

# Energieentwertung

## – Ein qualitativer Zugang zur Irreversibilität

H. J. Schlichting

*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, Energie gleichzeitig als quantitativ erhalten und qualitativ verändert anzusehen.

Die im alltäglichen Umgang mit der Energie erfahrene qualitative Veränderung im Sinne einer Entwertung, die es bei-

spielsweise (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 werden 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 (Joule'sche 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.) genügt 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 nicht-linearen 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 heranzuführen

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 Erschließung komplexer Systeme der wissenschaftlich technischen und der natürlichen Welt und damit für die

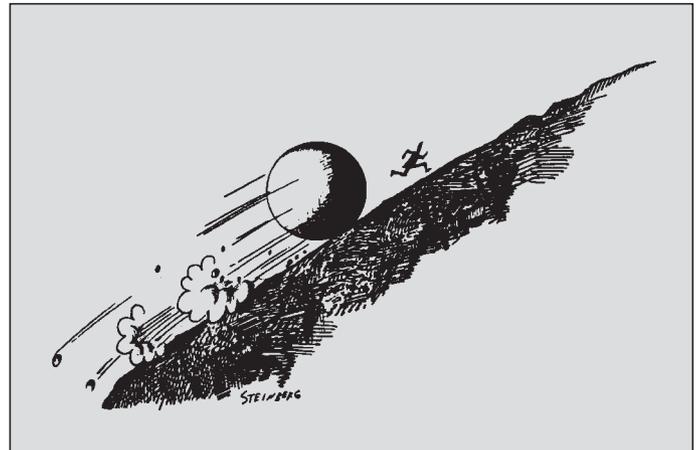


Abb. 1: Verstoß gegen das Prinzip der Energieerhaltung. Kein Verstoß gegen das Energieprinzip. Quelle: The New Yorker 1963, Steinberg

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.

### Energieerhaltung 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.

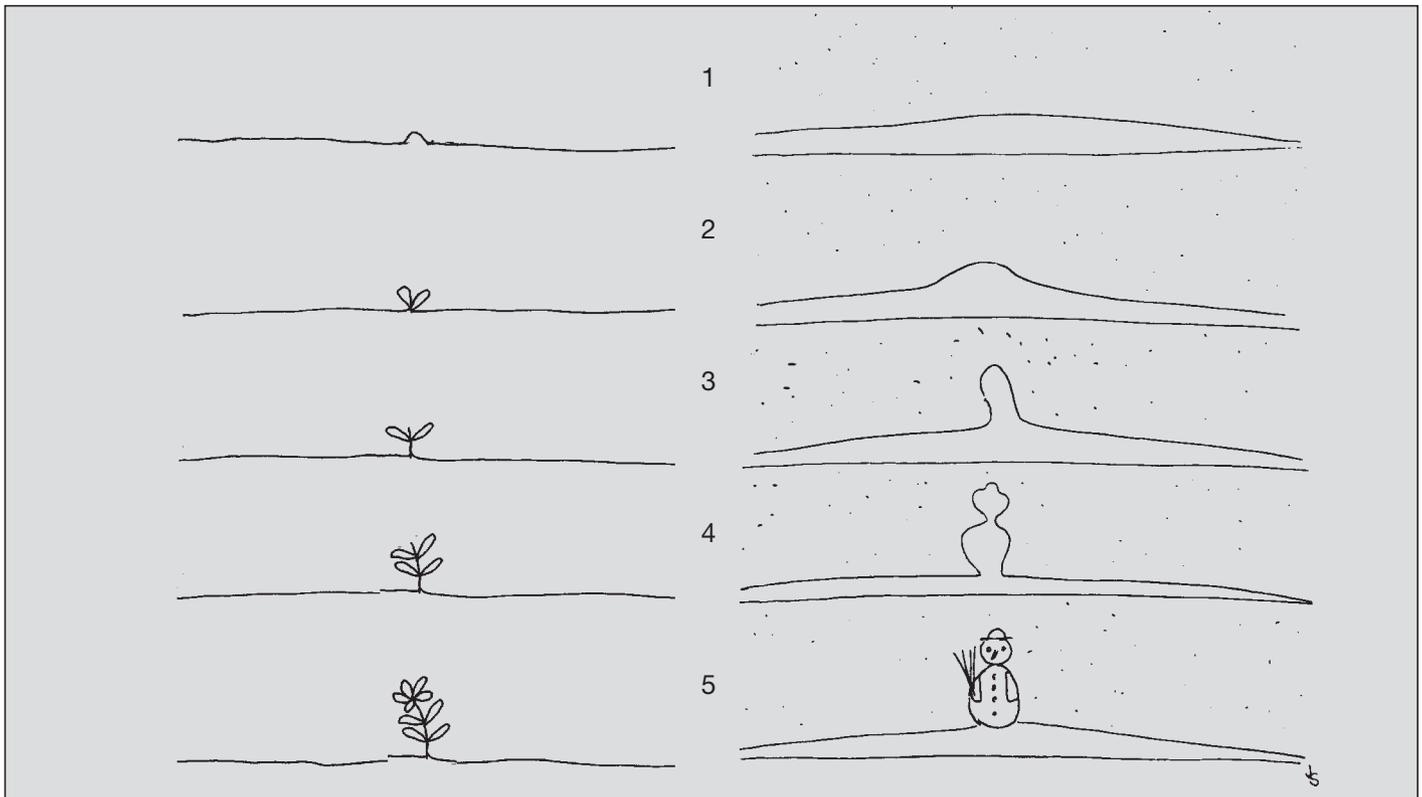


Abb. 2: Zwei Strukturbildungsvorgänge, der eine wird für möglich, der andere für unmöglich gehalten.

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 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, sodass dieser steigt. Die Energieentwertung der absinkenden Luft gleicht die Energieentwertung, die mit dem fallenden Luftballon verbunden wäre, aus und bewirkt, 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.

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 rückwärtslaufende Teilvorgänge (Rückspulkonzept) wird an anderer Stelle ausführlicher beschrieben (siehe [4]).

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

*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 können und dabei die Menschen mit Licht, Bewegung usw. 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.

- 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 Temperaturengleichvorgang 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.

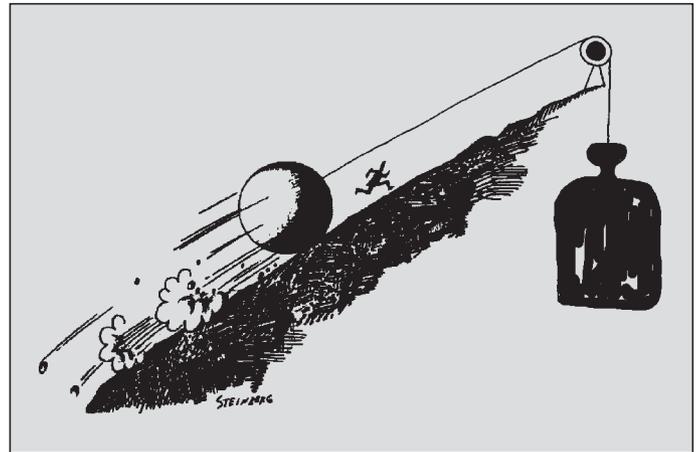


Abb. 3: Die Bedrohung des flüchtenden Menschen scheint nunmehr sehr real (siehe Abb. 1).

Die Temperaturerniedrigung 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 Geschehens 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 Gleichgewicht 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 „Tieres“ 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 und der Vorgang kann 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 zu Stande kommt, wenn auf Grund einer semipermeablen 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 elektrischen 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 im 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 unverstänlich bleiben. „Wieso müssen wir Energie sparen, wenn sie doch ewig erhalten bleibt?“ (typische Schülerfrage). Da-

bei 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 [6] 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 ([6], [7]).

### Literatur

- [1] Auerbach, Felix: Die Weltherrin und ihr Schatten. Jena: Verlag von Gustav Fischer 1913
- [2] Rahmenrichtlinien
- [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.

### Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. Hans Joachim Schlichting, Westfälische Wilhelms-Universität, Münster, FB Physik, Wilhelm Klemm-Str. 10, 48149 Münster

# Von der Energieentwertung zur Entropie

H. J. Schlichting

*Entropie: Alter der Dinge.  
Vermehrung dessen, was sich nicht mehr verwandeln kann.  
Asche.  
Paul Valéry*

## Einführung der Entropie

Zur physikalischen Beschreibung der lebensweltlichen Energie sind zwei komplementäre physikalische Konzepte nötig: Energie und Entropie. Die Energie beschreibt den Erhaltungsaspekt, die Entropie den Verbrauchs- und Antriebsaspekt. Wir haben vorgeschlagen, die Entropie im Rahmen der Mittelstufenphysik vorläufig durch das (qualitative) Konzept der Energieentwertung zu ersetzen und dadurch ein weit gehendes qualitatives Verständnis der Energetik zu erreichen. Auf dieser Grundlage wird im Folgenden ein Weg zu einer Quantifizierung der Energieentwertung als Entropie skizziert.

Ausgangspunkt ist der Vergleich zweier verschiedener mit Energieentwertung verbundener Vorgänge. Wir legen fest, dass derjenige zweier Vorgänge mit einer größeren Energieentwertung einhergeht, der den jeweils anderen zurückzuspulen, das heißt entgegengesetzt zu der Richtung zu treiben vermag, in die er von selbst ablaufen würde. Im Hinblick auf eine Quantifizierung durch eine Zustandsgröße, die Entropie  $S$ , vergegenwärtigen wir uns zunächst, dass an einem von selbst ablaufenden (mit Energieentwertung verbundenen Vorgang) stets zwei Systeme, ein Energie abgebendes und ein Energie aufnehmendes System beteiligt sind und somit als Summe der „Wertänderung“ des einen und des anderen Systems aufgefasst werden können.

Da rein mechanische oder elektrische Vorgänge, d. h. der Austausch von mechanischer oder elektrischer Energie in der einen wie in der anderen Richtung, also ohne Energieentwertung ablaufen, ist für die Definition der Entropie nur die Zustandsänderung thermischer Systeme von Belang.

