

Energieentwertung und Entropie

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 ohne Entropie versteht man nie

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.

Da die Energie eine mengenartige Größe ist, sollte man die Bedeutung des Wortes Energieverbrauch in Analogie zur Bedeutung des Verbrauchs von beliebigen Stoffen, etwa zum Wasserverbrauch im Haushalt betrachten: Wasser wird für die verschiedensten Zwecke, zum Kochen, Waschen, Klospülen usw. verbraucht, ohne daß darin ein Widerspruch zur Erhaltung des Wassers gesehen würde. Es dürfte den Lernenden daher nicht schwerfallen, 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 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 (siehe unten) erfaßt. Mit Hilfe der Entropie lassen sich diese bleibenden Veränderungen, die Irreversibilität von Prozessen quantitativ beschreiben.

Für eine frühe Einführung der Entropie im Physikunterricht spricht außerdem, daß das Entropieprinzip ohnehin bereits unter verschiedenen Namen verwendet wird. Wenn beispielsweise ein Gegenstand umkippt, sagt man, er gehe ins stabile Gleichgewicht über, weil – ganz aristotelisch – der Schwerpunkt bestrebt sei, 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 in der einseitigen Tendenz eines Gegenstandes, den Zustand minimaler potentieller Energie einzunehmen, das Entropieprinzip zum Ausdruck kommt? Rein mechanisch gesehen dürfte ein fallender Gegenstand gar nicht zur Ruhe kommen, sondern müßte 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.

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) verschwinden 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 Strukturbildungsprozesse bestimmt.

Da die Entropie meist mit Zerfall, Verschleiß und Vergänglichkeit in Zusammenhang gebracht wird, sieht man sie meist als ein zu vermeidendes Übel an. Es muß daher mit Nachdruck darauf hingewiesen werden, daß die mit Hilfe der Entropie beschriebene Tendenz von Systemen, unter Dissipation von Energie ins thermodynamische Gleichgewicht überzugehen, überhaupt erst ermöglicht, daß Systeme aus dem thermodynamischen Gleichgewicht herausgetrieben werden, Ströme fließen und Strukturen entstehen.

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 und schließlich ein Zugang zu Phänomenen skizziert wird, 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 Beispiele typische Beispiele:

- Wenn eine Kerze abbrennt, 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.

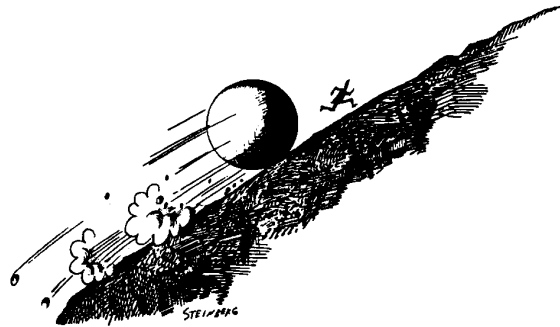


Bild 1: Verstoß gegen das Prinzip der Energieentwertung. Kein Verstoß gegen das Energieprinzip

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 von selbst wieder aufladen.

Gemeinsam ist den Vorgängen also, daß sie von selbst nur in der einen nicht aber in der anderen Richtung ablaufen, "ohne eine 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, so daß dieser steigt. Die Energieentwertung der absinkenden Luft macht die Energieentwertung, die mit dem fallenden Luftballon verbunden wäre rückgängig 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 (Bild 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.

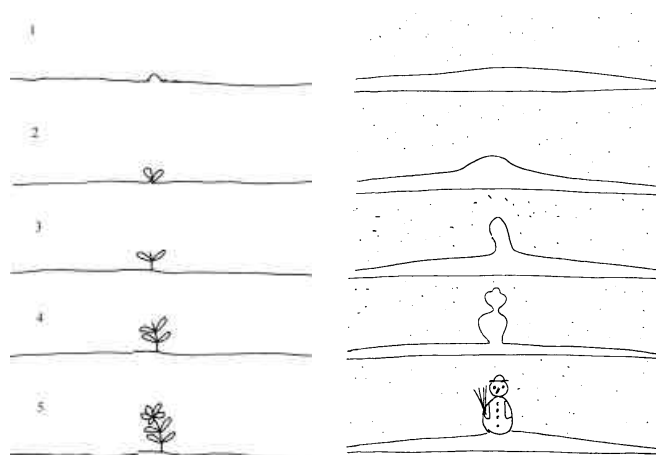


Bild 2: Zwei Strukturbildungsvorgänge, der eine wird für möglich, der andere für unmöglich gehalten.

