

Wie fließt der Impuls?

Thomas Wilhelm

1. Unterschiedliche Beschreibungen

Ein physikalischer Themenbereich kann fachlich auf unterschiedliche Weise beschrieben werden, wobei jede der verschiedenen Beschreibungen trotz ihrer Unterschiedlichkeit fachlich korrekt sein kann. Für die Lehre muss diese physikalische Beschreibung elementarisiert, d.h. auch vereinfacht werden. Jede Elementarisierung hat ihre Vor- und Nachteile. Die Beurteilung der jeweiligen Stärken und Schwächen für die Lehre ist eine didaktische Aufgabe, keine fachliche.

Eine fachlich mögliche Beschreibung der Mechanik geht über Impulsströme [1]. Der Karlsruher Physikkurs hat diese Idee didaktisch konsequent durchgedacht, Materialien für die Schule entwickelt [2] und diese im Unterricht ausprobiert. Die begrenzte Aufgabe dieses Artikels ist nur, einen einzelnen Aspekt didaktisch zu diskutieren, der mit der Wahl des Koordinatensystems zu tun hat.

2. Ein Problem

Nehmen wir an, ein Auto fährt von West nach Ost und wird dabei immer schneller. Wir stehen südlich davon und schauen nach Norden auf das Auto. Legen wir das Koordinatensystem wie üblich (aber nicht verpflichtend) mit der positiven x-Achse nach rechts, also nach Osten, dann hat das Auto einen positiven Impuls, der gleichmäßig zunimmt. Der Karlsruher Physikkurs beschreibt dies, indem er sagt, dass Impuls von der Straße auf das Auto auffließe (siehe Abb. 1 links).

Nehmen wir an, wir stehen bei derselben Bewegung nördlich des Autos und schauen Richtung Süden auf das Auto. Legen wir das Koordinatensystem wieder mit der positiven x-Achse nach rechts, also jetzt umgekehrt nach Westen, dann hat das Auto einen negativen Impuls, der gleichmäßig abnimmt. Der Karlsruher Physikkurs beschreibt dies, indem er sagt, dass ein Impuls vom Auto auf die Straße abfließe (siehe Abb. 1 rechts).

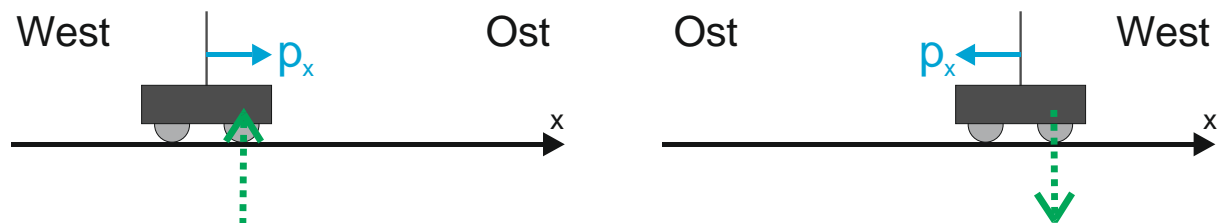


Abb. 1: Beschreibung einer schneller werdenden Bewegung nach Osten gemäß dem Karlsruher Physikkurs a) mit Blick von Süden nach Norden und b) mit Blick von Norden nach Süden

Das ist zwar in sich stimmig und richtig, aber für manche verwirrend. Warum fließt bei ein und derselben Bewegung einmal ein Impuls auf und einmal ab? Der Vorgang ist ja derselbe,

nur das Bezugssystem hat sich geändert. Gibt es auch eine Beschreibung, die unabhängig davon ist, wie das Koordinatensystem gelegt wird?

3. Die Erklärung

Der Grund liegt darin, dass der Impuls in der Physik keine positive, skalare, mengenartige Größe ist, sondern eine vektorielle Größe, also eine Richtung hat. Diese Richtung äußert sich bei eindimensionalen Bewegungen nur noch im Vorzeichen. Der Karlsruher Physikkurs schaut nun immer, wie ein positiver, d.h. ein nach rechts gerichteter Impuls fließt.

