

# Energieverbrauch und Energieentwertung

von H. Joachim Schlichting und Udo Backhaus

*Ausgehend von den Schwierigkeiten, die vorwissenschaftlichen Erfahrungen und Vorstellungen zur Energie mit dem fachlichen, auf der Energieerhaltung beruhenden Energiebegriff zu erfassen, wird vorgeschlagen, zusätzlich zur Energieerhaltung das Konzept der Energieentwertung einzuführen. Die Energieentwertung beschreibt die letztlich auf der Irreversibilität beruhenden Erfahrungen im Zusammenhang mit energetischen Vorgängen.*

## 1 Problemstellung

Die physikalische Bedeutung der Energie beruht auf ihrer Eigenschaft, während physikalischer Vorgänge unverändert zu sein. Konsequenterweise wird diese Energieerhaltung dann auch häufig zur Grundlage der Energieeinführung im Physikunterricht gemacht<sup>1)</sup>.

Im vorwissenschaftlichen Verständnis scheint es indessen charakteristisch für die Energie zu sein, verbraucht zu werden: Die wachsenden Energiepreise, die drohende Erschöpfung der Energiequellen, Appelle zum Energiesparen usw. sprechen nicht gerade gegen die Möglichkeit von Energieverbrauch und beeinflussen die Schülervorstellungen über Energie offenbar nachhaltiger als Erfahrungen, die die Energieerhaltung zum Ausdruck bringen.

Man macht es sich u. E. zu einfach, hierin lediglich ein weiteres Beispiel für die oft zitierte Diskrepanz zwischen lebensweltlichen und physikalischen Vorstellungen zu sehen. Denn man kann sich leicht davon überzeugen, daß die Physik auch zur Beschreibung von Erfahrungen des Energieverbrauchs angemessene Konzepte, z. B. Entropie, Freie Energie und Exergie, hervorgebracht hat. Diese haben nur leider bislang so gut wie keine Berücksichtigung in der Schulphysik gefunden, wenn man einmal von der wohl mehr aus Vollständigkeitserwägungen heraus erfolgten Erwähnung der Entropie in manchen Schulbüchern der Sek. II absieht.

In der vorliegenden Arbeit werden demgegenüber die grundlegenden Argumente diskutiert, mit denen man auf jenen primären Erfahrungen des Energieverbrauchs ein qualitatives Konzept der Energieentwertung aufbauen kann. Zusammen mit dem Energiebegriff ermöglicht dieses Konzept eine umfassende Beschreibung und ein tieferes Verständnis der Phänomene und Probleme, die mit dem vorwissenschaftlichen Energiekonzept verbunden sind.

In einer nachfolgenden Arbeit (BACKHAUS et al. 1984) wird beschrieben, wie man das Konzept der Energieentwertung zu einer physikalischen Größe

verschärfen kann, deren Werte die Erfahrungen des Energieverbrauchs bzw. der Energieentwertung zahlenmäßig zu erfassen vermögen. Dabei wird sich zeigen, daß die qualitativen Überlegungen sowohl zum Entropie- als auch zum Exergiebegriff hin entwickelt werden können.

Obwohl unsere Überlegungen mit dem Ziel erfolgen, den derzeitigen Physikunterricht entsprechend zu beeinflussen, stellen sie nicht mehr dar als die sachstrukturelle Grundlage (und deren Erläuterung anhand einiger Beispiele) für die Erarbeitung detaillierterer Unterrichtsversuche.

## 2 Energieverbrauch ist durch Irreversibilität bedingte Energieentwertung

Unsere Alltagserfahrungen sind durch den Verbrauch von Dingen des täglichen Bedarfs geprägt.

- Im Haushalt wird Wasser verbraucht, indem man Geschirr spült, Kartoffeln kocht, Wäsche wäscht oder das WC spült usw.
- Lebensmittel werden verbraucht, indem sie verzehrt werden.
- Zement, Kalk, Sand usw. werden verbraucht, indem man mit ihrer Hilfe Gebäude errichtet.

Die Beispiele zeigen, daß der Verbrauch insofern in einer Entwertung der betrachteten Dinge besteht, als die Dinge hinterher nicht mehr oder nur noch mit Einschränkungen für den ursprünglichen Gebrauchszweck geeignet sind. Mengenmäßig sind sie jedenfalls unverändert geblieben.

- Verbrauchtes Wasser kann normalerweise nicht noch einmal für denselben Zweck verwendet werden: Mit verschmutztem Abwaschwasser kann man nicht noch einmal abwaschen. Die mengenmäßige Erhaltung des verbrauchten Wassers drückt sich u. a. in der Praxis aus, bei der Berechnung der Kanalkosten die Menge des dem Haushalt zugeführten reinen Trinkwassers zugrunde zu legen.

- Der Verbrauch der Lebensmittel drückt sich in der Tatsache aus, daß sie in eine wertlosere Form überführt und als solche vom Körper wieder ausgeschieden werden. Dadurch wird die mengenmäßige Erhaltung demonstriert.
- In einem Gebäude verbauter Zement, Kalk, Sand usw. sind zum erneuten Bauen ungeeignet. Ihre Erhaltung liegt in Form von Bausubstanz auf der Hand.
- In voller Analogie zur hier demonstrierten Vorstellung vom Verbrauch von Dingen soll im folgenden der Verbrauch von Energie verstanden werden:
- Hält man ein Zimmer durch eine Heizung warm,
- reinigt man einen Teppich mit einem Staubsauger,
- fährt man mit einem Auto, so wird dabei Energie verbraucht. Dem Verbrauch liegt eine Energieumwandlung zugrunde, durch die die Energie in eine Form überführt wird, \*in der sie nicht in gleichem Maße einsetzbar ist wie vorher. Der Energieverbrauch erweist sich daher analog dem Verbrauch von Gegenständen als eine Entwertung<sup>2)</sup>,

Bei energetischen Vorgängen der folgenden Art

- Verbrennen von Heizöl,
- Zur-Ruhe-Kommen eines Schwungrads und
- Abkühlen einer Tasse Tee

steht zunächst die Entwertung eines Gegenstandes im Vordergrund. Es ist allerdings leicht möglich, die Entwertung auf die Abnahme der Energie des jeweiligen Systems zurückzuführen. Berücksichtigt man den Energieerhaltungssatz und damit den Energiezuwachs der Umgebung, so erweisen sich auch diese Beispiele als mit Entwertung verbundene Energieumwandlungsvorgänge.

