

Intelligentes Wissen aufbauen

Strukturen und Analogien für eine nachhaltige Physiklehre nutzen

Peter Schmälzle

Die aktuellen Bildungsstandards sollen gewährleisten, dass der Unterricht an Schulen nachhaltiger wird. Dazu bedarf es „intelligenten Wissens“, das sich aufbauen lässt, wenn die Schülerinnen und Schüler Strukturen erkennen und damit verbundene Analogien ausnutzen.

Die Ergebnisse der internationalen TIMSS- und PISA-Studien haben in der deutschen Bildungspolitik eine breite Diskussion über den naturwissenschaftlichen Unterricht ausgelöst. Aber bereits vor diesen Studien waren Mängel im Lernerfolg in den naturwissenschaftlichen Fächern – und insbesondere in der Physik – bekannt. Heinz Muckenfuß bezeichnete auf Basis empirischer Studien 1995 den naturwissenschaftlichen Unterricht, besonders den Physikunterricht, als katastrophal [1].

Mögliche Ursachen für die geringe Nachhaltigkeit des Physikunterrichts fand Martin Wagenstein schon 1971. Er beklagte die zu große Stofffülle, als deren Konsequenz das Ergebnis des Unterrichts oft in „Formelfragmenten und Satztrümmern“ bestehe [2]. Bei der Analyse der Sprache im Physikunterricht und in Schulbüchern kam Gottfried Merzyn zu dem Ergebnis, dass Schülerinnen und Schüler sich im Physikunterricht in jeder Unterrichtsstunde mit durchschnittlich neun neuen Fachbegriffen auseinandersetzen müssen. Außerdem weisen (ältere) Physikbücher bis zu 2000 Fachbegriffe auf, von denen rund die Hälfte nur an einer Stelle vorkommen [3].

Dennoch setzte erst nach den TIMSS- und PISA-Studien eine breite öffentliche Diskussion ein. Als Folge davon veröffentlichte die Kultusministerkonferenz 2004 Bildungsstandards für den Mittleren Bildungsabschluss in den



Johannes Simon/ddp

Die Ergebnisse der TIMSS- und PISA-Studien haben die Diskussion um nachhaltigen Unterricht ausgelöst.

naturwissenschaftlichen Fächern [4]. Während zuvor die verbindlichen Inhalte des Unterrichtsfachs im Vordergrund standen, geben die Bildungsstandards und die neuen landesweit gültigen Bildungspläne nun vor, über welche Kompetenzen Schülerinnen und Schüler am Ende des Unterrichts verfügen sollen. Dabei sind die vier Kompetenzbereiche Fachwissen, Erkenntnisgewinnung, Kommunikation und Bewertung ausgewiesen, sodass das reine Faktenwissen an Gewicht verliert. Das ist ganz im Sinne der Forderung Franz Weinerts nach intelligentem Wissen. Darunter versteht er Wissen, das nicht „tot“ im Gedächtnis liegt, nicht „verlötet“ ist mit der Situation, in der es erworben wurde, sondern das lebendig, flexibel nutzbar, eben intelligent ist [5]. Intelligentes Wissen zu erwerben sieht Weinert als wichtigste Aufgabe des Bildungssystems und des lebenslangen Lernens an.

Entsprechend findet man in den „Leitgedanken zum Kompetenzerwerb“ der Bildungsstandards Physik für das Gymnasium in Baden-Württemberg die Vorgabe: „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“ [6]. Weiter fordern die Standards für die Klasse 10 in Physik: „Strukturen erkennen und Analogien hilfreich einsetzen“.

