

Gunnar Friege, Rüdiger Scholz und Heinz-Werner Oberholz

Darstellungen energetischer Prozesse

Physikalische Vorgänge mit Energiekontomodell, Energieflussdiagrammen und Energieübertragungsketten beschreiben

KLASSENSTUFE:	7–10
ZEITUMFANG:	variabel
THEMEN:	Energieformen, Energieumwandlungsprozesse, Energieentwertung, Energieerhaltung
KOMPETENZEN:	Erkenntnisgewinnung (Modellbildung); Kommunikation (Darstellungsformen)
METHODEN:	variabel
WEITERE MATERIALIEN:	PhET-Simulation [3]

Die Beschreibung physikalischer Vorgänge unter Verwendung des Energiebegriffs ist bekanntermaßen schwierig, aber auch sehr ergiebig (s. a. Basisartikel auf S. 2–9). Die zentralen didaktischen Aufgaben bestehen darin, energetische Vorgänge in Natur und Technik entdecken zu lassen, Energie von anderen physikalischen Größen zu unterscheiden und dazu eindeutige Begriffe sowie geeignete Darstellungen zu finden, die über sämtliche Klassenstufen hinweg vernetzt sind und tragfähig bleiben.

Unterschiedliche Darstellungsformen wie Energiekonten, Energieflussdiagramme oder Energieübertragungsketten kommen in Schulbüchern und im Unterricht zum Einsatz. Zum Teil sind sie curricular sogar explizit gefordert (vgl. z. B. [1]).

Solche Darstellungsformen dienen der Visualisierung. Allerdings sind die Informationen in Energiedarstellungen meist hochverdichtet. Die Verwendung und Interpretation von Pfeilen macht diese Problematik exemplarisch deutlich (s. dazu [2], S. 29): Für was genau steht ein Pfeil (Energie, Energieumwandlung, Energietrans-

port, fortschreitende Zeit)? Sind mit den Pfeileigenschaften (Breite, Richtung) noch weitere Größen codiert?

Im Folgenden werden drei unterschiedliche und gängige Energiedarstellungen betrachtet:

- Varianten der Nutzung sind zentral beim Thema *Energiekonten*.
- Die Darstellungsform *Energieflussdiagramm* wird im Kontext technischer Prozesse diskutiert.
- Bei den *Energieübertragungsketten* wird auf a) verschiedene Zugänge zum Energiebegriff, b) die unterschiedliche Konstruktion von Energieübertragungsketten und c) die Entwicklung dieser Darstellungsform im Lauf der Sekundarstufe I eingegangen.

Energiekonto: Bilanzierung von Energie

In der Energiekontodarstellung steht die Bilanzierung von Energien im Vordergrund: Jede in einer Situation vorkommende Energieform (Bewegungsenergie, Lageenergie ...) hat in der Regel ein eigenes Konto mit einer „Füllstandshöhe“, einem Kontostand.

Die „Füllstandshöhen“ können sich mit der Zeit ändern, d. h., zwischen Konten wird Energie „transferiert“. Dies entspricht der *Energieumwandlung*. Die Summe der „Füllstandshöhen“ bleibt konstant, sofern alle relevanten Konten betrachtet werden. Dies entspricht der *Energieerhaltung*.

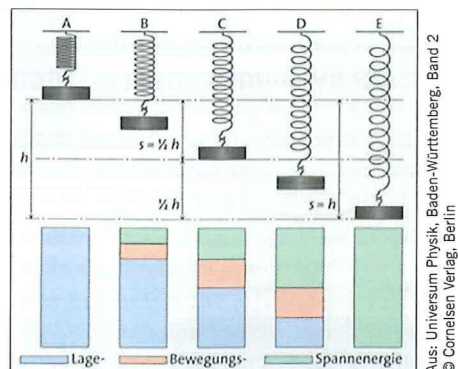
Varianten der Kontodarstellung

Brückmann und Detken (S. 10–17) setzen das Kontomodell im Anfangsunterricht ein. Hier steht die qualita-

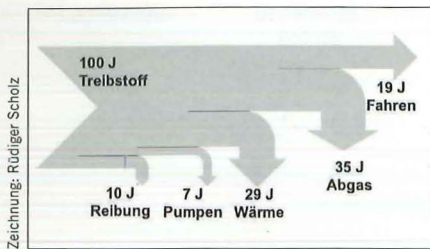
tive/halbquantitative Bilanzierung im Vordergrund: Konten und (geschätzte) Füllstandshöhen zu verschiedenen Zeitpunkten werden grafisch gezeigt. Energieformen sind Lage- und Bewegungsenergie sowie die „Verluste“. Altersgemäß erfolgen keine quantitativen Berechnungen, jedoch werden der Energieerhaltungsgedanke grafisch verdeutlicht und die Energieentwertung eingeführt.

