

## πάντα ῥεῖ – alles fließt

### Ströme von Stoffen und Ströme physikalischer Größen

*Friedrich Herrmann*  
*Institut für Theoretische Festkörperphysik*  
*Karlsruher Institut für Technologie*  
*f.herrmann@kit.edu*

#### 1. Einleitung

„An der Feder hängt eine Masse“, „Licht ist reine Energie“, „Elektrische Ladung fließt durch einen Draht“. Mit jedem dieser Sätze wird ein Gegenstand verwechselt mit einer Größe, die ihn beschreibt. Es wird untersucht, ob solche Formulierungen gerechtfertigt sind. Wir werden sehen, dass der erste Satz nicht unzulässig, der zweite unbedingt zu vermeiden und der dritte unentbehrlich ist.

#### 2. Physikalische Größe und physikalisches System – Vertauschungen

Wir betrachten einen Satz, den man gern im Zusammenhang mit der Situation von Abb. 1 ausspricht: „An der Feder hängt eine Masse.“ Dieser 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. 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.



Abb. 1. Hängt an der Feder eine Masse? Hängt an der Federkonstante ein Körper?

In jedem dieser Fälle wird der Name eines konkreten Begriffes – Körper, Kondensator, Licht, Behälter – ersetzt durch den Namen einer physikalischen Größe – Masse, Kapazität, Wellenlänge, Volumen. Gemeint ist aber in jedem der Sätze der konkrete Gegenstand. Man meint hier mit der Masse den Körper und mit der Wellenlänge das Licht. Indem man den Namen einer physikalischen Größe benutzt, bringt man zum Ausdruck, dass es einem im betrachteten Zusammenhang nur auf eine bestimmte Eigenschaft des Gegenstandes ankommt.

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*. 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.

Die hier angesprochenen Ersetzungen sind also nicht unzulässig und sie können auch vorteilhaft sein. Allerdings ist der Gewinn nicht groß, denn Sätze wie “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 deutlich an einer Situation, die den 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? 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 Objektnamen nicht akzeptieren, weil sie zum Ausdruck bringen, dass es sich nur um ein Maß handelt. Solche Namen sind stets Zusammensetzungen, in denen das Grundwort ein mathematischer Begriff ist. Sie enden auf “-konstante”, (Beispiel: Federkonstante), “-menge” (wie Stoffmenge) oder “-stärke” (wie Feldstärke).

Nun sind die Namen der physikalischen Größen zusammen mit der Fachsprache in einem verwickelten Evolutionsprozess entstanden. Manche dieser Namen sind wohl überlegt, andere vielleicht weniger. Manche Ausdrucksweise war ein glücklicher Griff, eine andere wiederum ganz und gar nicht. Die Fachsprache wurde nicht von einer allwissenden Autorität nach wohl überlegten Regeln konstruiert. Sie enthält Beiträge von verschiedenen Personen mit verschiedenen Neigungen und Absichten, in verschiedenen historischen Zusammenhängen. Entsprechend geschieht auch das Vertauschen von Objekt- und Größennamen nicht auf Grund einer sachlichen Notwendigkeit, sondern man macht es zufälligerweise an einer Stelle und man macht es nicht an einer anderen.

In den bisher angeführten Beispielen brachte eine Namensvertauschung keinen deutlichen Gewinn, aber sie richtete auch keinen Schaden an. Wir diskutieren im Folgenden Fälle, in denen eine Vertauschung Probleme verursacht.

### 3. Physikalische Größe und physikalisches System – Verwechslungen

#### 3.1 Elektromagnetische Strahlung gleich Energie

Oft wird gesagt, elektromagnetische Strahlung sei reine Energie, oder Photonen seien Energiequanten. Diese Aussagen sind nicht richtig, denn die elektromagnetische Strahlung oder das elektromagnetische Feld ist ein physikalisches System, also ein Gegenstand der realen Welt. Die Energie dagegen ist ein mathematischer Begriff zur Beschreibung des Systems, und sie ist nicht die einzige Größe, mit der man diesen Gegenstand beschreibt. Die Strahlung hat außer Energie noch Impuls und Entropie, sie hat einen Druck und sie hat manchmal eine Temperatur. Dasselbe gilt für die Elementarportionen: Die Photonen tragen zwar eine bestimmte Menge Energie, außerdem aber auch Impuls, Drehimpuls und anderes.

