\text{C}$ ). Um die Wärmemenge  $Q = 1 \text{ kWh}$  an den Heizkörper abzugeben, ist dazu gemäß Gl. (28) eine Mindestarbeit  $W_{\min} = Q(1 - T_u/T_H) = 0,096 \text{ kWh}$  nötig, das sind 9,6% der benötigten Wärme. In Wirklichkeit liegen die Verhältnisse sehr viel ungünstiger: Je nach der mittleren Temperatur des verfügbaren Wärmebads (Umgebungsluft, Erdreich, Grundwasser) kann von energetischen Wirkungsgraden  $\eta = Q/W$  (Leistungsziffern) zwischen 2 und 4 ausgegangen werden. Dem entsprechen exergetische Wirkungsgrade

$$\eta^* = \frac{W_{\min}}{W} = \frac{Q(1 - T_u/T)}{Q/\eta} = 0,19 \dots 0,38 ; \quad (34)$$

das sind Werte, die auch in etwa von WKM'n gleicher Größe erreicht werden.

## 11.2 Kompressionswärmepumpe

Der Wärmeübergang vom kalten zum warmen Körper (z. B. vom Grundwasser der Temperatur von  $10^\circ\text{C}$  zum Heizkörper der Temperatur von  $55^\circ\text{C}$ ) wird dadurch realisiert, daß das Arbeitsmittel (z. B. Frigen), das in Wärmekontakt mit einem Wärmereservoir relativ niedriger Temperatur  $T_u$  verdampft, durch eine hinreichend große Druckerhöhung (und damit Temperaturerhöhung) veranlaßt werden kann, in Wärmekontakt mit einem Wärmereservoir verhältnismäßig hoher Temperatur  $T_1 > T_u$  zu kondensieren. Da das Arbeitsmittel bei der Verdampfung Wärme aufnimmt und bei der Kondensation Wärme abgibt, stellt sich als Nettoeffekt jener Wärmetransport vom kalten zum warmen Körper ein.

*Weiterführende Literatur:* z. B. BAIER 1978.

### 11.3 KÜHLSCHRANK ALS WÄRMEPUMPE

Ein Kühlschrank funktioniert nach demselben Prinzip wie die Wärmepumpe: Wärme wird von einem kalten zu einem warmen Körper transportiert. Der Unterschied besteht in der Hilfsfunktion. Während die Wärmepumpe zu Heizzwecken benutzt wird, indem ein im Verhältnis zum zu heizenden Körper kaltes thermisches Reservoir angezapft wird, dient der Kühlschrank Kühlzwecken, indem einem kalten Körper (dem Kühlgut) Wärme entzogen und an die im Vergleich dazu warme Umgebung abgegeben wird.

Der Kühlschrank ist im Vergleich zur Wärmepumpe weit verbreitet. So gut wie jeder Haushalt verfügt über einen Kühlschrank. Dementsprechend liegt es nahe, den Kühlschrank zu Versuchszwecken als Wärmepumpe zu benutzen.

*Versuche:* In einer von SCHWARZER et al. (1977) beschriebenen Versuchsanordnung wird ein Kühlschrankaggregat in einem geschlossenen Raum von  $0,1 \text{ m}^3$  (Modell einer zu heizenden Wohnung) untergebracht. Der Verdampfer wird in einen Behälter mit Wasser, das durch zulaufendes Leitungswasser auf konstanter Temperatur  $T_u$  gehalten wird (Modell des Grundwassers), getaucht. Zur Messung der zugeführten elektrischen Energie dient ein Wattmeter. Mit Hilfe eines Kontaktthermometers wird eine konstante über der Umgebungstemperatur liegende Raumtemperatur  $T_R$  (z. B.  $T_R = 35^\circ\text{C}$ ) eingeregelt. Hält man  $T_R$  nun wahlweise durch die Wärmepumpenheizung oder eine Elektroheizung (Heizdraht) aufrecht, so lassen sich die dazu jeweils nötigen Leistungen und damit der energetische sowie (unter Einbeziehung des maximalen energetischen Wirkungsgrads) der exergetische Wirkungsgrad bestimmen. Durch Variation der Isolierung, Größe und Temperatur  $T_R$  des Modellraums, lassen sich weitere Aufschlüsse über Probleme der Raumheizung gewinnen.

### 11.4 HEIßLUFTMOTOR ALS WÄRMEPUMPE

Auch der schon früher erwähnte Heißluftmotor (z. B. LEYBOLD) kann als Wärmepumpe betrieben werden, indem man seine Funktionsweise einfach umkehrt. Hier wird besonders deutlich, daß eine Wärmepumpe im Prinzip als eine »rückwärts« laufende Wärmekraftmaschine aufgefaßt werden kann.

*Versuche:* Den energetischen Wirkungsgrad des Heißluftmotors als WP bestimmt man ohne großen Aufwand z. B. dadurch, daß man den durch die WP gekühlten oberen Luftraum durch eine Heizwendel auf konstanter Umgebungstemperatur hält und die aufgewandte elektrische Leistung zur mechanischen Leistung ins Verhältnis setzt (weitere Einzelheiten bei HECHT (1978)). Der exergetische Wirkungsgrad ergibt sich daraus mit Hilfe des maximalen energetischen Wirkungsgrads.

## 11.5 Absorptionswärmepumpe

Die mit dem Wärmeübergang von einem kalten zu einem warmen Körper verbundene Energieaufwertung wird bei der Kompressionswärmepumpe angetrieben durch die Entwertung hochwertiger Arbeit. Da auch Wärme, die bei hoher Temperatur abgegeben wird, wertvoller ist als solche, die bei niedriger Temperatur entsteht, müßte es im Prinzip möglich sein, eine Wärmepumpe mit hochwertiger Wärme zu betreiben bzw., wenn der kalte Körper kein Reservoir darstellt, sondern z. B. das Kühlgut eines Gefrierschranks, müßte die paradox erscheinende Möglichkeit bestehen, einen Körper mit Hilfe von Wärme zu kühlen.

Diese Möglichkeit besteht tatsächlich. Beispielsweise sind in südlichen Regionen, in denen noch keine allgemeine Elektrizitätsversorgung existiert, Kühlschränke in Gebrauch, die mit der durch Verbrennung von Gas entstehenden Wärme betrieben werden. Der zugrundeliegende Mechanismus unterscheidet sich von dem der oben skizzierten Kompressionswärmepumpe im Prinzip nur dadurch, daß die Verdichtung des dampfförmigen Arbeitsmittels durch die relativ starke Erwärmung aufgrund des verbrennenden Gases besorgt wird.

## 12 Chemische Energie in thermische Energie

Die wohl wichtigste Energieumwandlung dieser Art ist die Verbrennung. Durch die Verfügungsgewalt über das Feuer gelang dem Menschen zum ersten Mal die Erschließung einer externen Energiequelle zur Erfüllung von Hilfsfunktionen.

Diese Energieumwandlung ist normalerweise mit einer großen ungenutzt bleibenden Energieentwertung verbunden: Geht man von der Flammentemperatur  $T_F = 2250 \text{ K}$  aus, so besitzt die entstehende Wärme an dieser Stelle noch einen hohen Wert (große Exergie), die Wärme wird jedoch üblicherweise an Systeme sehr viel niedrigerer Temperatur abgegeben. Das hängt einerseits vom Bedarf ab (es wird vor allem Niedertemperaturwärme benötigt), andererseits von den Materialien der Energiewandler, die nur relativ niedrige Temperaturen aushalten. Beispielsweise wird in Wärmekraftwerken die Wärme bei einer Temperatur von maximal  $800 \text{ K}$  weiterverarbeitet.

## 13 Lichtenergie in thermische Energie

Indem die die Erdoberfläche konstituierenden Systeme (Luft, Häuser, Bäume, Straßen usw.) bei Sonnenschein Energie bei sehr hoher Temperatur aufnehmen und bei einer niedrigen Temperatur (näherungsweise spricht man von Umgebungstemperatur) wieder abgeben, wird eine i. a. sehr große Energieentwertung bedingt. Obwohl alle Systeme im Schnitt dieselbe Leistungsmenge abstrahlen, die sie erhalten haben, nehmen sie i. a. je nach ihrer Oberflächenbeschaffenheit verschiedene Temperaturen an. Je matter und dunkler ein Körper ist, desto höher ist seine Temperatur. Weil dunkle und matte Körper ein großes Absorptionsvermögen (das ist das Verhältnis aus absorbiertes zu auffallender Strahlungsleistung) besitzen, d. h. höhere Leistungen aufnehmen als andere, müssen sie auch höhere Leistungen abstrahlen. Das ist aber nur bei höheren Temperaturen möglich, denn das Emissionsvermögen nimmt mit der Temperatur zu. Aufgrund der relativ hohen Temperaturen, bei denen diese Körper strahlen ist die abgegebene Wärme relativ wertvoll, und es liegt nahe, dem Körper diese Wärme zur energetischen Nutzung zu entziehen. Die Systematisierung und Optimierung dieser Idee hat zum Sonnenkollektor geführt.

### 13.1 Thermischer Flachkollektor

Dieser Kollektortyp besteht aus einer matt-schwarzen Platte, an deren Unterseite Röhren angebracht sind, in denen Wasser zirkuliert, um die Wärme zu übernehmen und abzuführen. Meist wird das ganze noch durch Glasplatten abgedeckt, wodurch die Abstrahlung (Treibhauseffekt, siehe Kap. VIII, 2.4.3) herabgesetzt wird. Die Wärmeabfuhr wirkt natürlich der Erwärmung des Kollektors entgegen und kann daher nur in dem Maße erfolgen, wie die sich unter diesen Bedingungen einstellende Temperatur im Hinblick auf die beabsichtigte Nutzung noch ausreicht. Die mit einem typischen Flachkollektor erreichbaren Temperaturen liegen meist unter 100°C. Das bedeutet zwar immer noch eine enorme Entwertung der Sonnenenergie. Bedenkt man aber, daß etwa die Hälfte der in der Bundesrepublik verbrauchten Primärenergie ohnehin für die Erzeugung von Niedertemperaturwärme, d. h. Wärme, die bei Temperaturen unter 100°C anfällt, benötigt wird, so ist hierin nicht unbedingt ein Nachteil zu erblicken. Als Nachteil muß indessen die extreme Witterungsabhängigkeit des Kollektors angesehen werden, die sich besonders in unseren Breiten mit ihren relativ wenigen Sonnentagen pro Jahr bemerkbar macht. Eingesetzt werden Flachkollektoren vor allem zur Brauchwasser-, Schwimmbekenerwärmung, Niedertemperaturheizung meist in Verbindung mit einem herkömmlichen System usw.

*Weiterführende Literatur:* Sonnenkollektoren einfacher Bauart lassen sich ohne großen Aufwand im Technik- oder Physikunterricht selbst herstellen (z. B. PILTZ 1980, BROCKT 1979). Käuflich zu erwerben sind Demonstrationskollektoren z. B. bei den Firmen NEVA, SOLARTECHNIC, TRANSFER-ELEKTRIC und KRÖNCKE, mit denen auf einfache Weise vielfältige Messungen durchgeführt werden können. Beispielsweise lassen sich mit dem »Solarkollektor« (KRÖNCKE) nach einer Beschreibung von HANSCHKE u. a. Wärmekapazität des Kollektors, Solarkonstante sowie Leistung und Wirkungsgrad des Kollektors in Abhängigkeit von der Temperatur ermitteln.

### 13.2 Konzentrierende Kollektoren

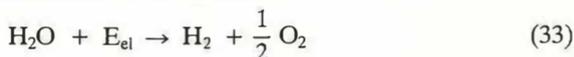
Um höhere Temperaturen zu erreichen als mit dem Flachkollektor, nutzt man das bekannte Prinzip der Konzentrierung des Sonnenlichts z. B. Fokussierung mit Hilfe eines Hohlspiegels aus. Die Temperaturerniedrigung und damit Wertminderung kommt stark vereinfacht dadurch zustande, daß aus einem sehr kleinen Raumwinkel kommendes Sonnenlicht von einem Körper absorbiert wird und im Prinzip in den gesamten Raum wieder emittiert wird. Denn wie man sich anhand der PLANCKSchen Strahlungsformel (39) klarmachen kann, bedeutet eine Aufweitung des Raumwinkels eine Verminderung der Temperatur. Konzentrierende Kollektoren sind Vorrichtungen, die die Sonnenstrahlung in einen kleinen Raumwinkel »zurückbündeln«. Bei genügend starker Konzentration wäre es im Prinzip möglich, auf diese Weise Temperaturen zu erreichen, wie sie die Strahlung besitzt, bzw. – bei ungestörter Strahlung – wie sie auf der Sonnenoberfläche herrschen. In der Tat gelingt es, im Sonnenofen von Odeillo (Südfrankreich) Temperaturen von 3800 °C zu produzieren.

*Versuche:* Für Versuche eignen sich käuflich zu erwerbende Hohlspiegelöfen (z. B. SUNTRONIC), von etwa 1 m<sup>2</sup> Fläche, mit denen Leistungen von 800 W und Temperaturen von mehreren 100 °C erreichbar sind.

*Weiterführende Literatur:* Eine Beschreibung verschiedener Typen konzentrierender Kollektoren sowie Einzelheiten über deren Wirkungsweise findet man z. B. bei FRICKE et al. (1981 a).

## 14 Elektrische Energie in chemische Energie

Ein typisches Beispiel für eine solche Energieumwandlung ist die *Elektrolyse* von Wasser, wie sie in einem Hoffmann'schen Wasserzersetzungsgesetzapparat abläuft (Abb. 10). Läßt man einen Gleichstrom durch das Wasser fließen (durch Umlegen von Schalter S1), so scheidet sich an der einen Elektrode Wasserstoffgas an der anderen Sauerstoffgas ab:



Die dabei aufgewandte elektrische Energie  $E_{el}$  findet sich zumindest teilweise im Wasserstoffgas wieder<sup>11</sup>. Denn beispielsweise bei der Verbrennung von Wasserstoff zu Wasser wird die bei der Wasserspaltung zugeführte chemische Energie wieder verfügbar: Die mit der Verbrennung von Wasserstoff einhergehende Energieentwertung wird auf diese Weise durch den Verbrauch elektrischer

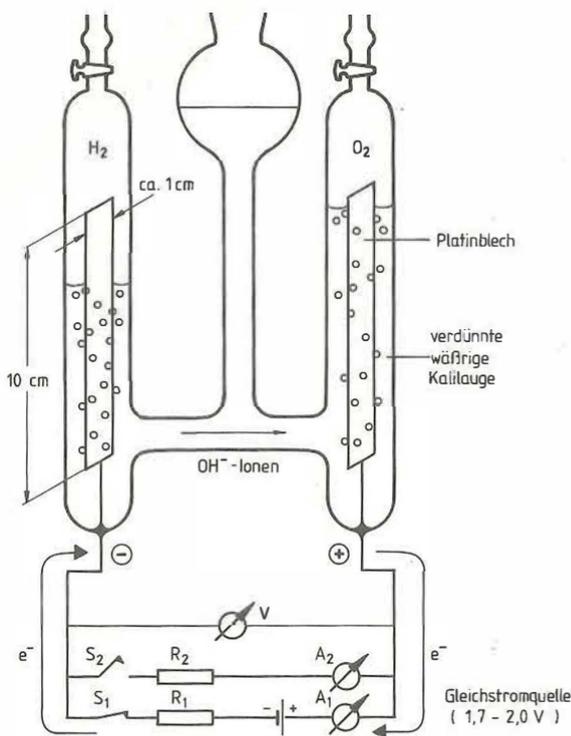


Abb. 10. Hoffmannscher Wasserzersetzungsapparat (nach HAMANN et al. 1974).

<sup>11</sup> Wenn hier dem Wasserstoff die chemische Energie zugeordnet wird, so folgen wir damit der üblichen Konvention, wonach z. B. Benzin, Kohle, Lebensmittel und hier Wasserstoff – nicht aber z. B. Sauerstoff als Energieträger angesehen wird. Die Zuordnung ist natürlich ebenso willkürlich wie die Zuordnung von potentieller Energie zu einem hochgehobenen Körper. Empirisch feststellbar ist lediglich die chemische Energie, die bei einer entsprechenden Reaktion frei wird (z. B. Verbrennung von Wasserstoff) oder zugeführt wird (Spaltung von Wasser). Motiviert wird die Konvention dadurch, daß die als Energieträger angesehenen Substanzen selten sind und mit Mühen beschafft werden müssen, was z. B. für den überall vorhandenen Sauerstoff nicht der Fall ist.

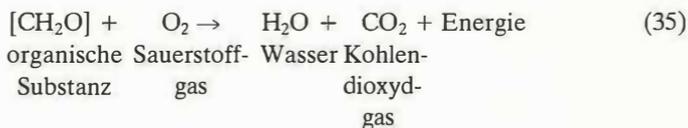
scher Energie rückgängig gemacht, bzw. es wird eine entsprechende Energieaufwertung betrieben. Ähnliche Vorgänge laufen beim Aufladen von Batterien und Akkumulatoren ab. Diese Umwandlungen sind im Rahmen der Energieversorgung nur als Energiespeicher (siehe Kap. VII, 1), für relativ geringe Energiemengen interessant. Wegen des großen Anteils der chemischen Energieträger am Primärenergieaufkommen und der elektrischen Energie am Endenergieverbrauch, kommt dem umgekehrten Vorgang größere Bedeutung zu (siehe Kap. V, 7).

*Weiterführende Literatur:* HAMANN et al. 1974.

## 15 Lichtenergie in chemische Energie

Die grünen Blätter der Pflanzen stellen energetisch gesehen hochkomplizierte fotochemische Kraftwerke dar, in denen mit Hilfe von Sonnenlicht pflanzliche Biomaterie hergestellt wird, die chemische Energie in großer Konzentration enthält, wie man beispielsweise bei der Verbrennung von Holz oder Stroh erfahren kann.

Dieser Vorgang der *Fotosynthese* bewirkt im Prinzip, daß die mit der Verbrennung bzw. allgemein mit dem Zerfall von Biomaterie einhergehende Energieentwertung durch die Aufnahme hochwertiger Sonnenenergie (Energieaufwertung) rückgängig gemacht wird. Aus der Sicht der ablaufenden Prozesse wird mit Hilfe des Verbrauchs von Sonnenenergie der in der folgenden Summenformel zusammengefaßte Zerfallprozeß



zurückgespult.

*Weiterführende Literatur:* BÖGER 1978, METZNER 1975, GÜNTHEROTH 1979, GOVINDJEE et al. 1974, LEVINE 1969, DRISSLER et al. 1974, Unterrichtspraktische Aspekte findet man z. B. bei SCHLÖSSER 1974.

## VI. Energietransport

Ziel ist es, die maßgeblichen Phänomene des Energietransports in einem groben qualitativen Überblick zusammenzutragen, ohne eine weitere Vertiefung der Problematik anzustreben. Dabei teilen wir die Phänomene den jeweils zugrunde liegenden Transportmechanismen entsprechend in mechanische, thermische und elektrische Energietransporte ein. Eine gewisse Gewichtung der Ausführungen erfolgte nach energietechnischen Gesichtspunkten.

### 1 Mechanischer Energietransport

Typische mechanische Energieträger sind vor allem Kette, Riemen, Seil und Welle. Sie sind wesentliche Bestandteile von Maschinen und anderen technischen Vorrichtungen.

*Beispiele:* 1. Mit einer Kette wird beim Fahrrad die Muskelenergie des Menschen, nachdem sie über die Tretkurbel in Rotationsenergie umgewandelt worden ist, auf das Hinterrad übertragen, durch das schließlich der gewünschte Effekt der Fortbewegung erzielt werden kann.

2. Mit einem Keilriemen wird beim Automotor ein kleiner Teil der Energie zum Antrieb von Wasserpumpe und Lichtmaschine ausgekoppelt.

3. Mit Wellen wird üblicherweise die Antriebsenergie des Autos auf die Antriebsräder verteilt.

4. Seile finden vor allem beim Hochheben von Lasten, beim Abschleppen usw. als (Über)-Träger mechanischer Energie Verwendung.

Noch bis vor einigen Jahrzehnten war die mechanische die vorherrschende Form der technischen Energieübertragung. Ein kompliziertes System von Transmissionsriemen transportierte die etwa durch eine Dampfmaschine produzierte mechanische Energie zu den einzelnen Maschinen. Heute ist sowohl die dezentrale Energieerzeugung als auch die mechanische Energieverteilung fast völlig durch die zentrale Erzeugung elektrischer Energie in Kraftwerken und die elektrische Übertragung dieser Energie zu den Fabriken und einzelnen Maschinen innerhalb der Fabriken ersetzt worden.

Nicht nur durch bewegte Festkörper läßt sich mechanische Energie transportieren. Ebenso bedeutungsvoll ist die Energieübertragung im Zusammenhang mit strömenden Flüssigkeiten und Gasen.

*Beispiele:* 1. Mit einer Pumpe kann man Wasser in einen Hochbehälter befördern. Daß mit dem Wasser auch »Energie hochgepumpt« wird, merkt

man nicht nur daran, daß die Pumpe mit Energie versorgt werden muß, sondern auch daran, daß das hochgepumpte Wasser nunmehr eine potentielle Energie besitzt, die man nutzen kann, wenn man das Wasser wieder herunterlaufen läßt<sup>11</sup>. In sogenannten Pumpspeicherwerken wird beispielsweise die zu Zeiten geringen Verbrauchs an elektrischer Energie überschüssige Energie zum Hochpumpen von Wasser genutzt und zu Zeiten hohen Verbrauchs an elektrischer Energie über ein Wasserkraftwerk wieder verfügbar gemacht.

2. Im globalen Maßstab stellt die Sonne eine entsprechende »Pumpe« dar. Indem sie das Wasser immer wieder in die Wolken transportiert, belädt sie es mit Energie, die sich, nachdem die Wolken abgeregnet sind, beispielsweise im bewegten Wasser der den Meeren zustrebenden Flüssen manifestiert. Diese Bewegungsenergie wird im Schnitt durch Reibung verschiedenster Art (z. B. zwischen Wasser und Flußbett) in dem Maße an die Umgebung abgegeben, wie sie aufgrund des ständigen Durchlaufens einer Höhendifferenz aus der potentiellen Energie entsteht. Man kann die Energie aber auch wenigstens teilweise durch Wasserturbinen anzapfen und damit für den Menschen nutzbar machen.

3. Der Wind als eine Form von bewegter Luft trägt Energie eventuell über große Entfernungen fort. Die Energie wird ähnlich wie die des strömenden Flußwassers durch Reibung (u. a. innere Reibung) als Wärme an die Umgebung abgegeben, es sei denn, man nutzt sie z. B. durch Windmühlen.

4. In manchen Maschinen, z. B. Baggern, Kränen o. ä., wird eine Flüssigkeit mit einer von einem zentralen (Diesel-)Motor betriebenen Pumpe unter Druck gebracht. Auf diese Weise kann Energie mit der Flüssigkeit (Hydrauliköl) an die entlegenen Stellen transportiert werden, an denen sie wirksam werden soll. Mit sogenannten Hydraulikzylindern bzw. Hydraulikmotoren werden Hin- und Herbewegungen bzw. Drehbewegungen produziert.

5. Der Preßlufthammer ist ein bekanntes Beispiel für die Übertragung von Energie durch zusammengepreßte Luft. Ein mit einem Dieselmotor betriebener Kompressor belädt die Luft mit mechanischer Energie, die dann über einen Schlauch mit der Luft zum Hammer transportiert wird, wo sie in kraftvollen Hin- und Herbewegungen genutzt werden kann.

## 2 Thermischer Energietransport

Thermische Energie breitet sich aufgrund verschiedener Mechanismen aus, nämlich aufgrund von Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung (siehe auch Kap. VI, 6).

Die drei Wärmetransportmechanismen treten i. a. nicht getrennt voneinander auf. Dementsprechend ist die jeweils betrachtete Transportart allenfalls die vorherrschende. Der idealisierende Charakter der hier zugrunde gelegten Einteilungssystematik kommt darüber hinaus insbesondere bei der Konvektion

zum Ausdruck. Denn offenbar handelt es sich hier auch um einen mechanischen Energietransport. Dies wird besonders deutlich am Beispiel einer Warmwasserheizung, in der die Wärmeverteilung durch Konvektion unterstützt wird durch eine Wasserpumpe. Man könnte sich auf den Standpunkt stellen, diese Transporte seien im Grunde mechanische Transporte energiespeichernder Materie.

### 3 Mechanische Transporte von Energieträgern

Eine entsprechende Charakterisierung gilt auch für die folgenden Transporte: Wärmetransporte durch Warmwasserleitungen (z. B. Fernwärme), Transporte von chemischen Energieträgern wie Kohle, Gas, Öl, usw. in Pipelines, in Tankern usw.

Diese Beispiele machen deutlich, daß auch die Grenze zwischen Energietransport und Energiespeicherung fließend ist: Man kann die Frage, ob Energietransport und Transport eines Energieträgers, also eines Energie speichernden Systems, etwas grundsätzlich Verschiedenes ist, u.E. nicht allgemein beantworten. Beim Energietransport durch Transport von Energieträgern kann man ähnlich wie beim Transport von Stoffen (z. B. in Flaschen) zwei Fälle unterscheiden:

1. Die Energieträger werden am Bestimmungsort entleert und wie leere Pfandflaschen zur Abfülleinrichtung zur Energiequelle zwecks erneuter Auffüllung zurückgeführt. Zu diesem Typ gehört z. B. der Transport von thermischer Energie in der Warmwasserleitung. Aber auch der unten beschriebene Transport elektrischer Energie kann unter diesem Aspekt gesehen werden. Charakteristisch ist das Vorhandensein einer Hin- und Rückleitung.

2. Die energiebeladenen Träger werden nach der Entleerung am Bestimmungsort, wie Einwegflaschen »weggeworfen«.

Dies gilt u. a. für die fossilen Energieträger: Nach der Energieabgabe durch Verbrennung werden die Reste des Trägers (Rauchgase, Asche) an die Umgebung abgegeben. Charakteristisch für diese Transporte ist das Vorhandensein nur *einer* Zuleitung. Ähnlich wie bei Einwegflaschen und anderen Einwegverpackungen wird auch bei »Einwegenergieträgern« die Umwelt in zunehmendem Maße belastet. In der Natur treten daher typischerweise »Mehrweg-« bzw. Kreisprozesse auf (Kap. VIII, 2.4). Auch eine Umwelt schonende »ökologische« Wirtschaft müßte auf dem Prinzip des Kreislaufs (Recycling) basieren.

## 4 Elektrischer Energietransport

Im Unterschied zur Natur, die (in Form von Wasser und Luft) von mechanischen Energietransporten auch über weitere Entfernungen reichlich Gebrauch macht, benutzt der Mensch dafür vor allem den elektrischen Strom als Energieträger. Da abgesehen von Anwendungen in der Nachrichtentechnik (Rundfunk, Fernsehen u. ä.) Energie kaum in Form von elektrischer Energie benötigt wird, ist der Weg über die elektrische Energie in den meisten Fällen ein Umweg, durch den man sich i. a. zusätzliche Energieentwertungen und -verluste einhandelt. Dies erscheint in vielen Fällen durch Vorteile, die die Verwendung elektrischer Energie mit sich bringt, gerechtfertigt: Elektrische Energie

- läßt sich über Hochspannungsnetze im Bereich einiger hundert Kilometer relativ verlustarm transportieren,
- kann – da es sich um eine hochwertige Energieart handelt – problemlos und i. a. ohne allzu großen Verlust in jede andere gerade benötigte Energieart umgewandelt werden,
- erzeugt selbst keine Umweltverschmutzungen, weshalb die bei ihrer Herstellung verursachten Verschmutzungen lokal beschränkt bleiben können.

## 5 Chemischer Energietransport

Sieht man vom mechanischen Transport chemischer Energieträger (z. B. Erdöl in Pipelines) ab, so besitzt der chemische Energietransport im technischen Bereich nur geringe Bedeutung. Für viele natürliche Vorgänge sind chemische Transporte allerdings konstitutiv. Beispielsweise sind sie für die Verteilung der fotosynthetisch produzierten Energie innerhalb der Pflanzen verantwortlich. Auch der Transport der Nährlösungen von den Wurzeln zu den teilweise sehr hoch gelegenen Pflanzenteilen erfolgt chemisch aufgrund des in Kap. V, 4.2 beschriebenen Verdunstungsmechanismus.

An dieser Stelle erwähnt sei noch die folgende Energietransportart, bei der man von Wärmetransport auf kaltem Wege sprechen könnte (BOLTENDAHL et al. 1980). Dabei wird einem Gemisch geeigneter Stoffe Wärme zugeführt und eine chemische Reaktion bewirkt, die zu einer energiereichen Substanz führt. Diese Substanz (z. B. gasförmig) wird nach den üblichen Verfahren zum Bestimmungsort transportiert und dort veranlaßt, in einer umgekehrten chemischen Reaktion möglichst die gesamte Wärme wieder freizugeben. Das zurückgewonnene energiearme Gemisch wird sodann zur Energiequelle zurückgeführt. Dieses Verfahren könnte insbesondere für den Transport von »Hochtemperaturwärme« Bedeutung erlangen, weil der Pipelinetransport aus technischen und Kostengründen nur für geringe Entfernungen (< 40 km) geeignet ist (ebd.).

## 6 Energietransport durch Strahlung

Im kosmischen Geschehen spielt diese häufig auch zum thermischen Energietransport gerechnete Energietransportart eine große Rolle. Beispielsweise gelangt die Sonnenenergie in Form von Strahlung zur Erde. Sieht man von speziellen Anwendungen (Informationsübertragung bei Rundfunk, Fernsehen u. ä.) ab, so hat diese Transportart energietechnisch bislang keine Bedeutung erlangen können. Allerdings gibt es Zukunftspläne, durch solarzellenbestückte Raumschiffe außerhalb der Erdatmosphäre eingesammelte Sonnenenergie in Form von Mikrowellen zur Erde zu »funken« und dort mit riesigen Antennen aufzufangen. Abgesehen von der Gefährlichkeit eines solchen Unternehmens ist es fraglich, ob die energetische Amortisation (vgl. Kap. IV, 2.3) in vernünftige Grenzen gebracht werden kann (siehe z. B. RUTH 1981).

## 7 Energiestromdichte

Ein Transport ist i. a. umso wirtschaftlicher zu realisieren, je dichter sich das jeweilige Transportgut »packen« läßt. Beispielsweise kann man erheblich mehr Kartons in einem Lastwagen befördern, wenn man sie zusammenfaltet. Analoge Argumente lassen sich für den Transport von Energie finden.

