



Zur Formulierung von Erhaltungs- und Nichterhaltungssätzen

FRIEDRICH HERRMANN

Zu jeder mengenartigen Größe lässt sich ein Satz über ihre Erhaltung oder Nichterhaltung formulieren. Für die elektrische Ladung lautet er: Elektrische Ladung kann weder erzeugt noch vernichtet werden. Ein solcher Satz ist kurz und leicht verständlich. Oft formuliert man den Sachverhalt aber auf unnötig komplizierte Art. Manchmal ist die Formulierung nicht allgemein gültig; in anderen Fällen wird nur eine Konsequenz aus der Erhaltung bzw. Nichterhaltung ausgesprochen. Ein einheitliches Vorgehen könnte zur Klarheit und zur Straffung des Unterrichts beitragen.

1 Einleitung

Zu jeder mengenartigen Größe (FALK, 1977, FALK, 1990, HERRMANN, 2006) kann man einen Satz über ihre Erhaltung oder Nichterhaltung aussprechen. Mit diesen einfachen und funda-

mentalenen Gesetzen hat die Physik aber einige Probleme. In manchen Fällen wird die Tatsache so formuliert, als gelte sie nur unter bestimmten Bedingungen; in anderen werden statt der Aussage über die Größe selbst, Konsequenzen aus der Erhaltung bzw. Nichterhaltung beschrieben.

Wir werden zunächst in Abschnitt 2 daran erinnern, was man unter einer mengenartigen Größe versteht. In Abschnitt 3 wird der Begriff der Erhaltung gegen den Begriff der Konstanz abgegrenzt. In Abschnitt 4 kommen wir zum eigentlichen Thema: Es werden übliche Formulierungen der Erhaltung oder Nichterhaltung kritisch beleuchtet, und zwar nacheinander für die Energie, den Impuls, die Masse, die elektrische Ladung, die Entropie, die Stoffmenge und die magnetische Ladung. In Abschnitt 5 wird angesprochen, dass es Klassen von Prozessen gibt, bei denen man Größen, die allgemein nicht erhalten sind, wie erhaltene Größen behandeln kann. Schließlich werden in Abschnitt 6 Konsequenzen für den Unterricht diskutiert.

2 Mengenartige Größen

Der Wert einer physikalischen Größe bezieht sich meist auf ein räumlich-geometrisches Objekt: einen Punkt, eine Linie, eine Fläche oder einen Raumbereich (HERRMANN, 2009).

Eine Temperatur, ein Druck, eine Massendichte oder eine elektrische Feldstärke gehören zu einem Punkt; die elektrische Spannung ist für eine Linie definiert; Kraft, elektrische Stromstärke und Leistung beziehen sich jeweils auf eine Fläche; Masse, Impuls, Entropie und einige andere mehr beziehen sich auf einen Raumbereich. Diese letzteren, d. h. die raumbezogenen, nennt man *extensive Größen*.

Es gibt einige Größen, die nicht in dieses Schema passen, die uns aber hier nicht interessieren.

Die extensiven Größen sind aus zwei Gründen für den Physikunterricht besonders wichtig:

1. Sie spielen im Aufbau der Physik eine zentrale Rolle. Jedes der klassischen Teilgebiete der Physik hat seine eigene, das Gebiet charakterisierende extensive Größe: die Mechanik den Impuls, die Elektrizitätslehre die elektrische Ladung, die Wärmelehre die Entropie. Daraus resultiert eine weitreichende Analogie, die den Unterricht erheblich straffen kann.
2. Der Umgang mit ihnen ist besonders einfach. Wenn man es mit den extensiven Größen zu tun hat, kann man von einem sehr tragfähigen Modell Gebrauch machen: dem *Stoffmodell*. Man stellt sich die Größe vor als Mengemaß für einen Stoff oder ein Fluidum, und spricht über sie, als spreche man über diesen gedachten Stoff. Wegen dieser Möglichkeit nennt man sie auch *mengenartige Größen* (Kasten 1). Besonders verbreitet ist dieser Umgang bei der elektrischen Ladung. Man erkennt es an den Formulierungen, die allgemein benutzt werden: die Ladung fließt, man häuft Ladung an, etc.

