

152 Impulsströme in ruhenden Impulsleitern

ZUSAMMENFASSUNG

Es gibt keinen Grund, die Impulsübertragung durch ruhende Medien nicht als Impulsstrom zu beschreiben. Die Rechtfertigung für die Anwendung des Strommodells bei Impulstransporten ist dieselbe wie die beim Transport elektrischer Ladung. „Wirklich“ strömt weder der Impuls, noch die elektrische Ladung oder die Masse, denn physikalische Größen können prinzipiell nicht strömen. Wenn man vom Strom einer physikalischen Größe spricht, benutzt man stets ein Modell.

Gegenstand

Dass Impuls mit Hilfe bewegter Körper oder strömender Flüssigkeiten oder Gase transportiert werden kann, ist allgemein bekannt. Dass Impuls aber auch durch ruhende Medien fließt, wenn diese unter mechanischer Spannung stehen, ist weniger bekannt oder wird regelrecht bestritten [1].

Mängel

Abb. 1 zeigt einen etwas ungewöhnlichen Schwinger. Zwei Körper A und B, die sich horizontal bewegen können, sind über zwei Federn und einen Stab zwischen den Federn aneinander gekoppelt [2]. Man kann sich vorstellen (wie es in der Mechanik oft gemacht wird), dass der Stab starr ist und Federn und Stab masselos sind*.

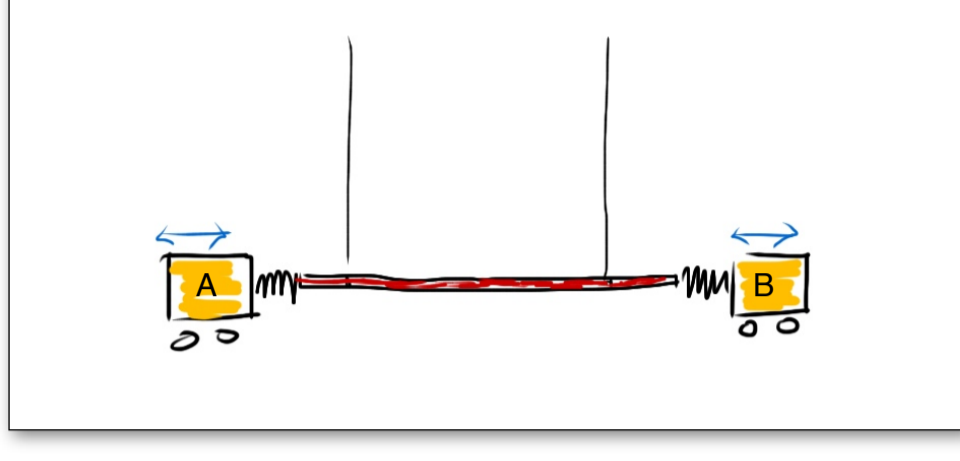


Abb. 1
A und B schwingen gegeneinander. Der Stab bleibt dabei in Ruhe.

Die Körper werden symmetrisch nach außen gezogen und dann losgelassen, sodass sie gegeneinander schwingen. Der Impuls von A und der von B ändern sich nun periodisch, und zwar so, dass die Impulsabnahme des einen Körpers mit der Impulszunahme des anderen einher geht. Das kann man auch so ausdrücken: Der Impuls fließt durch den Stab zwischen den beiden Körpern hin und her.

Wenn man nicht akzeptiert, dass durch den Stab ein Impulsstrom fließt, so verzichtet man auf die Möglichkeit dieser einfachen Beschreibung. Stattdessen wird man sagen: A übt auf die linke Feder eine Kraft aus, und diese übt eine Kraft auf A aus. Außerdem übt die linke Feder auch eine Kraft auf den Stab aus und dieser wiederum eine auf die Feder. Darüber hinaus übt der Stab noch eine Kraft auf die rechte Feder aus, und diese übt eine Kraft auf den Stab aus. Schließlich übt die rechte Feder auch noch eine Kraft auf Körper B aus, welcher selbst wiederum eine Kraft auf die rechte Feder ausübt. Dabei ist noch nicht gesagt, in welcher Beziehung die Kräfte zueinander stehen.

