

Abb. 6: Der Energiestrom von einer Batterie zu einem Widerstand längs widerstandsfreier Drähte.

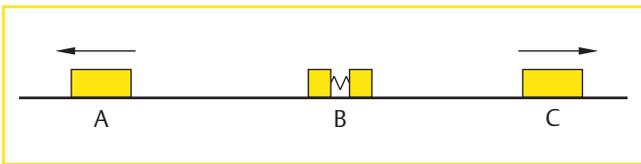


Abb. 7: Die zwei gleich großen Teilkörper von B werden durch eine Feder auseinandergetrieben. A und B stehen für zwei sich bewegende Bezugssysteme.

2. System, das sich mit v nach rechts bewegt ($v =$ Endgeschwindigkeit des rechten Körpers nach dem Stoß)

Vor dem Stoß

Beide Körper bewegen sich mit v nach links, d. h.

- $p_{\text{gesamt}} = 2 m v$,
- $E_{\text{gesamt}} = 2 \cdot 1/2 m v^2 = m v^2$.

Nach dem Stoß

Der linke Körper bewegt sich mit $2 v$ nach links, der rechte Körper ruht.

- $2 p'_{\text{gesamt}} = 2 m v = p_{\text{gesamt}}$,
- $E'_{\text{gesamt}} = 1/2 m (2 v)^2 = 2 m v$.
- Energiebilanz: $E' = E'_{\text{gesamt}} - E_{\text{gesamt}} = 2 m v - m v = m v$.

Diese Energie muss vor dem Stoß in der Feder gespeichert gewesen sein. Es ist dieselbe Energiemenge wie im Laborsystem angenommen. Es hat also einen Sinn, diese Energie in der Feder zu lokalisieren. Natürlich hängt die in einem Körper gespeicherte kinetische Energie von der Wahl des Bezugssystems ab. Innerhalb eines Bezugssystems können dann, wie *Mie* an weiteren Beispielen gezeigt hat, alle in diesem Bezugssystem beobachteten Energieströme lokalisiert werden.

8 | Abschließende Bemerkungen

Die Annahme der Energieerhaltung hat sich auch im letzten Beispiel zur Beschreibung der Prozesse aus unterschiedlichen Inertialsystemen als fruchtbar erwiesen. Auch hier können Energieströme wie Ströme eines „immaterielles Fluidum“ angesehen werden. Die Tragfähigkeit dieser Vorstellung, die konsequente Anwendung der Energieerhaltung, die Lokalisierung der

Energieübertragung durch Energieströme durch den Raum, erleichtert den sicheren Umgang mit diesen physikalischen Größen. Dabei werden konsequent Gesamtzusammenhänge betrachtet: Wenn an einer Stelle Energie auftaucht, dann muss sie von einer anderen Stelle herkommen und von dort durch den Raum hergeströmt sein. Natürlich ist das Bild des Strömens wie eingangs ausgeführt „hinzugedichtet“. Das gilt aber für alle physikalischen Beschreibungsweisen, seien sie auch noch so abstrakt formuliert. Was nützt eine scheinbar „reine“ abstrakte Beschreibungsweise, die den Anwender verunsichert und ihn dazu verleitet, statt Gesamtzusammenhänge richtig zu erfassen, punktuell denkend die falschen Schlüssen zu ziehen? Besonders für den allgemeinbildenden Physikunterricht, in dem stufenweise die Schülerinnen und Schüler angeleitet werden aus ihren Präkonzepten physikalische Begriffe und Konzepte zu entwickeln, sind tragfähige mentale Bilder, die durch den weiterführenden Unterricht immer präziser gefasst werden können, von großen Vorteil. Zum Schluss sei noch einmal *Udo Backhaus* [4] zitiert: „Mit den Flüssen physikalischer Größen können anscheinend Vorgänge aus den verschiedenen Bereichen der Physik weitgehend analog beschrieben werden. Diese Betrachtungsweise trägt insofern wesentlich zur Vereinheitlichung der Physik bei. Aufgrund der mechanischen Analogie ist die Beschreibung sehr anschaulich und sollte dadurch Schülern auf der qualitativen Ebene schon früh eine selbstständige Anwendung auf relativ komplexe Sachverhalte ermöglichen. Allein diese Gesichtspunkte lassen es mir sehr lohnend erscheinen,

diese Ideen gründlich zu durchdenken, zu diskutieren und evtl. zu erproben.“

Dass sich das lohnt, zeigt die Äußerung einer Schülerin einer 10. Klasse. Sie schreibt in ihrem Portfolio zur Frage: „Was hat der Physikunterricht des vergangenen Schuljahres dir persönlich gebracht?“, „... Und hiermit kann ich direkt meinen letzten wichtigen Inhalt anschließen, nämlich die Zusammenhänge zwischen Hydraulik, Elektrizitätslehre und Thermik. In allen drei Gebieten gibt es ständig Überschneidungen, die in Tabellen festgehalten wurden. Z. B. Druckdifferenz, elektrische Potenzialdifferenz und Temperaturdifferenz. Es sind zwar verschiedene Bezeichnungen, aber im Prinzip erfüllen alle dieselben Faktoren, dieselbe Aufgabe, in ihrem Gebiet.“

Das war eine interessante und auch beeindruckende Feststellung, da man hier sieht, wie nahe diese drei Themen doch miteinander zusammenhängen. Außerdem erleichtert es das Verständnis, da „verstehen“ das Verbinden mit schon bekannten Dingen bedeutet, also die Funktion eines Faktors auf ein weiteres physikalisches Gebiet.“

Literatur:

- [1] *Gustav Mie*: Entwurf einer allgemeinen Theorie der Energieübertragung, Sitzungsberichte der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, Jahrgang 1898, October, Wien
- [2] *Wolfgang Pauli*: Phänomen und physikalische Realität, Zürich 1954, enthalten in *W. Pauli*: Aufsätze und Vorträge über Physik und Erkenntnistheorie; Vieweg Braunschweig 1961
- [3] *Hartmann Römer*: Naturgegeben oder frei erfunden? Wie viel Freiheit gibt es in der Physik?, Freiburg 1997
- [4] *Udo Backhaus*: „Der Energietransport durch elektrische Ströme und elektromagnetische Felder“; Naturwissenschaft und Unterricht Band 20, Westarp Wissenschaft, Magdeburg 1993.
- [5] *S. R. Groot*: Thermodynamik irreversibler Prozesse, BI-Taschenbuch, Band 18, Mann heim 1960
- [6] *H. Römer, M. Forger*: Elementare Feldtheorie, VCH, Weinheim, 1993
- [7] *Manfred Euler*, aus einem Vortrag von *Manfred Euler* auf der DPG-Frühjahrstagung in Regensburg 2002
- [8] *Dieter Plappert*: Umsetzungsbeispiele zu den Bildungsstandards Physik, Leuheft Ph 38.2, Stuttgart 2004. Zu beziehen unter www.leu.bw.schule.de/allg/publikationen
- [9] *L. D. Landau, E. M. Lifschitz*: Lehrbuch der theoretischen Physik, Hydrodynamik, Band 5, Akademie-Verlag Berlin 1978
- [10] Aus der Analogieserie von Conatex, Postfach 1407, 66514 Neunkirchen, 06821/94110, www.conatex.com
- [11] *Max Planck*: Bemerkungen zum Prinzip der Aktion und Reaktion in der allgemeinen Dynamik, Physikalische Zeitschrift 9. Jahrgang, Nr. 23, Seite 828ff

Anschrift des Verfassers

Prof. Dieter Plappert, Staatliches Seminar für Didaktik und Lehrerbildung, Kunzenweg 21, 79117 Freiburg
E-Mail: post@plappert-freiburg.de

sieren. Der Energietransport findet nicht innerhalb der Leitungen, sondern im „Umfeld“ der Leitungen, in den den elektrischen Strom begleitenden elektromagnetischen Feldern statt. Die Felder übernehmen einerseits die Rolle der „Energieleitung“ und andererseits die Rolle des Energiespeichers bei Kondensator und Spule. Die strömende Ladung hat wieder „funktional“ die Rolle des Energieträgers, jedoch nicht im „naiven Sinn“. Dies kann im Unterricht im Zusammenhang mit der Behandlung der entsprechenden Felder, nach den Bildungsstandards Physik Baden-Württemberg Gymnasium in Klasse 9 bzw. 10 bzw. in der Kursstufe angesprochen werden. Die Energie selbst behält dabei die anschauliche Eigenschaft eines „immateriellen Fluidum“. Die Bedeutung der elektrischen Ladung als Energie-Träger wird abstrakter: Sie trägt den Energietransport nicht dort, wo sie strömt, sondern in ihrem „Umfeld“.

7 | Zum Bezugssystemwechsel bei Energiebetrachtungen

● Wieder wollen wir zunächst *Mie* zitieren *Mie* [1, S. 1143]: „Wir haben bisher stillschweigend vorausgesetzt, dass die Geschwindigkeit sich in absoluter Weise ermitteln lässt. Indessen können wir Geschwindigkeiten nur relativ zu irgendeinem System messen, aus dem wir ebenso gut in ein anderes transformieren dürfen, das sich zum ersten mit konstanter Geschwindigkeit parallel verschiebt ... Die Transformation des Energiestroms geschieht also dadurch, dass man dem Strom f_1 einen Strom f_r superponiert ...“ Er demonstriert seine Überlegungen exemplarisch an einem Geschoss, das aus einer Kanone genau horizontal, von West nach Ost, geschleudert wird. Die Energie, die das Geschoss bekommt, ist durch das Schießpulver vorgegeben. Er führt seine Berechnungen für zwei Systeme durch: Erstens für das Laborsystem und zweitens für das System, das dieselbe Geschwindigkeit v hat wie die Kugel nach dem Abschuss. Er zeigt, dass die Energie in beiden Fällen erhalten bleibt, dass aber im Bezugssystem 2, in dem die Kugel nach dem Abschuss ruht, die vorher vorhandene kinetische Energie der Kugel und die Energie des Schießpulvers bei der Impulsänderung der Kugel vollständig in die Erde geströmt ist. Um die Impulsbilanz auszugleichen, ändert sich nämlich beim Abschuss, von Bezugssystem 2 aus betrachtet, die Geschwindigkeit der Erde.

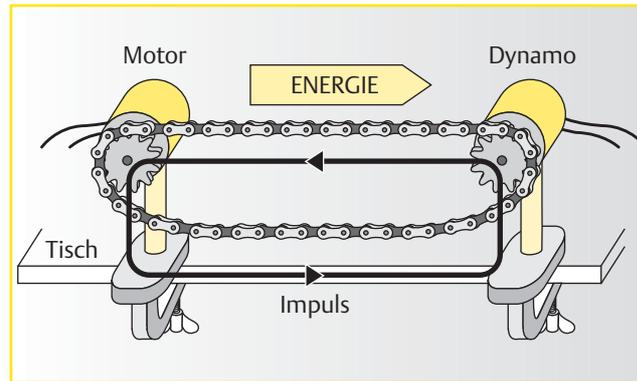


Abb. 4: Ein Motor und ein Dynamo sind durch eine Kette miteinander verbunden. Beginnt der Motor sich zu drehen, beginnt die am Dynamo angeschlossene Lampe zu leuchten: Energie strömt vom Motor zum Dynamo, zur Lampe. Der Impuls, der in einem geschlossenen Stromkreis durch die Kette und den Tisch fließt, fungiert als „Energie-Träger“.

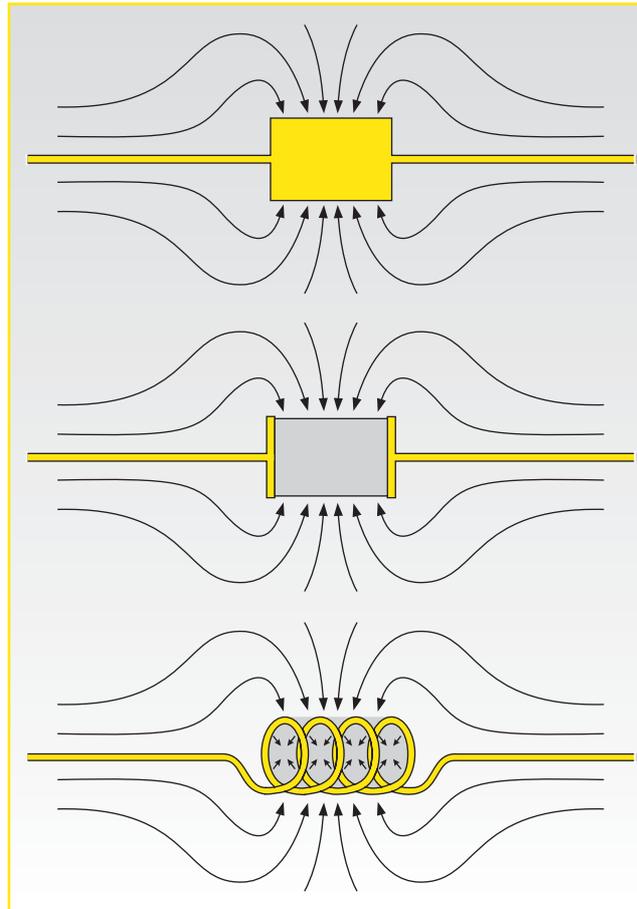


Abb. 5: aus *Udo Backhaus*: Energiefluss im Pointing-Bild: stromdurchflossener Widerstand (a), Kondensator beim Aufladen (b), Spule beim Stromanstieg. Die Energiedichte wird durch erung „Der Energietransport durch elektrische Ströme und elektromagnetische Felder“; *Naturwissenschaft und Unterricht* Band 20, Westarp Wissenschaft, Magdeburg 1993.