Wir haben es also wieder mit einer Verwechslung von physikalischer Größe und physikalischem System zu tun, allerdings von anderer Art als bei unseren früheren Beispielen. Denn hier wird ja nicht einfach der Name Energie für die Strahlung benutzt (das wird natürlich auch oft getan), sondern es wird ausdrücklich gesagt, Strahlung sei Energie. Strahlung und Energie wären also dasselbe. Das ist aber als würde man sagen: „Ein Körper ist Masse“ oder „ein Tisch ist Länge“. Diese Sätze sind nicht Ausdruck einer Metonymie – sie sind einfach falsch.

Die Identifizierung von Strahlung und Energie bezeugt zweierlei Fehlauflassungen:

1. Erstens besteht eine falsche Vorstellung von der Energie. Die Energie scheint mehr zu sein als eine physikalische Größe. Man macht sie tatsächlich zu einem Stoff. Diese Vorstellung ist weit verbreitet. Als Beispiel ein Zitat aus einer physikalischen Fachzeitschrift: „...auch Wärme- und Bewegungsenergie hat eine Masse“. Also eine physikalische Größe „hat“ eine andere, so als würde man sagen: „Der Druck hat eine Temperatur“. Noch deutlicher äußert sich dieses Missverständnis darin, wie man über die so genannten Energieformen spricht: Wärme hat andere Eigenschaften als Arbeit, kinetische Energie hat andere Eigenschaften als potentielle. Der Energie wird jeweils eine Eigenschaft zugeschrieben, für deren Charakterisierung eine andere Größe zuständig ist. Bei der Energieform Wärme werden der Energie die Eigenschaften zugeschrieben, die durch die Entropie charakterisiert werden, bei der Arbeit die Eigenschaften, die zum Impuls oder zur Kraft gehören. Schon der Name Energieform suggeriert, die Energie könne unterschiedliche Eigenschaften haben.

2. Zweitens besteht eine unglückliche Vorstellung vom Licht und von den Photonen. Ein Photon wäre danach nicht mehr als eine Energieportion und hätte damit nur eine einzige Eigenschaft. Wenn ein Photon erzeugt oder vernichtet wird, so denkt man offenbar nur daran, dass der Energiesatz erfüllt sein muss. Dass Drehimpuls- und Impulssatz auch gelten, wird leicht vergessen, und die Vorstellung, dass Licht Entropie und dass es eine Temperatur hat, wird erschwert.

### 3.2 Elektrische Feldstärke gleich elektrisches Feld

Wir kommen zu einem weiteren Fall der Verwechslung von System und Variable, hier mit einer zusätzlichen Schwierigkeit.

Das Wort Feld wird in der Physik in zwei verschiedenen Bedeutungen verwendet.

1. Man versteht darunter die Verteilung einer lokalen Größe im Raum. So spricht man von einem Temperaturfeld, um die Funktion  $T(x,y,z)$  oder einem Dichtefeld, um die Funktion  $\rho(x,y,z)$  zu bezeichnen.  $\mathbf{E}(x,y,z)$  müsste man konsequenterweise Feldstärkefeld nennen.

2. Feld ist der Name einer bestimmten Klasse physikalischer Systeme. So gibt es das System *elektromagnetisches Feld* und das System *Gravitationsfeld*.

Es wäre gut, das Wort nur in einer der beiden Bedeutungen zu benutzen. Es bietet sich an, auf die erste Benutzungsweise zu verzichten, denn für sie findet man leicht eine Alternative. Ein treffender Name für die Funktion  $T(x,y,z)$  ist „Temperaturverteilung“, oder für  $\mathbf{E}(x,y,z)$  „Feldstärkeverteilung“.

Nun aber zu der Verwechslung, die unser Thema ist: Auch hier wird oft das physikalische System mit der Größe verwechselt. Man sieht es etwa wenn jemand sagt: „Zwischen den Kondensatorplatten befindet sich ein Feld  $\mathbf{E}$ “. Was ist gemeint: Die physikalische Größe  $\mathbf{E}$  oder das physikalische System Feld? Wenn man das auf den Körper an der Feder überträgt, müsste man sagen: „An der Feder hängt ein Körper  $m$ “. Was also: das System Körper oder die Variable  $m$ ?

