

# Ströme von Stoffen und Ströme physikalischer Größen

F. Herrmann

## 1 Physikalische Größe und physikalisches System – Vertauschungen

Wir betrachten einen Satz, der die Situation in Abb. 1a beschreibt: „An der Feder hängt eine Masse.“ Der Satz ist genau genommen falsch. Die Masse ist eine physikalische Größe, d.h. im Sinn der Mathematik eine Variable und damit ein abstraktes mathematisches Konzept. Als solches kann sie weder hängen noch nicht hängen. Auch in Abbildung 1b hängt nicht eine Masse an der Feder, sondern ein ausgeschnittener Buchstabe. Ein Satz, der das Gemeinte richtig ausdrückt, würde lauten: „An der Feder hängt ein Körper.“

Viele andere gebräuchliche Formulierungen enthalten dieselbe Unstimmigkeit: „In den Stromkreis wird eine Kapazität eingebaut“, statt „In den Stromkreis wird ein Kondensator eingebaut“, „Das Filter lässt nur die kurzen Wellenlängen durch“, statt „Das Filter lässt nur Licht kurzer Wellenlängen durch“ oder „Das Gas befindet sich in einem zylinderförmigen Volumen“, statt „Das Gas befindet sich in einem zylinderförmigen Behälter“. Wie eine mathematische Variable nicht hängen kann, so kann

man sie auch nicht in einen Stromkreis einbauen, sie kann nicht durch ein Filter hindurchgehen und sie kann nicht zylinderförmig sein.

In jedem dieser Fälle wird der Name eines konkreten Gegenstandes oder Systems – Körper, Kondensator, Licht, Behälter – ersetzt durch den Namen einer physikalischen Größe – Masse, Kapazität, Wellenlänge, Volumen. Handelt es sich dabei um eine Verwechslung, einen Fehler, eine falsche Aussage? Wir wollen nicht voreilig schließen.

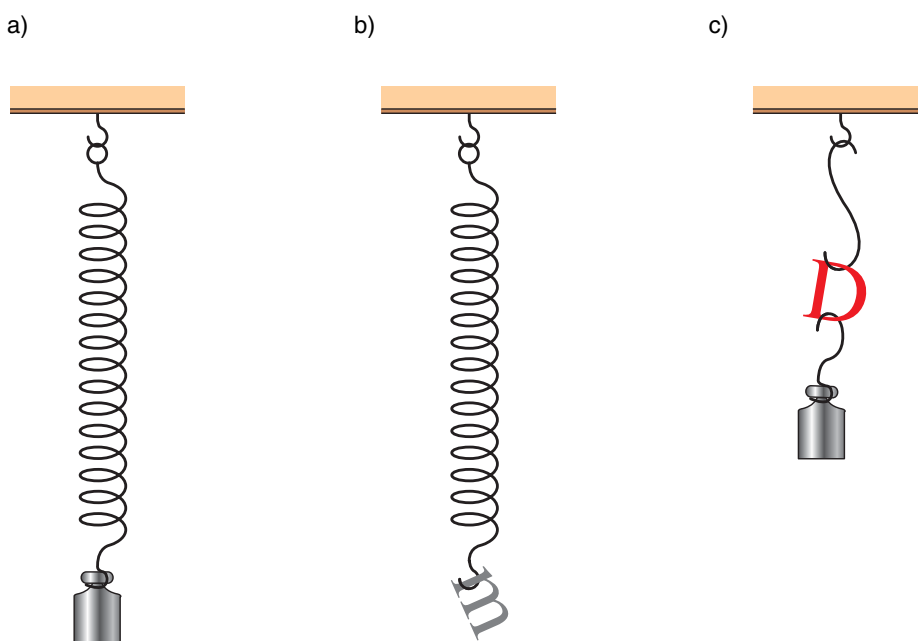
In der Umgangssprache ist es gang und gäbe, den Namen eines Begriffs durch den eines anderen zu ersetzen. In der Wortbedeutungslehre nennt man das eine Metonymie. Hier einige Beispiele für Metonymien: „Thomas Mann lesen“, statt „ein Buch von Thomas Mann lesen“, „ein Glas trinken“, statt „den Wein in dem Glas trinken“, „Brüssel entscheidet“, statt „die Europäische Kommission in Brüssel entscheidet“, „der Saal applaudiert“, statt „die Leute im Saal applaudieren“. Offenbar funktioniert die Sprache, auch wenn man solche Ersetzungen macht, und von der

Umgangssprache kann man sogar sagen, sie funktioniert so gut, gerade weil man diese Möglichkeit hat.

Wenn man in einem bestimmten Zusammenhang „Thomas Mann“ sagt, so meint man ein Buch von ihm. Genauso ist es bei den physikalischen Beispielen. In unseren Beispielen meint man mit der Masse den Körper und mit der Wellenlänge das Licht. Indem man den Namen einer physikalischen Größe statt den Namen des eigentlich gemeinten Gegenstandes benutzt, bringt man zum Ausdruck, dass es einem im betrachteten Zusammenhang nur auf eine bestimmte Eigenschaft des Gegenstandes ankommt.

