

## Energieentwertung - ein qualitativer Zugang zur Irreversibilität

H. Joachim Schlichting Westfälische Wilhelms Universität Münster

*The comprehension of the laws which govern any material system is greatly facilitated by considering the energy and entropy of the system in the various states of which it is capable.*

J. Williard Gibbs (1875)

### Energie wird wie Wasser verbraucht

Geht man davon aus, dass es zu den allgemeinen Zielsetzungen des Physikunterrichts gehört, ein angemessenes Verständnis der durch die Naturwissenschaften geprägten Welt zu ermöglichen, so kann sich der Unterricht nicht auf die Idealgestalten der Physik beschränken, sondern muß sich einer aktiven Auseinandersetzung mit den lebensweltlichen Erfahrungen der Schülerinnen und Schüler stellen.

Die Thermodynamik mit ihren allgemeinen Begriffen und Konzepten wie System, Zustand, Zustandsänderungen, Energie und Entropie kann dabei eine wesentliche Rolle spielen. Zwar ist schon seit längerem die Bedeutung der Energie als Brücke zwischen Physik und Lebenswelt erkannt worden. Leider beschränken sich die meisten Einführungen der Energie auf den Aspekt der Energieerhaltung. Die lebensweltlichen Erfahrungen im Umgang mit der Energie sind aber darüber hinaus vor allem durch den *Energieverbrauch* und den *Antrieb* von Vorgängen geprägt. Die Vernachlässigung, ja die bewußte Unterdrückung dieser Aspekte verhindert geradezu, dass Beziehungen zwischen physikalischen Konzepten und lebensweltlichen Erfahrungen gesehen werden.

In Anlehnung an die übliche Verwendung des Wortes Verbrauch gehen wir davon aus, dass zwischen Energieerhaltung und Energieverbrauch kein Widerspruch besteht. Da die Energie eine mengenartige Größe ist, sollte man die Bedeutung des Wortes Energieverbrauch in Analogie zur Bedeutung des Verbrauchs von beliebigen Stoffen, etwa dem Wasserverbrauch im Haushalt betrachten: Wasser wird für die verschiedensten Zwecke, zum Kochen, Waschen, Klospülen usw. verbraucht, ohne dass jemand darin einen Widerspruch zur Erhaltung des Wassers sähe. Im Gegenteil, meist wird die Schmutzwasserbeseitigung dadurch berechnet, dass man den Wasserverbrauch an der Wasseruhr abliest. Auf diese Weise dürften die Lernenden keine konzeptuellen Schwierigkeiten damit haben, Ener-

gie gleichzeitig als quantitativ erhalten und qualitativ verändert anzusehen.

Die im alltäglichen Umgang mit der Energie erfahrene qualitative Veränderung im Sinne einer Entwertung, die es beispielsweise (wiederum in Analogie zum Wasserverbrauch) unmöglich macht, einmal an die Umgebung abgegebene Energie noch einmal, z.B. zum Heizen eines Zimmers zu gebrauchen, wird im Rahmen der physikalischen Begriffsbildung jedoch nicht als zusätzliche Eigenschaft der Energie beschrieben, sondern durch einen eigenen physikalischen Begriff, die Entropie, erfaßt. Mit Hilfe der Entropie lassen sich diese bleibenden Veränderungen, die Irreversibilität von Prozessen, physikalisch beschreiben.

### Die Entropie "legalisieren"

Neben dieser didaktisch- lerntheoretischen Argumentation spricht für eine frühe Hinführung zur Entropie im Physikunterricht die Praxis, das Entropieprinzip bereits unter der Hand und unter verschiedenen Namen zu verwenden, ohne dass dies bewußt gemacht würde.