Der erste Fall (Blick von Süden) ist klar: Der Impuls ist nach rechts gerichtet und es fließt weiterer, nach rechts gerichteter Impuls dazu. Im zweiten Fall (Blick von Norden) könnte man auch sagen, der Impuls ist nach links gerichtet und es fließt weiterer nach links gerichteter Impuls dazu, wobei nach links gerichtet negativ bedeutet. Dass ein negativer (nach links gerichteter) Impuls dazu kommt, ist mathematisch gleichbedeutend damit, dass ein positiver (nach rechts gerichteter) Impuls abfließt.

Die Entscheidung des Karlsruher Physikkurses, stets nur positive (also nach rechts gerichtete) Impulse fließen zu lassen, führt beim Wechsel des Bezugssystems im obigen Sinne dazu, dass aus Hinauffließen ein Hinunterfließen wird. Man könnte sich stattdessen auch dafür entscheiden, immer nur Impulse hinauffließen zu lassen. Dann würde ein Wechsel des Bezugssystems im obigen Sinne bedeuten, dass statt einem positiven (also nach rechts gerichteten) Impuls ein negativer (also nach links gerichteter) Impuls hinauffließt (siehe Abb. 2). In jedem Fall muss sich irgendetwas umkehren, weil das Bezugssystem umgedreht wurde.



Abb. 2: Beschreibung einer schneller werdenden Bewegung nach Osten mit der zeitlichen Ableitung des Impulsvektors a) mit Blick von Süden nach Norden und b) mit Blick von Norden nach Süden

Das Problem entsteht also dadurch, dass man zur Beschreibung dieser eindimensionalen Bewegung mit Zahlen oder Diagrammen ein Koordinatensystem festlegen muss und dieses stets nach rechts festlegt. Würde man das Koordinatensystem statt immer nach rechts immer so festlegen, dass die Bewegung immer in positive Richtung erfolgt, hätte man immer positive Impulse und es würden bei der oben beschriebenen Bewegung immer positive Impulse hinauffließen.

4. Alternative Beschreibungen

Spätestens an dieser Stelle fragt man sich doch, ob es denn nicht möglich wäre, eine Beschreibung zu finden, die davon unabhängig ist, wie man willkürlich sein Koordinatensystem legt, in der es also weder positiv noch negativ gibt. In der Schule geht das sehr wohl, wenn

man auf Zahlen und Diagramme verzichtet und das Problem zeichnerisch löst. Dazu betrachten wir auch nicht die Flussrate, sondern die Änderung in einem festen kleinen Zeitintervall Δt . Dann erhält man ein Bild wie in Abbildung 3. Man sieht hier, dass das Auto immer schneller wird, weil immer Impuls in Bewegungsrichtung dazukommt (hinauffließt). Käme dagegen ein Impuls gegen die Bewegungsrichtung dazu, würde das Auto langsamer. Das ist nun auch auf zwei Dimensionen erweiterbar. Kommt Impuls senkrecht zur Bewegung dazu, ändert sich nur die Richtung. Die Ursache für die Änderung des Impulses ist jeweils eine Kraft: $\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$.

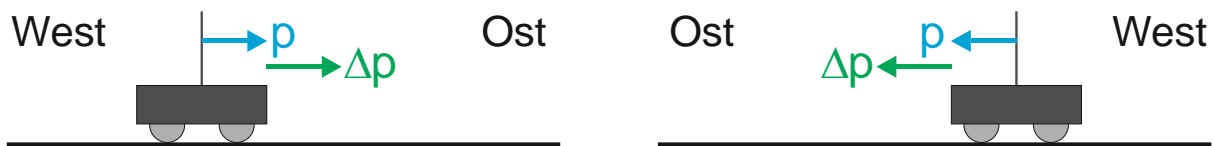


Abb. 3: Alternative Beschreibung einer schnellerwerdenden Bewegung nach Osten mit Impulsänderungsvektoren für ein festes Zeitintervall Δt a) mit Blick von Süden nach Norden und b) mit Blick von Norden nach Süden

