

*Atti del Quarto Forum di didattica delle scienze sperimentali, Locarno 2005*  
*Actes du Quatrième Forum des didactiques des sciences expérimentales, Locarno 2005*  
*Akten des Vierten Forum Fachdidaktiken Naturwissenschaften, Locarno 2005*

## **DING UND MASS**

**FRIEDRICH HERRMANN**

Abteilung für Didaktik der Physik, Universität, 76128 Karlsruhe

Hauptreferat

Der Vortrag wird enden mit zwei Empfehlungen, die ich in zwei Sätzen formulieren werde. Ich könnte die beiden Sätze gleich aussprechen, aber um Sie von den Aussagen dieser Sätze zu überzeugen, brauche ich etwas mehr Zeit – wenn es mir überhaupt gelingen sollte.

Um Sie in das Problem einzuführen, das ich diskutieren will, betrachten wir eine Aussage, die zu diesem Gerät gehört (rote Kugel hängt an einer Stahlfeder). Die Aussage lautet:



“An der Feder hängt eine Masse.”

Dieser Satz ist, genau genommen, falsch. Damit meine ich nicht, dass da in Wirklichkeit nichts hängt. Ich meine vielmehr, dass der Satz nicht zutreffen kann, weil er logisch falsch ist. Warum? Weil die Masse eine physikalische Größe ist, das heißt, im Sinne der Mathematik eine Variable, ein abstraktes mathematisches Konzept. Und ein solches kann weder hängen noch nicht hängen. Ein Satz, der das gemeinte richtig ausdrückt, lautet:



“An der Feder hängt ein Körper.”

Ähnliche Sätze, die uns genauso leicht von den Lippen gehen, sind etwa: “Ich baue in den Stromkreis eine Kapazität ein.” Korrekt wäre: “Ich baue in den Stromkreis einen Kondensator ein.”

“Das Filter lässt nur die kurzen Wellenlängen durch.” Richtig wäre: “Das Filter lässt nur Licht kurzer Wellenlängen durch.”

“Das Gas befindet sich in einem zylinderförmigen Volumen.” Richtig heißt es: “Das Gas befindet sich in einem zylinderförmigen Behälter.”

Genauso, wie eine mathematische Variable nicht hängen kann, so kann man sie auch nicht einbauen, sie kann nicht durch ein Filter hindurchgehen und sie kann nicht zylinderförmig sein.

Der Fehler, der hier gemacht wurde, ist der: Man hat ein Gebilde aus der realen Welt verwechselt mit einem mathematischen Objekt, den Körper mit der Masse, den Kondensator mit der Kapazität usw. Man macht also eine Verwechslung, und das ist schlecht, könnte man denken. Dies können wir als eine These betrachten. Ich will nun aber hierzu gleich die “Antithese” diskutieren.

Ich hatte gesagt, man verwechselt etwas. Ist es nicht aber zu hart ausgedrückt, wenn man sagt “man verwechselt”? Das bedeutet ja, man hat einen Fehler gemacht. Man kann nämlich durchaus auch vertreten, dass diese Verwechslungen keine Fehler seien, sondern absichtliche *Vertauschungen* oder *Ersetzungen*. In der Umgangssprache ist es gang und gäbe, einen Begriff durch einen anderen zu ersetzen, und zwar auch durch einen Begriff einer ganz anderen Abstraktionsebene. In der Wortbedeutungslehre spricht man hier von einer *Metonymie*.

Brot → Nahrung  
Zunge → Sprache

Was tut man eigentlich, wenn man eine solche Ersetzung macht?

Betrachten wir noch einmal unsere Beispielsätze: Es ist ja nicht so, dass wir bei dem Satz “An der Feder hängt eine Masse” ein Objekt fälschlicherweise mit einer seiner Eigenschaften verwechseln. Wir haben vielmehr den Namen der Eigenschaft als Namen für das Objekt benutzt. In unserem Kopf wird

die Masse zu etwas, das tatsächlich hängen kann. Eine Masse von 2 kg ist keine Variable mehr, es *ist ein Körper*, der zweimal so schwer ist wie ein Körper der Masse 1 kg. Die Kapazität wird etwas, was man in die Hand nehmen kann und was man in einen Stromkreis einbauen kann. *Wir nehmen den Namen des Maßes als Namen für das Ding*. Offenbar funktioniert also die Sprache sehr gut, auch wenn man solche Ersetzungen macht, ja, man kann sogar sagen, sie funktioniert so gut, weil man mit solchen Ersetzungen operiert. Es ist auch offensichtlich, dass die Vertauschung bei den zitierten Beispielen keinen Schaden anrichtet: jeder versteht, was gemeint ist. Es scheint sogar vorteilhaft zu sein, statt vom Körper gleich von der Masse zu sprechen, denn auf die kommt es schließlich an. Trotzdem: Man muss auch zugeben, dass der Vorteil nicht besonders groß ist. Die Sätze: “An der Feder hängt ein Körper” und “An der Feder hängt eine Masse” nehmen sich nicht viel.