Herkunft

Wir vermuten, dass der Grund dafür, dass man Impulsströme in nichtbewegten Stäben, Seilen, Federn usw. nicht akzeptiert, in der Tatsache zu suchen ist, dass man einen etwas naiven Strombegriff zu Grunde legt. Danach würde man nur dann von einem Strom sprechen, wenn sich ein Stoff oder eine Menge von Teilchen kollektiv bewegt. Dann wäre die Schlussfolgerung natürlich zwingend, dass kein Strom fließt, wenn kein sich bewegendes Teilchen vorhanden sind. Ein solcher Strombegriff entspricht aber weder dem der Physik, noch dem der Umgangssprache.

So spricht man im Alltag auch dann von Strömen, wenn nicht die Bewegung von etwas Materiellem gemeint ist, sondern etwas, was man im physikalischen Kontext eine extensive physikalische Größe nennen würde: Man spricht etwa von Geldströmen, oder von Datenströmen.

In der Physik ist die Sache noch einfacher: Man spricht vom Strom einer Größe X , wenn sich für sie eine Gleichung der folgenden Gestalt formulieren lässt:

$$\frac{\partial \rho_x}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{j}_x = \sigma_x$$

Diese Gleichung kann man als Bilanzgleichung interpretieren. Daher kommen auch die Namen, die sich für die verschiedenen Größen der Gleichung etabliert haben: ρ_x nennt man die Dichte von X , \vec{j}_x die Stromdichte und σ_x die Dichte der Produktionsrate (welche für Erhaltungsgrößen gleich null ist).

Die Gleichung verlangt nun nicht, dass an einem Ort, an dem \vec{j}_x ungleich null ist, auch ρ_x ungleich null sein muss; siehe hierzu auch den Aufsatz von Gustav Mie: *Entwurf einer allgemeinen Theorie der Energieübertragung* [3].

Tatsächlich kann diese Möglichkeit, nämlich $\vec{j}_x \neq 0$ bei $\rho_x = 0$, immer dann auftreten, wenn die strömende Größe zweierlei Vorzeichen fähig ist. Man darf sich dann vorstellen, dass es zwei Beiträge zum Strom gibt, wobei sich die räumlichen Dichten der beiden Anteile zu null addieren, während die Stromdichten nicht null ergeben.

Ein Beispiel hierfür ist ein elektrischer Strom in einem normalen elektrischen Leiter. Die elektrische Ladung ist kompensiert, die Stromdichte nicht.

Diese Möglichkeit existiert nicht bei extensiven Größen, die nur positive Werte annehmen können, wie Energie, Masse, Entropie und Stoffmenge.

Die Kontinuitätsgleichung, die die einzige Rechtfertigung des Physikers dafür ist, von einem Strom zu sprechen, verlangt auch nicht, dass ein Strom auf der Bewegung von irgendwelchen Teilchen beruht.

Wer glaubt, dass er einen Transport besser versteht, wenn dieser an bewegte Teilchen gekoppelt ist, mag zunächst den Impulstransport durch ruhende Gase betrachten, Abb. 2. Die beiden Kolben werden durch das Gas, das sie einschließen, nach außen beschleunigt; also Kolben A nach links und Kolben B nach rechts. Hier gelangt offenbar Impuls von A nach B, (wenn wir die positive Impulsrichtung nach rechts wählen). Der mikroskopische Mechanismus ist hier so einfach, dass wohl kaum Bedenken bestehen, den Vorgang als Impulsfluss zu deuten.