Wenn beispielsweise ein Gegenstand umkippt, sagt man, er gehe ins stabile Gleichgewicht über, weil der Schwerpunkt bestrebt sei, stets die niedrigste Lage einzunehmen. Dabei wird die Schwerkraft, also ein rein mechanisches Konzept als Ursache angesehen. Wem ist schon klar, dass der Übergang ins Gleichgewicht nur unter Dissipation von Energie, also Zunahme von Entropie möglich ist und sich in der einseitigen Tendenz eines Gegenstandes, den Zustand minimaler potentieller Energie einzunehmen, das Entropieprinzip manifestiert? Rein mechanisch gesehen dürfte ein fallender Gegenstand gar nicht zur Ruhe kommen, sondern immer wieder zum Startpunkt zurückkehren. Auch die zahlreichen "mechanischen" Phänomene, bei denen die Reibung als konstruktives Element im Spiel ist, wie etwa die Fortbewegung eines Autos oder eines Bootes wer-

den kaum mit der Dissipation von Energie, bzw. Entropie in Verbindung gebracht.

In der Elektrizitätslehre sieht es ähnlich aus. Stationäre elektrische Ströme stellen typische Fließgleichgewichte dar, die nur dadurch aufrechterhalten werden können, dass Energie dissipiert wird (Joulesche Wärme). Und der oft als Paradoxon bezeichnete Befund, dass der Ladungsausgleich zwischen einem geladenen und einem baugleichen ungeladenen Kondensator zu einem "Verlust" der Hälfte der Energie führt, ist Ausdruck der Entropiemaximierung.

Schließlich sind alle Argumente im Zusammenhang mit der Minimierung von Oberflächen, etwa bei der Strukturierung von Seifenblasengebilden mehr oder weniger umständliche Umschreibungen des Entropieprinzips. Denn die Verminderung der Oberflächen wird durch die Dissipation von Oberflächenenergie bewirkt, also durch einen irreversiblen Prozeß, der die Entropie der Welt zu maximieren sucht.

Anstatt in den verschiedensten Zusammenhängen eine Vielzahl von Prinzipien zur Erklärung zu benutzen, (Schwerpunkt nimmt tiefste Lage ein, Oberfläche wird möglichst klein, unterschiedliche Flüssigkeitsniveaus gleichen sich aus, Potentialdifferenzen (z.B. elektrische Spannungen) werden ausgeglichen usw.) genügte die einmalige Einführung des universell, d.h. über alle disziplinären Grenzen hinweg gültigen Entropieprinzips bzw. eines entsprechenden qualitativen Äquivalents, das alle Vorgänge bzw. Zustandsänderungen und Strukturbildungen bestimmt.

### Die positiven Aspekte der Entropie hervorheben

Die Entropie wird in der Physikausbildung nicht nur in ihrer Bedeutung unterschätzt. Sie hat darüber hinaus ein sehr negatives Image. Sie wird für alles Übel in der Welt verantwortlich gemacht. Bereits kurz nachdem sie in der zweiten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts aus der Taufe gehoben wurde, galt sie als Inbegriff für Zerstörung und Zerfall, die schließlich zum "Wärmetod der Welt" führen würde. "Die Weltherrin und ihr Schatten" lautete ein damals weit verbreitetes Buch von Felix Auerbach [1], in dem die Entropie als Schatten, als Gegenspieler der Energie, der Weltherrin, beschrieben wurde. Erst viel später wurde erkannt, dass die Rollen eigentlich vertauscht werden müßten, aber diese Erkenntnis beginnt sich erst heute in den Lehrplänen und Ausbildungsgängen niederzuschlagen [2].

Vermutlich infolge der allmählichen Verbreitung der nichtlinearen Physik, die sich u.a. mit der Strukturbildung in komplexen Systemen befaßt, treten

immer mehr die konstruktiven und positiven Aspekte des Entropieprinzips in den Vordergrund. Es wird deutlich, dass die mit Hilfe der Entropie beschriebene Tendenz von Systemen, unter Dissipation von Energie ins thermodynamische Gleichgewicht überzugehen, nicht nur negativ im Sinne des Zerfalls von Strukturen gesehen werden darf. Denn nur durch diese Bewegung zum strukturlosen Gleichgewicht ist es möglich, dass andere Systeme aus dem thermodynamischen Gleichgewicht herausgetrieben werden, Ströme fließen und Strukturen entstehen können. Ein Physikunterricht, der nicht nur Systeme im thermodynamischen Gleichgewicht behandelt und den Kontakt zu realen Systemen herstellen möchte, kommt daher nicht umhin, sich mit Konzepten zu befassen, die diese Phänomene zu beschreiben gestatten.

