

- ▷ Aufgabenstellungen und Arbeitsdokumentationen für ein Portfolio,
- ▷ Schriftliche Dokumentation von Versuchsplanung, -aufbau und -auswertung (auch als „Gruppenleistung“)

4 Einführung in den Magnetismus als Lerntheke

In diesem Abschnitt beschreiben wir eine Lerntheke für eine 5. Klasse, die eine erste Einführung in den Permanentmagnetismus liefert. Dazu wird eine Übersicht über eine denkbare Aufteilung in Unterthemen sowie das jeweils benötigte Material gegeben. Einige der vorgeschlagenen Themen werden detaillierter vorgestellt.

Für viele der angesprochenen Themen gibt es Vorlagen aus dem Grundschulbereich, die sich sehr gut als Anleitungen für die Lerntheke einsetzen lassen, z. B. [6]. Auch die Angebote aus [5] eignen sich hier gut.

Hinweis für Lehrkräfte: In die Stäbchen aus Magnetbaukästen, z. B. von Geomag oder anderen Herstellern sind kräftige Neodym-Magnete eingearbeitet. Ein solches

Stäbchen anstelle eines gewöhnlichen Stabmagneten richtet sich an einem Faden aufgehängt sehr gut im Erdfeld aus. Dies ist ein gutes Alternativangebot.

Literatur

- [1] Baumert, J., Klieme, E., Neubrand, M., Prenzel, M., Schiefele, U., Schneider, W., Stanat, P., Tillmann, K.-J., Weiß, M. (Hrsg.): PISA 2000, Basiskompetenzen von Schülerinnen und Schülern im internationalen Vergleich, Leske & Budrich, Opladen 2001.
- [2] Baumert, J., Bos, W., Lehmann, R. (Hrsg.): TIMMS/III. Dritte internationale Mathematik- und Naturwissenschaftsstudie, Band 1 und 2, Leske & Budrich, Opladen 2000
- [3] Niggli, A.: Lernarrangements erfolgreich planen. Didaktische Anregungen zur Gestaltung offener Unterrichtsformen, Verlag Sauerländer, Aarau/Schweiz, 2000.
- [4] Roesler, F. (2004): Arbeiten in der Lernwerkstatt – eine Möglichkeit für kooperatives und selbständiges Arbeiten. Praxis der Naturwissenschaften-Physik, Heft 6/53, S.19-23 (Materialien sind abrufbar unter www.physik.uni-muenchen.de/didaktik (Fundgrube: Unterrichtsmaterialien))
- [5] www.lmu.de/supra (Das Thema „Magnetismus“ wird zurzeit für SUPRA aufbereitet.)
- [6] Jung, S.: Magnet und Kompass – Kopiervorlagen für einen handlungsorientierten Sachunterricht, Auer, Donauwörth, 2001.

Anschrift der Verfasser:

Eva Heran-Dörr, Martin Hopf, Prof. Dr. Dr. Hartmut Wiesner, Lehrstuhl für Didaktik der Physik, Universität München, Schellingstr. 4, 80799 München

Impuls von Anfang an

– Zur Einführung physikalischer Größen im Anfangsunterricht

D. Plappert

Das Kennen lernen von Erscheinungen in Natur und Technik und das genaue Beobachten stehen in einem Anfangsunterricht natürlicherweise im Zentrum. Aus lernpsychologischen und insbesondere lernökonomischen Gründen sollte die Auswahl der dabei betrachteten Phänomene nicht willkürlich sein und auch nicht dadurch bestimmt sein, dass die Phänomene spektakulär sind. Das zentrale Auswahlkriterium sollte vielmehr sein, ob die Schülerinnen und Schüler im Laufe des weitem Unterrichts aus den betrachteten Beispielen zentrale methodische oder begriffliche physikalische Konzepte herauschälen können oder nicht. Im Folgenden wollen wir am Beispiel der Mechanik beleuchten, wie an den Vorerfahrungen der Schülerinnen und Schüler anknüpfend, die zentrale physikalische Größe der Mechanik, der Impuls, stufenweise eine immer präzisere physikalische Bedeutung bekommen kann. Auf einer bestimmten Stufe der Begriffsbildung muss die Abgrenzung zur physikalischen Größe Energie für die Schülerinnen und Schüler deutlich erlebbar werden. Auf dem dargestellten Weg stehen zunächst qualitative Betrachtungen im Vordergrund, so wie es die Bildungsstandards Baden-Württemberg [1] ab Klasse 7 fordern.

1 Zur Einführung physikalischer Begriffe

In seinem Buch „Lernen – Gehirnforschung und die Schule des Lebens“ [2] nennt *Manfred Spitzer* folgende Bedingungen für erfolgreiches Lernen:

- Es kommt in der Regel nicht auf die einzelnen Fakten an, sondern vielmehr auf die allgemeinen Prinzipien, die durch die Fakten klar werden sollen.
- Die Beispiele müssen so gewählt werden, dass die Schüler aus ihnen die Regeln herausziehen können und
- so, dass sie die daran behandelten Inhalte mit ihren eigenen, individuellen Lebenserfahrungen in Verbindung bringen können.

Diese Forderungen liegen dem *didaktischen Weg* zur Einführung physikalischer Sachverhalte zugrunde, der in den Bildungsstandards Physik von Baden-Württemberg [1] auf die folgende Weise beschrieben ist: „Am Anfang eines Physikverständnisses steht die Auseinandersetzung mit den Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler, die sie in den Unterricht mitbringen. Phänomene führen zu physikalischen Fragestellungen. Erklärungen werden in Bildern, Modellen

und Experimenten veranschaulicht und *schrittweise* mithilfe der physikalischen Fachsprache gefasst. Das im Rahmen der physikalischen Grundbildung an speziellen Beispielen erworbene Wissen über Fakten und begriffliche Strukturen sowie die dabei entwickelten Fähigkeiten müssen auf neue Fragestellungen anwendbar sein“. Eine Folge davon ist, dass die Begriffsbildung zunächst auf einer eher *qualitativen Stufe* verbleibt und erst bei der weiteren Schärfung des Begriffs mehr und mehr die *quantitative Stufe* erreicht.

Dieser Weg unterscheidet sich damit erheblich von der Art, wie traditionell physikalische Größen im Unterricht eingeführt werden, indem sie

- entweder von anderen physikalischen Größen, den so genannten Basisgrößen, abgeleitet oder
- durch eine Messvorschrift definiert werden, die aus drei Bestandteilen („Einheit“, „Gleichheit“, „Vielfachheit“) besteht.

Dieser Weg ist nicht nur aus den oben genannten lernpsychologischen Gründen für den Anfangsunterricht ungeeignet, sondern ist, wie *Friedrich Herrmann* in [3] ausführlich zeigt, überhaupt nicht konsequent durchführbar.

2 Impuls – die zentrale Größe der Mechanik

Betrachten wir den heute üblichen Aufbau der Mechanik, so steht die physikalische Größe Kraft im Zentrum. Um das „kumulative Lehren“ im Physikunterricht durch die Neukonzeption des Bildungsplans Baden-Württembergs zu begünstigen, werden nur wenige, dafür aber zentrale Konzepte, gefordert, die in möglichst vielen Bereichen der Physik von grundlegender Bedeutung sind und die in den unterschiedlichen Altersstufen immer wieder aufgegriffen und verfeinert werden können. Dafür ist in der Mechanik das Impulskonzept besser geeignet als das Kraftkonzept,

- da der Impuls mit anderen wichtigen physikalischen Größen wichtige Eigenschaften gemeinsam hat, z. B. die Erhaltung,
- da mit dem Impuls viele Analogien zu anderen Gebieten der Physik deutlich werden und
- da der physikalische Impulsbegriff in enger Verbindung steht mit den Vorerfahrungen der Schülerinnen und Schüler von „Wucht“ und „Schwung“.

Eine entsprechende Anknüpfung an die Vorerfahrungen der Schülerinnen und Schüler bei der Bildung des physikalischen Kraftbegriffs ist dagegen recht problematisch. Dies soll Abb. 1 verdeutlichen: Kraft ist etwas, was man hat, was man trainieren und gewinnen kann Diese Eigenschaften des alltagsprachlichen Kraftbegriffs stehen im Widerspruch zu dem physikalischen Kraftkonzept.

Gegen die Neukonzeption der Mechanik mit dem Impuls als zentrale Größe wurden aus unterschiedlichen Gründen Bedenken geäußert:

- zum einen wurde eine Einschränkung der didaktischen Freiheit des Physiklehrers befürchtet, da scheinbar der Weg des Karlsruher Physikkurses [4] vorgeschrieben wird und
- zum anderen wurde eine formale Überforderung der Anfänger befürchtet, da bisher der Impuls als Produkt von Masse und Geschwindigkeit in der Sekundarstufe II eingeführt wurde.

Mit diesen beiden Befürchtungen wollen wir uns im Folgenden zunächst auseinander setzen.