Wir haben die Entwertung der Energie als Ausdruck für die eingeschränkte Einsetzbarkeit der Energie nach einer Energieumwandlung eingeführt. Der objektive Kern dieser Begriffsbestimmung ist in der Tatsache enthalten, daß Energieumwandlungsvorgänge nicht in umgekehrter Richtung ablaufen, ohne sonstige Veränderungen in der Welt zu hinterlassen. Das objektive der Energieentwertung besteht so gesehen in der Irreversibilität von Energieumwandlungsvorgängen: Energieentwertungen sind endgültig in dem Sinne, daß sie nicht von selbst wieder verschwinden.

Selbsttätige Energieumwandlungsvorgänge sind unumkehrbar (irreversibel). Sie sind deshalb mit Energieentwertung verbunden, die darin besteht, daß die Energie teilweise oder ganz in eine weniger nützliche Form überführt wird.

Dieser Satz von der Entwertung der Energie ist das noch weitgehend vorwissenschaftliche Äquivalent zum 2. Hauptsatz der Thermodynamik.

### 3 Vergleich von Energieentwertungen

Wir haben die bei einem Vorgang auftretende Energieentwertung mit der Eigenschaft des Vorgangs begründet, von selbst nicht in umgekehrter Richtung ablaufen zu können. Die Erfahrung zeigt zwar, daß Vorgänge durchaus dazu gebracht werden können, unter Aufhebung der aufgetretenen Energieentwertungen zurückzulaufen:

- Abgekühlter Tee kann wieder erwärmt,
- ein stehengebliebenes Schwungrad wieder auf Touren gebracht werden.

Aber so etwas passiert eben nicht von selbst! Außer der Umkehr des Prozesses läuft nämlich stets ein anderer Prozeß in seiner natürlichen Richtung ab, also unter Entwertung von Energie: Im Falle der Erwärmung des Tees beispielsweise das Brennen einer Kerze und im Falle des Schwungradantriebs beispielsweise das Fließen von elektrischem Strom durch einen an eine Quelle angeschlossenen Elektromotor.

Die Umkehr eines selbsttätigen natürlichen Prozesses kann durch den Ablauf eines anderen selbsttätigen Prozesses erzwungen werden.

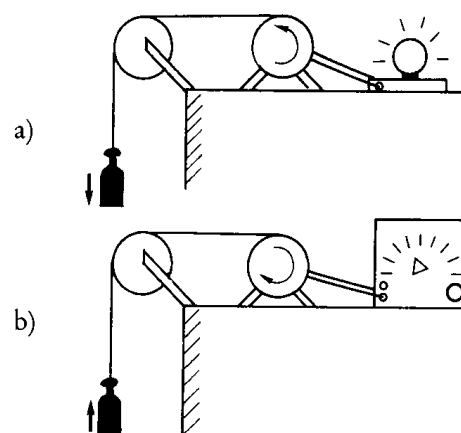


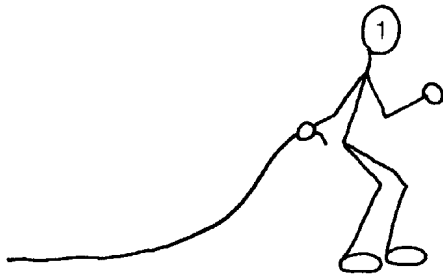
Abb. 1: a) Das herunterfallende Gewichtstück hält einen Elektrogenerator entgegen dessen Tendenz stehenzubleiben in Bewegung: Die Lampe leuchtet. b) Der unter Spannung stehende Motor hebt ein Gewichtstück entgegen dessen Tendenz herunterzufallen.

Da jeder natürliche Prozeß mit Energieentwertung einhergeht, seine Umkehrung demnach die Aufhebung dieser Energieentwertung, also gewissermaßen eine Energieaufwertung bedingt, kann man denselben Sachverhalt auch folgendermaßen ausdrücken:

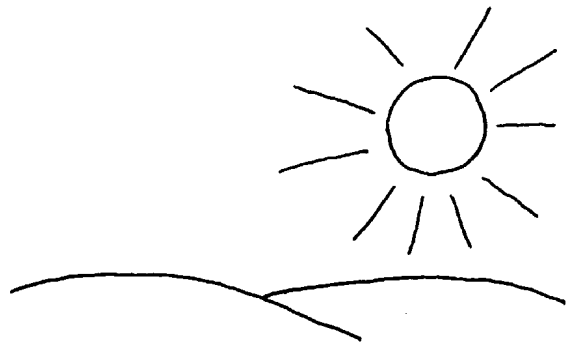
Eine Energieaufwertung wird stets durch eine Energieentwertung betrieben.

Damit wird die Möglichkeit nahegelegt, zusammengesetzt denkbare selbsttätige Prozesse als Ergebnis des „Gegeneinanderwirkens“ zweier selbsttätiger Prozesse aufzufassen, die sich aufgrund der jeweiligen „Kopplung“ gegenseitig am Ablauf hindern: Um ablaufen zu können, müssen sie den jeweils anderen entgegen dessen selbsttätiger Ablaufrichtung treiben bzw. zurückspulen.

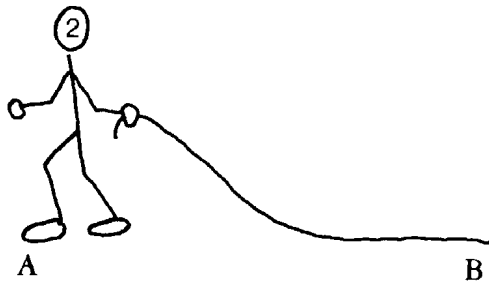
Abb. 2: Darstellung der Parallele zwischen Tauziehen und Rückspulen eines selbsttätigen Vorgangs.



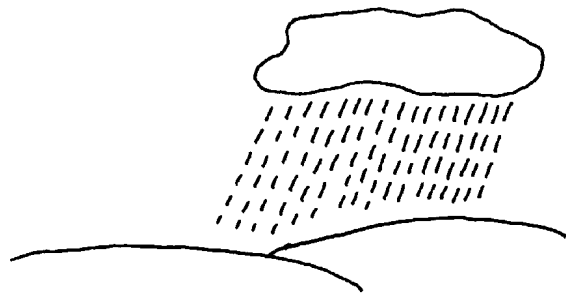
Die Person 1 zieht das Tau nach rechts.



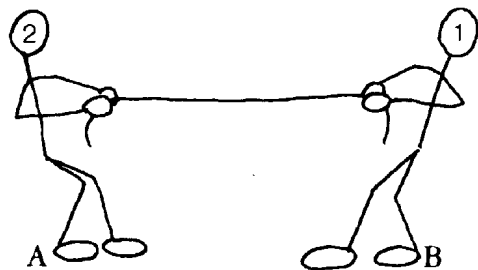
Die Sonne scheint auf Wüstensand.