Dass solche Ersetzungen nicht notwendig sind, sieht man besonders schön einem Beispiel, bei dem man die Ersetzung nicht macht, obwohl es von derselben Art ist, wie die Masse an der Feder. So wie man die Masse an der Feder hängen lässt, sollte man doch eigentlich genauso gut sagen können: “Der Körper hängt an der Federkonstante.” Warum sagt man das denn nicht? Nun, diese Ersetzung geht nicht aus einem sehr banalen Grunde: Weil der Name der Größe der Identifizierung im Weg steht. Die Bezeichnung „Konstante“ sagt ganz klar, dass es sich um einen mathematischen Begriff handelt. Das Wort ist als Objektname ungeeignet.



Nun verdanken die Größen ihre Namen den verschiedensten Zufällen. Die Namen sind entstanden zusammen mit der Fachsprache in einem verwickelten Evolutionsprozess. Manche Namen wurden gut überlegt, andere vielleicht weniger. Manche Ausdrucksweise war ein glücklicher Griff, eine andere wiederum ganz und gar nicht. Die Fachsprache wurde ja nicht von irgend jemanden nach bestimmten Regeln konstruiert. Entsprechend geschieht auch das Vertauschen nicht nach vernünftigen Regeln.

Ich werde im Folgenden zeigen, dass dieses Vertauschen der Namen von Ding und Maß in vielen Fällen sogar erhebliche Nachteile mit sich bringt. Ich werde an mehreren Beispielen zeigen, dass das Vertauschen zu begrifflicher Unklarheit und manchmal sogar zu falschen Vorstellungen führt.

## 1. ELEKTROMAGNETISCHE STRAHLUNG = ENERGIE

In vielen Texten – ich habe eine lange Sammlung entsprechender Zitate – liest man, elektromagnetische Strahlung sei reine Energie, oder auch Photonen seien Energiequanten. Auch hier liegt also klar eine Verwechslung vor: Die Energie – eine physikalische Größe – wird mit dem elektromagnetischen Feld – einem Gebilde der realen Welt – verwechselt. Oder das Energiequantum – wieder eine physikalische Größe – mit einem Photon – einem Gebilde der realen Welt. Es ist überflüssig zu betonen, dass das elektromagnetische Feld oder elektromagnetische Strahlung noch andere Größen hat, oder durch andere Größen charakterisiert wird, als die Energie: Die Strahlung hat außer Energie noch Impuls und Entropie, sie hat einen Druck und manchmal eine Temperatur. Dasselbe gilt für die Elementarportionen: Die Photonen haben eine bestimmte Menge Energie, außerdem aber Impuls, Drehimpuls und anderes.

Die Fehlvorstellungen, die durch solche Formulierungen verursacht werden, sind gleich von zweierlei Art:

1. Erstens entsteht eine falsche Vorstellung von der Energie. Es entsteht nämlich die Vorstellung, die Energie sei mehr als nur eine physikalische Größe. Diese Fehlvorstellung ist weit verbreitet. Hier ein Zitat, das sie belegt: “Auch Wärme- und Bewegungsenergie besitzen eine Masse”. Der Satz behauptet also, eine physikalische Größe „habe“ eine andere. Es ist als sage man in der Mathematik,  $x$  habe  $y$ .
2. Zweitens entsteht eine falsche Vorstellung vom Licht und von den Photonen. Nach meiner Erfahrung ist für viele Studenten ein Photon tatsächlich nicht mehr als eine Energieportion. Das würde aber

heißen, dass für Photonen nur die Energie einen von null verschiedenen Wert hat. So denkt man oft nur daran, dass der Energiesatz erfüllt sein muss, und man vergisst, dass auch Drehimpuls- und Impulssatz gelten müssen. Auch wird die Vorstellung erschwert, dass Licht Entropie und eine Temperatur hat.