Die hier angesprochenen Ersetzungen sind also nicht unzulässig und sie können auch vorteilhaft sein. Allerdings ist der Gewinn nicht groß, denn die Sätze „An der Feder hängt ein Körper“ und „An der Feder hängt eine Masse“ nehmen sich nicht viel. Dass solche Ersetzungen nicht unentbehrlich sind, sieht man auch an einer Situation, die der zuvor beschriebenen ähnlich ist, in der man die Ersetzung aber nicht macht. Sollte man nicht, so wie man eine Masse an einer Feder hängen lässt, auch einen Körper an der Federkonstante hängen lassen können, Abb. 1c? Warum sagt man denn das nicht? Weil der Name der Größe einer Identifizierung mit dem Gegenstand (der Feder) im Weg steht. Es gibt Namen von physikalischen Größen, die wir als Objektamen nicht akzeptieren, weil sie zu deutlich zum Ausdruck bringen, dass es sich um ein Maß, und nicht um einen Gegenstand handelt. Solche Namen sind stets Zusammensetzungen, in denen das Grundwort ein mathematischer Begriff ist. Sie enden auf „-konstante“, (wie Federkonstante), „-menge“ (wie Stoffmenge) oder „-stärke“ (wie Feldstärke). Wir können also feststellen: Das Vertauschen geschieht nicht nach vernünftigen Regeln.

Nun zum eigentlichen Thema. Wir betrachten den Satz: „In einem Stromkreis fließt elektrische Ladung.“ Die Aussage scheint von derselben Art zu sein, wie die zuvor diskutierten: Die elektrische Ladung ist eine physikalische Größe, und als solche kann sie prinzipiell nicht fließen. Wird



**Abb. 1:** (a) An der Feder hängt ein Körper. (b) Misslungener Versuch, eine Masse an die Feder zu hängen. (c) Misslungener Versuch, einen Körper an die Federkonstante zu hängen

die Ladung hier also wieder als Stellvertreter verwendet für etwas, das fließen kann und auch wirklich fließt, also im Sinne einer Metonymie? Man mag an die beweglichen Elektronen denken. Die können aber nicht gemeint sein, denn viele Sätze, die man mit der elektrischen Ladung formuliert, bleiben nicht richtig, wenn man das Wort Ladung durch das Wort Elektronen ersetzt; vor allem dann, wenn die Ladungsträger keine Elektronen sind, sondern andere geladene Teilchen, etwa Defektelektronen, Cooperpaare oder Ionen der verschiedensten Art.

Was für einen Sinn macht es dann, von strömender Ladung zu sprechen? Tatsächlich handelt es sich hier um mehr als eine Metonymie; wir haben es mit einem Modell zu tun.

## 2 Modelle in der Physik

Was versteht man unter einem Modell? B sei ein Modell von A. A besteht aus Elementen, zwischen denen gewisse Beziehungen existieren. Da B ein Modell von A ist, muss auch B aus Elementen bestehen, die durch Beziehungen miteinander verknüpft sind, und die Elemente und Beziehungen in A lassen sich auf die in B abbilden. Das heißt A und B haben eine gemeinsame Struktur. Man kann auch sagen: Es existiert eine Übersetzungstabelle, eine Art zweisprachiges Wörterbuch. Man kann nun in B irgendwelche Schlüsse ziehen und diese mithilfe des Wörterbuchs in Aussagen über A übersetzen. Sind solche Aussagen über A oft korrekt, so ist das Modell ein gutes Modell, sind sie oft falsch, so ist das Modell schlecht. Es gibt keine falschen und richtigen Modelle, nur besser passende und weniger gut passende.

Diese Definition des Modellbegriffs ist noch recht allgemein. Ihr zufolge gibt es zu jedem physikalischen Gegenstand eine ganze Reihe von Modellen. So ist in diesem Sinn etwa die mathematische Beschreibung eines Systems ein Modell, oder auch ein Computerprogramm, mit dem man A „simuliert“.

Wir wollen das Wort „Modell“ hier in einem engeren Sinn benutzen. Unter dem Modell B wollen wir ein anderes physikalisches System verstehen, das mit A eine Strukturverwandtschaft hat, und das die folgende Besonderheit hat: Es soll uns vertraut sein. Wir haben bei B nicht das Bedürfnis, dass man uns erklärt wie es funktioniert.

Wir wissen jetzt auch, was man meint, wenn man sagt, man habe A verstanden. Es bedeutet einfach, dass man eingesehen hat: A verhält sich wie B.

Hofstadter sagt es so: „Wiederholt haben wir gesehen, wie Analogien und Entsprechungen zweite Bedeutungen entstehen lassen, die auf dem Rücken der ersten Bedeutungen daherkommen. [...] Jegliche Bedeutung geht auf Analogien zurück.“ [1] und Nietzsche [2]: „[...] ‚verstehen‘ das heißt naiv bloß: Etwas Neues ausdrücken können in der Sprache von etwas Altem, Bekanntem.“

## 3 Das Stoffmodell

Zurück zu den elektrischen Strömen: Als Modell dient hier eine Flüssigkeit oder ein Fluidum. Die Größe  $Q$  interpretieren wir als Maß für die Menge des Fluidums, und im Sinne einer Metonymie sagen wir Ladung, wenn wir das gedachte Fluidum meinen.