Im Folgenden geht es um eine Besonderheit der mengenartigen Größen: Man kann für jede von ihnen einen Satz über Erhaltung oder Nichterhaltung aussprechen. So ist etwa der Impuls erhalten, die Entropie ist es nicht. Für nicht-mengenartige Größen hat es keinen Sinn, über Erhaltung oder Nichterhaltung zu sprechen; Temperatur, Druck, Kraft, magnetische Feldstärke etwa sind weder erhalten noch nicht erhalten. Das Kriterium »erhalten oder nicht erhalten« passt einfach nicht auf sie. (Man beachte, dass mit »erhalten sein« nicht gemeint ist, dass der Wert der Größe zeitlich konstant ist.)

Welches sind nun die mengenartigen Größen? Sicher gehören dazu Masse, Energie, Impuls, elektrische Ladung und Entropie; außerdem aber auch der Drehimpuls (obwohl es nicht immer möglich ist, eine Drehimpulsdichte und -stromdichte zu definieren), die magnetische Ladung (obwohl sie in den heutigen Lehrbüchern kaum noch vorkommt), die Stoffmenge (obwohl sie von den meisten Physikern eher als »chemische« Größe verstanden wird), und schließlich Größen, die man in der Teilchenphysik als Quantenzahlen bezeichnet, etwa die Baryonenzahl und die Leptonenzahl.

3 Erhaltung und Konstanz

Erhaltung und Konstanz sind benachbarte Konzepte; sie sind einander so nah, dass sie oft verwechselt oder auch synonym verwendet werden.

So ist es in der Hamilton-Mechanik üblich, zwischen den Begriffen »Konstante der Bewegung« (auch Integral der Bewegung) und »Erhaltungsgröße« nicht zu unterscheiden.

Das Problem dabei ist, dass ein System mit n Freiheitsgraden $2n$ Konstanten der Bewegung hat, also funktionale Ausdrücke, die zeitunabhängig sind. Dabei handelt es sich oft um sehr unanschauliche Ausdrücke. Nicht jede Größenkombination, die unter bestimmten Bedingungen zeitlich konstant ist, ist eine Erhaltungsgröße, und der Wert einer Erhaltungsgröße muss an einem System nicht zeitlich konstant sein. Er ist es nur, wenn ein Austausch der Größe mit der Umgebung ausgeschlossen wird.

Wir empfehlen daher, auch schon im Physikunterricht der Schule, sauber zu unterscheiden zwischen »zeitlich konstant« und »erhalten«, wobei das Erhaltensein das wichtigere Konzept ist.

4 Wie man die Erhaltung bzw. Nichterhaltung formuliert

Nun zu unserem eigentlichen Thema: der Formulierung von Erhaltungs- und Nichterhaltungssätzen.

Von einer *extensiven* Größe spricht man gewöhnlich, wenn sich der Wert der Größe auf einen Raumbereich bezieht; *mengenartig* nennt man eine Größe, auf die man das Stoffmodell anwenden kann. Die Kategorien *extensiv* und *mengenartig* sind nicht ganz deckungsgleich. Wir betrachten als Beispiel die »Größe« Geldwert. Hier benutzt jeder das Stoffmodell; die Größe wäre also mengenartig. Nach unserem Kriterium ist der Geldwert aber keine extensive Größe, denn man kann ihn nicht einem Raumbereich zuordnen; auch gibt es zum Geldwert keine Dichte und keine Stromdichte.

Kasten 1. Extensive und mengenartige Größen

Eigentlich sollte es gar kein Problem geben. Wenn man das Stoffmodell verwendet, wenn man also bereit ist, die Mengenangabe einer Größe X auch sprachlich zum Ausdruck zu bringen, so kann man die Erhaltung von X so formulieren:

- X kann nicht erzeugt und nicht vernichtet werden.

Falls X keine Erhaltungsgröße ist, würde einer der drei folgenden Sätze gelten:

- X kann erzeugt, aber nicht vernichtet werden.
- X kann erzeugt und vernichtet werden.
- X kann vernichtet, aber nicht erzeugt werden.

Allerdings kennen wir für den letzten Fall kein Beispiel. Konkret würden wir also die Sätze von Kasten 2 erhalten.