Warum werden die beiden Begriffe beim Feld nicht auseinander gehalten? Ein Grund scheint zu sein, dass keine konkrete Vorstellung von einem physikalischen Gegenstand oder Gebilde „Feld“ vorhanden ist: Es gibt nur eine physikalische Größe. Das Feld wird nur als mathematische Konstruktion aufgefasst. Es wird als real existierendes Gebilde nicht ernst genommen. Man sieht es auch daran, wie das Feld in Schulbüchern definiert wird: „Den Raum um einen Magneten ... bezeichnet man als magnetisches Feld.“ Den Raum stellt man sich als leer vor. Wenn es eine Feldstärke gibt, die verschiedene Werte annehmen kann, so bedeutet das, dass der leere Raum ein Eigenschaft hat. Es gäbe eine Eigenschaft ohne einen Gegenstand, der die Eigenschaft hat. Kein Wunder, dass der Feldbegriff als schwierig empfunden wird.

Auch Hochschulbücher verfangen sich manchmal im Begriffsgewirr. Man sieht es daran, wie mit den Feldgrößen  $\vec{H}$  und  $\vec{B}$  umgegangen wird. So wird oft beteuert, das eigentliche oder richtige Magnetfeld sei nicht  $\vec{H}$ , sondern  $\vec{B}$ . Was ist mit einer solchen Aussage gemeint? Das Feld existiert, egal ob es einen Physiker gibt, der es beschreibt, oder nicht, d.h. egal ob es physikalische Größen gibt oder nicht. Zur Beschreibung dieses Systems benutzen die Menschen von ihnen erfundene oder konstruierte physikalische Größen, und zwar mehr als nur eine, etwa:

- die magnetische Feldstärke  $\vec{H}$  ;
- die magnetische Flussdichte  $\vec{B}$  ;
- das magnetische Skalarpotenzial;
- das magnetische Vektorpotenzial;
- die Magnetisierung;
- die Energiedichte;
- den mechanischen Spannungstensor.

Keine dieser Größen ist das richtige oder wahre Feld. Das Feld existiert unabhängig von diesen Größen und es kann durch jede von ihnen beschrieben werden. Welche man wählt ist nur eine Frage der Zweckmäßigkeit.

#### 4. Ströme physikalischer Größen

Schließlich ein Fall, der oberflächlich betrachtet von derselben Art ist, wie die zuvor diskutierten: „Die elektrische Ladung fließt in einem Stromkreis“ (und ähnliche Formulierungen). Man könnte gleich einwenden: Die elektrische Ladung ist eine physikalische Größe, und als solche kann sie prinzipiell nicht fließen. Wird 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 Ladung formuliert, bleiben nicht richtig, wenn man das Wort Ladung durch das Wort Elektronen ersetzt.

Wir wollen nichts anderes, als eine Sprechweise finden, um den Inhalt einer Gleichung plausibel zu vermitteln – der Kontinuitätsgleichung:

$$\frac{d\rho}{dt} + \operatorname{div} \vec{j} = 0 .$$

Zu diesem Zweck benutzen wir ein Modell. Wir sagen: Stell dir eine Flüssigkeit vor, die nicht erzeugt oder vernichtet werden kann. Deren Menge wird durch  $Q$  charakterisiert. So bilden wir uns eine Anschauung von den durch die Kontinuitätsgleichung beschriebenen Vorgängen. Das gedachte Fluidum bezeichnen wir dabei gleich mit „elektrische Ladung“, also dem Namen der Größe, die das Fluidum beschreibt. Das ist hier noch mehr gerechtfertigt als bei der hängenden Masse, denn während der hängende Körper außer seiner Masse noch andere messbare Eigenschaften hat, möchten wir uns bei den Eigenschaften des Modellfluidums sicher nicht auf weitere Eigenschaften festlegen (obwohl offenbar viele Menschen mit manchen physikalischen Größen eine Farbe assoziieren). Man kann also sagen, dass wir es wieder mit einer Metonymie zu tun haben.