Aufgrund der im Begriff der Energieentwertung niedergelegten Vorstellung, dass umso mehr Energie entwertet wird, je mehr davon in der Umgebung landet, liegt es nahe zu definieren: Die Entropieänderung eines (thermischen) Systems ist proportional zur Menge der entwerteten Energie:

$$\Delta S \sim \Delta E = \Delta Q$$

Wie man sich leicht klar macht, ist die Energieentwertung bzw. die Entropieänderung  $\Delta S$  außerdem von der Temperatur der beteiligten Systeme abhängig. Wie lässt sich das in der Definition der Entropieänderung darstellen? Wenn von einem mechanischen System die Energie  $\Delta E$  an ein thermisches System abgegeben wird (Dissipationsvorgang), so ist

die damit verbundene Entropieänderung  $\Delta S$  umso größer, je niedriger die Temperatur des (thermischen) Systems ist. Denn wenn die Energie  $\Delta E$  zunächst selbsttätig auf das System mit der höheren Temperatur  $T_1$  übergeht, kann sie von dort auch noch selbsttätig auf das System mit der niedrigeren Temperatur  $T_2$  übergehen. Mit anderen Worten: Die Entropieänderung  $\Delta S(T_2)$ , die beim Übergang von  $\Delta E = \Delta Q$  auf das System mit der niedrigeren Temperatur  $T_2$  hervorgerufen wird, kann als Summe der Entropieänderung  $S(T_1)$  beim Übergang von  $\Delta E$  auf das System mit der höheren Temperatur  $T_1 > T_2$  und der Entropieänderung  $\Delta S(T_1 \rightarrow T_2)$  beim Übergang von  $\Delta E$  von diesem auf das System mit der niedrigeren Temperatur  $T_2$  aufgefasst werden:

$$\Delta S(T_2) = \Delta S(T_1) + \Delta S(T_1 \rightarrow T_2).$$

Da alle Entropieänderungen positiv sind, gilt insbesondere:

$$\Delta S(T_2) > \Delta S(T_1).$$

Demnach kann die mit der Aufnahme einer Energiemenge  $\Delta E = \Delta Q$  verbundene Entropieänderung als monoton fallende Funktion der Temperatur  $T$  aufgefasst werden. Man kann sogar zeigen, dass die Entropieänderung umgekehrt proportional zur absoluten Temperatur ist [1].

Mit anderen Worten: Nimmt ein System der Temperatur  $T$  die Energiemenge  $\Delta E = \Delta Q$  auf, so nimmt seine Entropie um  $\Delta S = \Delta Q/T$  zu. Gibt das System  $\Delta Q$  ab, so nimmt dessen Entropie um den gleichen Betrag ab.

Dabei wurde vorausgesetzt, dass es sich bei den (thermischen) Systemen entweder um Wärmereservoir handelt, oder die Energieübertragung in so kleinen Portionen erfolgt, dass man näherungsweise von einer gleich bleibenden Temperatur ausgehen kann.

Als typisches Beispiel eines von selbst ablaufenden (irreversiblen) Vorgangs betrachten wir das Abkühlen einer Teekanne mit heißem Wasser. Kühlt sich das Wasser der Temperatur  $T$  auf Umgebungstemperatur  $T_U < T$  ab, so setzt sich die Gesamtentropieänderung  $\Delta S$  aus der Entropieabnahme des Wassers  $\Delta S_W = -\Delta Q/T$  und der Entropiezunahme der Umgebung  $\Delta S_U = \Delta Q/T_U$  zusammen:

$$\Delta S = \Delta Q (1/T_U - 1/T) > 0.$$

Wegen  $T > T_U$  nimmt die Gesamtentropieänderung zu in Übereinstimmung mit der Tatsache, dass die Abkühlung von Wasser an der Umgebung ein selbsttätiger und daher mit Energieentwertung verbundener Vorgang ist.

Der Satz von der Entwertung der Energie lässt sich nunmehr als Entropiesatz präzisieren:

*In einem abgeschlossenen System kann die Entropie nicht abnehmen:  $\Delta S \geq 0$ .*

Neben dem als 1. Hauptsatz der Thermodynamik bezeichneten Energiesatz gehört der Entropiesatz als 2. Hauptsatz der Thermodynamik zu den grundlegenden Prinzipien der Thermodynamik und der Physik überhaupt.

**Entropie als mengenartige Größe**

Die Entropie ist wie die Energie eine mengenartige Zustandsgröße. Anders als die (intensive) Größe Temperatur ist sie proportional zur Stoffmenge (Teilchenzahl) des Systems und kann daher wie die Energie als eine Art Stoff aufgefasst werden. Mit anderen Worten: Jedes System enthält neben Energie auch Entropie, beides kann zwischen Systemen ausgetauscht werden. Im Unterschied zur Energie, die dabei stets erhalten bleibt, kann – wie am Beispiel der Wärmeleitung deutlich geworden ist – die Entropie dabei zunehmen, also erzeugt werden. Denn obwohl mit der Energie  $\Delta E = \Delta Q$  nur die Entropie  $\Delta S_a = \Delta Q/T$  an die Umgebung übergeht, nimmt die Entropie der Umgebung um  $\Delta S_U = \Delta Q/T_U$ , also stärker zu als dies aufgrund der zugeführten Entropie der Fall sein dürfte. Es wurde also zusätzlich die Entropie

$$\Delta S_i = \Delta Q(1/T_U - 1/T)$$

erzeugt. Das ist genau die Entropiezunahme aufgrund der Irreversibilität des Vorgangs, die wir früher mit Energieentwertung bezeichnet haben:

Die Energieentwertung ist gleichbedeutend mit der bei einem selbsttätigen (irreversiblen) Vorgang erzeugten Entropie.

Bei jeder Zustandsänderung tritt daher eine Entropieänderung  $\Delta S$  auf, die sich aus der ausgetauschten,  $\Delta S_a$ , und der im System erzeugten Entropie  $\Delta S_i$  zusammensetzt:  $\Delta S = \Delta S_a + \Delta S_i$ .

Diesen Zusammenhang kann man sich wiederum am Beispiel des Wasserverbrauchs in einem Haushalt veranschaulichen. Der Wasserverbrauch durch Kochen, Waschen, Klosettspülen usw. ist mit einer Entwertung des Wassers verbunden, die es unmöglich macht, das Wasser noch einmal für denselben Zweck zu gebrauchen. Die Entwertung besteht darin, dass das Wasser verschmutzt, also mit Schmutz angereichert wird. Analog dazu kann man sich die Zunahme der Entropie als eine Art Zunahme der „Verschmutzung“ des Systems vorstellen.

Auf diese Weise wird ein Zusammenhang von Entwertung bzw. Entropie und Verschmutzung nahe gelegt. Zwar unterliegt der Stoff, der die Verschmutzung ausmacht einem Erhaltungssatz. Er kann weder erzeugt noch vernichtet werden. Demgegenüber beschreibt die Entropieerzeugung gerade das, was Stoff oder Energie zum Schmutz macht, die Verteilung des oder der ursprünglich an einer Stelle konzentrierten und damit beherrschbaren Stoffes oder Energie über ein größeres Raumgebiet.

Ebenso wie wir eine Energieentwertung als notwendige Voraussetzung für eine Energieaufwertung bzw. als Antrieb für einen Vorgang angesehen haben, hat auch die Verschmutzung etwas Positives. Indem beispielsweise die Umwelt ständig Schmutz aufnimmt, schafft sie die Voraussetzung dafür, dass andere Systeme, z. B. Lebewesen ständig ihren Schmutz loswerden und nicht daran ersticken. Diese Ambivalenz der Entropie sollte immer im Auge behalten werden. Da Entropie nur zunehmen und nicht ab-

nehmen kann, kann sie nur dadurch beseitigt werden, dass sie an ein geeignetes anderes System, typischerweise die Umwelt oder letztlich das Weltall abgegeben wird.

**Unterschiede gleichen sich aus**

Temperaturunterschiede, Höhendifferenzen, Spannungen, Stoffkonzentrationen usw. tendieren dazu, sich auszugleichen und denselben Wert anzunehmen. Hinter dieser Tendenz steckt das Bestreben der Entropie (Entropieprinzip), maximal zu werden. Demnach muss das thermodynamische Gleichgewicht, in dem die genannten Unterschiede verschwinden, als Ergebnis der Maximierung der Entropie der zum Ausgleich führenden Prozesse darstellbar sein. Das soll am Beispiel des Ausgleichs zweier unterschiedlicher Wasserstände (verbundene Gefäße) demonstriert werden. Unsere Ausgangsfrage lautet: Wie groß ist die Entropiezunahme, wenn man zwei unterschiedlich hoch gefüllte Behälter in Verbindung bringt?