### Den Physikunterricht an den aktuellen Forschungsstand heranführen

Der heutige Physikunterricht bleibt überwiegend auf den Bereich der klassischen Physik beschränkt. Neuere Entwicklungen der letzten hundert Jahre wie Quantenphysik und Relativitätstheorie und erst recht Gegenstände der aktuellen physikalischen Forschung erreichen den Physikunterricht kaum. Besonders zu nennen sind hier die im Rahmen der Nichtgleichgewichtsthermodynamik und der nichtlinearen Dynamik diskutierten Phänomene wie Strukturbildung, Selbstorganisation, chaotisches Verhalten u.ä., die zur Erschießung komplexer Systeme der wissenschaftlich technischen und der natürlichen Welt und damit für die Schulphysik von großer Bedeutung sind.

Es soll im folgenden skizziert werden, wie ein zunächst nur qualitatives und globales Verständnis dieses Problemkreises mit schulischen Mitteln erreicht und damit ein vorläufiger Rahmen für ein tiefer gehendes Verständnis geschaffen werden kann. Ausgangspunkt sind thermodynamische Konzepte, mit denen zunächst ein neuer Blick auf die alten Systeme im thermodynamischen Gleichgewicht geworfen wird und schließlich ein Zugang zu Phänomenen geschaffen werden kann, die sich aus dem thermodynamischen Gleichgewicht heraus zu komplexen Strukturen entwickeln. Mit einem Wort von Ilya Prigogine soll das Interesse des Unterrichts vom "Sein zum Werden" gelenkt werden.

### Energieentwertung als qualitatives Konzept der Irreversibilität

Den Ausgangspunkt unserer Überlegungen bildet die Frage, worin die Gemeinsamkeiten von Vorgängen bestehen, bei denen Energie verbraucht wird

(ausführlichere Darstellungen in [4]). Dazu betrachten wir einige typische Beispiele:

- Wenn eine Kerze abbrennt, dann wird die im Wachs enthaltene chemische Energie verbraucht, indem sie an die Umgebung abgegeben wird.
- Heißes Teewasser kühlt sich an der Umgebung ab. Dabei fließt Wärme bei hoher Temperatur an die Umgebung niedrigerer Temperatur.
- Eine Kugel rollt einen Berg hinab. Die potentielle Energie geht an die Umgebung über.
- Ein (heliumgefüllter) Luftballon erhebt sich in die Lüfte. Dabei wird potentielle Energie der schwereren Luft an die Umgebung abgegeben.
- Eine Taschenlampe leuchtet, wird allmählich dunkler und erlischt schließlich völlig. Die in der Batterie gespeicherte chemische Energie wird verbraucht und als Wärme und Licht an die Umgebung abgegeben.

Der Verbrauch der Energie äußert sich bei diesen Vorgängen darin, dass sie unwiderruflich an die Umgebung abgegeben wird. Jedenfalls werden sich die Verbrennungsgase nicht von selbst wieder mit der in der Umgebung reichlich vorhandenen Energie zu einer Kerze vereinigen, obwohl dies nicht im Widerspruch zum Energieerhaltungssatz stünde. Ebenso wird sich das Teewasser nicht wieder von selbst erwärmen, die Kugel nicht von selbst den Berg hinaufrollen und die Batterie sich nicht wieder von selbst aufladen.