Wichtig ist bei dieser Betrachtung, dass der gesamte Prozess vollständig aus demselben Bezugssystem heraus betrachtet wird. Wenden wir diese Überlegungen auf das folgende Beispiel an: Ich betrachte drei Körper A, B und C. Im Bezugssystem von B bewegen sich die Körper A und C von B gleichförmig mit einer Geschwindigkeit desselben Betrags v auseinander. Der Körper B besteht nun aus zwei gleich großen Teilkörpern der Masse m , zwischen denen eine Feder gespannt ist. Zunächst seien die Teilkörper zusätzlich starr miteinander verbunden. Wird die starre Verbindung gelöst, dann werden die beiden Körper mit der in der Feder gespeicherten Energie auseinander getrieben. Wir betrachten diesen Vorgang in zwei verschiedenen Bezugssystemen:

1. Laborsystem Vor dem Stoß

Beide Körper haben $v = 0$ und damit

- $p_{\text{gesamt}} = 0$ und
- $E_{\text{gesamt}} = 2 \cdot 1/2 m v^2 = 0$.

Nach dem Stoß

Beide Körper haben eine Geschwindigkeit mit demselben Betrag: $v_1' = v_2' = v$. Da die Geschwindigkeit beider Körper unterschiedliches Vorzeichen hat, gilt weiterhin

- $p'_{\text{gesamt}} = 0 = p_{\text{gesamt}}$
- Für die Energie gilt:
- $E'_{\text{gesamt}} = 2 \cdot 1/2 m v^2 = m v^2$.
- Energiebilanz:
 $E' = E'_{\text{gesamt}} - E_{\text{gesamt}} = m v$.

Diese Energie muss vor dem Stoß in der Feder gespeichert gewesen sein.

Dasselbe Ergebnis ist in Landau-Lifschitz [9, S. 13 und 23] für inkompressible Flüssigkeiten zu finden:

$$\vec{j}_E = \rho \vec{v} \left(\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} \right), \quad (5)$$

wobei j_E die Energiestromstärke in einer inkompressiblen Flüssigkeiten und ρ die Masendichte der Flüssigkeit ist.

Betrachten wir den in Abb. 3 dargestellten Wasserstromkreis. Gehen wir davon aus, dass die Strömungsgeschwindigkeit v an allen Stellen denselben Wert hat. Dann spielt in Gleichung (5) der Term der kinetischen Energie $v^2/2$ für die Energieübertragung keine Rolle. Wir erhalten somit

$$\vec{j}_E = \vec{v} \cdot p. \quad (6)$$

In der oberen Leitung strömt das Wasser mit der Strömungsgeschwindigkeit v unter höherem Druck p_2 nach rechts, in der unteren mit derselben Strömungsgeschwindigkeit v mit tieferem Druck p_1 nach links. Aufgrund von (6) sind die Energieströme in den Leitungen lokalisierbar. Diesen Zusammenhang meinen wir im Anfangsunterricht, wenn wir sagen, das Wasser im oberen Schlauch trägt mehr Energie als das Wasser im unteren Schlauch, das Wasser ist der Energieträger, mit dem die Energie von der Pumpe zur Turbine strömt und dass in der Turbine Energie vom Wasser abgeladen wird. Auf diese Weise lernen die Schülerinnen und Schüler zentrale Zusammenhänge zunächst propädeutisch an Stoffströmen kennen, bevor in einem weiteren Unterricht, statt der strömenden Stoffe strömende physikalische Größen betrachtet werden.

Anmerkung

Die Stärke des Energiestroms I_E , der z. B. vom Wassergenerator (3) vom Wasserstrom der Stärke I_V abgeladen wird, können wir ermitteln, indem wir zunächst die Gleichung (6) auf beiden Seiten mit der Querschnittsfläche A des Schlauches multiplizieren. Wir erhalten

$$I_E = v p A = \rho \frac{v A}{t} = \rho \frac{V}{t} = \rho I_V, \quad (6^*)$$

wobei V/t hier als Wasserstromstärke I_V interpretiert werden kann, da wir das Wasser als inkompressibel betrachten. Auf die Vektorschreibweise wurde verzichtet, v und A werden als orthogonal angenommen. Für den vom Wassergenerator wirklich abgela-

denen Energiestrom erhalten wir dann eine Gleichung

$$I_E = p_2 I_V - p_1 I_V = \Delta p I_V, \quad (6^{**})$$

die analog z. B. der entsprechenden Gleichung $P = UI$ ist, die für elektrische Energieübertragungen gilt.

5 | Energieströme in Fahrradketten

Wieder zitieren wir *G. Mie* [1, S. 1133ff]: „Man denke sich einen ganz beliebigen materiellen Körper, der durch die geschlossene Fläche S begrenzt ist. Auf die Fläche S wirken Mechanismen, die sich unter Ausübung von Druckkräften bewegen und dadurch an S eine Arbeit verrichten, ... Die Größe des mechanischen Energiestroms f berechnet sich als Product der Geschwindigkeit und der Größe des Druckes p_v , der auf das zur Richtung der Geschwindigkeit v senkrechte Flächenelement wirkt: $f = p_v v$. Seine Richtung fällt mit der Richtung dieses Druckes p_v zusammen.“ Wie zu erwarten, gilt hier derselbe Zusammenhang wie für inkompressible Flüssigkeiten; der Spannungstensor reduziert sich auf Druckkomponenten. Da bei einer „Transmission“ (*Mie*: „In der Technik spielt der mechanische Leistungsstrom der Energie naturgemäß eine bedeutende Rolle. Er wird bezeichnet als der durch die Transmission übertragene Effekt ...“) bzw. der Fahrradkette eine Zugspannung herrscht, hat p_v in der Gleichung $j_E = p_v \cdot v$ ein negatives Vorzeichen und somit haben die Energiestromdichte und die Geschwindigkeit der Kettenglieder umgekehrtes Vorzeichen. Die Energie strömt also durch die gespannten Kettenglieder hindurch, der Bewegungsrichtung der Kette entgegen. Auch hier spielen die Kettenglieder nicht die Rolle der Energieträger sondern sie fungieren als Energieleitungen. Als „eigentlicher“ Energieträger kann der Impulsstrom identifiziert werden (Abb. 4), der energiebeladen ($v \neq 0$) durch die gespannte Kette und ohne Energie ($v = 0$) durch den Fahrradrahmen strömt.