Sei  $S$  die durch den Ausgleichsvorgang um

$$\Delta S = \Delta Q/T = (E_a - E_b)/T \tag{1}$$

zunehmende Gesamtentropie  $S_0$  am Anfang des Vorgangs und  $E_{ib}$  die potentielle Energie am Anfang ( $i = a$ ) und am Ende ( $i = b$ ) des Vorgangs. Bezeichnet man des Weiteren mit  $A_j$  und  $h_{ij}$  die Querschnittsfläche und Wasserhöhe der beiden Behälter  $j = 1, 2$ , so läuft das Problem darauf hinaus, das Maximum der Entropie  $S$  bezüglich der sich einstellenden Wasserhöhe  $h_{e1}$  eines der Behälter als Variable, etwa  $h_{e1}$  zu bestimmen.

$$dS/dh_{e1} = 0,$$

$$0 = (E_a - E_b)/T.$$

Unter Ausnutzung der Volumenerhaltung des Wassers:

$$V = A_1 h_{a1} + A_2 h_{a2} = A_1 h_{e1} + A_2 h_{e2} \tag{2}$$

gilt für die potentielle Energie am Anfang und Ende des Vorgangs:

$$E_a = 1/2 \rho g (A_1 h_{a1}^2 + A_2 h_{a2}^2)$$

und

$$E_b = 1/2 \rho g (A_1 h_{e1}^2 + A_2 h_{e2}^2).$$

Dabei sind  $\rho$  und  $g$  die Dichte des Wassers und die Erdbeschleunigung, der Faktor 1/2 berücksichtigt, dass die potentielle Energie gleich der Energie der im Schwerpunkt vereinigt gedachten Masse des Wassers ist. Damit ergibt sich:

$$0 = 1/2 \rho g (-A_1 h_{e1}^2 + (A_1^2/A_2) (h_{a1} + h_{e1}) + A_1 h_{a2})/T.$$

Nach  $h_{e1}$  aufgelöst, erhält man:

$$h_{e1} = (A_1 h_{a1} + A_2 h_{a2})/(A_1 + A_2).$$

Mit Hilfe von Gleichung (2) berechnet sich  $h_{e2}$  zu:

$$h_{e2} = (A_1 h_{a1} + A_2 h_{a2})/(A_1 + A_2).$$

Mit anderen Worten: Am Ende des Vorgangs, nachdem

das System ins thermodynamische Gleichgewicht übergegangen ist, sind die Wasserhöhen gleich. Bezogen auf die ursprüngliche Wasserstände  $h_{a1}$  und  $h_{a2}$  gilt:

$$h_{e1} = h_{e2} = h_e = (A_1 h_{a1} + A_2 h_{a2}) / (A_1 + A_2).$$

Man liest unmittelbar ab, dass für den Spezialfall zweier gleich großer Behälter, von denen zu Beginn einer gefüllt und der andere leer ist, die Hälfte der Energie dissipiert wurde.

Dieser Vorgang macht deutlich, dass ein (mechanisches) System nur dann seinen Zustand ändern kann, wenn Energie dissipiert bzw. Entropie erzeugt wird. Auch die in der Mechanik übliche Umschreibung von der Minimierung der potentiellen Energie kann daran nichts ändern, es allenfalls verschleiern. In der reibungsfreien Mechanik, in der der Energiesatz der Mechanik gilt, kann also kein Gegenstand umfallen und kein Gefäß auslaufen, um nur diese Beispiele zu nennen.

### Das Modell der Wärmekraftmaschine

Die mit der Abgabe der Energiemenge an die Umgebung erzeugte Entropie ist umso größer, je höher die Temperatur des Energie abgebenden Systems ist (siehe oben). Sie ist maximal, wenn es sich um die Abgabe von mechanischer, elektrischer oder mit Einschränkungen auch chemischer Energie handelt. Deshalb gelten diese Energiearten auch als die wertvollsten. So kann beispielsweise mechanische Energie von selbst auf ein System beliebig hoher Temperatur übergehen (Reibung). Die dabei erzeugte Entropie ist umso kleiner, je höher die Temperatur dieses Systems ist. Kurzum: Mechanische Energie  $\Delta E_m$  geht unabhängig von der Höhe der Temperatur des beteiligten (thermischen Systems) von selbst vollständig in thermische Energie über:  $\Delta Q = \Delta E$ .

Das Umgekehrte gilt natürlich nicht. Ein Vorgang, bei dem thermische Energie von selbst in mechanische Energie übergeht, muss je nach der Temperatur des thermischen Systems mehrere Male ablaufen, sodass mehr thermische Energie aufgewandt werden muss, als mechanische Energie entsteht:  $\Delta Q > \Delta E$ .

Der irreversible Prozess des Übergangs von thermischer Energie von einem System der Temperatur  $T_1$  auf ein System der Temperatur  $T_2 < T_1$ , soll dazu genutzt werden, einen (mechanischen) Vorgang (z. B. Stehen bleiben einer Turbine) zurückzuspulen, bzw. mechanische Energie  $\Delta E_m$  zu erzeugen.

Sei  $\Delta Q_1$  die thermische Energie die vom Wärmereservoir der Temperatur  $T_1$  (z. B. des auf konstanter Temperatur gehaltenen Kessels einer Wärmekraftmaschine) und  $\Delta Q_2$  die Wärme, die schließlich an die Umgebung (bzw. den Kühler) der Temperatur  $T_2$  abgegeben wird. Dann lautet die Frage: Wie viel mechanische Energie  $\Delta E_m = \Delta Q_1 - \Delta Q_2$  lässt sich abzweigen, sodass die gesamte Entropieänderung nicht negativ wird:

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 \geq 0.$$

Dabei ist  $\Delta S_1 = -\Delta Q_1 / T_1$  die Entropieabnahme, die mit der Abgabe der Energie  $\Delta Q_1$  und  $\Delta S_2 = \Delta Q_2 / T_2 = (\Delta Q_1 - \Delta E_m) / T_2$  die Entropiezunahme, die mit der Aufnahme der Energie  $\Delta Q_2$  durch die Umgebung verbunden ist:

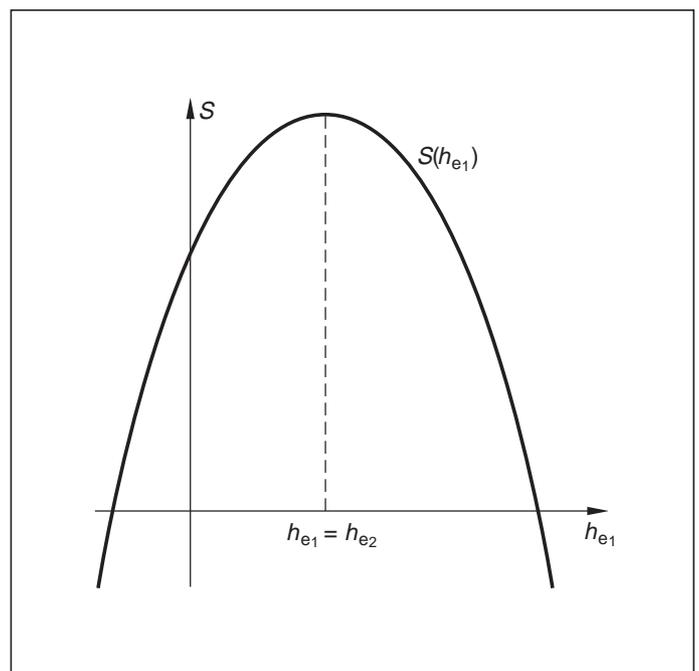
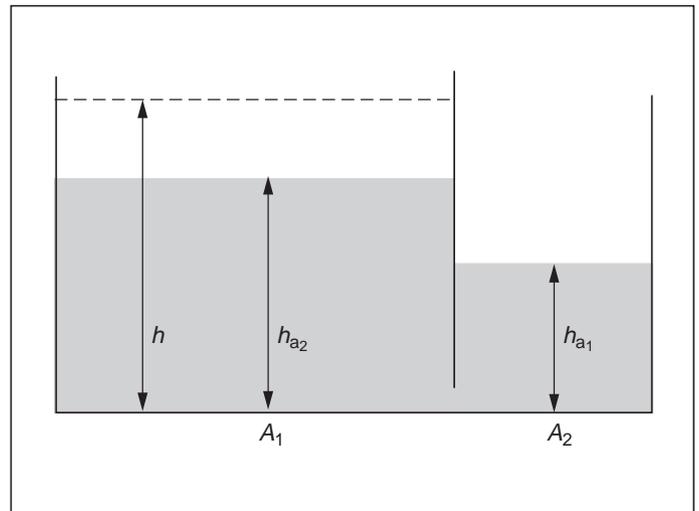


Abb. 1 (oben): Die Ausgangssituation zweier verschieden groß und unterschiedlich gefüllter Behälter, die mit einander verbunden werden und in den thermodynamischen Gleichgewichtszustand übergehen.

Abb. 2 (unten): Der Verlauf der Entropie als Funktion der Wasserhöhe  $h_{e1}$  am Ende des Ausgleichsvorgangs

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = -\Delta Q_1 / T_1 + (\Delta Q_1 - \Delta E_m) / T_2 \geq 0.$$

Interessiert man sich für den Anteil der gewonnenen mechanischen Energie  $\Delta E_m$  an der aufgewendeten thermischen Energie  $\Delta Q_1$ , also für den Wirkungsgrad  $\eta = \Delta E_m / \Delta Q_1$ , so folgt daraus:

$$\Delta S = \Delta Q_1 (1/T_2 - 1/T_1 - \eta/T_2) \geq 0.$$

Mit anderen Worten:

$$\eta \leq (1 - T_2/T_1).$$

Damit lässt sich die bereits qualitativ gewonnenen Einsicht, dass sich aus thermischer Energie umso mehr mechanische Energie gewinnen lässt, je höher die Temperatur des heißen und je niedriger die Temperatur des kalten Reservoirs ist, auch quantitativ abschätzen.

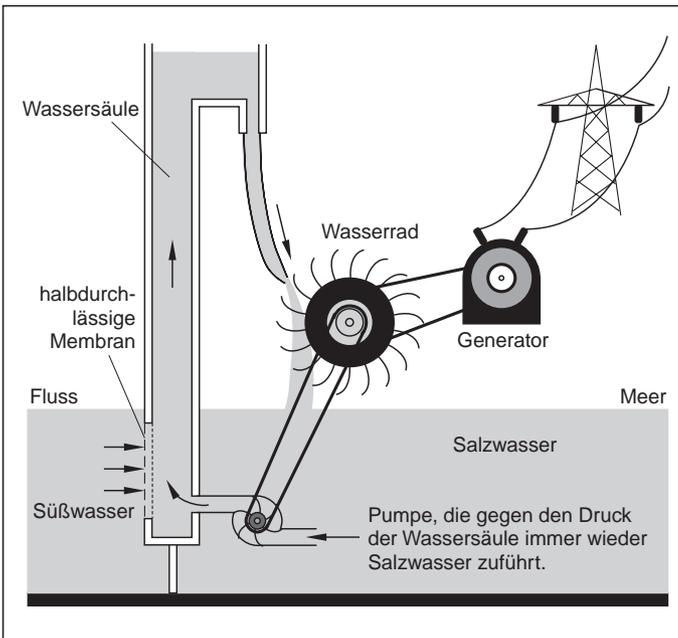


Abb. 3: Schema eines Kraftwerks, das die Mischungstendenz von Salz und Süßwasser zur Aufstauung von Wasser nutzt.