3 Die Mechanik von Isaac Newton

Überraschend ist es, wenn wir die „Neufassung“ der Mechanik mit dem Aufbau vergleichen, den *Isaac Newton* in seinen „mathematischen Prinzipien der Naturlehre“ [5] vor über 300 Jahren gewählt hat. Dort werden im ersten Abschnitt zunächst einige zentrale physikalische Größen „erklärt“: die „Größe der Materie“, die „Größe der Bewegung“, die „Trägheitskraft“, die „angebrachte Kraft“ und die „Zentripetalkraft“. Die „Erklärung“ der „Größe der Bewegung“ in deutscher Übersetzung lautet:

„Die Größe der Bewegung wird durch die Geschwindigkeit und die Größe der Materie vereint gemessen.“

Dies begründet *Newton* wie folgt: „Die Bewegung des Ganzen ist die Summe der Bewegungen der einzelnen Teile. Daher ist sie eine doppelte in einem doppelt so großen Körper bei gleicher Geschwindigkeit und eine vierfache, in einem doppelt so großen Körper bei gleicher Geschwindigkeit.“ Im Weiteren nennt er die „Größe der Bewegung“ oft auch nur die „Bewegung“. Beim weiteren Lesen wird deutlich, dass *Newton* mit „Größe der Bewegung“ die physikalische Größe meint, die wir heute „Impuls“ nennen. Außerdem wird klar, dass er an vielen Stellen die Impulserhaltung, die zuvor von *Huygens* erkannt wurde, als so selbstverständlich voraussetzt, dass er sie nicht explizit erwähnt.

Im folgenden zweiten Abschnitt mit dem Titel „Grundsätze oder Gesetze der Bewegung“, werden drei „Gesetze“ auf folgende Weise beschrieben:

1. Gesetz

Jeder Körper beharrt in seinem Zustande der Ruhe oder der gleichförmigen geradlinigen Bewegung, wenn er nicht durch einwirkende Kräfte gezwungen wird, seinen Zustand zu ändern.

2. Gesetz

Die Änderung der *Bewegung* ist der Einwirkung der bewegenden *Kraft* proportional und geschieht nach der Richtung derjenigen geraden Linie, nach welcher jene Kraft wirkt.

3. Gesetz

Die Wirkung ist stets der Gegenwirkung gleich, oder die Wirkungen zweier Körper auf einander sind stets gleich und von entgegen gesetzter Richtung.

Abb. 1 Der „Kraftbegriff“ beim Muskeltraining

Kraft

Wir benötigen Kraft, um unseren Körper aufrecht zu halten und zu bewegen. Kraft wächst jedoch nur am Widerstand. Setzen wir unserem Körper keine angemessenen Widerstände entgegen, wird er schwächer. Wir beginnen, uns krank zu schonen.

Eine schwache Muskulatur verursacht Schmerzen. Das gilt für den Rücken ebenso wie für die gesamte Skelettmuskulatur. Deshalb ist Kraft auch kein Luxus, sondern Notwendigkeit – in jedem Alter.

Mit korrekt durchgeführtem Krafttraining bremsen Sie die Abbauvorgänge des Körpers. Stattdessen bauen Sie auf, gewinnen an Haltung, Widerstandskraft und Gesundheit.

Unser Muskelaufbautraining mobilisiert Ihre Kraftreserven.

Wenn irgend eine Kraft eine gewisse Bewegung hervorbringt, so wird die doppelte eine doppelte, die dreifache eine dreifache erzeugen; mögen diese Kräfte zugleich und auf einmal, oder stufenweise auf einander folgend einwirken.

Abb. 2: Aus Newtons Begründungen zum 2. Gesetz

Jeder Gegenstand, welcher einen andern drückt oder zieht, wird eben so stark durch diesen gedrückt oder gezogen. Drückt jemand einen Stein mit dem Finger, so wird dieser vom Steine gedrückt. Zieht ein Pferd einen an ein Seil befestigten Stein fort, so wird das erstere gleich stark gegen den letzteren zurückgezogen, denn das nach beiden Seiten gespannte Seil wird durch dasselbe Bestreben schlaff zu werden, das Pferd gegen den Stein und diesen gegen jenes drängen; es wird eben so stark das Fortschreiten des einen verhindern, als das Fortrücken des andern befördern. Wenn irgendein Körper auf einen andern stößt und die Bewegung des letztern irgendwie verändert, so wird ersterer, in seiner eigenen Bewegung dieselbe Änderung, nach entgegen gesetzter Richtung, durch die Kraft des andern (wegen der Gleichheit des wechselseitigen Druckes) erleiden. Diesen Wirkungen werden die Änderungen nicht der Geschwindigkeiten, sondern der Bewegungen nämlich bei Körpern, welche nicht anderweitig verhindert sind, gleich. Die Änderungen der Geschwindigkeiten, nach entgegen gesetzten Richtungen, sind nämlich, weil die Bewegungen sich gleich ändern, den Körpern umgekehrt proportional. Es gilt dieses Gesetz auch bei den Anziehungen, wie in der nächsten Anmerkung gezeigt werden wird.

Abb. 3: Newtons Begründung des 3. Gesetzes

Besonders aufschlussreich sind die „Begründungen“ der Gesetze (Abb. 2 und 3). Deshalb sind sie hier im Wortlaut wiedergegeben.

Fassen wir die drei Newton'schen Gesetze in der heute gebräuchlichen physikalischen Sprache zusammen, so können wir sagen:

1. Gesetz

Ein Zustand ist stationär, wenn keine äußere Einwirkung vorhanden ist.

2. Gesetz

Die Impulsänderung ist proportional der bewegendenden Kraft und geschieht in der Richtung der äußeren Kraft.

3. Gesetz

Zwei Systeme wirken gleich, aber entgegengesetzt aufeinander. Ändert sich bei einem Stoß der Impuls eines Körpers, so ändert sich der Impuls des zweiten Körpers um denselben Betrag jedoch in entgegen gesetzter Richtung.

Schon Newton hatte also den Impuls als die zentrale physikalische Größe der Mechanik erkannt; für ihn war die Impulserhaltung ebenso selbstverständlich, wie für uns heute die Erhaltungseigenschaft der elektrischen Ladung. Bemerkenswert ist die Formulierung des 2. Gesetzes, durch die Newton nicht den Zusammenhang der bewegendenden Kraft F mit der Beschleunigung a durch $F = m a$ herstellt, sondern stattdessen den mit der zeitlichen Änderung des Impulses des Körpers durch $F = \Delta p / \Delta t$.

Durch die Neukonzeption der Mechanik wird also kein bestimmter didaktischer Weg vorgeschrieben; der Weg Newtons und der des Karlsruher Physikkurs sind zwei von sehr vielen anderen möglichen Wegen [6], [7].

4 Impuls als mengenartige Größe

Durch Newton wurde die Mechanik zum ersten Gebiet der Physik, das mathematisch beschreibbar wurde, andere folgten. Nachdem das von Faraday entwickelte Feldkonzept mathematisch gefasst war, konnten Fragen wie etwa „wie wirken Kräfte durch den Raum hindurch?“ oder „wie lange dauert es, bis eine Kraftwirkung, die an einem Ort entsteht, an einem anderen Ort spürbar wird?“ behandelt werden. Auf diese Weise wurde aus der „Fernwirkungstheorie“ Newtons eine „Nahwirkungstheorie“. Seltsamer Weise wird dies in der Behandlung der Mechanik in der Schule bis heute nicht berücksichtigt. Fragen wie: „wie gelangt der

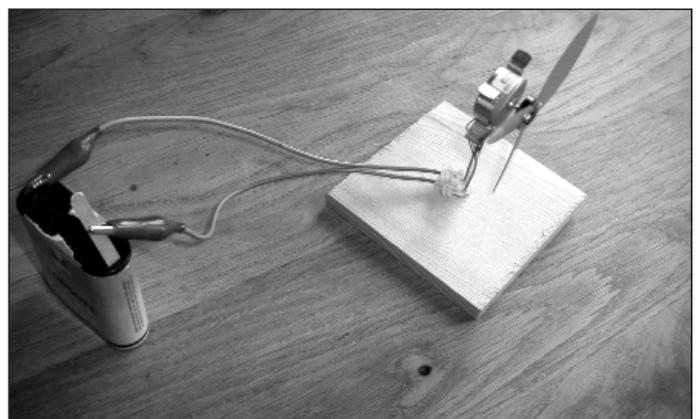
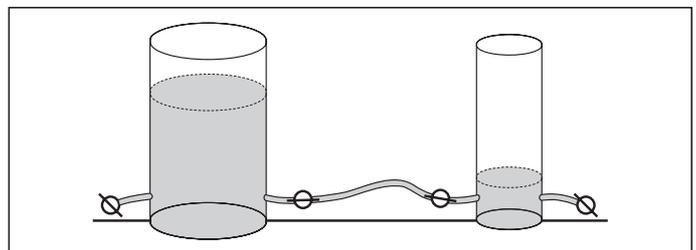
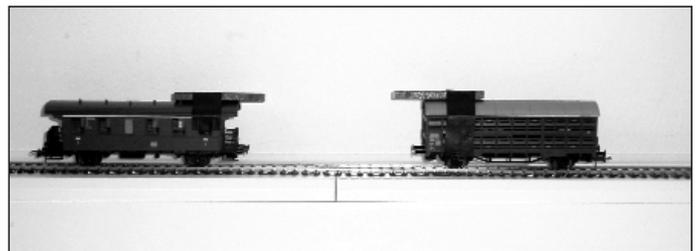
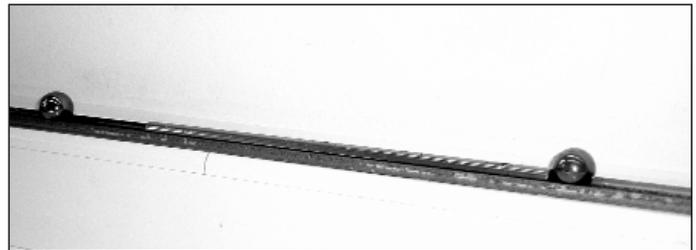


Abb. 4 (oben): Eine Kugel bewegt sich auf eine Stange zu, an der eine 2. Kugel anliegt.