Wir wollen die beiden die Aussagen “An der Feder hängt eine Masse” und “Photonen sind Energiequanten” vergleichen: Es werden ähnliche Vertauschungen gemacht. Im ersten Fall ist aber der Schaden gering, während im zweiten die Vertauschung von Ding und Maß zu gravierenden Missverständnissen führt.

## 2. ELEKTRISCHE FELDSTÄRKE = ELEKTRISCHES FELD

Dieses Beispiel ist noch mit einer besonderen Schwierigkeit gewürzt. Das Wort Feld wird nämlich in der Physik in zwei deutlich verschiedenen Bedeutungen verwendet.

1. Zum einen versteht man unter einem Feld 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 Größe  $\rho(x,y,z)$  zu bezeichnen.
2. Zum Anderen benutzt man das Wort Feld als Name bestimmter physikalischer Systeme oder Gebilde. So gibt es das *elektromagnetische Feld* und das *Gravitationsfeld*.

Es ist wichtig, diese beiden Bedeutungen auseinanderzuhalten. Am besten benutzt man das Wort Feld nur in einer der beiden Bedeutungen. Es bietet sich an, in unserem ersten Fall auf die Benutzung des Wortes zu verzichten, da man für sie leicht eine Alternative findet. Eine treffender Name für die Funktion  $T(x,y,z)$  ist etwa die Temperaturverteilung, oder für  $\rho(x,y,z)$  die Dichteverteilung.

Nun aber zu der Verwechslung, die zu unserem Thema gehört: Man verwechselt auch hier wieder physikalisches System und Größe. Sie sehen es sofort, etwa wenn jemand sagt: “Zwischen den Kondensatorplatten befindet sich ein Feld  $E$ ”. Was ist gemeint: Die physikalische Größe  $E$  oder das physikalische Gebilde Feld? Wenn man das auf den Körper, der an der Feder hängt, überträgt, so müsste man sagen: “An der Feder hängt ein Körper  $m$ ”. Beim Feld werden diese beiden Begriffe offenbar gar nicht auseinandergehalten: Man bezeichnet sowohl die Größe mit  $E$  und auch das Gebilde. Der Grund hierfür ist wahrscheinlich, dass die Vorstellung von einem physikalischen Gegenstand oder Gebilde “Feld” gar nicht vorhanden ist. Es scheint überhaupt nur eine physikalische Größe zu geben. Hier wird also nicht der Name der Größe einem System angeheftet, sondern es wird angenommen, das System bestehe nur aus einer Größe. Diese Vorstellung ist natürlich von der Logik her schon unsinnig, denn, noch einmal, eine Größe ist ein mathematisches Konzept.

Dass das Feld für nicht mehr als eine physikalische Größe genommen wird, sieht man auch daran, wie mit den magnetischen Feldgrößen  $H$  und  $B$  umgegangen wird. In manchen Büchern wird beteuert, das eigentliche Magnetfeld sei  $B$ , in anderen wiederum, es sei  $H$ . Die angemessenere Auffassung ist so: Es gibt ein physikalisches System, das wir magnetisches Feld nennen. 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 selbstverständlich mehr als nur eine: die magnetische Feldstärke  $H$ , die magnetische Flussdichte  $B$ , das magnetische Skalarpotential, das magnetische Vektorpotential, die Magnetisierung, die Energiedichte, den mechanischen Spannungstensor.

Zusammenfassend kann man sagen, dass hier also die Verwechslung dazu führt, dass ein System, von dem man sich eine einfache Anschauung bilden könnte, als etwas sehr Abstraktes erscheint.

### 3. STRÖME PHYSIKALISCHER GRÖSSEN

Man könnte denken, in unsere Liste von Beispielsätzen am Anfang, gehöre auch der folgende Satz:  
"In einem Stromkreis fließt elektrische Ladung."

Die elektrische Ladung ist eine Größe, und eine Größe kann nicht fließen oder strömen.

Diese Sprechweise ist aber hier die einzige, die uns überhaupt zur Verfügung steht. Man wüsste gar nicht, wie man sich ausdrücken sollte, wollte man sie vermeiden. Tatsächlich unterscheidet sich dieser Satz auch von denen, die ich am Anfang zitiert habe.

Wenn wir von einem Strom einer physikalischen Größe sprechen, so liegt nicht eine Verwechslung vor zwischen einer Größe und einem real existierenden System. Was hier gemacht wird ist: Man wendet ein Modell an. Man erfindet oder erdichtet also ein Modellsystem. Und die Sprache, die wir benutzen, bezieht sich auf dieses erfundene System.