### Das Modell der Wärmepumpe

Ein Zimmer der Temperatur  $T_1$  zu heizen heißt, die Wärmeleitung, bei der die thermische Energie  $\Delta Q_1$  vom Zimmer an die Umgebung der Temperatur  $T_2$  übergeht, ständig rückgängig zu machen. Es muss also die damit verbundene Entropiezunahme  $\Delta S_Z = \Delta Q_1 (1/T_2 - 1/T_1)$  mindestens ausgeglichen werden. Benutzt man elektrische Energie zum Heizen, so wird durch die Dissipation der elektrischen Energie  $\Delta E_{el} = \Delta Q_1$  die Entropie  $\Delta S_H = \Delta Q_1/T_2$  erzeugt. Man sieht sofort, dass  $\Delta S_H \geq \Delta S_Z$ , sodass diese Art zu heizen als Verschwendung angesehen werden muss. Wenn man die gesamte Irreversibilität der Dissipation von elektrischer Energie ausnutzen würde, könnte man im Idealfall ( $\Delta S_H = \Delta S_Z$ ) den Vorgang mehrmals, nämlich um den Faktor

$$\Delta S_H / \Delta S_Z = \Delta Q_1 / [T_2 \Delta Q_1 (1/T_2 - 1/T_1)] = T_1 / (T_1 - T_2)$$

zurückspulen. Diese theoretische Möglichkeit lässt sich beispielsweise mit Hilfe einer elektrisch betriebenen Wärmepumpe wenigstens teilweise realisieren. Dabei wird thermische Energie aus der Umgebung auf die Heizungsanlage übertragen. Genau genommen muss also für  $T_1$  die Heizkörpertemperatur eingesetzt werden. Diese kann umso niedriger (im Idealfall gleich der Zimmertemperatur) sein, je größer der Heizkörper ist.

### Warum heizen wir die Wohnung?

Diese Frage stellt sich angesichts der durch unsere Ausführungen begründeten Tatsache, dass es bei allen Verrichtungen des Lebens weniger auf die Energie ankommt als – vorwissenschaftlich gesprochen – auf deren Wert. Denn Energie ist u. a. als thermische Energie der Umgebung reichlich vorhanden. Trotzdem lässt sich damit keine Wohnung heizen. Es kommt vielmehr darauf an, den Vor-

gang der Wärmeleitung, mit der Wärme durch die Wände an die Umgebung übergeht, ständig durch Zufuhr von Wärme durch die Heizkörper zurückzuspulen und auf diese Weise einen stationären Nichtgleichgewichtszustand oberhalb der Umgebungstemperatur aufrechtzuerhalten.

Robert Emden umschreibt in einer Arbeit aus dem Jahre 1938 diese Situation folgendermaßen: „Auf die Frage, warum wir im Winter heizen, antwortet der Laie: ‚Um das Zimmer wärmer zu machen.‘ Ein Fachmann der Thermodynamik drückt sich möglicherweise so aus: ‚Um fehlende Energie zuzuführen.‘ In diesem Fall erweist sich der Laie, nicht der Gelehrte, als im Recht“ [4].

In der Tat, wenn ein Zimmer, sagen wir von der Temperatur  $T_1$  auf  $T_2$  erwärmt wird, verändert sich die kinetische Energie von  $E_1 = 3/2 k N_1 T_1$  auf  $E_2 = 3/2 k N_2 T_2$ . Da der Luftdruck im Zimmer normalerweise gleich dem Außendruck ist, ändert sich die Teilchenzahl von  $N_1 = p V / (k T_1)$  auf  $N_2 = p V / (k T_2)$ , d. h. es gilt:  $N_1/N_2 = T_2/T_1$ . Setzt man dies in den Ausdruck für die Energie ein, so ergibt sich  $E_1 = E_2$ . Mit anderen Worten: Die Energie bleibt bei einer Erwärmung unverändert, weil durch die Ausdehnung der Luft die aufgrund des Druckkontaktes mit der Umgebung das Zimmer verlassenden Luftteilchen genau so viel Energie mit sich nehmen, wie die verbleibenden Teilchen an Energie durch die Heizung aufnehmen. (Eine genauere Betrachtung Sommerfelds ergibt sogar, dass die Energie des Zimmers bei Erwärmung abnimmt. „Der bemerkenswerte Schluss auf den Vorrang der Entropie über die Energie gilt somit *a fortiori*“ [5]).

### Energie aus Mischungsvorgängen

Wenn sich Süß- und Salzwasser vermischen, so geht das aus beiden Wassern zusammengesetzte System ins thermodynamische Gleichgewicht über. Kann die Irreversibilität dieses Mischungsvorgangs genutzt werden, ein anderes System aus dem thermischen Gleichgewicht herauszutreiben, also beispielsweise Wasser anzuheben und damit – konventionell gesprochen – potentielle Energie zu erzeugen?

Die Antwort lautet ja. Mit Hilfe einer semipermeablen Wand, die nur die kleineren Wassermoleküle durchlässt, wird infolge der Mischungstendenz das Süßwasser entgegen der schwerkraftsbedingten Tendenz, die Wasserstände gleich zu machen bzw. gleich zu halten, aufgestaut bzw. angehoben und mechanische Energie erzeugt. Wie groß das theoretische Potential der mechanischen Energie ist, lässt sich mit Hilfe der Entropie abschätzen:

Wir gehen davon aus, dass sich reines Wasser vom Volumen  $V_1$  bei der Temperatur  $T$  mit Meerwasser vom Volumen  $V_2$  mischt. Dabei wird sich aufgrund der Größe des Meeres ( $V_2 \gg V_1$ ) die Salzkonzentration nicht ändern. Da die Salzmoleküle sehr verdünnt im Wasser enthalten sind, können sie wie ein ideales Gas behandelt werden, das sich bei der Mischung mit reinem Wasser irreversibel und isotherm ausbreitet. Dabei nimmt die Entropie zu (siehe z. B. [6]):

$$\Delta S = \Delta Q/T = (\Delta E + p \Delta V)/T.$$

Da sich Temperatur und innere Energie bei einer Entspannung nicht ändern,  $\Delta E = 0$ , erhält man bei Verwendung der idealen Gasgleichung  $p V = N k T$ :

$$\Delta S = N_2 k T \ln ((V_1 + V_2)/V_1) = N_2 k T \ln (1 + V_2/V_1)$$

und da  $V_2 \gg V_1$ , kann man näherungsweise setzen:

$$\Delta S \approx N_2 k.$$

Mit anderen Worten: Es wird die Energiemenge  $T \Delta S = N_2 k T$  dissipiert. Stattdessen, kann man den Mischungsvorgang aber durch geeignete Vorrichtungen dazu veranlassen, einen anderen Vorgang zurückzuspulen und beispielsweise Wasser zu einer Wassersäule aufzustauen. Trennt man nämlich durch eine semipermeable Wand, die nur die (kleineren) Wassermoleküle durchlässt, das Salz- vom Süßwasser, so gelingt die Mischung nur, indem die Wassermoleküle gegen den sich dadurch langsam aufbauenden Schweredruck der wachsenden Wassersäule (siehe Abb. 3) ins Salzwasser eindringen (Osmose). Dabei kann (im Idealfall) die gesamte dissipierte Energie als mechanische Arbeit verfügbar werden:

$$\Delta W = T \Delta S = N_2 k T = p_0 V_2,$$

wobei  $p_0 = N_2 k T/V_2$  der Gasdruck des gedachten idealen Gases, der so genannte osmotische Druck der Salzlösung ist. Dem entspricht ein (mechanischer) Energiestrom von

$$P = dN/dt k T = p_0 dV_2/dt.$$

Bei der Steighöhe  $h = 0$  ist der (osmotische) Druck  $p_0$  maximal nutzbar. Mit wachsender Höhe der Wassersäule macht sich der Einfluss der Schwerkraft bemerkbar. Bei einer Höhe von  $h_s = p_0 V_1 / m g = p_0 / \rho g$  würden beide Gleichgewichtstendenzen in Form des hydrostatischen Drucks der Wassersäule einerseits und des osmotischen Drucks der Salzlösung andererseits die Waage halten und den Mischungsvorgang zum Stillstand bringen. Sorgt man dafür, dass bereits bei einer geringeren Höhe  $h < h_s$  das Wasser überläuft und ein Wasserrad betreibt und gleichzeitig durch Nachschub von Wasser die übrigen Bedingungen (z. B. die Salzkonzentration gleich bleiben), so kann man einen stationären Zustand erreichen, bei dem der Energiestrom

$$P = \Delta E_{\text{pot}}/dt = \rho g h \Delta V_1/\Delta t = p_0 \Delta V_1/\Delta t,$$

abgezweigt werden kann.

Da der Energiestrom einerseits mit zunehmender Höhe der Wassersäule zunimmt andererseits mit der dadurch bedingten Abnahme der Druckdifferenz an der Membran abnimmt, muss es bei einer Höhe  $h_m$  einen maximalen Energiestrom geben.