Energie kann nicht erzeugt und nicht vernichtet werden.
Impuls kann nicht erzeugt und nicht vernichtet werden.
Drehimpuls kann nicht erzeugt und nicht vernichtet werden.
Elektrische Ladung kann nicht erzeugt und nicht vernichtet werden.
Magnetische Ladung kann nicht erzeugt und nicht vernichtet werden.
Entropie kann erzeugt, aber nicht vernichtet werden.
Stoffmenge kann erzeugt und vernichtet werden.

Kasten 2. Einfache Formulierung von Erhaltungs- und Nichterhaltungssätzen

Da wir das Stoffmodell verwenden, sind wir mit der Sprache flexibel. Physikalisch in Ordnung ist daher auch jede andere Formulierung des Sachverhalts, die nach den Kriterien der Umgangssprache dasselbe ausdrückt wie die Sätze von Kasten 2.

Man könnte also auch sagen:

- *Energie kann nicht entstehen und nicht vergehen.*

Oder eben kurz:

- *Die Energie bleibt erhalten.*

Es mag überraschen, dass diese einfache Möglichkeit des Ausdrucks von Erhaltung und Nichterhaltung in der Lehrbuchliteratur eher selten verwendet wird. Stattdessen trifft man oft Formulierungen an, die schwerer verständlich sind, die weniger allgemeingültig sind, ja sogar solche, denen man gar nicht ansieht, dass sie die Erhaltung bzw. Nichterhaltung einer Größe zum Inhalt haben.

Dabei kann man die folgenden Mängel feststellen: Statt die Erhaltung direkt auszusprechen

- werden Konsequenzen aus der Erhaltung beschrieben.
- wird ein Verfahren geschildert, mit dem man die Erhaltung überprüfen kann.

Wir wollen im Folgenden einige beliebte Formulierungen der Erhaltung bzw. Nichterhaltung für die wichtigsten mengenartigen Größen kritisch diskutieren.

4.1 Die Energie

Sehr oft wird ein energetisch abgeschlossenes System vorausgesetzt:

- *In einem abgeschlossenen System ist die Energie konstant.*

Der Satz macht eine Aussage über einen Spezialfall. Tatsächlich kann man die Erhaltung der Energie überprüfen, indem man ein abgeschlossenes System betrachtet: Man verfolgt den Wert der Energie im Lauf der Zeit, und stellt fest, dass er sich nicht ändert. Der Energiesatz gilt aber auch wenn das System, mit dem man es zu tun hat, nicht abgeschlossen ist. Ja, man braucht überhaupt kein spezielles System zu betrachten, um ihn auszusprechen. Und überprüfen kann man ihn auch an einem nicht abgeschlossenen System: Man muss dann nur die ein- oder ausströmende Energie mit in die Bilanz aufnehmen.

4.2 Der Impuls

Mit dem Impulssatz steht es ähnlich. Auch hier wird oft so oder ähnlich formuliert:

- *In einem abgeschlossenen System ändert sich die Summe der Einzelimpulse nicht.*

Zunächst ist es ein unnötiges Detail, statt vom Impuls von der Summe der Einzelimpulse zu sprechen. Schließlich kann man den Gesamtimpuls auf beliebig viele Arten in »Einzelimpulse« zerlegen. Hinzu kommt noch eine schwerwiegendere Unstimmigkeit: Vor dem Impulssatz werden die Newtonschen Gesetze behandelt. Diese sind aber nichts anderes als Ausdruck der Impulserhaltung für spezielle

Situationen (HERRMANN, 2015).

Sie sind außerdem, wenigstens im Rahmen des heutigen Begriffsystems der Mechanik, redundant: Das erste und das dritte folgen aus dem zweiten. Das bedeutet, dass man die drei Gesetze in der Newtonschen Formulierung nicht mehr braucht, wenn man gleich am Anfang der Mechanik den Impulserhaltungssatz einführt.