Nun gibt es hier noch die Besonderheit, dass zur Beschreibung elektrischer und auch anderer Ströme zwei verschiedene Modelle gebräuchlich sind. Manche bevorzugen das eine, andere das andere, aber man kann auch verschiedene Mischformen ausmachen. Wir wollen die beiden Extremversionen beschreiben, und die Probleme diskutieren, die mit ihrem Gebrauch zusammenhängen. Das eine Modell ist das bekannte Teilchenmodell. Das andere trägt keinen allgemein eingeführten Namen. Wir wollen es das Stoffmodell nennen.

##### 4.1 Das Stoffmodell

Wann darf man das Stoffmodell anwenden? Wir wollen nicht vergessen, dass man von einem Modell prinzipiell nicht sagen kann, ob es richtig oder falsch ist, sondern nur, ob es zweckmäßig ist oder nicht. Das Stoffmodell ist anwendbar auf alle extensiven Größen. Die Rechtfertigung beruht darauf, dass für jede extensive oder „mengenartige“ Größe eine Kontinuitätsgleichung gilt, d.h. eine Gleichung der Form:

$$\frac{d\rho_X}{dt} + \operatorname{div} \vec{j}_X = 0 .$$

$X$  ist die mengenartige Größe,  $\rho_X$  ihre räumliche Dichte,  $\vec{j}_X$  die Stromdichte, also Menge pro Zeit und Fläche.

Für die die Energie etwa lautet die Gleichung

$$\frac{d\rho_E}{dt} + \operatorname{div} \vec{j}_E = 0,$$

und für die elektrische Ladung

$$\frac{d\rho_Q}{dt} + \operatorname{div} \vec{j}_Q = 0.$$

Die Interpretation der Kontinuitätsgleichung für die elektrische Ladung ist so: Wenn die Dichte der Ladung irgendwo abnimmt, d.h. wenn  $d\rho_Q/dt < 0$  ist, so ist  $\operatorname{div} \vec{j}_Q > 0$ . Die Mathematik sagt uns, dass der Vektor  $\vec{j}_Q$  von der Stelle mit  $d\rho_Q/dt < 0$  wegweist. Wir haben also einen Strom der Ladung oder des gedachten Stoffes nach außen.  $d\rho_Q/dt$  nimmt ab, weil von dem Stoff etwas wegfließt. Wir sehen daran, dass die Stromrichtung die Richtung des Vektors  $\vec{j}_Q$  ist. Das ist ein wichtiger Punkt, wir werden uns darauf später beziehen.

#### 4.2 Das Teilchenmodell

Nach dem Teilchenmodell kommt der Strom einer physikalischen Größe dadurch zustande, dass sich gedachte Körperchen, für die die Größe einen von null verschiedenen Wert hat, bewegen. Im Falle des elektrischen Stroms stellt man sich die Elektronen, Ionen, Positronen usw. als Körperchen oder Teilchen vor. Der Strom einer Größe wird also auf die Bewegung von Teilchen zurückgeführt. Als Stromrichtung erscheint hier die Bewegungsrichtung der Teilchen.

Wieder wollen wir die Frage stellen, welches die Bedingungen dafür sind, dass man das Modell anwenden kann. Diejenigen Vertreter des Teilchenmodells, die etwas sorglos sind, werden sagen: Es geht immer dann, wenn es Teilchen gibt. Mit dieser Bedingung ist es nun aber oft schwer zu entscheiden, ob man das Modell anwenden darf oder nicht. Gebilde, die einer naiven Vorstellung von einem Teilchen entsprechen, d.h. einem kleinen individuell verfolgbaren Körperchen, gibt es nur in wenigen Fällen. Oft befinden sich die so genannten Teilchen in Zuständen, in denen sie nur schwach lokalisiert sind. Individuen sind dann nicht mehr auszumachen. Und oft befinden sie sich in Zuständen, in denen sie von den Fachleuten als virtuelle Teilchen bezeichnet werden. Dies ist der Grund dafür, dass das Teilchenmodell zu Unstimmigkeiten führen kann, wie wir gleich sehen werden.

Wir wollen die beiden Modelle gegenüberstellen. Vorher sei aber noch einmal betont, dass manche der Vorwürfe, die sich die Vertreter der Modelle gegenseitig machen, unbegründet sind.