Der Volumendurchsatz durch die Membran ist proportional zur Differenz des maximalen osmotischen Drucks  $p_0$  bei  $h = 0$  und des Drucks  $p$  bei der Höhe  $h$  der Wassersäule:

$$\Delta V_1/\Delta t = c (p_0 - p) A.$$

Dabei ist  $A$  die Querschnittsfläche der Membran und  $c$  ein Durchlässigkeitskoeffizient. Der Energiestrom an der Membran beträgt demnach

$$P = c p (p_0 - p) A.$$

Er wird maximal, wenn  $dP/dp = 0$  ist, also bei  $p = p_0/2$ . Damit gilt:

$$P_{\text{max}} = p_0^2 c A/4$$

Um einen Eindruck von der Größenordnung des potentiell-

<p>1 Kilomol NaCl hat eine Masse von 58 kg entsprechend <math>N_2 = 6 \cdot 10^{26}</math> Teilchen 3 % Salz pro <math>\text{m}^3</math> sind 30 kg Ein Abschirmungsfaktor von 1,8 ist aufgrund teilweiser Dissoziation von NaCl in Ionen, die in Lösung einen eigenen Druck aufbauen, zu berücksichtigen <math>c = 5,9 \cdot 10^{16}</math> Wassermoleküle/(s Pa <math>\text{m}^2</math>) <math>= 1,77 \cdot 10^{-12}</math> <math>\text{m}^3</math>/(s Pa <math>\text{m}^2</math>) <math>\rho_0 = N_2 k T/V_2</math> <math>p_0 = 1,8 \cdot 6 \cdot 10^{26} \cdot 1,4 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 30/58</math> Pa <math>p_0 = 23\,500</math> hPa</p>
--

**Tab. 1: Zahlenwerte zur Berechnung des maximalen Energiestroms, der theoretisch durch kontinuierliche Mischung von Salz- und Süßwasser gewonnen werden könnte.**

len Energiestroms zu gewinnen, setzen wir Zahlen ein (siehe Tab. 1, nach [7]). Könnte man den osmotischen Druck voll ausnutzen, so könnte eine Wassersäule von 235 m aufrechterhalten werden. Allerdings betrüge die maximale Leistung pro Quadratmeter Membranfläche nur:

$$P_{\text{max}}/A = 5,5 \cdot 10^{12} \text{ Pa}^2 \cdot 1,77 \cdot 10^{-12} \text{ m}^3/(\text{s Pa m}^2) = 2,4 \text{ W/m}^2.$$

Wenn man einmal von anderen Problemen (Verschmutzung etc.) absieht, müssten große Membranflächen vom Wasser beispielsweise in das Meer einmündender Flüsse durchdrungen werden.

### Zusammenfassung

Das Konzept der Energieentwertung, mit dem sich irreversible Vorgänge qualitativ beschreiben lassen, kann zur quantitativen Größe der Entropie verschärft werden. Mit Hilfe der Entropie lassen sich über qualitative Beschreibungen hinausgehend, Ablafrichtungen, Systementwicklungen, Möglichkeiten der Energiegewinnung usw. quantitativ abschätzen, ohne dass man genau über die zu Grunde liegenden Mechanismen Bescheid wissen müsste: „*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. Willard Gibbs).

### Literatur

- [1] Backhaus, Udo: Die Entropie als Größe zur Beschreibung der Unumkehrbarkeit von Vorgängen. Osnabrück 1982
- [2] Schlichting, H. Joachim: Energieentwertung – ein qualitativer Zugang zur Irreversibilität (in diesem Heft)
- [3] Thompson, D'Arcy: Über Wachstum und Form. Frankfurt: Suhrkamp 1983, S. 66
- [4] Emden, Robert: Wozu haben wir eine Winterheizung? Nature 1938
- [5] Sommerfeld, Arnold: Thermodynamik und Statistik. Frankfurt: Harri Deutsch 1977, S. 32 und 299
- [6] Boysen, Gerd et al.: Oberstufe Physik, Band1. Berlin: Cornelsen 1997, S. 146
- [7] Fricke, Jochen; Borst, Walter L.: Energie. München: Oldenburg 1984, S. 185 ff.

### Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. Hans Joachim Schlichting, Westfälische Wilhelms-Universität, Münster, FB Physik, Wilhelm Klemm-Str. 10, 48149 Münster

# Von der Dissipation zur dissipativen Struktur

H. J. Schlichting

*The system can be regarded as having evolved in great part to discover patterns, so that a pattern becomes in a sense its own reward, even if it confers no particular advantage in the real world*  
Murray Gell-Man

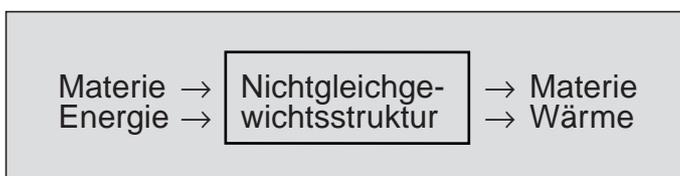
## Prozess und Struktur: Das Ruhende im Bewegten

Im Rahmen des Energieentwertungskonzepts [1] wird das Warmhalten von Tee auf einem Stövchen folgendermaßen beschrieben: Der selbsttätige Vorgang der Abkühlung des Tees auf Umgebungstemperatur wird ständig durch den Vorgang des Abbrennens der Kerze zurückgespult, so dass das Teewasser auf eine Temperatur oberhalb der Umgebungstemperatur eingeregelt und das System in einem stationären Nichtgleichgewichtszustand gehalten wird. Solche Nichtgleichgewichtszustände umgeben uns in großer Zahl:

- Das mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h fahrende Auto,
- die Badewanne ohne Stöpsel, die durch zulaufendes Wasser auf einer gleich bleibenden Füllhöhe bleibt,
- der gleichmäßig dahin fließende Fluss, dessen Fließen allenfalls an einem mitbewegtes Blatt zu erkennen ist,
- das von einer Glühwendel abgegebene Licht, aber auch der durch die Wendel fließende elektrische Strom,
- die Kerzenflamme,
- die gegen den Wind wandernden Sandrippel in der Wüste,
- die blühende Blume etc.

Bei den zuletzt genannten Beispielen liegt es nicht sofort auf der Hand, dass es sich um gegeneinander wirkende Vorgänge bzw. Prozesse handelt. Die „Lichtstruktur“ der Kerze kann als Ergebnis von Prozessen aufgefasst werden, in denen das Erlöschen infolge der Abgabe von Wärme, Licht und Stoffen ständig durch Oxidation von neuem Wachs zurückgespult wird, wodurch das System fern vom thermodynamischen Gleichgewicht gehalten wird. Demnach kann man alle genannten Beispiele sowohl als Prozesse als auch als Nichtgleichgewichtsstrukturen, also energiedurchflossene (offene) Systeme auffassen. Man wird vor

Abb. 1: Schematische Darstellung einer Nichtgleichgewichtsstruktur, deren Energieinhalt im zeitlichen Mittel konstant bleibt, weil ebenso viel Energie (bzw. Materie und Energie) aufgenommen wie abgegeben wird. Dabei wird Entropie produziert.



allem dann von einer Struktur sprechen, wenn das System eine auffällige äußere Gestalt annimmt. In allen Fällen bleibt die Energie des Systems (im Mittel) konstant. Dem System wird genauso viel Energie und/oder Materie zugeführt, wie es an die Umgebung abgibt (siehe Abb. 1). Allerdings wird dabei die Energie entwertet bzw. dissipiert. Das System muss daher mehr Entropie abgeben als es aufnimmt. Durch diesen Entropieexport wird die Struktur im Nichtgleichgewicht gehalten.

## Nichtgleichgewichtsstrukturen

### Fließgleichgewicht

Wie weit entfernt sich ein durch Energieentwertung angetriebenes System vom thermodynamischen Gleichgewicht? Die Antwort auf diese Frage macht eine Differenzierung der obigen Beispiele nötig. Zur Verdeutlichung betrachten wir den auf dem Stövchen warm gehaltenen Tee etwas genauer.

Solange die Wärmezufuhr nur gering ist, wird die Wärme zur kälteren Oberfläche geleitet und dort an die Luft abgegeben. Das System ändert sich rein äußerlich nicht und behält die Symmetrie bei, die es im thermodynamischen Gleichgewicht besaß: Es bleibt dem Gleichgewicht sehr nahe. Im Falle der Wärmeleitung ist mit dem Energiestrom durch das System hindurch eine Entropieproduktions- bzw. Dissipationsrate:

$$\Delta S_{\text{WL}}/\Delta t = \Delta Q/\Delta t (1/T_U - 1/T)$$

verbunden (vgl.[2]). Dabei stellt  $\Delta Q/\Delta t$  einen Energiestrom und  $(1/T_U - 1/T)$  eine (verallgemeinerte) Kraft dar, die den Strom antreibt. Die Dissipationsrate kann ganz allgemein (also nicht nur bezogen auf die Wärmeleitung) als Produkt aus Strömen und diese antreibenden Kräften aufgefasst werden. So gilt beispielsweise für die elektrische Leitung:

$$\Delta S_{\text{el}}/\Delta t = I U/T,$$

wobei  $I$  den (elektrischen) Strom und  $U/T$  die verallgemeinerte Kraft darstellen.

In der Nähe des thermodynamischen Gleichgewichts können Ströme und Kräfte als proportional zueinander angesehen werden (lineare Näherung). In diesem stationären (Fließ-) Gleichgewicht nimmt die Dissipationsrate einen im Rahmen der jeweiligen Randbedingungen minimalen Wert an (Prigogine'sches Prinzip der minimalen Dissipations- bzw. Entropieproduktionsrate). Damit lässt sich dieser Bereich der linearen Nichtgleichgewichtsthermodynamik äh-

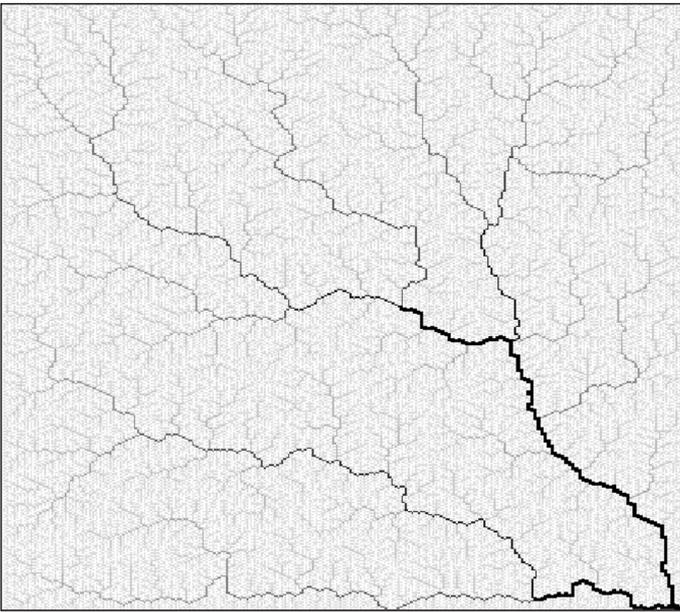


Abb. 2: Flussnetzwerk mit Abfluß in der Ecke, das dabei ist, sich in eine Struktur mit minimaler Dissipationsrate zu entwickeln (auf einem Gitter mit 200 x 200 Feldern) (aus [5]).

lich wie das thermodynamische Gleichgewicht durch das Extremum einer Potentialfunktion charakterisieren (vgl. z. B. [2]).