Nun gibt es hier noch die Besonderheit, dass zwei verschiedene Modelle üblich sind. Manche Leute bevorzugen das eine, andere das andere. Ich werde jetzt die Probleme diskutieren, die mit ihrem Gebrauch zusammenhängen. Ich nenne die Modelle das „Stoffmodell“ und das „Teilchenmodell“. Wir beginnen mit dem Stoffmodell.

#### 3.1 Das Stoffmodell

Es ist anwendbar auf alle extensiven Größen. Weil man das Stoffmodell auf diese Größen anwenden kann, werden sie auch oft mengenartige Größen genannt. Zu den mengenartigen Größen gehören: Die elektrische Ladung, die Energie, der Impuls, die Entropie und andere. Wie funktioniert das Modell?

Ein Kennzeichen dafür, dass eine Größe  $X$  mengenartig ist, ist ihr Auftreten in einer Gleichung des Typs:

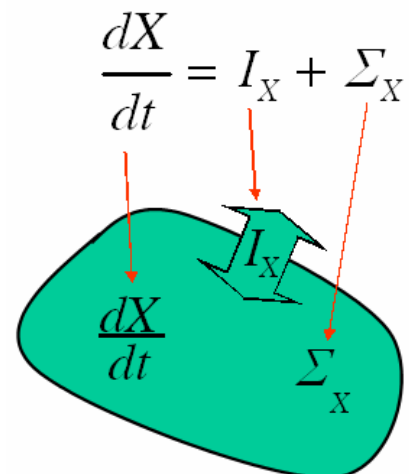
$$dX/dt = I_X + \Sigma_X$$

Hier steht  $X$  für irgendeine der mengenartigen Größen. Die Gleichung macht eine Aussage über ein bestimmtes Raumgebiet.  $dX/dt$  stellt die zeitliche Änderung des Werts von  $X$  im Innern des Raumgebiets dar. Auch  $\Sigma_X$  bezieht sich auf das Innere des Gebiets.

Der Wert von  $I_X$  dagegen bezieht sich auf die *Oberfläche*.

Mit Hilfe des Stoffmodells kann man dieser Gleichung und den in ihr auftretenden Größen eine anschauliche Deutung geben. Man stellt sich die Größe  $X$  vor als Maß für die Menge eines Stoffs oder Fluidums. Mit "vorstellen" ist gemeint, dass man physikalisch korrekt mit ihr umgeht, wenn man so über sie spricht wie man über einen Stoff spricht. Man darf, wenn man dieses Modell anwendet, dasselbe Vokabular verwenden, das in der Umgangssprache benutzt wird, um Substanzen zu bilanzieren.  $dX/dt$  ist demnach ein Maß für die zeitliche Änderung der Menge des eingebildeten Stoffes.  $\Sigma_X$  gibt an, wieviel der Menge  $X$  im Raumbereich pro Zeiteinheit erzeugt oder vernichtet wird, und  $I_X$  deutet man als die Stärke eines Stroms, der durch die Oberfläche des Bereichs fließt. Die Änderung des Wertes von  $X$  hat gemäß dieser Interpretation zwei Ursachen: Zum einen die Erzeugung bzw. Vernichtung von  $X$  im Innern des Gebiets und zum anderen einen Strom durch die Oberfläche. Die Gleichung beschreibt also die Bilanz der Größe  $X$ .

Der Term  $\Sigma_X$  ist für manche mengenartigen Größen immer gleich null. Solche Größen können ihren Wert innerhalb eines Raumgebiets nur dadurch ändern, dass ein Strom durch die Oberfläche des Gebiets fließt. Man nennt sie Erhaltungsgrößen. Beispiele hierfür sind die elektrische Ladung und die Energie.



Noch etwas zur Natur dieses Modellstoffs: Der eingebildete Stoff ist ein kontinuierliches Fluidum. Ganz so wie dem Normalmenschen etwa das Wasser oder die Luft erscheint. Von kleinen Teilchen, die sich bewegen, ist nicht die Rede.

Nun unser zweites Modell.