Ludemann und Kraus (S. 39–43) setzen die Kontodarstellung als Hilfsmittel zur Lösung von quantitativen Aufgaben ein. Die Füllstandshöhen für Konten der potentiellen, kinetischen und Spann- sowie thermischen Energie werden für den Anfangs-, ggf. einen Zwischen- und den Endzustand eines Systems berechnet.

Die Darstellung von Energiekonten ist auch in der Literatur nicht einheitlich. Beispielsweise zeigt **Abbildung 1** nicht mehrere Energiekonten mit unterschiedlichen Füllstandshöhen für jede Energieform zu einem bestimmten Zeitpunkt, sondern stets die addierten Füllstandshöhen jeder Energieform zu den ausgewählten Zeitpunkten. Dadurch werden die



1 | Energiekontodarstellung beim Federpendel



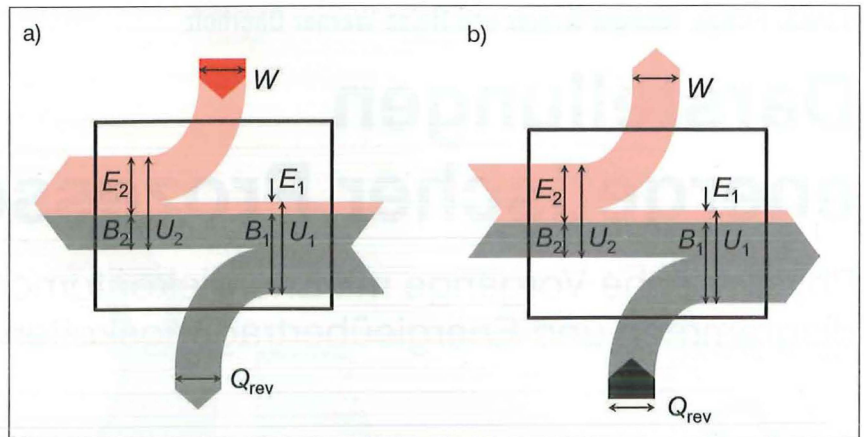
2 | Energieströme bei PKW

Energieerhaltung sowie die Energieumwandlung gut sichtbar und die Darstellung bleibt übersichtlich. Die Energiekonten selbst sind allerdings nicht mehr so leicht erkennbar. Anzumerken ist zudem, dass in diesem Beispiel auf den Aspekt der Energieentwertung nicht eingegangen wird.

Energiekontendarstellungen bilanzieren in der Regel Energieformen zu verschiedenen (mindestens jedoch zwei) Zeitpunkten. Je nach Auswahl können dabei der Gedanke mehrerer, nicht leerer Energiekonten zu einem Zeitpunkt sowie die kontinuierliche Energieumwandlung nicht erkannt werden. Simulationen ermöglichen eine dynamische Darstellung und verdeutlichen beide Aspekte damit wesentlich präziser. Beispielsweise werden in einigen PhET-Simulationen Energiekonten als Darstellungsform integriert und zu jedem Zeitpunkt angezeigt. Exemplarisch sei hier z. B. auf die Energieskatpark-Simulation verwiesen [3]: In dieser Simulation lässt sich zudem die idealisierte von der nicht-idealisierten Bewegung unterscheiden. Das im letzteren Fall zusätzlich eingeführte Konto verdeutlicht die Abgabe von Energie in die Umgebung und damit die Energieentwertung.

Energieflussdiagramme: Sankey-Diagramme revisited

1898 erschien in einer Zeitschrift für Ingenieure erstmals ein Energieflussdiagramm von Captain Henry Riall Sankey, um Ineffizienzen in einem Dampfkraftwerk grafisch sichtbar zu machen (s. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/10/JIE_Sankey_V5_Fig1.png). Es sollte sich zeigen, dass diese Form der Dar-



3 | Energieflussdiagramme beim Presslufthammer (W : verrichtete Arbeit; U : innere Energie des Systems; Q_{rev} : an die Umgebung abgegebene bzw. aus der Umgebung zugeführte Wärme; E : Exergie; B : Anergie; grau: Wärme; rosa: Arbeit): a) isotherme Kompression, b) isotherme Expansion

stellung eine ungeahnte Anwendbarkeit finden sollte: Überall dort, wo Systeme durch Ströme extensiver Größen verbunden sind, lassen sich Sankey-Diagramme einsetzen. Und da die Diagramme zudem einen echt quantitativen Zugang ermöglichen (die Breite der Strompfeile korrespondiert mit der strömenden Menge), wurden die Diagramme umso wichtiger, je teurer die strömenden Größen wurden (Ressourcenverknappung). Die Diagramme halfen bei einer effektiven Ressourcenplanung.