### Natürliche Entwässerung als Minimalsystem

Als eindrucksvolles Beispiel für das Prinzip der minimalen Dissipationsrate sei hier der stationäre Zustand eines Systems erwähnt, bei dem es um die Entwässerung einer Ebene geht (Abb. 2), die jeden Punkt der Ebene in eindeutiger Weise einbeziehen. Man kommt auf eine solche Minimalstruktur, wenn man die Minimierung der Dissipationsrate in einen Computeralgorithmus zur Simulation der Flussstruktur umsetzt [5]. Auch experimentell sind derartige Minimalstrukturen auf einfache Weise zugänglich (Abb. 3).

### Der gefangene Ball

Auch in dem folgenden Freihandexperiment bildet sich ein Fließgleichgewicht aus. Hält man einen Tischtennisball vor den Flaschenhals einer halbierten mit Wasser gefüllten Plastikflasche (ein Trichter ist ebenfalls geeignet), so kann man den Ball getrost loslassen, er wird nicht wie vielleicht erwartet durch das sehr viel dichtere Wasser hochgedrückt, sondern bleibt vor der Öffnung und versperrt dem Wasser weitgehend den Weg. Nur ein kleines Rinnsal fließt an den Seiten des Balls vorbei (Abb. 4). Auf diese Kleinigkeit kommt es indessen an. Denn darin zeigt sich der irreversible, dissipative Vorgang, der diese Nichtgleichgewichtsstruktur aufrechterhält.

Nichtgleichgewichtsstruktur? Ja, das System befindet sich außerhalb des thermodynamischen Gleichgewichts, denn aufgrund des untergetauchten Balls sehr geringer Dichte wird der Schwerpunkt des Systems erhöht. Verhindert man die Dissipation potentieller Energie durch das abfließende Wasser, indem man die untere Öffnung zuhält, schnellt der Ball sofort nach oben und bringt das System ins Gleichgewicht.

Wie kommt es zu dieser Strukturbildung? Hält man den Ball gegen die Auftriebskraft vor die Öffnung, so verengt man den Strom abfließenden Wassers. Das vor und hinter

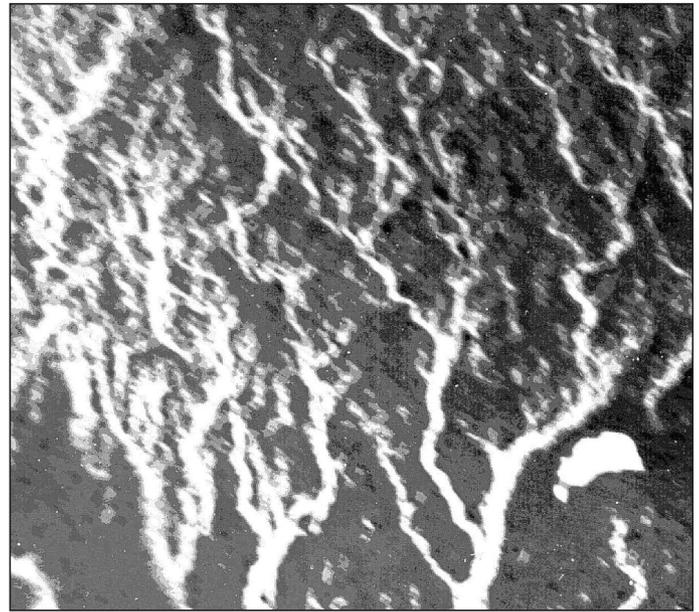


Abb. 3: Einzugsbereich von Wasser auf einer in feuchter Farbe gestrichenen Papierfläche, die nach der Benetzung mit Wasser schräg gehalten wurde.

dem Ball mit großem Querschnitt fließende Wasser wird auf einen sehr kleinen Querschnitt eingeschränkt. Dadurch wird das Wasser an der Engstelle stark beschleunigt. Beschleunigung bedeutet aber anschaulich gesehen, dass die jeweils nachfolgenden Wasserportionen die zurückgebliebenen „Leerstellen“ aus Trägheit nicht so schnell auffüllen können, wie sie entstehen. Das bei nichtbeschleunigten Strömungsvorgängen herrschende Gleichgewicht mit dem äußerem Luftdruck wird in der Weise gestört, dass der Ball unter Druck gerät und in die Strömung hinein gepresst wird (*Bernoulli-Prinzip*). Dadurch werden die Beschleunigung der Strömung und der Unterdruck weiter verstärkt. Der Strom würde sich selbst strangulieren, wenn nicht aufgrund des mit der Enge zunehmenden Strömungswiderstandes die Geschwindigkeit des Stroms noch stärker vermindert als sie durch die Verkleinerung des Querschnitts erhöht würde. Der Strömungswiderstand wächst also mit einer höheren Potenz der Geschwindigkeit als die mit der Verengung wachsende Kraft auf den Ball. Aufgrund dieser Nichtlinearität können sich beide Tendenzen gegenseitig „überholen“, begrenzen und auf diese Weise einen stationären Fließvorgang einregeln (siehe weiter unten).

### Dissipative Struktur

Wenn sich ein System noch weiter aus dem thermodynamischen Gleichgewicht heraus entwickelt als es bei einem Fließgleichgewicht der Fall ist, kommt es zu einer neuen Struktur. Dazu betrachten wir noch einmal den auf dem Stövchen warm gehaltenen Tee. Bislang waren wir davon ausgegangen, dass die von unten zugeführte Wärme durch Wärmeleitung durch das System transportiert wird. Wenn der zugeführte Wärmestrom erhöht wird und ein kritisches Maß überschreitet, entfernt sich das System weiter vom thermodynamischen Gleichgewicht, und es tritt ein völlig neues Phänomen auf: Die Flüssigkeit setzt sich in Bewegung. Die Auftriebskraft aufgrund der erwärmten und sich infolgedessen ausdehnenden unteren Flüssigkeitsschicht wird so stark, dass es zu einer Überwindung der inneren Reibungskraft kommt und erwärmte Flüssigkeit aufsteigt. Auf diese Weise wird die Wärmeleitung durch den sehr viel effektiveren Transportmechanismus der Wärmekonvektion

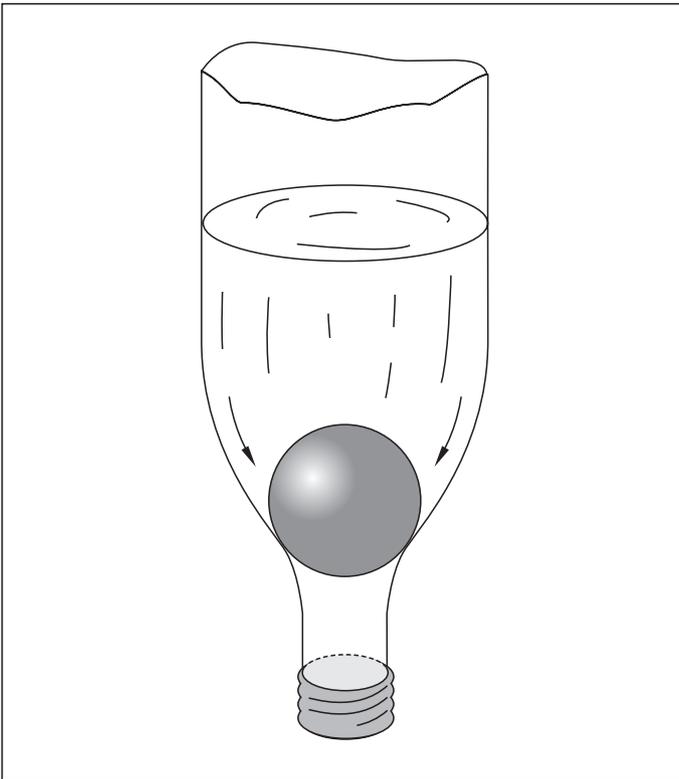
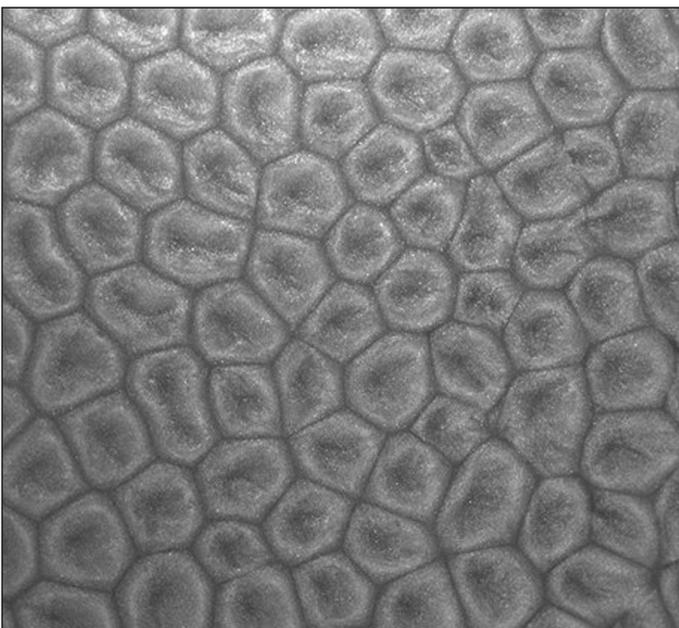


Abb. 4: Der Tischtennisball „versucht“ den Hals der halben PET-Flasche zu verschließen.