Energie als ordnende Größe

Ausgangspunkt für die Strukturierung durch Analogien ist die didaktische Entscheidung, der Energie eine herausragende Rolle zukommen zu lassen. Das ist im Einklang mit den Bildungsstandards, welche die Energie als „Basiskonzept“ ausweisen. Die Bedeutung der Energie in der Schulphysik hat in den letzten dreißig Jahren geradezu dramatisch zugenommen. In den 70er-Jahren stand die Energie noch im Schatten der Arbeit, die im Mechanikunterricht zuerst eingeführt wurde. Die Energie wurde dann definiert als Fähigkeit, Arbeit zu verrichten. Das hat sich entscheidend verändert. Aktuelle Schulphysikbücher gehen auf die Arbeit – wenn überhaupt – nur noch am Rande ein. Dabei führen sie die Arbeit auf Energie zurück, z. B. als Bezeichnung für die mittels einer Kraft längs eines Weges

Dr. Peter Schmälzle,
Staatliches Seminar
für Didaktik und Lehrer-
bildung (Gymna-
sium), Jahnstr. 4,
76133 Karlsruhe

gelieferte Energie [7]. Diese Akzentverschiebung ist aus physikalischer Sicht zu begrüßen, schließlich ist die Energie in den traditionellen Teilgebieten Mechanik, Elektrizitäts- und Wärmelehre sowie in der modernen Physik von zentraler Bedeutung. Mit der Energie gelingt es, die Schulphysik zu strukturieren, was zu der Hoffnung berechtigt, dass Physik dadurch für Schüler überschaubarer wird.

Dennoch wird diese Möglichkeit der Strukturierung selten genutzt. Beim Thema Energieübertragung in elektrischen Stromkreisen ist der Zusammenhang $P = U \cdot I$ ein Ziel des Unterrichts. Die Energiestromstärke bzw. Leistung P ist häufig aus der Mechanik bekannt. Die elektrische Stromstärke I , die elektrische Spannung U (evtl. das Potential ϕ [8]) und den elektrischen Widerstand lernen die Schüler meist unmittelbar zuvor bei der Untersuchung elektrischer Stromkreisprobleme kennen. Jeder Lehrer, der dieses Thema einmal unterrichtet hat, weiß – und zahlreiche empirische Untersuchungen belegen das –, wie schwer es Schülerinnen und Schülern fällt, mit den abstrakten Größen elektrische Stromstärke und Spannung korrekt umzugehen. Deshalb sollen zwei didaktische Hilfsmaßnahmen das Verständnis erleichtern.

WAS AN WASSER- UND LUFTSTRÖMEN ZU ERKENNEN IST

Gesetzmäßigkeiten, die Schüler bei der Beschäftigung mit dem Strömen von Wasser und Luft erkennen können:

- Luft und Wasser strömen von selbst von Stellen hohen Drucks zu Stellen geringeren Drucks.
- Eine Druckdifferenz zwischen zwei Stellen treibt einen Luft- oder Wasserstrom an.
- Mit einer Luft- bzw. Wasserpumpe kann man Luft bzw. Wasser von Stellen geringeren zu Stellen höheren Drucks befördern.
- Die Wasserstromstärke gibt an, wie viel Wasser in jeder Sekunde an einer Stelle vorbeifließt.
- Im unverzweigten Stromkreis ist die Stromstärke an jeder Stelle gleich groß.
- Die zu einem Knotenpunkt hinfließenden Ströme haben zusammen dieselbe Stromstärke wie die wegfließenden.
- Je größer der Antrieb ist, desto größer ist die Stromstärke (bei vorgegebener Leitung).
- Jede Leitung setzt dem/der hindurchfließenden Wasser/Luft einen Widerstand entgegen.
- Der Widerstand einer Leitung ist umso größer, je länger die Leitung und je kleiner der Querschnitt der Leitung ist.

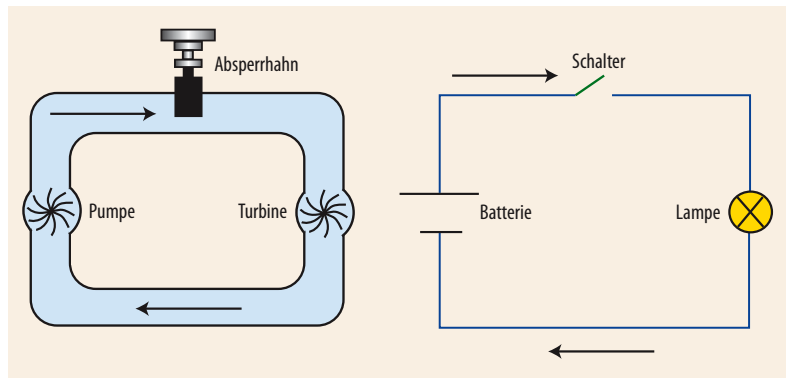


Abb. 1 Im Physikunterricht ist die Analogie zwischen einem Wasserstromkreis

und einem elektrischen Stromkreis etabliert.