*Beispiel:* Würde man die von einer elektrischen Hochspannungsleitung von 2 cm Durchmesser transportierte Leistung von 500 MW in Form von bewegter Luft (die Strömungsgeschwindigkeit sei 100 km/h) befördern, so benötigte man dazu, von sonstigen Schwierigkeiten einmal abgesehen, eine Pipeline von über 200 m Durchmesser. Der dafür zu treibende Aufwand (z. B. an Material) wäre viel zu hoch.

Technische Energietransporte sind i. a. umso effektiver, je mehr Leistung  $P$  durch eine Flächeneinheit  $A$ , bzw. bei je höherer Geschwindigkeit  $v$  ein Ener-

Tab. 4: Energiestromdichte einiger Energieträger (nach Gl. 36).

Energieträger	Energiestromdichte $S$ [kW/m <sup>2</sup> ]
Wind ( $v = 50$ km/h)	1,7
Wellen ( $v = 36$ km/h)	5,0
Sonnenlicht (direkte Strahlung, Erdoberfläche)	1,0
220-kV-Hochspannungsleitung	$600,0 \times 10^6$
Braunkohleförderband ( $v = 20$ km/h)	$100,0 \times 10^6$
Erdgaspipeline (UdSSR-Westeuropa; $v = 430$ m/s)	$14,8 \times 10^6$
Welle eines 300 MW-Generators	$0,6 \times 10^6$

gieträger möglichst hoher Energiedichte  $D$  (Energie  $E$  pro Volumen  $V$ ) transportiert wird, d. h. je größer die Energiestromdichte

$$S = P/A = D \cdot v \quad (36)$$

ist.

Diese Größe  $S$  erlaubt in gewissem Umfang, verschiedene Energietransporte hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit zu vergleichen. So ist einer der Gründe dafür, daß manche Energieträger (z. B. Sonnenlicht, Wind) und manche Energieumwandlungen (z. B. Energiedirektumwandlung in Brennstoffzellen, Energiegewinnung mittels Solarzellen) heute noch nicht allgemein wirtschaftlich sind, in ihrer geringen Energiestromdichte zu sehen.

## 8 Energietransportverluste

Da jeder energetische Vorgang, so auch der Energietransport, von einer je spezifischen Energieentwertung begleitet ist, muß bei der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit verschiedener Transportarten neben der Energiestromdichte der jeweilige Energieverlust aufgrund der Energieentwertung berücksichtigt werden. Diese schlägt insbesondere bei Transportarten über längere Entfernungen stark zu Buche. Es zeigt sich, daß solche Transporte, die mit einer geringen Energiestromdichte verbunden sind, i. a. die größten relativen Energieverluste aufweisen. Handelt es sich bei den Energieträgern um Energie speichernde Substanzen wie Kohle, Öl und Gas, so äußern sich diese Verluste in den Transportkosten, die – wie für andere Güter auch – durch die pro Massen- und Entfernungseinheit aufzubringende Energie (kJ/t/km) gemessen werden. Denn die Energiespeicher selbst erleiden während des Transports i. a. keine Veränderung.

Tab. 5: Transportkosten in kJ/t/km und als rel. Verlust/km, d. h. als Verhältnis von verbrauchter zu transportierter Energie (FRICKE 1981, S. 287 und S. 307).

Transportart	Transportkosten	
	kJ/t/km	rel. Verlust/km
Öltanker (200 000 BRT)	42	$1 \times 10^{-6}$
Öl-Pipeline	140	$3 \times 10^{-6}$
Eisenbahn (Öl)	1440	$3 \times 10^{-5}$
Lastkraftwagen (Öl)	7200	$1,7 \times 10^{-4}$
Hochspannungsleitung (110 KV, 50 MW)	–	$2 \times 10^{-4}$

## VII. Energiespeicherung

Streng genommen ist jeder Körper ein Energiespeicher. Die meisten von ihnen sind allerdings insofern unbrauchbar, als sie im Gleichgewicht mit ihrer Umgebung stehen und daher keine wertvolle Energie, Exergie (vgl. Kap. III, 2.2), mehr besitzen. Aus diesem Grund wollen wir im folgenden nur dann von Energiespeichern sprechen, wenn die im jeweiligen Körper enthaltene Energie nicht völlig wertlos ist, sondern ein gewisses Maß an Exergie enthält und der Körper diese auch (zur Erfüllung bestimmter Hilfsfunktionen) hinreichend lange bei sich zu halten vermag. Hinsichtlich des Werts der gespeicherten Energie wollen wir zwei Klassen von Speichern unterscheiden.

1. *reine Exergiespeicher*: Dazu wollen wir neben den mechanischen und elektrischen Energiespeichern auch die chemischen Speicher zählen, obwohl die chemische Energie heute noch überwiegend über den mit erheblicher Energieentwertung verbundenen Umweg der thermischen Energie in die gewünschte Form gebracht wird (z. B. Erzeugung von elektrischer Energie im Wärmekraftwerk).

2. *thermische Energiespeicher*: In ihnen ist die Energie thermisch, also in weniger wertvoller Form, gespeichert. Je nach der Temperatur, bei der die Energie abgegeben wird, besitzt sie einen mehr oder weniger großen Anteil an Exergie.

Ein weiteres Gütekriterium für Energiespeicher ist die Dichte, mit der die Energie  $E$  in einem bestimmten Volumen  $V$ ,

$$D_v = E/V \quad (37)$$

oder »in« einer bestimmten Masse  $m$ ,

$$D_m = E/m \quad (38)$$

untergebracht werden kann.

Bei einer gegebenen Speicherart wachsen nämlich mit der Menge der zu speichernden Energie i. a. auch die Materialkosten, so daß eine große Klasse von Speichern, die bei kleinen Energiemengen gute Dienste leisten, wie Batterien, Akkumulatoren, Federwerke (z. B. bei Uhren), Thermosflaschen usw., bei größeren Energiemengen sich als viel zu teuer erweisen.

*Beispiel*: Wollte man die in einer normalen Jahresration Heizöl (4000 l/3500 kg) gespeicherte Energie in Bleiakkumulatoren unterbringen, so benötigte man dazu etwa 1340 t Blei, eine Menge, die nicht nur äußerst kostspielig, sondern auch wohl kaum in einem gewöhnlichen Keller unterzubringen wäre.

# 1 Chemische Energiespeicher

## 1.1 Fossile Bioenergiespeicher

Die fossilen Energieträger Kohle, Öl, Erdgas sind besonders gute Energiespeicher. Ihrer Haltbarkeit verdanken wir, daß sie seit ihrer Entstehung vor Millionen von Jahren bis heute »überlebt« haben.

Der relativ hohen Energiedichte, mit der der ansonsten so flüchtige Sonnenschein hier komprimiert wurde, verdanken wir die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten der fossilen Brennstoffe, die letztlich als Basis für die gesamte Industrialisierung angesehen werden muß. Die Industrialisierung hat aber auch mit sich gebracht, daß diese Spardose der Sonne mit wachsender Geschwindigkeit geplündert wird, so daß der Zeitpunkt, da uns Öl, Kohle und Gas nicht mehr

Tab. 6: Energiedichte einiger typischer Energiespeicher.

Energiespeicher (Energieart)	Energiedichte	
	[kJ/kg]	[MJ/m <sup>3</sup> ]
<i>Chemisch:</i>		
Erdöl	42 000	37 000
Kohle	32 000	42 000
Holz (trocken)	15 000	4 500
Methanol	21 000	17 000
Wasserstoff gasförmig	120 000	10
flüssig	120 000	8 700
Batterien, z. B.		
Bleiakku,	40-130	100-900
fortgeschrittene Typen	200-1 000	100-300
Uran 235	$7 \times 10^{10}$	$1 \times 10^{12}$
<i>Mechanisch:</i>		
hochgepumptes Wasser, z. B.	1	1
h = 100 m		
Preßluft, z. B. Druck = 30 bar	4	3
Schwungräder	300-3 000	25-125
Wind, z. B. v = 50 km/h	0,1	0,0001
strömendes Wasser,	0,015	0,015
z. B. v = 20 km/h		
<i>Elektrisch:</i>		
Kondensator		2
Supraleitende Spule		100
<i>Thermisch:</i>		
Wasser, z. B. $\Delta T = 70 \text{ K}$	300	300
Sonnenlicht in Erdhöhe		$3 \times 10^{-6}$

zur Verfügung stehen, abzusehen ist. Bisher gefundene Alternativen sind entweder auch begrenzt und sicherheitstechnisch umstritten (z. B. Kernenergie aus Uran), oder ihre Gewinnung und Aufbewahrung bereitet große Schwierigkeiten. Letztere Einschränkung gilt insbesondere für jene regenerativen, auf die Aktivität der Sonne beruhenden Energieträger bzw. -ströme, die zwar absolut gesehen in ausreichender Menge vorhanden sind (siehe Kap. VIII, 2), im allgemeinen aber so flüchtig und launenhaft in Erscheinung treten, daß nach dem derzeitigen Stand der Technologie eine auf ihnen aufbauende Energieversorgung der Menschen vergleichbar wäre dem Versuch, die Wasserversorgung der Menschen durch ein Anzapfen der Luftfeuchtigkeit sicherzustellen.

### *1.2 Aktuelle Bioenergiespeicher*

Lebende Biomasse besitzt zwar ähnlich gute Speicherqualitäten wie die fossile. Wie wir in Kap. VIII, 2.4.4 ausgeführt haben, ist ihre großtechnische Gewinnung jedoch verhältnismäßig aufwendig und angesichts der katastrophalen Ernährungssituation in der dritten Welt problematisch.

### *1.3 Wasserstoff als Energiespeicher*

Aussichtsreich scheint indessen die sog. *Wasserstofftechnologie* oder *Wasserstoffökonomie* (BOCKRIS et al. 1980). Im Prinzip geht es darum, Sonnenenergie in dem äußerst kompakten Speicher Wasserstoff unterzubringen. Jemand der einmal die Heftigkeit einer Knallgasreaktion erlebt hat, bei der Wasserstoffgas  $H_2$  mit Sauerstoff  $O_2$  zu Wasser verbrennt, gewinnt einen Eindruck davon, daß im  $H_2$ -Gas das Dreifache an Energie gespeichert ist als im Benzin, nämlich 124 MJ/kg. Da dieser Prozeß, bei dem hochwertige chemische Energie in Wärme umgesetzt wird, mit relativ starker Energieentwertung einhergeht, läßt er sich auch nur unter Einsatz hochwertiger Energie zurückspulen. Wasser kann mit Hilfe von elektrischer Energie (Elektrolyse) in Sauerstoff und Wasserstoff gespalten werden (siehe Kap. V, 14).

Wenn die Sonnenenergie aber zunächst in elektrische Energie aufgewertet werden muß, um im Wasserstoff abgespeichert werden zu können, stellt sich die Frage, warum man dann die elektrische Energie nicht direkt in die elektrischen Leitungsnetze einspeist. Da sich die großtechnische Aufwertung von Sonnenenergie nur in Gebieten intensiver und gleichmäßiger Sonneneinstrahlung lohnt, etwa in den Wüstengebieten, also fernab von den Gebieten, in denen die Energie gebraucht wird, müßte die elektrische Energie teilweise über enorme Entfernungen transportiert werden, auf denen die Transportverluste zu groß wären.

Sieht man einmal von Sicherheitsproblemen ab, so wäre hingegen der Transport der Energie in Form von flüssigem Wasserstoff in Großtankern ähnlich günstig wie der Transport von Öl. Außerdem ließe sich elektrische Energie nur an Sonnentagen produzieren und dann auch nur in der Menge, die in dem Moment gerade gebraucht wird. Um den Umweg über die elektrische Energie zu vermeiden, werden in jüngster Zeit andere Verfahren zur Wasserspaltung untersucht: Vor allem der fotolytischen Zerlegung des Wassers mit Hilfe des Lichts und der thermischen Zerlegung von Wasser unter Zuhilfenahme von Katalysatoren werden einige Zukunftschancen eingeräumt, obwohl vorerst die Elektrolyse allen anderen Verfahren hinsichtlich Kosten und Effizienz überlegen ist (SÖRENSEN 1979, S. 499).

## 1.4 Batterien

Schließlich seien noch chemische Energiespeicher genannt, die so gut wie keine großtechnische Bedeutung besitzen, aus dem »energetischen« Alltag aber nicht mehr wegzudenken sind: die Batterien. Neben den nur einmal zu verwendenden Batterien (für die Energieversorgung von Taschenlampen, Kofferradios usw.) spielen die wiederaufladbaren Typen, insbesondere der Bleiakкумуляtor, der heute in jedem Kraftfahrzeug als Energiespeicher für die elektrischen Einrichtungen vorhanden ist, eine wichtige Rolle.

In einem Bleiakku können 40–130 kJ/kg chemisch abgespeichert werden. Der Wirkungsgrad des Lade- und Entladevorgangs beträgt 70–80%. Verglichen mit anderen Speichern (siehe Tabelle 11) ist dies äußerst unbefriedigend. In den letzten Jahren sind daher eine Vielzahl weiterer Batterietypen entwickelt worden, die eine Energiedichte von 200–1000 kJ/kg aufweisen. Erwähnt sei hier nur der Natrium/Schwefel-Akku (500 kJ/kg, 100 W/kg), von dem z. B. angenommen wird, daß er zu einer weiteren Verbreitung des Elektroautos führen könnte (vgl. z. B. BAIER 1981).

## 2 Mechanische Energiespeicher

### 2.1 Lageenergiespeicher

Mechanisch läßt sich Energie auf mehrere Weisen speichern. Seit langem bekannt ist die Speicherung von Energie durch Anheben von Materie, die dadurch eine höhere potentielle Energie erlangt. Beispielsweise werden ältere Wanduhren durch hochgezogene Gewichtsstücke mit Energie versorgt, eine Möglichkeit, von der heute immer weniger Gebrauch gemacht wird. Großtech-

nisch spielt diese Art der Energiespeicherung jedoch nach wie vor eine wichtige Rolle: In Wasserkraftwerken wird die Energie aufgestauten Wassers zur Erzeugung elektrischer Energie benutzt. Obwohl in den Industrienationen die Wasserkraftnutzung nur eine untergeordnete Rolle spielt, gewinnen Wasserspeicher in der elektrischen Energieversorgung zunehmende Bedeutung und zwar als »Energiepuffer«. Da es i. a. unökonomisch ist, Wärmekraftwerke dem zum Teil drastisch schwankenden Bedarf an elektrischer Energie durch Abschalten bzw. Zuschalten von Kraftwerksblöcken anzupassen, nutzt man teilweise überschüssige Energie zu Zeiten geringen Bedarfs, um Wasser in höher gelegene Becken zu pumpen, welches zu Zeiten des Spitzenbedarfs zum Betreiben zusätzlicher Turbinen herangezogen werden kann (Pumpspeicherkraftwerk).

*Beispiel:* Hat man ein Becken in  $h = 100$  m Höhe mit einem Fassungsvermögen von  $500\,000\text{ m}^3$ , so läßt sich (bei Vernachlässigung der Absenkung des Wasserspiegels) daraus eine mechanische Energie von

$$W = m \cdot g \cdot h = 500\,000\text{ t} \cdot 10\text{ m/s}^2 \cdot 100\text{ m} = 500\,000\text{ MJ}$$

gewinnen. Dem entspricht eine Energiedichte

$$D_v = 1\text{ MJ/m}^3 \text{ bzw. } D_m = 1\text{ kJ/kg.}$$

Würde man damit einen 100 MW-Generator betreiben, so könnte man bei einem Wirkungsgrad von 90% fast  $1\frac{1}{2}$  Stunden lang eine Leistung von 100 MW ins Netz einspeisen. Da für Pumpspeicherwerke meist nicht die geographischen Voraussetzungen existieren, werden weitere Möglichkeiten zur »Leistungsglättung« erwogen, z. B. Druckluftspeicher.

## 2.2 Druckluftspeicher

Durch Zusammenpressen von Luft läßt sich ähnlich wie in einer elastischen Feder Energie speichern. Ein allseits bekannter Druckluftspeicher dieser Art ist ein aufgepumpter Autoreifen, obwohl der meist für andere Zwecke gebraucht wird.

*Beispiel:* Mit der aus einem solchen Reifen ausströmenden Luft ließe sich beispielsweise eine Modeldampfmaschine betreiben. Wie man leicht nachrechnen kann, lassen sich darin normalerweise nur etwa 0,5 kJ unterbringen.

Für großtechnische Anwendungen ist man auf große Volumina und Drücke angewiesen. Ausgelaugte Salzlager erfüllen zuweilen diese Voraussetzungen.

*Beispiel:* Betrachtet man ein Volumen  $V = 100\,000\text{ m}^3$  und einen Druck  $p = 30\text{ bar}$ , so läßt sich die untere Grenze der auf diese Weise speicherbaren Energie leicht abschätzen:

$$W = p \cdot V = 300\,000\text{ MJ},$$

entsprechend einer Energiedichte von  $D_v = 3\text{ MJ/m}^3$  bzw.  $D_m = 4\text{ kJ/kg}$ . In Wirklichkeit ist die speicherbare Energiemenge noch größer, weil bei derartig hohen Drücken hohe Temperaturen (hier: einige  $100^\circ\text{C}$ ) auftreten und damit neben dem elastischen zusätzlich ein thermisches Speicherfach eröffnen. Allerdings geht insbesondere dann, wenn die Speicherzeiten groß sind, Energie durch thermische Verluste verloren. Die obige Abschätzung gilt für den Fall des dadurch bedingten Temperatenausgleichs mit der Umgebung. (Eine ausführliche quantitative Beschreibung des Druckspeichers findet man z. B. bei FRICKE et al. 1981, S. 420 ff.).

### 2.3 Bewegungsenergiespeicher

Jeder bewegte Körper ist im Prinzip ein Speicher *kinetischer* Energie.

*Beispiel:* In einem mit einer Geschwindigkeit  $v = 100\text{ km/h}$  fahrenden,  $m = 1000\text{ kg}$  schweren Kraftfahrzeug ist eine Bewegungsenergie von

$$W_{\text{kin}} = \frac{m}{2} v^2 = 386\text{ kJ}$$

enthalten.

Abgesehen davon, daß auf diese Weise nur sehr wenig Energie pro Masse unterzubringen ist, wäre ein Auto als Energiespeicher vergleichbar mit einem durchlöcherten Eimer als Wasserspeicher. So wie man im Falle des defekten Eimers ständig Wasser nachfüllen muß, um einen bestimmten Füllstand aufrechtzuerhalten, muß dem Auto ständig Energie zugeführt werden, um es auf einer bestimmten Geschwindigkeit bzw. kinetischen Energie zu halten. Bei bewegtem Wasser und bewegter Luft (Wind) kann es trotz ähnlich großer Verluste (Reibung) dank der kostenlosen Aufladung durch die Sonne (vgl. Kap. VIII, 2.4) dennoch sinnvoll sein, dieses Energiereservoir anzuzapfen.

*Beispiel:* Der Abbremsung eines Luftstroms vom Querschnitt  $A = 50\text{ m}^2$  von  $v_1 = 10\text{ m/s}$  auf  $v_2 = 5\text{ m/s}$  entspricht eine Leistungsabgabe von

$$P_{\text{Wind}} = \frac{1}{2} \rho A (v_1^3 - v_2^3) = 28\text{ kW}.$$

( $\rho = 1,29\text{ kg/m}^3$  ist die Dichte der Luft) (siehe auch Kap. V, 1.2 und VIII, 2.4.2).

*Schwungradspeicher:* Allerdings sind auch Wind und strömendes Wasser zur »Aufbewahrung« oder »Zwischenlagerung« von Energie im Sinne der oben erwähnten energietechnischen Intentionen genauso ungeeignet wie das fahrende Auto. Umso erstaunter kann man sein, daß auf der Stelle bewegte, sich drehende Körper, sogenannte Schwungräder, sehr wohl zur Energiespeicherung taugen. Früher benutzte man bei Dampfmaschinen große Schwungräder zur »Leistungsglättung« der nur zyklisch entstehenden mechanischen Energie. Auch heute noch sind Schwungräder aus ähnlichen Gründen in vielen Maschinen insbesondere in Automotoren vorhanden. Als Vorrichtungen zur großtechnischen Energiespeicherung sind sie allerdings erst in jüngster Zeit aktuell geworden, nachdem es gelang, Materialien zu fabrizieren, die hohe Geschwindigkeiten »aushalten«.

*Beispiel:* Bringt man ein Schwungrad einer Masse von  $m = 200 \text{ t}$  und einem Radius von  $r = 2,25 \text{ m}$  auf eine Drehzahl von  $v = 60 \text{ s}^{-1}$ , so läßt sich auf diese Weise eine Energie von

$$W_{\text{rot}} = \frac{1}{2} I \omega^2 = \frac{1}{4} r^2 m \cdot 4\pi^2 \cdot v^2 = 36\,000 \text{ MJ}$$

auf einer Fläche von etwa  $36 \text{ m}^2$  (POST et al. 1973, S. 22) speichern. (Hier wurde der Einfachheit halber die Form einer zylindrischen Scheibe mit dem Trägheitsmoment  $I = \frac{1}{2} m r^2$  zugrunde gelegt.) Dem entspricht eine Energiedichte von  $180 \text{ kJ/kg}$ . Ein  $100 \text{ m}$  hochliegender  $10 \text{ m}$  tiefer Speichersee würde dafür eine Fläche von  $36\,000 \text{ m}^2$  beanspruchen. Durch Zusammenschaltung mehrerer solcher Einheiten ließe sich die Speicherkapazität weiter vergrößern, womit Schwungräder unabhängig von geographischen Bedingungen ideale Energiepuffer darstellten.

Als realistisches Nahziel gelten Schwungräder mit einer Energiedichte von bis zu  $400 \text{ kJ/kg}$ . Um die Energieverluste in vernünftigen Grenzen zu halten und möglichst hohe Speicherzeiten zu erhalten, müssen die Schwungräder in einem luftverdünnten Gehäuse untergebracht werden.

### 3 Elektrische Energiespeicher

Elektrische Energie läßt sich direkt in Kondensatoren und Spulen speichern. Während die Speicherung im Kondensator über längere Zeiten möglich ist, gelingt dieses in Spulen nur mit Hilfe der Supraleitung. Beide Speicher haben allerdings außer bei einigen speziellen Anwendungen keine wirtschaftliche Bedeutung erlangen können.

## 4 Thermische Energiespeicher

Der Bedarf an Niedertemperaturwärme, also Wärme, die bei einer Temperatur unter 100 °C abgegeben wird, macht etwa ein Drittel des Gesamtenergieverbrauchs in der BRD aus. Er fiel noch um ein beträchtliches höher aus, wenn nicht im Sommer viele Heizungsaufgaben von der Sonne übernommen würden. Könnte man zumindest einen Teil des Überschusses an thermischer Energie vom Sommer in den Winter hinüberretten, so fiel unsere Heizkostenrechnung sehr viel geringer aus. Dadurch wird auf die Bedeutung der Speicherung thermischer Energie verwiesen.

### 4.1 »Fühlbare Wärme«

Die einfachste Möglichkeit, Energie thermisch zu speichern, besteht darin, einen Körper zu erwärmen und ihm zu gegebener Zeit diese Energie wieder zu entziehen, eine Methode, die bei der Wärmflasche, dem Kachelofen usw. seit langem praktiziert wird. Dabei eignen sich solche Körper besonders, die pro Temperaturerhöhung  $\Delta T$  und Masse  $m$  bzw. Volumen  $V$  möglichst viel Energie  $\Delta E$  aufzunehmen vermögen, also eine große Masse bzw. Volumen bezogene Wärmekapazität

$$c = \frac{\Delta E}{\Delta T} \cdot \frac{1}{m} \quad \text{bzw.} \quad c' = \frac{\Delta E}{\Delta T} \cdot \frac{1}{V}$$

besitzen. (Dabei handelt es sich vor allem um die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck, die sich allerdings bei Festkörpern und Flüssigkeiten meist kaum von der Wärmekapazität bei konstantem Volumen unterscheidet.) Es zeigt sich, daß Flüssigkeiten, insbesondere Wasser, gute Wärmespeicher darstellen. Zwar ließe sich in Festkörpern die Energiedichte dadurch erhöhen, daß man die Energie bei höherer Temperatur speicherte.

*Beispiel:* Man könnte die gleiche Energie, die 1 kg Wasser mit der Erwärmung von 20 auf 70 °C zugeführt wurde, auch in 1 kg Kupfer unterbringen, das von 20 auf 560 °C erwärmt wurde.

Der Nachteil ist jedoch, daß die Abkühlung und damit die Energieverlustrate mit der Temperatur zunimmt. Aber selbst wenn man an aufwendige Isoliermaßnahmen denkt, kommt diese Hochtemperaturspeicherung meist deshalb nicht in Frage, weil es sich bei der zu speichernden Energie vor allem um weniger wertvolle »Niedertemperaturwärme« handelt, die man für einen entsprechend weniger wertvollen Zweck (z. B. Raumheizung) ohne aufwendige Energieauf- und Energieentwertungen aufbewahren möchte.

*Beispiel:* Ein würfelförmiger mit Wasser gefüllter Behälter von 6,70 m Kantenlänge, der im Sommer (z. B.) durch Sonnenkollektoren auf 50°C aufgeheizt wird, vermag bei einer Abkühlung auf 5°C eine Energie von 56 500 MJ abzugeben. Dem entspricht eine Energie von etwa 1 500 l Heizöl. Die Wärmeverluste des Speichers und der Ölheizung dürften bei guter Isolierung etwa gleich sein. Zwar könnte der Speicher nur in Verbindung mit einer Niedertemperaturheizung und einer Wärmepumpe benutzt werden, um genügend hohe Heiztemperaturen während der gesamten Heizzeit sicherzustellen; das Beispiel zeigt aber, daß der Gedanke nicht abwegig ist, auf diese Weise einen Teil der Sonnenwärme in den Winter hinüberzuretten. Ein doppelt verglaster Sonnenkollektor von 40 m<sup>2</sup> Fläche wäre in der Lage, diesen Speicher innerhalb des Sommerhalbjahres aufzufüllen.

Erwähnt sei hier noch ein Speicher »fühlbarer Wärme«, der sich aufgrund eines äußerst geschickten Mechanismus' die Sonnenenergie selbst einfängt und auch die Isolationsproblematik in hervorragender Weise löst: der Sonnenteich. Die Idee dazu stammt aus der Natur selbst. Sie erscheint verwirklicht in einigen Salzseen (z. B. in Ungarn), bei denen durch einmündende Bäche die tiefere Salzwasserschicht durch eine Süßwasserschicht überlagert wird. Das Salzwasser ist so schwer, daß auch eine relativ starke Erwärmung aufgrund der Aufnahme von Sonnenlicht nicht ausreicht, eine Konvektion in Gang zu setzen, die – wie in anderen Seen üblich – das warme Wasser zur Abkühlung an die Oberfläche beförderte. Da Wasser ein relativ guter Isolator ist, sorgt die obere Schicht sogar noch für eine gute Isolierung mit dem Erfolg, daß in diesen Seen auch im Winter Salzwassertemperaturen von 60°C gemessen werden. In Israel sind Solarteiche als künstliche Nachbildungen dieser Seen bereits in Betrieb, und es bestehen Pläne, bis zum Jahre 2000 etwa 40 Prozent des heutigen israelischen Ölverbrauchs durch Energie aus Solarteichen zu ersetzen (WEINBERGER 1964, RABL et al. 1975, HALLERMAYER 1981).

#### 4.2 »Latente Wärme«

Es ist bekannt, daß man zum Schmelzen von 1 kg Eis bei 0°C eine Energie von 335 kJ aufwenden muß, ohne eine Temperaturerhöhung zu bewirken. Da man diese Energie beim erneuten Gefrieren des Wassers in Eis von 0°C auf »Heller und Pfennig« zurückerhält, hat man es im Prinzip mit einem Energiespeicher zu tun.

In der Tat ist hiermit bereits die Idee der sog. Latentwärmespeicher umrissen: Die allgemein mit Phasenübergängen verbundenen Energieströmungen lassen sich unter bestimmten Bedingungen zu Energiespeicherungen verwenden. Man kennt heute Salze mit niedrigem Schmelzpunkt, die für strukturelle Phasenübergänge relativ große Wärmemengen benötigen und auf diese Weise

bis zu 50mal so viel Energie pro Masseneinheit speichern wie Bleiakkumulatoren und diese Energie nahezu hundertprozentig wieder abgeben können. (Der Bleiakkumulator hat demgegenüber nur einen Wirkungsgrad von etwa 66%.)

*Beispiel:* Man kann Glaubersalz ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ ) bei etwa  $32^\circ\text{C}$  durch Zufuhr von  $0,25 \text{ MJ/kg}$  relativ wertloser – aber etwa zur Niedertemperaturraumheizung geeigneter – Wärme und Wasser veranlassen, in eine andere Phase (wäßrige  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ -Lösung) überzugehen (SØRENSEN 1979, S. 495 ff.). Durch Abkühlen der Lösung unter  $32^\circ\text{C}$  kristallisiert das Glaubersalz wieder aus und gibt die gespeicherte Energie bei  $32^\circ\text{C}$  wieder als Wärme zurück.

Genannt sei hier noch ein Latentwärmespeichertyp, der eigentlich zu den Speichern hochwertiger Energie zählt, weil der energiespeichernde Phasenübergang bei relativ hohen Temperaturen stattfindet. Es handelt sich dabei um sogenannte eutektische Mischungen aus Fluoriden der Alkali- und Erdalkalimetalle. Beispielsweise kann die Substanz  $\text{NaF/MgF}_2$  etwa  $1,8 \text{ MJ/kg}$  ( $3900 \text{ MJ/m}^3$ ) aufnehmen (etwa  $0,6 \text{ MJ/kg}$  Schmelzwärme und  $1,2 \text{ MJ/kg}$  »fühlbare Wärme«), um von  $15^\circ\text{C}$  auf die Schmelztemperatur von  $745^\circ\text{C}$  gebracht zu werden (SCHRÖDER 1974, S. 156). Durch Abkühlung kann man diese Energie wieder zurückgewinnen. Wegen der Höhe der Schmelztemperatur ist die Energie wertvoll, enthält also einen relativ hohen Exergieanteil und ist daher im Prinzip geeignet, beispielsweise Kraftfahrzeuge (Stirlingmotor) zu betreiben.

## VIII. Energievorkommen

### 1. Kosmischer Ursprung der Energie

#### 1.1 Kosmische Energiequellen

Die im 1. Hauptsatz enthaltene Hoffnung allgegenwärtiger Energie wird durch die im 2. Hauptsatz zum Ausdruck gebrachte Erfahrung ständiger Energieentwertung zunichte gemacht. Demnach muß man sich fragen, weshalb es überhaupt noch wertvolle Energie gibt, weshalb viele Speicher hochwertiger Energie bis heute vor der Entwertung verschont geblieben sind.