überlagert. Dadurch steigt die Dissipationsrate sehr stark an und treibt das System in einen stationären Zustand fernab vom thermodynamischen Gleichgewicht. In diesem Falle spricht man mit *Ilya Prigogine* von einer *Dissipativen Struktur*, einem System, dessen Struktur sich der Dissipation (bzw. Entwertung) von Energie verdankt.

Die durch die Konvektion bedingte Strukturierung der Flüssigkeit kann man insbesondere in einer wenige Millimeter dünnen Flüssigkeitsschicht (z. B. Silikonöl, dem man als Indikator der Bewegungen z. B. etwas Kupfer- oder Aluminiumpulver beigemischt hat) eindrucksvoll sichtbar

Abb. 5: Typische Konvektionszellen in einer Flüssigkeitsschicht. In der Mitte der Zellen quillt die Flüssigkeit hoch, um – an der Oberfläche abgekühlt – an den Zellengrenzen in Konkurrenz mit den Nachbarzellen wieder abzusinken.



machen (Abb. 5) Die Flüssigkeitsschicht wird je nach den Randbedingungen des Systems (z. B. Form des Gefäßes, Viskosität) durch ein typisches Muster aufeinander abgestimmter Konvektionszellen geprägt (*Bénard-Konvektion*). Ein ähnliches Zellenmuster kann man erzeugen, wenn man eine flache Schale mit Sand auf einem Vibrationsgenerator (siehe z. B. [3]) in Schwingung versetzt. Dann sind es kollektiv zirkulierende Sandkörnchen, die sich in dieser Struktur organisieren.

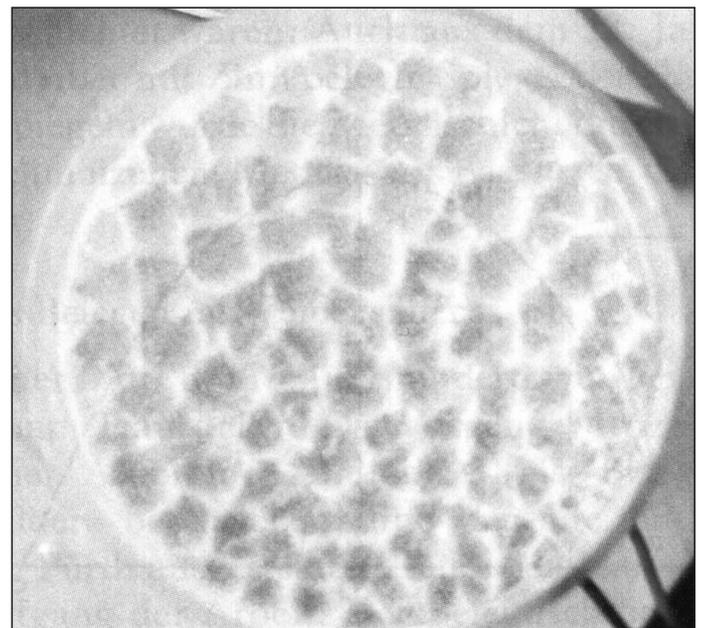
Aber auch die Flamme einer Kerze kann als dissipative Struktur aufgefasst werden. Bei ruhiger Luft erscheint sie fast wie die Blüte einer Blume in gleich bleibender äußerer Form: „Der Stängel der Flamme ist so gerade, so zart, dass die Flamme eine Blume ist“ (*Gaston Bachelard*). Wie bei dem äußerlich gleich bleibenden Muster der *Bénardzellen* verdankt sich auch hier die Dauerhaftigkeit der Struktur einem ständigen Wechsel. Im Docht aufsteigendes flüssiges Wachs verdampft, reagiert mit dem Luftsauerstoff und setzt Energie frei, die vor allem nicht verbrannten Kohlenstoff zum Leuchten bringt. Da ständig neues Wachs verbrennt und anschließend als Verbrennungsgas aufsteigt, werden stets neue Kohlenstoffteilchen zum Leuchten gebracht. Die Flamme vergeht und entsteht in jedem Moment neu.

### Strukturbildung durch Symmetriebruch

Die Strukturbildung ist offensichtlich mit einem Bruch der Symmetrie des Systems verbunden. Die neue Struktur besitzt eine niedrigere Symmetrie als im thermodynamischen Gleichgewicht, aus dem sie hervorgeht. Im Falle der *Bénardkonvektion* wachsen die Polygonzellen aus der homogenen Flüssigkeitsschicht heraus, sobald eine kritische Temperatur überschritten wird. Dabei wird die hohe Symmetrie des Systems erniedrigt (siehe z. B. [3]).

An welcher Stelle der Flüssigkeitsschicht setzt das Konvektionsgeschehen ein? Im Fall einer ideal gleichmäßigen Erwärmung wäre das System genau so blockiert wie *Buridans* Esel, der in der Mitte zwischen zwei gleichen Heuhaufen verhungert, weil von beiden gleich starke Reize ausgehen. Denn da die Flüssigkeitsschicht als Ganzes wärmer und da-

Abb. 6: Konvektionszelle in einer Sandschicht, die mit Hilfe eines Vibrationsgenerators in Schwingung versetzt wird. Obwohl es sich hier um ein völlig anderes System handelt, ist die Ähnlichkeit zur *Bénardkonvektion* frappierend.



mit spezifisch leichter wird, müsste sie als Ganzes aufsteigen. Das ist natürlich unmöglich. Zum Glück ist das System ebenso wie der Esel in einem derartigen labilen Gleichgewicht hochgradig sensitiv: Kleinste Störungen reichen aus (beispielsweise das zufallsbedingte gleichzeitige Aufsteigen einiger Flüssigkeitsmoleküle an bestimmten Stellen), um sich zu makroskopischen Bewegungen aufzuschaukeln, die schließlich die ganze Flüssigkeitsschicht erfassen und mit Konvektionszellen ausfüllen. Wie auf ein Kommando schält sich aus dem mikroskopischen Chaos des thermodynamischen Gleichgewichts ein kohärentes, kollektives Verhalten heraus. Die vorher individuell und unabhängig voneinander agierenden Flüssigkeitsteilchen machen plötzlich gemeinsame Sache. Solange sich an den äußeren Bedingungen nichts ändert (konstanter Energiestrom), bleibt dieses zufällig zustande gekommene Zellenmuster erhalten. Der Zufall wird gewissermaßen konserviert und bestimmt die individuelle Gestalt der dissipativen Struktur. Der Zufall kann daher als das kreative, von vornherein nicht bestimmbar und nicht vorhersagbare Element der Strukturbildung angesehen werden: Aus zufälligen Schwankungen innerhalb eines Systems geht eine ganz neue Ordnung des Systems hervor. *Ilya Prigogine* sah in diesem Verhalten die physikalische Antwort auf die Frage, wie Neues im Bereich der unbelebten und belebten Natur entsteht.

Von Bedeutung ist darüber hinaus, dass das hochdimensionale Vielteilchensystem aufgrund solcher phasenübergangsähnlicher Mechanismen aus der enormen Vielfalt möglicher Verhaltensweisen eine Struktur hervorbringt, die durch wenige Freiheitsgrade beschreibbar ist. *Edward Lorenz* konnte 1963 zeigen, dass sich Konvektionsbewegungen in Fluiden (bis auf Fluktuationen) durch ein System dreier gekoppelter nichtlinearer Differentialgleichungen beschreiben lassen. Daher gelingt es, die Bewegungsfiguren der *Bénard*-Konvektion an einem mechanischen Modellsystem, einer Art Wasserrad, zu untersuchen und zu beschreiben [6].

### Die Rolle der Nichtlinearität

Die einmal eingestellte Struktur erweist sich als äußerst robust. Wenn man das System etwas stört, so baut es die Störungen sofort wieder ab. Diese Stabilität beruht auf der Nichtlinearität der Energie- bzw. der damit verbundenen Entropieströme, die das System in Gang halten.

Dazu machen wir uns Folgendes klar. Der mit der rotierenden Flüssigkeit transportierte Wärmestrom und der damit verbundene Entropiestrom sind proportional zur strömenden Flüssigkeitsmenge (Masse). (Dabei gehen wir davon aus, dass die Temperatur des Flüssigkeitsstroms von unten nach oben näherungsweise gleich bleibt). Mit der Konvektion entsteht ein Strom mechanischer Energie, der quadratisch mit der Geschwindigkeit wächst. Da die mit der Erzeugung mechanischer Energie verbundene Entropieabnahme durch Entropiezunahme im System (Ausgleichsvorgänge) mindestens kompensiert werden muss, nimmt der Strom der erzeugten Entropie mindestens quadratisch, also nicht-linear mit der Geschwindigkeit zu. Diese Entropie muss zusätzlich zu der mit dem Wärmestrom aufgenommenen Entropie entsorgt werden, weil das System ansonsten daran „ersticken“ würde. Es stellt sich daher zwangsläufig eine maximale Konvektionsgeschwindigkeit ein, bei der die im System erzeugte Entropie mit dem durch das System hindurch fließenden Wärmestrom gerade noch exportiert werden kann. Da – anschaulich gesprochen – mit der Rotati-

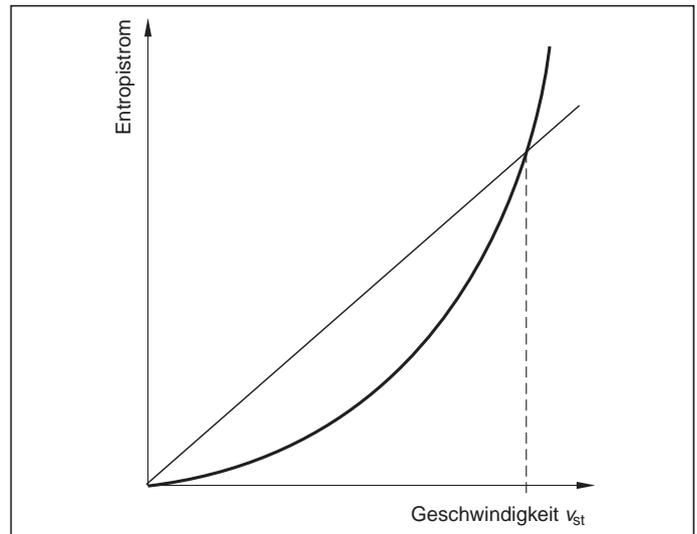


Abb. 7: Zunahme des mit dem Energiestrom transportierten Entropiestroms (Gerade) und des Stroms der im System erzeugten Entropie (Kurve).  $v_{st}$  ist die stationäre Geschwindigkeit, bei der sich produzierte und exportierte Entropie die Waage halten.

ongeschwindigkeit die Entropieproduktion „schneller“ zunimmt als der Entropieexport, kann erstere letztere überholen und damit begrenzen. Es kommt zur Einregelung einer stationären Rotationsgeschwindigkeit, die in dem gleich bleibenden Muster der Konvektionszellen zum Ausdruck kommt.