6 | Energieströme in elektromagnetischen Feldern

Über viele Seiten hinweg beweist *Mie* [1, S. 1172] den folgenden Satz: „Die elektromagnetische Energieübertragung lässt sich lokalisieren. Der Vector, durch den sich alle realisierbaren Energieübertragungen berechnen lassen, ist der Poynting'sche Energiestrom.“

Ganz im diesem Sinne schreibt *U. Backhaus* [4]: „In dieser Arbeit soll das Zusammenspiel zwischen Erfahrung und Konvention, zwischen Phänomen und Theorie am Beispiel einer bekannten physikalischen Begriffsbildung untersucht werden: am Beispiel des Flusses extensiver physikalischer Größen. Dabei konzentriere ich mich auf den Fluss der Energie durch elektromagnetische Anordnungen und Felder. Einerseits ist man durch die Diskussion von Problemen des Energietransportes mit der Vorstellung vertraut, dass Energie sich bewegen, fließen kann. Andererseits ist diese Vorstellung aber doch nicht so fest verankert wie z. B. die vom Fluss elektrischer Ladung, vom elektrischen Strom also. Dadurch ist es, so hoffe ich, leichter möglich, eine Sensibilität für die konventionellen Aspekte dieser Fließvorstellung zu erzeugen.“ In *Backhaus* Aufsatz wird besonders die Energieübertragung bei elektrischen Strömen untersucht. Dabei ist sein Anliegen zu zeigen, dass es zur physikalischen Beschreibung mithilfe des Poynting-Vektors gleichwertige alternative Möglichkeiten gibt, die zur Folge haben, dass der Energietransport, wie „naiv“ erwartet, in den Leitungen selbst stattfindet. Auf diesen Gesichtspunkt wollen wir hier jedoch nicht weiter eingehen.

Der Poynting-Vektor $\vec{j}_E = \vec{E} \times \vec{H}$ steht für die Dichte des betrachteten elektromagnetischen Felds. Wir wollen diese Beschreibungsweise auf die an elektrische Ströme gekoppelten Energieströme anwenden.

In Abb. 5 fließt durch widerstandsfreie Drähte ein elektrischer Strom (a) durch einen Widerstand hindurch, (b) in einen Kondensator beim Aufladen hinein und heraus (c) und durch eine Spule mit Steigerung der Stromstärke. Wie zu erwarten, strömt die Energie zunächst im Umfeld der widerstandsfreien Drähte und dann in den Widerstand, in den Kondensator und in die Spule hinein. Diese Energie führt im Widerstand zu einer Erhöhung der Temperatur, wird beim Kondensator in seinem elektrischen Feld und bei der Spule in ihrem magnetischen Feld gespeichert. Übertragen wir diese Überlegungen auf einen Gleichstromkreis (Abb. 6) mit Batterie (1) und Widerstand (2), die durch supraleitende Leitungen (3) miteinander verbunden sind, so ergibt sich im Prinzip die dargestellte Verteilung der Energiestromdichte. Mithilfe des Poynting-Vektors lassen sich also auch die an elektrischen Strömen gebundenen Energieströme im Raum lokali-

einfachste Fall ist, wenn nur ein Gradient einer Größe ΔA_1 vorkommt und L_{X_1} linear ist. Wir erhalten dann z. B. für den elektrischen Strom die Beziehung $I = 1/R \cdot U$. Die Onsager'schen Gleichungen bilden den allgemeinen physikalischen Hintergrund des im Physikunterricht verwendeten „Strom-Antrieb-Widerstand-Konzepts“.

3 | Bildhafte Beschreibungen

3.1. Mentale Bilder

Die Sprache der Physik ist zweifelsohne die Mathematik. Die jeweiligen Gleichungen können jedoch durch mentale Bilder interpretiert und veranschaulicht werden. Durch solche Bilder können komplexe Zusammenhänge innerlich leichter handhabbar gemacht werden, nicht nur für die Schülerinnen und Schüler sondern auch für die Lehrerinnen und Lehrer. Hierzu schreibt *Manfred Euler* (IPN Kiel) [7]: „Komplexe mentale Modelle sind für einsichtsvolles Problemlösen zentral. Bilder und innere Wandlungsprozesse spielen dabei eine herausragende Rolle. Gerade in den für Außenstehende so „rational“ erscheinenden Naturwissenschaften gilt: „Es gibt keine Einsicht ohne innere Bilder!“ Eine große Zahl von Berichten und Selbstzeugnissen über bedeutsame Einsichten aus den unterschiedlichsten Bereichen stützt diese These. Die Beispiele zeigen enge Verbindungen zwischen mentalen Bildern, bewussten und unbewussten Transformationsprozessen von inneren Bildern und kreativen Problemlöseprozessen auf. Ein solcher Zusammenhang gilt für den singulären genialen „Geistesblitz“ ebenso wie für Einsichten in eher alltäglichen Situationen. Die reflektierte Nutzung von Bildern, Analogien, Symbolen und Modellen auf unterschiedlichen Ebenen der Abstraktion markiert daher wesentliche Stufen auf dem Weg zur naturwissenschaftlichen Bildung. Das Potenzial von Bildern wird im naturwissenschaftlichen und mathematischen Unterricht derzeit zu wenig genutzt, sowohl als externes Medium der Vermittlung als auch als internes Medium beim Problemlösen. Freilich führt der Königsweg zur Bildung über das Medium der Sprache. Mit ihr drücken wir das aus, was uns bewusst ist und verleihen unseren Gedanken eine kommunikable Gestalt, doch die Balance zwischen dem verbalen und dem nonverbalen Zugang ist derzeit allenfalls suboptimal. Es muss gelingen, so etwas wie eine „Visuelle Bildung“ zu stärken, die mit tragfähigen

mental Bildern auf unterschiedlichen Ebenen der Abstraktion vertraut macht. Verbale und visuelle Modelle sind aufeinander zu beziehen und mit der Wirklichkeit zu verknüpfen. Dazu gehört auch, dass man die Bilder kritisch hinterfragt. Intuitive Einsicht benötigt rationale Rekonstruktion, andernfalls bleibt sie pure Phantasie. Auf einer weniger formalen Ebene könnte man sagen: „*Bilder und Sprache müssen einander ergänzen, sie stehen in einem komplementären Verhältnis.*“