Schuld daran ist die Tatsache, daß viele selbsttätige Prozesse an »Hindernissen hängenbleiben« oder Umwege durchlaufen, durch die die Energieentwertungen verzögert werden. Einige solcher Prozeßhemmungen sind uns vertraut. Beispielsweise beruhen die extrem guten Speichereigenschaften fossiler Energieträger darauf, daß sie erst durch Überwindung einer Reaktionsschwelle veranlaßt werden können, ihre Energie abzugeben.

Solche Hemmungen sind offenbar ganz allgemein Schuld daran, daß auch kosmisch gesehen die hochwertige Gravitationsenergie nach Jahrmilliarden kosmischer Evolution erst zu einem sehr kleinen Teil in weniger wertvolle Energiearten entwertet worden ist. Der Physiker DYSON (1971) geht so weit zu folgern, daß das Weltall nicht durch eine inhärente Stabilität überlebt, sondern daß die mit Energieentwertung einhergehenden Vorgänge durch verschiedene Hemmungen (hangups) in ihrem Ablauf teilweise beträchtlich verzögert werden. Solche Hemmungen sind u. a.

1. die *enorme Größe des Weltalls*. Die freie Fallzeit kollabierender Massen ist von der Größenordnung des Alters des Weltalls.

2. Die Hemmung der *Rotation* langlebiger Objekte wie Galaxien, Planetensysteme usw. Sie hindert ausgedehnte Objekte bzw. Teile derselben daran, sofort unter dem Einfluß der Gravitation in sich zusammenzustürzen. Dies ist ein Grund dafür, daß z. B. die Erde noch nicht in die Sonne gestürzt ist. Allerdings muß die Rotation auch nur als Verzögerung des Sturzes angesehen werden. Durch Reibungsvorgänge (z. B. Abbremsung der Erde durch die wie riesige Bremsbacken wirkenden »Wasserberge« der Gezeiten (Gezeitenreibung) wird auch die Rotationsenergie allmählich entwertet (siehe Kap. VIII, 3).

3. die *thermonukleare* Hemmung. Kommt es schließlich doch zum gravitativen Kollaps, so wird vielfach (z. B. bei unserer Sonne) durch die dabei auftretende extrem hohe Erwärmung eine Kernfusion gezündet. Die dabei freiwerdenden Energien erzeugen einen Gegendruck und halten den Kollaps solange auf, bis ein beträchtlicher Teil der i. a. leichten Substanzen thermonuklear verbrannt ist. Obwohl die auf diese Weise ausgestrahlten Energien wie-

derum nur einen Bruchteil der Gravitationsenergie des kollabierenden Sterns ausmachen, verdanken die Menschen im Falle der Sonne diesem »Sonnen-schein« fast alle bedeutenden Energiere Ressourcen (vgl. Kap. VIII, 2).

4. die Hemmung *der schwachen Wechselwirkung*. Ihr ist zu verdanken, daß die thermonukleare Reaktion der Sonne nicht explosionsartig erfolgt, sondern daß die auf der Sonne vorwiegend stattfindenden Proton-Proton-Reaktionen sehr viel langsamer ablaufen als die aus der Wasserstoffbombe bekannten Reaktionen der Isotopen Deuterium und Tritium. Sie sorgt aber nicht nur dafür, daß die Sonne nunmehr seit 5 Milliarden Jahren friedlich vor sich hinscheint, sondern auch dafür, daß die riesige Mengen Protonen enthaltenden Weltmeere kein Pulverfaß darstellen.

5. die *Transporthemmungen*. Sie beruhen darauf, daß der Transport von Energie vor allem durch Leitung und Strahlung vom heißen Sonneninnern zur kälteren Oberfläche Milliarden von Jahre zu ihrer Vollendung braucht. Im Falle der Erde wird dadurch außerdem bewirkt, daß sie flüssig und geologisch aktiv bleibt und sogar in Form von Erdwärme ein anzapfbares Energiereservoir darstellt (siehe Kap. VIII, 4).

6. die *Hemmung der Oberflächenspannung*. Sie hat dafür gesorgt, daß die spaltbaren Uran- und Thoriumkerne seit ihrer Entstehung bei der gravitationalen Kondensation der Erde überlebt haben und heute zum Leid und Wohl der Menschheit durch Überdehnung ihrer Oberfläche unter relativ energiereichem Knall zum Platzen gebracht werden können (siehe Kap. VIII, 5).

7. die *speziellen chemischen und biologischen Hemmungen*. Ihnen ist die Konservierung vor allem der fossilen Brennstoffe bis in unsere Tage (und ohne den Abbau durch den Menschen wohl noch länger) zu verdanken (siehe Kap. VIII, 2.4.4).

Die Hemmungen vermögen zwar nur einige Aspekte kosmischen Geschehens zu modellieren, sie machen aber verständlich, wieso trotz des Alters des Weltalls immer noch und wohl auch noch auf lange Zeit hinaus Energien zur Verfügung stehen, die noch nicht entwertet, d. h. letztlich in kosmische Hintergrundstrahlung einer Temperatur von einigen K umgewandelt worden sind.

## 1.2 Irdische Energiequellen

Aus kosmoenergetischer Sicht erweisen sich die Energiequellen der Erde als Abzweiger der oben beschriebenen Energieströme des Weltalls. Da die Erde aber nur einen winzigen Ausschnitt des Universums darstellt, treten die Energieströme auf der Erde wenn überhaupt mit einer ganz anderen Gewichtung auf.

Der dominierende Energiestrom ist die der Erde von der Sonne zugestrahlte Lichtenergie. Dazu sind auch die fossilen Energievorräte zu rechnen, die im

Gründe einen inzwischen fast aufgebrauchten Speicher in Jahrmillionen angesammelter Sonnenenergie darstellen. Darüber hinaus wird in geringem Maße die Rotationsenergie der Erde in Form von Gezeiten-, Wellen- und Windenergie und die geothermische Energie angezapft. Schließlich ist noch die Kernenergie zu nennen, die in relativ geringem Umfang auf der Erde vorzufinden ist, allerdings in jüngster Zeit in wachsendem Maße ausgebeutet wird. Fossile Energie und Kernenergie haben zur Zeit den größten Anteil an den Energiehaushalten der Industrienationen, und es wird allenthalben der Eindruck erweckt, als seien sie die einzigen ernstzunehmenden Energieresourcen. Tatsache ist aber, daß sie im Unterschied zu den übrigen Energiequellen nicht erneuerbar sind und in absehbarer Zeit erschöpft sein werden, wenn nicht vorher ein grundlegender Wandel im menschlichen »Energieverhalten«, eintritt.

Insbesondere die fossilen Energieträger sind viel zu schade, verbrannt zu werden. Sie stellen ein ideales Rohstoffeservoir für Kunststoffe, Arzneimittel u. a. Produkte dar. Außerdem sind vielfältige Umweltbelastungen in Rechnung zu stellen, deren Ausmaße noch nicht abzusehen sind. Letzteres gilt auch für die Kernenergie, deren weitere Verbreitung darüberhinaus die Gefahr eines Atomkrieges vergrößern könnte.

Im folgenden sollen die Energiepotentiale der wichtigsten für die Nutzung durch den Menschen in Betracht kommenden Energiequellen abgeschätzt werden. Eine Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten soll hier auf die physikalisch-technischen Aspekte beschränkt bleiben. Eine umfassende Bewertung hätte u. a. politische, wirtschaftliche und ethische Gesichtspunkte zu berücksichtigen.

## **2 Sonnenenergie**

### *2.1 Energetische Bedeutung des Sonnenscheins*

Sieht man einmal von Kernenergie und Erdwärme ab, so lebt die Menschheit auch heute wie eh und je von Sonnenenergie. Geändert hat sich seit etwa 150 Jahren nur, daß der Mensch seither seine Energie fast ausschließlich aus der »Spardose der Sonne«, den in Jahrmillionen produzierten fossilen Brennstoffen bezieht, während er bis dahin den reichlich fließenden Strom des Sonnenlichts direkt anzapfte. Obwohl eine Änderung des menschlichen Energieverhaltens als unumgänglich angesehen werden muß (weil Spardosen die unangenehme Eigenschaft haben, sehr schnell leer zu werden, zumindest dann, wenn die Entnahmen sehr viel größer sind als die Eingaben), ist sie nicht so leicht zu verwirklichen, wie es auf den ersten Blick erscheinen mag. Zwar ist der Sonnenschein ebenso wertvoll wie die in der fossilen Biomasse abgespeicherte

Sonnenenergie. Faßt man nämlich die von der Sonne ausgehende Wärmestrahlung als Wärme auf, so ist der Wärmemenge  $Q$  zumindest im Falle der direkten ungestörten Strahlung die Exergie<sup>12</sup>

$$\varepsilon \approx Q \cdot (1 - T_u/T_s) = 0,95 Q$$

zuzuordnen ( $T_s \approx 5800$  K ist die Temperatur der direkten Strahlung bzw. der Sonnenoberfläche,  $T_u \approx 300$  K die Umgebungstemperatur). Auch das diffuse weiße Sonnenlicht besitzt noch einen relativ hohen Wert. Aber die Sonnenstrahlung kommt sehr verdünnt auf der Erde an. Selbst im günstigsten Falle, beträgt die auf den Quadratmeter auftreffende Leistung nicht mehr als 1,3 kW, eine Leistung, die im Falle der Zuleitung zu einem elektrischen Heizstrahler durch einen Querschnitt von einigen Quadratmillimetern strömt.

Daher müßte das Sonnenlicht millionenfach und mehr konzentriert werden, um den energietechnischen Ansprüchen des Menschen gerecht zu werden. Das ist nur unter großem technischen Aufwand möglich, wodurch die energetische Amortisation (Kap. IV, 2.3) sehr schnell in Frage gestellt wird. Darüberhinaus ist der extremen Witterungsabhängigkeit der Sonnenenergie durch kurzfristig auffüllbare Energiespeicher Rechnung zu tragen. Die heute verfügbaren Speicher sind aber häufig noch nicht rentabel (Kap. VII.).

## 2.2 Physikalische Beschreibung der Sonnenstrahlung

Die quantitative Beschreibung der Wärmestrahlung ist dann relativ einfach, wenn man sich auf sogenannte »schwarze« Strahlung bezieht. Dabei handelt es sich um Strahlung, die von einem »schwarzen« Strahler ausgeht, d. h. einem Körper, der Strahlung aller Frequenzen aufzunehmen und abzugeben in der Lage ist. Die Energie der von einem solchen schwarzen Strahler ausgesandten Wärmestrahlung ist in einer Weise auf die einzelnen Frequenzen verteilt, die nicht von der speziellen Natur des Strahlers, sondern nur von seiner (absoluten) Temperatur  $T$  abhängt und durch die sogenannte PLANCKSche Strahlungsformel

$$E_\nu = \frac{2h\nu^3 A \Omega}{c^2} \cdot \frac{1}{(e^{h\nu/kT} - 1)} \quad (39)$$

<sup>12</sup> Eine genauere thermodynamische Analyse der Wärmestrahlung zeigt, daß  $\varepsilon = Q(1 - \frac{1}{2} T_u/T_s)$ , (vgl. z. B. SCHLICHTING et al. 1978).

beschrieben wird.  $E_\nu$  ist die Energie (pro Frequenzintervall  $(\nu, \nu + \delta\nu)$ ) eines Strahlungsbündels der Frequenz  $\nu$ , das den Raumwinkel  $\Omega^{13}$  und die Fläche  $A$  durchstrahlt;  $h$  und  $c$  bezeichnen die universellen Konstanten des PLANCK'schen Wirkungsquantums und der Lichtgeschwindigkeit. Wegen des eindeutigen Zusammenhangs zwischen der von der Strahlung transportierten Energie und der Temperatur des schwarzen Strahlers hat es sich eingebürgert, der Strahlung selbst diese Temperatur zuzuordnen und von der *Temperatur der Strahlung* zu sprechen (PLANCK 1923, S. 96). Aus Gl. (39) kann man i. w. durch Aufsummierung der Energien  $E_\nu$  für alle  $\nu$  (Integration über  $\nu$ ) die Energie pro Flächen- und Zeiteinheit (Energiestromdichte) der in den Raumwinkel  $\Omega$  emittierten Gesamtstrahlung bestimmen. Sie beträgt

$$S = \frac{1}{\pi} \cdot \Omega \sigma \cdot T^4 \quad (\text{Stefan-Boltzmann-Gesetz}), \quad (40)$$

$$\text{mit } \sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5,67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}.$$

*Ergänzung:* Um auch Strahlungen beschreiben zu können, die von einem beliebigen nichtschwarzen Körper ausgehen, oder Strahlungen, die zwar »schwarzen« Ursprungs sind, durch verschiedene Wechselwirkungen (z. B. Streuung mit anderen Körpern) aber aus dem Gleichgewicht gebracht wurden, hat Max PLANCK (ebd.) diese Überlegungen verallgemeinert. Indem er jedem einzelnen sich frei ausbreitenden Strahlungsbündel der Frequenz  $\nu$  über die Beziehung (39) formal eine Temperatur  $T_\nu$  zuordnete, konnte er die Gesamtstrahlung als »Mischung« von Einzelstrahlungen mit unterschiedlichen Temperaturen auffassen. *Die Temperatur  $T_\nu$  ist gleich der Temperatur, die der ausstrahlende Körper haben müßte, wenn er wie ein »schwarzer« Körper ausstrahlte.*

*Weiterführende Literatur:* PLANCK 1923.

### 2.3 Solare Energiebilanz

Obwohl die Sonne  $R = 149$  Mill. km von der Erde entfernt ist, übt der Bruchteil der Sonnenstrahlung, der die Erde trifft, einen entscheidenden Einfluß auf alles irdische Geschehen aus. Von Ballons und neuerdings von Satelliten aus hat man die Energiestromdichte  $S_e$  (extraterrestrische Solarkonstante) der Strahlung, die außerhalb der Atmosphäre auf eine senkrecht zur Verbindungslinie Erde-Sonne orientierte Einheitsfläche auftrifft, gemessen. Sie beträgt im Schnitt  $1,353 \text{ kW/m}^2$ . Insgesamt strömt daher auf die Erdhalbkugel eine Strahlungsleistung von  $P'_a = S_e \pi \cdot r_e^2 = 172,5 \times 10^{12} \text{ kW}$  ein ( $r_e = \text{Erdradius} \approx$

<sup>13</sup> Der Raumwinkel ist das in einer Pyramide eingeschlossene Raumgebiet mit z. B. der Sonnenscheibe als Grundfläche und der Spitze im jeweils betrachteten Punkt der Erdoberfläche gemessen in Steradian (sterad).

6370 km). Geht man davon aus, daß die Strahlung »schwarz« ist, so errechnet sich gemäß Gl. (39) eine effektive Strahlungstemperatur von

$$T_{\text{eff}} = \left( \frac{\pi}{\sigma \Omega} \right)^{1/4} \cdot S_e^{1/4} = 5762 \text{ K}, \quad (41)$$

wobei  $\Omega = \frac{\pi r^2}{R^2} = 0,68 \times 10^{-4}$  sterad der Raumwinkel ist, unter dem man die Sonnenscheibe von der Erde aus sieht, und  $r = 0,694$  Mill. km der Radius der Sonne. Berechnet man mit dieser Temperatur  $T_{\text{eff}}$  die entsprechende schwarze Energieverteilung (gestrichelte Linie in Abb. 11), so stellt man fest, daß dadurch die wahre (außerhalb der Erdatmosphäre gemessene) Energieverteilung der Sonnenstrahlung sehr gut wiedergegeben wird. Daraus schließt man, daß die Sonne sich tatsächlich wie ein nahezu schwarzer Strahler mit der effektiven Temperatur  $T_{\text{eff}}$  verhält. Schuld daran ist die äußerste Schicht der Sonne, die sogenannte Photosphäre, in der die Strahlung durch viele Streuvorgänge nahezu »ins Gleichgewicht« gebracht wird. Aus der extraterrestrischen Solarkonstanten  $S_e$  kann man auf die Energiestromdichte  $S_s$  am Ort der Sonne schließen, wenn man berücksichtigt, daß die Strahlung auf

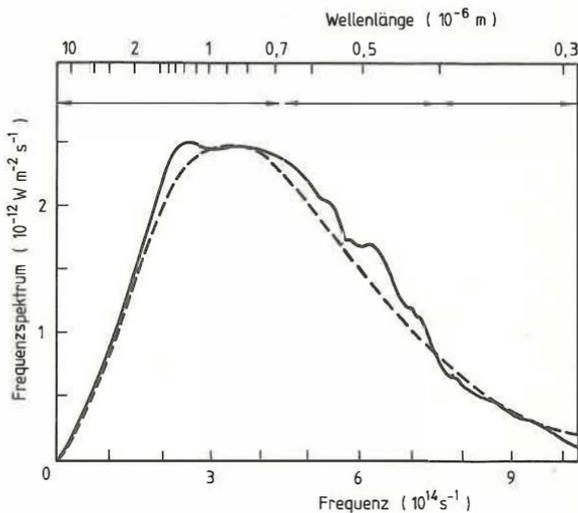


Abb. 11: Spektrale Verteilung der Sonnenenergie pro Flächen und Zeiteinheit aufgenommen in mittlerer Erdenfernung von der Sonne (durchgezogene Linie), sowie Verteilung von schwarzer Strahlung der Temperatur 5762 K wie sie sich aus dem PLANCKSchen Strahlungsgesetz (39) ergibt.

ihrem Weg von der Sonne zur Erde um den Faktor  $r^2/R^2$  verdünnt wird:

$$S_s = \frac{R^2}{r^2} S_e = 62400 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \quad (42)$$

Die Sonne strahlt demnach eine Gesamtleistung von

$$P_s = S_s \cdot 4\pi r^2 = 3,78 \times 10^{23} \text{ kW}$$

aus.

Gemäß der Einsteinschen Äquivalenz zwischen Energie  $E$  und Masse  $m$ ,  $E = mc^2$  (wobei  $c$  die Lichtgeschwindigkeit ist), bedeutet diese Energieabstrahlung einen Massenverlust von 4,2 Mill. t pro Sekunde. Der aus dem extrem kleinen Raumwinkel ( $\Omega = 0,68 \times 10^{-4}$  sterad) von der Erde absorbierte solare Energiestrom  $P_a = (1 - \alpha)P'_a$  ( $\alpha = 0,34$  berücksichtigt den i. w. von der Atmosphäre reflektierten Bruchteil des insgesamt auf die Atmosphäre auftreffenden Energiestroms  $P'_a$ ) wird, nachdem sich ein dynamisches Gleichgewicht zwischen Einstrahlung und Abstrahlung eingestellt hat, schließlich als terrestrischer Energiestrom  $P_e$  wieder emittiert; nun allerdings in den gesamten Raum,  $\Omega' = 4\pi$ .

Diesem globalen Streuvorgang entspricht eine Verteilung der Energie auf alle räumlichen Freiheitsgrade, so daß pro räumlichen Freiheitsgrad sehr viel weniger Energie zur Verfügung steht als vorher. Geht man davon aus, daß auch die Erde sich wie ein schwarzer Strahler verhält, (was im Bereich der langwelligen Erdstrahlung gemäß ROMER (1976, S. 382) näherungsweise der Fall ist), dann entspricht dieser enormen Energieverminderung pro Freiheits-

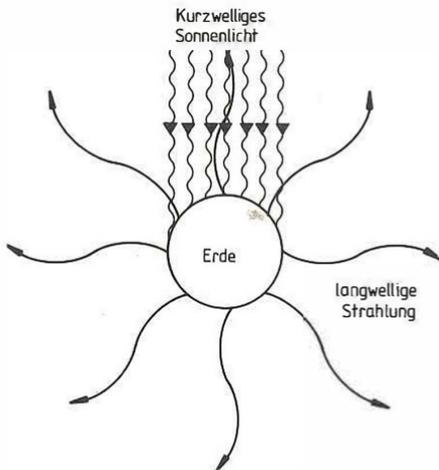


Abb. 12: Die Erde im dynamischen Gleichgewicht zwischen absorbierter (kurzwelliger) und emittierter (langwelliger) Strahlung.

grad gemäß Gl. (40) eine entsprechend starke Temperaturerniedrigung. In der Tat schafft es die »heiße« Sonnenstrahlung, die Erde und damit die von ihr ausgehende Erdstrahlung nur auf einer vergleichsweise niedrigen Temperatur von  $T_E \approx 283\text{--}293\text{ K}$  ( $\triangleq 10^\circ\text{--}20^\circ\text{C}$ ) zu halten. (Von Temperaturschwankungen u. ä. sei hier der Einfachheit halber abgesehen.) Dieser Temperatur entspricht eine »schwarze« Strahlung mit einem Maximum im langwelligen (infraroten-) Frequenzbereich, weshalb die Erde von sich aus kein sichtbares Licht aussendet. (Erst oberhalb von  $500^\circ\text{C}$  beginnen Körper allmählich zu glühen und sichtbares Licht auszusenden.) Dynamisches Gleichgewicht zwischen im Mittel von der Erde aufgenommenener ( $P_a$ ) und wieder ausgesendeter Strahlung ( $P_e$ ),

$$P_e = P_a, \quad (43)$$

und Erdtemperatur  $T_E$  hängen eng miteinander zusammen: Herrschte auf der Erde eine niedrigere Temperatur  $T_n < T_E$ , dann würde die Erde gemäß Gl. (40) und (43) weniger Energie ausstrahlen als sie von der Sonne erhielte. Das Ergebnis wäre eine Erwärmung. Diese dürfte allerdings nicht über  $T_E$  hinausgehen, denn bei einer höheren Temperatur  $T_h > T_E$  wäre die Ausstrahlung wiederum gemäß Gl. (40) und (43) größer als die Einstrahlung mit dem Effekt einer Abkühlung. Solange die von der Sonne empfangene Leistung  $P_a$  im Mittel konstant bleibt, wird demnach zwangsläufig die Erdtemperatur  $T_E$  »eingeregelt«.

*Ergänzung:* In Wirklichkeit sind die energetischen Vorgänge sehr viel komplexer, als es in dieser vereinfachten Beschreibung zum Ausdruck kommt. Dennoch wollen wir sie bei der folgenden Abschätzung der Erdtemperatur  $T_E$  zugrundelegen. Geht man davon aus, daß die der Sonne zugewandte Erdscheibe der Fläche  $\pi r_e^2$  aus dem solaren Energiestrom  $P_s$  den Strom

$$P_a = (1 - \alpha) P'_a = (1 - \alpha) \pi r_e^2 \Omega \frac{\sigma}{\pi} T_{\text{eff}}^4 \quad (44)$$

abzuzweigen vermag, dann tritt durch dieselbe Fläche der terrestrische Energiestrom

$$P_e = \pi r_e^2 \Omega' \cdot \frac{\sigma}{\pi} T_E^4. \quad (45)$$

Durch Gleichsetzen von Gl. (44) und (45) ergibt sich daraus die Erdtemperatur:

$$T_E = \left( \frac{1}{4} (1 - \alpha) \right)^{1/4} \cdot \left( \frac{r}{R} \right)^{1/2} \cdot T_{\text{eff}} \approx 251\text{ K}. \quad (46)$$

Trotz der sehr starken Vereinfachungen, die dieser Abschätzung zugrunde liegen (u. a. Vernachlässigung der Wechselwirkungen mit der Atmosphäre), wird die Größenordnung richtig erfaßt. Vor allem der sogenannte Treibhauseff-

fekt (siehe Kap. VIII, 2.4.3) sorgt für eine biologisches Leben auf der Erde ermöglichende Erhöhung der Durchschnittstemperatur.

*Weiterführende Literatur:* Unterrichtspraktische Anregungen zu diesem Kap. findet man z. B. bei BROCKMEYER (1979 a, 1979 b); EATON et al. (1977); OPPEGARD (1975); MÜLLER-ARNKE (1978); STURM (1979).

Die obigen Überlegungen haben gezeigt, daß die Erde näherungsweise pro Zeiteinheit genausoviel Energie abstrahlt wie sie von der Sonne empfängt. Die Strahlung und mit ihr die transportierte Energie werden jedoch bei diesem Vorgang qualitativ geändert: Aus der Sicht der Erde findet unter den hier zugrundegelegten Vereinfachungen (u. a. Annahme einer konstanten Erdtemperatur als Umgebungstemperatur  $T_U$ ) eine vollständige Energieentwertung statt, die sich äußerlich darin zeigt, daß wertvolles sichtbares Licht ankommt und wertlose unsichtbare Strahlung abgeht. Abgesehen von den Wüstengebieten der Erde wird diese globale Energieentwertung aber vielfältig genutzt: Zahlreiche (offene) Systeme wie Pflanzen, Flüsse, ja ganze Ökosysteme, welche – sich selbst überlassen – unter Entwertung der in ihnen enthaltenen Energie zerfallen müßten, werden mit Hilfe der Sonnenenergie aufgebaut und/oder am »Leben« gehalten. Indem diese Systeme nämlich direkt oder indirekt über verschlungene Umwege (siehe weiter unten) ständig wertvolle Sonnenenergie zu sich nehmen, sind sie in der Lage, mit der dadurch bedingten Energieaufwertung die permanente Energieentwertung (Abgabe von Energie an die Umgebung und von dort schließlich Ausstrahlung in den Weltraum) aufzuheben. Dieser Vorgang befindet sich natürlich in Übereinstimmung mit dem Energieentwertungsprinzip; denn der Energieaufwertung durch Aufnahme von Sonnenenergie entspricht eine mindestens gleichgroße Energieentwertung aufgrund der Abnahme von Sonnenenergie. Die Entwertung wird gleichsam verlagert, letztlich in die Sonne selbst, die ständig hochwertige Energie verliert. Auf der Beschreibungsebene der Prozesse entspricht diesen Energieaufwertungen u. a. die Rückspulung jener Vorgänge, deren selbsttätiger Ablauf für das Leben auf der Erde so wichtig ist.

Ablauf und Rückspulung jener lebenswichtigen Vorgänge zusammen stellen demnach einen Kreisprozeß bzw. Kreislauf dar, der im Unterschied zu einem endgültige Veränderungen in der Welt zurücklassenden linearen Prozeß durch ständige Wiederholbarkeit Stabilität und Dauer garantiert. Ähnlich wie ein Rad dadurch in Bewegung gehalten wird, daß die mit der selbsttätigen Verlangsamung der Drehbewegung einhergehende Energieentwertung durch Zufuhr hochwertiger Energie aufgehoben wird, werden die »Kreisläufe des Lebens« durch Zufuhr hochwertiger Sonnenenergie und Abgabe minderwertiger Wärme an die Umgebung angetrieben.

## 2.4 Solarbetriebene Kreisläufe der Erde

Im folgenden sollen einige jener solarbetriebenen Kreisläufe skizziert werden, die ihrerseits für die Energieversorgung des Menschen genutzt werden können. So ist beispielsweise der irdische Wasserkreislauf insofern energetisch interessant, als das sich in Flüssen sammelnde und zu den Meeren zurückfließende Regenwasser Wasserkraftwerke etwa zur »Erzeugung« elektrischer Energie betreiben könnte.

Dazu betrachten wir zunächst den Weg der Sonnenenergie von oberhalb der Erdatmosphäre bis zur Erdoberfläche und zurück an Hand von Abb. 13.

Die erste Spalte enthält die einfallende (kurzwellige) Sonnenenergie:  $P'_a = 172\,500$  TW (vgl. S. 108). Sie wird zu 29% bereits in der Atmosphäre und zu 5% von der Erdoberfläche, von Meeren, Flüssen und Seen (Hydrosphäre), insgesamt also zu 34% in den Weltraum zurückgeworfen. Diese sogenannte Albedo gibt der Erde von außerhalb (Raumfähre) aus gesehen ihr charakteristisches Aussehen. Die restlichen 66% der Sonnenenergie werden von der Erde und Atmosphäre absorbiert.

In der zweiten Spalte wurden die wesentlichen Energiespeicher eingezeichnet: potentielle Energie von Wasser in der Atmosphäre, latente Energie der Phasenumwandlungen, chemische Energie in aktueller und fossiler Biomasse, Kernenergie usw. Die meisten dieser Energiemengen sind in Materie gebunden und nehmen nicht an den ungestörten klimatischen Vorgängen teil.

Die dritte Spalte stellt die Speicherung in Form von thermischer Energie dar und die vierte die Speicherung in Form von Bewegungsenergie der allgemeinen Zirkulationen von Atmosphäre und Wasser. Weniger bedeutende Beiträge zur Energiebilanz wie Bewegungsenergie der driftenden Kontinente, Gezeiten der festen Erde, Bewegung des Grundwassers und der Tiere sowie die in der Biosphäre gespeicherte thermische Energie wurden nicht eigens aufgeführt. Die fünfte Spalte enthält die langwellige Rückstrahlung von der Erde. Ausgehend von der Voraussetzung, daß es sich hier um einen stationären Vorgang handelt, ist die Energiebilanz natürlich ausgeglichen. Deshalb spricht man auch zuweilen von einem »Energiekreislauf« (vgl. SØRENSEN 1979, S. 173 ff.). Dieser Ausdruck ist indessen mißverständlich, denn wenn man den abgehenden Energiestrom mit dem ankommenden »kurzschließen« würde, hätte man zwar einen Kreis, aber noch lange keinen Kreislauf. Weil der Energiestrom von selbst nur »bergab«, d. h. in Richtung abnehmenden Wertes läuft, hätte der Kurzschluß den absoluten Stillstand allen Geschehens zur Folge. Das hindert die mit dem solaren Energiestrom einhergehende Energieentwertung nicht daran, zahlreiche echte Kreisläufe am Laufen zu halten.