Die Stoffmodellvertreter werfen den Teilchenmodellvertretern vor, es sei naiv, sich Elektronen als kleine Kügelchen vorzustellen, denn sie seien in Wirklichkeit keine Kügelchen, und die Teilchenmodellvertreter werfen den Stoffmodellvertretern vor, es sei falsch, sich die Energie als ein Fluidum vorzustellen, denn die Energie sei kein Fluidum. Beide Vertreter sollte man daran erinnern, dass sie Modelle verwenden, und Modelle sind weder falsch noch richtig.

Nun zu den Vor- und Nachteilen der beiden Modelle. Wir vergleichen sie in verschiedener Hinsicht.

#### 4.3 Vergleich der Modelle

##### 4.3.1 Anschaulichkeit

Das Teilchenmodell ist anschaulich – darüber besteht kein Zweifel. Aber auch das Stoffmodell ist anschaulich, und der Normalbürger akzeptiert es mit der größten Bereitwilligkeit und wendet es ständig an, und zwar auch in Fällen, wo dem Physiker die Haare zu Berge stehen sollten.

So wendet jeder, auch der Physiker im Privatleben, das Stoffmodell selbstverständlich auf das Geld oder den Geldwert an. Man kann aber auch Formulierungen hören wie die: „Wenn du mir

doch etwas von deiner Geduld abgeben könntest“. Anscheinend kann man Geduld wie einen Stoff übertragen. Bei Wilhelm Busch wird sogar die Zeit zum Stoff:

*Hartnäckig weiter fließt die Zeit  
Die Zukunft wird Vergangenheit  
Von einem großen Reservoir  
ins andre rieselt Jahr für Jahr*

Betrachten wir als nächstes, was die beiden Modelle darüber sagen, was man unter der Stromrichtung versteht.

#### 4.3.2 Die Stromrichtung

Zunächst zu einem Fehler, den einige Vertreter des Teilchenmodells machen: Sie sagen, man könne über die Richtung des elektrischen Stroms per Konvention verfügen. Eine Freiheit bei der Festlegung der Stromrichtung gibt es aber nicht.

In dem einen, dem Stoffmodell ist die elektrische Stromrichtung die Richtung des Vektors  $\vec{j}_Q$ . Im Teilchenmodell ist es die Bewegungsrichtung der Ladungsträger. Die ist je nach Ladungsträgersorte verschieden. Man kann sie übrigens auch als die Richtung eines Stromdichtevektors sehen: Die Richtung des Vektors  $\vec{j}_n$  in der Kontinuitätsgleichung für die Stoffmenge oder Teilchenzahl. Es besteht also keine Wahl zwischen zwei elektrischen Stromrichtungen.

Wenn man die Teilchenbewegungsrichtung als Stromrichtung nimmt, handelt man sich allerdings einiges Ungemach ein. Wenn man tatsächlich immer nur von den Ladungsträgern spräche, würde die Elektrizitätslehre unnötig kompliziert. Denn immer wenn in einem Stromkreis die Ladungsträger wechseln – und das passiert häufig – würde der Strom nicht weiterfließen, sondern er würde durch einen anderen abgelöst, der auch eine andere Richtung haben kann. Dieses Verfahren ist kaum durchzuhalten. Tatsächlich macht es auch niemand konsequent. Wie macht man es denn aber? Man tut so, als gebe es nur eine Teilchensorte, die Elektronen. So zieht man sich allerdings etwas billig aus der Affäre. Außerdem hat man sich noch ein paar hässliche Konsequenzen für die Elektrodynamik eingehandelt: So wird die Rechte-Hand-Regel, die ja einen Teil der ersten Maxwellgleichung ausdrückt, zur Linke-Hand-Regel. Den Schülern tut man damit gewiss keinen Gefallen, denn später muss alles korrigiert werden. Die Schüler haben dagegen kein Problem beim Umgang mit dem Stoffmodell. So wie sie keine Probleme damit haben den Geldwert von der Banknote zu unterscheiden, so haben sie auch keine Problem die Ladung von den Ladungsträgern zu unterscheiden.