Beim Zeichnen von Energieflussdiagrammen helfen folgende Hinweise (s. a. [5]):

- Es werden nur (extensive) Mengengrößen (wie z. B. Stoffmengen, Energiemengen) dargestellt, die auf eine Zeitperiode bezogen sind.
- Die Pfeilbreite ist proportional zur Menge.
- Es werden keine Bestandsgrößen („Konten“) berücksichtigt.
- Es gilt ein Erhaltungssatz für die jeweils strömende Größe (z. B. Energieerhaltungssatz).

Damit werden offenbar nur die Bilanzen des 1. Hauptsatzes dargestellt (s. a. Abb. 2). Durch die Unterscheidung zwischen Exergie und Anergie, die der 2. Hauptsatz auszeichnet, werden jedoch auch Auf- und Entwertungsprozesse darstellbar:

- Energieformen, für die der 2. Hauptsatz eigentlich ohne Bedeutung ist, weil sie sich ohne Beschränkung durch ihn in jede andere Form umwandeln lassen,

werden *Exergie* genannt (z. B. die mechanischen Energieformen, elektrische Energie).

- Als *Anergie* werden Energien aus der Gruppe der Energieformen bezeichnet, die gar nicht in Exergie umgewandelt werden kann, z. B. innere Energie der Umgebung.
- Mischungen aus Anergie und Exergie sind demgemäß beschränkt umwandelbar, wobei das Mischungsverhältnis durch den 2. Hauptsatz festgelegt ist.

Die Begriffe Exergie und Anergie haben sich in der technischen Thermodynamik bewährt.

Beispiel: Druckluft mit Sankey

Durch Verwendung von Exergie und Anergie lassen sich thermodynamische Prozesse, in denen Energieentwertung wesentlich ist, anschaulich und quantitativ richtig darstellen. Als instruktives Beispiel soll hier die Herstellung von Druckluft dienen, verknüpft mit der Frage: *Warum kann man mit komprimierter Luft, z. B. mithilfe eines Drucklufthammers, Arbeit abgeben, wo doch die innere Energie von Druckluft genauso groß ist wie die von normaler Luft bei gleicher Temperatur?*

Die thermodynamischen Prozesse sind die isotherme Kompression und Expansion von Luft (s. Abb. 3). Nähert man Luft als ideales Gas, muss man die Gasgleichung für die Volumenänderung $V_1 \rightarrow V_2$ integrieren, um die Kompressionsarbeit berechnen. Man

erhält: $W = -\mu \cdot R \cdot T \cdot \ln(V_2/V_1)$ mit μ : Stoffmenge, R : universelle Gaskonstante und T : Temperatur.

Als Beispiel diene die reversible isotherme Kompression eines Arbeitsgases der Menge $\mu = 45$ mol auf ein Hundertstel des Volumens bei konstanter Temperatur $T = 290$ K mit $R = 8,314$ J/(K·mol). Einsetzen liefert die zugeführte (Volumen-)Arbeit $W = 500$ kJ. Da T und damit die innere Energie U konstant sind, wird die zugeführte Energiemenge vollständig als Wärme $Q_{\text{rev}} = -500$ kJ an die Umgebung abgeführt ($U_2 = U_1$ in Abb. 3). Dabei sinkt die Entropie des Arbeitsgases um $\Delta S = Q_{\text{rev}}/T \approx 1,7$ kJ/K und es wird klar, woher Druckluft die besondere Arbeitsfähigkeit bezieht: Bei gleicher innerer Energie ist der Exergie-Anteil der komprimierten Luft größer als bei Normalluft: $E_2 > E_1$, der Anergie-Anteil kleiner $B_2 < B_1$. Bei der Expansion füllt die zuströmende Wärme Q_{rev} aus der Umgebung die durch Abgabe von Arbeit im Presslufthammer reduzierte Energiemenge mit Anergie wieder auf. Vor der Kompression sei $U_1 = E_1 + B_1$ (E_1 und B_1 sind unbekannt), nach der Kompression ist $U_2 = U_1 = E_2 + B_2 = (E_1 + W) + (B_1 + T \cdot \Delta S)$.