Zum einen greifen Lehrer auf die „Wasserstrom-Analogie“ zurück, bei der sie den elektrischen Stromkreis mit einem geschlossenen Wasserstromkreis vergleichen (Abb. 1). Das soll helfen, die abstrakten Vorgänge in elektrischen Stromkreisen anschaulicher zu machen. Lehrbuchautoren schätzen diese Analogie als hilfreich ein, denn sie findet sich in allen gängigen Schulbüchern für die Sekundarstufe 1. Manche Didaktiker betrachten sie aber skeptisch, denn für den gewinnbringenden Einsatz von Analogien müssen die Schülerinnen und Schüler mit dem Analogbereich vertraut sein. Nur dann können sie Einsichten auf den Zielbereich übertragen. Mit Wasserstromkreisen haben sie meist keine Erfahrung. Daher warnen Duit und Glynn, dass es mehr Schaden als Nutzen bringen könne, das Wassermodell unkritisch zu verwenden [9]. Andere Autoren geben zu bedenken, dass Analogien immer auch einen Umweg bedeuten [10].

Die zweite didaktische Maßnahme ist eine besonders anschauliche Art der Beschreibung, bei der die Spannung als Antrieb für das Fließen des Stroms gedeutet wird. Auch der Widerstand R lässt sich in diese Beschreibung integrieren: Ein Antrieb für den elektrischen Strom ist erforderlich, weil jedes Gerät (und jede gewöhnliche Leitung) der hindurchfließenden Elektrizität einen Widerstand entgegengesetzt.

Diese Vorgehensweise ist charakteristisch für den Elektrizitätslehreunterricht der Sekundarstufe 1. Meist greifen Lehrer aber nur an dieser Stelle des gesamten Physikunterrichts auf die Analogie und

die spezielle Art der Beschreibung zurück. Doch vertun sie hier nicht eine Chance? Auch andere Themen bieten sich für diese Vorgehensweise an. Die zugrunde liegende Idee beruht darauf, dass sich unterschiedliche Energieübertragungen gleichartig beschreiben lassen. Bei der Energieübertragung in elektrischen Stromkreisen verbindet die Beziehung $P = U \cdot I$ den Energiestrom mit dem Ladungs- oder Elektrizitätsstrom. Energie und elektrische Ladung sind mengenartige (extensive) Größen. Das Bindeglied zwischen den beiden Stromstärken P und I ist die elektrische Spannung U . Sie legt fest, wie viel Energie mit einer Ladungsportion übertragen wird.

Weitere Analogien

All dies lässt sich auf den Unterricht der Wärmelehre übertragen. Kennzeichnend für die Wärmelehre sind Vorgänge, bei denen Energie zusammen mit Entropie übertragen wird. Auch der Stellenwert der Entropie hat in der Schule zugenommen. Die baden-württembergischen Bildungsstandards geben für das Gymnasium in Klasse 10 die Entropie verbindlich vor.

Mit Entropie lassen sich Energieübertragungen genauso beschreiben, wie Schülerinnen und Schüler das von der Elektrizitätslehre kennen. Auch die Entropie ist eine mengenartige Größe. Wie viel Energie ΔE mit einer Entropieportion ΔS übertragen wird, hängt von der absoluten Temperatur T ab: $\Delta E = T \cdot \Delta S$. Bei Vorgängen, bei de-



PhotoDisc, Inc.

Abb. 2 Aus dem Alltag sind effektive Kühlvorgänge bekannt. Dabei strömt Entropie aus dem warmen Getränk in die kalten Eiswürfel.

nen Energie und Entropie strömen, lautet die Beziehung zwischen den Stromstärken: $P = T \cdot I_S$.