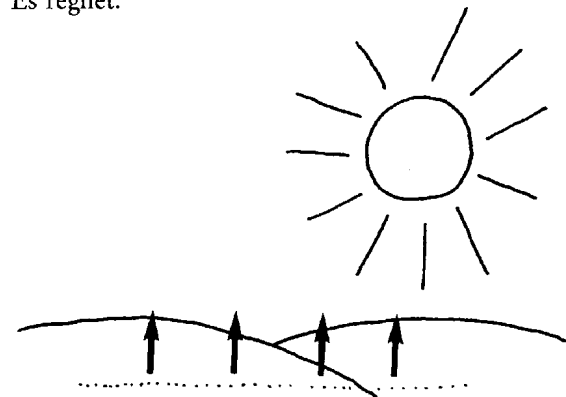
Die Person 2 zieht das Tau nach links.



Es regnet.



Die Person 2 zieht unter großer Anstrengung das Tau nach links und zwingt die Person 1 ebenfalls nach links, obwohl diese nach rechts zieht.



Die Sonne veranlaßt Wasserdampf, entgegen der Tendenz herunterzufallen, aufzusteigen und sich in Regenwolken zu sammeln.

Nehmen wir das Beispiel eines an einem Faden hängenden Gewichtstücks, das mit Hilfe eines Elektromotors hochgezogen werden soll (Abb. 1). Das Gewichtstück "möchte" herunterfallen, der unter elektrischer Spannung stehende Elektromotor "möchte" laufen. Läuft der Elektromotor, so wird das Gewichtstück hochgehoben und damit entgegen der Richtung getrieben, die es ohne "Kopplung" an den Elektromotor einschlagen würde. Fällt das Gewichtstück, so wird der Elektromotor gezwungen, in umgekehrter Richtung als Elektrogenerator zu laufen, was man beispielsweise durch Aufladen eines Kondensators demonstrieren kann. Gleichgewicht läge dann vor, wenn sich beide Bewegungstendenzen die Waage hielten. Der Zustand ist zwar leicht realisierbar, aber i. a. ist der zugehörige Prozeß nicht reversibel (Ausnahme: Supraleitung).

Als weiteres Beispiel betrachten wir den Temperaturengleich zwischen je einem Liter Wasser mit Temperaturen von 100°C und 50°C. Beide Wassermengen haben die Tendenz, sich auf Umgebungstemperatur abzukühlen. „Koppelt“ man beide Systeme, z. B. indem man sie in thermischen Kontakt bringt und von der Umgebung isoliert, dann kann die Abkühlung des 100°C heißen Wassers nur ablaufen, wenn gleichzeitig das 50°C warme Wasser entgegen dessen Abkühlungsbestreben weiter erwärmt wird.

Das Gegeneinanderwirken selbsttätiger Vorgänge läßt sich durch das Bild des Tauziehens veranschaulichen: jeder der beiden Gegner möchte das Tau in seine Richtung ziehen. Dies ist aber nur möglich, wenn er den Jeweils anderen in dessen Gegenrichtung zwingt. im allgemeinen wird das einem der beiden Gegner, dem stärkeren, auch gelingen. Nur für den Fall, daß beide gleich stark sind, werden sie sich nicht von der Stelle bewegen (Abb. 2).

Ähnlich wie das Tauziehen dazu dient, die körperliche Stärke der beiden Gegner aneinander zu messen bzw. miteinander zu vergleichen, gestattet das Gegeneinanderschalten von Prozessen einen Vergleich der mit ihnen verbundenen Energieentwertungen.

Da der jeweilige Gesamtprozeß selbsttätig abläuft und deshalb mit Energieentwertung einhergeht, liegt es nahe, die mit den Teilprozessen verbundenen Entwertungen folgendermaßen zu vergleichen:

Von zwei selbsttätigen Prozessen ist derjenige mit einer größeren Energieentwertung verbunden, der den anderen entgegen der natürlichen Richtung ablaufen lassen und damit die mit diesem verbundene Energieentwertung rückgängig machen kann.

## 4 Energieumwandlungen in der neuen Sehweise

Es ist möglich, jeden Energieumwandlungsvorgang als Resultat eines „Tauziehens“ zwischen zwei gegeneinandergeschalteten Prozessen aufzufassen. Dazu stellt man sich vor, die Energie werde nicht direkt von einem System zum anderen übertragen, sondern vom einen System an die Umgebung (bzw. allgemeiner an ein beliebiges drittes System) abgegeben und dieser gleichzeitig vom anderen System wieder entzogen. So gesehen spult bei der Energieumwandlung der Prozeß „Abgabe der Ausgangsenergie an die Umgebung“ den Prozeß „Abgabe der Endenergie an die Umgebung“ zurück. Mit einer Energieentwertung wird also eine Energieaufwertung betrieben.

Da aber jede Energieart mindestens teilweise in jede andere umgewandelt werden kann (vgl. z. B. Matrix der Energiedirektumwandlungen in SCHLICHTING 1983, S. 18), hat man sich damit von der allgemeinen Anwendbarkeit des oben vereinbarten Vergleichsverfahrens überzeugt.

Allerdings war dazu eine veränderte Betrachtung bekannter Vorgänge erforderlich. Wenn auch wegen der Gleichzeitigkeit der Energieaufnahme und -abgabe durch die Umgebung diese Betrachtung niemals in Widerspruch zur Erfahrung geraten kann<sup>3)</sup>, so soll doch nicht behauptet werden, die Vorgänge liefen "wirklich" so ab. Es soll vielmehr betont werden, daß beim Vergleich von Energieentwertungen die Anfangs- und Endzustände der beteiligten Systeme entscheidend sind: die Zustände haben sich nach dem Vorgang so verändert, als hätte ein Prozeß einen anderen zurückgespult - und nur darauf kommt es an! Zweifellos erfordert eine solche Betrachtungsweise einige Übung. Wir glauben jedoch, dies mit der sich im folgenden erweisenden Erschließungsmächtigkeit unseres Konzepts rechtfertigen zu können.

Wie stellen sich die oben skizzierten Beispiele in dieser Sehweise dar?

