

157 Impulsstromrichtung und Bezugssystemwechsel

ZUSAMMENFASSUNG

Dass die Stromrichtung einer Impulskomponente bezugs-systemabhängig ist, ist nichts Ungewöhnliches. In der Physik ändern sich Zahlenwerte, Richtungen, ja sogar Interpretationen von Erscheinungen auch in vielen anderen Zusammenhängen.

Gegenstand

Zwei Körper A und B sind durch eine gedehnte Feder miteinander verbunden, Abb.1.

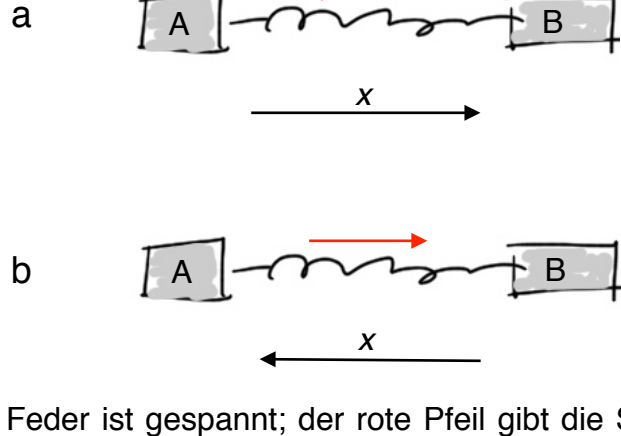


Abb. 1. Die Feder ist gespannt; der rote Pfeil gibt die Stromrichtung des x -Impulses an. (a) Der Impuls von A nimmt zu, der von B nimmt ab. (b) Der Impuls von B nimmt zu, der von A nimmt ab.

In Teilbild a ist die x -Achse nach rechts orientiert. Daher nimmt der Impuls von A zu, der von B nimmt ab. Es müsste also Impuls in die negative x -Richtung fließen, d.h. nach links, wie es der rote Pfeil zeigt. Orientiert man die x -Achse nach links, so nimmt der Impuls von A ab und der von B zu, und das heißt, dass der Impuls von links nach rechts fließt. Das kann nicht sein, denn dann hätte man die Richtung des Impulsstroms „willkürlich, d.h. unabhängig vom Geschehen im System allein durch eine neue Wahl des Koordinatensystems verändert“. [1]

Mängel

Die Schlusskette unter *Gegenstand* enthält einen Fehler.

Zunächst eine allgemeine Bemerkung.

Eine physikalische Größe beschreibt eine Eigenschaft eines Systems. Der Wert der Größe hängt von verschiedenen Gegebenheiten ab. An erster Stelle vom Zustand des Systems, denn dieser soll ja durch die Größe beschrieben werden. Er hängt außerdem von der Maßeinheit ab, was trivial ist, und er kann schließlich noch von der Wahl des Bezugssystems abhängen. Dass sich die Werte physikalischer Größen beim Wechsel des Bezugssystems ändern, ist eine jedem Physiker bekannte Tatsache.

Im konkreten vorliegenden Fall kann man den scheinbaren Widerspruch, oder besser das Unbehagen, auf zwei Arten beseitigen.

1. Die Stromrichtung ist physikalisch gesehen die Richtung des Stromdichtevektors. Ein Vektor stellt eine koordinatenunabhängige Beschreibung dar. So ist etwa die Geschwindigkeit ein Vektor. Stellt man diesen Vektor als Pfeil dar, so ist die Pfeilrichtung unabhängig von der Wahl eines Koordinatensystems, man braucht kein Koordinatensystem, um den Pfeil korrekt zu zeichnen. Seine Richtung ist durch die Anordnung der Elemente des Systems eindeutig festgelegt. Die kartesischen Komponenten dagegen sind es nicht. Zwei Autos fahren auf einer Straße gleich schnell, nämlich mit 60 km/h, aber in entgegengesetzte Richtungen, eines nach rechts, das andere nach links. Um den Sachverhalt physikalisch zu beschreiben, ordnet man jedem Auto einen Vektor zu. Die Beschreibung ist rechts-links-symmetrisch. Benutzt man zur Beschreibung kartesische Koordinaten, so muss man dem einen Auto eine positive Geschwindigkeit +60 km/h, dem anderen die negative Geschwindigkeit -60 km/h zu ordnen. Die Symmetrie ist zerstört – woran aber kein Physiker Anstoß nehmen wird.

Sollte es nicht bei der Impulsstromdichte genau so sein? Ist die Impulsstromdichte nicht ein Vektor, sodass dessen Richtung unabhängig von der Wahl des Koordinatensystems sein sollte? Nein, die Impulsstromdichte ist kein Vektor, sie ist ein Tensor. Wenn wir hier über eine Impulsstromrichtung sprechen, so sprechen wir über den Strom einer Komponente des Impulsvektors. Diese ist nicht mehr koordinatensystemunabhängig. Sie ist aus demselben Grund koordinatensystemabhängig, wie die Geschwindigkeitskomponente im vorangehenden Beispiel.