Wenn man die Karrikatur (Bild 1) der den Berg hinaufrollenden Kugel mit dem Vorgang des Herabfallenden Gewichtsstücks ergänzte, wäre der Witz dahin, weil ein solcher Vorgang realistisch ist. (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 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 *Energie*entwertung 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 Temperatenausgleichsvorgang in die umgekehrte 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 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.
- 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.

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.

Definition der Entropie

Mit der Energieentwertung lassen sich viele Problem zumindest qualitativ beschreiben. Spätestens auf der Oberstufe möchte man auch in der Lage sein, quantitative Abschätzungen und Berechnungen durchführen zu können. Wir zeigen daher im folgenden, wie man aufbauend auf der mit Hilfe der Energieentwertung geschaffenen phänomenologischen Basis zu einer Quantifizierung der Energieentwertung als physikalische Größe der Entropie kommen kann.

Ausgangspunkt ist der Vergleichs zweier verschiedenen mit Energieentwertung verbundener Vorgänge. Wir legen fest, *daß derjenige zweier Vorgänge mit einer größeren Energieentwertung einhergeht, der den jeweils anderen zurückzuspulen, daß 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 ΔS 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 ΔE an ein thermisches System abgegeben wird (Dissipationsvorgang), so ist die damit verbundene Entropieänderung ΔS umso größer, je niedriger die Temperatur des (thermischen) Systems ist. Denn wenn die Energie ΔE zunächst selbsttätig auf das System mit der höheren Temperatur übergeht, kann sie von dort auch noch selbsttätig auf das System mit der niedrigeren Temperatur 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 ΔE auf das System mit der höheren Temperatur $T_1 > T_2$ und der Entropieänderung $\Delta S(T_1 \rightarrow T_2)$ beim Übergang von ΔE 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 ΔQ ab, so nimmt dessen Entropie um den gleichen Betrag ab. Dabei wurde vorausgesetzt, daß es sich bei den (thermischen) Systemen entweder um Wärmereservoirs handelt oder die Energieübertragung in so kleinen Portionen erfolgt, daß man näherungsweise von einer gleichbleibenden Temperatur ausgehen kann.

Als typisches Beispiel eines von selbst ablaufenden (irreversiblen) Vorgangs betrachten wir das Abkühlen von heißem Wasser der Temperatur T auf Umgebungstemperatur $T_U < T$. In diesem Fall setzt sich die Gesamtentropieänderung ΔS 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, mit Energieentwertung verbundener Vorgang ist.

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

In einem geschlossenen System kann die Entropie nicht abnehmen: $DS \geq 0$.

Neben dem als 1. Hauptsatz der Thermodynamik bezeichneten Energiesatz gehört der Entropiesatz als 2. Hauptsatz 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 der 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 die Entropie dabei zunehmen, also erzeugt werden. *Die Energieentwertung ist so gesehen gleichbedeutend mit Erzeugung von Entropie.*

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 nahegelegt: 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 auf 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 abnehmen kann, kann sie nur dadurch beseitigt werden, daß sie an ein geeignetes anderes System, typischerweise die Umwelt oder letztlich das Weltall abgegeben wird.

Literatur

- [1] Backhaus, Udo: Die Entropie als Größe zur Beschreibung der Unumkehrbarkeit von Vorgängen. Osnabrück 1982
- [2] Rahmenrichtlinien NRW
- [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] Boysen, Gerd et al.: Oberstufe Physik, Band 1. Berlin: Cornelsen 1997, S. 129 ff; ders. Oberstufe Physik, Band 2. Berlin 1998, S. 448 ff