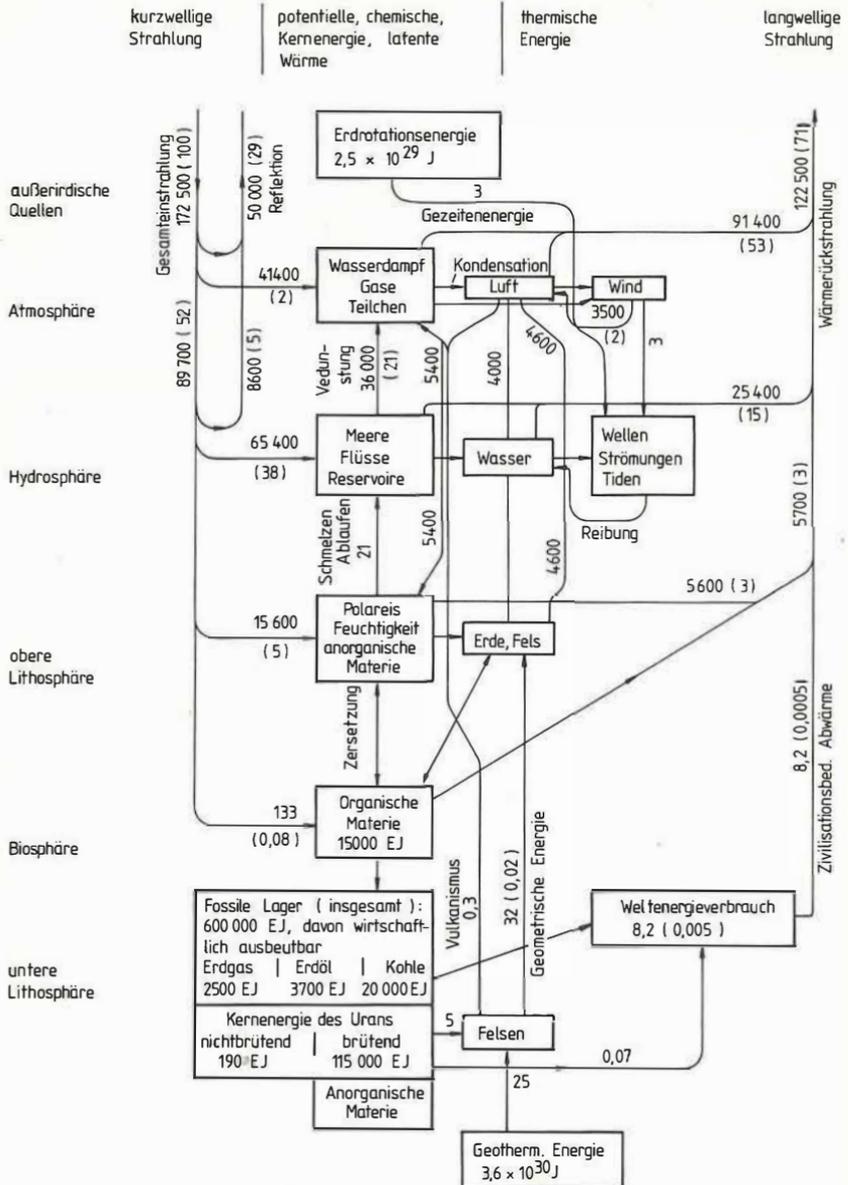


Abb. 13: Schematische Darstellung des Energiekreislaufs. Die Energieströme (Energie/Zeit) sind in TW ( $10^{12}$  W) angegeben. Zahlen in Klammern bezeichnen den prozentualen Anteil an der einfallenden Sonnenstrahlung von 172 500 TW (100%). Energiespeicher sind in EJ ( $10^{18}$  J) angegeben (basierend auf Daten von SØRENSEN 1979, S. 174; MICHELSEN 1980, S. 202).

### 2.4.1 Wasserkreislauf

Etwa 52% der Gesamtenergieeinstrahlung ( $P'_a$ ) erreicht die Erdoberfläche. Der größte Teil dieser Energiemenge, nämlich 38% von  $P'_a$  wird von Meeren, Seen und Flüssen absorbiert. Nur 9% von  $P'_a$  werden von der Landfläche der Erde (obere Lithosphäre) aufgenommen. Obwohl die Wasserfläche 70% der Erdoberfläche einnimmt, absorbiert sie viel mehr Energie als diesem Anteil entspräche. Das liegt vor allem daran, daß die durchschnittliche Albedo der Wasseroberfläche geringer ist als diejenige der Landflächen. Das Wasser der Erde wird mit einer Rate von 16,5 Mill.  $m^3/s$  verdunstet. Da man für 1 kg etwa 2470 kJ an thermischer Energie benötigt, ist damit eine Leistungsaufnahme von 40 800 TW verbunden; das ist mehr als die Hälfte der von den Wasserflächen der Erde aufgenommenen Energie. Der Rest geht i. w. in thermische Energie des Wassers über und wird als langwellige Strahlung schließlich in den Weltraum zurückgeschickt (Abb. 14). Das gleiche Schicksal ist auch der in der Verdunstungswärme des Wassers enthaltenen Energie vorbehalten, allerdings über einen für das Leben auf der Erde entscheidenden Umweg: Zunächst steigt der leichte Wasserdampf auf, gewinnt dadurch potentielle Energie und wird eventuell in andere Gebiete getrieben. Motor dieser Energieaufwertung ist natürlich wieder die Sonne. Wenn der sich i. a. in Wolken ansammelnde Wasserdampf schließlich Bedingungen vorfindet, die eine Kondensation möglich machen, wird die Verdunstungswärme wieder frei. Während die 13 Mill.  $m^3$  Wasser, die durchschnittlich pro Sekunde in Form von Regen o. ä. über dem Meer niedergehen, eine sofortige vollständige Entwertung der potentiellen Energie zur Folge haben, erfolgt die Entwertung der etwa 3,5 Mill.  $m^3$ , die pro Sekunde über dem Land niedergehen, zum Teil schrittweise über den Umweg der Bewegungsenergie von Fließgewässern, die schließlich ebenfalls ins Meer einmünden. Auf diese Weise wird der Kreislauf des Wassers geschlossen.

*Wasserströmungen:* Wegen des regional unterschiedlichen Einfalls von Sonnenstrahlen bilden sich im Meer Ausgleichsströmungen. Vor allem die starke Verdunstungsrate und die damit verbundene Erhöhung des Salzgehalts in heißen und trockenen Gegenden, Misch- und Temperatenausgleichsvorgänge zwischen verschiedenen Wasserschichten aber auch die Wechselwirkung mit der atmosphärischen Zirkulation bringen die Wasserströmungen hervor. Der



Abb. 14: Schematische Darstellung des »solarbetriebenen« Wasserkreislaufs.

Golfstrom, der Guinea-, Mozambique-, Brasilien- und Australische Strom sind Beispiele für solche Strömungen.

*Beispiel:* Die maximale Geschwindigkeit im Zentrum des Golfstroms beträgt  $v = 2 \text{ m/s}$ ; dem entspricht eine Energiedichte von  $\frac{1}{2} \rho v^2 = 2 \text{ kJ/m}^3$  und eine Energiestromdichte von  $\frac{1}{2} \rho v^3 = 4 \text{ kW/m}^2$ . Bei einer mittleren Breite von 50 km und einer Tiefe von 120 m ergibt sich ein Strömungsleistungspotential von 24 GW.

Das fließende Wasser in Flüssen und anderen Laufgewässern ist eine der ersten vom Menschen genutzten Energiequellen (Wasserkraft). Indem das Wasser mehr oder weniger starke Gefälle durchläuft, bevor es ins Meer einmündet, wird ständig Höhenenergie in Bewegungsenergie umgewandelt und normalerweise durch Reibung ungenutzt an die Umgebung abgegeben.

Eine Grobabschätzung des theoretischen Leistungspotentials des Laufwassers auf der Erde ergibt etwa 5 TW ( $5 \times 10^{12} \text{ W}$ ). Davon entfallen auf Asien 37%, auf Afrika 23%, auf Nordamerika 14%, auf Lateinamerika 13%, auf Europa 10% und auf die Bundesrepublik Deutschland nur 0,2%.

*Süßwasserproduktion durch Verdunstung:* Der Wasserkreislauf ist mit einem anderen Kreislauf eng verbunden: der Entmischung von Salz- und Süßwasser infolge der Verdunstung und die neuerliche Vermischung von Süßwasser und Salzwasser u. a. beim Einmünden der Flüsse in die Meere.

Da die Vermischung einen selbsttätigen Vorgang darstellt, ist es prinzipiell möglich, die damit verbundene Entwertung für Energieaufwertungen (Herstellung wertvoller Energie) heranzuziehen. In der Tat ist an entsprechende Nutzungsmöglichkeiten, z. B. mit Hilfe der Osmose, auch schon nachgedacht worden (siehe Kap. V, 4.1). Demnach ließe sich der Vermischungsvorgang bis zu einer Energieaufwertung von 2,4 J pro Sekunde und pro  $\text{m}^2$  Grenzfläche zwischen Süß- und Salzwasser ausnutzen.

#### 2.4.2 Atmosphärische Kreisläufe

Etwa 19% der einfallenden Sonnenstrahlung ( $P'_a$ ) wird direkt von der Atmosphäre aufgenommen. Mit dieser Energie und der Kondensationswärme des Wassers, (die etwa von gleicher Größenordnung ist), wird eine komplexe Maschinerie von Prozessen wie Entstehung von Temperatur- und Druckdifferenzen an der einen Stelle und der entsprechenden Ausgleichsvorgänge an einer anderen Stelle aufrechterhalten, die ihren sichtbarsten Ausdruck in Luftbewegungen und deren Wechselwirkungen mit der Erdoberfläche finden. Letzten Endes wird das Wetter weitgehend durch diese Vorgänge bestimmt (Einzelheiten siehe z. B. SØRENSEN 1979, S. 78 ff.).

*Windenergie:* Die Luftbewegungen äußern sich u. a. als Winde und Stürme. Obwohl sich in ihnen nur etwa 2% von  $P'_a$  niederschlagen, nämlich 3500 TW

und davon theoretisch wiederum nur 3%, also 105 TW, durch Windenergieanlagen (s. Kap. V, 1.2) genutzt werden könnten, handelt es sich um ein Leistungspotential vom rund 13fachen des derzeitigen Weltenergieverbrauchs. Allein für das Gebiet der Bundesrepublik, wo nutzbare Windgeschwindigkeiten von durchschnittlich mehr als 5 m/s (entsprechend Energiestromdichten von mehr als  $80 \text{ W/m}^2$ ) nur in den Küstengebieten auftreten, läßt sich (bei Erhöhung der Bodenreibung um 10%) ein Potential von 0,17 TW berechnen. Realistisch sind demgegenüber vielleicht 25000 MW, das sind etwa 80% der derzeitigen Stromerzeugung in der BRD. Die Ermittlung der Windenergiepotentiale erfolgt aufgrund örtlicher Windgeschwindigkeitsmessungen. Die aufgrund von Kostenanalysen ermittelten großtechnisch nutzbaren Windgebiete (Standardmeßhöhe 10 m) sind z. B. bei MATTHÖFER (1977, S. 67) angegeben.

*Wellenenergie:* Die für eine energetische Nutzung in Frage kommenden Windwellen entstehen durch die Einwirkung des Windes auf die Wasseroberfläche. Ihr Zustandekommen hängt stark von der Windgeschwindigkeit, der Winddauer, der Streichlänge des Windes über die Wasseroberfläche, der Wellenauflänge und der Wassertiefe ab. Durch die Nutzung der Wellenenergie an den Küsten gelingt es also indirekt, einen Teil der Bewegungsenergie des Seewindes anzuzapfen, was direkt, etwa mit Hilfe von Windmühlen, schwierig wäre. Die Größenordnung der gesamten in Wasserwellen gespeicherten Bewegungsenergie beträgt etwa 0,1% der gesamten Windenergie.

An der deutschen Nordseeküste werden pro Meter Wellenfront etwa 14 kW/m entwertet; vor den Britischen Inseln sind es sogar 50 kW/m. (FRICKE et al. 1979, S. 85. Eine einfache Modellrechnung zur Bestimmung der Wellenenergie aus Wellenlänge und Amplitude findet man ebd.).

Da die Installation entsprechender Energiegewinnungsanlagen wegen der relativ geringen Energiedichte sehr kostenaufwendig ist und eine ungünstige energetische Amortisation bedingt, sind Überlegungen angestellt worden, die Wellenenergie durch Interferenz zu konzentrieren. Dazu soll vor der Küste auf etwa 400 m Länge eine periodische Folge von Betonblocks gleichsam als Beugungsgitter verankert werden. Auf diese Weise können die durch Interferenz verstärkten Wellen Amplituden bis zu 30 m erreichen und durch geeignete Trichter in bis zu 100 m über dem Meeresspiegel liegende Reservoirs geführt werden.

#### 2.4.3 Exkurs: Die Atmosphäre als Treibhaus

In der Modellrechnung von Kap. VIII, 2.3, in der wir die Durchschnittstemperatur der Erde unter der Voraussetzung bestimmt haben, daß die Atmosphäre ohne »Netto«einfluß auf die energetische Bilanz sei, sind wir auf einem Wert von 251 K gekommen, der die wahre Durchschnittstemperatur der Erde von

290 K um 39 Grad unterschätzt. Würde man diese Abschätzung ernst nehmen, so müßte die Erde völlig vereist und verschneit sein (Zustand der »weißen Erde«). Die Albedo einer »weißen Erde« wäre aber mehr als doppelt so groß wie die tatsächliche und würde daher mehr als doppelt so viel der einfallenden Strahlung reflektieren. Die Folge wäre eine Temperaturabnahme um weitere 50 Grad auf etwa 200 K. Daß dem nicht so ist, verdanken wir dem Vorhandensein einer Atmosphäre, die wir in der früheren Abschätzung völlig außer Acht gelassen haben. Die Atmosphäre ist erfahrungsgemäß ziemlich durchsichtig für die einfallenden Sonnenstrahlen: Immerhin werden im Durchschnitt (d. h. über Zeiten der Bewölkung und anderer Bedeckungen gemittelt) 47% der Strahlung vom Erdboden absorbiert, nachdem insgesamt 34% reflektiert und nur 19% von der Atmosphäre aufgenommen wurden. Sie ist nicht mehr durchsichtig für die schließlich durch vielfältige Vorgänge im Erde-Atmosphäre-System auf Umgebungstemperatur abgewertete langwellige Wärmestrahlung, die in den Weltraum zurückfließt. Insbesondere Kohlendioxid, Wassertröpfchen in Wolken und Wasserdampf absorbieren langwellige Strahlung. Zwar kann auch die Atmosphäre die auf diese Weise zusätzlich aufgenommene Energie nicht behalten. Die absorbierte Wärme wird wieder ausgestrahlt. Allerdings wird sie sowohl nach oben von der Erde weg als auch nach unten zur Erde hin ausgestrahlt, so daß die Erdoberfläche die Hälfte der abgegebenen Energie »postwendend« zurückerhält, wodurch eine zusätzliche Erwärmung und damit Temperaturerhöhung erfolgt. Folglich wird die langwellige Strahlung von der Erde zur Atmosphäre erneut verstärkt usw., bis nach einer bestimmten Temperaturerhöhung ein stationäres Gleichgewicht eingestellt ist (siehe Abb. 15).

Diese Aufheizung wird »Treibhauseffekt« genannt, weil die Atmosphäre ähnlich wie die Scheiben eines Treibhauses wirkt: Diese lassen sichtbares Licht durch, verzögern aber den Wiederaustritt des im Treibhausinnern durch Streu-

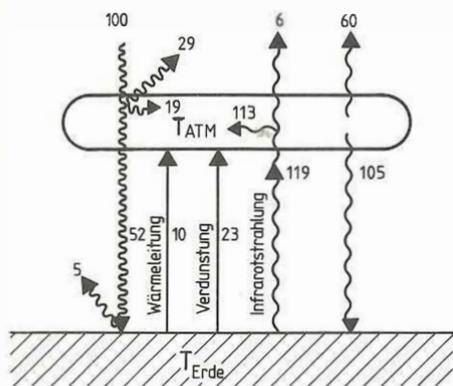


Abb. 15.: Schematische Darstellung des Treibhauseffekts. Die Zahlen geben die jeweiligen Anteile in Einheiten (Prozent) der einfallenden Strahlung  $P_0$  an.

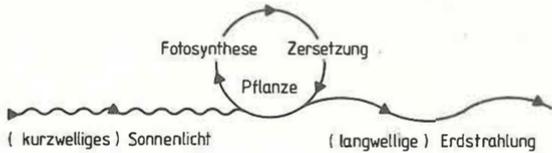


Abb. 16: Schematische Darstellung eines »solarbetriebenen« biologischen Kreislaufs (Entstehen und Vergehen von Pflanzen).

ung auf infrarote Strahlung abgewerteten Lichts. In Wirklichkeit spielt dieser Effekt in Treibhäusern eine untergeordnete Rolle.

#### 2.4.4 Biologische Kreisläufe

Die biologischen Kreisläufe sind eng miteinander verbunden und bedingen sich gegenseitig (siehe Abb. 16). Sie lassen sich aber insgesamt durch den Vorgang des Zerfalls von organischer Substanz unter Abgabe der in ihr gespeicherten chemischen Energie an die Umgebung (Energieentwertung) und den erneuten Aufbau von organischer Substanz unter Aufnahme hochwertiger Energie (Energieaufwertung) kennzeichnen. Eine Schlüsselstellung nimmt dabei jener Prozeß ein (Fotosynthese, siehe Kap. V, 15), mit dem es den grünen Blättern der Pflanzen gelingt, unter Aufnahme hochwertiger Sonnenenergie aus anorganischen Substanzen Biomaterie aufzubauen (Produzenten, siehe Abb. 17). Indem tierische Organismen (Konsumenten: Pflanzenfresser) diese Biomaterie als Nahrung zu sich nehmen und unter Aufnahme von Sauerstoff (Atmung) zersetzen, kommt man einerseits zum Ausgangspunkt zurück: Hochwertige

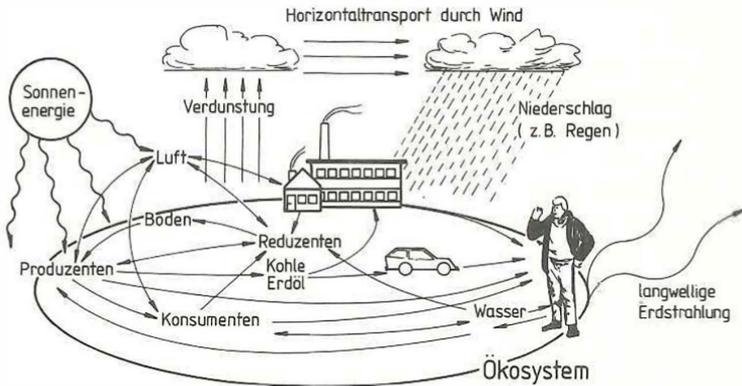


Abb. 17: Schematische Darstellung der Vernetzung »solarbetriebener« Kreisläufe mit dem industriellen Produktionssystem des Menschen.

chemische Energie wird verbraucht, und minderwertige Substanzen (u. a.  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) werden ausgeschieden: Der fotosynthetische Kreislauf ist geschlossen. Unter Aufnahme von hochwertiger Sonnenenergie können die ausgeschiedenen Substanzen erneut in pflanzliche Biomasse zurückverwandelt werden.

Die bei der Zersetzung (Verdauung usw.) freigesetzte hochwertige Energie wird andererseits beim Aufbau tierischer Substanz verwendet, die ihrerseits Konsumenten (Fleischfressern) als Nahrung dienen und damit einen weiteren biologischen Kreislauf begründen kann. Weitere Kreisläufe sind u. a. darin zu sehen, daß

- zerfallende Pflanzen und Tiere unter Einwirkung von Kleinstlebewesen (Reduzenten) zersetzt werden und als Nahrung erneut in pflanzliche Biomasse aufgehen können,
- die jeweilige Aufnahme aus der Atmosphäre und Abgabe in die Atmosphäre u. a. von Kohlendioxid und Sauerstoff sowohl den Aufbau und Zerfall und die Aufrechterhaltung der Lebensvorgänge von Pflanzen und Tieren begleiten.

Alle Kreisläufe zusammen stellen ein komplexes System dar, welches sich solange in einem dynamischen Gleichgewicht halten kann, wie die Eingriffe in dieses Regelsystem in Grenzen bleiben, insbesondere also einzelne Kreisläufe nicht endgültig zum Erliegen gebracht werden. Wie man sich anhand von Abb. 17 veranschaulichen kann, ist letzten Endes der Mensch und mit ihm sein industrielles Produktionssystem Teil dieses globalen Ökosystems. Beispielsweise bezieht der Mensch die zur Aufrechterhaltung seines industriellen Systems notwendigen hochwertigen Energien vor allem aus der fossilen Biomasse, die er in ähnlicher Weise nutzt wie ein tierischer Organismus Nahrungsmittel. Der Verbrauch von fossilen Brennstoffen hat jedoch mittlerweile ein Maß angenommen, das bei weitem die Entstehungsrate neuer fossiler Brennstoffe übersteigt, so daß dadurch eine Reihe von Kreisläufen gestört bzw. sogar außer Kraft gesetzt werden:

- Die fossile Biomaterie wird bald aufgebraucht sein.
- Der Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre nimmt stetig zu und könnte zu irreparablen klimatischen Auswirkungen führen.
- Die Abgabe von entwerteter Energie an die Umgebung nimmt ständig zu. Auch dadurch könnten u. a. klimatische Probleme entstehen.

Theoretisch wäre ein Aufhalten dieser Entwicklung nur dadurch möglich, daß man zur Kreislaufwirtschaft zurückkehrt, z. B. dadurch, daß man erneuerbare (regenerative) Energiequellen nutzt und Rohstoffe in den Kreislauf zurückführt (Recycling). Eine entsprechende Umorientierung unserer Wirtschaft dürfte allerdings vorerst nicht zu erwarten sein.

*Weiterführende Literatur:* Zur Vertiefung der hier angesprochenen Probleme siehe z. B. DUTTWELLER (1974), FLOHN 1973 u. 1975, TRIBUTSCH 1979, S. 20.

*Lebende Biomasse:* Die hier beschriebenen »Kreisläufe des Lebens« bewirken, daß (abgesehen vom rapiden Abbau der fossilen Energielager) der Bestand an »lebender« Biomasse in etwa konstant bleibt: Im Schnitt wird durch die weltweite Fotosyntheseaktivität ebensoviel biologische Trockenmasse produziert, nämlich 7,4 Mill. kg/s entsprechend einer Energierate von 133 TW ( $1,33 \times 10^{14}$  W) wie abgestorbene Biomasse (unter Abgabe der chemischen Energie als Wärme an die Umgebung (Energieentwertung)) u. a. unter Beteiligung von Reduzenten wieder in ihre (energiearmen) Bestandteile zerlegt wird.

Nur etwa 3,3% davon haben vorher einem Zweck gedient, etwa 2% der Ernährung und 1,3% der technischen Verwendung (Holz, Papier, usw.).

Die Fotosynthese stellt den größten globalen Produktionsprozeß dar. Auf die Flächeneinheit bezogen beträgt die Produktionsrate durchschnittlich  $0,26 \text{ W/m}^2$ . Ihre Schwankungen sind aber ziemlich groß. Allein auf dem Lande werden  $7,6 \times 10^{13}$  W »produziert«, entsprechend  $0,51 \text{ W/m}^2$  (ODUM 1972).

Geht man davon aus, daß im Mittel ein Energiestrom von 160 W auf jedem  $\text{m}^2$  der Erdoberfläche auftritt, so ergibt sich allerdings nur ein energetischer Wirkungsgrad von durchschnittlich 0,16% bzw. von 0,23% für die Landflächen. Er ist sogar noch geringer, wenn man nicht nur, wie wir es in dieser Abschätzung getan haben, die tatsächlich auf die Erdoberfläche auftreffende Sonnenenergie berücksichtigt, sondern darüber hinaus die zahlreichen Vorgänge wie Konvektion, Verdunstung von Wasser, Atmung usw. in Rechnung stellt, die die Fotosynthese erst möglich machen.

Obwohl die biologischen Sonnenkraftwerke i. a. mit viel niedrigerem energetischem Wirkungsgrad arbeiten als die technischen (siehe Kap. V, 8 und 13) sollte nicht übersehen werden, daß bei ersteren die energetischen Herstellungskosten der Kraftwerke, die grünen Blätter, bereits berücksichtigt sind, die bei einem Vergleich nicht unterschlagen werden dürfen.

Gemessen am maximalen energetischen Wirkungsgrad von  $\eta_{\max} = 0,08$  (BÖGER 1978, S. 410) ergibt sich somit ein exergetischer Gesamtwirkungsgrad (in diesem Fall sogar einschließlich energetischer Amortisation (Kap. IV, 2.3)) von

$$\eta^* = \eta/\eta_{\max} = W/W_{\max} \cong 0,03,$$

d. h. 3% für die durchschnittliche fotosynthetische Produktion auf dem Lande.

*Fossile Biomasse:* Die Kohle-, Öl- und Erdgaslager der Erde sind aufgrund komplizierter Umwandlungsprozesse unmittelbar aus der Biomasse entstanden, die vor Jahrmillionen durch Fotosynthese geschaffen und u. a. durch geologische Vorgänge nach und nach aus dem »normalen« Produktions-Zerfallszyklus abgezweigt wurden. Ein Blick auf Tabelle 7 zeigt, daß die fossilen Bio-

Tab. 7: Der auf 1 kg Masse entfallende Inhalt nutzbarer chemischer Energie (Heizwert) in MJ ( $10^6$ J) einiger organischer Substanzen.

Bio-(Trocken-)masse	18
Holz	14
Kohle	29
Benzin	44
Heizöl	42
Erdgas	48
Wasserstoffgas	124

speicher noch besser sind als aktuelle. Unter anderem wegen der effektiven Speicherung hochwertiger chemischer Energie sind die fossilen Brennstoffe (noch) Grundlage der menschlichen Energiewirtschaft: Sie decken über 90% des derzeitigen Weltenergiebedarfs ab. Obwohl die fossilen Lager insgesamt auf  $6 \times 10^{23}$  J geschätzt werden, erscheinen aus heutiger Sicht nur etwa  $26,1 \times 10^{21}$  J davon ausbeutbar.

Beim derzeitigen Wachstum der Weltbevölkerung ist dadurch eine Energieversorgung nur auf einige Jahrzehnte hinaus gesichert. Jedenfalls erscheint die »fossile« Energiemenge nicht gerade sehr groß im Vergleich zur jährlichen Biomasseproduktion, die mit 4000 EJ immerhin ein Sechstel der Reserven darstellt. Verglichen mit dem totalen Sonnenenergiepotential ist diese Energiemenge geradezu verschwindend klein.

*Lebende Biomasse als Energiequelle?* Allerdings sollte diese auf den ersten Blick günstig erscheinende Produktionsbilanz der Fotosynthese nicht dahingehend mißdeutet werden, daß sie unter den derzeitigen energiewirtschaftlichen Verhältnissen einen entscheidenden Beitrag zur Energieversorgung der Menschheit leisten könnte. Wie man sich an »Bioenergiequellen« wie Holz und Stroh, die schon lange in Gebrauch sind, klarmachen kann, ist ihre Ernte mit erheblichem Aufwand verbunden. So erfordert das Trocknen einen relativ hohen Energieeinsatz. Solange man dafür Sonne und Wind benutzt, fallen zwar keine direkten Energiekosten an. Der Vorgang ist jedoch arbeitsintensiv und zeitraubend. Das gleiche gilt für das Einbringen der Ernte. Zwar ließe sich durch intensive landwirtschaftliche Bewirtschaftung (ähnlich wie bei der Nahrungsmittelproduktion) die flächenbezogenen »Energieerträge« noch erheblich erhöhen. Dies würde aber zumindest teilweise wieder aufgehoben durch den Aufwand, der mit der Unterhaltung der Anbauflächen (maschinelle Landbearbeitung, Düngung usw.) verbunden ist.

Gegen die rein energetische Nutzung von Land, auf dem im Prinzip auch Nahrungsmittel wachsen könnten, spricht außerdem ein ethisches Argument: Solange auf der Erde der größte Teil der Menschheit am Existenzminimum

vegetiert und viele Menschen tagtäglich verhungern, erscheint der Anbau von Biomasse zum Betrieb etwa von Pkw's geradezu unverantwortlich.

In dieser Hinsicht ist die technische Sonnenenergiefixierung der biologischen überlegen: Solarzellen und -kollektoren lassen sich in jenen sonnenreichen und regenarmen Gebieten, in denen ohne weiteres keine Pflanzen wachsen (z. B. Wüstenregionen) besonders vorteilhaft installieren.

Anders verhält es sich jedoch mit organischen Abfällen (z. B. Mist, Fäkalien). Eine Nutzung der darin enthaltenen Bioenergie z. B. durch die Produktion von Biogas erscheint nicht nur technisch machbar, sondern auch wirtschaftlich vertretbar, insbesondere für Entwicklungsländer.

*Weiterführende Literatur:* Zur energetischen Holznutzung siehe: FRÜHWALD et al. 1980, HECK 1980. Zur Nutzung von biologischen Abfällen siehe RUSKE et al. 1980, S. 101 ff., MÖNNINGHOFF 1981 (mit unterrichtspraktischen Anregungen).

## 2.5 Weitere solare Energiequellen

### 2.5.1 Sonnenlicht

Gemäß Abb. 13 erreichen mit einer Gesamtleistung von 89 700 TW 52% des gesamten auf die Erdatmosphäre auftreffenden Sonnenlichts  $P'_a$  die Erdoberfläche. Bis auf 5% von  $P'_a$ , die von Wasseroberflächen reflektiert und 24% von  $P'_a$ , die für die Verdunstung von Wasser genutzt werden, wird dieses enorme Energiereservoir lediglich insofern durch den Menschen genutzt, als er von dem damit verbundenen Licht- und Wärmewirkungen profitiert. Eine systematisch organisierte technische Nutzung geht über Ansätze nicht hinaus (siehe Kap. V, 13 und 15). Zwar entspricht dem theoretischen Leistungspotential von 89 700 TW etwa das 10 000fache des derzeitigen Weltenergieverbrauchs. Realistische Werte dürften allerdings weit darunter liegen, weil einerseits die Leistungsdichte sehr stark um ihren Mittelwert von  $160 \text{ W/m}^2$  schwankt, vor allem aufgrund klimatischer Einflüsse, jahreszeitlicher Veränderungen, aufgrund des Tag-Nacht-Rhythmus', und weil andererseits Abdeckungen der Erdoberfläche bereits in geringem Umfang Einfluß auf das Klima haben können. An eine großtechnische Nutzung wäre ohnehin nur in sonnenreichen Gegenden der Erde zu denken, z. B. in den Wüstengebieten, wo mittlere Strahlungsdichten bis zu  $290 \text{ W/m}^2$  und an Sonnentagen Energiestromdichten bis zum Wert der Solarkonstanten ( $S_e = 1,36 \text{ kW/m}^2$ ) auftreten. In unseren Breiten beträgt die mittlere Energiestromdichte nur etwa  $110 \text{ W/m}^2$ . Davon sind vorerst nur etwa  $40 \text{ W/m}^2$  direkte Strahlung für eine energetische Nutzung interessant.

*Aufgabe:* Wie groß muß die Auffangfläche eines Solarkraftwerks in unseren Breiten sein, um rund um die Uhr die Leistung eines 1 GW-Kohlekraftwerks zu garantieren, wenn man geeignete Speicher zur Überbrückung der Zeiten voraussetzt, an denen keine direkte Strahlung verfügbar ist?