4.3 Die Masse

Dass die Masse bei so genannten physikalischen Vorgängen erhalten ist, wurde von jeher als Selbstverständlichkeit betrachtet. Die sprachlichen Wendungen, die im Zusammenhang mit der Masse verwendet werden, lassen den Gedanken, dass die Masse nicht erhalten sein könnte, gar nicht aufkommen. Den Verdacht, dass die Masse vielleicht doch nicht erhalten ist, hatte man nur im Zusammenhang mit Stoffumwandlungen. Aber das war ein Problem der Chemiker. Und die klärten die Frage auch: Ein Satz von der Erhaltung der Masse, der auch für Stoffumwandlungen gilt, wurde von LOMONOSOV entdeckt.

Bei den Chemikern wurde er als Lehrsatz gehandelt, bei den Physikern nicht. Erst als man im Zusammenhang mit Kernreaktionen bemerkte, dass sich die Ruhmassen ändern, schien er auch für die Physik interessant zu werden. Bemerkenswert für sie war also erst die Abweichung von der Erhaltung.

Zwar ist diese Abweichung; wenn man die Energie-Masse-Äquivalenz ernst nimmt, keine Verletzung des Massen/Energie-Erhaltungssatzes, aber den Namen Defekt hat sie bis heute behalten.

4.4 Die elektrische Ladung

Mit der Erhaltung der Ladung steht es ähnlich wie mit der der Masse. Man betont, dass es zwei Arten von Ladung gibt, positive und negative, aber dass die Ladung allgemein, d. h. nicht die

positive oder die negative allein, erhalten ist, wird meist nicht formuliert, sondern von vornherein als gegeben angenommen.

4.5 Die Entropie

Hier ist die Situation am unerfreulichsten. Zunächst noch einmal die moderne und leicht verständliche Formulierung des Entropiesatzes oder zweiten Hauptsatzes:

- *Entropie kann erzeugt, aber nicht vernichtet werden. (1)*

(Da wir uns später auf die verschiedenen Versionen des Entropiesatzes beziehen, versehen wir sie mit Nummern.)

Nach allgemeiner Auffassung wurde die Größe Entropie von CLAUSIUS definiert oder eingeführt. Zwar hatte OSTWALD schon 1908 bemerkt, dass das alte Carnotsche Caloricum mit der Größe, die man später Entropie nannte, übereinstimmt (OSTWALD, 1908), aber diese Feststellung hat sich nie auf die Formulierung des Entropiesatzes ausgewirkt.

CLAUSIUS hat den Namen »Zweiter Hauptsatz« geprägt, und hat den Satz auf die verschiedensten Arten formuliert, etwa so:

- *Die Wärme kann nicht von selbst aus einem kälteren in einen wärmeren Körper übergehen. (2)*

(Einige andere seiner Versionen des Satzes sind heute kaum noch zu verstehen, siehe auch HERRMANN, 2015).

Offenbar war man nicht so recht zufrieden mit dieser und den anderen CLAUSIUSschen Formulierungen, und so kamen weitere hinzu. Besonders beliebt geworden ist die von MAX PLANCK (PLANCK, 1897):

- *Es ist unmöglich, eine periodisch funktionierende Maschine zu konstruieren, die weiter nichts bewirkt als Hebung einer Last und Abkühlung eines Wärmereservoirs. (3)*

Dass man auch mit dieser Formulierung nicht glücklich war, erkennt man daran, dass in etlichen Büchern gleich mehrere Versionen des Entropiesatzes angeboten werden, etwa in MACKE (1962) (Kasten 3). Keine der fünf verschiedenen Formulierungen ist wirklich leicht verständlich.

Wir wollen uns die beiden heute beliebtesten Versionen des Entropiesatzes noch einmal vornehmen, nämlich die von CLAUSIUS (2) und die von PLANCK (3).

Wie ist die Beziehung zwischen Satz (2) und der modernen Formulierung (1)?

Der Übergang von Wärme von einem wärmeren auf einen kälteren Körper ist ein irreversibler oder »dissipativer« Prozess, d. h. es wird dabei Entropie erzeugt. Sollte er rückwärts ablaufen, so müsste Entropie vernichtet werden. Das ist nach (1) verboten. Also folgt (3) aus (1). Was den Satz etwas merkwürdig macht, ist, dass er nur eine bestimmte Konsequenz aus dem allgemeinen Satz (1) beschreibt; denn Satz (1) hat noch viele andere Konsequenzen, zum Beispiel: Wasser fließt nur den Berg hinunter, nie-

mals hinauf; oder elektrische Ladung fließt nur vom hohen zum niedrigen elektrischen Potenzial, nie umgekehrt, Impuls geht nur vom Körper mit der höheren Geschwindigkeit auf den mit der niedrigeren, eine chemische Reaktion läuft nur vom hohen zum niedrigen chemischen Potenzial.