Wir stellen uns dieses Modell-Fluidum am Besten als Kontinuum vor. Das Modell, das wir hier verwenden, ist das Stoffmodell.

Warum ist es nun vorteilhafter, mit dieser gedachten Flüssigkeit zu operieren, als mit den „wirklich“ strömenden Teilchen?

Erstens: Oft sind nicht die Elektronen die Ladungsträger, sondern andere Teilchen. Wenn man den elektrischen Strom als sich bewegende Elektronen definiert, muss man die Halbleiterphysik und die Elektrochemie ausklammern.

Zweitens: Die Elektronen haben den Nachteil, dass sie negativ geladen sind und nicht positiv. Das hat zur Folge, dass die physikalische Größe elektrische Ladung immer das Gegenteil von dem tut, was die Elektronen machen. Die Ladung nimmt ab, weil Elektronen zufließen.

Man mag zugunsten der Elektronen anführen, dass man mit ihnen, wenigstens im Fall der n-leitenden Stoffe, also der meisten Metalle, der Wirklichkeit näher kommt, denn wir wissen doch, dass in diesen Stoffen die Elektronen die Ladungsträger sind. Wir sprechen dann also nicht von einem Modell, sondern von der Wirklichkeit. Nun ist aber die Vorstellung die man von den Elektronen vermittelt, nämlich, dass sie kleine Körperchen seien, die zwischen den Atomen herumflitzen, und ab und zu gegen irgendein Hindernis stoßen, nicht sehr tragfähig. Wie man in der Festkörperphysikvorlesung lernt, beschreibt man die Elektronen besser als Wellen, sogenannte Blochwellen, die sich über große Entfernungen im Festkörper ausdehnen. Die zugehörigen Teilchen haben in Zuständen der oberen Hälfte des Leitungsbandes eine negative Masse, und obendrein ist diese „effektive Masse“ ein Tensor. Wenn man aber von diesen Merkwürdigkeiten absieht, benutzt man auch wieder ein Modell. Warum dann nicht gleich dasjenige, das die wenigsten Komplikationen verursacht?

Ein anderer Gesichtspunkt ist die Anschaulichkeit. Es besteht kein Zweifel darüber, dass das Teilchenmodell anschaulich ist. Dass aber auch das Stoffmodell anschaulich ist, erkennt man daran, dass es auch der physikalische Laie mit der größten Bereitwilligkeit anwendet – sogar in Fällen, wo man als Physiker gewiss etwas vorsichtiger wäre. Immer wenn man von „viel“ oder „wenig“ spricht, ist das Stoffmodell im Spiel. Viel Geld, viel Geduld, viel Zuversicht – alles deutet darauf hin, dass man die entsprechenden Begriffe im Sinn einer Menge oder eines Stoffes benutzt. „Gib mir Hoffnung“, „gib mir etwas von deiner Geduld“ sind gängige Formulierungen, die sogar die Übertragbarkeit, einen „Strom“ von Hoffnung oder Geduld metaphorisch zum Ausdruck bringen. Ein besonders schönes Beispiel, bei dem sogar die Zeit Stoffcharakter hat, stammt von Wilhelm Busch:

*Hartnäckig weiter fließt die Zeit, die Zukunft wird Vergangenheit. Von einem großen Reservoir ins andre rieselt Jahr um Jahr.*

Schließlich hat das Stoffmodell noch einen anderen Vorteil. Bisher haben wir nur über die elektrische Ladung gesprochen. Das Stoffmodell funktioniert aber auch in vielen anderen Fällen. Wir können es anwenden auf jede mengenartige oder extensive Größe; nicht nur auf die elektrische Ladung, sondern auch auf die Energie, die Masse, den Impuls und die Entropie, ja sogar den Drehimpuls.

Bei manchen dieser Größen mag man geneigt sein zu fragen: Was strömt denn dort eigentlich? Bei einem Impulsstrom zum Beispiel: Kann der Impuls wirklich strömen?

Bei anderen wird diese Frage eigenartigerweise nicht gestellt: Bei einem Energiestrom strömt einfach die Energie. Wirklich? Nein. Weder die Energie strömt, noch der Impuls, noch die elektrische Ladung oder die Masse. In jedem Fall gibt es die Strömung nur in unserem Kopf; oder besser: Wir stellen uns vor, dass eine gedachte Modellflüssigkeit strömt, mit ihr operieren wir und wir tun gut daran. ■

## Literatur

[1] Douglas Hofstadter, *Ich bin eine seltsame Schleife*, Klett-Cotta, Stuttgart 2008, S. 211

[2] Friedrich Nietzsche, *Werke IV, Aus dem Nachlass der Achtzigerjahre*, Verlag Ullstein GmbH, Frankfurt 1972, S. 805

## Anschrift des Verfassers

Prof. Dr. Friedrich Herrmann, Institut für Theoretische Festkörperphysik, KIT, 76128 Karlsruhe, E-Mail: f.herrmann@kit.edu