## 2.5.2 Sonnenwärme

Die Sonnenenergie sorgt auf vielfältige Weise dafür, daß die Erde eine biologisches Leben ermöglichende Umgebungstemperatur innerhalb eines fast 0 K ( $\cong -273^\circ\text{C}$ ) kalten Weltraums annimmt. Obwohl die Umgebung lokal und innerhalb kleiner Zeiträume eine konstante Temperatur aufweist und als Reservoir entwerteter Energie anzusehen ist, ergeben sich zeitliche (z. B. Tag-Nacht-Rhythmus) und räumliche (z. B. Oberfläche – tiefere Schichten des Meerwassers) Temperaturschwankungen. Diese können unter Umständen zu Wärmeausgleichsprozessen veranlaßt und damit zu einer energetischen Nutzung herangezogen werden. Denkbar ist beispielsweise der Betrieb von Wärmekraftmaschinen zwischen den durch Sonneneinstrahlung auf einer höheren Temperatur gehaltenen Oberfläche der Meere und kälteren tieferen Schichten.

*Aufgabe:* In Äquatornähe sind Wasseroberflächentemperaturen von  $25^\circ\text{C}$  keine Seltenheit. Welche Energiemenge läßt sich im Prinzip aus  $1\text{ m}^3$  Wasser mit einer Wärmekraftmaschine (Exergetischer Wirkungsgrad  $\eta^* = 0,5$ ) gewinnen, die zur Kühlung Tiefenwasser von  $6^\circ\text{C}$  benutzt (Wärmekapazität von Wasser  $C_w = 4,19\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ )? Wie hängt die gewinnbare Energie von der Temperaturdifferenz ab?

## 3 Gezeitenenergie

Unter Gezeiten versteht man das zweimal pro Tag an den Küsten zu beobachtende Ansteigen (Flut) und Abfallen des Meerwassers. Verbunden hiermit sind häufig sehr starke Gezeitenströmungen. Verantwortlich für das Zustandekommen des periodischen Wasseranstiegs und der Wasserströmungen sind der Mond und in zweiter Linie auch die Sonne. Der mittlere Tidenhub im offenen Meer beträgt etwa 60 cm (wie aus der Berechnung der Gleichgewichtsflut folgt (z. B. SCHLICHTING et al. 1977)). Günstige Küstenformationen ergeben Resonanz- und Trichtereffekte mit bis zu 20 m Tidenhub.

Die Energien, die sich in den Bewegungen der Flutberge manifestieren, entstammen letztlich der Rotationsenergie der Erde: sie bringen die Erde allmählich zum Stillstand, ein Schicksal, das den Mond schon früher ereilt hat.

*Ergänzung:* Die Entwertungsrate der Gezeitenenergie läßt sich aus der Abbremsung der Erde abschätzen:

Zur Zeit dreht sich die Erde (Äquatorialradius  $r = 6378388\text{ m}$ , Masse  $m = 5,977 \times 10^{24}\text{ kg}$ ) in  $T_1 = 23\text{ h } 56\text{ m } 4,099\text{ s}$  um sich selbst. Man weiß, daß die Erde in 100 Jahren  $0,00164\text{ s}$  länger (also  $T_2 = 23\text{ h } 56\text{ m } 4,10064\text{ s}$ ) für eine Umdrehung braucht (LEXIKON TECHNIK 1972, 919). Die Erde hat in dieser Zeit  $\Delta t = 100\text{ Jahre} = 3,155 \times 10^9\text{ s}$  die Energie  $\Delta E = E_1 - E_2$  abgegeben ( $E_i$ ,  $i = 1,2$ , ist die jeweilige Rotationsenergie der Erde). Dem entspricht eine Leistungsabgabe  $P = \Delta E/\Delta t$ . Es gilt:

$$E_i = \frac{1}{2} \theta \omega_i^2 = \frac{1}{5} m r^2 (2\pi v_i)^2 = \frac{1}{5} m r^2 \frac{4\pi^2}{T_i^2}, \quad i = 1,2.$$

Daraus folgt:

$$\Delta E = \frac{4\pi^2}{5} m r^2 \left( \frac{1}{T_1^2} - \frac{1}{T_2^2} \right) = 9,8 \times 10^{21} \text{J},$$

bzw.:

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{9,8 \times 10^{21} \text{J}}{3,155 \times 10^8 \text{s}} = 3,12 \times 10^{12} \text{W}.$$

Die Leistungsabgabe aufgrund der Gezeitenreibung beträgt etwa  $3 \times 10^{12} \text{W}$  (vgl. Abb. 13). Davon geht etwa ein Drittel in den flachen Seegebieten, den Buchten, weiten Fließmündungen und Meeresarmen verloren (MUNK et al. 1960). Diese Energie stellt ein Potential dar, das im Prinzip angezapft werden könnte (siehe Kap. V, 1.1). Realistischer ist es jedoch, von einem weltweiten Potential von 1000 GW auszugehen.

*Aufgabe:* Welche Fläche  $A$  muß eine Bucht mit einem Tiedenhub von  $h = 5 \text{ m}$  mindestens einnehmen, damit man pro Gezeitenperiode  $T$  eine Leistung  $P = 50 \text{ GW}$  gewinnen kann? Wie hängt  $P$  von  $h$  ab?

*Weiterführende Literatur:* MATTHÖFER 1977, S. 91, FRICKE et al. 1979.

#### 4 Geothermische Energie

Aufgrund der Sonneneinstrahlung bilden sich auf dem Festland (Sand, Gestein u. ä.) zeitweilig thermische Energiespeicher aus. Anders als beim Meerwasser (siehe Kap. VIII, 2.5.2) werden wegen der relativ geringen Wärmekapazität u. U. hohe Temperaturen erreicht. Allerdings findet beim Ausbleiben der Sonnenstrahlung aber auch eine schnelle Abkühlung statt, wodurch die Speichereigenschaften stark beeinträchtigt werden. Der die Temperatur der Erdoberfläche bestimmende Einfluß der Sonnenenergie reicht nur etwa bis zu einer Tiefe von 30 m in die Erdoberfläche hinein. Darunter nimmt die Temperatur zu. Das ist auf eine Energiequelle zurückzuführen, die wie auch die Kernenergie, ausnahmsweise nicht von der Sonne herrührt, jedenfalls nicht von der Sonnenstrahlung: die geothermische Energie. Ihr Einfluß auf die globale Energiebilanz der Erde ist zwar minimal. Mit 32 TW (siehe Abb. 13) trägt die Erdwärme mit nur etwa 0,02% zur abgestrahlten Energie bei. Aber sie macht noch fast das Vierfache des derzeitigen Weltenergieverbrauchs aus. Bei einer Erdoberfläche von  $5,1 \times 10^8 \text{ km}^2$  entspricht dem eine mittlere Energiestromdichte von  $0,06 \text{ W/m}^2$ ; das ist etwa 1/200 der Solarkonstanten in unseren Breiten. Ein Nettoenergiestrom der vom Erdinnern zur Erdoberfläche gerichtet ist, kann nur dann zustandekommen, wenn ein Temperaturgefälle vorliegt, wenn also die Temperatur der Erde in tieferen Schichten höher ist.

Für die Bundesrepublik Deutschland beträgt der mittlere Temperaturgradient bis zu einer Tiefe von 5 km etwa 25 bis 30 K/km. Nur im Bereich geothermischer Anomalien (wie z. B. Heißdampf- und Heißwasserlagerstätten, heißes Gestein) erhält man wesentlich höhere Werte, beispielsweise 75 K/km für den Bundesstaat Montana in den USA. Solche Anomalien sind daher für eine Nutzung besonders interessant.

Bislang in Betrieb stehende geothermische Energieanlagen (z. B. in »Larderello« (Italien), »The Geysers« (USA)) nutzen geothermische Anomalien aus.

Die Nutzung der »normalen« Erdwärme ist vor allem wegen der großen Bohrtiefen noch sehr kostspielig, obwohl das entsprechende theoretische Energiepotential relativ groß ist.

*Anmerkung:* Der Erdwärmestrom geht zu 70% aus radioaktiven  $\alpha$ -Zerfällen vor allem von Uran 238 und Thorium 232 hervor, das in den Gesteinsschichten der Erdhülle in geringem Umfang vorhanden ist; nur 30% entstammen der Ursprungswärme.

*Weiterführende Literatur:* Siehe z. B. BORST et al. (1979 a), MATTHÖFER (1977, S. 74), KERTZ (1974).

## 5 Kernenergie

### 5.1 Kernspaltung

Uran und einige weitere radioaktive Elemente (z. B. Thorium) zählen zu den wenigen Energiequellen auf der Erde, die nicht auf die Sonnenenergie zurückzuführen sind. Sie stellen Überbleibsel aus der Zeit der Entstehung unseres Planetensystems dar. Ihr Überleben bis in die heutige Zeit verdanken diese Elemente vor allem der Langsamkeit (große Halbwertszeit) ihres radioaktiven Zerfalls (Übergang in ein leichteres Element durch Aussendung radioaktiver

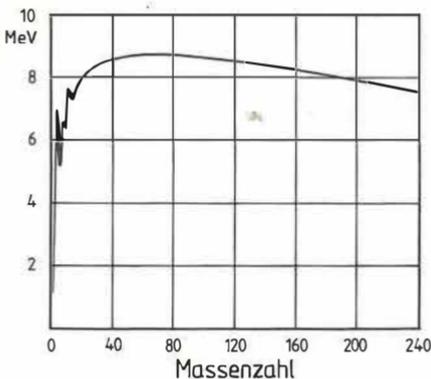


Abb. 18: Bindungsenergie pro Nukleon für Kerne mit verschiedener Massenzahl (1 MeV =  $10^6$ eV  $\approx$   $1,6 \times 10^{-13}$ J).

Strahlung) und der Oberflächenspannung ihrer Atome (vgl. Kap. VIII, 1), die sie bis heute daran gehindert haben, selbsttätig unter Abgabe verhältnismäßig großer Energiemengen in leichtere Atome zu zerfallen. Die Atomkernbausteine (Nukleonen: Protonen und Neutronen) werden ähnlich den Wassermolekülen eines Wassertropfens durch Oberflächenspannung zusammengehalten: Die Existenz von Atomkernen ist anschaulich der Tatsache zu verdanken, daß beim Zusammenschluß mehrerer Nukleonen unter Abgabe von sog. Bindungsenergie ein fester tropfenartiger Verband entsteht, der i. a. nur dadurch aufzulösen ist, daß diese freigewordene Bindungsenergie wieder zugeführt wird. Betrachtet man die für die Stärke des Zusammenhalts der verschiedenen Atomkerne charakteristischen Bindungsenergien pro Nukleon  $E_B$  (Abb. 18), so zeigt sich, daß die Kerne mit Nukleonenzahlen (Massenzahlen) um 60 besonders stark gebunden sind, während leichtere und schwerere Kerne abnehmende Stabilität aufweisen.

Dieser Sachverhalt wird bei der Kernspaltung ausgenutzt. Es zeigt sich nämlich, daß schon eine geringe Störung (Auftreffen eines langsamen Neutrons) ausreicht, um beispielsweise einen Urankern der Massenzahl 235 (U 235) zum »Platzen« zu bringen. Da die entstehenden Bruchstücke X und Y (z. B. Y =

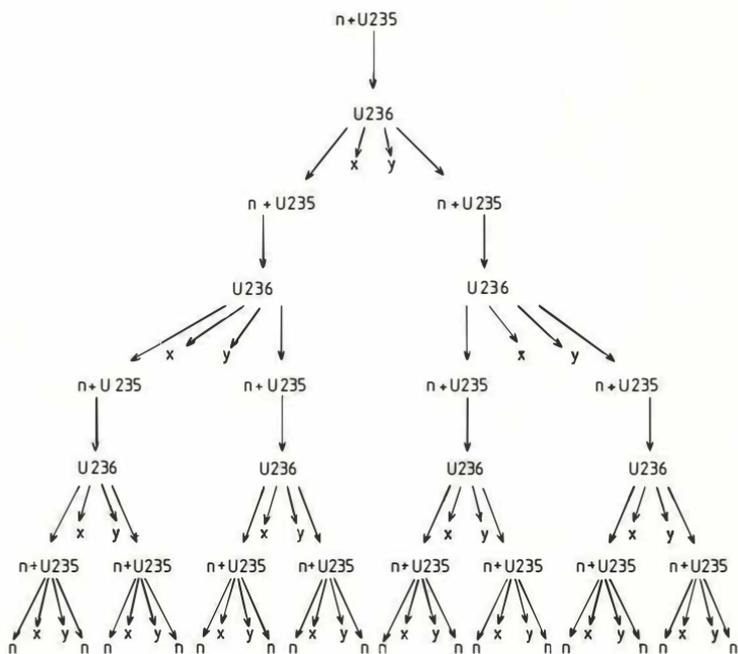


Abb. 19: Schematische Darstellung einer Kettenreaktion im Uran 235. X, Y sind die Bruchstücke der Spaltung, n ein freiwerdendes Neutron.

Krypton 89 und X = Barium 144) größere Bindungsenergie pro Nukleon besitzen, wird der Differenzbetrag  $E_s$  zur Bindungsenergie pro Nukleon des U 235 vor allem als Bewegungsenergie der Bruchstücke frei, die sich aufgrund von Abbremsungen schließlich als Wärme äußert.

$$E_s = 235 \cdot E_B(\text{U 235}) - 89 \cdot E_B(\text{Kr 89}) - 144 \cdot E_B(\text{Ba 144}) \cong 200 \text{ MeV} \\ \cong 3,2 \times 10^{-11} \text{ J.} \quad (47)$$

Bei einem einzelnen Prozeß dieser Art ist die freiwerdende Energie so gering, daß sie nicht bemerkt werden würde. Da bei dieser Spaltung jedoch außerdem 3 (im Mittel 2,5) Neutronen frei werden, wird es möglich, daß diese Neutronen ihrerseits Spaltungen bewirken usw., so daß eine Kettenreaktion abläuft (Abb. 19), die innerhalb kürzester Zeit enorme Energiemengen freizusetzen vermag. 1 g Uran 235 enthält  $N = L/A = 25,7 \times 10^{20}$  Atome ( $L = 6,03 \times 10^{23}$  ist die Loschmidtzahl.  $A = 235$  ist das Molekulargewicht). Bei der vollständigen Spaltung von 1 kg Uran 235 würde daher gemäß Gl. (47) eine Energie von  $E_G = N \cdot 1000 \cdot E_s \cong 8 \times 10^7 \text{ MJ}$  frei. Das ist etwa das 3 Mill.-fache der aus 1 kg Kohle durch Verbrennung freisetzbaren chemischen Energie. Uran stellt damit eine äußerst effektive Energiequelle dar.

Am Beispiel der Uranspaltung ist aber besonders deutlich geworden, daß große Energiequellen nicht nur viel Energiesklaven für die Menschheit bedeuten, sondern auch große Zerstörungsgewalt. Jedenfalls vernichteten nur wenige Jahre nach der Entdeckung der Kettenreaktion amerikanische Atombomben zahlreiche Menschenleben in Japan. Seitdem hat eine rasante Entwicklung von Atomwaffen in Ost und West ein Zerstörungspotential geschaffen, durch das die Menschheit viele Male ausgelöscht werden könnte. Zwar ist es auch gelungen, die Kettenreaktion in sog. Kernreaktoren unter Kontrolle zu bringen und zum Betreiben von Wärmekraftwerken (Kernkraftwerke) heranzuziehen. Der Ausbau der Kernenergie ist allerdings wegen vielfältiger Gefahren (z. B. das noch ungelöste Problem der Entsorgung, d. h. der Beseitigung langlebiger radioaktiver Abfälle, die mit wachsender Verbreitung von Kernreaktoren wachsende Gefahr u. a. zum kriegerischen Mißbrauch) stark umstritten. Zu diesen Nachteilen der Kernenergie kommt erschwerend hinzu, daß die Energiereserven des Uran 235 von gleicher Größenordnung sind wie die zur Neige gehenden Erdölreserven (vgl. Abb. 13). Mit Hilfe des sog. Brutreaktors wäre es zwar möglich, auch das etwa 100mal so häufig wie das Uran 235 vorkommende Uran 238 der Energienutzung zuzuführen. Das setzt aber voraus, daß dieser Reaktortyp rechtzeitig zur Serienreife entwickelt werden kann.

## 5.2 Kernverschmelzung

Wie man Abb. 18 entnimmt, wäre ein noch höherer Energiegewinn pro Nukleon möglich, wenn man leichte Kerne zu schwereren vereinigen könnte. Solche Kernverschmelzungsvorgänge finden bei sehr hohen Temperaturen in Sternen, u. a. in der Sonne, statt. Den in der Sonne ablaufenden Kernreaktionen verdanken wir letztlich fast alle auf der Erde verfügbaren Energiequellen (siehe Kap. VIII, 2). Auf der Erde haben wir die ungeheuren Energiefreisetzungen, die bei kettenreaktionsartig verlaufenden Kernverschmelzungen auftreten, wieder einmal zuerst als gegen die Menschheit gerichtetes Zerstörungspotential in Form von Wasserstoffbomben zur Kenntnis nehmen müssen. Im Prinzip sind solche Reaktionen wie z. B. die Verschmelzung von Deuterium (schweres Wasser) auch unter kontrollierten Bedingungen denkbar. Das im Meerwasser reichlich vorhandene Deuterium wäre dann als riesiges Energiereservoir anzusehen: Aus  $1 \text{ m}^3$  Meerwasser wären auf diese Weise  $10^7$  MJ, aus dem gesamten Meerwasser  $10^{25}$  MJ zu gewinnen, eine Energiemenge, die in etwa der gesamten im Erdinnern gespeicherten thermischen Energie entspricht. Man ist heute indessen noch weit davon entfernt, Kernverschmelzungen in der Praxis zu beherrschen. Es fragt sich, ob man den Menschen wünschen sollte, daß dieses jemals gelingt.

*Weiterführende Literatur:* MATTHÖFER (1977), Arbeitsgruppe »Wiederaufbereitung« (1977), WOHLFAHRT (1979).

## IX. Energiesysteme

Ein sich selbst überlassenes, mit der Umgebung in Kontakt stehendes System, z. B. eine frisch gepflückte Blume, ein Stück Eis, ein neues Auto usw. zerfällt mit der Zeit von selbst in wertlose Bestandteile. Diese und andere Erfahrungen haben zur Formulierung und Quantifizierung des Prinzips von der Entwertung der Energie geführt. Die ebenfalls zu machende Erfahrung, daß solche geordneten Strukturen immer wieder erschaffen oder am »Leben« gehalten werden können, konnte ebenfalls auf der Grundlage dieses Prinzips erklärt werden: Indem die mit dem Zerfall verbundene Entwertung der Energie u. a. durch Aufnahme hochwertiger Energie immer wieder rückgängig gemacht wird, können sich derartige Systeme in einer Welt behaupten, in der das Prinzip der Energieentwertung regiert. Da die funktionelle oder raum-zeitliche Ordnung solcher Systeme gleichsam durch die Entwertung bzw. Dissipation von Energie (Zufuhr hochwertiger und Abgabe minderwertiger Energie) aufrechterhalten wird, spricht man neuerdings auch von »dissipativen Strukturen« (PRIGOGINE 1972). In einem allgemeinen Sinn zählen dazu nicht nur die oben behandelten »Kreisläufe des Lebens«, pflanzliche Organismen und Ökosysteme, sondern beispielsweise auch ein fahrendes Auto, ein funktionierender Haushalt, eine stehende Welle (Abb. 20). Wir wollen im folgenden exemplarisch einige einfache solcher (offenen) Systeme analysieren, die innerhalb der Energieproblematik eine gewisse exemplarische Bedeutung besitzen: der menschliche Organismus, die Verkehrsmittel Fahrrad und Auto sowie der Haushalt. Das Schwergewicht der Behandlung soll dabei allerdings auf praktische energie-technische Gesichtspunkte gelegt werden.

### 1 Energetik des Menschen

Thermodynamisch gesehen ist der Mensch ein hochorganisiertes offenes System, das sich u. a. durch die Aufnahme hochwertiger chemischer Energie und Stoffe<sup>14</sup> (in Form von Nahrungsmitteln und Sauerstoff) und Abgabe von minderwertiger Energie und Stoffe am Leben hält und darüberhinaus durch Verrichtung von Arbeit in der Lage ist, seine Umwelt zu gestalten (Abb. 20). Diese Gestaltungsmöglichkeiten haben sich im Verlauf der Geschichte der Menschheit vor allem dadurch erweitert, daß der Mensch es lernte, die ent-

<sup>14</sup> Die Aufnahme von Energie ist zum Teil zwangsläufig mit der Aufnahme von Stoffen verbunden (z. B. Zucker und Sauerstoff); zum Teil dienen die Stoffe aber auch als »Material« dem Aufbau und Erhalt des Körpers.

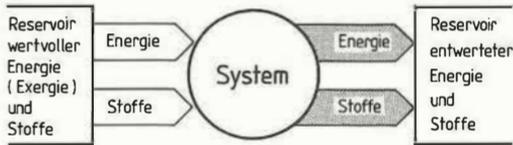


Abb. 20: Schematische Darstellung dissipativer Strukturen, d. h. Systeme hoher raumzeitlicher und/oder funktioneller Ordnung, die durch Entwertung von Energie (Aufnahme von hochwertiger Energie und Stoffe und Abgabe entwerteter Energie und Stoffe) aufrechterhalten werden.

sprechenden Energieaufwertungen (z. B. Beschaffung von Nahrungsmitteln) nicht direkt durch eigene Arbeit, sondern in zunehmendem Maße durch den Einsatz externer Energiequellen zu bewirken. Letzten Endes muß die gesamte Energienutzung durch den Menschen unter dieser Perspektive gesehen werden.

Die Betrachtung von energetischen Vorgängen am Beispiel des Menschen erscheint uns besonders geeignet, über den Erwerb eines zahlenmäßigen und formalen Verständnisses hinaus einen körpereigenen Maßstab für Energieumsetzungen zu liefern. Indem man auf diese Weise lernt, technische Energieumsätze an »menschlichen« Energieumsätzen zu messen, werden u. E. Voraussetzungen für ein kritisches Verständnis des derzeitigen »Energieverhaltens« der »zivilisierten« Menschheit geschaffen.

### 1.1 Energieumsatz bei verschiedenen Tätigkeiten

Der Mensch nutzt die in Nahrungsmitteln steckende hochwertige Energie. Ihre Aufnahme dient dazu, die durch die vielfältigen Körperfunktionen (Bluttransport, Muskeltätigkeit, Gehirntätigkeit usw.) bedingten Energieentwertungen rückgängig zu machen und den Organismus funktionsfähig zu halten.

Ein (völlig inaktiver) Erwachsener verbraucht dafür täglich im Schnitt 8400 kJ hochwertiger chemischer Energie (VOGEL et al. 1977, S. 303). Dem entspricht eine in der Abgabe von Körperwärme sich äußernde Leistung  $P_{GU}$  von etwa 100 W. Dieser sog. Grundumsatz dient u. a. der Aufrechterhaltung der Herztätigkeit (200 kJ/Tag) und der Atmung (250 kJ/Tag). Wird die chemische Energie nicht nur für Energieaufwertungen innerhalb des Organismus genutzt, sondern darüberhinaus für die Ersetzung der beim Laufen, Lastenheben, Treppensteigen usw. verbrauchten mechanischen (Muskel-)Energie, so kommt ein entsprechender Energieumsatz hinzu.

Vergleicht man die Energetik des menschlichen Organismus' mit einer Wärmekraftmaschine, so werden u. a. folgende Unterschiede offenbar: Während die WKM die chemische Energie über den Umweg der thermischen Energie in mechanische umwandelt, macht der Organismus von der Direktumwandlung in

Tab. 8: Leistungsabgabe des menschlichen Organismus pro kg Körpermasse bzw. Gesamtmasse in W/kg für verschiedene Aktivitäten (nach COHEN 1977 und TUCKER\* 1975).

Schlafen	1,15
Ruhig Sitzen	1,54
Bequem Stehen	1,79
Handarbeit (Nähen)	1,92
An- und Ausziehen	2,05
Singen	2,18
Schreibmaschineschreiben	2,31
Abwaschen, Bügeln	2,43
Fegen	2,56
Leichte Freiübungen	3,20
Radfahren (13 km/h)	3,25
Spazieren (4,5 km/h)	3,84
Radfahren (20 km/h)	4,44
Tischlern, Klempnern	4,49
Aktiver Sport	4,87
Laufen (6,4 km/h)	5,13
	6,44*
Treppen hinuntergehen	5,77
Schwere Gegenstände verladen	6,41
Schwere Sportübungen	7,05
Tennis, Schwimmen	8,33
Schnell laufen (8,8 km/h)	9,61
Sehr schwere Sportübungen	10,25
Sehr schnell laufen (12,6 km/h)	16,02*
Treppauf gehen	17,94

mechanische Energie (Kap. V, 4.3) Gebrauch. Daß es sich um eine solche Direktumwandlung handelt, wird schon durch den Umstand klar, daß bei einer Körpertemperatur  $T_K = 310 \text{ K}$  ( $37^\circ\text{C}$ ) und einer Umgebungstemperatur  $T_U = 293 \text{ K}$  ( $20^\circ\text{C}$ ) ein Wirkungsgrad von maximal

$$\eta = 1 - T_U/T_K \approx 0,05$$

möglich wäre. In Wirklichkeit treten aber Wirkungsgrade von z. B.  $\eta_A = 0,6$  für die Atmungsmuskulatur und  $\eta_G = 0,25$  für den Gesamtorganismus bei effektiver Arbeitsweise auf (siehe weiter unten). Ein nach dem WKM-Prinzip arbeitender Organismus müßte demnach zumindest Temperaturen von

$$T'_K = T_U/(1 - \eta_A) \approx 733 \text{ K} (\triangleq 460^\circ\text{C})$$

aushalten können, was absolut ausgeschlossen ist.

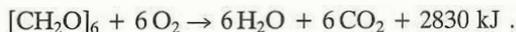
Wir wollen die dem Körper in Form von Lebensmitteln zugeführte und tatsächliche verbrauchte chemische Energie (d. h. die metabolische Rate) Lei-

stungsinput  $P_{in}$  nennen. Die zur Verrichtung von Arbeit an der Umgebung abgegebene Leistung wird mit Leistungsoutput  $P_{out}$  bezeichnet. Nach den vorangegangenen Ausführungen besteht zwischen  $P_{in}$  und  $P_{out}$  folgender Zusammenhang:

$$P_{in} = P_{GU} + P_{out}/\eta_G \quad (48)$$

Da die Freisetzung der chemischen Energie der Nahrungsmittel im Organismus wie bei der Verbrennung chemischer Energieträger durch die Summenformel (35) beschrieben wird, besteht die Möglichkeit, den Energie- bzw. Leistungsinput  $P_{in}$  durch Messung des jeweiligen Sauerstoff-( $O_2$ )Bedarfs abzuschätzen.

Geht man der Einfachheit halber von Traubenzucker,  $[CH_2O]_6$ , als chemischen Energieträger aus, so werden pro Mol etwa 2830 kJ freigesetzt (SCHMIDT et al. 1977, S. 521):



Da 1 Mol Traubenzucker einer Masse von  $[12 + 2 + 16]g \times 6 = 180 g$  entspricht und 6 Mol  $O_2$  ein Volumen von  $22,4 \times 6 l = 134,4 l$  einnehmen, ist ein  $O_2$ -Umsatz von 1 l mit einer Energieabgabe von  $(2830/134,4)kJ = 21 kJ$  verbunden.

Aus Fahrradergometermessungen weiß man, daß ein Durchschnittserwachsener bei einem Leistungsoutput  $P_{out} = 75 \text{ W}$  pro Minute 1 l  $O_2$  mehr verbraucht als bei vollständiger Ruhe. Da mit 1 l  $O_2$  pro Minute ein Leistungsumsatz von  $P_u = \frac{21000 \text{ J}}{60 \text{ s}} = 350 \text{ W}$  verbunden ist, ergibt sich ein Wirkungsgrad

$$\eta_G = P_{out}/P_u = 0,21$$

und gemäß Gl. (48) ein Leistungsinput  $P_{in} = 450 \text{ W}$ .

Der Wirkungsgrad  $\eta_G$  bezieht sich auf den Gesamtorganismus. Weil dabei auch Aktivitäten mit berücksichtigt werden, denen kein äußerer Effekt entspricht, (z. B. die Aktivitäten der Skelettmuskulatur, um den Körper aufrecht zu halten), ist er stets niedriger als derjenige der einzelnen Muskeln (siehe Kap. V, 4.3). Da die Tätigkeit des Fahrradfahrens (bzw. Ergometertretens) normalerweise gegenüber den meisten anderen Tätigkeiten (z. B. Laufen, Treppensteigen) eine sehr effektive Weise der Verrichtung von Arbeit an der Umgebung darstellt (siehe Kap. IX, 2.3.1), wird der dabei ermittelte Wirkungsgrad des Gesamtorganismus' von 20–25% nur selten überboten (ebd. S. 520).

## 1.2 Nahrungsmittelenergie

In der obigen Abschätzung haben wir der Einfachheit halber nur Traubenzucker als Energieträger zugrundegelegt. In Wirklichkeit setzen sich die Nahrungsmittel aus den unterschiedlichsten chemischen Substanzen zusammen, denen i. a. auch eine unterschiedliche Energiedichte entspricht (siehe Tab. 9). Wenn dem Organismus keine Nahrungsmittel zugeführt werden, dann kann der Mensch je nach der Größe der vorhandenen Fettpolster mehr oder weniger lange von körpereigener Substanz leben.

*Beispiel:* Gemäß Tab. 8 muß ein Radler (Gesamtmasse  $m_G = 90$  kg) bei einer Geschwindigkeit von 20 km/h eine Leistung von 400 W aufbringen. Dem entspricht nach einer Fahrt von 10 km ein Energieverbrauch von 720 kJ. Das läßt sich gemäß Tab. 9 beispielsweise mit etwa 30 g Schokolade abdecken.

Tab. 9: Gehalt an verwertbarer chemischer Energie in einigen Lebensmitteln (in kJ/kg):

Zucker	16 500
Brot	10 000
Pommes Frites	7 100
Vollmilch Schokolade	23 650
Fett	32 400
Bier	1 800
Coca Cola	1 500
Rum	15 000

Anderenfalls müßten dem Fettpolster des Körpers etwa 22 g entnommen werden. Legt man zugrunde, daß der Körper zu 80% aus Wasser besteht, so ist damit eine »Gewichtsabnahme« von 110 g verbunden.

*Aufgabe:* Um wieviel würde der Mensch abnehmen, wenn er statt der obigen Radfahrt ein Nickerchen machen würde?