Abb. 5 (Mitte oben): Impulsübertragung bei magnetisch gekoppelten Eisenbahnwagen

Abb. 6 (Mitte unten): Bei geöffnetem Hahn wird Wasser von einem Behälter zum anderen „übertragen“!

Abb. 7 (unten): Elektrizität strömt durch das Kabel hindurch.

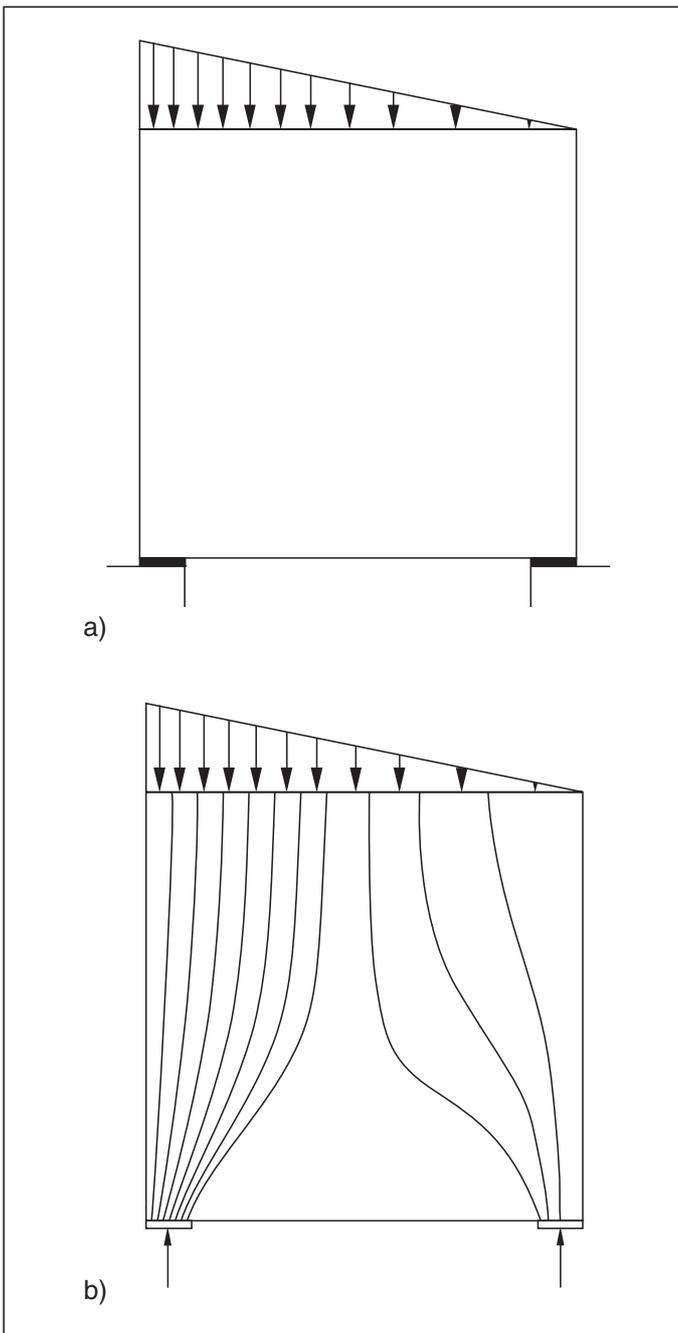


Abb. 8: Geometrie der Belastung (a) und Kraftfluss für diese Belastung (b)

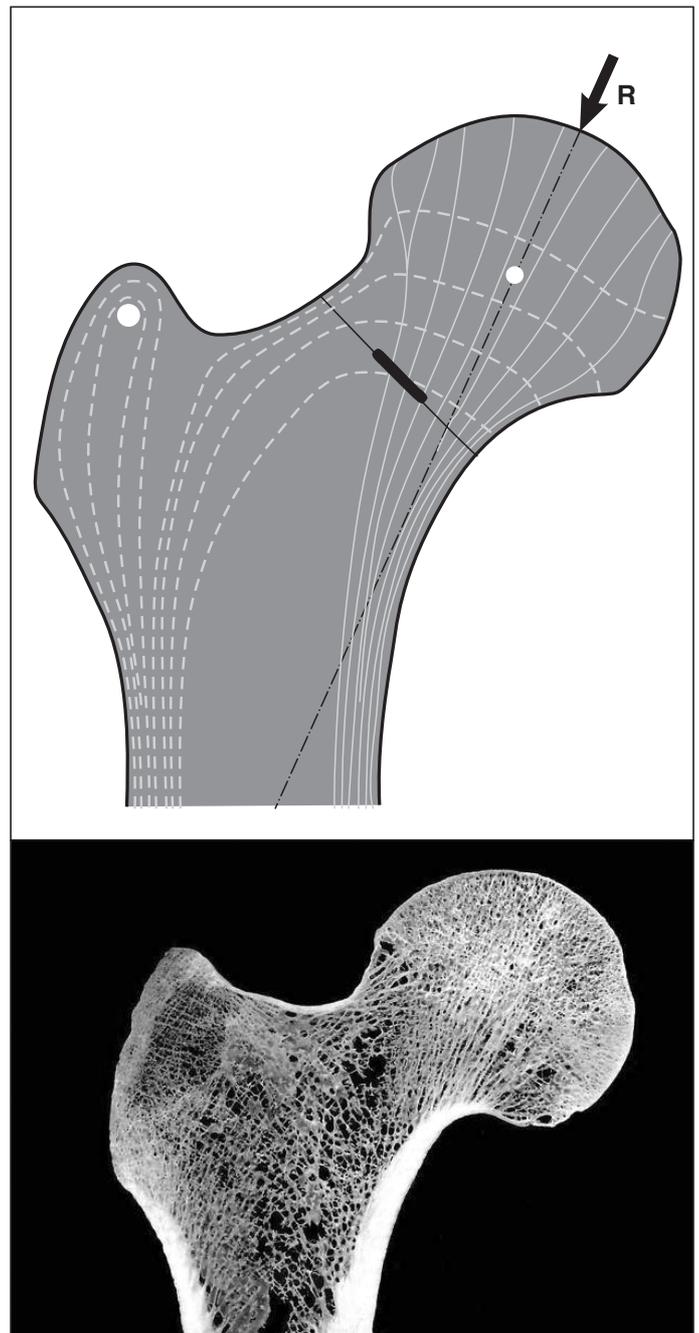


Abb. 9: Strukturen innerhalb des Knochens verbildlichen den „Kraftfluss“

Impuls von einem Körper auf einen anderen?“, „wo kommt der Impuls beim Beschleunigen her?“, „wo geht der Impuls beim Abbremsen hin?“ werden in der Regel nicht gestellt und somit auch nicht im Unterricht behandelt. Nehmen wir die Impulserhaltung erst, dann sind diese Fragen jedoch sehr nahe liegend. In Abb. 4 stößt eine Kugel auf eine Stange, an der eine zweite ruhende Kugel liegt. Die erste Kugel kommt beim Stoß zum Stillstand, die zweite Kugel setzt sich in Bewegung. Es ist deutlich, dass der Impuls durch die Stange von der einen Kugel zur anderen gelangt. In Abb. 5 sind zwei Modelleisenbahnwagen magnetisch (abstoßend) gekoppelt. Der Impuls gelangt beim Stoß durch das Magnetfeld von dem einen Wagen zum anderen. In beiden Fällen wird Impuls „übertragen“. Diese Formulierung ist gebräuchlich, aber sehr abstrakt. Kein Mensch würde bei dem in Abb. 6 dargestellten Versuchsaufbau sagen, dass wenn der Hahn geöffnet wird, Wasser von einem zum anderen Behälter übertragen wird. Vielmehr

sagt man, das Wasser „fließt“ bzw. „strömt“, obwohl das Strömen selbst nicht sichtbar ist. Dieselbe Situation liegt bei Abb. 7 vor: wird ein Motor mit den beiden Anschlüssen einer Batterie verbunden, fließt Elektrizität durch die Kabel hindurch. Ebenso nahe liegend, aber für Physiker ungewohnt, ist es, für die in den Abb. 4 und 5 dargestellten Situationen zu sagen: der Impuls strömt durch die Stange von der einen Kugel in die andere, bzw. strömt durch das Magnetfeld hindurch, von dem einen Wagen in den anderen hinein. Für Schülerinnen und Schüler ist diese Beschreibungsweise genauso verständlich wie die in der Elektrizitätslehre Übliche mithilfe des elektrischen Stroms. Weitere Ausführungen zum physikalischen Strombegriff sind in [8] dargestellt.