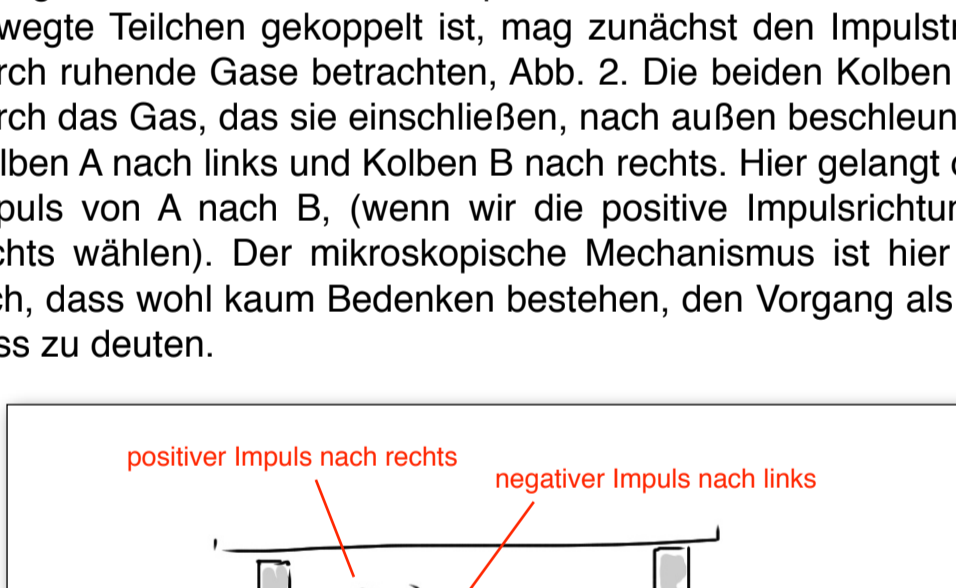


Abb. 2
Impuls geht von Kolben A zu Kolben B. Die eine Hälfte der Moleküle transportieren positiven Impuls nach rechts, die andere negativen nach links.

Diejenigen Moleküle, deren Geschwindigkeit eine positive x -Komponente haben, tragen positiven Impuls und transportieren diesen nach rechts. Die Moleküle mit negativer x -Geschwindigkeit haben negativen Impuls und transportieren diesen nach links, was auch einem Impulsstrom (einem Strom positiven Impulses) nach rechts entspricht. Man sieht also: Die Beiträge zur *Impulsdichte* heben sich auf, die Beiträge zu *Stromdichte* „verstärken“ sich.

Ein Problem, welches Bartelmann et al. zu haben scheinen, ist auch, dass der Impulsstrom seine Flussrichtung ändert, wenn man die positive Impulsrichtung anders herum festlegt. Unser Beispiel zeigt aber, dass dahinter nichts Geheimnisvolles steckt. Wenn man das nicht will, dann bleibt nur, auf die mathematische Beschreibung des Vorgangs ganz zu verzichten.

Ähnliche Überlegungen kann man anstellen, wenn der Impuls durch einen Festkörper oder auch durch das elektromagnetische Feld fließt. Die Sache ist dann etwas verwickelter**. Eine neue Einsicht im Zusammenhang mit dem Problem von Bartelmann et al. bringt sie aber nicht. Die Dinge sind so einfach, wie sie sich beim Impulsfluss durch ein Gas darstellen, und das heißt: Verständlich schon für Schüler der Mittelstufe.

Entsorgung

Physikalische Größen sind Variablen im Sinn der Mathematik, und können prinzipiell weder strömen noch nicht strömen (so wie eine Masse nicht an einer Feder hängen kann). Wenn wir trotzdem vom Strom elektrischer Ladung, von Masse oder von Impuls sprechen, so bedeutet das, dass wir ein Modell benutzen. Wenn man sich dieser Tatsache bewusst ist, so tritt die Frage, ob es in der Natur einen Impulsstrom gibt, gar nicht erst auf. Man führt ihn ein oder man lässt es bleiben; man benutzt das Modell oder man benutzt es nicht. Eine Entscheidung gegen das Modell würde aber die Frage aufwerfen, warum man das Strommodell bei Energie, Masse und elektrischer Ladung verwendet und nicht beim Impuls.

Kurz: Bei einem aufgeklärten Umgang mit dem Strombegriff ist ein Impulsstrom genauso gerechtfertigt wie ein elektrischer oder eine Massestrom.

*Diese Vorstellung ist für unsere Zwecke akzeptabel. Tatsächlich würde sie zur Folge haben, dass der Impuls nicht mit Schallgeschwindigkeit, sondern unendlich schnell durch den Stab läuft.

**Wir empfehlen als Übung im Umgang mit Impulsströmen die entsprechenden Überlegungen anzustellen für eine thermisch angeregte lineare Kette, die einmal unter Zug- und einmal unter Druckspannung steht.

[1] Gutachten über den Karlsruher Physikkurs; In Auftrag gegeben von der Deutschen Physikalischen Gesellschaft von M. Bartelmann, F. Bühler, S. Großmann, W. Herzog, J. Hüfner, R. Lehn, R. Löhken, K. Meier, D. Meschede, P. Reineker, M. Tolán, J. Wambach und W. Weber;
http://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/stellungnahmen_gutachter/stellungnahme_KPK.pdf

[2] Ich danke Werner Maurer für die Idee zu diesem Versuch, siehe auch
<http://www.youtube.com/watch?v=aBLPEOM7xbM>

[3] *Gustav Mie: Entwurf einer allgemeinen Theorie der Energieübertragung*, Sitzungsberichte der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Klasse der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, CVII. Band, Abtheilung II.a, 1898, S. 1113-1181