

150 Die Richtung von Impulsströmen

ZUSAMMENFASSUNG

Die Stromrichtung des Impulses hängt davon ab, wie man die positive Richtung der kartesischen Impulskomponenten definiert hat. Auf entsprechende Art hängt auch die elektrische Stromrichtung von der Definition des Vorzeichens der elektrischen Ladung ab. Die Änderung von Verlauf und Richtung eines Stroms durch Wechsel des Koordinatensystems oder Bezugssystems ist in der Physik allgegenwärtig.

Gegenstand

Kräfte können als Impulsströme interpretiert werden. Die Einsicht stammt von Max Planck [1], und man findet sie erwähnt oder ausführlich dargestellt in zahlreichen Lehrbüchern der theoretischen Physik, vornehmlich im Zusammenhang mit der Mechanik der Continua. Da der Impuls eine vektorielle Größe ist und daher seine kartesischen Komponenten zweierlei Vorzeichen annehmen können, besteht eine Willkür in der Wahl der Vorzeichen der Impulskomponenten. Von dieser Wahl hängt auch die Stromrichtung der drei Impulskomponenten ab.

Mängel

Da Impulsströme nur in Lehrbüchern für Fortgeschrittene behandelt werden, bekommen die meisten Studenten der Physik nichts davon mit. Entsprechend unsicher sind auch erfahrene Physiker im Umgang mit ihnen. Es scheint besonders zu stören, dass die Stromrichtung von der Festlegung des Vorzeichens der strömenden Größe abhängt [2].

Unter der Stromrichtung versteht man in der Physik immer die Richtung des Stromdichtevektors, egal um welche „strömende Größe“ es sich handelt.

Da das Stromrichtungsproblem beim Impuls dasselbe ist wie bei der elektrischen Ladung, erinnern wir zunächst daran, wie man die Richtung des elektrischen Stroms festlegt.

Für die elektrische Ladung gilt eine Kontinuitätsgleichung:

$$\frac{\partial \rho_Q}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{j}_Q = 0 \quad (1)$$

Hier ist ρ_Q die elektrische Ladungsdichte und \vec{j}_Q die elektrische Stromdichte.

Wenn die Ladungsdichte an einer Stelle abnimmt, d.h. wenn $\partial \rho_Q / \partial t < 0$ ist, so ist dort die Divergenz von \vec{j}_Q positiv, d.h. es fließt ein Strom von der Stelle weg. Diese Festlegung der Stromrichtung folgt aus der Kontinuitätsgleichung der elektrischen Ladung und stellt keine Konvention dar, wie es manchmal behauptet wird. Trotzdem gibt es im Prinzip die Möglichkeit, zur entgegengesetzten Stromrichtung zu kommen, nämlich, indem man das Vorzeichen der elektrischen Ladung anders herum definiert. Entsprechend der allgemein akzeptierten Festlegung tragen Elektronen negative und Protonen positive Ladung. Würde man festlegen, dass die Ladung der Elektronen positiv und die der Protonen negativ ist, so würde sich nach Gleichung (1) auch die Stromrichtung umkehren. Die elektrische Stromrichtung beruht also auf einer Konvention, allerdings nicht auf die Art, wie es manchmal behauptet wird: Man kann nicht die Konvention über das Vorzeichen der elektrischen Ladung beibehalten, und nur die Richtung des Stroms umdefinieren.

Nun zum Impuls. Für jede kartesische Komponente des Impulses einzeln gilt ein Erhaltungssatz und damit eine Kontinuitätsgleichung der Gestalt von Gleichung (1). Wie im Fall der elektrischen Ladung gilt auch hier, und zwar für jede der drei Impulskomponenten einzeln: Man hat die Freiheit festzulegen, was man unter positivem und negativem Impuls versteht. Sobald man sich darauf festgelegt hat, liegt auch die Stromrichtung fest. Und wenn man die Festlegung der positiven Impulsrichtung umkehrt, so kehrt auch der Stromdichtevektor seine Richtung um.

Nun ist es bequem, sich darauf festzulegen, was man unter positiver elektrischer Ladung versteht. Einmal getroffen, ist die Entscheidung verbindlich. Das ist beim Impuls anders: Für jedes Experiment, das man beschreibt, muss erneut festgelegt werden, welchen Impuls man als positiv bezeichnet. Es gibt zwar auch hier eine Konvention: Bewegung nach rechts bedeutet positiver x-Impuls etc. Diese Konvention stammt aus der Mathematik und wird auch in der Physik durchweg befolgt: die positive Richtung von Koordinatensystemen aller Art ist nach rechts bzw. nach oben. Aber es genügt, eine Bewegung, die in die positive x-Richtung verläuft, von der Rückseite aus zu betrachten, und schon wird aus einer positiven Geschwindigkeit eine negative und aus positivem Impuls negativer. (In dieser Situation befindet man sich als Lehrer. Ein Experiment, das auf dem Lehrertisch aufgebaut ist, wird man daher immer aus Schülersicht beschreiben.)

Herkunft

Für den Physiker ist der Strom eine Modellvorstellung, die ihre Rechtfertigung allein aus der Gültigkeit einer Bilanzgleichung der Form

$$\frac{\partial \rho_X}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{j}_X = \sigma_X \quad (2)$$

bezieht. Hier ist X eine beliebige extensive Größe. Falls die Größe eine Erhaltungsgröße ist, verschwindet der Erzeugungsterm σ_X .