Da die Masse des Autos konstant ist, kann man sich fragen, wieso man den Impuls statt die Geschwindigkeit betrachtet. Statt zu schauen, welcher Impuls pro Zeit aufströmt, könnte man auch schauen, welche Geschwindigkeit pro Zeit aufströmt. Wenn man ein festes Zeitintervall betrachtet, bedeutet dies: Statt zu schauen, welcher Impulsänderung auftritt, schaut man, welche Geschwindigkeitsänderung auftritt. Damit erhält man die Darstellung von Abbildung 4. Beschreiben kann man das dann auch mit der Gleichung $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}$ [3].

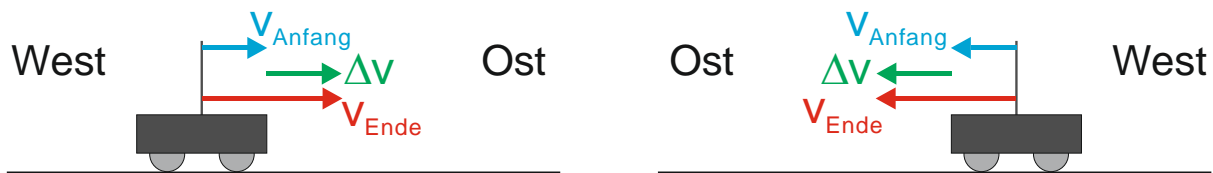


Abb. 4: Alternative Beschreibung einer schnellerwerdenden Bewegung nach Osten mit Geschwindigkeitsänderungsvektoren für ein festes Zeitintervall Δt a) mit Blick von Süden nach Norden und b) mit Blick von Norden nach Süden

Mit dieser Darstellung ist man näher an der Beschreibung der Hochschulphysik. Diese macht den nicht einfachen Schritt, $\Delta \vec{v}$ und Δt zu einer neuen, schwierigen Größe zusammenzufassen: $\frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \vec{a}$.

5. Fazit

Beim Karlsruher Physikkurs wird zuerst die Richtung des Koordinatensystems festgelegt und zwar willkürlich per Definition immer nach rechts. Dann wird geschaut, ob positive (d.h. in Richtung des Koordinatensystems gerichtete) Impulse auf- oder abfließen. Alternativ könnte man es auch so beschreiben, dass Impulse (oder Geschwindigkeiten) immer nur auffließen,

wobei diese nach rechts oder links gerichtet sein können, d.h. es kommen nach rechts oder nach links gerichtete Impulse (bzw. Geschwindigkeiten) dazu.

Entscheidet man sich im traditionellen Unterricht dafür, dass das Koordinatensystem immer nach rechts gerichtet ist, führt eine Drehung des Koordinatensystems wie in Abb. 1 auch dazu, dass aus einer positiven Geschwindigkeit eine negative wird. Dort muss man aber bei einer schnellerwerdenden Bewegung in negative Koordinatenrichtung (Abb. 1b) nicht sagen, es gehe positive Geschwindigkeit weg. Stattdessen ist es hier möglich zu sagen, es komme negative Geschwindigkeit dazu.

Die alternative Darstellung mit Pfeilen ist dabei unabhängig von der Richtung des gewählten Koordinatensystems. Ob die Werte positiv oder negativ sind, ergibt sich erst dann, wenn man diese Richtung festlegt. Solange man keine Richtung des Koordinatensystems festgelegt hat, kann man nicht sagen, ob die Geschwindigkeit oder der Impuls positiv oder negativ ist und ob die Größe zu- oder abnimmt; man kann nur sagen, ob das Tempo (der Geschwindigkeitsbetrag) zu- oder abnimmt [4]. Die Darstellungen der Abbildungen 2 bis 4 haben den Vorteil, dass der Teil b die Spiegelung von Teil a ist. Ungeschickt ist hingegen, dass die Abbildung 1b nicht die Spiegelung von 1a ist.