3.2 Das Energie-Träger-Bild [8]

„Die Tatsache, dass Energie nie alleine strömen kann, sondern immer zusammen mit einer zweiten Größe strömen muss (Gibbs'sche Fundamentalform (1)), kann durch das „Energie-Träger-Konzept“ verbildlicht werden: Die zweite physikalische Größe hat die Aufgabe eines „Energieträgers“. Auf diese Weise wird der Zusammenhang dieser beiden physikalischen Größen in ein mentales Bild gebracht, das den Schülerinnen und Schülern hilft, diese beiden Größen einerseits zu differenzieren und andererseits miteinander in Verbindung zu bringen.

An späterer Stelle im Unterricht, z. B. in höheren Klassenstufen kann dann auch darauf hingewiesen werden, dass dieses Bild physikalische Zusammenhänge verbildlicht. *Es wird mit zunehmendem Wissen auch immer deutlicher, dass dieses Bild sehr abstrakt gemeint ist, dass mit „Energieträger“ nicht gemeint ist, dass z. B. die Elektrizität die Energie wie in einem Rucksack trägt, was daran zu erkennen ist, dass beim elektrischen Energietransport die Energie nicht durch das Kabel selbst sondern durch die Felder im Raum um das Kabel herum strömt. Elektrizität als „Energieträger“ ist in demselben Sinne gemeint wie die CD als „Tonträger“: Auf der CD selbst sind*

nicht die Töne enthalten, die wir beim Anhören empfinden (vergleiche „Wahrnehmung und Messung“). Trotz der eigentlich abstrakten Bedeutung plädiere ich dafür, das „Energie-Träger-Bild“ im Anfängerunterricht zunächst „naiv“-stofflich zu verwenden,

- weil der alltagssprachliche Name mit seinen verbundenen Präkonzepten im Unterricht aufgegriffen werden kann,
- weil ein tragfähiges, gut zu handhabendes Bild entsteht, das sicher angewendet werden kann, und das den Schülerinnen und Schülern hilft, die Energie und die zweite, am Energietransport beteiligte Größe zu unterscheiden und miteinander in Verbindung zu bringen.

Im Unterricht können Wasser- und Luftströme dazu dienen, die grundlegende Begriffe und Prinzipien der Strömungslehre propädeutisch einzuführen: Stromstärke, Knotenregel (Kontinuität), Antrieb, Widerstand. Diese werden im darauf folgenden Unterricht immer mehr von „naiv“-stofflichen Vorstellungen abstrahiert. Die Ströme mengenartiger physikalischer Größen wie die Ströme von Energie, elektrischer Ladung, Impuls und Entropie werden im Sinne von *G. Mie*, als Ströme „immaterieller Fluida“ verstanden.

4 | Energieströme im Wasserstromkreis

- *G. Mie* [1] leitet auf Seite 1137 für den „mechanischen Leistungsstrom“ die folgende Gleichung her:

„Die Größe des mechanischen Energiestroms f berechnet sich als Product der Geschwindigkeit v und der Größe des Drucks p_v , der auf das zur Richtung der Geschwindigkeit v senkrechte Flächenelement wirkt $f = p_v \cdot v$.“

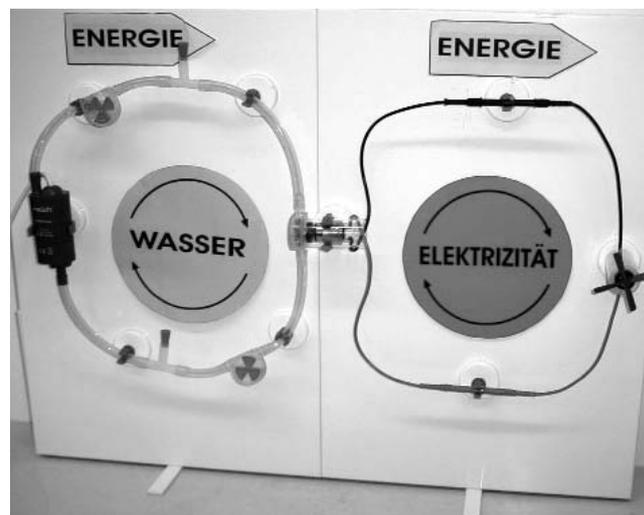


Abb. 3: Energieträger-Stromkreis: Der äußerlich entsprechende Aufbau hilft die Begriffe Wasserstrom, elektrischer Strom und Energiestrom zu differenzieren [10].

Energie in eindeutig bestimmbarer Weise im Raum verteilt sein muss. Ich habe die Forderung, dass es nur Nahwirkungen gäbe, mathematisch ausgedrückt in Form allgemeiner Principien, deren sich, das Princip der Erhaltung der Energie mitgerechnet, vier nothwendig ergeben haben. Es zeigt sich nun, dass dies (das Problem der Energieübertragung) mit Hilfe einer durch die Eigenschaften der Materie überall eindeutig bestimmten Vectorgröße zu geschehen hat, die ich der herkömmlichen Ausdrucksweise folgend, als „wirklichen Energiestrom“ bezeichne. Dieser Vector lässt sich wirklich immer in einer einfachen Weise berechnen. Besonders wichtig ist es hierbei gewesen, die Energieübertragung im elektromagnetischen Felde zu behandeln, und es hat sich ergeben, dass der von *Poynting* und *Heaviside* hergeleitete Energiestrom thatsächlich als der wirkliche Energiestrom bezeichnet werden muss.“ Im Folgenden werden wir immer wieder auf die Ausführungen von *Gustav Mie* zurück kommen. Zuvor wollen wir jedoch kurz andeuten, wie sich die von *Mie* dargestellten Sachverhalte im Laufe der vergangenen 100 Jahren zu einer allgemeinen Strömungslehre weiterentwickelt haben. Diese zeichnet sich durch ihre allgemeine Gültigkeit für die unterschiedlichen Phänomenbereiche aus. Durch analoge mathematische Beschreibungsweise können Verwandtschaften gefunden werden, durch die diese miteinander vernetzt werden können. Die verallgemeinere Strömungslehre ist eine Feldtheorie, in der der Raum als Kontinuum betrachtet wird. Jedem Raumpunkt werden zusätzliche Qualitäten zugeordnet, wie Druck, Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit, elektrische Feldstärke, ... Jedes makroskopische System kann hierbei in eine Vielzahl infinitesimaler