Es mag sein, dass es einem gelingt, aus der Tatsache, dass die Wärme nur von heiß nach kalt fließt, herzuleiten, dass das Wasser den Berg nur hinunter fließt, aber wie umständlich das wäre! Warum nicht die allgemeine Formulierung, aus der man leicht auf die verschiedenen Spezialfälle schließen kann.

Auch die Formulierung (3) von PLANCK kann man kritisch sehen. Wir wollen ihr einen anderen Satz, der ebenfalls zutreffend ist, gegenüber stellen:

- *Es ist unmöglich, eine periodisch funktionierende Maschine zu konstruieren, die weiter nichts bewirkt als Hebung einer Last und die Entladung eines Ladungsreservoirs.*

Achtung: Mit Entladung ist gemeint, dass die Ladung verschwindet, d. h. nicht etwa in die Erde abgeleitet wird. Wir sehen, woran das scheitert: Elektrische Ladung kann nicht vernichtet werden. Entsprechend ist die von PLANCK angesprochene Maschine nicht möglich, weil Entropie nicht vernichtet werden kann. PLANCKs Satz ist zwar zutreffend, nur: Er sagt nichts darüber, dass Entropie erzeugt werden kann. Er ist also nicht äquivalent zu Satz (1).

Schließlich noch eine Formulierung des Entropiesatzes, die man nur als Verzweiflungstat bezeichnen kann. Offenbar ebenfalls unzufrieden mit den üblichen Versionen formuliert der Autor (zusätzlich zu drei anderen Formen des Entropiesatzes) den Lehrsatz (MESCHÉDE, 2002):

- *Es gibt irreversible Vorgänge.*

Diesen Satz versteht man zwar, und er folgt auch ganz klar aus (1), nur (1) folgt nicht aus ihm. Denn er sagt nichts darüber aus, wer oder was die Ursache der Irreversibilität ist.

Obwohl schließlich, nachdem der Mengencharakter der Entropie deutlich geworden war (LOHR, 1916; siehe auch HERRMANN, 2015), auch die einfache Version des Entropiesatzes (wie in

»Mit (243.1) erhalten wir somit folgende, untereinander gleichwertige Formulierungen des II. Hauptsatzes der Thermodynamik:

1. *Unmöglichkeit eines PM II.*

2. *Der reversible Carnotsche Wirkungsgrad eines beliebigen thermodynamischen Systems ist*

$$\eta_x = \eta_c \equiv 1 - T_1/T_2.$$

3. *$\delta Q/T$ ist entsprechend (6) integrierbar.*

4. *Die durch $\frac{\delta Q}{T} \equiv dS$ definierte Entropie S ist eine Zustandsgröße.*

5. *Bei irreversiblen, infinitesimalen Zustandsänderungen im abgeschlossenen System gilt stets $(\delta S)_{\text{irr}} > 0$.*«

Kasten 3. Fünf Versionen des zweiten Hauptsatzes in einem Lehrbuch der theoretischen Physik (MACKÉ, 1962, 120).

Kasten 2) verwendet wurde, haben die alten Formulierungen überlebt.

4.6 Die Stoffmenge

Die Stoffmenge wird als eigenständige *physikalische* Größe nicht recht ernst genommen. Jeder kennt sie und weiß, damit umzugehen, aber man betrachtet sie eher als die Anzahl der physikalischen Systeme, mit denen man es zu tun hat. Daher wird auch kein Satz über ihre Nichterhaltung ausgesprochen. Als Kollateralschaden kann man es bezeichnen, dass die zugehörige intensive Größe, das chemische Potenzial, dabei unter die Räder kam.