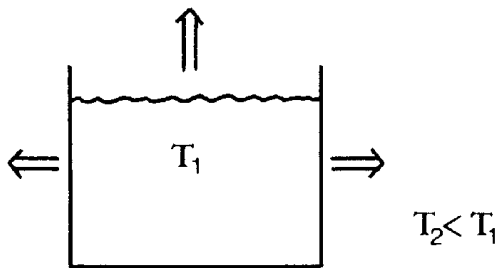
1. Betrachten wir zunächst den Temperaturengleichvorgang bzw. energetisch gesprochen die Umwandlung von Wärme höherer Temperatur in Wärme niedrigerer Temperatur<sup>4)</sup>: Bevor man die unterschiedlich temperierten Wassermengen in thermischen Kontakt bringt, geben Sie selbsttätig Wärme an die Umgebung ab, was mit einer Energieentwertung verbunden ist. Den bei Kopplung eintretenden Temperaturengleichvorgang stellt man sich so vor, daß das 100°C heiße Wasser sich weiterhin unter Abgabe von Wärme an die Umgebung abkühlt, während das 50°C warme Wasser gezwungen wird, sich unter Aufnahme von Wärme aus der Umgebung zu erwärmen; ein Vorgang, der mit Energieaufwer-

tung einhergeht, da er entgegengesetzt zur selbsttätigen Richtung abläuft. Offenbar ist diese Betrachtung unabhängig von der Art der beteiligten Körper. Bezogen auf dieselbe Energiemenge kann man deshalb gemäß unserem Vergleichsverfahren folgern:

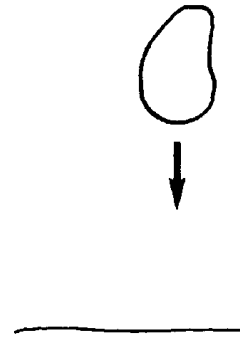
Die Abgabe von Wärme hoher Temperatur an die Umgebung ist mit einer größeren Energieentwertung verbunden als die Abgabe von Wärme niedrigerer Temperatur.

- Bei der Umwandlung der mechanischen Energie eines herunterfallenden und dadurch einen Elektrogenerator betreibenden Gewichtsstücks kommt man zu folgender Beschreibung: Das Fallen des Gewichtsstücks ohne Kopplung an den Motor führt zu Energieabgabe an die Umgebung (Dissipation von mechanischer Energie) und ist mit Energieentwertung verbunden. Ebenso führt ein elektrischer Strom, der keinen Motor betreibt, zu Wärmeabgabe an die Umgebung (Dissipation von elektrischer Energie). In einem

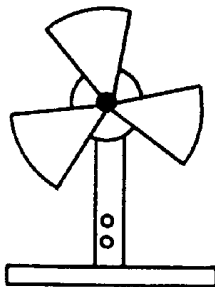
Abb. 3: Beispiele für selbsttätige Vorgänge und die jeweilige Zurückspulung des einen durch den anderen.



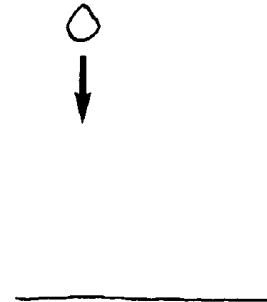
Ein Topf mit heißem Wasser kühlt an der Umgebung ab.



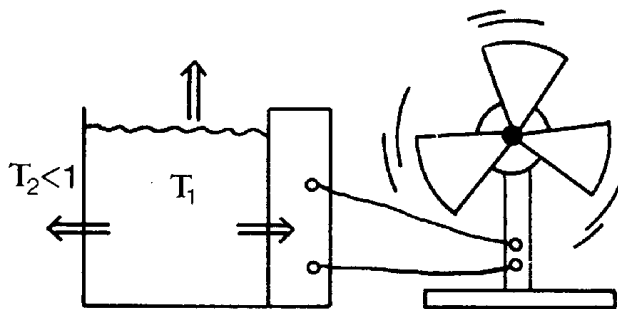
Ein schwerer Stein fällt zu Boden und bleibt liegen.



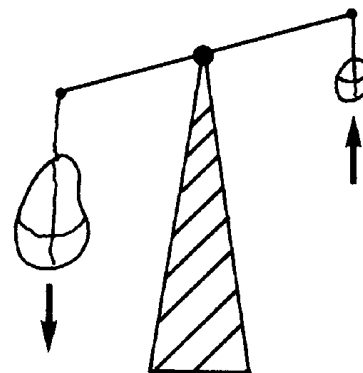
Ein sich selbst überlassener rotierender Ventilator kommt an der Umgebung zum Stillstand.



Ein leichter Stein fällt zu Boden und bleibt liegen.



Bringt man das heiße Wasser mit einem Thermogenerator in thermischen Kontakt und koppelt diesen elektrisch mit dem Ventilator, so wird dieser in Drehung versetzt: Die Abkühlung des Wassers hält den Generator entgegen dessen Tendenz stehenzubleiben in Bewegung.



Mit einer Waage kann der „Fall“ des schweren Steins genutzt werden, den „Fall“ des leichten Steins rückgängig zu machen.

Elektrogeneratoren sind beide Prozesse in einer Weise „gekoppelt“, daß durch die Entwertung mechanischer Energie die Aufwertung elektrischer Energie betrieben wird, die sich in der Aufrechterhaltung eines elektrischen Stroms manifestiert.

Damit diese Energieumwandlungen selbsttätig ablaufen, muß die jeweilige Energieaufwertung natürlich kleiner sein als die jeweilige Energieentwertung des „reibenden“ Teilprozesses. Da dieses sowohl für die Umwandlung von elektrischer Energie in mechanische als auch umgekehrt gilt, folgt daraus nicht wie im

obigen Beispiel des Temperatenausgleichs, daß die Dissipation einer bestimmten Menge der einen Energieart mit einer größeren Energieentwertung verbunden wäre als die Dissipation derselben Menge der jeweils anderen Energieart. Aus den Umwandlungen kann mit geringfügiger Idealisierung vielmehr das folgende Ergebnis gewonnen werden:

Die mit der Abgabe derselben Menge elektrischer und mechanischer Energie an die Umgebung verbundene Energieentwertung ist gleich groß.

3. Schließlich sei noch das Beispiel der Umwandlung von elektrischer Energie in thermische Energie betrachtet, wie sie bei der Erwärmung man den Tauchsieder in einen Topf mit Wasser stellt, kann man sich dadurch entstanden denken, daß durch den Dissipationsvorgang das Wasser gezwungen wird, dieselbe Energiemenge der Umgebung zu entziehen. Dieser Vorgang stellt die Umkehrung der selbsttätigen Abkühlung von Wasser auf Umgebungstemperatur dar und ist folglich mit einer Energieaufwertung verbunden. Da mit elektrischer Energie im Prinzip beliebig hohe Temperaturen erzielt werden können, folgt aus dieser Betrachtungsweise:

Die mit der Abgabe von elektrischer Energie an die Umgebung verbundene Entwertung ist größer als die mit Wärmeabgabe an die Umgebung verbundene. Dieser Satz gilt unabhängig von der Temperatur des Wärme abgebenden Körpers.

## 5 Tragfähigkeit des Entwertungskonzepts

Der lerntheoretische Nachteil, der mit der Änderung der üblichen Sehweise verbunden ist, wird u. E. durch die große Erschließungsmächtigkeit und universelle Anwendbarkeit des Rückspulkonzepts mehr als aufgewogen. Diese wurden durch die vorangegangenen Überlegungen bereits angedeutet und sollen im folgenden weiter umrissen werden.