Wenig bekannt ist, dass bei mechanischen Fragestellungen, bei denen es auf den Weg ankommt, auf dem der Impuls „übertragen“ wird, von „Kraftfluss“ gesprochen wird. Für jeden Statiker, der die Tragfähigkeit von technischen Kon-

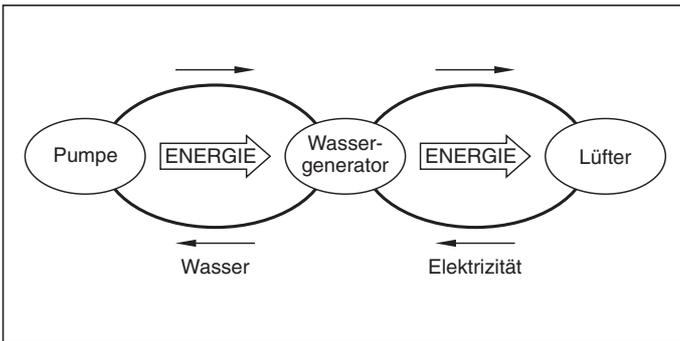
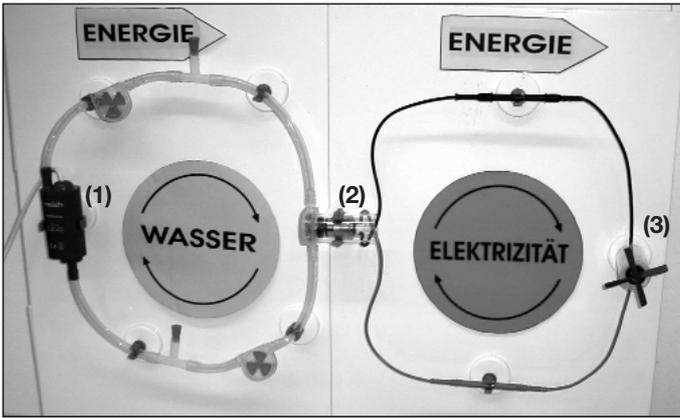


Abb. 10 (oben): Der Energieträger-Stromkreis

Abb. 11 (unten): Energie ist das, was hindurch strömt! Wasser und Elektrizität strömen im Kreis.

struktionen berechnen muss, ist die Mechanik eine „Nahwirkungstheorie“. Um das „Abtragen der Lasten“ zu berechnen, kann er den „Kraftfluss“ analog einer Flüssigkeitsströmung berechnen. In einem Artikel über das Modellieren von Tragwerken schreibt *M. Jennwein* [9]: „Die Abtragung der Lasten durch eine Scheibe hindurch zu den Lagern ist analog zu einer Partikelströmung, wie *Fonseca* [10] streng bewiesen hat (Abb. 8). Wir fassen die Lasten bereichsweise zu Resultierenden zusammen und bezeichnen deren Weg von der „Quelle“ (Lastangriff) durch das Tragwerk bis zur „Mündung“ im Lager als Lastpfade. Der Lastanteil eines Lastpfades bleibt auf diesem Weg konstant (analog zur Kontinuitätsgleichung bei Strömungen). Die Verwandtschaft des „Kraftflusses“ mit Strömungsbildern ist eine wichtige Modellierungshilfe.“ Auch Mediziner sprechen von Kraftfluss, wenn sie den Knochenaufbau behandeln: die Strukturen innerhalb des Oberschenkelknochens zeigen an, wie die Kraft fließt (Abb. 9). In beiden Fällen wird physikalisch gesprochen, die „Impulsstromdichte“ mit dem anschaulichen Begriff „Kraftfluss“ bezeichnet. Zusammenfassend können wir sagen: Impuls ist in einem bewegten Körper enthalten, wird beim Beschleunigen von außen zugeführt, beim Abbremsen nach außen abgegeben. Impuls verhält sich wie eine Art Stoff, Impuls ist stoffartig, mengenartig.

Schälen wir diesen Impulsbegriff im Physikunterricht langsam aus alltäglichen Erfahrungen der Schülerinnen und Schüler heraus, dann hat die Beziehung $p = m v$ zunächst eine ebenso geringe Bedeutung für den Impulsbegriff wie die entsprechende Beziehung $Q = C U$ für den Begriff der elektrischen Ladung Q . Wir plädieren dafür, Werte für Impulsmengen erst dann wirklich anzugeben, wenn es für die jeweils behandelte Fragestellung wirklich wichtig ist. Dann kann für den Impuls eine eigenständige Maßeinheit einge-

führt werden. In [4], [6] und [7] wird hierfür 1 Hy (Huygens) mit $1 \text{ Hy} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ festgelegt.

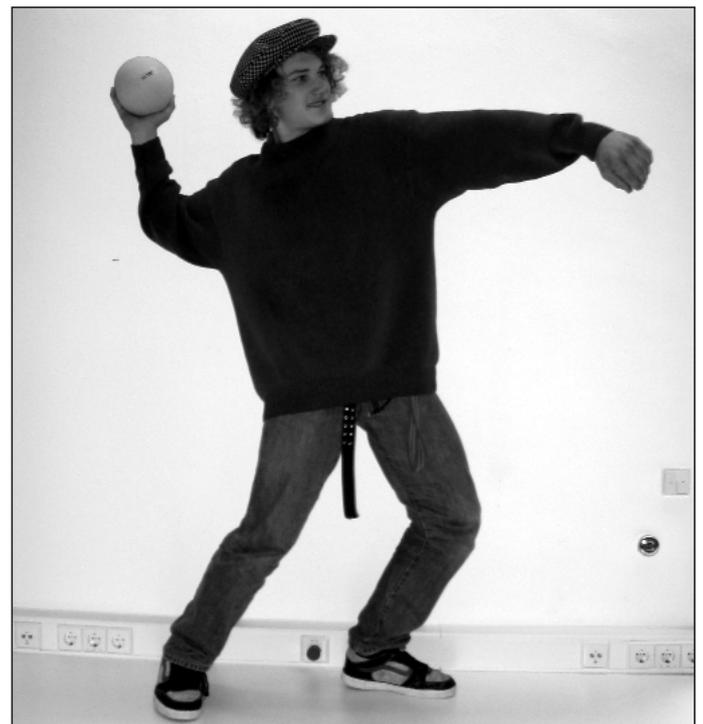
Anmerkungen

Interessant wäre das in der Tragwerksplanung verwendete Verfahren, in dem Kraftflüsse betrachtet werden, für den weiterführenden Physikunterricht z. B. durch entsprechende Simulationsprogramme nutzbar, zu machen.

5 Die Abgrenzung von Impuls und Energie

Historisch war es ein langer Streit, ob mv oder mv^2 die für die Mechanik charakteristische Erhaltungsgröße ist. Erst allmählich war die Begriffsbildung so weit fortgeschritten, dass klar wurde, dass es sich hierbei um zwei verschiedene Erhaltungsgrößen handelt, nämlich um die Energie und um den Impuls. Dies ist auch heute noch, besonders für einen Anfänger, in vielen Bereichen ein Problem. An jedem Energietransport sind bekanntlich verschiedene physikalische Größen beteiligt, die zunächst schwer zu unterscheiden sind. Physikalisch betrachtet, strömt Energie nie allein, bzw. wird nie allein ausgetauscht, sondern immer mit einer zweiten physikalischen Größe zusammen. Diese zweite Größe kennzeichnet die „äußere Erscheinungsform“ des Energietransports. Ein wesentliches Ziel des Unterrichts muss sein, die Energie klar von diesen Größen zu unterscheiden. Die Schülerinnen und Schüler sollen erkennen, dass Energie nicht Schwingung, Licht, Zucker, Strom, ... ist oder physikalisch genauer, dass Energie nicht Impuls, Elektrizität, Drehimpuls, Entropie, ... ist. Damit die Schülerinnen und Schüler in einem Anfangsunterricht diesen Unterschied bildhaft erleben können, wurde der in Abb. 10 dargestellte Versuchsaufbau [11] entwickelt: Eine mit einem Netzgerät verbundene Pumpe (1) treibt Wasser an, das Wasser einen „Wassergenerator“ (2) und dieser einen

Abb. 12: Der Impuls strömt vom Boden, die Energie von den Muskeln in die Kugel.



elektrischer „Lüfter“ (3). Ist im vorhergegangenen Unterricht geklärt, dass ein Propeller zum Antrieb Energie benötigt ([8] und [12]), kann der „Weg“ der Energie zurückverfolgt werden: sie kommt vom „Wassergenerator“, von der Pumpe, vom Netzgerät bzw. von einem Kraftwerk, ... Die Energie ist das, was durch alle Stationen hindurch geht. Dies wird durch die Energiepfeile symbolisiert (Abb. 11). Auf diese Weise wird der „Erhaltungsaspekt“ der Energie betont. Das Wasser dagegen nimmt *einen anderen Weg*: es strömt im Kreis. Deshalb werden zwischen Pumpe und Turbine zwei Schläuche benötigt. Das *zentrale Kriterium*, durch das wir die Energie und die zweite am Energietransport beteiligte physikalische Größe unterscheiden ist:

- Energie und die zweite am Energietransport beteiligte Größe nehmen oft *unterschiedliche Wege*.