## 1.3 Energie und Leistung

*Beispiel:* Ein Mensch (Körpermasse  $m = 70$  kg) muß beim Treppensteigen für eine Steighöhe  $h$  die Hubarbeit

$$W_H = -mgh,$$

( $g$  = Erdbeschleunigung) an der Umgebung verrichten, wenn man die Arbeit für die horizontale Fortbewegung vernachlässigt.

Tab. 10: Zeiten, während der ein Erwachsener (auf einem Fahrradergometer) verschiedene Leistungen zu erbringen vermag (nach WILKIE 1960).

Zeitdauer	Leistungsoutput $P_{\text{out}}$ [W]	Leistungsinput $P_{\text{in}}$ [W] (für $\eta_G = 25\%$ und $P_{\text{GU}} = 100 \text{ W}$ )
dauernd	75	400
270 min	142	668
60 min	208	932
1 min	403	1712
5 sec	1120	4580

Zum Besteigen des 300 m hohen Eiffelturms muß daher eine Arbeit von  $W_H = 210 \text{ kJ}$  aufgebracht werden.

Um beurteilen zu können, ob jemand diese Kletterpartie überhaupt schaffen kann, genügt offenbar nicht die Angabe der aufzubringenden Energie: In hinreichend langer Zeit kann der Mensch beliebig viel Energie aufbringen. Man ist darüberhinaus auf die Information angewiesen, in welcher Zeit die Energiemenge aufgebracht werden soll; d. h. welche Leistung erbracht werden muß.

Im vorliegenden Beispiel der Eiffelturbesteigung könnte man beispielsweise fragen, ob der Mensch diese Aufgabe in einer halben Stunde schaffen kann.

Legt man den bei Ergometeruntersuchungen ermittelten Wirkungsgrad des Organismus'  $\eta_G = 25\%$  zugrunde, so kommt man zu einem Leistungsinput

$$P_{\text{in}} = 4 \times 117 \text{ W} + 100 \text{ W} = 568 \text{ W},$$

ein Wert, der nach Tab. 10 von einem Durchschnittserwachsenen mehrere Stunden lang erbracht werden kann. Jemand, der Erfahrungen im Treppensteigen hat, wird diese Einschätzung nicht recht glauben können. In der Tat ist das Treppensteigen ein typisches Beispiel für Tätigkeiten, die wegen zusätzlicher Aktivitäten des Organismus' (z. B. Beschleunigungen der Schenkel und Arme) mit einem niedrigeren Wirkungsgrad verbunden sind als das Fahrradfahren.

Nach Tab. 8 gehört das Treppensteigen zu den anstrengendsten Tätigkeiten überhaupt.

## 1.4 Energie und Kraft

Nicht nur die Leistungsfähigkeit des Menschen begrenzt seine körperlichen Aktivitäten. Es gibt Fälle, in denen die zu erbringende Leistung im »menschlichen« Rahmen liegt, der Mensch aber dennoch nicht ohne weiteres in der Lage ist, eine gegebene Aufgabe zu erfüllen.

*Beispiel:* Unser Durchschnittsmensch soll einen 500 kg schweren Eisenblock 10 cm hoch heben. Dazu muß er eine Energie bzw. Hubarbeit von  $W_H = 500 \text{ J}$  verrichten. Ließe er sich dazu 10 s Zeit, so wäre ein Leistungsoutput von  $P_H = 50 \text{ W}$  erforderlich, was normalerweise ohne Schwierigkeiten zu schaffen ist. Demgegenüber wird der Mensch den Block wohl kaum von der Stelle bewegen können.

Neben der Leistungsfähigkeit, d. h. dem Vermögen, eine bestimmte Energiemenge pro Zeiteinheit aufzubringen, muß der Mensch auch genügend Energie pro Wegstrecke abgeben können, d. h. genügend Kraft »besitzen« bzw. ausüben können. Die von einem Menschen maximal aufzubringende Kraft hängt unmittelbar von der Beschaffenheit (insbesondere vom Volumen) seiner Muskeln ab und kann innerhalb gewisser Grenzen antrainiert werden.

Ein technischer Trick, die für eine bestimmte Arbeit  $W$  auszuübende Kraft herabzusetzen, besteht darin, mit Hilfe von einfachen Maschinen (Hebel, Getriebe, Flaschenzug usw.) die Wegstrecke künstlich zu vergrößern, so daß das Produkt aus Kraft und Weg, die Arbeit  $W$ , unverändert ist. Solche kraftumwandelnden einfachen Maschinen spielen auch in fast allen technischen Anlagen eine wichtige Rolle.

## 1.5 Nahrungsmittelenergie und ihr Preis

Der normalerweise als groß empfundene Energieaufwand beim Treppensteigen wie überhaupt jede von größeren Anstrengungen begleitete körperliche Aktivität verleitet leicht zu einer gefühlsmäßigen Überschätzung der tatsächlich aufgebrauchten Energien.

Daß bei einer von vielen Menschen bereits als anstrengend empfundenen Radfahrt von 10 km allenfalls 22 g Fett »verheizt« werden (siehe oben), muß denjenigen enttäuschen, der in körperlicher Betätigung eine effektiv wirkende Methode zu sehen glaubt, überschüssige »Pfund« loszuwerden.

Geradezu grotesk erscheinen Überlegungen, menschliche Energieumsetzungen nach den i. a. noch als zu hoch empfundenen Energiepreisen bewerten zu wollen.

*Beispiel:* Legt man einen Energiepreis von 15 Pf für 1 kWh ( $\cong$  3600 kJ) elektrische Energie zugrunde, so wäre der Eiffelturmaufstieg nicht einmal 10 Pf wert. Ein 8 Stunden arbeitender Tischler (70 kg schwer) würde gemäß Tab. 9 und Gl. (48) gerade 1543 kJ Arbeit an der Umgebung verrichten entsprechend einer durchschnittlichen Leistung von 54 W. Der reine Nutzenergiepreis für den 8-Stunden Tag betrüge 6 Pf. Bezieht man die gesamte pro Tag von einem Durchschnittserwachsenen verbrauchte Nahrungsmittelenergie von etwa 11 000 KJ mit in die Rechnung ein, so kommt man bei einem Heizölpreis von 70 Pf/l (1 l Erdöl enthält etwa 36,5 MJ chemische Energie) zu einer Ausgabe von 21 Pf.

Die in Form von Lebensmitteln verbrauchte chemische Energie geht in die nationalen Energiebedarfsbilanzen nicht ein. Das mag zum einen daran liegen, daß die chemische Nahrungsmittelenergie größtenteils einer Energiequelle, nämlich der Sonne entstammt, die bislang in den Energiebilanzen noch nicht auftaucht. Zum anderen ist die Lebensmittelenergiemenge verglichen mit der technisch genutzten Energie relativ gering. Geht man von einem durchschnittlichen täglichen Nahrungsmittelenergieverbrauch von 11 000 kJ pro Kopf der Bevölkerung aus, so steht dem in der Bundesrepublik ein Pro-Kopf-Verbrauch an technisch genutzter Energie von 526 300 kJ (1978), also das fast 50-fache gegenüber.

Allerdings sollte nicht übersehen werden, daß im Durchschnitt noch das 8-fache der Nahrungsmittelenergie an technischer Energie für die Produktion, Verpackung und Verteilung der Nahrungsmittel eingesetzt werden muß.

Zu ganz anderen Ergebnissen kommt man, wenn man die gleichen Betrachtungen nicht für Industrienationen wie BRD und USA anstellt, sondern beispielsweise für Indien. Dort ist der Pro-Kopf-Verbrauch (1972) mit 14 650 kJ pro Tag (WORLD ENERGY SUPPLIES 1974) von gleicher Größenordnung wie die von einem Durchschnittserwachsenen benötigte Nahrungsmittelenergie.

Insgesamt gewinnt man aus diesen Betrachtungen den Eindruck, daß der Energieverbrauch der zur Unterstützung der Menschen entwickelten Energiesysteme in keinem Verhältnis zum Energieverbrauch des Menschen selbst steht.

## **2 Energetik der menschlichen Fortbewegung**

Die Energetik der menschlichen Fortbewegung, deren Erörterung im folgenden exemplarisch auf die Energiesysteme »Fahrrad« und »Kraftfahrzeug« beschränkt werden soll, schließt sich unmittelbar an die Energetik des Menschen an. Es wird zunächst ein System, das Fahrrad, beschrieben, das einerseits zwar völlig auf die Leistungsfähigkeit des Menschen beschränkt ist, andererseits aber eine enorme Steigerung der Mobilität über die des »unbewaffne-

ten« Menschen hinaus ermöglicht. Durch die Behandlung des Systems »Kraftfahrzeug« werden Steigerungsmöglichkeiten der Mobilität über die Begrenzungen der menschlichen Leistungsfähigkeit hinaus, aber auch die neue Größenordnung der Energieumsätze durch dieses System vor Augen geführt. Immerhin werden in der Bundesrepublik Deutschland etwa ein Drittel der Primärenergie für den Verkehr (Fortbewegung und Transport) aufgewandt. Die mit der Motorisierung verbundenen negativen Folgen (wie Lärm, Abgase, Verbrauch von Landschaft) können hier nicht thematisiert werden, die Erfassung der energetischen Dimension liefert jedoch einige sachliche Voraussetzungen für entsprechende Vertiefungen.

*Weiterführende Literatur:* Z. B. DUVE (1979), ROBERT (1979), DOLLINGER (1972), ILLICH (1977).

Ein laufender Mensch, ein fahrendes Fahrrad oder Auto stellen insofern ein funktionelles Ordnungssystem dar, als die Aufrechterhaltung ihres Bewegungszustandes durch Entwertung hochwertiger (chemischer) Energie erzwungen werden muß: Die während der Fortbewegung durch verschiedene Reibungsvorgänge bedingte Energieentwertung, die sich in der Abnahme der Bewegungsenergie äußert, muß ständig durch Zufuhr hochwertiger (mechanischer) Energie aufgehoben werden; ansonsten würde das jeweilige System zur Ruhe kommen. (Die mechanische Energie wird bei Mensch und Fahrrad durch einen chemomechanischen Vorgang in den Muskeln (siehe Kap. V, 4.3), beim Auto durch einen thermodynamischen Vorgang im Verbrennungsmotors erzeugt). Bei einer gleichförmigen Bewegung dient die Energiezufuhr lediglich dazu, die Energieentwertung aufgrund von Reibung auszugleichen. Ohne Reibung bliebe das System in dem einmal eingenommenen Bewegungszustand.

## 2.1 Transportsystem Fahrrad

Das Fahrrad war lange Zeit in Vergessenheit geraten, obwohl seine Erfindung von großer Bedeutung für die Technisierung, wie wir sie heute kennen, insbesondere im Bereich der Fortbewegung und des Transports gewesen ist.

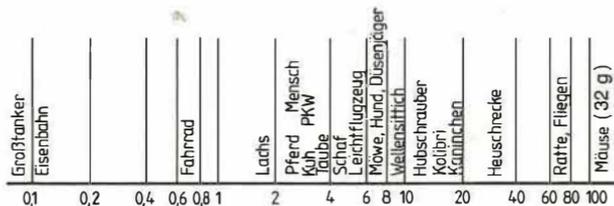


Abb. 21: Transportkosten: Energieinput/(Strecke · Körper- bzw. Transportmasse) in kJ/(km kg) für verschiedene Transportsysteme.

Die menschliche Dimension der Fahrradtechnologie ist u. a. in der Begrenzung der eingesetzten Energien auf ein menschliches Maß begründet. Sie ging mit der Ersetzung des Menschen durch den Verbrennungsmotor verloren. Die Motorisierung ist aber zumindest in den Industrienationen an einem Punkt angelangt, da ihr Grenznutzen negativ zu werden beginnt (ILLICH 1977). Heute werden daher wenn auch zaghafte Versuche unternommen, dem Fahrrad seine Bedeutung beispielsweise für einen menschlichen, ökologisch und ökonomisch vernünftigen Stadtverkehr zurückzugeben.

Wie bei der Fortbewegung durch Laufen ist auch beim Fahrradfahren der menschliche Organismus der »Motor des Transportsystems« und wird durch das menschliche Leistungsprofil (Tab. 10) bestimmt. Mit dem Fahrrad vermag der Mensch aber seine Fortbewegungsfähigkeiten so zu steigern, daß er die natürliche Evolution überflügelt (vgl. Abb. 21).

### 2.1.1 Energetik des Radfahrens

Die beim Fahrradfahren aufzubringende Energie bzw. Leistung hängt u. a. vom Luftwiderstand, der Rollreibung zwischen Laufrädern und Boden, von Getriebe- und Schwingungsverlusten und im Falle von Steigungen von der dabei zu verrichtenden Hubarbeit ab. Weitere Einflüsse wie Straßenoberfläche, Luftdruck der Reifen usw. schließen wir im folgenden dadurch aus, daß wir uns auf gleichbleibend harten, glatten Untergrund, fest aufgepumpte Reifen beziehen. Für solche Bedingungen liegen Daten vor (siehe Tab. 11). Außerdem wollen wir unsere Betrachtungen der Einfachheit halber auf ebenes Gelände beziehen, obwohl eine Einbeziehung von Steigungen keine prinzipiellen Schwierigkeiten mit sich bringt.

Unter diesen Bedingungen wird die Fortbewegung mit dem Fahrrad weitgehend durch den Luftwiderstand und die Rollreibung (einschließlich Schwingungsverluste u. ä.) bestimmt. Die Rollreibungskraft ist (nahezu) unabhängig

Tab. 11: Steckbrief eines 28er Tourenrads.

Leistung ( $P_{\max}$ )	hängt vor allem vom Fahrer ab (siehe Tabelle 10)
Leergewicht ( $m_L$ )	20 kg
Gesamtgewicht (m)	90 kg
$c_w$ -Wert	0,9
Frontfläche (A)	0,5 m <sup>2</sup>
Rollwiderstand pro Masse ( $F_{\text{Roll}}/1 \text{ kg}$ )	0,057 $\frac{\text{N}^*}{\text{kg}}$
Kraftstoffverbrauch	je nach Leistungsoutput

\* in diesem Wert sind ebenfalls geschwindigkeitsunabhängige Beiträge von Schwingungsverlusten u. ä. enthalten (nach SHARP 1896).

von der Geschwindigkeit, der Leistungsoutput aufgrund der Rollreibung proportional zur Geschwindigkeit.

Der Luftwiderstand ist proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit  $\vec{v}_{rel} = \vec{v} - \vec{v}_w$ , die der Radfahrer relativ zur Luft (Wind) besitzt ( $\vec{v}$  ist die Geschwindigkeit des Radfahrers,  $\vec{v}_w$  die Windgeschwindigkeit jeweils bezogen auf die Erde). Diese Abhängigkeit kann man sich durch eine einfache Abschätzung veranschaulichen: Der Widerstand, den die Luft auf den Radfahrer ausübt, kommt dadurch zustande, daß der Radfahrer in einer Art unelastischen Stoß die Luft auf Fahrradgeschwindigkeit beschleunigt. Dadurch wird auf die Luft pro Zeiteinheit  $\Delta t$  der Impuls  $\Delta \vec{p} = \Delta m_L \cdot \vec{v}_{rel}$  übertragen bzw. die Kraft

$$\vec{F}_L = \Delta \vec{p} / \Delta t = \Delta m_L \vec{v}_{rel} / \Delta t$$

ausgeübt.  $\Delta m_L$  ist die Masse der Luftsäule der Länge  $v_{rel} \cdot \Delta t$  und vom Querschnitt  $A$  des Radfahrers:

$$\vec{F}_L = \rho \cdot A \cdot v_{rel} \vec{v}_{rel} \quad (49)$$

(Beträge von Vektoren werden durch Weglassen der Pfeile gekennzeichnet.) Dies ist natürlich der ungünstigste Fall. In Wirklichkeit »schlüpft« ein Teil der

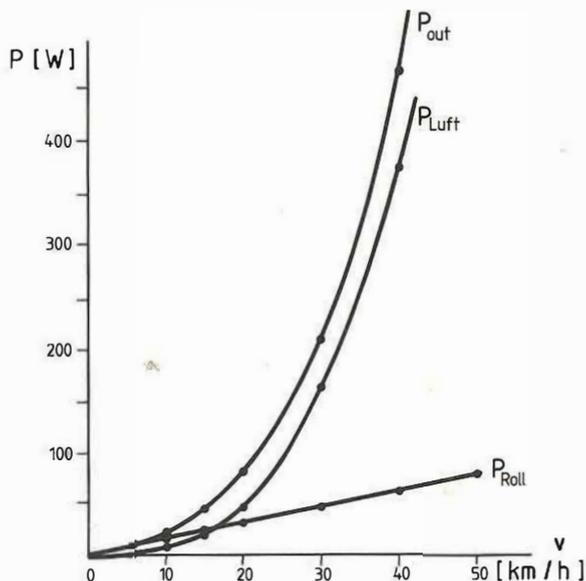


Abb. 22: Leistungsoutput als Funktion der Geschwindigkeit beim Fahrrad.

Luft laminar an den Seiten des Radfahrers vorbei. Das pflegt man üblicherweise durch Einführung einer effektiven Fläche  $A' = \frac{1}{2} c_w \cdot A$  zu berücksichtigen. Dabei ist der Widerstandsbeiwert  $c_w$  eine empirisch zu bestimmende Konstante. Bei aufrechtsitzenden Tourenfahrern hat man für  $c_w$  beispielsweise den Wert 0,9 ermittelt (SHARP 1896). Die Querschnittsfläche  $A$  beträgt im Durchschnitt  $0,5 \text{ m}^2$ . Vom Fahrrad muß demnach insgesamt die Leistung

$$P = (\vec{F}_{\text{Roll}} + \vec{F}_{\text{Luft}}) \vec{v} = \vec{F}_{\text{Roll}} \vec{v} + \frac{1}{2} \rho c_w A \cdot v_{\text{rel}} \cdot \vec{v} \cdot \vec{v}_{\text{rel}} \quad (50)$$

aufgebracht werden. Bei Windstille,  $v_w = 0$ , (davon soll in folgenden ausgegangen werden), erhält man demnach folgende einfache Formel:

$$P = P_{\text{Roll}} + P_{\text{Luft}} = F_{\text{Roll}} v + \frac{1}{2} \rho c_w A \cdot v^3 \quad (51)$$

In Abb. 22 wurde der Leistungsoutput aufgrund der Rollreibung  $P_{\text{Roll}}$  und des Luftwiderstandes  $P_{\text{Luft}}$  sowie als deren Summe der gesamte Leistungsoutput  $P_{\text{out}}$  aufgetragen. Wie man rein qualitativ erwartet, ist bei niedrigen Geschwindigkeiten die Leistungsabgabe aufgrund der Rollreibung dominierend. Bei einer Geschwindigkeit von 15,5 km/h sind beide Anteile gleich stark. Bei höheren Geschwindigkeiten nimmt der Luftwiderstandsanteil so stark zu, daß der Rollreibungsanteil zunehmend unbedeutend wird. Schon bei  $v = 30$  km/h, einer Geschwindigkeit, die man noch über eine Stunde durchhalten könnte (vgl. Tab. 10), macht der Rollreibungsanteil nur noch etwa 20% des Leistungsoutputs aus. Daraus kann man folgern, daß bei höheren Geschwindigkeiten die Qualität des Fahrrads nebensächlich wird. Da offenbar nur die Rollreibung von der Masse abhängt, hat es den Anschein, als spielte auch die Masse des Rades keine Rolle. Für ebenes Gelände ist das durchaus richtig. I. a. hat man es aber mit mehr oder weniger großen Steigungen zu tun. In einem solchen Fall ist die Masse natürlich nicht zu vernachlässigen, wie man sehr schnell merkt, wenn man mit einem vollbeladenen Fahrrad einen Berg hochradelt. Von Steigungen soll jedoch im folgenden abgesehen werden.

Interessante Variationen der hier angestellten Betrachtungen ergeben sich auch, wenn man den Windeinfluß berücksichtigt. Wegen der starken Abhängigkeit der Fahrleistung von der Geschwindigkeit relativ zur Luft, haben kleine Windgeschwindigkeitsänderungen bereits großen Einfluß auf die Fahrgeschwindigkeit.

Unterdrückt man den Luftwiderstand z. B. dadurch, daß man im Windschatten z. B. eines Kraftfahrzeugs fährt, so hat man nur die Leistung aufgrund der Rollreibung aufzubringen. Mit einem Leistungsoutput von beispielsweise 114 W, den man für mehrere Stunden erbringen könnte (Tab. 10), würde man eine Geschwindigkeit von 80 km/h erreichen.

### 2.1.2 Messungen am Fahrrad

Was bislang rein theoretisch abgeleitet wurde, läßt sich am Fahrrad auch ohne großen Aufwand durch entsprechende Messungen ermitteln und gegebenenfalls bestätigen. Eigene Messungen am Fahrrad zusammen mit vielfältigen »körperlichen« Erfahrungen beim Fahrradfahren können ein unmittelbares Gefühl für Energieumsetzungen vermitteln, was u. E. als eine Voraussetzung für ein vertieftes Verständnis der Energie auch in anderen Bereichen und für energiebewußtes Handeln angesehen werden muß.

Die einfachste, von der radfahrenden Person (ausgestattet mit Stoppuhr und ggf. – zur einfachen Registrierung der Daten – einem Diktiergerät) allein durchzuführende Meßmethode besteht darin, ein mit einem Tachometer versehenes Fahrrad auf eine bestimmte möglichst hohe Geschwindigkeit zu bringen (z. B. 30 km/h). Man läßt das Rad ausrollen und mißt die Zeiten, die vergehen, bis sich die Geschwindigkeit des nun antriebslos ausrollenden Fahrrads auf z. B. 25 km/h, 20 km/h usw. verringert hat. Aus den den so ermittelten Geschwindigkeiten  $v_i$  entsprechenden kinetischen Energien  $E_i$  und den gemessenen Zeiten  $\Delta t_i$ , die zwischen  $v_i$  und  $v_{i+1}$  verstrichen sind, bestimmt man die entsprechenden mittleren Leistungsabgaben (Leistungsoutput)

$$P_i = (E_i - E_{i+1})/\Delta t_i . \quad (52)$$

*Weiterführende Literatur:* Weitere Angaben zu im Physikunterricht durchführbaren Messungen findet man bei SCHLICHTING et al. (1981, S. 89 ff.).

## 2.2 Transportsystem Kraftfahrzeug

Das Kraftfahrzeug (bzw.: Kfz, Auto) mit Verbrennungsmotor als Antrieb hat seit seiner Erfindung vor etwa 100 Jahren alle möglichen Konkurrenten im Bereich des Personen- und Gütertransports weit in den Schatten gestellt und ist bereits in Bereiche vorgedrungen, die natürlicherweise als Domäne des Fahrradfahrers und Fußgängers gelten: Wege unter drei Kilometer Länge werden zu 40% mit dem Auto »bewältigt« (WIRTSCHAFTSWOCHE 1979).

Der Antrieb des Autos wird durch eine Wärmekraftmaschine besorgt (vgl. Kap. V, 3.1). Sie verwandelt die im Benzin oder Diesel gespeicherte chemische Energie durchschnittlich zu etwa 15% in hochwertige Bewegungsenergie und entwertet etwa 85% vor allem über den Kühler in thermische Energie der Umgebung. Die Prognosen über die absehbare Erschöpfung der Erdölvorräte hat in der ganz und gar auf Erdöl angewiesenen Autobranche enorme Einsparungsbemühungen in Gang gesetzt, die allerdings bei den immer schon auf Wirtschaftlichkeit ausgerichteten europäischen Fahrzeugen nicht so stark zu

Buche schlagen wie etwa bei den amerikanischen. Die heute hergestellten Kraftfahrzeuge stellen ein vorläufiges Ergebnis dieser Bemühungen dar.

### 2.2.1 Energetik des Kraftfahrzeugs

Als Vertreter eines typischen europäischen PkW's sei im folgenden der VW-Golf betrachtet. Das energetische Verhalten des Wagens läßt sich ähnlich untersuchen wie das des Fahrrads. Sieht man wiederum von Steigungen, Windinflüssen usw. ab, so sind auch hier Luftwiderstand und Rollreibung die die Energetik bestimmenden Faktoren. Nach derselben Modellvorstellung, wie wir sie beim Fahrrad zugrundegelegt haben (Formel (51)), kommt man zu dem in Abb. 23 dargestellten Zusammenhang zwischen Leistungsoutput  $P_{out}$  und Geschwindigkeit. Ähnlich wie beim Fahrrad wird der Leistungsoutput bei niedrigen Geschwindigkeiten durch die Rollreibung bestimmt; bei höheren Geschwindigkeiten dominiert der Leistungsoutput aufgrund des Luftwiderstands. Wegen der größeren Rollreibung und der im Durchschnitt höheren Geschwindigkeiten des Autos bezieht sich der Vergleich auf einen entsprechend höheren Geschwindigkeitsbereich: Erst bei 90 km/h sind im vorliegenden Beispiel Rollreibungs- und Luftwiderstandseinfluß auf den Leistungsoutput gleich groß. Angesichts des hohen Anteils von Fahrten unterhalb von 90 km/h ist die Rollreibung ein großer »Energiefresser«. Wegen der Proportionalität der Rollreibungskraft zur Masse spielt also u. a. die Reduzierung der Masse unserer Autos für künftige Energieeinsparungen eine wichtige Rolle; ganz abgesehen von der dadurch reduzierten Hubarbeit bei Steigungen.

Tab. 12:

Steckbrief des VW Golf GLS										
Leistung ( $P_{max}$ )	51 kW									
Beschleunigung von 0 auf 100 km/h	10 sec									
Leergewicht ( $m_L$ )	750 kg									
Gesamtgewicht (m) (ein Fahrer)	820 kg									
$c_w$ -Wert ( $c_w$ )	0,42									
Frontfläche (A)	1,8 m <sup>2</sup>									
Rollwiderstand ( $F_{Roll}$ )	267 N									
Kraftstoffverbrauch pro 100 km	<table style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr> <td style="font-size: 2em; vertical-align: middle;">{</td> <td>bei 90 km/h</td> <td>6,3 l</td> </tr> <tr> <td></td> <td>bei 120 km/h</td> <td>9,0 l</td> </tr> <tr> <td></td> <td>im Stadtverkehr</td> <td>11,0 l</td> </tr> </table>	{	bei 90 km/h	6,3 l		bei 120 km/h	9,0 l		im Stadtverkehr	11,0 l
{	bei 90 km/h	6,3 l								
	bei 120 km/h	9,0 l								
	im Stadtverkehr	11,0 l								

Die unter den hier betrachteten Bedingungen (Windstille, keine Steigung) maximale Geschwindigkeit  $v_{max}$  wird erreicht, wenn das Fahrzeug die maximale Leistung  $P_{max}$  »auf die Straße bringt«. Durch Einsetzen des jeweils bekannten Wertes für  $P_{max}$  in Formel (51):

$$P_{\max} = F_{\text{Roll}} v_{\max} + \frac{1}{2} c_w A v_{\max}^3,$$

läßt sich  $v_{\max}$  bestimmen. Im vorliegenden Fall erhalten wir für  $P_{\max} = 51 \text{ kW}$  eine Endgeschwindigkeit von etwa  $v_{\max} = 156 \text{ km/h}$ .

*Ergänzung:* Die bisherigen Betrachtungen beschränken sich auf gleichförmige Bewegungen, also auf jene quasistationären Bewegungszustände, bei denen ein gegebener Leistungsoutput unter Überwindung der Reibungskräfte eine jeweils konstante Geschwindigkeit aufrechterhält. Mehr noch als beim Fahrrad dürfte beim Auto darüberhinaus die Frage interessant sein, wie schnell, d. h. innerhalb welcher Zeit  $\Delta t$ , eine Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$  zu realisieren ist. In der Tat gehört das Beschleunigungsvermögen zu den wesentlichen Qualitätsmerkmalen eines Autos.

Die Beschleunigung  $a$  wird durch eine kontinuierliche Erhöhung der kinetischen Energie des Autos hervorgerufen und zwar dadurch, daß die insgesamt pro Weglänge  $\Delta s$  aufgebrauchte Energie, die sog. Antriebskraft  $F_{\text{An}} = E_{\text{An}}/\Delta s$ , größer ist als  $F_{\text{Reib}} = E_{\text{Reib}}/\Delta s$ , also diejenige Energie, die zur Überwindung der Reibung pro Weglänge notwendig ist. Damit steht die Differenz

$$F = ma = F_{\text{An}} - F_{\text{Reib}}$$

zur Beschleunigung des Fahrzeugs der Masse  $m$  zur Verfügung. Um genauere Aussagen über das Verhalten von  $a$  machen zu können, muß man einiges über das Verhalten von

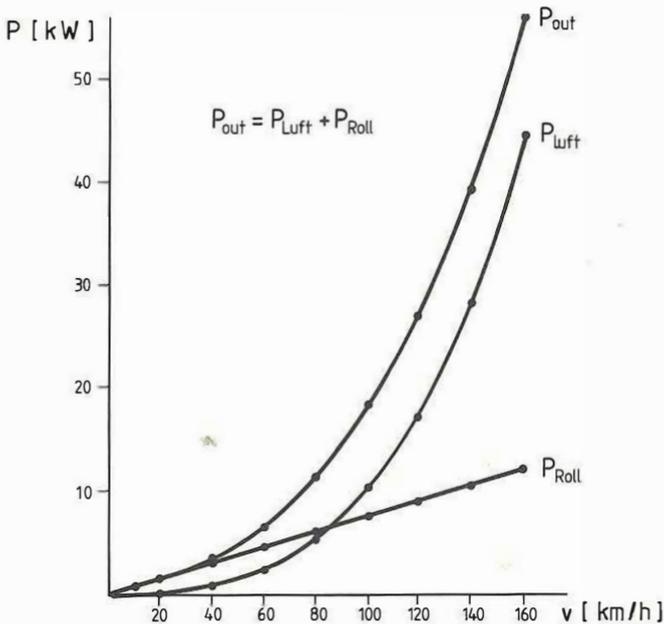


Abb. 23: Leistungsoutput eines VW-Golf als Funktion der Geschwindigkeit. Aufgetragen sind  $P_{\text{Roll}}$ ,  $P_{\text{Luft}}$  und die Summe aus beiden  $P_{\text{out}}$ .

$F_{An}$  während des Beschleunigungsvorgangs wissen. In grober Annäherung an die Realität nehmen wir an, daß die maximale Leistung  $P_{max}$  konstant zur Verfügung steht, so daß mit der jeweiligen Geschwindigkeit  $v$

$$F_{An} = P_{max}/v$$

gegeben ist.