Ganz allgemein sei bereits hier auf die Vorteile hingewiesen, die die grundsätzliche Einbeziehung der Umgebung mit sich bringt:

- Die Vorgänge, die zu scheinbaren Widersprüchen zur Energieerhaltung führen, bilden hier den Ausgangspunkt: Energieabgabe an die Umgebung. Die bei allen Vorgängen praktisch nicht zu vermeidende Beteiligung der Umgebung kann in naheliegender Weise berücksichtigt werden: die ihr entzogene Energiemenge ist kleiner als die ihr zugeführte.
- Alle Aussagen gelten bezüglich "der" Umgebung. Damit liegt die Frage nach der Abhängigkeit von der Temperatur der Umgebung auf der Hand. Wer macht sich sonst schon klar, daß z. B. der Wirkungsgrad eines Kraftwerks im Winter größer ist als im Sommer, daß also im Sommer dieselbe Leistung nur durch Einsatz von mehr Brennstoff aufrechterhalten werden kann?
- Das vorliegende Konzept verweist unmittelbar auf die Bedeutung von Kreisprozessen für Systeme, die man wertmäßig erhalten möchte. Ein Kreisprozeß kann gesehen werden als Prozeß zusammen mit dessen Umkehrung: Eine durch einen Prozeß bewirkte Entwertung wird durch die Umkehrung wieder aufgehoben. Dadurch wird beispielsweise auf sog. Recyclingverfahren in der Wirtschaft u. a. zur Schonung von Rohstoffressourcen hingewiesen.
- Schließlich rückt die offensichtlich nur näherungsweise gültige Temperaturkonstanz der Umgebung Probleme ins Blickfeld, die ansonsten leicht der Aufmerksamkeit entgehen. Beispielsweise beruhen viele Umweltprobleme auf der Tatsache, daß die Umgebung als praktisch nicht beeinflussbares System angesehen wird, das daher als Müllplatz unbeschränkter Aufnahmekapazität für entwertete Stoffe und Energie behandelt werden kann.

### 5.1 Energieentwertung als „Motor“ allen Geschehens

Die Strahlungsbilanz der Erde ist im Mittel nahezu ausgeglichen. Die von der Sonne eingestrahlte Energie wird im Mittel von der Erde wieder ausgestrahlt. Der kleine aber entscheidende Unterschied zwischen beiden Vorgängen besteht darin, daß die auftreffende "heiße" kurzwellige Strahlung (d. h. Strahlung, die von einem heißen Objekt ausgegangen ist) die Erde als „kalte“ langwellige Strahlung, genauer: bei Umgebungstemperatur wieder verläßt. Diesem enormen Temperatursprung entspricht eine enorme Energieentwertung. Die Erdoberfläche (einschließlich Atmosphäre) ist jedoch so beschaffen,

daß die Entwertung zu zahlreichen Aufwertungen in der Lage ist, die letztlich das gesamte Geschehen auf der Erde bestimmen:

- Bereits in der Atmosphäre wird ein Teil der Sonnenenergie absorbiert. Die dem entsprechende Entwertung betreibt Aufwertungen in Form der Entstehung von Temperatur- und Druckdifferenzen, die sich sodann z. B. in Form von Winden wieder ausgleichen. Die mit den Winden verbundene Energieentwertung kann ihrerseits z. B. in Windmühlen und Segelschiffen vom Menschen genutzt werden.
- Ein sehr großer Teil der Sonnenenergie sorgt für die Verdunstung von Wasser auf der Erdoberfläche. Auf diese Weise werden vielfältige Energieaufwertungen betrieben:
  - Entgegen der Tendenz herunterzufallen, wird Wasser in höhere Lagen gehoben (Wolkenbildung).
  - Dabei werden z. B. bei verdunstendem Meerwasser Salz- und Süßwasser entmischt.

Der erneute Ablauf dieser zurückgespulten Vorgänge führt zu Entwertungen, die vom Menschen zu zahlreichen Energieaufwertungen genutzt werden können: Beispielsweise zur Erzeugung von elektrischer Energie mit Hilfe eines Wasserkraftwerkes. Selbst die Energieentwertung aufgrund der erneuten Mischung von Salz- und Süßwasser beim Einmünden der Flüsse ins Meer könnte über den Vorgang der Osmose zur Energieerzeugung herangezogen werden.

- Der wichtigste Aufwertungsprozess, der durch die globale Entwertung der Sonnenenergie betrieben wird, ist wohl in der ständigen Rückgängigmachung des Zerfalls von Biomaterie durch Verbrennung, Vermoderung, durch den Stoffwechsel von Mensch und Tier usw. zu sehen. Dieser Zerfallsvorgang läßt sich pauschal durch eine chemische Reaktion der Art
 
$$[CH_2O]_x + xO_2 \rightarrow xH_2O + xCO_2 + \text{Energie}$$

charakterisieren.

Die mit der Umkehr dieser Reaktion verbundene Aufwertung manifestiert sich in der Produktion von Biomasse (Fotosynthese), die letztlich als Ausgangspunkt für viele natürliche (z. B. Ernährung von Mensch und Tier) und, vor allem in ihrer fossilen Form, für fast alle technischen Vorgänge (Energiewirtschaft) angesehen werden muß (weitere Beispiele siehe SCHLICHTING 1983).

## 5.2 Vom Nutzen der Energie

Im Rahmen des Entwertungskonzepts kann man die menschliche Nutzung der Energie als gezielten Einsatz geeigneter selbsttätig ablaufender Prozesse ansehen. Man läßt selbsttätige Prozesse nicht einfach ablaufen, ohne daß sonst noch etwas geschieht. Durch geeignete Vorrichtungen sorgt man dafür, daß mit ihrer Hilfe andere, für den Menschen nützliche Prozesse im Bedarfsfalle zurückgespult werden, um erneut ablaufen und dabei Wärme, Bewegung, Schall, Licht usw. in den verschiedensten Formen zur Befriedigung menschlicher Bedürfnisse hervorbringen zu können.

Der erreichbare Nutzen läßt sich offenbar durch einen größeren Energieverbrauch steigern - und genau auf diese Weise wurden in der Vergangenheit die wachsenden menschlichen Bedürfnisse hauptsächlich befriedigt. Dabei ist eine Energieverschwendung geradezu vorprogrammiert, denn die bloße Steigerung der Energieentwertung, um größere Energieaufwertungen zu bewirken, umgeht die Frage, ob nicht eine gewünschte Aufwertung mit einer kleineren Energieentwertung erreicht werden kann als bisher. Diese Frage muß auf jeden Fall geklärt werden, wenn man nicht Gefahr laufen möchte, Energie zu verschwenden, was nicht nur von Nachteil im Hinblick auf eine schnellere Erschöpfung der zur Verfügung stehenden Energiequellen wäre, sondern auch und vor allem im Hinblick auf eine wachsende Beeinflussung unserer Umwelt. Je größer die Energieentwertung ist, mit der eine bestimmte Aufwertung betrieben wird, desto mehr Energie landet auf dem Energiemüllplatz Umgebung mit der Folge einer zunehmenden thermischen und - infolge des größeren Brennstoffdurchsatzes - chemischen Umweltverschmutzung.