Wir plädieren dafür, den Energiebegriff vor der Behandlung der Mechanik im Unterricht einzuführen. Für die frühzeitige Einführung der Energie spricht, dass die Energie die physikalische Größe ist, die nicht nur in fast allen Gebieten der Physik sondern auch der anderen Naturwissenschaften von zentraler Bedeutung ist [8]. Außerdem hat dies den Vorteil, dass der in der Mechanik neu eingeführte Impulsbegriff an geeigneter Stelle von dem schon bekannten Energiebegriff unterschieden werden kann. Der Unterschied von Energie und Impuls wird besonders deutlich, wenn wir die Stellen des mechanischen Energietransportes betrachten, an denen die Energie und der Impuls *verschiedene Wege* nehmen. Beim Abstoßen des Balles (Abb. 12), kommt die Energie von den Muskeln, der Impuls aus der Erde. Der Muskel hat die Funktion einer „Impulspumpe“. Beim Abbremsen des Autos (Abb. 13), fließt der Impuls in die Erde, die Energie bleibt in den Bremsen stecken, die Bremsen werden warm. Die Bremse hat die Funktion eines „Impulswiderstandes“. Beim Windkraftwerk, das auf einen Eisenbahnwagen gebaut ist (Abb. 14), strömt der Impuls durch die gespannte Feder ab, die Energie jedoch zur Leuchtdiode [13]. Das Windkraftwerk hat die Funktion eines „Energieumladers“: die Energie wird von Impuls auf Elektrizität umgeladen. In Abschnitt 6.5 werden wir darauf noch detaillierter eingehen.

6 Skizze der Einführung des Impulsbegriffs im Anfangsunterricht

6.1 Einführendes Beispiel

Auf einem Arbeitsblatt [7] ist der in Abb. 15 beschriebene Text dargestellt. Die Schülerinnen und Schüler sollen miteinander die Frage diskutieren „Warum konnte das Schiff nicht abbremsen, obwohl es doch noch 450 m vom Eisberg entfernt war?“. Als Antwort kommt oft sinngemäß: „Das Schiff hatte zu viel Schwung. Es konnte seinen Schwung nicht schnell genug loswerden.“ Damit ist das Thema der nun folgenden Einheit genannt: der Schwung ist das, was physikalisch genauer untersucht werden soll.

6.2 Schwung, Wucht, Impuls

Es werden die unterschiedlichsten Gegenstände aus der Erfahrungswelt der Schülerinnen und Schüler daraufhin untersucht, unter welchen Bedingungen sie viel oder wenig „Schwung“ oder „Wucht“ haben. Interessant sind u. a. die in Abb. 16 dargestellten Gymnastikbälle [14]: obwohl sie

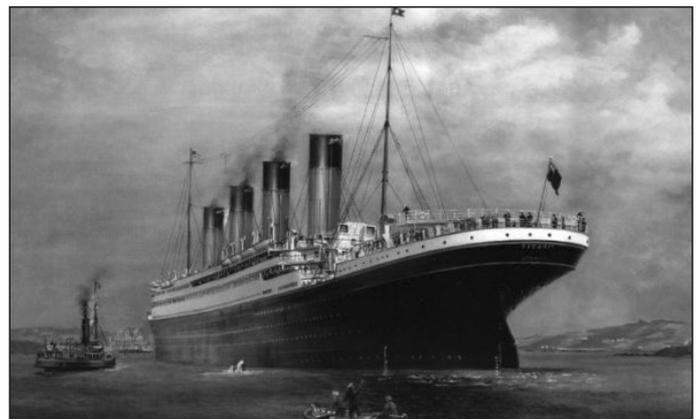
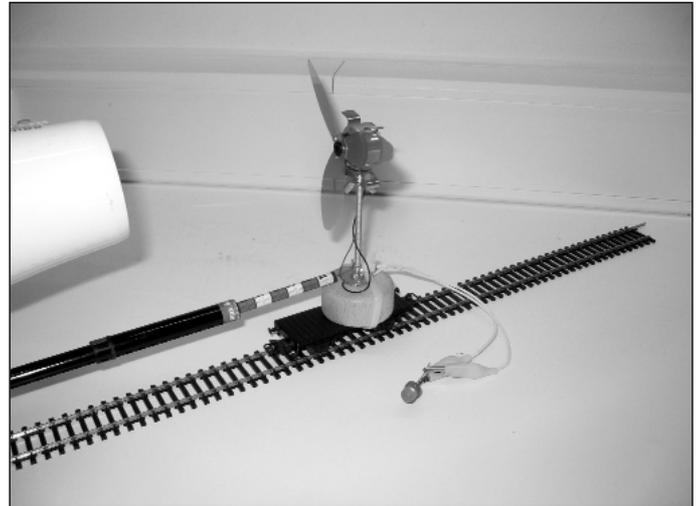
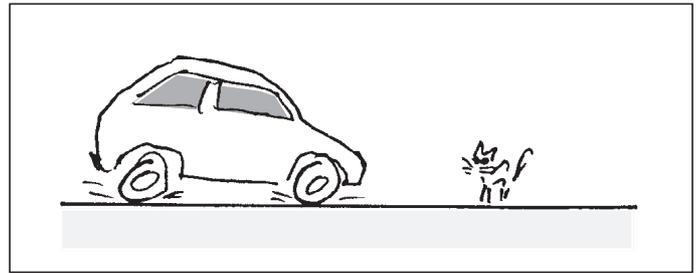


Abb. 13 (oben): Beim Abbremsen strömt der Impuls in die Erde, die Energie bleibt in den Bremsen stecken.

Abb. 14 (Mitte): Der Impuls fließt über die gespannte Feder ab, die Energie mit dem elektrischen Strom weiter zur Leuchtdiode.

Abb. 15 (unten): „Warum bremst die Titanic nicht einfach ab?“ In diesem Augenblick hatte die Titanic eine Entfernung von etwa 450 m zum Eisberg und fuhr mit einer Geschwindigkeit von 22 Knoten, das entspricht etwa 41 km/h, auf ihn zu. Mit starrem Blick sieht die Mannschaft auf den herannahenden Eisberg. Nur langsam beginnt sich das 60 000 t schwere Schiff zu drehen und seine Geschwindigkeit zu verringern.

äußerlich fast gleich aussehen, spüren die Schülerinnen und Schüler beim Fangen des einen Balls, dass er eine viel größere Wucht hat als der andere, bzw. beim Abwerfen, dass der eine Ball viel mehr Schwung braucht als der andere.

Das Ergebnis vielfältiger Betrachtungen ist, dass

- alles, was sich bewegt „Schwung“, „Wucht“ hat, auch strömende Luft, strömendes Wasser,
- dass, je schneller ein Körper sich bewegt und
- je schwerer er ist, er umso mehr „Schwung“, „Wucht“ hat.

Diese Aussagen sollen mithilfe der physikalischen Fachsprache genauer gefasst werden.



Abb. 16: Zwei „äußerlich“ sehr ähnlich aussehende Gymnastikbälle ($m_1 = 2000$ g, $m_2 = 300$ g)

- Das, was wir in der Alltagssprache „Schwung“ bzw. „Wucht“ nennen, wird in der Physik Impuls genannt. Der Impuls eines Körpers ist umso größer,
- je größer seine Geschwindigkeit ist und
- je größer seine Masse ist.

