

## Der Impuls als Produkt aus Masse und Geschwindigkeit

*Gegenstand:*

Der Impuls wird gewöhnlich definiert als das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit eines Körpers:

$$\mathbf{p} = m \cdot \mathbf{v} \quad (1)$$

$\mathbf{p}$  ist demnach nichts anderes als eine Abkürzung für das Produkt aus  $m$  und  $\mathbf{v}$ . Der Impuls erscheint damit als Musterbeispiel für eine abgeleitete Größe. In manchen Büchern wird der Impuls sogar ausdrücklich als Hilfsbegriff bezeichnet /1/.

*Mängel:*

Es gibt mehrere Gründe dafür, den Impuls nicht als abgeleitete Größe, sondern als Grundgröße einzuführen.

1) Der Impuls ist eine Erhaltungsgröße. Diese Eigenschaft ermöglicht es, den Impuls von bewegten Körpern zu messen, ohne auf Beziehung (1) zurückzugreifen /2, 3/. Da man auch die (schwere) Masse und die Geschwindigkeit unabhängig voneinander und unabhängig vom Impuls messen kann, lässt sich die Gültigkeit von Gleichung (1) experimentell prüfen.

2) Gleichung (1) gilt nicht für alle Systeme. So lässt sich der Impuls des elektromagnetischen Feldes nicht nach dieser Gleichung berechnen. Vielmehr hängt die Impulsdichte  $\rho_p$  mit elektrischer und magnetischer Feldstärke zusammen gemäß:

$$\rho_p = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{H}}{c^2}$$

3) Die Beziehung (1) hat ein Analogon in der Elektrizitätslehre. Der extensiven mechanischen Größe Impuls entspricht die extensive elektrische Ladung, der intensiven Größe Geschwindigkeit entspricht die intensive elektrische Spannung. So wie für bestimmte Systeme, nämlich nicht zu schnelle (nichtrelativistische) Körper der Impuls zur Geschwindigkeit proportional ist, so ist für bestimmte andere Systeme, etwa Kondensatoren (aber auch viele andere Systeme) die elektrische Ladung  $Q$  zur elektrischen Spannung  $U$  proportional. Den Proportionalitätsfaktor zwischen  $\mathbf{p}$  und  $\mathbf{v}$  nennt man die (träge) Masse, den zwischen  $Q$  und  $U$  elektrische Kapazität:

$$Q = C \cdot U. \quad (2)$$

Ein Vergleich der Beziehungen (1) und (2) zeigt, dass man die Masse als Impulskapazität eines Körpers interpretieren kann. Je größer die Masse eines Körpers ist, desto mehr Impuls enthält er bei gegebener Geschwindigkeit. (Je größer die elektrische Kapazität eines Kondensators ist, desto mehr Ladung enthält er bei gegebener Spannung.)

Dieser Vergleich zeigt uns, wie ungeschickt es ist, den Impuls über Gleichung (1) zu definieren. Es ist so, als würde man die elektrische Ladung über Gleichung (2) einführen, statt, wie es üblich ist, als eigenständige, von  $U$  und  $C$  unabhängig messbare Größe.

4) Dass es sinnvoll ist, den Impuls als eigenständige Größe zu begreifen, folgt auch aus der Tatsache, dass der Impuls (genauer: die Impulsdichte) eine der Komponenten des Energie-Impuls-Tensors ist. Das heißt, der Impuls spielt für das Gravitationsfeld eine ähnliche Rolle wie elektrische Ladung oder elektrischer Strom für das elektromagnetische Feld: Er gehört (neben Energie, Energiestrom und Impulsstrom) zu den Quellen des Gravitationsfeldes. Die Quellen von Feldern spielen eine wichtige Rolle bei den fundamentalen Wechselwirkungen der Natur, und man wird diese Quellgrößen nur ungern als abgeleitete Größen betrachten.

### *Herkunft:*

Die physikalische Größe Impuls ist (im Gegensatz zur elektrischen Ladung) in einem längeren Entwicklungsprozess entstanden. Es war im 17. Jahrhundert eines der erklärten Ziele der Mechanik, Stoßgesetze zu formulieren. Dabei vermutete man richtig, dass bei Stoßvorgängen eine Invariante eine wichtige Rolle spielt. Diese versuchte man, durch Masse und Geschwindigkeit auszudrücken.

Im Jahr 1644 veröffentlichte Descartes seine *Principia philosophiae*, in denen er die Erhaltung des Produkts aus Masse und Geschwindigkeit, die *quantitas motus* (zu deutsch die Bewegungsmenge) behauptete. Einige Jahrzehnte später glaubte Leibniz nachzuweisen, dass das Produkt aus Masse und Geschwindigkeitsquadrat die "richtige" Stoßinvariante sei. Und es entbrannte der berühmte, jahrzehntelange Streit um das "wahre Kraftmaß", der erst 1726 durch Daniel Bernoulli beendet wurde, und bei dem es bekanntlich keine Verlierer gab. Vielmehr entstanden schließlich zwei neue Begriffe. Den einen nennen wir heute Impuls, den anderen kinetische Energie. Das Ergebnis dieser Entwicklung war natürlich ein nach Gleichung (1) definierter Impuls. Erst viel später entdeckte man, dass man sehr wohl eine Erhaltungsgröße Impuls konstruieren kann, dass man aber dazu die Beziehung (1) als Definition aufgeben muss. Die spezielle Relativitätstheorie lehrte, dass Impuls und Geschwindigkeit nicht mehr proportional sind. Man rettete Gleichung (1) für bewegte Körper, indem man eine geschwindigkeitsabhängige Masse einführte. Wenn man den Impulssatz aber auch auf Vorgänge anwenden will, an denen das elektromagnetische Feld beteiligt ist, so muss man den Impulsbegriff verallgemeinern: Man muss den Impuls unabhängig von Gleichung (1) einführen.

### *Entsorgung:*

Man führt den Impuls als eigene Basisgröße ein, mit einem eigenen Messverfahren, etwa so, wie man es mit der elektrischen Ladung zu tun gewohnt ist. Über Gleichung (1) definiert man die (träge) Masse als den Proportionalitätsfaktor zwischen Impuls und Geschwindigkeit.

- /1/ Pohl, R. W.: Mechanik, Akustik und Wärmelehre.– Springer-Verlag, Berlin, 1969.– S. 45
- /2/ Herrmann, F.: Der Karlsruher Physikkurs, Unterrichtshilfen. - Aulis-Verlag, Köln - S. 19.
- /3/ Herrmann, F., Schubart, M.: Measuring momentum without the use of  $p = mv$  in a demonstration experiment. - In: American Journal of Physics 57 (1989). - S. 858

F. H.