Eine zufallsbedingte Zunahme der Geschwindigkeit über den stationären Wert hinaus würde zu einer größeren Entropieproduktionsrate führen, so dass der die Rotation aufrechterhaltende Temperaturgradient reduziert und damit die Rotationsgeschwindigkeit vermindert würde. Umgekehrt, wenn mehr Entropie entsorgt werden könnte, als entsteht, würde es zu einer Zunahme der Rotationsgeschwindigkeit kommen. Mit anderen Worten: Eine Zunahme der Rotationsgeschwindigkeit führt aufgrund der überproportional wachsenden Entropieproduktion zu einer Abnahme der Geschwindigkeit, was aufgrund der nunmehr geringeren Entropieproduktion zu einer Zunahme der Geschwindigkeit führt usw. Diese Art der Rückkopplung im Systemverhalten ist unmittelbarer Ausdruck der Nichtlinearität, die letztlich dafür sorgt, dass der stationäre Nichtgleichgewichtszustand der dissipativen Struktur gewissermaßen von selbst, d. h. ohne Eingriff von außen, einreguliert wird, bzw. sich selbst organisiert.

### Die Flamme einer Kerze

Wir kommen noch einmal auf die Flamme der Kerze zurück. Sie ist das Paradebeispiel einer dissipativen Struktur, die von Energie und Materie durchströmt wird. Im stationären Zustand versorgt der Docht die Flamme mit einem flüssigen Wachsstrom, der in der Brennzone verdampft und mit dem Sauerstoff der Luft reagiert. Dabei wird Energie freigesetzt, die zur Lichtentstehung im Bereich der Kerzenflamme führt. Auf Einzelheiten soll es uns hier nicht ankommen. Erwähnt sei nur, dass die unvollständige Verbrennung des Wachses zur Freisetzung von Kohlenstoffteilchen führt, die in der Hitze der anfallenden Energie erglühen und nicht unwesentlich zur Helligkeit der Flamme beitragen. Was aus chemischer Sicht als Unvollkommenheit angesehen werden kann, erweist sich hinsichtlich des Zwecks der Flamme, Licht zu spenden, als Ausdruck einer jenseits fachlicher Kategorien liegenden Vollkommenheit.

Die Kerzenflamme verdankt sich einer ganzen Reihe wohl- abgestimmter Regelvorgänge, bei denen Energie- und Stofftransporte, chemische Reaktionen und Phasenübergänge in subtiler Weise miteinander vernetzt sind und sich gegenseitig bedingen. Dabei fällt auf, dass die Größe der Kerzenflamme weitgehend unabhängig von der Art des Brennstoffs und des Dochts sowie der Dicke und Form der jeweiligen Kerze ist. Dieses Phänomen, das die Kerzenflamme (bei ruhiger Luft) unbeweglich wie die Blüte einer Blume erscheinen lässt, findet in der Entropiebilanz des Prozesses eine einleuchtende Erklärung.

Wenn die Flamme entzündet wird, wächst sie sehr schnell zu ihrer endgültigen Größe an. Anders als etwa beim Hausbau, bei dem es lediglich auf die Zufuhr von Energie und Materie ankommt, welche im Prinzip beliebig große Bauwerke ermöglicht, geht es beim Wachstum der Flamme um Zufuhr und Abfuhr von Energie und Stoffen. Da die Flamme sichtbarer Ausdruck der in ihr ablaufenden selbsttätigen Vorgänge ist, fallen Abwärme und Abgase an, die entsorgt werden müssen. Selbst wenn die Flamme ihre endgültige Größe erreicht hat, müssen weiterhin Energie und Stoffe zu- und in gleichem Maße abgeführt werden. Entscheidend für die Aufrechterhaltung einer dissipativen Struktur ist die mit den inneren Vorgängen einhergehende Energiedissipation bzw. Entropieproduktion.

Da sich der Stoffwechsel auf das gesamte Volumen der Flamme bezieht, kann man davon ausgehen, dass die Entropieproduktion  $\Delta S_i$  proportional zum Volumen der Flamme bzw.  $r^3$  ist, wobei  $r$  die Flammengröße bezeichnet:

$$\Delta S_i = \varphi \cdot r^3,$$

mit  $\varphi$  als dimensionsbehafteter Proportionalitätskonstanten. Es muss also ständig mehr Entropie exportiert werden, als mit der aufgenommenen Materie importiert wird. Die Flamme würde ansonsten an der Entropie „ersticken“. Da Entropiezunahme anschaulich Ausgleich von Differenzen und Intensitäten bedeutet, würden die Lebensbedingungen zunehmend eingeschränkt werden.

Die Differenz der durch die Oberfläche der Flamme zu- und abfließenden Entropie  $\Delta S_e$  kann als proportional zur Oberfläche bzw.  $r^2$  angesehen werden:

$$\Delta S_e = \tau \cdot r^2,$$

mit  $\tau$  als dimensionsbehafteter Proportionalitätskonstanten. Die Entropiebilanz der Flamme beträgt demnach:

$$\Delta S = \Delta S_i + \Delta S_e.$$

Im stationären Zustand gilt:

$$\Delta S = \varphi \cdot r^3 - \tau \cdot r^2 = 0.$$

Dann hat die Flamme ihre maximale Größe  $r = r_s = \tau/\varphi$  erreicht. Solange  $r$  klein ist, gilt  $\Delta S < 0$ , und die Flamme kann weiter wachsen. Bei größeren Werten von  $r$  ist hingegen  $\Delta S > 0$ , dann staut sich in der Flamme überschüssige Entropie, die zu einer Einschränkung der „Lebensbedingungen“ und damit zu einer Verkleinerung der Flamme führen würde.

An dieser Stelle sei noch einmal auf die Erschließungsmächtigkeit der thermodynamischen Argumentation hingewiesen: Man kann auch ohne Kenntnis der komplizierten physikalischen und chemischen Vorgänge Aussagen über die Begrenzung der Flammengröße machen. Die Aussagen



**Abb. 8:** Die Ähnlichkeit zwischen Kerzenflammen und Blüten ist nicht nur äußerlich. Auch eine Pflanze kann als dissipative Struktur angesehen werden, die sich in einem ständigen Auf- und Abbau befindet.

sind sogar so allgemein, dass man auf ganz ähnliche Weise begründen kann, warum sich bei der Bénardkonvektion statt einer einzigen zahlreiche in etwa gleich große kleinere Konvektionszellen ausbilden. Diese „Zellteilung“ findet man mutatis mutandis auch in der Biologie wieder. Die Entwicklung größerer Lebewesen war u. a. nur dadurch möglich, dass die Natur Vielzeller hervorbrachte.

### Fazit

Mit einfachen thermodynamischen Überlegungen lässt sich zeigen, dass Strukturen in der belebten und unbelebten Natur nicht nur im Einklang mit dem Entropieprinzip stehen, sondern gewissermaßen dadurch erst ermöglicht werden. Indem Systeme ins thermodynamische Gleichgewicht übergehen, können andere Systeme aus dem thermodynamischen Gleichgewicht herausgetrieben und als sich selbst organisierende Struktur stabilisiert werden. Dabei wird deutlich, dass die aus Nichtgleichgewichtsstrukturen bestehende Wirklichkeit als dynamischer Prozess betrachtet werden kann: Sie entsteht jeden Augenblick neu. Mit anderen Worten: „Der Wechsel ist das Beständige“ (Arthur Schopenhauer).

### Literatur

- [1] Schlichting, H. Joachim: Energieentwertung – ein qualitativer Zugang zur Irreversibilität. PdN-Ph (in diesem Heft)
- [2] Schlichting, H. Joachim: Von der Energieentwertung zur Entropie. PdN-Ph (in diesem Heft)
- [3] Boysen, Gerd et al.: Oberstufe Physik, Band1. Berlin: Cornelsen 1997, S. 146
- [4] De Groot, Sybren R.; Mazur, Peter: Grundlagen der Thermodynamik irreversibler Prozesse. Mannheim: BI 1969
- [5] Zeiger; Klaus; Nordmeier, Volkhard; Schlichting, H. Joachim: Flussnetzwerke – Strukturbildung in der natürlichen Umwelt. In: Deutsche Physikalische Gesellschaft (Hrsg.): Didaktik der Physik. 1999, S. 513- 518
- [6] Schlichting, H. Joachim; Bachhaus, Udo; Küpker, H. G: Chaos beim Wasserrad – ein einfaches mechanisches Modell für das Lorenzsystem. Physik und Didaktik 19/3, 196-219 (1991)

### Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. Hans Joachim Schlichting, Westfälische Wilhelms-Universität, Münster, FB Physik, Wilhelm Klemm-Str. 10, 48149 Münster