Anmerkungen

1. Der Unterschied von Alltags- und Fachsprache sollte im Unterricht erläutert werden. Dabei sollte die Alltagssprache nicht abgewertet, sondern die Verschiedenheit bewusst gemacht werden. Im Physikunterricht sollte die Verbindung zur Alltagssprache gepflegt werden, an entscheidenden Stellen jedoch die Benutzung der Fachsprache gefordert werden. Abb. 17 zeigt einen Text, der im Unterricht einer 9. Klasse mit den Schülerinnen und Schülern zusammen formuliert wurde.
2. Die Masse wird zunächst nur als die Eigenschaft eines Körpers eingeführt, die in kg gemessen wird. An späterer Stelle wird dann der physikalische Massebegriff weiter präzisiert.
3. Wir verzichten an dieser Stelle bewusst den Impuls als Masse \cdot Geschwindigkeit zu quantifizieren, da die genauen Werte des Impulses, den ein bewegter Körper hat, hier keine sinnvolle Rolle spielen. Die qualitativen „je-desto“-Beziehungen genügen, um den physikalischen Impulsbegriff weiter zu schärfen und mit entsprechenden Alltagserfahrungen in Verbindung zu bringen.

Abb. 17: Der Zusammenhang von Alltags- und der Fachsprache

Zur physikalischen Fachsprache

Die „physikalische Fachsprache“ benützt in der Regel Worte unserer Umgangssprache, aber oft in einem etwas anderen Sinn. Es gelingt so die Sachverhalte physikalisch genauer auszudrücken. Diese Sprache wollen wir im Unterricht üben.

Beispiel:

Alltagssprache: „Der Gasbrenner *erwärmt* das Wasser.“

Fachsprache: „Dem Wasser wird Energie zugeführt. Dabei steigt die Temperatur bis zum Sieden, danach bleibt sie gleich, bis das Wasser ganz verdampft ist.“

6.3 Weitere Eigenschaften des Impuls

Im Folgenden werden durch systematisches Beobachten alltäglicher Erscheinungen weitere Eigenschaften des Impulses herausgearbeitet. Das können die Schülerinnen und Schüler etwa in einen Lernzirkel selbstständig tun. Die Ergebnisse seien im Folgenden übersichtsartig zusammenfassen.

- Eine Münze wird mit den Fingern auf verschiedenen Unterlagen weggeschnippt. Unter welchen Bedingungen kommt sie möglichst weit? Warum gibt es zwar Eisstockschießen (Abb. 18) aber kein Grasstockschießen? *Je reibungsfreier sich ein Körper bewegt, desto länger behält er seinen Impuls bei.*
- Eine Münze wird mit den Fingern auf eine andere Münze geschnippt. Ein bewegter Eisenbahnwagen fährt auf einen ruhenden (Abb. 5), eine bewegte Kugel stößt auf eine ruhende (Abb. 4). *Impuls kann von einem Körper auf einen anderen übergehen.*
- Ein bewegter Eisenbahnwagen fährt so auf einen ruhenden, dass die Kupplung einrastet und beide Wagen miteinander verbunden weiterfahren (Abb. 19). *Der Impuls eines Körpers kann sich auf mehrere Körper verteilen.*

Wie in der Elektrizitätslehre können diese Eigenschaften des Impulses, durch Analogiebetrachtungen vertieft werden. Die in Abb. 20 dargestellte Tabelle kann im Unterricht von den Schülerinnen und Schülern in Teamarbeit selbstständig erarbeitet oder, wenn sie teilweise ausgefüllt vorgegeben ist, selbstständig ergänzt werden.

Anmerkungen

Im Weiteren werden wir der Elektrizitätslehre entsprechend die Strömungsvorstellung auch in der Mechanik verwenden und sagen: Beim Stoß fließt Impuls von dem einen Körper in den anderen hinein. Natürlich kann die Mechanik, in der der Impuls im Zentrum steht, auch ohne dieses Strömungsbild sinnvoll und erfolgreich unterrichtet werden. Die Bildungsstandards Baden-Württemberg überlassen dies der methodischen Freiheit des Lehrers.

6.4 Wo kommt der Impuls her, wo geht er hin?

Fahren zwei gleiche Eisenbahnwagen, deren Kupplungen einrasten können, mit derselben Geschwindigkeit aufeinander zu, so bleiben beide stehen. Entsprechendes kann in anderen Versuchen festgestellt werden. Verschwindet hier durch den Stoß der Impuls der beiden Wagen, löst er sich einfach auf? Das könnte sein. Es gibt aber noch eine andere Möglichkeit, die wir zunächst als „Arbeitshypothese“ annehmen wollen:

- Der Impuls kann hier nicht einfach addiert werden, so dass $1 + 1 = 2$ ergibt. Zwei Zahlen können jedoch so addiert werden, dass ihre Summe Null ist, wenn sie unterschiedliches Vorzeichen haben. Dann gilt $1 + (-1) = 0$. Bewegen sich Körper entgegengesetzt so haben sie entgegen gesetztes Vorzeichen. Der Elektrizitätslehre entsprechend wollen wir das Vorzeichen des Impulses willkürlich festzulegen: wie in der Mathematik üblich, soll das Vorzeichen des Impulses *positiv* sein, wenn sich der Körper nach *rechts* bewegt.

Ein Auto bremst ab und kommt zum Stehen (Abb. 13). Was passiert mit dem Impuls? Verschwindet er? Ein Auto beschleunigt, sein Impuls wird größer. Wo kommt der Im-



Abb. 18: Warum gibt es kein „Grasstockschießen“?



Abb. 19: Der bewegte Eisenbahnwagen kuppelt ein, der Impuls verteilt sich auf beide Wagen.

puls her? Wird er beim Beschleunigen erzeugt? „Isolieren“ wir ein ferngesteuertes Modellauto vom Boden, indem wir es auf ein leichtes Holzbrett auf Papprollen stellen (Abb. 21), so stellen wir fest:

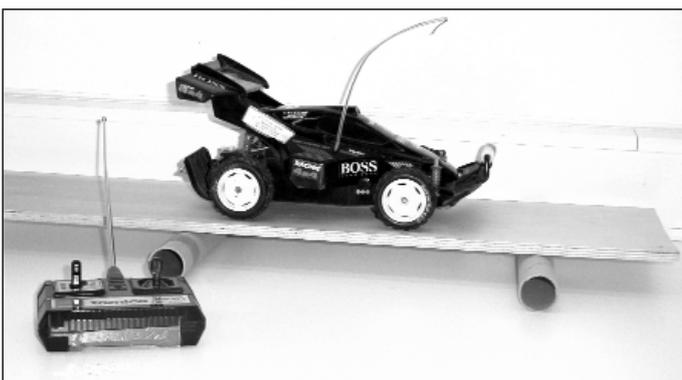
- Beim Beschleunigen des Autos wird gleichzeitig die „Fahrbahn“ in die entgegen gesetzte Richtung beschleunigt.
- Beim Abbremsen des Autos wird die bewegte „Fahrbahn“ wieder abgebremst.

Interpretieren wir die Versuche mit unserem Impulskonzept, so kommen wir zu dem folgenden Ergebnis:

- Wird das Auto nach rechts beschleunigt, bekommt es positiven Impuls, die „Fahrbahn“ negativen. Das Auto macht „Impulsschulden“ bei der Fahrbahn; beim Beschleunigen fließt Impuls aus der „Fahrbahn“ in das Fahrzeug. Der Motor des Autos hat die Funktion einer „Impulspumpe“.
- Wird das Auto wieder abgebremst, so gibt es seinen positiven Impuls ab, der negative Impuls der „Fahrbahn“ wird gleichzeitig kleiner, die „Impulsschulden“ werden beglichen, der Impuls fließt beim Abbremsen in die „Fahrbahn“ zurück.

Beschleunigt und bremst das Auto statt auf der „Fahrbahn“ auf dem Erdboden, dann ist es genauso: es strömt Impuls aus der Erde in das Auto und umgekehrt. Die Masse der Erde ist so gewaltig, dass die „Impulsschulden“

Abb. 21: Die Fahrbahn ist „impulsisoliert“!



Impuls

Ein Körper hat einen großen Impuls.

Ein Körper enthält um so mehr Impuls, je größer seine Geschwindigkeit und je größer seine Masse ist.

Je reibungsfreier sich ein Körper bewegt, desto länger bleibt der Impuls in ihm.

Impuls kann von einem Körper auf einen „übergehen“, von einem zum anderen „fließen“.

Der Impuls kann sich auf mehrere Körper verteilen.

Wasser

In dem Behälter befindet sich viel Wasser.

Ein Behälter enthält um so mehr Wasser, je größer seine Füllhöhe und je größer seine Breite ist.

Je „dichter“ ein Behälter ist, desto länger bleibt das Wasser in ihm.

Wasser kann von einem Behälter in einen anderen fließen bzw. strömen (siehe Abb. 6).

Wasser kann sich auf mehrere Behälter verteilen.

Abb. 20: Eine erste Analogie von Impuls und Wasser

bzw. das „Impulsguthaben“ das beim Beschleunigen und Abbremsen entstehen, nicht wahrgenommen werden kann. Bei dem in Abb. 22 dargestellten Raketenfahrzeug trägt das nach hinten weg gesprühte Wasser die Impulsschulden, die der Wagen beim Beschleunigen machen muss.