Gemeinsam ist den Vorgängen also, dass sie von selbst nur in der einen nicht aber in der anderen Richtung ablaufen, "ohne eine andere bleibende Veränderung zurückzulassen" [3]. Man sagt auch, die Vorgänge sind irreversibel. Bezogen auf die Energie macht sich die Irreversibilität in einer Entwertung bemerkbar, die darin besteht, dass die Energie nicht noch einmal für denselben Zweck genutzt werden kann.

Mit anderen Worten: *Jeder von selbst ablaufende (energetische) Vorgang bzw. Prozeß ist mit einer Entwertung von Energie verbunden, die darin zum Ausdruck kommt, dass der Vorgang nicht von selbst in umgekehrter Richtung abläuft.*

Dieser Satz kann als ein qualitatives Äquivalent zum 2. Hauptsatz der Thermodynamik, dem Entropieprinzip angesehen werden. Es liegt nahe, vom *Prinzip der Energieentwertung* zu sprechen.

Die Schülerinnen und Schüler werden an dieser Stelle erfahrungsgemäß geltend machen, dass man durchaus Vorgänge kennt, die in umgekehrter Richtung ablaufen. So könnten sie beispielsweise darauf hinweisen, dass ein (heliumgefüllter) Luftballon

nicht nach unten fällt, sondern aufsteigt. Oder dass das Teewasser auf einer Herdplatte wieder warm wird.

Der aufsteigende Luftballon und ähnliche Vorgänge

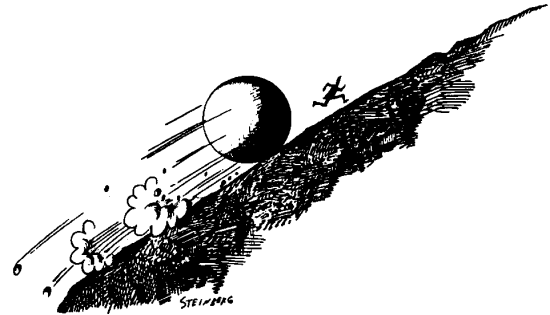


Abb. 1: Verstoß gegen das Prinzip der Energieentwertung. Kein Verstoß gegen das Energieprinzip

können leicht als verkappte Beispiele für Energieentwertung entlarvt werden. Denn der Luftballon steigt nicht von allein auf. Er wird durch die absinkende schwerere Luft hochgedrückt. Dadurch nimmt die potentielle Energie des Luftballons zu, die der absinkenden Luft ab. Der Vorgang der absinkenden Luft spult gewissermaßen den Vorgang des fallenden Luftballons zurück, so dass dieser steigt. Die Energieentwertung der absinkenden Luft macht die Energieentwertung, die mit dem fallenden Luftballon verbunden wäre, rückgängig, was man anschaulich als eine Energieaufwertung bezeichnen könnte.

Diese Sehweise kann an anderen von selbst ablaufenden Vorgängen vertieft werden. Auch das Teewasser wird nicht *von selbst* warm, sondern *wird* erwärmt. Das heißt, es sind weitere Vorgänge beteiligt, die sich bis hin zum Strom liefernden E-Werk verfolgen lassen. Das Prinzip von der Entwertung der Energie schließt nicht aus, dass Teilvorgänge mit einer Energieaufwertung einhergehen. Entscheidend ist, dass der gesamte (mit Aufnahme und Abgabe von Energie, also unter Energieerhaltung) verbundene Vorgang von selbst abläuft und daher eine Energieentwertung bedingt.

Die Unterscheidung von Gesamt- und Teilvorgängen kann so weit entwickelt werden, dass man Vorgänge, die scheinbar im Widerspruch zum Prinzip von der Entwertung der Energie stehen, als Ergebnis einer beschränkten Wahrnehmung zu entlarven lernt. Betrachten wir beispielsweise die als Bildsequenz (Abb. 2) dargestellten beiden Strukturbildungsvorgänge, so würde man auf den ersten Blick die selbsttätige Entstehung eines Schneemanns als unmöglich, das Heranwachsen einer Pflanze aber als selbstverständlich ansehen, obwohl in beiden Fällen etwas Ähnliches passiert: es entsteht eine