#### 4.3.3 Wenn es keine Teilchen gibt

Die Verwendung des Teilchenmodells setzt voraus, dass es Teilchen oder wenigstens Quasiteilchen gibt. Überzeugend ist das Modell allerdings nur, wenn man es mit Teilchen zu tun hat, die ihren Namen auch im Sinn der Umgangssprache verdienen, d.h. wenn ihre quantenmechanische Wellenfunktion einigermaßen gut lokalisiert ist. Nun gibt es aber Transporte, bei denen solche Teilchen nicht vorhanden sind.

#### Die Energie

Es gibt keine Probleme etwa bei der Beschreibung des Energiestroms von der Sonne zur Erde. Energieträgerteilchen sind die Photonen, die man sich in diesem Zusammenhang getrost als kleine, räumlich voneinander getrennte Gebilde vorstellen darf.

Anders ist es beim elektrischen Stromkreis – eine Batterie und ein Lämpchen zum Beispiel. Die Teilchen wären hier virtuelle Photonen, d.h. Gebilde, die der alltagssprachlichen Vorstellung von Teilchen kaum noch entsprechen. Als Vertreter des Teilchenmodells wird man vielleicht von einem

Energiestrom von der Batterie zur Lampe sprechen, aber man ziert sich anzugeben, wo denn die Energie langfließt. Man erkennt den Argwohn diesen Teilchen gegenüber daran, dass man es meist vorzieht, von *Energieübertragung* zu sprechen. Besonders deutlich ist das beim Transformator: „Die Energie wird von der Primär- auf die Sekundärspule übertragen.“ Und nicht: „Die Energie fließt von der Primär- zur Sekundärspule.“

Ähnlich ist es bei der mechanischen Energieübertragung durch eine Stange, ein Seil oder eine hydraulische Flüssigkeit. Die Teilchen, die zu diesem Transport gehören, sind virtuelle Phononen. Auch hier ist das Teilchenmodell kaum hilfreich, und man zieht sich lieber auf die alte Fernwirkungssprache zurück. Statt zu sagen, es fließe ein Energiestrom sagt man, es werde Arbeit verrichtet.

Der Umgang mit der Energie wird also schwierig. Die Schüler oder Studenten müssen lernen, mit einem komplizierten Modellmix umzugehen. Viel einfacher wäre es, wenn man das Stoffmodell anwendete. Nach unserer Erfahrung haben Schüler damit keine Probleme.

### Die elektrische Ladung

Wir haben sie schon diskutiert. Als Vertreter des Teilchenmodells müsste man hier dieselben Skrupel haben, wenn es um die Beschreibung der Supraleitung geht. Die Cooperpaar-Wellenfunktion ist so stark delokalisiert, dass es kaum zu hilfreich ist, wenn man von sich bewegenden Teilchen spricht.

### Der Impuls

Auch beim Impuls entsteht ein Problem, wenn man seinen Transport mit dem Teilchenmodell beschreiben will. Wir betrachten die beiden Situationen der Abb. 2. In beiden Fällen wird Impuls von links nach rechts transportiert. Man sieht es daran, dass der Impuls des Wagens zunimmt. In beiden Fällen gilt für den Impuls eine Kontinuitätsgleichung und die Interpretation als Impulsstrom ist in beiden Fällen gerechtfertigt. Den oberen Impulstransport nennt man in der Hydrodynamik einen konduktiven, den unteren einen konvektiven Impulstransport. Außerhalb dieser Fachliteratur wird aber nur im unteren Beispiel von einem Impulsstrom gesprochen. Wieder ist der Grund, dass man das Teilchen-, und nicht das Stoffmodell anwendet. Im unteren Beispiel gibt es sich bewegende Teilchen, die Wassermoleküle, im oberen nicht, oder wenigstens sind sie nicht so offensichtlich. Die Unterscheidung führt dazu, dass zwei Vorgänge nicht einheitlich beschrieben werden, obwohl

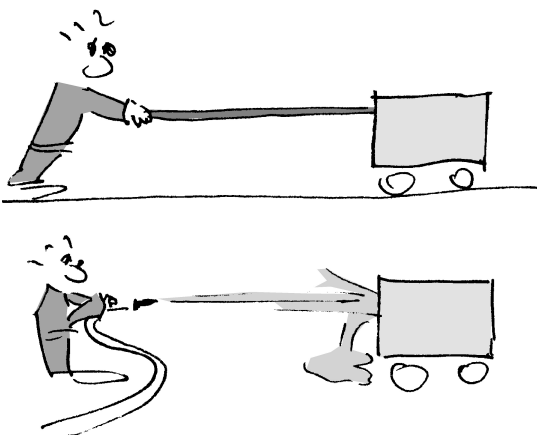


Abb. 2. Für die beiden Impulstransporte sind unterschiedliche Sprechweisen üblich. Oben: „Auf den Wagen wirkt eine Kraft“. Unten: „Das Wasser transportiert Impuls“.