2. Was die Schule betrifft, so braucht man das Konzept Tensor nicht zu kennen. Man behandelt die drei Komponenten des Impulses unabhängig voneinander, so als handele es sich um drei Skalare. Für jede gilt, unabhängig von den beiden anderen, ein Erhaltungssatz. Wir betrachten etwa die x -Komponente des Impulses. Man hat nun noch die Freiheit, den x -Impuls in die eine oder in die entgegengesetzte Richtung positiv zu zählen. Ein Körper, dessen Impuls bei der ersten Wahl 5 Einheiten beträgt, hat dann bei der anderen Wahl -5 Einheiten. Die Beschreibung des Systems spiegelt also nicht die Symmetrie wider, die das System von sich aus hat. Das ist ein Opfer, das man immer bringen muss, wenn man ein System in kartesischen Koordinaten (oder in Zylinder- oder Kugelkoordinaten) beschreibt. Die Wahl eines Koordinatensystems zerstört die Symmetrie.

Man kann übrigens den Satz, dass der Impuls in einer gespannten Feder in eine bestimmte Richtung fließt, auch invariant formulieren:

Bei Zugspannung fließt (positiver) Impuls in die negative Richtung.

Der Satz bleibt richtig, auch wenn man die x -Richtung umkehrt. Trotzdem empfehlen wir diese Formulierung nicht für die Schule. Schüler haben nicht dieselben Schwierigkeiten wie erfahrene Physiker.

Herkunft

Die Gutachter scheinen sich daran zu stoßen, dass die mathematische Beschreibung einer symmetrischen Situation unsymmetrisch ist. Dass sie daran Anstoß nehmen, mag daran liegen, dass ihnen diese spezielle Situation noch nicht begegnet war. Wenn man sich umschaut, findet man schnell viele andere Erscheinungen, bei denen das analoge Problem auftritt, bei denen man aber keine Schwierigkeit mehr sieht, weil man die Situation gut kennt und durchschaut, und sich längst an die Asymmetrie gewöhnt hat.

Hier einige Beispiele:

Bei der quantenmechanischen Behandlung des Wasserstoffatoms spielt angeblich eine z -Richtung eine besondere Rolle. Jeder Student hat damit zunächst Schwierigkeiten. Und manch einer hat bis zum Ende seines Studiums nicht verstanden, dass diese z -Richtung nur ein Artefakt der mathematischen Beschreibung ist.

Kaum einem Schüler oder Studenten wird klar, was es mit den beiden Induktionsexperimenten auf sich hat: einmal kommt die Induktionsspannung zustande, weil \vec{B} ungleich null ist, ein andermal, weil eine Lorentzkraft auftritt; einmal ist das elektrische Feld ein Rotationsfeld, einmal nicht. Tatsächlich handelt es sich beide Male um denselben Effekt, aber in verschiedenen Bezugssystemen beschrieben. Auch hier könnte man sich wundern, dass „unabhängig vom Geschehen im System“ zwei ganz verschiedene Erklärungen gegeben werden.

Ebenso könnte es einen stören, dass der Energiestrom in einer Fahrradkette, je nach Bezugssystem, einmal vom vorderen zum hinteren, und einmal vom hinteren zum vorderen Kettenrad fließt, der Energiestromdichtevektor also einmal nach rechts und einmal nach links weist. Auch hier kehrt ein Stromdichtevektor seine Richtung „unabhängig vom Geschehen im System“ um. Beschreibt es deshalb „keine Eigenschaft des Systems?“

Oder nehmen wir das magnetische Feld eines geraden Drahtes, durch den ein elektrischer Strom fließt. Es wird verursacht durch die Driftbewegung der Elektronen – sagt man gewöhnlich. In dem Bezugssystem aber, in dem die Driftgeschwindigkeit null ist, kommt das Magnetfeld –so ist man gezwungen zu sagen– nicht mehr durch die Elektronen zustande, sondern die der Atomrümpfe. (Der Bezugssystemwechsel ist übrigens minimal: die Driftgeschwindigkeit beträgt nur Bruchteile eines Millimeters pro Sekunde.) Die Ursache des Magnetfeldes ist einmal die Bewegung von Elektronen und einmal die der Atomrümpfe, „unabhängig vom Geschehen im System“.

Oder das magnetische Feld eines Elektronenstrahls: Im Bezugssystem der Elektronen ist die magnetische Feldstärke null. Also: mal ein magnetisches Feld, mal keines – „unabhängig vom Geschehen im System“.

All das sind Situationen, die dem Physiker mehr oder weniger vertraut sind, an die er sich hat gewöhnen müssen. Der Impulsstrom in der Feder ist nur eine weitere davon.

Entsorgung

1. Was die Schule betrifft: Man mache es so, wie im *Karlsruher Physikkurs*. Man legt die positive x -Richtung ein für allemal fest, und zwar von den Schülern aus gesehen nach rechts. Mit der Tatsache, dass der Impulsstrom in einer gespannten Feder dann nach links fließt, hatte nach unserer Erfahrung kein Schüler Schwierigkeiten.

2. Zu einem viel späteren Zeitpunkt diskutiert man das Problem in einem weiteren Kontext. So wird im KPK unter anderem der Lehrsatz formuliert: „Durch einen Bezugssystemwechsel wird die Welt nicht verändert. Es ändert sich nur unsere Beschreibung der Welt.“

[1] 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: Gutachten über den Karlsruher Physikkurs; in Auftrag gegeben von der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

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

„... die Richtung der x -Achse kann willkürlich im Raum festgelegt und auch verändert werden, unabhängig vom physikalischen Geschehen innerhals des Systems. Damit kann physikalischen Geschehen im System allein durch eine neue Wahl des Koordinatensystems verändert werden. Wir schließen daraus: die Richtung des KPK-Impulsstroms ist keine Eigenschaft des Systems.“