4.7 Die magnetische Ladung

Ein weiterer Sonderfall ist die magnetische Ladung. Was den Unterricht in der Schule betrifft, könnte sie eine der schönsten Erhaltungsgrößen sein. Mit der elektrischen Ladung hat sie gemeinsam, dass sie positive und negative Werte annehmen kann. Ihr Vorteil gegenüber der elektrischen Ladung ist, dass die Effekte, mit denen man es zu tun hat, sehr viel deutlicher sind. Dass sich Ladungen kompensieren, dass die Ladung erhalten ist, die Erscheinung der Influenz, sind bei der magnetischen Ladung viel deutlicher zu erkennen als bei der elektrischen. Durch historische Zufälligkeiten hatte die Erhaltung der magnetischen Ladung ein schweres Schicksal. Die Größe selbst wurde nach und nach aus der Physik entfernt, und zwar wegen eines epistemologischen Missverständnisses: Weil keine magnetischen Monopolteilchen existieren, gibt es, so das Argument, auch die Größe magnetische Ladung nicht. Als Folge davon wurde es unmöglich, oder wenigstens sehr umständlich, die Tatsache zu beschreiben, dass Nord- und Südpol eines Magneten entgegengesetzt gleich sind. Gleich in was? In der magnetischen Ladung. Nicht einmal die Tatsache, dass es keine magnetisch geladenen Teilchen gibt, kann man mehr ausdrücken. Denn man braucht dazu die Größe, deren Wert für ein solches Teilchen null ist.

5 Erhaltung unter bestimmten Umständen

Wir haben gesehen, dass bestimmte physikalische Größen einen Erhaltungssatz befolgen: Energie, Impuls, Drehimpuls, elektrische und magnetische Ladung. Andere tun das nicht: Entropie und Stoffmenge. Die Masse wollen wir hier nicht einordnen; sie geht einfach in der Energie auf.

Die erhaltenen Größen sind uns besonders sympathisch, denn ihr Verhalten ist einfacher als das der nichterhaltenen. Wenn irgendwo ihr Wert abnimmt, so muss er anderswo zunehmen und umgekehrt.

Nun kann man diesen Vorteil aber auch bei den nichterhaltenen Größen haben, denn es gibt Situationen, oder genauer: Prozesse, bei denen eine im Prinzip nicht erhaltene Größe weder erzeugt noch vernichtet wird, wo sie sich also verhält wie eine Erhaltungsgröße. Wir wollen das für die beiden nichterhaltenen Größen, die wir diskutiert haben, untersuchen.

5.1 Die Entropie

Es gibt Prozesse, bei denen die Entropieerzeugung sehr gering ist. Mit gering ist dabei gemeint, dass die Erzeugungsrate klein

ist, verglichen mit den Entropieströmen, die fließen. (Beide, Erzeugungsrate und Entropiestrom, werden in derselben Einheit gemessen.) Es sind diejenigen Prozesse, die man in der technischen Thermodynamik zu realisieren sucht, und die man auch in guter Näherung realisiert.

So ist in einem Kraftwerk die Entropie, die durch die Turbinenanlage fließt am Eingang und am Ausgang praktisch gleich. Die Entropieerzeugung in einer großen Dampfturbine ist sehr gering, verglichen mit der durchströmenden Entropie. Die Entropie verhält sich hier also wie eine erhaltene Größe. Und weil es so ist, sind wir berechtigt, die Dampfturbinenanlage so darzustellen, wie es CARNOT bei seinem genialen Vergleich der Dampfmaschine mit einem Wasserrad getan hat. So wie ebenso viel Wasser in großer Höhe zum Wasserrad hin wie auf geringer Höhe wegfließt, so fließt in den Turbinenkreislauf genauso viel Entropie auf hoher Temperatur hinein wie auf niedriger heraus (Abb. 1).