Wir fassen die wichtigsten Ergebnisse dieses Abschnitts zusammen:

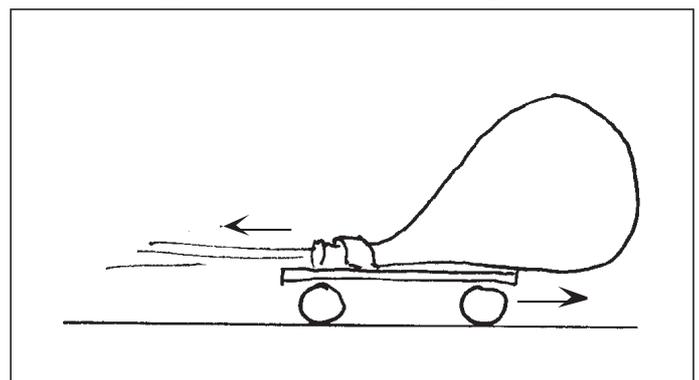
- nimmt der Impuls eines Körpers zu, so kommt er immer von irgendwo her,
- nimmt der Impuls eines Körpers ab, so geht er immer irgendwo hin.

Dies haben alle bisherigen physikalischen Untersuchungen gezeigt, so dass wir davon überzeugt sind, dass Impuls weder erzeugt noch vernichtet werden kann. Somit hat sich unsere oben eingeführte „Arbeitshypothese“ bewährt.

Anmerkungen

An dieser Stelle sollte die Tatsache, dass die Impulswerte verschiedenen Vorzeichen haben können, klar werden, jedoch nicht zu streng formalisiert werden. Es kann auch zunächst auf die Festlegung der positiven Richtung ganz verzichtet werden und nur deutlich gemacht werden, dass das Vorzeichen der Impulswerte entgegengesetzt ist, wenn die Bewegungsrichtung der Körper entgegengesetzt ist.

Abb. 22: Das weggeschleuderte Wasser trägt die Impulsschulden



6.5 Der Zusammenhang von Impuls und Kraft

Wir kommen auf unsere Ausgangsfrage zurück: „Warum konnte die Titanic nicht abbremsen, obwohl sie doch noch 450 m vom Eisberg entfernt war?“ Wir können nun antworten: „Die Titanic hatte zu viel Impuls, sie konnte ihn nicht schnell genug abgeben!“ Es entsteht dann die Frage, warum der Impuls nicht schnell genug abgegeben werden konnte. Eine Antwort könnte sein, dass die Schiffsmotoren zu schwach waren. Mit kräftigeren Motoren, hätte das Unglück vielleicht vermieden werden können.

Damit der Bremsweg des Autos in Abb. 13 klein genug ist, muss die Bremskraft stark genug sein. Damit ein Auto stark beschleunigen kann, muss der Motor kräftig sein.

In allen Beispielen kommt es darauf an, dass der Impuls „schnell“ aufgenommen, bzw. abgegeben wird. Im Alltag spricht man in diesem Zusammenhang oft von „Antriebskraft“ und „Bremskraft“. Den Zusammenhang von Kraft und Impuls können wir zunächst eher alltagssprachlich so formulieren:

- Je größer die Antriebs- bzw. Bremskraft ist, die auf einen Körper einwirkt, des schneller wird der Impuls vom Körper aufgenommen bzw. abgegeben.

Um diese Aussage physikalischer schärfer zu formulieren, muss der „Kraftbegriff“ eine physikalische Bedeutung bekommen. Die Schülerinnen und Schüler sollten an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass die alltagssprachliche Bedeutung von „Kraft“ erheblich von der physikalischen abweicht. Dies muss durch den folgenden Unterricht an den entsprechenden Stellen schrittweise verdeutlicht werden.

Formulieren wir den Zusammenhang von Kraft und Impuls physikalisch präziser, so ergibt sich:

- Je größer die Kraft ist, die auf einen Körper einwirkt, desto mehr Impuls wird pro Zeiteinheit vom Körper aufgenommen bzw. abgegeben.

Verwenden wir die Strömungsvorstellung, so können wir dieses Ergebnis auch folgendermaßen formulieren:

- Je größer die Kraft ist, die auf einen Körper einwirkt, desto mehr Impuls strömt pro Zeiteinheit in den Körper hinein bzw. aus dem Körper hinaus.

Wurde im Unterricht an früherer Stelle, z. B. im Zusammenhang mit Wasserströmen und elektrischen Strömen, der Begriff „Stromstärke“ eingeführt, so kann an dieser Stelle darauf verwiesen werden („kumulatives Lehren“) und entsprechend formuliert werden:

- Je größer die Kraft ist, die auf einen Körper einwirkt, desto größer ist die Stärke des Impulsstroms, der in den Körper hinein bzw. aus dem Körper hinaus.

Dann wird deutlich, dass Kraft und Impulsstromstärke zwei verschiedene Bezeichnungen für dieselbe physikalische Größe sind.

Anmerkungen

Im folgenden Unterricht muss nun der physikalische Kraftbegriff geschärft werden. Je nach dem gewählten didaktischen Weg wird dies auf unterschiedliche Weise geschehen: Die Verformung von Körpern zeigt an, ob eine Kraft wirkt, ob und wie viel Impuls hindurch strömt. Mit einer geeichten Feder („Newtonmesser“) kann die Kraft, die Impulsstromstärke, quantifiziert werden. Bleibt man zunächst im qualitativen, so kann formuliert werden:

- je stärker die Feder gedehnt ist, desto größer ist die Kraft, desto mehr Impuls strömt pro Zeiteinheit durch die Feder hindurch.

Es würde den Rahmen dieses einführenden Aufsatzes sprengen, den weiteren Unterrichtsgang detailliert darzustellen. Es sei stattdessen hingewiesen auf [4] und [7]. Dort ist dies auf unterschiedliche Weise geschehen.

Anmerkungen

Dass das „Schwerefeld“ der Erde u. a. die Rolle eines Impulsleiters hat, kann ohne Probleme im Anfangsunterricht behandelt werden: Wird ein Körper los gelassen, beginnt er zu fallen, er wird immer schneller. Daran erkennen wir, dass sein Impuls beim Fallen zunimmt. Woher kommt dieser Impuls? Da der Körper von der Erde angezogen wird, wirkt das Schwerefeld der Erde wie eine gespannte Feder, die die beide Körper aufeinander zu bewegt. Da die Masse der Erde so gewaltig groß ist, wird sie dabei nicht wahrnehmbar beschleunigt. Es wird somit deutlich,

- dass Impuls durch das „Schwerefeld“ der Erde, von der Erde in den fallenden Körper hineinströmt.

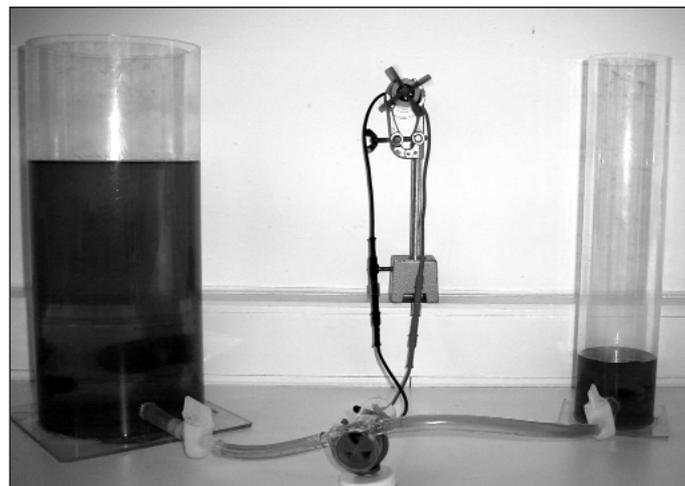
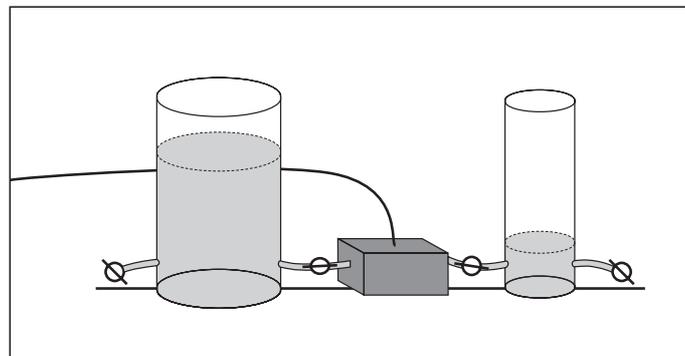
Bei dieser Formulierung wurde das Vorzeichen des nach „unten“ gerichteten Impulses als positiv festgelegt, da so die Sprechweise bei Fallvorgängen erleichtert wird. Durch solche Betrachtungen wird eine physikalische Grundlage geschaffen, um etwa das Phänomen des Fliegens im Anfangsunterricht mithilfe von Impulsbilanzen physikalisch verstehen zu können [15].