Struktur. Erst auf den zweiten Blick wird klar, dass man bei der Pflanze, die Anwesenheit von Licht als selbstverständlich vorausgesetzt hat, d.h. die irreversible Ausstrahlung von Energie durch die Sonne. Man hätte also der Vollständigkeit halber auch eine Sonne im Bild einzeichnen müssen. Würde man die Sequenz des wachsenden Schneemanns mit einer Schar Kinder umgeben, die sich beim Bau des Schneemanns verausgaben, so erschiene auch dieser Vorgang realistisch. Immer dann, wenn ein Vorgang entgegen seiner "natürlichen" Richtung verläuft, läßt sich ein anderer gegebenenfalls unauffälliger Vorgang finden, der in natürlicher Richtung also selbsttätig abläuft und ersteren antreibt.

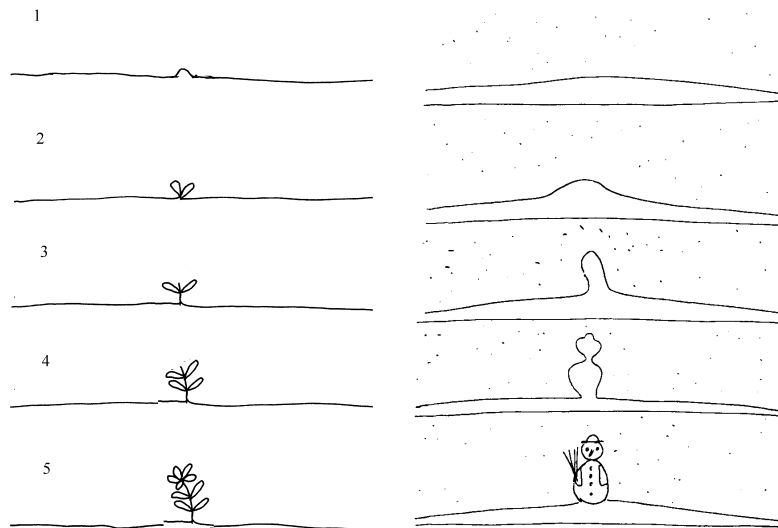


Abb. 2: Zwei Strukturbildungsvorgänge, der eine wird für möglich, der andere für unmöglich gehalten.

Wenn man die Karikatur (Abb. 1) der den Berg hinaufrollenden Kugel mit dem Vorgang des Herabfallenden Gewichtsstücks ergänzte (Abb. 3), wäre der Witz dahin, weil ein solcher Vorgang nicht gegen die Erfahrung verstößt. Die entscheidende Idee der hier skizzierten Aufteilung eines als untrennbar empfundenen Gesamtgeschehens in vorwärts und rückwärts laufende Teilvorgänge (Rückspulkonzept) wird an anderer Stelle ausführlicher beschrieben (siehe [4].)

Es ließen sich zahlreiche weitere Beispiele finden, die schließlich folgende Verallgemeinerung nahelegen:

*Jeder Vorgang läßt sich durch einen anderen selbsttätigen Vorgang zurückspulen, d.h. umgekehrt zur natürlichen Richtung treiben. Mit anderen Worten: Eine Energieaufwertung wird durch eine Energieentwertung betrieben.*

Im Lichte dieses Satzes gewinnt der Verbrauch von Energie im Alltag einen etwas anderen Akzent: Wir benötigen keine Energie, sondern Vorgänge, die bei ihrem Ablauf Licht, Bewegung, Schall, Wärme etc. in den verschiedensten Formen produzieren. Damit man diese Vorgänge je nach Bedarf und Bedürfnis immer wieder ablaufen lassen bzw. aufrechterhalten kann, muß man geeignete selbsttätige Vorgänge zur Verfügung haben, mit denen die abgelaufenen bzw. ablaufenden Vorgänge immer wieder zurückgespult werden, um erneut oder weiterhin ablaufen zu können und dabei die Menschen mit Licht, Bewegung usw. zu versorgen. Dazu eignet sich insbesondere der Verbrauch hochwertiger elektrischer Energie, die mit Hilfe elektrischer Stromkreise auf relativ einfache und bequeme Weise verfügbar gemacht werden kann. Um seinerseits den elektrischen Strom

aufrecht zu erhalten, müssen im Kraftwerk riesige Mengen Kohle, Gas u.ä. verbrannt werden.