Mikrosysteme zerlegt gedacht werden. Jedes Mikrosystem muss jedoch noch so groß gedacht werden, dass es selbst als Kontinuum aufgefasst werden kann. Auf diese Weise können extensiven Größen Raumdichten und Ströme zugeordnet werden, wie etwa Massendichte, Entropiedichte, Impulsdichte, Energiedichte und Massendichte, Entropiestromdichte, Impulsstromdichte und Energiestromdichte. Faszinierend ist zu lesen, wie *Max Planck* 1908 durch Betrachtungen dieser Art die Bedeutung „des Newton’schen Prinzips der Gleichheit von Aktion und Reaktion in seiner Bedeutung einer allgemeinen Dynamik auch auf die Elektrodynamik und die Thermodynamik“ verallgemeinert [11]. Dort schreibt er zu unserer Fragestellung u. a.: „Vom Standpunkt der Nahwirkungstheorie aus betrachtet kann jede Energieart nur durch kontinuierliche Fortpflanzung, nicht durch sprungweise Änderung ihren Ort im Raum verändern ... Die Strömung (der Energie) kann erfolgen durch Strahlung, wie beim Poynting’schen Vektor, durch Leitung, wie bei Druck oder Stoß, und bei der Wärmeleitung und durch Konvektion, wie beim Eintritt von ponderablen Atomen oder Elektronen durch die betrachtete Oberfläche. In jedem Fall ist die gesamte Energieströmung an jeder Stelle des Raumes, auf die Flächen- und Zeiteinheit bezogen, ein bestimmter endlicher Vektor.“ In seinem Aufsatz verallgemeinert *Planck* den Impulsbegriff und betrachtet „Impulsströmungen“ nicht nur durch Materie hindurch sondern auch durch elektromagnetische Felder. Die in Abb. 1 dargestellt Seite eines aktuellen Hochschulbuchs soll zeigt, wie diese Art der Beschreibung heute mathematisch gefasst werden kann. Erweitert man die Strömungslehre im Sinne von *Max Planck* um die Thermodynamik reversibler und irre-

versibler Prozesse [5], so kommen u. a. die Onsager’schen Transportgleichungen hinzu, so dass wir zwei Klassen von grundlegenden Gleichungen erhalten.

2.1 Energiestromgleichung:

Bei jedem Übergang eines Systems von einem Zustand zu einem anderen, ändern mindestens zwei Größen ihren Wert. Auf diese Weise werden die Austauschformen der Energie beschrieben. Diese Tatsache wird durch die Gibbs’sche Fundamentalform mathematisch gefasst:

$$dE = T dS + \varphi dQ + v dp + \mu dn + \dots, \quad (1)$$

wobei T die Temperatur, S die Entropie, φ das elektrische Potenzial, Q die elektrische Ladung, v die Geschwindigkeit, p der Impuls, μ das chemische Potenzial und n die Stoffmenge sind. Jede Energieänderung kann auch durch einen Strom einer extensiven Größe realisiert werden. Die Gibbs’sche Fundamentalform erhält dann die folgende Form:

$$P = T I_S + \varphi I_Q + v F + \mu I_n + \dots, \quad (2)$$

wobei I_S die Entropiestromstärke, I_Q die elektrische Stromstärke, F die Impulsstromstärke (Kraft), I_n die Mengenstromstärke bedeuten. Differenziell geschrieben, erhalten wir die entsprechende Beziehung für die jeweiligen Stromdichten j :

$$j_E = T j_S + \varphi j_Q + v j_p + \mu j_n + \dots, \quad (3)$$

2.2 Onsagersche Gleichung

Durch diese Gleichung wird allgemein ein Zusammenhang des Stroms I_X einer extensiven Größen X oder eines materiellen Stoffsystems X und dem Gradient verschiedener intensiven Größe ΔA_k , oft als „Antrieb“ bezeichnet, beschrieben:

$$I_X = \sum_{k=1}^n L_{Xk} \Delta A_k,$$

wobei der Koeffizient L_{Xk} den konkreten Zusammenhang des Stroms I_X mit den k unterschiedlichen Antrieben ΔA_k beschreibt. Im Allgemeinen kann ein Strom eines Stoffes verschiedene Antriebe zugleich haben, z.B. ein Wasserstrom in einem Schlauch im Gravitationsfeld der Erde (Druckgradient, Gravitationsfeldstärke) oder thermoelektrische Ströme (Temperaturgradient, elektrische Feldstärke).... Der

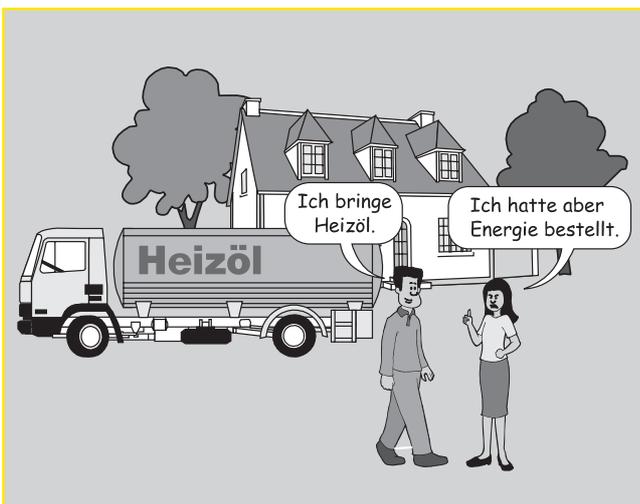


Abb. 2: Energie ohne Träger gibt es nicht.