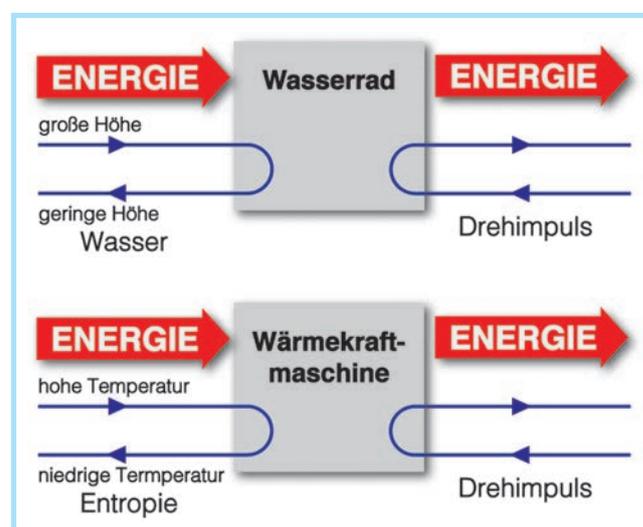


Abb. 1. Wasser strömt auf großer Höhe zum Wasserrad hin; derselbe Wasserstrom fließt auf geringer Höhe wieder weg. CARNOT hatte erkannt, dass das Entsprechende für eine Wärmekraftmaschine gilt: Das Caloricum (später Entropie genannt) geht auf hoher Temperatur in die Maschine hinein; der gleiche Caloricum-Strom kommt zum Ausgang der Maschine wieder heraus.

5.2 Die Stoffmenge

Stoffmengen ändern sich in Reaktionen: in chemischen Reaktionen, in Reaktionen mit Licht, in Kernreaktionen und in Reaktionen, die man in der Teilchenphysik behandelt. Nun gibt es traditionell etablierte Bereiche der Naturwissenschaft, in denen die Umstände so sind, dass sich die Mengen bestimmter Teilchen nicht ändern. Sie verhalten sich wie Erhaltungsgrößen. Besonders wichtig ist in dieser Hinsicht die Chemie. Da hier nur Anregungsenergien von einigen eV oder einigen zig eV eine Rolle spielen, verwandeln sich die chemischen Grundstoffe nicht in andere Grundstoffe. Das heißt: So lange die Methoden der Chemie angewendet werden, gilt für jedes chemische Element ein Erhaltungssatz. Es gelten also rund 100 Erhaltungssätze. Und auch wenn man es gewöhnlich nicht so ausdrückt, macht

man doch ständig von ihnen Gebrauch. Immer wenn es darum geht, eine Reaktionsgleichung einzurichten: Rechts und links muss dieselbe Menge eines jeden Grundstoffes stehen.

Abgesehen von diesen beiden Beispielen, also Entropie und Stoffmenge, gibt es auch Größen, von denen wir noch nicht wissen, ob sie erhalten sind oder nicht. Etwa die Baryonenzahl. Und was uns die Kosmologie eines Tages zur Energieerhaltung sagen wird, wissen wir auch noch nicht. Auf jeden Fall gibt es keinen Grund, Baryonenzahl und Energie hier und jetzt nicht wie Erhaltungsgrößen zu behandeln. Schließlich geht es in der Physik nicht darum, letzte Wahrheiten zu finden, sondern darum, ob ein Verfahren zweckmäßig ist oder nicht.

6 Die Rolle von Erhaltungssätzen im Unterricht

Erhaltungssätze sind wichtige physikalische Gesetze. Sie verdienen es, im Unterricht behandelt zu werden. Ihre Behandlung ist einfach, sobald der Mengencharakter einer Größe klar geworden ist. Der wichtigste Schritt ist also, den Mengencharakter deutlich werden zu lassen. Die Formulierung des Erhaltung- bzw. Nichterhaltungssatzes ist dann nur noch ein Detail. Die vorangehenden Betrachtungen haben gezeigt, dass manche Sätze über Erhaltung bzw. Nichterhaltung im Unterricht (an Schule und Hochschule) einen prominenten Platz einnehmen, während andere gar nicht erwähnt werden. Energie und Impulserhaltung werden »gefeiert«, zur Erhaltung von Masse und elektrischer Ladung wird kein Merksatz formuliert. Bedeutet das, dass man die Erhaltung von Masse und Ladung für unwichtig hält? Nein. Es bedeutet viel mehr, dass man deren Erhaltung für so selbstverständlich hält, dass es überflüssig ist, sie in einem Lehrsatz zum Ausdruck zu bringen.