### Entwertung durch Verteilung über ein größeres Volumen

Bei manchen irreversiblen Vorgängen rückt die *Energieentwertung* in den Hintergrund.

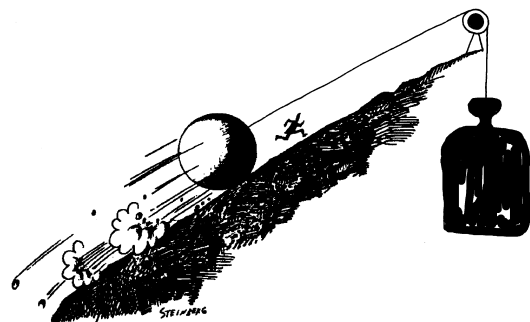


Abb. 3: Die Bedrohung des flüchtenden Menschen scheint nunmehr sehr real.

- Wäsche trocknet auf der Leine ,
- die Regenpfütze auf dem Asphalt verschwindet,
- das Wasser im Teich wird während trockener Sommerwochen weniger.

Diesen Vorgängen liegt die Tendenz der Stoffe insbesondere von Flüssigkeiten und Gasen zugrunde, sich von selbst mehr oder weniger schnell auf den zur Verfügung stehenden Raum zu verteilen. Ein Tropfen Parfüm, der auf dem Handrücken verteilt wird, ist bald auch in einiger Entfernung wahrzunehmen. Die Entwertung durch Verdunstung kann man sich durch folgende Überlegung veranschaulichen. Wenn man einen Klumpen Gold zu einem feinen Pulver mahlt und es dann auf einem großen

Feld verteilt, so ist es zwar nach wie vor vorhanden. Es ist aber nichts mehr wert, da es nur unter unvorstellbar hohem Aufwand wieder eingesammelt werden könnte.

Die Verdunstung ist wie jeder selbsttätige Vorgang in der Lage, andere Vorgänge zurückzuspulen. So weist beispielsweise eine leicht flüchtige Flüssigkeit in einem offenen Gefäß eine deutlich niedrigere Temperatur als die Umgebung auf. Infolge der Verdunstung wird also ein Temperatenausgleichsvorgang in umgekehrter Richtung getrieben. Dadurch dass die für die Trennung der Flüssigkeitsteilchen nötige Energie der Umgebung und das heißt vor allem der Flüssigkeit selbst entzogen wird, kühlt sie sich entsprechend ab. Die mit dieser Abkühlung einhergehende Aufwertung der Energie wird durch die Entwertung aufgrund der Verteilung der Flüssigkeit ausgeglichen.

Die Temperaturniedrigung der Flüssigkeit kommt bei einer bestimmten Gleichgewichtstemperatur unterhalb der Umgebungstemperatur zum Stillstand. Denn die abgekühlte Flüssigkeit, tendiert dazu, wieder Umgebungstemperatur anzunehmen. Infolge dessen setzt ein Energiestrom von der Umgebung zur Flüssigkeit ein. Wenn dieser Energiestrom genauso groß ist wie der Energiestrom, der die Verdunstung unterhält, ist dieses Fließgleichgewicht erreicht.