6.6 Der Zusammenhang von Impuls und Energie

„Warum muss der Akku des Modellautos geladen sein, damit es beschleunigen kann? Der Impuls kommt doch aus

Abb. 23 (oben): Energie und Wasser haben unterschiedliche Wege

Abb. 24 (unten): Das Wasser strömt von einem Behälter zum anderen, die Energie strömt zum Motor.



der Erde und nicht aus dem Akku?“ Diese Frage kann der Einstieg für die folgende Unterrichtssequenz sein. Die Schülerinnen und Schüler wissen, dass im Akku Energie gespeichert ist und dass Energie zur Fortbewegung benötigt wird. Die Energie des Akkus treibt den Motor, die „Impulspumpe“ an, so dass der Impuls aus dem Erdboden ins Auto hineinfließen kann. Im bewegten Auto ist dann außer dem Impuls Energie gespeichert. Beim Abbremsen fließt der Impuls in die Erde, die Energie bleibt aber in den Bremsen „stecken“, diese werden warm. Moderne Autos verwenden zum Abbremsen einen Dynamo und speichern die beim Bremsen „freiwerdende“ Energie in einem Akku. Diese Energie wird dann mithilfe eines Elektromotors zum Wiederbeschleunigen mit verwendet. Der Unterschied und der Zusammenhang von Energie und Impuls wird, wie in Abschnitt 5 beschrieben, besonders deutlich, wenn möglichst viele Beispiele besprochen werden, in denen Energie und Impuls unterschiedliche Wege nehmen. Dafür kann neben dem in Abb. 3 dargestellten Energieträger-Stromkreis auch die in Abb. 23 dargestellte Versuchsanordnung [11] hilfreich sein: Die Wasserpumpe pumpt Wasser aus dem einen Gefäß in das andere, die Energie bekommt die Pumpe mithilfe der Elektrizität. So wie hier Wasser und Energie nehmen Impuls und Energie beim Beschleunigen verschiedene Wege: der Impuls kommt aus der Erde, die Energie aus dem Benzin. Wird statt der Pumpe ein Wassergenerator eingebaut (Abb. 24), so kann dieser Versuch dem „Abbremsen“ entsprechend in umgekehrter Richtung durchgeführt werden: der Wassergenerator lädt die Energie vom Wasser. Die Energie fließt vom Generator zum Propeller, das Wasser von dem einen Behälter in den andern zurück, so wie beim Abbremsen eines Fahrzeugs die Energie in die Bremse und der Impuls in die Erde zurück strömt.

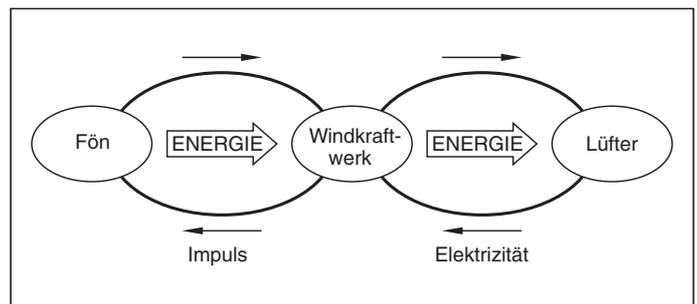
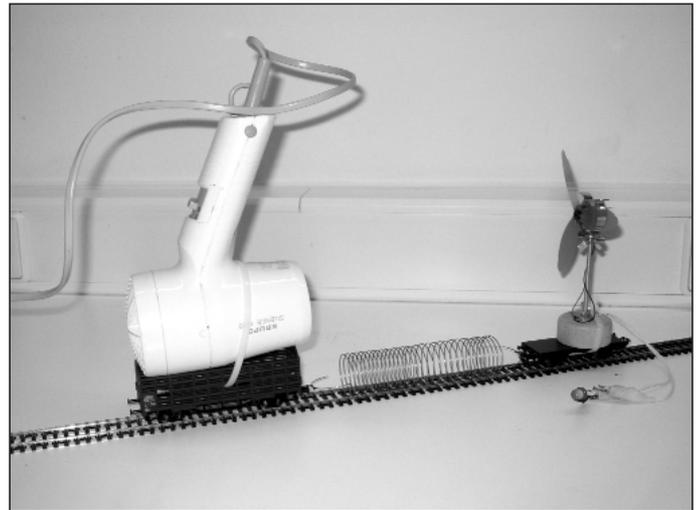


Abb. 25 (oben): Vergleiche diese Versuchsanordnung mit einem elektrischen Stromkreis!

Abb. 26 (unten): Energie strömt mit Impuls bis zum Windkraftwerk. Dort wird Energie vom Impuls auf Elektrizität umgeladen, ... aber: nicht der ganze Impuls fließt zurück ...

7 Abschließende Betrachtungen

Im weiteren Unterricht werden die hier eher qualitativ eingeführten Größen schrittweise quantisiert. Dies sollte möglichst anhand sinnvoller Fragen geschehen, wie etwa „Ein neu zu konzipierendes Auto soll eine bestimmtes Beschleunigungsvermögen haben. Wie groß muss die Kraft sein, mit der der Motor beschleunigen kann?“ oder „Wie viel Energie kann durch eine „Dynamobremse“ eingespart werden?“ oder „Wie kann aus der Bremsspur eines Autos die Geschwindigkeit berechnet werden, die es vor dem Abbremsen hatte“ oder Dabei wird die Differenzierung der beteiligten physikalischen Größen schrittweise weiter voranschreiten. Der auf diese Weise stattfindende Begriffsbildungsprozess entspricht dem in [2] beschriebenen Weg des menschlichen Spracherwerbs: die Begriffe werden immer schärfer differenziert indem immer weitere Verbindungen zwischen den einzelnen Begriffen erkannt werden. Der Begriffsbildungsprozess kommt deshalb nie zu einem Ende.

Werden Elektrizitätslehre und Wärmelehre wie in [8] und [12] beschrieben unterrichtet, so werden für die Schülerinnen und Schüler vielfältige Analogien zwischen der Mechanik und den anderen Gebieten erkennbar; es entstehen neue Fragen und es werden neue Verbindungen erkannt (Abb. 25 und 26). Das auf diese Weise entstehende begriffliche Netz wird dabei durch jede neue Verbindung, durch jedes neu behandelte Beispiel, kraftvoller und als Ganzes gestärkt.

Literatur und Bezugsquellen

- [1] www.bildungsstandards-bw.de unter Gymnasium, Physik
- [2] *Manfred Spitzer*: Lernen, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg 2002
- [3] *Friedrich Herrmann*: Altlasten der Physik (74): Einheit – Gleichheit – Vielfachheit; Praxis der Naturwissenschaften Physik 4/53, Juni 2004
- [4] *Friedrich Herrmann*: Der Karlsruher Physikkurs, Aulis Verlag Köln
- [5] *Isaac Newton*: Mathematische Prinzipien der Naturlehre; Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt 1963
- [6] *Franz Kranzinger*: Umsetzungsbeispiele zu den Bildungsstandards Physik, Leuheft Ph 38.1, Stuttgart 2004. Zu beziehen unter www.leu.bw.schule.de/allg/publikationen
- [7] Impulse Physik Baden-Württemberg Band 1; Klettverlag Stuttgart, 2004
- [8] *Dieter Plappert*: Verständliche Elektrizitätslehre, Praxis der Naturwissenschaften Physik 7/52, Oktober 2003
- [9] *M. Jennewein*: Das Modellieren des Tragwerks als Stabwerk; Betonkalender 2001/Teil 2, Ernst und Sohn Verlag Berlin
- [10] *Joao Fonseca*: Zum Bemessen und Konstruieren von Stahlbetonplatten und -scheiben mit Lastpfaden; Dissertation Universität Stuttgart, 1995
- [11] Analogieserie zu beziehen bei: Conatex, Postfach 1407, 66514 Neunkirchen, 06821/94110, www.conatex.com
- [12] Dieter Plappert: Kumulatives Lernen – die Bildung des Entropiebegriffs in Sekundarstufe I, Praxis der Naturwissenschaften Physik 4/53, Juni 2004
- [13] Versuchsanleitung des Bausatzes „Energiewerke“, durch den handlungsorientiert der Energiebegriff eingeführt werden kann, unter www.plappert-freiburg.de/physik Bestellung unter www.opitec.de Bausatz Nr. 123.987 zu 12,90 €
- [14] „Heavymed“ PVC-Medizinbälle, bis 3 kg bei 17 cm Durchmesser; im Sanitätshandel erhältlich.
- [15] *Klaus Weltner*: Flugphysik; MNU 55, 2002, Heft 7, Bildungsverlag Eins, Troisdorf

Anschrift des Verfassers:

StD *Dieter Plappert*, Staatliches Seminar für Didaktik und Lehrerbildung, Kunzenweg 21, 79117 Freiburg