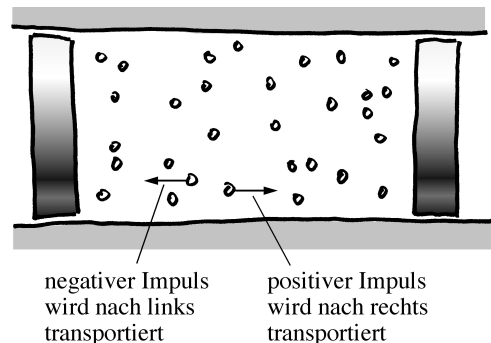


Abb. 3. Ein Teilchenstrom von links nach rechts und einer von rechts nach links, aber nur ein Impulsstrom von links nach rechts.

sie es könnten. Wieder haben wir einen Modellmix. In der oberen Situation verwendet man bekanntlich ein völlig anderes Bild: Man sagt, es wirke eine Kraft. Man verwendet also ein Konzept aus der Zeit der Fernwirkungen.

Es ist interessant, dass auch beim Impuls Stromrichtungsprobleme auftreten, wenn man den Impulsstrom mit dem Teilchenstrom verwechselt. Wir betrachten dazu ein Gas zwischen zwei Kolben in einem Zylinder, Abb. 3. Es überträgt Impuls vom linken zum rechten Kolben. (Der Impuls des rechten nimmt auf Kosten des Impulses des linken zu.) Betrachten wir nun die einzelnen Impulsträgerteilchen, d.h. die Gasmoleküle, so sehen wir, dass die Hälfte von ihnen positiven Impuls von links nach rechts transportieren, und die andere Hälfte negativen Impuls von rechts nach links. Beide tragen aber zum Impulstransport von links nach rechts bei. Sollen wir nun sagen, es fließen zwei Impulsströme? Einer von links nach rechts und einer von rechts nach links? Natürlich nicht. Es fließen zwei Teilchenströme unterschiedlicher Richtung. Der Impulsstrom hat aber für beide Beiträge dieselbe Richtung.

### *Die magnetische Ladung*

Das Analogon der elektrischen Ladung beim Magneten ist die magnetische Polstärke oder magnetische Ladung, eine altehrwürdige Größe. Sie ist aber in den letzten Jahrzehnten aus der Mode gekommen. Die Abneigung hat ihre Ursache vermutlich in einem Fehlschluss. Die Teilchenmodellvertreter waren am Werk und sie argumentierten so: Es gibt keine magnetisch geladenen Teilchen, keine magnetischen Monopole, wie man sagt. Also gibt es auch die Größe magnetische Ladung nicht.

Die Stoffmodellvertreter sind hier anderer Meinung: Sie sagen: In der Theorie tritt eine extensive Größe „magnetische Ladung“ auf. Wir wenden selbstverständlich das Stoffmodell auf sie an.

Die Folgen davon, eine Größe magnetische Ladung nicht zu benutzen, sind gravierend. So ist es unmöglich, einen ganz einfachen Satz mit den Mitteln der Schulphysik zu formulieren: dass die gesamte magnetische Ladung jedes Körpers null ist.

### *5. Schluss*

Aus diesen etwas langen Erörterungen lassen sich drei kurze Schlussfolgerungen ziehen.

- Sprechweisen wie „Die Masse hängt an der Feder“, sind zwar nicht schädlich, aber man gewinnt auch kaum etwas.
- Verwechslungen von physikalischer Größe und System wie in „Elektromagnetische Strahlung ist reine Energie“ sollte man unbedingt vermeiden.
- Wenn man über den elektrischen Strom spricht, so empfehlen wir, das Stoffmodell zu verwenden. Man spricht dann über die elektrische Ladung wie über ein gedachtes Fluidum.