vergessen, dass sie nicht prinzipiell vorgegeben sind; wir vergessen, dass es sich immer nur um mehr oder weniger allgemein anerkannte Übereinkünfte handelt. Hierzu sollen *Wolfgang Pauli* [2], *Hartmann Römer* [3] und *Udo Backhaus* [4] zu Wort kommen. *Wolfgang Pauli*: „Die zusammenhängende Formulierung von Gedankensystemen, bestehend aus mathematischen Gleichungen und aus Regeln, wie diese mit Erfahrungsdaten zu verknüpfen sind, nennen wir eine physikalische Theorie, die man dann innerhalb der Begrenzung ihres Anwendungsgebietes als „Modell der Wirklichkeit“ bezeichnen kann. Wie ich an anderer Stelle ausgeführt habe, halte ich es für müßig, darüber zu spekulieren, was zuerst da war, die Idee oder das Experiment. Ich hoffe, dass niemand mehr der Meinung ist, dass Theorien durch zwingende logische Schlüsse aus Protokollbüchern abgeleitet werden, eine Ansicht, die in meinen Studententagen noch sehr in Mode war. Theorien kommen zustande durch ein vom empirischen Material inspiriertes Verstehen, welches am besten im Anschluss an Plato als zur Deckung kommen von inneren Bildern mit äußeren Objekten und ihrem Verhalten zu deuten ist.“

Hartmann Römer: „Es lässt sich nicht bestreiten, dass sich Ordnungen und Gesetzmäßigkeiten nicht so einfach aus der Erfahrung gewinnen lassen, wie es ein naiv realistischer Standpunkt glauben machen will. Insbesondere entstammen die Begriffe, mit deren Hilfe wir gewisse Teilbereiche der Wirklichkeit strukturieren, nicht direkt der Erfahrung, sie gehen ihr vielmehr voran und werden an die Einzelerfahrungen herangezogen. Dies bleibt sicher wahr, unabhängig vom philosophischen Standpunkt zur Herkunft und Funktion der Begriffe und zur Art und Möglichkeit der Erkenntnis und der Rolle des Menschen hierbei. Nicht nur Begriffe, sondern auch Gesetzmäßigkeiten stammen nicht einfach und direkt aus der Erfahrung. Die logische Unmöglichkeit, eine allgemeine Gesetzmäßigkeit mit Sicherheit aus einer noch so großen endlichen Anzahl von Einzelbeobachtungen zu erschließen, ist als Induktionsproblem oder auch als Verifikationsproblem bekannt. Es ist prinzipiell unmöglich, eine allgemeine Gesetzmäßigkeit durch empirische Daten zu verifizieren.“

Udo Backhaus: „Physik wird von Menschen für Menschen gemacht, um Vorgänge in unserer natürlichen und technischen Umwelt beschreiben, erklären, vorhersagen

2.2 Impulsbilanz und Drehimpulsbilanz

Die Impulsbilanz stellt einen besonders interessanten und wichtigen Fall dar. Da der Impuls eine vektorielle Größe ist, haben wir drei Impulskomponenten getrennt zu bilanzieren. Wir schreiben $\rho_i^P(t, \mathbf{x})$ für die Dichte der i -ten Impulskomponente und $j_{ik}^P(t, \mathbf{x})$ für die k -Komponente der Stromdichte der i -ten Impulskomponente. In diesem Fall ist also das Dichtefeld bereits ein Vektorfeld und das Stromdichtefeld folglich ein Tensorfeld zweiter Stufe.

Als Quellen des Impulses kommen nur äußere Kräfte in Frage, die in das System hineingreifen, d.h. die Queldichte für den Impuls ist eine *Kraftdichte*, die wir mit $\mathbf{f}(t, \mathbf{x})$ bezeichnen. Dann lautet die Bilanzgleichung für den Impuls (im Indexkalkül geschrieben)

$$\frac{\partial \rho_i^P}{\partial t} + \nabla_k j_{ik}^P = f_i. \quad (2.11)$$

Ein äußeres Schwerfeld \mathbf{g} führt beispielsweise zu einer Kraftdichte $\mathbf{f} = \rho \mathbf{g}$.

Die Impulsstromdichte hat noch eine weitere äußerst wichtige Interpretation, da der pro Zeiteinheit durch eine Fläche strömende Impuls als Druckkraft auf diese Fläche angesehen werden kann: Genauer beschreibt j_{ik}^P die i -te Komponente der Kraft pro Fläche auf ein Flächenelement mit Normale in k -Richtung und

$$F_i = \int_F df_k j_{ik}^P \quad (2.12)$$

demzufolge die i -te Komponente der gesamten durch den Impulsstrom zustandekommenden Druckkraft auf eine Fläche F . Ist insbesondere F die Oberfläche ∂V eines Volumens V , so läßt sich Gl. (2.12) in die Form

$$F_i = \int_{\partial V} df_k j_{ik}^P = \int_V d^3x \nabla_k j_{ik}^P \quad (2.13)$$

umschreiben; dies ist die i -te Komponente der Druckkraft, die das Volumen V auf seine Umgebung ausübt.

In einem Fluid gilt offenbar

$$\rho_i^P = \rho v_i \quad (2.14)$$

und

$$j_{ik}^P = \rho v_i v_k + \sigma_{ik}, \quad (2.15)$$

wobei ρ die Massendichte und σ der (zunächst nicht weiter bestimmte) konduktive Anteil der Impulsstromdichte ist. Gemäß obiger Interpretation beschreibt σ denjenigen Anteil der Druckkräfte, der nicht durch die Strömung der Fluidteilchen zustandekommt, weshalb man σ auch als *Drucktensor* bezeichnet.

Ganz analog zur Impulsbilanz läßt sich die Drehimpulsbilanz formulieren; wieder sind drei Komponenten zu bilanzieren: Es sei $\rho_i^L(t, \mathbf{x})$ die Dichte der i -ten Drehimpulskomponente und $j_{ik}^L(t, \mathbf{x})$ die k -Komponente der Stromdichte der i -ten Drehimpulskomponente.

Abb. 1: Seite aus der „Elementaren Feldtheorie“ [6]

und beeinflussen zu können. Die Aussagen der Physik fassen vielfältige Erfahrungen zusammen und ordnen sie in ein umfassendes theoretisches System ein. Dabei gehen physikalische Aussagen immer auch über die unmittelbare Erfahrung hinaus. Deshalb greifen bei der Bildung physikalischer Begriffe empirische Erfahrungen und konventionelle Entscheidungen ineinander ... Die Interpretation von Phänomenen und die Aufmerksamkeit, die ihnen zuteil wird, hängen von den Vorerfahrungen und Erwartungen ab, sind also theoriegeleitet: „Was ein Mensch sieht, hängt sowohl davon ab, worauf er blickt, wie davon, worauf zu sehen ihn seine visuell-begriffliche Erfahrung gelehrt hat.“

2 | Die Entwicklung einer allgemeinen Theorie der Energieübertragung

● *Gustav Mie* zeigt in [1] sehr eindrucksvoll, dass die Energie immer lokalisierbar ist, dass man sich von der Energie das Bild eines „immateriellen Fluidums“ machen kann, für das es eine Nahwirkungsvorstellung gilt, sowohl in mechanischen als auch in elektromagnetischen Anwendungen.