Von Energieverschwendung muß man demnach z. B. reden, wenn man ein Zimmer mit einer elektrischen Heizung heizt, weil der Vorgang „Dissipation von elektrischer Energie bei Zimmertemperatur“ noch stark entwertend ist, also zu einer Energieaufwertung genutzt werden kann, z. B. indem Wärmeleitung aus dem Zimmer in die Umgebung zurückgespult, Wärme also aus der Umgebung in das Zimmer „gepumpt“ wird. Dadurch könnte mit demselben Einsatz an Energie dem Zimmer mehr Wärme zugeführt werden. Der maximal aus der Entwertung einer gegebenen Energiemenge zu ziehende Nutzen wäre demnach dann erreicht, wenn die erzielte Aufwertung der Entwertung gleich wäre, die mit dem Gesamtprozeß verbundene Energieentwertung verschwände und dieser damit reversibel wäre. Dieser Fall kann in Wirklichkeit natürlich nicht erreicht werden, weil er verschwindend kleine Ablaufgeschwindigkeiten bedingen würde. Dem steht jedoch in der Regel das Interesse an hinreichend

schnellen Prozeßabläufen entgegen, so daß entsprechende Entwertungen in Kauf genommen werden müssen<sup>5)</sup>. Energiesparmaßnahmen laufen letztlich darauf hinaus, diese notwendigen Entwertungen so klein wie möglich zu machen.

### 5.3 Verallgemeinerung des Entwertungskonzepts

Ausgangspunkt für die Ableitung des Energieentwertungskonzepts waren Erfahrungen im Zusammenhang mit Energieumwandlungsvorgängen. Die Anwendungsmöglichkeiten des Konzepts gehen allerdings über den dadurch gesteckten phänomenologischen Rahmen hinaus: Das Konzept der Energieentwertung ist letztlich zur Beschreibung der Irreversibilität von Vorgängen allgemein geeignet. Dies kommt bereits dadurch zum Ausdruck, daß das zum komparativen Begriff "Energieentwertung" führende Vergleichsverfahren auf der Fähigkeit von Prozessen beruht, andere Prozesse zurückzuspulen. Die Vergleichsvorschrift ist offenbar nicht auf energetische Prozesse beschränkt, also solche, bei denen die Aufmerksamkeit auf Energieumwandlungen gerichtet ist.

Nehmen wir z. B. den Vorgang der Vermischung von Salzwasser und Süßwasser. Es ist ein selbsttätiger Prozeß, der nicht von selbst zurückläuft. Mit Energieentwertung hat dieser Prozeß zumindest vordergründig wenig zu tun. Man könnte allenfalls allgemein von Entwertung sprechen, insofern, als das Süßwasser anschließend nicht mehr als Trinkwasser geeignet ist. Mikroskopisch gesehen läge die Kennzeichnung des Prozesses als Unordnungszunahme nahe. Welche Beschreibung auch gewählt wird, entscheidend ist, daß das obige Vergleichsverfahren auch auf Prozesse dieser Art anwendbar ist: Trennt man nämlich das Süßwasser vom Salzwasser durch eine für Süßwasser durchlässige Wand, dann kann die Mischung nur dadurch realisiert werden, daß das Süßwasser in die Salzwasserseite dringt und dort den Wasserspiegel hebt (Osmose). Der Mischungsvorgang kann also dazu benutzt werden, den mit Entwertung verbundenen Vorgang des Ausgleichs verschieden hoher Wassersäulen (d. i.: Dissipation mechanischer Energie) zurückzuspulen. Mischungsvorgänge sind deshalb mit Energieentwertung verbunden, wenn sie nicht auf solche Weise zu Aufwertungen genutzt werden.

Bei solchen Vorgängen ist jedoch, ebenso wie bei Verdunstungs-, Expansions- und chemischen Prozessen, die Betonung der Fähigkeit, andere Prozesse zurückzuspulen bzw. anzutreiben, meist angemessener als die Beschreibung mit dem hier oft schwerfällig wirkenden Begriff der Energieentwertung. Dieser scheint uns jedoch im hier betonten Spezialfall der Energieumwandlungen anschaulicher und konkreter zu sein und daher für die spätere Bildung

des allgemeinen Begriffes der Irreversibilität gute Dienste zu leisten.

## 6 Wert der Energie

In der vorwissenschaftlichen und technischen Diskussion der Energieumwandlungen ist häufig vom unterschiedlichen Wert der einzelnen Energiearten die Rede (siehe z. B. BAEHR 1981, S. 131). Dieses die Sprechweise vereinfachende Konzept „Wert der Energie“ läßt sich unmittelbar auf unserem Entwertungskonzept aufbauen. Damit kann man ihm eine präzisere Bedeutung geben, als es mit der bloßen Übernahme umgangssprachlicher Begriffe getan ist.

Dazu kommen wir auf die Ergebnisse des 4. Abschnitts zurück. Dort hatten wir aus Wärmeleitungsvorgängen gefolgert, daß die Abgabe von Wärme an die Umgebung mit umso größerer Energieentwertung verbunden ist, je höher die Temperatur des abzukühlenden Systems ist. Beschreibt man nun die Energieentwertung dadurch, daß man der Wärme einen sich ändernden Wert zuschreibt, dann folgt daraus<sup>6)</sup>:

Der Wert der Wärme wächst mit zunehmender Temperatur des abgebenden oder aufnehmenden Systems.

Schreibt man ganz entsprechend der mechanischen und der elektrischen Energie so einen Wert zu, daß sich die mit Umwandlungsvorgängen verbundenen Entwertungen auf die Wertänderungen der beteiligten Energieformen zurückführen lassen, dann folgt aus den im 4. Abschnitt gewonnenen Aussagen:

Elektrische Energie ist wertvoller als Wärme jeder Temperatur (des aufnehmenden oder abgebenden Systems).

Mechanische und elektrische Energie sind gleichwertig.