### 3.2 Das Teilchenmodell

Danach 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 sind die Körperchen oder Teilchen die Elektronen, Ionen, Positronen usw. Der Strom einer Größe wird also auf die Bewegung von Teilchen zurückgeführt. Als Stromrichtung erscheint hier auf natürliche Art die Bewegungsrichtung dieser 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 sehr schwer, zu entscheiden, ob man das Modell anwenden darf oder nicht. Teilchen, die der naiven Vorstellung von einem Teilchen entsprechen, d.h. einem kleinen individuell verfolgbaren Körperchen, gibt es nur in wenigen Fällen. Oft befinden sich die sogenannten Teilchen in Zuständen, in denen sie nur schwach lokalisiert sind. Individuen sind gar 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 oft zu Unstimmigkeiten führt.

Wir wollen die beiden Modelle gegenüberstellen, sie miteinander vergleichen. Vorher sei aber noch einmal betont, dass viele 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, sondern nur mehr oder weniger zweckmäßig.

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

#### a) Anschaulichkeit

Das Teilchenmodell ist sehr anschaulich, darüber besteht wohl kein Zweifel. Ich möchte hier aber hervorheben, dass auch das Stoffmodell sehr anschaulich ist, und dass es auch der Normalbürger mit der größten Bereitwilligkeit akzeptiert, und ständig anwendet – und zwar auch in Fällen, wo dem Physiker die Haare zu Berge stehen würden:

Selbstverständlich wendet jeder von uns das Stoffmodell auf das Geld oder den Geldwert an. Man kann aber auch Formulierungen hören wie die: Wenn du mir doch etwas von deiner Geduld geben könntest. Geduld kann man also übertragen wie einen Stoff. Das schönste Beispiel, das ich gefunden habe, ist von Wilhelm Busch

*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.

#### b) Die Stromrichtung

Zunächst zu einem Fehler, den Benutzer des Teilchenmodells manchmal machen: Sie sagen, man könne über die Richtung des elektrischen Stroms per Konvention verfügen. Hier ein Zitat aus einem

Schulbuch: "Die Richtung des elektrischen Stroms beruht auf einer Konvention. Bevor man etwas von Elektronen wusste, hatte man festgelegt, dass der elektrische Strom vom Pluspol einer Stromquelle durch den Stromkreis zum Minuspol fließt."

Eine Freiheit bei der Festlegung der Stromrichtung gibt es aber nicht. Was es natürlich gibt, ist eine Freiheit bei der Wahl der Modelle. In dem einen, dem Stoffmodell ist die elektrische Stromrichtung die Richtung des Vektors  $\mathbf{j}_Q$ , und die liegt eindeutig fest, sie kann nicht durch eine Verabredung geändert werden. Im Teilchenmodell ist es die Bewegungsrichtung der Ladungsträger. Wenn man nun die Teilchenbewegungsrichtung als Stromrichtung nimmt, handelt man sich viel Ungemach ein. Wenn man tatsächlich immer nur von den Ladungsträgern spräche, würde die Elektrizitätslehre sehr kompliziert. Denn immer wenn in einem Stromkreis die Ladungsträger wechseln – und das passiert ja häufig – würde der Strom nicht weiterfließen, sondern er würde durch einen anderen Strom abgelöst, der auch eine andere Richtung haben kann. Dieses Verfahren ist natürlich gar nicht durchzuhalten. Tatsächlich macht es auch niemand in dieser Konsequenz. 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 aber 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.

### c) Wenn es keine Teilchen gibt

Die Verwendung des Teilchenmodells in seiner naiven Form setzt voraus, dass es Teilchen, Quasiteilchen oder mindestens virtuelle Teilchen gibt. Akzeptabel ist das Modell allerdings nur, wenn Teilchen vorliegen, die ihrem Namen auch im Sinn der Umgangssprache entsprechen. D.h. wenn ihre quantenmechanische Wellenfunktion stark lokalisiert ist. Nun gibt es aber viele Transporte, bei denen solche Teilchen nicht vorhanden sind.

### Die Energie

Es gibt keinerlei Probleme etwa bei der Beschreibung des Energiestroms von der Sonne zur Erde. Die Energieträgerteilchen sind die Photonen, die man sich 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 wohl gelegentlich von einem *Energiestrom* von der Batterie zur Lampe sprechen, aber man ziert sich doch etwas, genau anzugeben, wo denn die Energie langfließt. Man erkennt den Argwohn diesen Teilchen gegenüber daran, dass man hier lieber von *Energieübertragung*, als von einem *Energiestrom* spricht. Besonders deutlich scheint es mir beim Transformator zu sein.