### Entwertung als "Antrieb"

In der Aussage, dass die Umkehr eines selbsttätigen Vorgangs den selbsttätigen Ablauf eines geeigneten anderen Vorgangs voraussetzt, wird das Prinzip des Antriebs für alles Geschehen auf der Erde und im Kosmos zum Ausdruck gebracht. Dies wird meist nicht so gesehen. Wem wäre schon klar, dass beispielsweise

- ohne Abgabe von Wärme durch die Heizkörper an die Wohnung, also ohne Entwertung von Energie, der "Schwerkraftsantrieb" der Heizungsanlage nicht funktionieren würde.
- ohne Entwertung von kinetischer Energie durch Wirbel, ein Schiff sich nicht vorwärts bewegen und ein Flugzeug nicht fliegen könnte.
- ohne Verdunstung von Wasser (Schwitzen) Menschen ihre Körpertemperatur nicht einregeln, keine Wolken entstehen könnten und damit wesentliche Aspekte des Lebens auf der Erde nicht vorhanden wären.

Da selbsttätige Vorgänge der "sichtbare" Ausdruck von Systemen sind, ins thermodynamische Gleichgewicht überzugehen, kann man den Antriebsaspekt auch folgendermaßen umschreiben. Die Tendenz von Systemen, ins thermodynamische Gleichge-

wicht überzugehen, kann so stark sein, dass dabei andere Systeme aus dem thermischen Gleichgewicht herausgetrieben werden:

- Um verdunsten zu können, muß der Flüssigkeit Energie entzogen werden. Indem sie sich auf diese Weise unter die Umgebungstemperatur abkühlt, entfernt sie sich aus dem thermodynamischen Gleichgewicht. Die so entstandene Temperaturdifferenz mit der Umgebung ruft ihrerseits einen Wärmeleitungsvorgang von der Umgebung zum System hervor. Wenn man nun diese Kette von Antrieben fortsetzt, indem man behauptet, dass die Wärmeleitung genutzt werden kann, mechanische Energie zu erzeugen, so mag das übertrieben klingen. In Form eines bekannten Spielzeugs, der (u.a. so genannten) Trinkente wird sogar noch eine etwas komplexere Sequenz von Antrieben bzw. Rückspulvorgängen realisiert: Indem auf dem feucht gehaltenen Kopf des "Tiers" Wasser verdunstet, wird ein Gas mit niedrigem Dampfdruck im Innern des Kopfes abgekühlt und teilweise zur Kondensation gebracht. Der dadurch entstehende Unterdruck führt dazu, dass eine Flüssigkeitssäule angehoben und das Tier nach vor überkippt, den Kopf in einem bereitstehenden Wasserglas erneut benetzt und einen Druckausgleich bewirkt. Das Tier schwingt zurück und, indem das abgekühlte Gas vor allem im Hinterteil des Tiers thermische Energie aus der Umgebung aufnimmt, wird der Ausgangszustand wieder hergestellt. Jetzt kann der Vorgang von neuem beginnen (Einzelheiten siehe z.B. [6]).
- Um sich schnell ausdehnen zu können, schiebt der heiße, unter hohem Druck stehende Dampf des Kraftwerkskessels die "im Wege" stehenden Turbinenschaufeln vor sich her und bringt die Turbine in Rotation.
- Um eine elektrische Spannung aufheben zu können, muß ein elektrischer Strom durch die Leitungen getrieben werden und dabei gegebenenfalls einen "im Wege" stehenden Elektromotor in Drehung versetzen.
- Das Bestreben von Salz- und Süßwasser sich zu vermischen ist so groß, daß es selbst dann zustande kommt, wenn aufgrund einer semi-permeablen Trennwand, die nur Süßwasser durchläßt, das sich durch das eindringend Süßwasser verdünnende Salzwasser zu einer Wassersäule aufstaut (Einzelheiten und quantitative Abschätzungen dazu siehe [8]).
- Auch eine chemische Reaktion kann mit Hilfe eines Daniel- Elements dazu veranlaßt werden, Elektronen über den "Umweg" eines elektri-

schen Stromkreises also gegen einen ohmschen Widerstand und – im Falle der Einbindung eines Elektromotors in den Stromkreis – einen "elektromotorischen Widerstand" auszutauschen.