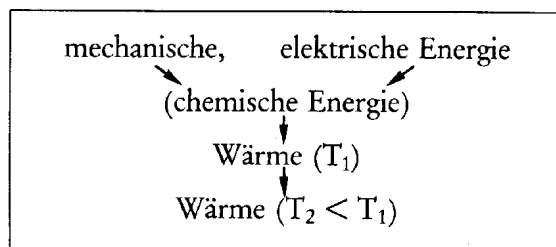


Abb. 4: Rangfolge der Energiearten

Alle diese Aussagen beziehen sich auf dieselbe Energiemenge. Es sei noch erwähnt, daß in vielen Anwendungen die chemische Energie näherungsweise als gleichwertig mit elektrischer und mecha-



nischer Energie angesehen werden kann. Eine Begründung dafür ist komplizierter und soll hier unterbleiben.

## 7 Beispiele und Anwendungen

Im folgenden werden die beiden alternativen Beschreibungsweisen, die sich a) aus den Vorstellungen zur Energieentwertung/-aufwertung und b) aus dem daraus abgeleiteten Wertkonzept der einzelnen Energieformen ergeben, auf Wärmekraftmaschine und Wärmepumpe angewandt, um zu qualitativen Aussagen über die erreichbaren Wirkungsgrade zu gelangen.

### 7.1 Wärmekraftmaschine

Mit einer Wärmekraftmaschine (WKM) wird durch Heizen eines Kessels die Bewegung eines Schwungrades aufrechterhalten, das z. B. durch das Antreiben eines Generators ständig abgebremst wird. Aus den bisherigen Überlegungen folgt sofort, daß der Wirkungsgrad der WKM,

$$\eta_{WKM} = \frac{W}{Q}$$

d. h. das Verhältnis aus verrichteter Arbeit  $W$  und investierter Wärme  $Q$ , kleiner als 1 sein muß:

a) Die Dissipation mechanischer Energie ist irreversibel, ihre Umkehrung deshalb mit Energieaufwertung verbunden. Um im Einklang mit dem Satz von der Entwertung der Energie zu bleiben, muß also ein anderer in natürlicher Richtung ablaufender Prozeß zu einer mindestens ebenso großen Energieentwertung führen. Der Heizkessel kann also nicht die ganze Energie auf das Schwungrad übertragen, sondern muß einen Teil davon an ein kälteres thermisches System (meist die Umgebung) abgeben.

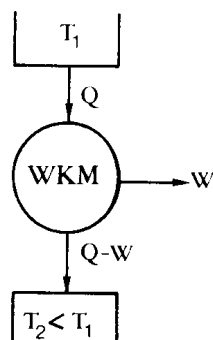


Abb. 5: Prinzip einer Wärmekraftmaschine (WKM) (Erläuterungen siehe Text).

b) Um dem Satz von der Energieentwertung zu genügen, muß entsprechend obiger Werteskala, wonach mechanische Energie wertvoller ist als Wärme jeder Temperatur, selbst im Idealfall mehr Wärme investiert werden, als mechanische Energie gewonnen werden kann.

Wegen des Prinzips der Energieerhaltung muß also ein Teil der Energie z. B. an die Umgebung abgegeben werden.

Da die Energieabgabe an die Umgebung umso stärker entwertend ist bzw., da der Wert der abgegebenen Wärme umso größer ist, bei je höherer Temperatur die Abgabe erfolgt, kann der Wirkungsgrad der WKM umso größer sein, je höher die Temperatur des Heizkessels ist.

In ähnlicher Weise kann man sich die Abhängigkeit des möglichen Wirkungsgrades von der Temperatur des Kühlsystems überlegen.

### 7.2 Wärmepumpe

Mit einer Wärmepumpe (WP) wird durch Einsatz von elektrischer Energie oder Wärme höherer Temperatur z. B. einem Zimmer ständig Wärme zugeführt, um dessen Temperatur trotz Wärmeabgabe an die Umgebung aufrechtzuerhalten. Ganz ähnlich wie in 7.1 folgt aus den bisherigen Überlegungen sofort, daß der Wirkungsgrad der WP,

$$\eta_{WP} = \frac{Q}{W} \text{ bzw. } \eta^* = \frac{Q}{Q'}$$

d. h. das Verhältnis aus erzielter Wärmezufuhr und investierter Energie  $W$  oder  $Q'$ , größer als 1 sein kann:

a) Die mit der Abgabe der Energie an das Zimmer verbundene Energieentwertung kann eine Aufwertung betreiben, z. B. indem Wärme entgegen der natürlichen Tendenz aus der Umgebung in das Zimmer gepumpt wird, so daß diesem zusätzlich Energie zugeführt wird.

b) Entsprechend obiger Werteskala kann weniger elektrische Energie oder Wärme höherer Temperatur - d. h. weniger hochwertige Energie - investiert werden als niederwertige Energie benötigt wird. Die zusätzliche Energie kann z. B. der Umgebung entzogen werden.

E

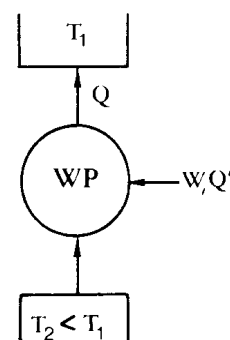


Abb. 6: Prinzip einer Wärmepumpe (WP) (Erläuterungen siehe Text).

Wie in 7.1 ergibt sich, daß der Wirkungsgrad der WP umso größer sein kann, je niedriger die Temperatur des Zimmers und je wärmer die Umgebung ist.

Daher wächst der Wirkungsgrad einer Wärmepumpe im Unterschied zur Wärmekraftmaschine mit abnehmender Temperatur des heißen Reservoirs und zunehmender Temperatur der Umgebung.

Ein Kühlschrank stellt im Prinzip eine Wärmepumpe dar, die die Dissipation hochwertiger Energie nutzt, um Wärme einem kalten endlichen Körper zu entziehen und auf die verglichen damit warme Umgebung zu übertragen, also einen Abkühlungsvorgang zu "betreiben". Handelt es sich bei der hochwertigen Energie um Hochtemperaturwärme (die z. B. durch Verbrennen von Gas hergestellt wird), dann liegt die paradox erscheinende, im Rahmen des Entwertungskonzepts aber verständliche Situation vor, daß etwas durch Erwärmen gekühlt wird: Mit dem Vorgang der Wärmeabgabe von einem Körper hoher Temperatur an die Umgebung wird der Vorgang der Wärmeaufnahme eines kalten Körpers aus der Umgebung zurückgespult, d. h. eine Abkühlung unter Umgebungstemperatur betrieben.

### 7.3 Wertabhängigkeit des Wirkungsgrads

In welchem Maße verschiedene Energiearten ineinander umgewandelt werden können, richtet sich nach dem Prinzip der Energieentwertung. Bei der Diskussion von Wärmekraftmaschine und Wärmepumpe ist folgendes deutlich geworden: Bei der Umwandlung einer minderwertigen in eine hochwertige Energieart entsteht selbst im Idealfall weniger hochwertige Energie als minderwertige Energie eingesetzt wurde. Umgekehrt kann bei der Umwandlung einer hochwertigen in eine minderwertige Energieart mehr minderwertige Energie hergestellt werden, als hochwertige Energie investiert wurde. (Da in unserem Konzept bei allen Energieumwandlungen die Umgebung beteiligt ist, kommt durch diese Aussagen kein Widerspruch zum Energiesatz zum Ausdruck.)