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 scheint das Teilchenmodell unakzeptabel und man benutzt es auch gar nicht. Man zieht sich lieber auf die alte Fernwirkungssprache zurück. Statt zu sagen, es fließe ein Energiestrom sagt man, es werde Arbeit verrichtet.

Die Beschreibung von Energieströmen im Teilchenmodell ist also oft unpassend. Viel einfacher ist es, wenn man das Stoffmodell konsequent anwendet. Damit kann man immer genau angeben, welchen Weg die Energie nimmt, indem man die Stromlinien angibt. Nach unserer Erfahrung haben Schüler damit auch gar keine Probleme.

### Die elektrische Ladung

Beim Strom elektrischer Ladung scheint das Teilchenmodell schlecht und recht zu funktionieren. Aber

auch hier kann es schwierig werden, nämlich wenn es um die Beschreibung der Supraleitung geht. Die Cooperpaar-Wellenfunktion ist so stark delokalisiert, dass es kaum zu rechtfertigen ist, hier von einer individuellen Bewegung von Teilchen zu sprechen.

### Der Impuls

Auch beim Impuls entsteht ein Problem, wenn man sich auf das Teilchenmodell versteift. Wir betrachten die beiden Situationen der Abbildung 1. In beiden Fällen wird Impuls von links nach rechts transportiert. Man sieht es daran, dass der Impuls des Wagens zunimmt. In beiden Fällen ist die Interpretation als Impulsstrom möglich, und sie ist auch einfach. Den oberen Impulsstrom nennt man in der Hydrodynamik einen konduktiven, den unteren einen konvektiven Impulsstrom. Außerhalb dieser Fachliteratur wird aber nur im unteren Beispiel von einem Impulsstrom gesprochen. Wieder ist der Grund, dass man versucht, 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. Diese willkürliche Unterscheidung führt dazu, dass zwei Vorgänge nicht einheitlich beschrieben werden, obwohl sie es könnten. 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. Wir haben also einen Modellmix.

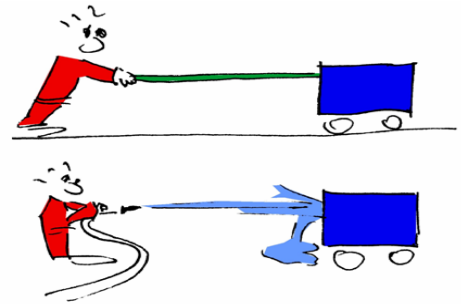


Abb. 1 In beiden Fällen gelangt Impuls vom Männchen zum Wagen. Das Teilchenmodell ist nur im unteren Fall plausibel. Nach dem Stoffmodell haben wir in beiden Fällen einen Impulsstrom aus der Erde über das Männchen in den Wagen.

Es ist interessant, dass auch beim Impuls Stromrichtungsprobleme auftreten, wenn man den Impulsstrom mit dem Teilchenstrom verwechselt. Wir betrachten dazu ein Gas, Abb. 2. 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 Impulsträgerpartikel, d.h. die Gasmoleküle, so sehen wir, dass manche positiven Impuls von links nach rechts transportieren, andere negativen Impuls von rechts nach links. Beide tragen damit zum Impulsstrom 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.

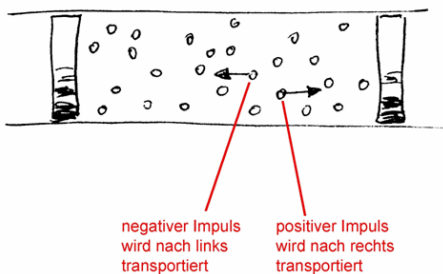


Abb. 2 Sowohl die Teilchen, die sich nach links, also auch die, die sich nach rechts bewegen, tragen zu einem Impulsstrom von links nach rechts bei. Im Teilchenmodell liegen zwei unterschiedliche Stromrichtungen vor.

### Die magnetische Ladung

Schließlich noch ein Beispiel, das auf den ersten Blick etwas exotisch erscheint, es unserer Meinung nach aber gar nicht ist. Es gibt eine Größe, die 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 meiner Meinung nach in einem Fehlschluss. Die Teilchenmodellvertreter waren am Werk und sie argumentieren 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. Das war mein letztes Beispiel. Ich komme zum Schluss und zu den beiden Sätzen, die ich versprochen habe.

- 1. Halte die Begriffe physikalische Größe und physikalisches System sorgfältig auseinander.**
- 2. Benutze zur Beschreibung von Strömungen das Stoffmodell und nicht das Teilchenmodell.**