Natürlich ist mit jedem Entwertungsvorgang der Übergang eines Systems in Richtung thermisches Gleichgewicht verbunden, was man als Wert- oder Strukturverlust, als Zerfall u.ä. beschreibt und damit zum Ausdruck bringt, dass etwas unwiderruflich verloren geht. Aber diese Entwertung bzw. Dissipation ist andererseits Voraussetzung dafür, dass andere Vorgänge zurückgespult und Systeme aus dem thermischen Gleichgewicht herausgetrieben werden. Darin ist der konstruktive Aspekt der Dissipation zu sehen. Ohne Dissipation bliebe die Welt im jeweiligen Zustand erstarrt - ohne Chance einer Veränderung.

## Zusammenfassung

Aus physikalischer Sicht umfaßt das lebensweltliche Energiekonzept sowohl den physikalischen Energiebegriff, der die Erfahrung der Erhaltung, als auch den Entropiebegriff, der die bleibende Veränderung erfaßt, die sich einerseits Energieverbrauch, andererseits aber auch im "Antrieb" von Vorgängen niederschlägt. Wegen der großen Bedeutung, die gerade dem Verbrauchs- und Antriebsaspekt im lebensweltlichen Umgang mit der Energie zukommt, muß eine auf den Erhaltungsaspekt beschränkte Energie unverstündlich bleiben. "Wieso müssen wir Energie sparen, wenn sie doch ewig erhalten bleibt?" (typische Schülerfrage). Dabei ist entscheidend, dass der Verbrauchs- und Antriebsaspekt als typischer Ausdruck der Irreversibilität allen realen Geschehens begriffen werden. Ohne unwiderrufliche Veränderungen gäbe es nicht Neues, keine Evolution, keine Geschichte und kein Leben. " ...wir sind Etwas, das wechselt, und Etwas, das dauert" (Jorge Luis Borges).

Vor diesem Hintergrund schlagen wir vor, bereits für die Sekundarstufe I ein qualitatives Äquivalent für die Entropie in Form der Energieentwertung verfügbar zu machen [5] und im Umgang mit diesem zur Energie komplementären Konzept eine breite Basis zu schaffen, auf der eine Quantifizierung in Form des Entropiekonzepts als logische Konsequenz erscheint ([7], [8]).

## Literatur

- [1] Auerbach, Felix: Die Weltherrin und ihr Schatten. Jena: Verlag von Gustav Fischer 1913  
[2] Rahmenrichtlinien für das Land NRW, Sek. II.

[3] Planck, Max: Zur Geschichte der Auffindung des physikalischen Wirkungsquantums. In: Vorträge und Reden. Braunschweig: Vieweg 1958, S. 256.

[4] Schlichting, H. Joachim: Energie und Energieentwertung in Naturwissenschaft und Umwelt. Heidelberg: Quelle & Meyer 1983. Ders.: Energieverbrauch und Energieentwertung. Der Physikunterricht 18/3, 24 (1984). Ders. Entropie und Exergie: Zwei Größen zur Beschreibung von Irreversibilität und Energieentwertung. Der Physikunterricht 18/3, 41 (1984)

[5] Boysen, Gerd et al.: Physik für Gymnasien. Berlin: Cornelsen 1994, S. 260 ff

[6] Schlichting, H. Joachim: Der trinkende Storch - eine Verdunstungskraftmaschine. Praxis der Naturwissenschaften - Physik 41/2, 22 (1992).

[7] Boysen, Gerd et al.: Oberstufe Physik, Band 1. Berlin: Cornelsen 1997, S. 129 ff. Ders.: Oberstufe Physik, Band 2. Berlin 1998, S. 448 ff

[8] Schlichting, H. Joachim: Von der Energieentwertung zur Entropie. In diesem Heft.

Zur Beschreibung des Energieverbrauchs und allgemeiner der Irreversibilität von Vorgängen wird das Konzept der Entwertung von Energie vorge-schlagen. Mit ihm kann darüber hinaus der "Antrieb" von Vorgängen und die Strukturbildung (Dissipative Strukturen) qualitativ beschrieben werden.