Daraus berechnet sich die Beschleunigung  $a$  zu

$$a = (P_{max}/v - F_{Reib})/m .$$

Setzt man für

$$F_{Reib} = P_{Reib}/v = F_{Roll} + \frac{1}{2} \rho \cdot c_w \cdot A \cdot v^2$$

ein, so erhält man

$$a = (P_{max}/v - F_{Roll} - \frac{1}{2} \rho \cdot c_w \cdot A \cdot v^2)/m . \quad (53)$$

Die Beschleunigung nimmt demnach bei möglichst voller Leistungsabgabe des Wagens mit wachsendem  $v$  sehr stark ab, weil einerseits die Antriebskraft wie  $1/v$  abnimmt und andererseits die Reibungskraft stärker als mit  $v$  zunimmt, um schließlich bei Erreichen der Maximalgeschwindigkeit ganz zu verschwinden. Aufgrund dieser Beschreibung (53) läßt sich die Zeit  $\Delta t$ , die das Fahrzeug benötigt, um beispielsweise von  $v = 0$  km/h auf  $v = 100$  km/h ( $\triangleq 27,8$  m/s) zu beschleunigen, abschätzen:

$$dt = dv/a .$$

Integration liefert:

$$\Delta t = m \int_0^{27,8} [(vdv/(P_{max} - F_{Roll}v - \frac{1}{2} \rho c_w \cdot Av^3))] . \quad (54)$$

Setzt man die Werte für den hier betrachteten VW-Golf ein, so erhält man  $\Delta t \approx 8$  s.

In Wirklichkeit mißt man eine Zeit  $\Delta t = 10$  s. Die Unterschätzung aufgrund unserer Rechnung war allerdings zu erwarten. Denn aufgrund der Begrenzung der Haftreibung zwischen Straße und Reifen, (deren Überschreitung die Reibung und damit die Antriebskraft drastisch herabsetzen würde: Durchdrehen der Räder), ergibt sich eine Begrenzung der Antriebskraft  $F'_{An} \leq \mu mg$  ( $g =$  Erdbeschleunigung,  $\mu =$  Haftreibungskoeffizient; in unserem Fall sei  $\mu = 0,6$ ) und damit der Antriebsleistung  $P_{An} = F'_{An} \cdot v + P_{Reib} \leq P_{max}$ . Demzufolge kann erst ab  $v = 36$  km/h die volle Leistung  $P_{max}$  entfaltet werden.

**Aufgabe:** Berechnung der Beschleunigungszeit von 0 auf 100 km/h durch Berücksichtigung dieser Anfangsphase. Welche Idealisierungen sind in diesem verfeinerten Modell enthalten?

Wichtiger noch als das schnelle Erreichen hoher Geschwindigkeiten ist die Möglichkeit, beispielsweise in Gefahrensituationen die in der Bewegung gespeicherte Energie auf möglichst kurzer Strecke wieder loszuwerden, zu bremsen. Hier spielt der Haftreibungskoeffizient  $\mu$  eine entscheidende Rolle: Er begrenzt die Energieentwertungsrate. Überschreitet nämlich die Bremskraft den Wert  $F'_{An} = \mu mg$ , so blockieren die Räder, und das Auto beginnt zu gleiten. Der entsprechende Gleitreibungskoeffizient ist aber i. a. sehr viel kleiner als der Haftreibungskoeffizient, so daß dadurch die Bremskraft stark herabgesetzt wird. Der Bremsvorgang wird durch Rollreibungs- und Luftwider-

standskraft unterstützt. Allerdings ist ihr Beitrag i. a. von untergeordneter Bedeutung: Wie man für den VW-Golf leicht nachrechnet, beträgt die Verzögerung  $a'$  bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h knapp  $0,8 \text{ m/s}^2$ , bei 50 km/h nurmehr  $0,4 \text{ m/s}^2$ , wohingegen bereits bei normalen Bremsen eine Verzögerung von  $3 \text{ m/s}^2$ , bei Vollbremsung, (d. h. Entfaltung des vollen Wertes  $\mu = 0,6$ ) sogar eine Verzögerung  $a' = \mu g = 6 \text{ m/s}^2$  auftritt. Dabei wird in jeder der vier Bremsstrommeln eine Leistung von

$$P_{\text{Brems}} = \frac{1}{4} m a' \cdot v$$

umgesetzt; das sind bei  $v = 100 \text{ km/h}$  für den VW-Golf 34 kW. Der Fahrtwind sorgt dafür, daß diese enorme Leistung genügend schnell an die Umgebung abgeführt wird.

### 2.2.2 Wirkungsgrad und Verbesserung des Leistungsoutputs

Entsprechend der Definition des Wirkungsgrads  $\eta$  (Kap. IV, 2.1; Verhältnis aus Nutzen und Aufwand) ist der Gesamtwirkungsgrad des Kraftfahrzeugs gleich dem Quotienten:

$$\eta = P_{\text{out}}/P_{\text{in}}$$

( $\eta$  ist das Produkt aus verschiedenen Einzelwirkungsgraden, von denen der mechanische Wirkungsgrad  $\eta_m$  des Kraftfahrzeugmotors mit typisch 25–30% die dominierende Größe ist).

Aus den in Abb. 23 und 26 enthaltenen Zahlenangaben für  $P_{\text{out}}$  und  $P_{\text{in}}$  ermittelt man den in Abb. 24 aufgetragenen Wirkungsgrad  $\eta$  für den VW-Golf in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Für mittlere Geschwindigkeiten ist  $\eta$  am größten. Im vorliegenden Fall liegt  $\eta_{\text{max}}$  zwischen etwa 15% und 25%. Da der Berechnung Zahlen zugrunde liegen, die aus idealisierten Bedingungen (konstante Geschwindigkeiten, kein Leerlaufbetrieb usw.) gewonnen wurden,

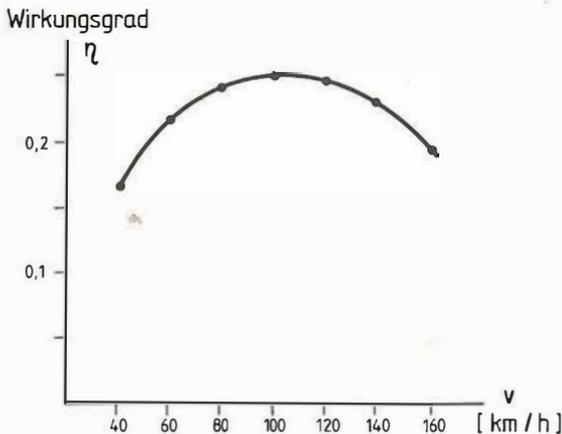


Abb. 24: Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit beim VW-Golf.

liegt der Wirkungsgrad realistischerweise im Durchschnitt bei 15%. Infolge des Energieschocks sind allerdings Entwicklungen einganggesetzt worden, die u. a. auf eine weitere Verbesserung des Wirkungsgrads abzielen:

- Wegen seines höheren Wirkungsgrads  $\eta_m$  gewinnt der Dieselmotor zusehends an Bedeutung.
- Möglichkeiten, den Motor im günstigen Drehzahlbereich (in dem der Wirkungsgrad optimal ist) zu betreiben, werden erwogen: A. LOWINS (1979) schlägt dazu Autos vor, in denen günstig laufende Dieselmotoren elektrische Generatoren und diese wiederum über Speicherbatterien Elektromotoren betreiben. Man müßte überprüfen, inwieweit die mit den zahlreichen Energieumwandlungen verbundenen Entwertungen, die Wirkungsgradverbesserung wieder aufheben.
- Neue Kraftstoffe, insbesondere Alkohol, Wasserstoffgas und verschiedene Gemische werden geprüft und sind z. T. bereits im Einsatz (SEIFFERT 1981).

Darüberhinaus lassen sich noch erhebliche Einsparungen durch Verminderung des Leistungsausgangs pro Kilometer erreichen und zwar vor allem durch Leergewichtsverminderung (Verminderung der Rollreibung) und Verbesserung des  $c_w$ -Wertes (Verminderung des Luftwiderstands) (GRAY et al. 1981). Wenn beispielsweise beim VW-Golf, wie beabsichtigt, das Leergewicht auf 650 kg und der  $c_w$ -Wert auf 0,3 herabgesetzt würden (KLINKENBERG 1979), käme man unter ansonsten unveränderten Bedingungen (insbesondere unveränderter Rollwiderstand/Masseneinheit und unveränderter mechanischer Wirkungsgrad  $\eta_m \approx 0,25$ ) z. B. bei einer Geschwindigkeit von 90 km/h gemäß Gl. (51) zu einer Verminderung der Transportkosten (siehe unten) und damit zu Energieeinsparungen von etwa 21%. Eine weitere Folge davon wäre die Vergrößerung der Leistungsreserven für Steigungen, Gegenwind und Beschleunigungen bzw. die Möglichkeit, die Nennleistung des Kfz herabsetzen zu können.

### 2.3 Transportkosten

Um so verschiedene »Systeme« wie Mensch, Fahrrad und Auto unter dem Gesichtspunkt des Energieverbrauchs vergleichen zu können, wollen wir eine Größe zur Bestimmung der Transportkosten einführen:

$$\varepsilon = E_{in}/s = P_{in}/v$$

$E_{in}$  bzw.  $P_{in}$  bezeichnen den Energie- bzw. Leistungsinput, d. h. die für den Transport insgesamt aufzubringende Energie bzw. Leistung,  $s$  ist die dabei zurückgelegte Strecke und  $v$  die eingenommene Geschwindigkeit. Nur so läßt sich die aufgrund unterschiedlicher Wirkungsgrade der einzelnen Systeme unterschiedliche Energieentwertung mit berücksichtigen.

Für manche Probleme erweist es sich darüberhinaus als zweckmäßig, die Transportkosten auf die transportierte Masse  $m$  zu beziehen, also

$$\epsilon' = \epsilon/m$$

zu betrachten.

Beim Kraftfahrzeug haben wir daher die chemische Energie des verbrauchten Benzins in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit zu betrachten (Abb. 26). Auch für den Radfahrer ließe sich der Verbrauch der chemischen Energie der Nahrungsmittel durch Messung des verbrauchten Sauerstoffs feststellen (siehe Kap. IX, 1.1). Wir werden in diesem Fall aber der Einfachheit halber den Leistungsinput unter der Voraussetzung eines konstanten Wirkungsgrads des Organismus' von  $\eta = 25\%$  und Grundumsatzes von 100 W aus dem nach Gl. (48) bestimmten Leistungsoutput berechnen:

$$\epsilon = P_{in}/v = 4 \left( F_{Roll} + \frac{1}{2} \rho c_w A v^2 + 25 \text{ W}/v \right) \quad (55)$$

$\epsilon$  und  $\epsilon'$  besitzen bei  $v \approx 13 \text{ km/h}$  ein Minimum (wie sich durch Extremwertberechnung leicht zeigen läßt (siehe Abb. 25)). Es gibt also eine Geschwindigkeit bzw. – wegen des Abschätzungscharakters der hier angestellten Rechnungen – einen Geschwindigkeitsbereich um 13 km/h, bei dem unser Standardradfahrer (gemäß Tab. 11) am günstigsten fährt: Die Transportkosten (in Form von chemischer Energie) sind hier minimal. Sie betragen knapp 62 kJ/km bzw. 0,9 kJ/(km · kg). Daß sie mit höheren Geschwindigkeiten stark zunehmen, liegt an der überproportionalen Zunahme des Luftwiderstands. Bei niedrigen Geschwindigkeiten fällt der Grundumsatz relativ stark ins Gewicht und bedingt, daß die Transportkosten wieder anwachsen.

### 2.3.1 Fußgänger und Fahrrad

Wie aus Abb. 20 hervorgeht, bewegt sich der Radfahrer verglichen mit Tieren und vielen Maschinen mit den geringsten Transportkosten fort. Ein Fußgänger, der am effektivsten mit einer Geschwindigkeit von 6,3 km/h läuft, braucht pro Kilometer immerhin 258 kJ. Das ist mehr als das Vierfache der Transportkosten des Radfahrers bei nur etwa halb so großer Geschwindigkeit (Abb. 25). Selbst bei einer dreifach so hohen Geschwindigkeit ist der Radfahrer noch mehr als dreimal so wirtschaftlich wie der Fußgänger. Sich so unwirtschaftlich wie der Fußgänger fortzubewegen, wird – wie ein Blick auf Abb. 25 zeigt – dem Radfahrer schwerfallen. Da er aufgrund seiner begrenzten Leistungsfähigkeit

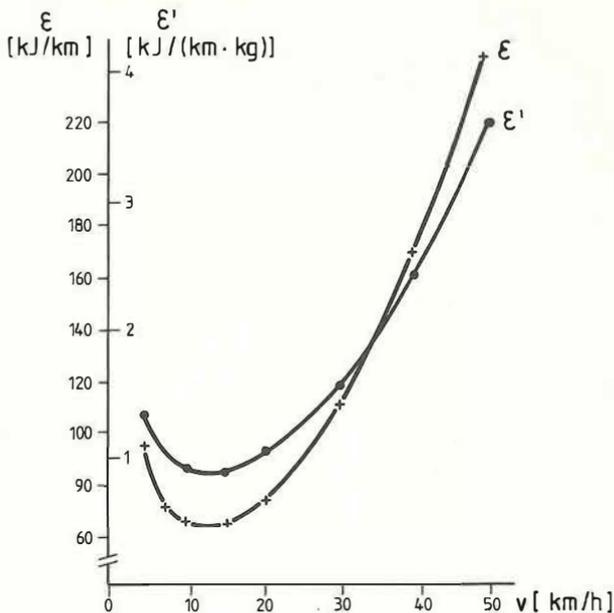


Abb. 25: Transportkosten  $\epsilon$  und  $\epsilon'$  in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit  $v$  beim Fahrrad. (Erläuterung siehe Text).

nicht so schnell fahren kann, daß er unwirtschaftlich fährt, müßte er es schon bei sehr kleinen Geschwindigkeiten versuchen.

*Ergänzung:* Daß ein Fahrradfahrer sich so viel effektiver fortbewegen kann als jemand der läuft, liegt hauptsächlich an der Art und Weise, wie die Muskeln eingesetzt werden. Beim Laufen wird sehr viel isometrische Arbeit verrichtet; d. h. Energie aufgewandt, die sich in keiner äußeren Wirkung zeigt und damit für die Fortbewegung verloren ist: Die Beinmuskeln müssen den gesamten Körper in einer aufrechten Position halten, den Körper heben und senken sowie die Schenkel beschleunigen und verzögern. Demgegenüber spart der Radfahrer diese Energie weitgehend ein: Durch das Sitzen wird den Beinmuskeln erspart, den Körper zu unterstützen. Nur die Knie und Schenkel bewegen sich hin und her und bewirken, daß die Füße ruhig und mit konstantem Tempo kreisen. Aber selbst die damit verbundene Beschleunigung und Verzögerung der Beine wird sehr effektiv durchgeführt, denn das sich jeweils hochbewegende Bein braucht nicht hochgehoben zu werden; es wird durch das heruntergedrückte Bein angehoben (vgl. WILSON 1973, S. 83).

Es ist natürlich klar, daß dieser rein energetisch motivierte Vergleich wesentliche Aspekte vernachlässigt. So setzt beispielsweise das Fahrrad relativ ebene »Fahrbahnen« voraus (diese Bedingung ist beim Kraftfahrzeug noch ausgeprägter); in unebenem Gelände kann das Laufen wieder vorteilhafter sein.

### 2.3.2 Auto und Fahrrad

Die Transportkosten hängen beim Kfz entscheidend vom Fahrverhalten ab.

- Fahrten, bei denen die Geschwindigkeit durch Beschleunigungen und Bremsen häufig geändert werden,
- häufiges Warten an Kreuzungen und Ampeln,
- Fahren im ungünstigen Drehzahlbereich usw.

erhöhen die Transportkosten entscheidend, weil dem dadurch erhöhten Energieverbrauch keine Kilometerleistung entspricht. Um zu nachprüfaren Aussagen zu kommen, werden bei Tests zur Feststellung des Kraftstoffverbrauchs entsprechende Standardbedingungen eingehalten. Die Verbrauchszahlen und die mit ihnen gewonnenen Ergebnisse weichen daher mehr oder weniger weit von der Realität ab. In Abb. 26 haben wir die Energiekosten  $\epsilon$  aufgrund der Angaben über den Kraftstoffverbrauch bei verschiedenen Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit aufgetragen. Verglichen mit den Transportkosten beim Fahrrad (siehe Abb. 25) erkennt man einen qualitativ ähnlichen Kurvenverlauf. (Auch beim Auto nimmt  $\epsilon$  bei niedrigen Geschwindigkeiten wieder zu). Absolut unterscheiden sich die Transportkosten aller-

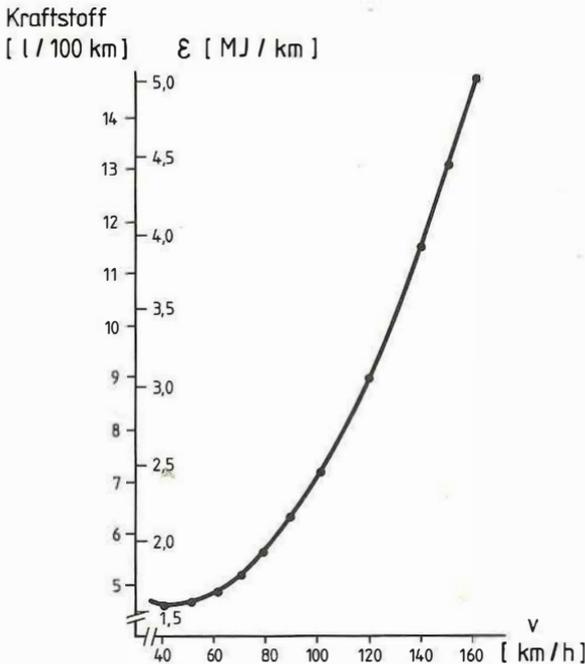


Abb. 26: Abhängigkeit des Kraftstoffverbrauchs bzw. der Transportkosten  $\epsilon$  von der Geschwindigkeit für den VW-Golf (nach LEE 1977, S. 209).

dings erheblich. Im Bereich vergleichbarer Geschwindigkeiten (Beim Kfz stehen uns für Geschwindigkeiten unter 40 km/h keine Zahlen zur Verfügung. Wir legen daher auch für diesen Bereich den Wert für  $v = 40$  km/h zugrunde.) liegen die Transportkosten bei einem der sparsamsten Kfz', erhoben unter günstigen Bedingungen, immerhin um den Faktor 25–30 höher als beim Fahrrad. Realistischerweise dürften sie noch viel höher liegen. Berücksichtigt man noch, daß der Nahrungsmittelenergieverbrauch im Unterschied zum Benzinverbrauch das nationale Energiebudget normalerweise nicht zusätzlich belastet, so können diese Transportkosten praktisch vernachlässigt werden. Zugunsten des Transports mit dem Auto wird die durch die Transportkosten nicht erfaßte Möglichkeit angeführt, sich sehr viel schneller fortbewegen zu können. Dies macht sich umso stärker bemerkbar, je weiter die zurückgelegten Entfernungen sind. Für die meisten Wege, nämlich mindestens für die 70,9% aller Wege, die unter 6 km lang sind und die überwiegend mit dem Auto zurückgelegt werden, gilt dieser Vorteil nicht mehr, insbesondere dann nicht, wenn man bedenkt, daß gerade für diese Wege in den meisten Fällen die Möglichkeit höherer Geschwindigkeiten ohnehin nicht mehr gegeben ist (vgl. ILLICH 1977, S. 26).

Bislang haben wir bei den Transportkosten lediglich die Energie des verbrauchten Kraftstoffs zugrundegelegt. Realistischerweise müßten auch noch die Energiekosten für Pflege, Ölwechsel, Reparatur und vor allem für die Herstellung einbezogen werden.

Berücksichtigt man außer den reinen Transportkosten nur noch die Herstellungskosten (siehe Kap. IV, 2.3), die pro Auto durchschnittlich mit 146 GJ (146 Mill. kJ) angegeben werden (FELS et al. 1973), so kommt man, eine Fahrleistung von 100 000 km vorausgesetzt, zu über 40% höheren Transportkosten:

Für 100 000 km verbraucht ein Kfz (bei 10 l/100 km) etwa 340 GJ (340 Mill. kJ) an Kraftstoffenergie. Einschließlich Herstellungsenergie entsprechen dem 4860 kJ/km (bzw. 14,3 l/100 km).

Das Kfz wurde hier natürlich nur hinsichtlich der Fortbewegungsmöglichkeiten von Personen betrachtet. Als Lastentransportmittel ist es anderen Beurteilungskriterien unterworfen und mit anderen Transportmitteln (wie Eisenbahn, Flugzeug, Schiff) zu vergleichen (siehe Tab. 3).

### 3 Energiesystem Haushalt

Bereits bei der Betrachtung des Menschen als Energiesystem wurde deutlich, daß zur Aufrechterhaltung einer funktionellen Ordnung nicht die Zufuhr irgendeiner (hochwertigen) Energieart ausreicht. Es muß sich um chemische Energie handeln, die dem Organismus in Form von Stoffen (Lebensmittel, Sauerstoff) zugeführt wird, wobei die Stoffe, neben ihrer Eigenschaft Energieträger zu sein, gewisse nichtenergetische Funktionen zu übernehmen haben. Auch zum Betrieb eines Haushalts ist die Zufuhr von Energie *und* Stoffen notwendig. Dem bundesrepublikanischen Haushalt wird Energie in Form von Elektrizität und/oder Erdöl bzw. Erdgas und/oder Fernwärme (warmes Wasser) sowie zu einem geringen Teil als Nahrungsmittel für die Bewohner zugeführt. Bei den Stoffen handelt es sich über die bereits als Energieträger genannten hinausgehend um Trinkwasser, Sauerstoff sowie um hochwertige, teilweise unter Einsatz beträchtlicher Energiemengen hergestellte Verbrauchsgüter wie Möbel, Verpackungen von Lebensmittel, Zeitungen u. ä. Abgegeben wird verbrauchte bzw. entwertete Energie u. a. durch Wärmeleitung und -strahlung zwischen Hauswänden, -fenstern, Dach und der Umgebung, durch erwärmtes Abwasser und erwärmte Abgase. Die Stoffe verlassen das Haus ebenfalls entwertet in Mülleimern und Abwässern, wobei hier die Tatsache unberücksichtigt bleiben soll, daß Verbrauchsgüter i. a. unterschiedlich lange im Haus bleiben (Abb. 20).

Die gesamte Entwertung wird betrieben, um den Haushalt in einem hochorganisierten Zustand zu halten, u. a. um den dort wohnenden Menschen das Leben angenehmer zu machen, beispielsweise durch Schutz vor Kälte und andere das Leben beeinträchtigende Umwelteinflüsse.

#### 3.1 Durchschnittlicher Energieverbrauch im Haushalt

1978 wurden etwa 39,1% der Primärenergie in den 23 Mill. Haushalten und Kleinbetrieben der Bundesrepublik verbraucht. Davon entfielen 89% auf die Heizung des Hauses, 7% auf die Warmwasserversorgung, 3% auf den Betrieb elektrischer Hausgeräte und 1% auf die Beleuchtung. Auffallend ist, daß trotz der Tatsache, daß die Heizung des Hauses überwiegend auf das Winterhalbjahr beschränkt ist, 96%(!) der Energie in Niedertemperaturwärme umgewandelt werden mußten. Angesichts der Tatsache, daß dafür fast ausschließlich hochwertige chemische Energie vorwiegend in Form von Heizöl aufgewandt wird, dürfte die Energieverschwendung in diesem Bereich besonders groß sein. Wir wollen uns daher exemplarisch auf eine Beschreibung der Energetik des Heizens beschränken.

### 3.2 Energieentwertung bei der Raumheizung

Bei der Raumheizung würde man mit relativ minderwertiger Energie auskommen, z. B. mit Niedertemperaturwärme in Form von warmem Wasser, das von einem Wärmekraftwerk bei einer Temperatur abgegeben wird, die im Bereich der Heizkörpertemperatur liegt (Wärme-Kraft-Kopplung) (siehe Kap. V, 3.1). Unser Energieversorgungssystem ist jedoch vorerst noch so organisiert, daß auf hochwertige Energiearten (z. B. chemische Energie in Form von Heizöl) zurückgegriffen werden muß. Man könnte jedoch die Energieentwertung, die mit dem Verbrauch der chemischen Energie des Öls verbunden ist, weitergehender nutzen, als man es mit der Erwärmung von Wasser auf Heizkörpertemperatur durch Verbrennung von Öl tut.

Würde man nämlich mit dem Öl eine Wärmepumpe betreiben, so könnte man wie in Kap. V, 11 ausgeführt, zusätzlich thermische Energie der Umgebung nutzen (z. B. Grundwasser) und dadurch insgesamt mehr Energie an die Wohnung abgeben als chemische Energie verbraucht wird. Der Einsatz dafür geeigneter, mit Dieselmotoren arbeitender Wärmepumpen scheitert jedoch noch an Schwierigkeiten, die vor allem organisatorischer und wirtschaftlicher Art sein dürften (siehe z. B. die Studie von JOCHIMSEN et al. 1979). Eine elektrisch betriebene Wärmepumpe würde zu einer ähnlichen Verbesserung der Energieausnutzung führen: Mit 1 kWh elektrischer Energie kann man im Schnitt 3 kWh Wärmeenergie an den zu heizenden Raum abgeben. Stellt man jedoch in Rechnung, daß für die elektrische Energie im Kraftwerk etwa das Dreifache an chemischer Energie eingesetzt werden müßte, so wird klar, daß insgesamt (exergetisch gesehen) kein Vorteil zur normalen Ölheizung besteht.

Eine wirkliche Energieeinsparung wäre zum einen dann gegeben, wenn die elektrische Energie aus Energieträgern (z. B. Uran) gewonnen würde, die im Haus nicht zu verheizen sind. Ein Plädoyer für elektrisch betriebene Wärmepumpenanlagen kann man daher auch als Argument für den Bau weiterer Kernkraftwerke ansehen.

Ein Beitrag zu Energieeinsparungen könnte zum anderen dann von elektrisch betriebenen Wärmepumpen geleistet werden, wenn diese zu Zeiten geringer Kraftwerksausnutzung (z. B. nachts) betrieben würden, d. h. wenn es sich nicht lohnt, die Kraftwerke abzuschalten.

### 3.3 Energieeinsparmöglichkeiten

Auf Einsparmöglichkeiten stößt man, wenn man versucht, Energieentwertungen zu vermeiden, die nicht zu Energieaufwertungen genutzt werden; das heißt konkret: Temperatursprünge sind möglichst gering zu halten. Eine Möglichkeit wurde bereits angedeutet: Anstatt nach dem Prinzip der Ölheizung bei sehr hoher Temperatur entstehende Wärme bei relativ niedriger Heizkörpertempe-

ratur  $T_H$  an das Heizungswasser abzugeben, könnte man mit einer (möglichst Dieselmotor-betriebenen) Wärmepumpe Wärme aus der Umgebung aufnehmen und bei der nicht viel höheren Heizkörpertemperatur  $T_H$  auf das Heizsystem übertragen.

Ein weiterer Temperatursprung besteht darin, daß die Heizkörpertemperatur i. a. viel höher ist als die aufrechtzuerhaltende Raumtemperatur. Er kommt folgendermaßen zustande: Der geheizte Raum verliert ständig Wärme durch Wände usw. an die kalte Außenluft. Dieser Verlust ist proportional zur Fläche der Außenwände und zur Temperaturdifferenz: Je kälter es draußen ist, desto größer sind die Energieverluste. Damit diese Verluste keine Temperaturniedrigung zur Folge haben, muß der Heizkörper die nach außen abgeflossene Energie ständig ersetzen. Seine Temperatur muß daher jeweils so viel über der Zimmertemperatur liegen, daß die dazu nötige Wärmemenge abgegeben werden kann. Da die Wärmeabgabe außerdem mit der Oberfläche des Heizkörpers wächst, läßt sich andererseits die jeweils erforderliche Heizungstemperatur durch Installation möglichst großer Heizkörper, z. B. Fußbodenheizung, herabsetzen und damit der Sprung zwischen Heizkörper- und Zimmertemperatur vermindern (Niedertemperaturheizung). Aber auch dadurch daß man durch eine Verbesserung der Isolierung der Wände, Fenster u. ä. für eine geringere Leistungsabgabe nach außen sorgt, läßt sich die Leistungsabgabe des Heizkörpers und damit die Heizkörpertemperatur senken.

Während jedoch Isoliermaßnahmen in jedem Fall zu Energieeinsparungen führen (da sie die Leistungsabgabe des Raumes nach außen und damit der Heizung an den Raum vermindern), sorgen Niedertemperaturheizungen nur dann für einen Spareffekt, wenn dadurch wirkliche Temperatursprünge und infolgedessen Energieentwertungen verkleinert werden können. Das ist beispielsweise bei einer direkten Ölheizung nicht der Fall, weil die Verminderung der Differenz zwischen Heizkörper- und Raumtemperatur eine entsprechende Erhöhung der Differenz zwischen Heizkörper- und Kesseltemperatur zur Folge hat.

*Versuche:* Mit Hilfe von Kästen veränderbarer Oberfläche, verschiedener Materialien (Isolierstoffe) und deren Dicke, in denen eine Wärmequelle (z. B. Glühlampe) bekannter Leistung und ein Thermometer installiert sind, läßt sich der Wärmedurchgang durch die Wände in Abhängigkeit von den verschiedenen Parametern bestimmen und entsprechende Energieeinsparmöglichkeiten abschätzen. (Weitere Einzelheiten: z. B. ZIMMERMANN (1977 und 1978)). Diese Versuche lassen sich durch die in Kap. V, 11,3 beschriebenen sinnvoll erweitern.

### 3.4 Indirekte Energiebewertungen im Haushalt

Bei genauerer Betrachtung sind die im Haushalt stattfindenden Energiebewertungen und damit die Energieaufwendungen noch größer, als eingangs angegeben wurde. Die »Stoffbewertungen« aufgrund der Verunreinigung von Trinkwasser (Klospülung und andere Abwässer) und des Verbrauchs von Konsumgütern (insbesondere erhebliche Mengen von Verpackungsmaterial) bedeuten im Grunde auch Energiebewertungen. Bei den Abwässern merkt man das spätestens dann, wenn man in Klärwerken unter Einsatz externer Energiequellen eine Reinigung, d. h. eine Trennung des Wassers von den darin enthaltenen Abfallstoffen vornimmt. Entläßt man das Schmutzwasser in die Natur, eine Praxis, die auch heute noch nicht als überwunden gelten kann, so überläßt man die Reinigung letzten Endes der Sonnenenergie. Bei den Konsumgütern tritt der für Herstellung, Transport und Beseitigung nötige Energieverbrauch unter den Sektoren Industrie und Verkehr auf.