Nun könnte uns diese Feststellung zu denken geben. Für jemanden, der noch nichts von der Physik weiß, und dem wir die Physik im Schnelldurchgang beibringen wollten, wäre die Erhaltung der Masse und der elektrischen Ladung nicht weniger bemerkenswert als die Erhaltung von Impuls und Drehimpuls oder die Erzeugbarkeit der Entropie. Offenbar liegt es an unserer zur Tradition gewordenen Art, die Physik zu lehren, dass man manches als selbstverständlich darstellt und anderes nicht. Wenn wir von der Masse von vornherein so sprechen, als sei sie Repräsentant der Materie, und von der Materie als sei sie etwas Unvergängliches, so scheint es überflüssig zu sein, einen Satz der Erhaltung der Masse auszusprechen. Wenn wir so von der elektrischen Ladung sprechen, wie wir es gewohnt sind – die Konduktorkugel entlädt sich, die Ladung fließt in die Erde ab usw. –, so lassen wir den Lernenden gar keine Chance zu bezweifeln, dass die Ladung erhalten ist. Das Experiment zeigt es jedenfalls nicht: Vorher war sie da, nachher ist sie weg. Wie soll sie erhalten sein? Einzig die Sprache des Lehrers bewirkt, dass man die Erhaltung für selbstverständlich hält. Er führt sie von vornherein als etwas Erhaltenes ein.

Anders etwa beim Impuls: Ihn lernt man kennen als eine Wertekombination aus m und v . Und dass das eine Erhaltungsgröße sein soll, ist nicht evident. Ja, dass es überhaupt eine eigenständige Eigenschaft eines Körpers beschreibt, außer Masse und Geschwindigkeit.

Hier unsere Empfehlungen:

1. Man wählt in allen Fällen die gleiche Art der Formulierung, damit die Gemeinsamkeiten der Größen deutlich werden.
2. Man wählt die Formulierungen wie in Kasten 2, oder ähnlich, d. h. man spricht die Erhaltung (bzw. Nichterhaltung) ohne Umschweife aus. Man beschreibt sie nicht über irgendwelche Konsequenzen.
3. Man spricht auch die bedingte Erhaltung unter gegebenen Umständen an. Man formuliert also einen Erhaltungssatz für die Stoffmenge in chemischen Reaktionen und für die Baryonenzahl und die Leptonenzahl in Kernreaktionen.

Und schließlich noch etwas, was man jemandem empfehlen würde, der bereit ist, sich etwas weiter von der Lehrtradition zu entfernen: Man verzichtet auf die schwer verständliche, traditionelle Formulierung der Newtonschen Gesetze. Stattdessen führt man den Impuls gleich am Anfang der Mechanik als eigenständige, nicht abgeleitete, erhaltene Größe ein.

Literatur

- FALK, G. (1977). Was an der Physik geht jeden an?. *Physikalische Blätter*, 33(12), 616–626.
- FALK, G. (1990). *Physik – Zahl und Realität*. Basel: Birkhäuser, 67.
- HERRMANN, F. (2006). Was ist eine mengenartige Größe. *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule*, 55(1), 44–46.
- HERRMANN, F. (2009). Worauf sich der Wert einer physikalischen Größe bezieht. *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule*, 58(4), 38–41.
- HERRMANN, F. (2015). Die Bilanzgleichungen für Energie, Impuls und Entropie. *MNU Journal*, 68(2), 68–73.
- LOHR, E. (1916). Entropieprinzip und abgeschlossenes Gleichungssystem. *Denkschr. Akad. Wiss. Wien, Nat.-Naturwiss. Klasse 93*, 339–421.
- MACKE, W. (1962). *Thermodynamik und Statistik*. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft, Geest & Portig, 120.
- MESCHEDE, D. (2002). *Gerthsen Physik*. Berlin: Springer, 248.
- OSTWALD, W. (1908). *Die Energie*. Leipzig: Verlag von Johann Ambrosius Barth, 77.
- PLANCK, M. (1897). *Thermodynamik*. Leipzig: Verlag von Veit & Comp., 80.
- Prof. Dr. FRIEDRICH HERRMANN, f.herrmann@kit.edu, ist jetzt im Ruhestand. Er hat am KIT Studentinnen und Studenten der Physik und des Lehramts Physik ausgebildet und war gleichzeitig Physik-lehrer am Europagymnasium in Wörth am Rhein. ■