In den Vorbemerkungen seines Aufsatzes ist zu lesen: „In neuerer Zeit beginnt, hauptsächlich durch den Einfluss der Maxwell'schen Theorie, die Ansicht herrschend zu werden, dass sich alle Naturerscheinungen durch Nahwirkungen erklären lassen. Eine Folgerung aus dieser Ansicht ist, dass die

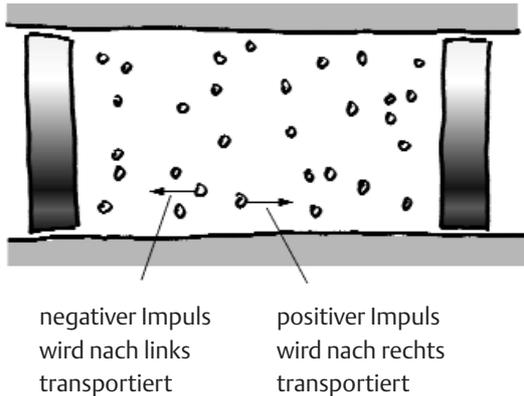


Abb. 3: Ein Teilchenstrom von links nach rechts und einer von rechts nach links, aber nur ein Impulsstrom von links nach rechts.

ströme unterschiedlicher Richtung. Der Impulsstrom hat aber für beide Beiträge dieselbe Richtung.

Die magnetische Ladung

Das Analogon der elektrischen Ladung beim Magneten ist die magnetische Polstärke oder magnetische Ladung, eine altehrwürdige Größe. Sie ist aber in den letzten Jahrzehnten aus der Mode gekommen. Die Abneigung hat ihre Ursache vermutlich in einem Fehlschluss. Die Teilchenmodellvertreter waren am Werk und sie argumentierten so: Es gibt keine magnetisch ge-

ladenen Teilchen, keine magnetischen Monopole, wie man sagt. Also gibt es auch die Größe magnetische Ladung nicht.

Die Stoffmodellvertreter sind hier anderer Meinung: Sie sagen: In der Theorie tritt eine extensive Größe „magnetische Ladung“ auf. Wir wenden selbstverständlich das Stoffmodell auf sie an.

Die Folgen davon, eine Größe magnetische Ladung nicht zu benutzen, sind gravierend. So ist es unmöglich, einen ganz einfachen Satz mit den Mitteln der Schulphysik zu formulieren: dass die gesamte magnetische Ladung jedes Körpers null ist.

5 | Schluss

● Aus diesen etwas langen Erörterungen lassen sich drei kurze Schlussfolgerungen ziehen.

- Sprechweisen wie „Die Masse hängt an der Feder“, sind zwar nicht schädlich, aber man gewinnt auch kaum etwas gegenüber der Formulierung „An der Feder hängt ein Körper“.
- Verwechslungen von physikalischer Größe und System wie in „Elektromagnetische Strahlung ist reine Energie“ sollte man unbedingt vermeiden.
- Wenn man über den elektrischen Strom spricht, so empfehlen wir, das Stoffmodell zu verwenden. Man spricht dann über die elektrische Ladung wie über ein gedachtes Fluidum.

Anschrift des Verfassers

Prof. Dr. Friedrich Herrmann, Didaktik der Physik,
Universität Karlsruhe, 76128 Karlsruhe, E-Mail:
friedrich.herrmann@physik.uni-karlsruhe.de

Zur Lokalisation von Energieströmen

D. Plappert

Vorbemerkungen

● Die physikalische Größe Energie ist eine der bedeutendsten Größe nicht nur der Physik, sondern sie spielt in vielen Bereichen der Naturwissenschaften eine zentrale Rolle. Seit mehr als 100 Jahren ist die Erhaltung der Energie und dass alle beobachtbaren makroskopischen Erscheinungen physikalisch durch eine Nahwirkungstheorie beschrieben werden können, bekannt. Trotzdem werden auch heute noch vereinzelt Zweifel laut, ob die Energie wirklich eine „ganz normale“ physikalische Größe sei, wie etwa die elektrische Ladung, eine Größe, die in einem System gespeichert sein kann, die von einem Ort zu einem anderen Strömen kann ...

In der Elektrizitätslehre waren die Erhaltungseigenschaft der elektrischen Ladung und das mentale Bild eines strömenden Fluidums schon 1750 im Sinne einer Nah-

wirkungsvorstellung allgemein anerkannt. 1898 hat *Gustav Mie* [1] in dem Aufsatz „Entwurf einer allgemeinen Theorie der Energieübertragung“ für die physikalische Größe Energie entsprechende Fragen sehr gründlich untersucht und geklärt. Darauf soll im Folgenden Bezug genommen werden um zu zeigen, mit welchem Recht auch die Energie als „immaterielles Fluidum“ betrachtet werden kann, das im Raum lokalisiert ist und das durch den Raum strömen kann. Außerdem soll die Bedeutung des Begriffs „Energie-Träger“ betrachtet und in den Zusammenhang der Energieübertragung in Materie und mit elektrischen Strömen gestellt werden. Für einen allgemeinbildenden Physikunterricht, in dem die Schülerinnen und Schüler Vertrauen bekommen sollen, dass es sich lohnt, die im Unterricht gelernten Konzepte zur Klärung physikalischer Alltagsfragen anzuwenden, ist es von großer Bedeutung, dass die im

Unterricht entwickelten Begriffe und Prinzipien durch entsprechende mentale Bilder lebendig und kräftig dargestellt werden. Nur so können sie Sicherheit im selbstständigen Umgang mit diesen Konzepten bekommen. Voraussetzung dafür ist natürlich, dass dies auch der unterrichtenden Lehrkraft gelingt. Dazu soll der folgende Beitrag beitragen.

1 | Der Zusammenhang von Phänomen und physikalischer Beschreibung

● Die physikalische Beschreibung von Phänomenen und die Interpretationen mit entsprechenden physikalischen, mentalen Bildern, sind nicht vorgegeben, sondern immer von Menschen geschaffen. Hierbei gibt es eine Freiheit, die u. a. durch die beobachteten Phänomene beschränkt ist. An viele in der Physik übliche Beschreibungsweisen haben wir uns so gewöhnt, dass wir