Während man den zur Erhaltung der Lebensqualität investierten Energieverbrauch in Grenzen noch zu akzeptieren bereit ist, müssen die Energieausgaben, die zur Herstellung, Verteilung und Beseitigung von Verpackungsmaterialien getätigt werden, wenigstens teilweise unter dem Gesichtspunkt vermeidbarer Energieverschwendungen gesehen werden, insbesondere dann, wenn die energetischen Herstellungskosten für die Verpackung größer sind als für das verpackte Produkt.

*Weiterführende Literatur:* Als wirtschaftspolitische Ergänzung zu der hier auf physikalische Aussagen beschränkten Darstellung sei ein Buch von MEYER ABICH et al. (1979) vorgeschlagen, das den vielsagenden Untertitel »Energieeinsparung als Energiequelle« trägt.

Die Probleme im Zusammenhang mit dem Energieaufwand für Verpackungen werden bei KRAFT (1981) skizziert. Die Problematik der energetischen Amortisation (siehe Kap. IV, 2.3), die im Zusammenhang mit Energieeinsparungen im Haushalt z. B. durch Isoliermaßnahmen gesehen werden muß, findet man bei FRICKE (1981 a). Erfolgversprechende Bemühungen, die Rohstoffe von Verbrauchsgütern in einen sowohl Energie als auch Rohstoff sparenden Kreislauf einzuschleusen (Recycling) und damit eine weitere von der Natur praktizierte Methode (siehe Kap. VIII, 2.4) auszunutzen, werden in einem vom DUTTWEILER INSTITUT (1974) herausgegebenen Sammelband behandelt.

# Literaturverzeichnis

Abkürzungen einiger häufig angegebener Zeitschriften

MNU: Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht

PU: Der Physikunterricht

NIU: Naturwissenschaften im Unterricht-Physik/Chemie

Praxis: Praxis der Naturwissenschaften-Physik

PhuD: Physik und Didaktik

BdW: Bild der Wissenschaft

Sci. Am.: Scientific American

phys.did.: physica didact.

PhiuZ: Physik in unserer Zeit

Umschau: Umschau in Wissenschaft und Technik

AGS/ASA-Programmstudie »Energiequellen für morgen?« Frankfurt: Umschau 1976  
Arbeitsgruppe »Wiederaufbereitung«: Atommüll oder der Abschied von einem teuren Traum · Reinbek: Rowohlt 1977.

BACKHAUS, U.: Die Entropie als Größe zur Beschreibung der Unumkehrbarkeit von Vorgängen. Dissertation, Universität Osnabrück 1982 (unveröffentlicht)

BACKHAUS, U. / SCHLICHTING, H. J.: Die Unumkehrbarkeit natürlicher Vorgänge. Phänomenologie und Messung als Vorbereitung des Entropiebegriffs. In: MNU 34, 153 (1981)

BAEHR, H. D.: Thermodynamik. Berlin usw.: Springer 1981

BAIER, W.: Die Wärmepumpe. In: BdW 15/1, 66 (1978)

BAIER, W.: Endziel muß die völlige Unabhängigkeit vom Erdöl sein. In: Frankfurter Rundschau vom 13. 6. 1981, S. 8

BECKURTS, K.-H. / DIETRICH, G.: Projekt Fernwärme. In: BdW 13/1, 64 (1976)

BERGE, O. E.: Der Wirkungsgrad einer Spielzeugdampfmaschine. In: NIU 29, 329 (1981)

BERGE, O. E.: Spielzeug im Physikunterricht. Heidelberg: Quelle & Meyer 1982

BETZ, A.: Windenergie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen. Göttingen 1926

BÖGER, P.: Photosynthese in globaler Sicht. Naturwissenschaftliche Rundschau 28, 407 (1975)

BOLTENDAHL, U. / HARTH, R.: Wärmetransport auf kaltem Wege. In: BdW 17/4, 44 (1980)

BORSCH, R. / HORNING, L. / KLING, J. / SCHÖBINGER, L.: Nutzung der Windenergie. In: NIU 29, 288 (1981)

BOCKRIS, J. / JUSTI, E.: Wasserstoff-Energie für alle Zeiten. Konzept einer Sonnen-Wasserstoff-Wirtschaft. München: Pfiemer 1980

BORST, W. L. / FRICKE, J.: Unsere Energiesituation – gestern, heute, morgen. PhiuZ 10/2, 35 (1979)

BORST, W. L. / FRICKE: Nutzung der Erdwärme. In: PhiuZ 10/5, 133 (1979 a)

BROCKMEYER, H.: Weitere Versuche mit Silizium-Solarzellen. In: Praxis 28/7, 180 (1979)

BROCKMEYER, H.: Die Nutzung der Sonnenenergie. In: Praxis 28/7, 184 (1979 a)

BROCKMEYER, H.: Sonnenbeobachtung ohne Fernrohr. In: Praxis 28/7, 185 (1979 b)

BROCKT, M.: Ein Sonnenkollektormodell für Unterrichtszwecke. In: NIU 27, 257 (1979)

BUHS, R.: Photovoltaische Solargeneratoren für den terrestrischen Einsatz. In: PU 15/3, 31 (1981)

BUDYKO, M.: Climate and Life. New York: Academic Press 1974

- CFW: CFW-Laborgeräte. Overhoffstr. 175, 4600 Dortmund 76
- CLIFFORD, D. / MC KERSLAKE, D. / WEDDELL: The effect of wind speed on the maximum evaporation capacity in man. In: *Journal of Physiology* 147, 253 (1959)
- COHEN, B. L.: Body weight as an application of energy conservation. In: *American Journal of Physics* 45, 867 (1977)
- CRAWLEY, G. M.: Energy and Environment. In: *Americ. Journ. Phys.* 43, 1036 (1975)
- DANIELS, F.: *Direct Use of the Sun's Energy*. New Haven: Yale University Press 1964
- DELISLE, G. / JUNG, R.: Erdwärmenutzung auch in Deutschland? The exploitation of geothermal energy. In: *Umschau* 76, 651 (1976)
- DOLLINGER, H.: *Die totale Autogesellschaft*. München: Hanser 1972
- DORST, W.: Ein Versuchsmodell zur Ausnutzung der Dampfkraft. In: *NIU* 19/3, 101 (1971)
- DRISLER, F. / HÄGELE, W.: Photosynthese. In: *PhiuZ* 5, 165 (1974)
- DUVE, F.: *Technologie und Politik. Verkehr in der Sackgasse – Kritik und Alternativen*. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt 1979
- DUTTWEILER-INSTITUT (Hrsg.): *Recycling-Lösung der Umweltkrise?* In: *Publikationen in »Brennpunkte« des Gottlieb-Duttweiler-Instituts*. Zürich 1974
- DYSON, F. J.: Energy in the universe. In: *Sci. Am.* 225/2, 51 (1971)
- EATON, B. G. / DE GREER, R. / FREIER, P. H.: The solar constant: a take home lab. In: *Phys. Teacher* 3, 172 (1977)
- EKRUTT, J. W.: *Die Sonne*. Hamburg: Gruner u. Jahr 1981
- ERNST, W.: Zur experimentellen Ermittlung des Wirkungsgrades von Generatoren und Motoren, In: *Physik in der Schule* 16, 124 (1978)
- EULER, K.-J.: Stand und Möglichkeit der Energie-Direktumwandlung. In: *Umschau* 74, 175 (1974)
- FALK, G. / RUPPEL, W.: *Energie und Entropie*. Berlin usw.: Springer 1976
- FARWIG, P. / BACKHAUS, U. / SCHLICHTING, H. J.: Was ist empirisch am Energieerhaltungssatz? In: *Scharmann* 1979, S. 201
- FELS, S. B. / FELS: The Energy of Automobiles. In: *Science and Public Affairs*. December 1973, S. 55
- FETTING, F.: Wasserstoff-Energieträger der Zukunft. In: *Umschau* 74, 467 (1974)
- FEYNMAN, R. P., LEIGHTON, R. B., SANDS, M.: *The Feynman Lectures on Physics*, Vol. I. Reading etc. 1963
- FINDL, E.: Physics and the electric car. In: *The Physics Teacher* 2, 72 (1971)
- FLOHN, H.: Energie und Klima im 21. Jahrhundert: Regieanweisungen eines Wissenschaftlers. In: *BdW* 12/11, 82 (1975)
- FLOHN, H.: *Globale Energiebilanz und Klimaschwankungen*. Schriftenreihe der Rheinisch Westfälischen Akademie der Wissenschaften. N 234. Bonn 1973
- FRICKE, J.: Wie unsicher sind unsere Kernkraftwerke. In: *PhiuZ* 6, 190 (1975)
- FRICKE, J.: Windmühlen. In: *PhiuZ* 7, 129 (1976)
- FRICKE, J.: Das Minto-Rad. In: *PhiuZ* 9, 131 (1978)
- FRICKE, J.: Die Nutzung der Windenergie. In: *PhiuZ* 12, 164 (1981)
- FRICKE, J.: Energetische Amortisation von Hausisolation und Sonnenkollektor. In: *PhiuZ* 12, 78 (1981 a)
- FRICKE, J. / BORST, L.: Energie aus dem Meer. In: *PhiuZ* 10, 85 (1979)
- FRICKE, J. / BORST, W.: *Ein Lehrbuch der physikalischen Grundlagen*. München: Oldenburg 1981
- FRICKE, J. / BORST, W. L.: Nutzung der Sonnenenergie: Konzentrierende Kollektoren. In: *PhiuZ* 12, 52 (1981 a)
- FRÜHWALD, A. / LIESE, W.: Holz – eine alternative Energiequelle? In: *Naturwissenschaftliche Rundschau* 33/12, 497 (1980)

- GAINES, J. L.: Dunking Bird. In: American Journal of Physics 27, 189 (1959)
- GARVEY, G.: Energy, Ecology, Economy. New York: Norton & Co 1972
- GEORGESCU-ROEGEN, N.: The Entropy Law and the Economic Process. Cambridge etc.: Harward 1971
- GLASER, P. E.: Solar Power from Satelites. In: Physics Today 30/2, 30 (1976)
- GOVINDJEE, G. and R.: The primary Events of Photosynthesis. In: Sci. Am. 251/6, 68 (1974)
- GRATHWOHL, M.: Zukunftsperspektiven der Energieversorgung. In: Naturwissenschaftliche Rundschau 30, 46 (1977) und 30, 82 (1977)
- GRAY, C. L. / HIPPEL, F. v.: The fuel economy of light vehicles. In: Sci. Am. 244/5, 36 (1981)
- GÜNTHEROTH, H.: Energieumwandlung in der Natur. In: BdW 12, 104 (1979)
- GÜNZLER, E.: Didaktische Überlegungen zu Photosynthese. In: NIU 9, 395 (1976)
- GUTBIER, H.: Brennstoffzellen: Stromerzeugung ohne Umwege. In: BdW 11, 76 (1974)
- HALLERMAYER, R.: Fallen für das Sonnenlicht. In: Umschau 81, 505 (1981)
- HAMANN, C. H. / BODEMANN, M. / SCHWARZER, E.: Direktumwandlung chemischer in elektrische Energie in Brennstoffzellen. In: PhuD 4, 303 (1974)
- HANSCHKE, T.: Physik und Technik der Nutzung von Sonnenenergie. Druckschrift der Firma Kröncke, o.O. und o.J.
- HÄRTEL, H. (Hrsg.): Zur Didaktik der Physik und Chemie. Hannover: Schroedel 1980
- HECHT, K.: Ein themodynamischer Grundversuch mit der Wärmepumpe. In: Praxis 27, 39 (1978)
- HECK, H. D.: Eine vergessene Energiequelle: Holz. In: BdW 17/5, 44 (1980)
- HERRMANN, A.: Die Entdeckung des Energieprinzips (J. R. Mayer). In: BdW 4, 140 (1978)
- HOPPE, W. / LOHMANN, W. / MARKL, H. / ZIEGLER, H. (Hrg.): Biophysik - Ein Lehrbuch. Berlin usw.: Springer 1977
- ILLICH, I.: Die sogenannte Energiekrise oder die Lähmung der Gesellschaft. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt 1977
- INGLIS, D. R.: A Windmills theoretical maximum extraction of power from the wind. In: American Journal of Physics 47/5, 416 (1976)
- IZE, Informationszentrale der Elektrizitätswirtschaft. Heinrich-Lübke-Str. 19, 5300 Bonn, 1981
- JAMMER, M.: Der Begriff der Masse in der Physik. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1964
- JARASS, L.: Strom aus Wind. Berlin usw.: Springer 1981
- JOCHIMSEN, U. / RUPP, H. / SCHWARZ, E.: Die Energiebox. Hannover: W. Dorn 1979
- JUNG, W.: Was ist Wärmeenergie? In: PhuD 4, 14 (1976)
- JUNG, W. / WEBER, E. / WIESNER, H.: Ein Versuch zur Einführung des Energiebegriffs. In: Der Physikunterricht 12/2, 22 (1978)
- JUNG, W. / WEBER, E. / WIESNER, H.: Der Energiebegriff als Erhaltungsgröße. In: phys. did. 4, 1 (1977)
- JUSTI, W.: Stand und Chancen der Energie-Direkt-Umwandlung I und II. In: Physikalische Blätter 29, 20 und 71 (1973)
- KATCHALSKY, A. / LIFSON, S.: Muscle as a Machine. In: Sci. Am. 210/3 72 (1954)
- KALHAMMER, F. R.: Energy Storage Systems. In: Sci. Am. 241/6, 42 (1979)
- KERTZ, W.: Kann Erdwärme unseren Energiebedarf decken? In: Umschau 21, 661 (1974)
- KLINKENBERG, P.: Der Golf der Zukunft hat einen Dreizylinder-Diesel. In: Frankfurter Rundschau 212, 12. 9. 1979, S. 11

- KOLB, K. B.: Reciprocating Engine. In: *Physics Teacher* 4, 121 (1966)
- KLUGE, R.: Erkenntniswege im Physikunterricht. Stuttgart: Klett 1970
- KÖHLER, W.: Der Strom kommt aus dem Wind. In: *BdW* 7, 56 (1976)
- KRAFT, J.: Wozu die Energie? In: *Die Zeit* 3, 9. 1. 1981, S. 37
- KRÖNKE: Dr. H. Kröncke KG, 3000 Hannover 73
- LANGENSIEPEN, F.: Experimente zur Wärme- und Elektrizitätslehre nach Abschaffung der Kalorie. In: *Praxis* 26, 97 (1977)
- LAUE, M. v.: *Energiesatz und neuere Physik*. Berlin 1943
- LEE, W.: Großversuch mit Methanol-Benzin-Mischkraftstoff. In: *Entwicklungslinien in der Kraftfahrzeugtechnik*. Köln: TÜV-Verlag 1977, S. 209
- LEVINE, R. P.: The Mechanism of Photosynthesis. In: *Sci. Am.* 241/6, 58 (1969)
- Lexikon Technik und exakte Naturwissenschaften, Frankfurt: Fischer 1972
- LEYBOLD: Leybold-Heraus GmbH & Co. KG, 5000 Köln 51
- LOWINS, A.: *Sanfte Energie*. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt 1979
- MANNHERZ, H. G., K. C. HOLMES: Muskeln arbeiten nach dem Prinzip eines Ruderers. In: *Umschau* 76/7, 203 (1976)
- MATTHÖFER, H.: *Zur friedlichen Nutzung der Kernenergie*. Bonn: Bundesregierung 1977
- METZNER, H.: Photosynthese-Umwandlung der Sonnenenergie. In: *Umschau* 75, 435 (1975)
- MEYER, ABICH, K. M. / HAMPICKE, U. / LIEB, W. / LUHMANN, München: Hanser 1979
- MICHELSSEN, G. / KALBERLAH (Hrsg.): *Der Fischer Öko-Almanach*. Frankfurt: Fischer 1980
- MILLER, J. S.: Physics of the Dunking Duck. In: *Americ. Journ. of Phys.* 26, 42 (1958)
- MINTO, W.: The Minto Wheel and Wheel Supplement. San Power Systems, Inc. 1121 Lewes Ave, Sarasota/Fla 33577, USA, 1975
- MÖNNINGHOFF, H.: Energie aus Biomasse. In: *NIU* 29, 314 (1981)
- MOROWITZ, H. J.: *Energy Flow in Biology*. New York: Academic Press 1968
- MUCKENFUSS, H.: Das Dampfkraftwerk im Klassenzimmer. In: *NIU* 26, 225 (1978)
- MÜLLER-ARNKE, H.: Die Temperatur der Sonne. In: *MNU* 31, 96 (1978)
- MULLEN, J. G. / LOOK, G. W. / KONKEL, J.: Thermodynamics of a simple rubberband heat engine. In: *American Journal of Physics* 43/4, 349 (1975)
- MUNK, W. / MAC DONALD, G. (1960), zitiert nach Sørensen 1979, S. 281
- NEF, J. U.: An Early Energy Crisis and Its Consequences. In: *Sci. Am.* 237/5, 140 (1977)
- NEUBERG, D. / PESTEL, E.: Energie für morgen – Comeback der Kohle? In: *BdW* 11/3, 68 (1974)
- NEUBERG, D.: Die neue Generation der Kohlekraftwerke. In: *BdW* 17/2, 64, (1980)
- NEVA: Dr. Vatter GmbH & Co, 7340 Geislingen (Steige)
- NUFFIELD Secondary Science 4: *Harnessing Energy*. London: Longman 1971
- OBERLIESEN, R.: Technik und Physik am Turbinenmodell. In: *NiU* 19, 98, 1971
- OBERMAIR, G. M.: Windenergienutzung. In: *PU* 15/3, 46 (1981)
- OPPEGARD, M.: Radiant energy measurement of a small lamp. In: *The physics teacher* 15, 362 (1977)
- OPPEGARD, M.: Down to Earth Solar Energy Measurement. In: *The physics teacher* 13, 162 (1975)
- PELKA, D. G. / PARK, R. T. / SINGH, R.: Energy from the wind. In: *American Journal of Physics* 46, 495 (1978)
- PILTZ, G.: Der Bau eines Sonnenkollektors. In: *Praxis* 28, 185 (1979)
- PLANCK, M.: *Theorie der Wärmestrahlung*. Leipzig: J. A. Barth Verlag 1923<sup>5</sup>
- POOLE, A. / WILLIAMS, P.: Flower Power: Prospects for Photosynthetic Energy. In: *Bulletin of Atomic Scientists* (May, 1976)

- POST, R. F. / POST, S. F.: Flywheels. *Sci. Am.* 229/6, 17, (1973)
- PRIGOGINE, I.: La thermodynamique de la vie. In: *Recherche* 3/24, 547, (1972)
- QUAST, U. / SCHWARZER, E.: Zur Behandlung von Wärmekraftmaschinen auf der Sekundarstufe I. In: *phys. did.* 3, 31 (1976 a)
- QUAST, U. / SCHWARZER, E.: Messungen an einem Heißluftmotor. In: *MNU* 29, 415 (1976 b)
- PHYWE: Phywe Aktiengesellschaft, 3400 Göttingen
- PLUMB, R. C.: Physical Chemistry of the Dunking Bird. In: *Journal of Chemical Education* 50, 213 (1973)
- RABL, A. / NIELSON, C. E.: Solar Ponds for Space Heating. In: *Solar Energy* 17, 1 (1975)
- RANG, O.: Versuch einer didaktischen Analyse zur Unterrichtseinheit »Wärmeenergie«. In: *PU* 4/1, 27 (1970)
- REIS, P.: Lehrbuch der Physik. Leipzig: Quandt & Händel 1876
- ROBERT, J.: *Les Chronophages*. Paris: Seuil 1979. (Auszugsweise in deutscher Übersetzung in Duve 1979)
- ROMER, R. H.: *Energy. An Introduction to Physics*. San Francisco: Freeman 1976
- ROWLEY, J. C.: Geothermal energy development. In: *Physics Today* 30/1, 36 (1977)
- RUSKE, B. / TEUFEL, D.: *Das sanfte Energiehandbuch*. Reinbek: Rowohlt 1980
- RUTH, J.: Sonnenenergie-Satelliten. In: *PhiuZ* 12/6, 181 (1981)
- SCHARMANN, A. (Hrsg.): *Vorträge der Frühjahrstagung 1978 der DPG, Fachausschuß Didaktik der Physik*. Gießen 1978
- SCHARMANN, A. / KUHN, W. (Hrsg.): *Vorträge der Frühjahrstagung 1979 der DPG, Fachausschuß Didaktik der Physik*, Gießen 1979
- SCHLICHTING, H. J. / FARWIG, P.: Ebbe und Flut im Unterricht der Sekundarstufe I und II. In: *phys. did.* 4, 197 (1977)
- SCHLICHTING, H. J. / BACKHAUS, U. / FARWIG, P.: Das grüne Blatt als Wärmekraftmaschine. In: *Scharmann* 1978, S. 325
- SCHLICHTING, H. J. / BACKHAUS, U.: Energie als grundlegendes Konzept. In: *PhuD* 7, 139 (1979)
- SCHLICHTING, H. J. / BACKHAUS, U.: *Physikunterricht 5–10*. München, Wien, Baltimore: Urban & Schwarzenberg 1981
- SCHLOSSER, K.: Die Photosynthese – ein Beispiel für fächerübergreifende Aspekte im Unterricht. In: *NIU* 22, 342 (1974)
- SCHMARBECK, D.: Bau eines Darrieus – Rotormodells zur Nutzung der Windenergie. In: *NIU* 29, 293 (1981)
- SCHMIDT, R. F. / THEWS, G.: *Physiologie des Menschen*. Springer 1977
- SCHMIDT-NIELSEN, K.: Locomotion: Energy Cost of Swimming, Flying and Running. In: *Science* 177, 222 (1972)
- SCHRÖDER, W. / SICHELSCHMIDT, R. / STIEGLER, L. / VESTNER, H.: *Natur und Technik*. Berlin: Cornelsen-Velhagen & Klasing 1977
- SCHRÖDER, J.: Energiespeicherung in Form von Wärme. In: *Umschau* 74/5, 155 (1974)
- SCHÜRMAN, H. W. / QUAST, U.: 1. Zum Begriff Wärme, 2. Zum Temperaturbegriff. In: *PhuD* 1, 80 (1976)
- SCHÜTZE, C.: Entropie. In: *Natur* (Erstausgabe), 123 (1980)
- SCHWARZER, E. / QUAST, U.: Zur quantitativen Behandlung der Wärmepumpe anhand eines umgebauten Kühlschranks. In: *phys. did.* 4, 251 (1977)
- SCHWARZER, E. / EIKENBERG, H. / QUAST, U.: Das Minto-Rad – Ein Beitrag zur Behandlung von Wärmekraftmaschinen auf der Sekundarstufe I. In: *Härtel* 1980, S. 83
- SEIFFERT, U.: Alternative Kraftstoffe. In: *Umschau* 81/2, 49 (1981)
- SELDERS, M.: Elektrische Energie von der Sonne. In: *Umschau* 77, 421 (1977)

- SELDERS, M. / BONNET, D.: Solarzellen. In: *PhiuZ 10/1*, 3 (1979)
- SHARP, A.: Bicycles and tricycles. London: Longmans, Green and Comp. 1896, reprint: Cambridge, Mas. and London 1977
- SØRENSEN, B.: Renewable Energy. London etc.: Academic Press 1979
- SOLARTECHNIK GmbH, An der Riede 7, 2803 Weyke
- SPENCE, R. P. / FOILES, C. L.: Stirling engines for demonstration. In: *The physics Teacher 20/1*, 38 (1982)
- STEINHART, J. S. / STEINHART, C. E.: Energy Use in the U.S. Food System. In: *Science 184*, 307 (1974)
- STONG, C. L.: The Amateur Scientist: Some delightful engines driven by heating of rubberbands. In: *Sci. Am.* 225/6, 120 (1971)
- STONG, C. L.: Machines that work like muscles. In: *Sci. Am.* 228/4, 112 (1973)
- STURM, W.: Behandlung der Solarenergie in der Schule. In: *Praxis 28/7*, 169 (1979)
- SÜDBECK, W.: Versuche mit Silizium-Solarzellen. In: *Praxis 22/II*, 284 (1973)
- SUNTRONIC: Solarelekttronik, Postfach 605344, 2000 Hamburg 60
- SUSSMAN, M. V. / KATCHALSKY, A.: Mechanochemical Turbine: A New Power Cycle. In: *Science 167*, 45 (1970)
- TRANSFER-ELECTRIC, Postfach 1327, Lemförde
- TRIBUTSCH, H.: Rückkehr zur Sonne. Berlin: Safari Verlag 1979
- TUCKER, V. A.: The Energetic Cost of Moving About. In: *American Scientist 63*, 413 (1975)
- VOGEL, G. / ANGERMANN, H.: dtv-Atlas zur Biologie, Bd. II. München: Deutscher Taschenbuchverlag 1977
- WALKER, G.: The Stirling Engine. In: *Sci. Am.* 229/1, 80 (1973)
- WALKER, J.: Why do particles of sand and mud stick together when they are wet. (The Amateur Scientist) In: *Sci. Am.* 246/1, 144 (1982)
- WEINBERGER, H.: The physics of the Solar Pond. In: *Solar Energy 8*, 45 (1964)
- WEIZÄCKER, C. F. v.: Atomenergie und Atomzeitalter. Frankfurt a. M.: Fischer 1957
- WHITT, F. / WILSON, D.: Bicycling Science: Ergonomics and Mechanics. Cambridge, Mass.: MIT Press 1979
- WILKIE, D. R.: Man as an aero-engine. In: *Journal of the Royal Aeronautic Society 64*, 477 (1960)
- WILSON, D. G.: Alternative Automobile Engines. In: *Sci. Am.* 239/1, 27 (1978)
- WILSON, S. S.: Bicycles Technology. In: *Sci. Am.* 228/3, 81 (1973)
- WIRTSCHAFTSWOCHEN. Zu Fuß in die Zukunft. In: *Wirtschaftswoche 33/24*, 46 (1979)
- WOHLFAHRT, H. (Hrsg.): 40 Jahre Kernspaltung. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1979.
- WOLFE, H. C. (Series Editor): Efficient Use of Energy. API Conference Proceedings Nr. 25. New York: American Institute of Physics, 1975
- WORLD ENERGY SUPPLIES 1969-1972, United Nations Statistical Papers, J. Nr. 17 (1974)
- WYNDHAM, C. H. et al.: Inter- and intra-individual differences in energy expenditure and mechanical efficiency. In: *Ergonomics 9/1*, 17 (1966) Zitiert nach: Whitt et al. 1979
- ZIMMERMANN, U.: Ein Schulversuch zur Bestimmung der Energieeinsparung durch Wärmeisolation von Wänden oder durch Senkung der Raumtemperatur. In: *NIU 12*, 358 (1977)
- ZIMMERMANN, U.: Ein Praktikumsversuch zum Thema Wärmedurchgang durch Wände. In *Praxis 27/4*, 85 (1978)

# Sachregister

- Akkumulator 75, 84 f., 93, 95  
Amortisation, energetische 55 f.  
Arbeit 27  
Auto, Kraftfahrzeug 135 f., 140 ff., 148
- Biomasse 117 ff.  
  lebende 119  
  fossile 119 ff.  
Brennstoffzelle 75
- Dampfmaschine 66  
Dampfturbine 67  
Dissipation (→ Reibung) 38, 41  
Dissipative Systeme 128
- Elektrogenerator 68, 73  
Elektrolyse 83  
Elektromotor 62, 68  
Energiearten 17, 20  
  chemische Energie 68 ff., 72 f., 74, 81, 85,  
  128, 140, 149 f., 151  
  elektrische Energie 22 ff., 62, 73, 75, 77  
  innere Energie 26  
  kinetische Energie 97  
  Lichtenergie 75, 82, 85  
  Muskelenergie 129  
Energiequellen  
  alternative 56  
  Bioenergie 94 f., 121, 123  
  Gezeitenenergie 61  
  Kernenergie 124 ff.  
  kosmische Energie 102  
  regenerative Energie 59  
  Sonnenergie 76, 106 ff., 121  
  thermische Energie d. Umgebung 122  
  Wasserenergie 60  
  Wellenergie 115  
  Windenergie 61, 114  
Energieaufwertung 33, 34 f., 52  
Energiedichte 92 f.  
Energieentwertung 20 ff., 22, 28, 30 ff., 34 f.,  
  52 f., 68, 153  
Energieerhaltung 18, 24 f.  
Energiefluß 15 f., 18, 24 f.  
Energiemessung 22 f.  
Energiepreis 134 f.  
Energiesparen 151, 153  
Energiespeicher 53, 88, 92  
  chemische 93 ff.  
  Druckluftspeicher 96  
  elektrische 98  
  mechanische 95 ff.  
  Pumpspeicher 96  
  thermische 92, 99 ff.  
Energiestromdichte 60, 90  
  eines Baches 60  
  bewegter Luft 61  
  der Sonnenstrahlung 106, 107  
Energietransport 53, 86 ff.  
  -verlust 91
- Energieumwandlung 17, 24, 49 f., 53, 59 ff.  
  -direktumwandlung 19, 63, 72, 74, 129  
Energieumsatz des Menschen 129  
Energieverluste 54 f., 56 f.  
Entropie 46  
Exergie 92
- Fahrrad 135 ff., 148  
Fortbewegung 135 ff.
- Heißluftmotor 65, 80  
Heizung 151 f.
- Kraft 133 f.  
Kreisläufe, solarbetriebene 110 ff.  
Kühlschrank 80
- Leistung 24, 129, 132 f.  
Leistungsinput 131, 145  
  -output 131, 139, 145
- Minto-Rad 71  
Muskeln 72 f., 134, 136
- Osmose 69 f., 114
- Plancksches Strahlungsgesetz 105  
Prozeß, irreversibler, unumkehrbar 31 f.
- Reibung (→ Dissipation) 28, 137 f., 139, 141
- Solarzelle 76  
Sonnenergie (→ Energiearten)  
Sonnenskollektor 81 ff.  
Sonnenteich 100
- Thermogenerator 74  
Trinkender Storch 70  
Transportkosten 145 ff., 148  
Turbine 61, 67
- Verbrennungsmotor 65  
Verdunstung 70, 114
- Wärme 27, 29 ff.  
Wärmemotor 68  
Wärme­kraft­ma­sch­ine 39, 50, 62 ff., 64 f.  
Wärmepumpe 38, 51, 54 f., 78 ff., 81  
Wasserstofftechnologie 94  
Wert der Energie 37 f.  
Wirkungsgrad 28, 54, 55, 63, 72, 130, 144