Möchte man die Güte einer Energieumwandlung beurteilen, dann reicht es u. E. nicht aus, wie üblich den Wirkungsgrad festzustellen, d. h. die Menge der gewünschten Energie( an der eingesetzten Energie zu messen. Beispielsweise suggeriert der Wirkungsgrad vom Werte 1 bei der Umwandlung von elektrische Energie in Wärme durch eine Widerstandsheizung, daß es nicht besser geht. Die große Energieverschwendung, die mit dieser Umwandlung verbunden ist, kommt auf diese Weise nicht in den Blick. Bei Wärmekraftmaschinen kommt es demgegenüber aufgrund des üblichen Wirkungsgrads zu

einer Unterschätzung der Güte der Energieumwandlung.

Im Rahmen des Entwertungskonzepts ist nicht der Vergleich der an einer Umwandlung beteiligten Mengen entscheidend, sondern die Frage, inwieweit der Idealfall einer verschwindenden Gesamtentwertung und damit des maximal möglichen Wirkungsgrads angenähert wird.

Wir schlagen daher einen Wirkungsgrad vor (siehe BACKHAUS et al. 1984, in diesem, Heft), der die tatsächlich gewonnene Menge der gewünschten Energie an der maximal gewinnbaren Menge mißt oder - von der eingesetzten Energie aus gesehen - der die minimal aufzuwendende Energie an der für die Gewinnung einer bestimmten Energiemenge tatsächlich aufzuwendenden Energie mißt.

## 8 Zusammenfassung

Ausgehend von der Erfahrung, daß Energie ähnlich wie andere Dinge des täglichen Bedarfs verbraucht wird, wurde der Begriff der Energieentwertung eingeführt. Als lebensweltliches Pendant zum zweiten Hauptsatz der Thermodynamik wurde der Satz von der Entwertung der Energie formuliert, der zum Ausdruck bringt, daß jeder selbsttätige Vorgang mit Energieentwertung einhergeht. Das Entstehen von Strukturen, die Aufrechterhaltung von Lebensvorgängen usw., Vorgänge, die offenbar mit Energieaufwertung verbunden sind, widersprechen diesem Prinzip nicht, da im Zusammenhang mit diesen Vorgängen immer noch andere Prozesse ablaufen. Im Rahmen unseres Konzepts werden solche Aufwertungen durch Vorgänge betrieben, die mit einer Energieentwertung einhergehen, so daß insgesamt keine Aufwertung eintritt. Nach diesem Schema können zwei Vorgänge hinsichtlich ihrer Energieentwertung verglichen werden, indem man sie gegeneinanderlaufen läßt: Derjenige Vorgang ist mit einer größeren Energieentwertung verbunden, der den jeweils anderen entgegen seiner natürlichen Abaufrichtung zu treiben vermag. Dieses Vergleichsverfahren erlaubt es, eine qualitative Werteskala für die verschiedenen Energiearten zu begründen, die den populärwissenschaftlichen Vorstellungen über den Wert der Energie entspricht.

Die starke Einbeziehung der Umgebung mag unüblich erscheinen, sie begründet aber nicht nur die große Tragfähigkeit des Entwertungskonzepts. Darüber hinaus wird dadurch bewußt gemacht, daß die Umgebung ähnlich wie für verbrauchte oder entwertete Gegenstände sozusagen den Müllplatz für Energie darstellt, dessen Aufnahmekapazität zwar groß aber sicher nicht unendlich ist. Die Belastung möglichst klein zu halten bedeutet, Energieentwertungen möglichst zu vermeiden. Das heißt: Energieentwertungen sollten zu größtmögli-

chen Energieaufwertungen genutzt werden, ein Bestreben, das gleichzeitig mit Energieeinsparungen einhergeht: Die Verringerung der (thermischen) Umweltverschmutzung und der Energieverschwendung sind so gesehen die beiden Seiten derselben Medaille.

Wie sich das hier nur bis zum komparativen Begriff entwickelte Konzept der Energieentwertung zu einer physikalischen Größe verschärfen läßt, wird in dem folgenden Aufsatz gezeigt.

#### Anmerkungen

- 1) Der Energiebegriff, insbesondere die Eigenschaft der Energieerhaltung, wird in dieser Arbeit als bekannt vorausgesetzt.
- 2) „Entwertung“ soll hier allgemein sowohl den völligen Wertverlust als auch alle Abstufungen nur teilweiser Wertverluste umfassen. Obwohl dieser Sachverhalt wohl besser mit dem Begriff „Abwertung“ zu umschreiben wäre, bleiben wir bei der etwas geläufigeren „Entwertung“.
- 3) Tatsächlich geht diese Beschreibung nicht weiter über die Erfahrung hinaus als die übliche: Auch die Sprechweise Energie, gehe von einem System auf das andere über, ist eine Modellvorstellung. Beobachtbar ist lediglich das Verschwinden einer bestimmten Energieart in dem einen System und das Auftauchen einer bestimmten Energieart im anderen System.
- 4) Diese verkürzte Sprechweise wird im folgenden benutzt, um den Vorgang der Wärmeabgabe (-aufnahme) eines Systems bei einer bestimmten Temperatur zu kennzeichnen.
- 5) Hohe Ablaufgeschwindigkeiten bedeuten große Energieentwertung, und es fragt sich, ob der Vorteil schneller Prozeßabläufe nicht häufig bereits in einem ungünstigen Verhältnis zum dafür zu treibenden Aufwand steht.
- 6) Diese Aussagen wurden hier nur für Temperaturen oberhalb der Umgebungstemperatur begründet. Sie gelten jedoch allgemein, wenn es auch unterhalb der Umgebungstemperatur näherliegt, von der mit der Energieaufnahme verbundenen Entwertung zu sprechen.

#### Literatur

- BACKHAUS, U.; SCHLICHTING, H. J.: Entropie und Exergie: Zwei Größen zur Beschreibung von Irreversibilität und Energieentwertung; Der Physikunterricht 18/3 (1984)
- BACKHAUS, U.; SCHLICHTING, H. J.: Der exergetische Wirkungsgrad; Der Physikunterricht 18/3 (1984)
- BAEHR, H. D.: Thermodynamik; Berlin: Springer 1981
- SCHLICHTING, H. J.: Energie und Energieentwertung; Heidelberg: Quelle & Meyer 1983