Zudem ist es möglich, die Temperatur mit einer Antriebsvorstellung zu verbinden. Aufgrund zahlreicher Alltagserfahrungen wissen Schülerinnen und Schüler, dass sich erwärmte Gegenstände nach und nach abkühlen. Dabei wird Entropie – und damit auch Energie – an die kühlere Umgebung abgegeben. Ein Temperaturunterschied zwischen zwei Stellen wirkt somit als Antrieb für einen Entropiestrom (Abb. 2). Einfache Versuche machen deutlich, dass manche Materialien Entropie recht gut leiten, während andere ihr einen großen Widerstand entgegensetzen. Auf diese Weise funktioniert die anschauliche Antrieb-Stromstärke-Widerstand-Vorstellung in der Wärmelehre [11].

Auch im Mechanikunterricht lassen sich Energieübertragungen entsprechend beschreiben. Dabei wird Energie zusammen mit Impuls übertragen. Quantitativ lässt sich dies durch $P = v \cdot F$ beschreiben, wobei v die Geschwindigkeit ist und F die Kraft. Auf den ersten Blick scheint dieser Ausdruck nicht von der Bauart zu sein, die in der Elektrizitäts- und Wärmelehre verwendet wurde, um die Energie mit einer anderen mengenartigen Größe zu verknüpfen. Deutet man jedoch Newtons Gesetz $F = dp/dt$ zwischen Kraft und zeitlicher Änderung des Impulses p als eine Bilanzgleichung – wie man das in der Elektrizitätslehre üblicherweise für

$I = dQ/dt$ macht –, so kann die Kraft als Impulsstromstärke gelten. Damit ist $P = v \cdot F$ von derselben Bauart wie die analogen Beziehungen in der Elektrizitäts- und Wärmelehre. Jedes Mal sind dabei ein Energiestrom und der Strom einer anderen mengenartigen Größe verknüpft. Der Proportionalitätsfaktor zwischen den Stromstärken P und F ist mit der Geschwindigkeit wieder eine intensive Größe. Auch in diesem Fall zeigt der Wert der intensiven Größe, wie viel Energie mit dem Impuls übertragen wird.

Im Physikunterricht kommen Impulsbilanzen meist im Zusammenhang mit Stoßversuchen vor. Aufgrund von Alltagserfahrungen der Schülerinnen und Schüler bieten sich dafür andere Vorgänge an. Bei jedem Abbremsvorgang überträgt ein Fahrzeug Impuls an die Erde. Solange sich Fahrzeug und Unterlage relativ zueinander bewegen, strömt beim Abbremsen Impuls aus dem Fahrzeug in die Unterlage. Die Relativgeschwindigkeit zwischen Fahrzeug und Unterlage ist somit die Ursache bzw. der Antrieb für die Impulsübertragung. Wie gut das funktioniert, hängt davon ab, wie stark die Reibung zwischen Fahrzeug und Unterlage ist. Bei Glatteis gelingt der Abbremsvorgang – und damit der Impulsübertrag – sehr schlecht. Bei dieser Art der Betrachtung lassen sich erneut zuvor erworbene Kompetenzen unmittelbar nutzen, um neue Sachverhalte zu erschließen.

Ausgehend von Energieübertragungen in verschiedenen Bereichen der Physik steht eine Strukturierungshilfe zur Verfügung, die es gestattet, recht unterschiedliche Vorgänge begrifflich einheitlich zu erfassen und qualitativ sowie quantitativ physikalisch zu beschreiben. Unter diesem Aspekt erhält auch die Wasserstrom-Analogie eine andere Bedeutung. Der Wasserstromkreis soll nun nicht nur ein anschauliches Modell für den einfachen elektrischen Stromkreis sein. Vielmehr bietet es sich an, am Beispiel von strömendem Wasser und strömender Luft das Antriebs-Stromstärke-Widerstands-Konzept mit den Schülern zu erarbeiten. Das Strömen von Wasser und Luft wird dabei selbst zum Unterrichtsthema. Dabei können Lehrer viele Erfahrungen der Schüler aufgreifen, um mithilfe von Alltagsgerätschaften (Luftballons, Autoreifen, Pumpen, diversen Trinkröhrchen und Schläuchen) experimentell grundlegende Sachverhalte zu erarbeiten (Abb. 3).