Schon im Zusammenhang mit der elektrischen Stromrichtung wird oft ein Fehler gemacht: Es wird unterschieden zwischen einer „technischen“ und einer „physikalischen“ Stromrichtung. Dabei ist nur die so genannte technische Stromrichtung mit der Theorie, d.h. mit Gleichung (2) kompatibel. Die so genannte physikalische Stromrichtung ist die Bewegungsrichtung der Elektronen (und damit gleichzeitig die Stromrichtung der extensiven Größe „Stoffmenge“ im Sinn von Gleichung (2)). Der Strom wird also nicht als eine Gleichung (2) entsprechende Modellvorstellung begriffen, sondern im Sinn der Umgangssprache als kollektive Bewegung. Auch beim Impulsstrom scheint die Erwartung zu bestehen, dass sich irgend etwas bewegen müsse.

Den Vorzeichenwechsel bei Umdefinition der Impulsrichtung mag man als unschön empfinden. Wer mit Impulsströmen nicht bewandert ist, mag auch Anstoß nehmen an der scheinbaren Symmetriebrechung bei einem Vorgang der offensichtlich symmetrisch ist. Abb. 1a zeigt einen einfachen Impulsstromkreis. Die Feder stehe unter Zugspannung. Der Impuls fließt hier entgegen dem Uhrzeigersinn. (Außer der eingezeichneten Impulsstromschleife fließen innerhalb des starren Jochs noch geschlossene Impulsströme.) Zählt man den Impuls nicht nach rechts, sondern nach links positiv, so kehrt auch der Impulsstrom seine Richtung um, Abb. 1b.

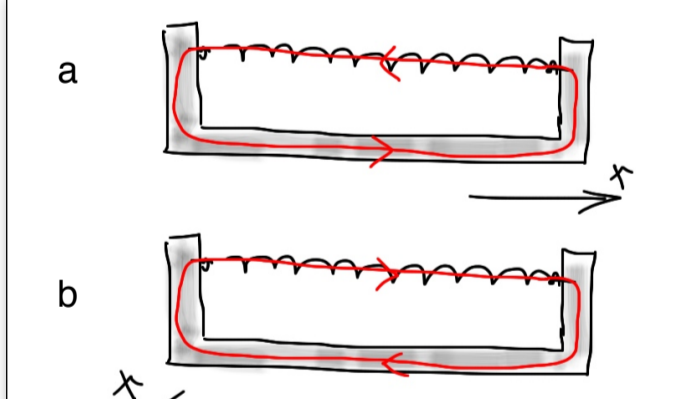


Abb. 1
(a) Positive Impulsrichtung nach rechts: Impulsstrom fließt gegen Uhrzeigersinn;
(b) positive Impulsrichtung nach links: Impulsstrom fließt im Uhrzeigersinn

Dass ein erfahrener Physiker hieran Anstoß nimmt, ist allerdings überraschend. Diese Art von Symmetriebrechung ist immer der Preis dafür, dass wir ein Problem mathematisch beschreiben. Sobald wir ein Koordinatensystem oder Bezugssystem festlegen, brechen wir die Symmetrie zwischen rechts und links, unten und oben etc. Wenn wir Atomorbitale berechnen, taucht bei einem kugelsymmetrischen Problem plötzlich eine ausgezeichnete Raumrichtung auf, meist als z-Richtung bezeichnet. Jeder Student hat damit Schwierigkeiten, aber irgendwann hat er verstanden, dass die Auszeichnung nur durch das mathematische Werkzeug bedingt ist.

Dass Ströme ihre Richtung bei Bezugssystemwechsel umkehren, kennen wir auch aus anderen Zusammenhängen. Betrachten wir zum Beispiel den Energiestrom in einer Fahrradkette. Im Bezugssystem des Fahrrads fließt die Energie durch den gespannten Teil der Kette vom vorderen zum hinteren Kettenrad. In einem Bezugssystem, in dem dieser Teil der Kette ruht, (das sich also in Fahrtrichtung gegen die Erde bewegt, und zwar schneller als das Fahrrad selbst) wird der Energiestrom durch die Kette null, und in einem Bezugssystem, das sich noch schneller gegen die Erde bewegt, kehrt der Energiestrom seine Richtung um: Die Energie fließt im gespannten Teil der Kette vom hinteren zum vorderen Kettenrad. (Es muss wohl nicht gesagt werden, dass hinten trotzdem immer der gleiche Energiestrom ankommt. Nur fließt er eben nicht nur durch die Kette, sondern auch durch den Fahrradrahmen.) Würden die Herren Gutachter der Deutschen Physikalischen Gesellschaft hier auch sagen: „Es gibt diesen Strom in der Natur nicht“? Oder: Die Richtung dieses Stroms „ist keine Eigenschaft des Systems“?

Entsorgung

Wenn man in der Schule elektrische Ströme einführt, orientiert man sich nicht an der Bewegung der Ladungsträger (die man ja den Schülern auch erst aufschwätzen muss), sondern man verwendet von Anfang an das „Stoffmodell“: Wir stellen uns die elektrische Ladung vor als eine Art Fluidum, dass in den Drähten strömt, und für dieses gedachte Fluidum gilt die Stromrichtung, die aus der Bilanzgleichung folgt. Dabei braucht man in der Schule natürlich nicht die Kontinuitätsgleichung zu formulieren. Es genügt zu sagen, dass wenn die Ladung eines Gegenstandes abnimmt, der Ladungsstrom vom Gegenstand wegfließt – eine Selbstverständlichkeit.

Entsprechend verfährt man mit dem Impuls: Nur muss man hier darauf achten, dass man am Anfang der Beschreibung einer Erscheinung klar festlegt, was man unter positivem Impuls versteht.

[1] M. Plack: Physikalische Zeitschrift, 9. Jahrgang, Nr. 23 (1908), S. 828

[2] 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. Tolan, J. Wambach und W. Weber;

http://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/stellungnahmen_gutachter/Stellungnahme_KPK.pdf