Während also im Karlsruher Physikurs immer positive Impulsänderungen auf- oder abfließen (aber nie fließen negative Impulsänderungen auf- oder abfließen), kommen im Konzept aus Abschnitt 4 nach rechts oder nach links gerichtete Geschwindigkeitsänderungen dazu (aber es gehen nie Geschwindigkeitsänderungen weg). Bei den bisher betrachteten eindimensionalen Bewegungen mag diese Unterscheidung spitzfindig sein. Bedeutung bekommt diese erst, wenn man zu zweidimensionalen Bewegungen übergeht. Hier kann die Darstellung aus

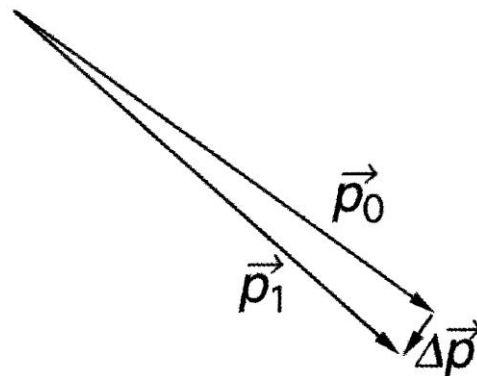


Abb. 5: Bei zweidimensionalen Bewegungen wie der Kreisbewegung wechselt auch der Karlsruher Physikurs zu einer Darstellung mit Impulsänderungsvektoren [5, S. 30, Abb. 2.63]. Diese Darstellung ist unabhängig von der Wahl der Richtung des Koordinatensystems.

Abbildung 1 nicht aufrecht erhalten werden und deshalb wechselt der Karlsruher Physikurs an dieser Stelle doch zur Darstellungsart aus Abbildung 3 (siehe Abb. 5) [5, S. 30, Abb. 2.63]. Der Karlsruher Physikurs wäre also konsistenter, wenn er auch die eindimensionalen Bewegungen entsprechend der Abbildung 3 behandeln würde.

Studien zeigen, dass es wichtig ist, zwischen skalaren und vektoriellen Größen zu unterscheiden. Das eigentliche Problem sowohl beim traditionellen Physikunterricht als auch beim Karlsruher Physikunterricht ist die starke Betonung eindimensionaler Bewegungen, bei denen der Richtungscharakter der Größen nicht deutlich wird. Wer das Fließen des Impulses nach

dem Karlsruher Physikunterricht unterrichten möchte, dem sei empfohlen, mit zweidimensionalen Bewegungen gemäß Abbildung 5 zu beginnen.

Literatur:

- [1] Strunk, C.; Rincke, K. (2013): Zum Gutachten der Deutschen Physikalischen Gesellschaft über den Karlsruher Physikkurs. Diskussionspapier, Univ. Regensburg, Regensburg, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bvb:355-epub-300368>
- [2] Hermann, F. (2003): Ein Lehrbuch für den Unterricht der Sekundarstufe I, Teil 1, 6. Auflage, Aulis Verlag Deubner, Köln
- [3] Wiesner, H.; Wilhelm, T.; Rachel, A.; Waltner, C; Tobias, V.; Hopf, M.; , Mechanik I: Kraft und Geschwindigkeitsänderung, Reihe Unterricht Physik, Band 5, Aulis-Verlag, 2011
- [4] Wilhelm, T.: Moment mal ... (6): Geschwindigkeit oder Tempo? - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 63, Nr. 1, 2014, S. 48 - 49
- [5] Hermann, F. (2010): Ein Lehrbuch für den Unterricht der Sekundarstufe II, Mechanik, 2. Auflage, Aulis Verlag in der Stark Verlagsgesellschaft

Anschrift des Verfassers

Prof. Dr. Thomas Wilhelm, Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt am Main, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt am Main, wilhelm@physik.uni-frankfurt.de, www.thomas-wilhelm.net.