Der Infokasten zeigt Ergebnisse, die sich dadurch in Klasse 7 erzielen lassen. Bei der Mechanik, Elektrizitäts- und Wärmelehre stehen zwar andere physikalische Sachverhalte im Vordergrund, aber viele Gesetzmäßigkeiten lassen sich analog formulieren. Auf diese Weise wird für Schülerinnen und Schüler offensichtlich, dass bereits Gelerntes bei neuen Themenbereichen sehr hilfreich sein kann.



S. Jorda

Abb. 3 Alltagserfahrungen mit Luftpumpen können die Schüler bei unterschiedlichen Analogiebetrachtungen nutzen.

Analogien für Fortgeschrittene

Auch der Unterricht der Sekundarstufe 2 kann von der Strukturgleichheit profitieren. Dabei ergeben sich Übereinstimmungen, die in dieser Form meist unberücksichtigt bleiben. Wenn es darum geht, die in verschiedenen Vorrichtungen gespeicherte Energie zu berechnen, arbeitet man in der Elektrizitätslehre mit dem Begriff Kapazität: Die Kapazität C einer Anordnung ist die Proportionalitätskonstante zwischen der angehäuften Ladungsmenge Q und der dazu erforderlichen Spannung U . Die (Ladungs-) Kapazität ist der Quotient aus der mengenartigen Größe Q und der Differenz $\Delta\phi = U$ der zugehörigen intensiven Größe. In der Mechanik erhält man als Quotient aus mengenartiger Größe (Impuls p) und zugehöriger intensiver Größe (Geschwindigkeit v) die Masse m . Mithilfe dieser Begriffsbildung lässt sich die Masse als „Impulskapazität“ deuten.

Was auf den ersten Blick recht oberflächlich aussehen mag, steht physikalisch auf solidem Fundament. Zahlreiche Gesetzmäßigkeiten zwischen physikalischen Größen lassen sich aus der Elektrizitätslehre in die Mechanik (und umgekehrt) „übersetzen“, da sich die mengenartigen Größen Impuls und elektrische Ladung entsprechen (Tabelle). Der Vergleich von harmonischen Schwingungen in der Mechanik und der Elektrodynamik, der in allen Physikbüchern für die Oberstufe zu finden ist, erscheint dabei in neuem Licht. In beiden Fällen strömt Energie zu-

sammen mit einer mengenartigen Größe zwischen zwei Energiespeichern hin und her. Für die in einer Feder gespeicherte Energie liefert die „formale Übersetzung“ den ungewohnten Ausdruck $\frac{1}{2} (1/D) \cdot F^2$. Berücksichtigt man, dass für die Verlängerung einer Feder $F = D \cdot s$ gilt, so liefert die Übersetzung den korrekten Ausdruck $\frac{1}{2} D \cdot s^2$ für die in einer Feder gespeicherte Energie.

Auf gleiche Weise erhält man ein physikalisch korrektes Resultat, das in dieser Form im Physikunterricht sonst unberücksichtigt bleibt. Der elektromagnetische Schwingkreis wird durch die Differentialgleichung beschrieben:

$$\ddot{Q} = -\frac{1}{L \cdot C} Q$$

Dieser Ladungsbilanz im elektromagnetischen Schwingkreis entspricht eine Impulsbilanz bei der mechanischen Schwingung. Durch Übersetzung resultiert hieraus die Differentialgleichung

$$\ddot{p} = -\frac{D}{m} p,$$

welche die mechanische Schwingung beschreibt. Dies verdeutlicht, dass Analogiebetrachtungen zu neuen Erkenntnissen führen können und keineswegs immer einen Umweg bedeuten.

Erweiterung möglich

Die vorgestellte Beschreibung, bei der in der Mechanik, Elektrizitäts- und Wärmelehre mit gleichen Anschauungen gearbeitet wird, lässt sich erweitern. Mit der Stoffmenge n als weitere mengenartige Größe und dem chemischen Potential

μ als zugehörige intensive Größe dehnt man das Bild von Antrieb, Stromstärke und Widerstand auf eine „Stofflehre“ aus. Dies berücksichtigt viele Vorgänge, die meist als Reaktion beschrieben werden [12].

Der Physikunterricht lässt sich nachhaltiger gestalten, wenn es gelingt, Weinerts Forderung nach intelligentem Wissen erfolgreich umzusetzen. Dem vorgestellten Konzept für den Physikunterricht liegt der Ansatz zugrunde, dass dabei Analogien hilfreich sein können, die in der Physik eine lange Tradition haben. Kuhn zitiert dazu Leibniz mit den Worten: „Nur über den Weg analogen Denkens ist Naturerkenntnis möglich“ [13].

- [1] H. Muckenfuß, Lernen im sinnstiftenden Kontext. Entwurf einer zeitgemäßen Didaktik des Physikunterrichts, Cornelsen Verlag, Berlin (1995), S. 24
- [2] M. Wagenschein, Was bleibt? (Verfolgt am Beispiel der Physik, in: J. Flügge (Hrsg.), Pathologie des Unterrichts, Bad Heilbrunn (1971), S. 74
- [3] G. Merzlyn, Physikschulbücher, Physiklehrer und Physikunterricht, IPN, Kiel (1994)
- [4] Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Bildungsabschluss. Luchterhand, München (2005), www.kmk.org/schul/Bildungsstandards/Physik_MSA16-12-04.pdf
- [5] F. E. Weinert, Lehren und Lernen für die Zukunft – Ansprüche an das Lernen in der Schule. Pädagogische Nachrichten Rheinland-Pfalz 2, 1-16 (2000)
- [6] Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg (Hrsg.): Bildungsplan für das Gymnasium der Normalform, Reclam, Ditzingen (2004), www.bildung-staerkt-menschen.de/service/downloads/Bildungsplaene/Gymnasium
- [7] Dorn-Bader: Physik 1 Gymnasium Baden-Württemberg. Schroedel (2005)
- [8] F. Herrmann und P. Schmälzle, Das elektrische Potential im Unterricht der Sekundarstufe 1, MNU 37, 8, S. 476 (1984)
- [9] R. Duit, und S. Glynn, Analogien – Brücken zum Verständnis, NiU-Physik 6, 27, S. 8 (1995)
- [10] E. Kircher, R. Girwidz und P. Häußler, Physikdidaktik. Eine Einführung, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (2001)
- [11] H. Petrich, D. Plappert und H. Schwarze, Entropielehre II. Energie und Entropie, Aulis Verlag Deubner, Köln (2008)
- [12] F. Herrmann, Eine Analogie zwischen Mechanik, Elektrizitätslehre, Wärmelehre und Stofflehre, PdN Physik in der Schule, Heft 2/55, S. 2 (2006)
- [13] W. Kuhn, Themenheft Analogien, PdN Physik, Heft 5/43, S. 1 (1994)

Entsprechungen zwischen der Elektrodynamik und der Mechanik		
	Elektrodynamik	Mechanik
Mengenartige Größe	elektrische Ladung Q	Impuls p
Stromstärke	elektrischer Strom I	Kraft, Impulsstrom F
Intensive Größe	Potential, Spannung φ, U	Geschwindigkeit v
Energieübertragung	$P = U \cdot I$	$P = v \cdot F$
Widerstand	Elektrischer Widerstand $R_Q = U/I$	mechanischer Widerstand Stokessche Reibung $R_p = \Delta v/F$
Kapazität	elektrische Kapazität $C = Q/U$	mechanische Kapazität, Masse $m = p/v$
Energiespeicherung	Kondensator $E = (C/2) \cdot U^2$	Körper $E = (m/2) \cdot v^2$
	Spule $E = (L/2) \cdot I^2$	Feder $E = \frac{1}{2} D \cdot F^2$
	Induktivität L	Kehrwert Federhärte $1/D$