Während die Formeln den Wechsel von Energieauf- und -entwertung kaum erkennen lassen, zeigen die Energieflussdiagramme bzw. um Exergie/Anergie erweiterte Sankey-Diagramme, diesen Prozess anschaulich (s. Abb. 3). Lässt man die Druckluft einfach so, ohne die Entnahme von Arbeit, in die Umgebung entweichen, wird die Entropie $\Delta S \approx 1,7$ kJ/K irreversibel erzeugt. Nutzarbeit kann nicht abgeführt werden und die Entropie der Umgebung steigt genau um diesen Wert. Da die Arbeit nicht genutzt wurde, wurde Energie einer Menge von 500 kJ unwiederbringlich entwertet.

Die Sankey-Darstellung zeigt also, dass die Idee, durch Druckluftnutzung werde Wärme aus der Umgebung (Q_{rev}) vollständig in Arbeit umgewandelt ($W = -Q_{\text{rev}}$), zumindest missverständlich ist. Denn die Nutzarbeit wird aus dem Exergie-Vorrat der komprimierten Luft gewonnen, die Wärme aus der Umgebung füllt lediglich mit

Anergie auf, damit die Gesamtenergie erhalten bleibt.

Sankey-Diagramme erfreuen sich nach wie vor großer Beliebtheit, nicht zuletzt die Angebote nützlicher Software zum Zeichnen der manchmal komplexen Diagramme bezeugen dies. Sie standen auch Pate bei der Entwicklung der Energieübertragungsketten (s. u.), wobei jedoch Speicher, Konten und Wandler konzeptfremd sind – was jedoch nicht unbedingt ein Nachteil ist. Handelt es sich nämlich um reine Exergiespeicher, wird ihr Prozessverhalten allein schon durch die Kontinuitätsgleichung bestimmt, was kaum zusätzliche Einsichten verspricht. Sind die Speicher gemischte Exergie-Anergie-Speicher, hängt ihr nutzbarer Energiegehalt dramatisch von den Umgebungsbedingungen ab, was die Darstellung erheblich verkompliziert. Bei sog. Wandlern stellt sich stets die Frage nach einem Restspeichervermögen. Sankey-Diagramme verzichten wohlweislich auf diese Zusätze. Die jeweiligen Quellen der externen Prozessenergien lassen sich z. B. neben die Energiepfeile notieren.

Energieübertragungsketten

Zum Thema „Energie“ ist auch heute noch der Lehrplan Physik für NRW von 1993 [6] lesenswert, der eine ausführliche didaktische Beschreibung zu diesem Thema liefert: „Der Unterricht hat zunächst ein Kriterium zu vermitteln, mit dem sich feststellen lässt, ob ein Körper Energie enthält.“ Als geeignetes Kriterium wird vorgeschlagen: „Ein Körper enthält dann Energie, wenn er die Erwärmung eines zweiten Körpers bewirken kann.“ Ein solcher Ansatz ruft geradezu nach „Energieübertragungsketten“. Eine Energieübertragungskette ist die (oft mehrfache) Übertragung von einer Energieform in eine andere. Im Schulbereich wird auch die grafische Darstellung eines solchen Vorgangs so genannt. Energieübertragungsketten werden gut erinnert und regen zum aktiven Nachdenken an. Entsprechend schlagen ältere, aber auch neuere Lehrpläne, Rahmenrichtlinien

und Kerncurricula eine entsprechende grafische Aufarbeitung energetischer Vorgänge vor (vgl. z. B. [7]–[9]).

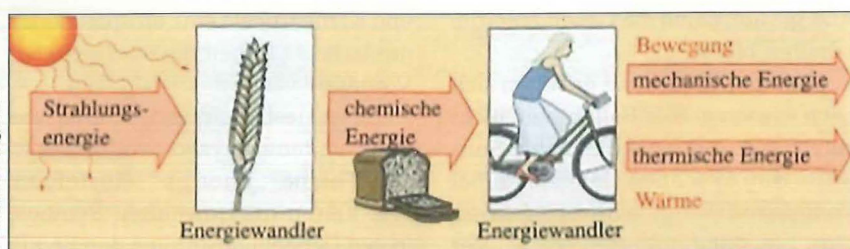
Es ist deshalb von Interesse, wie verschiedene Physikschulbücher in das Thema „Energie“ einsteigen: Wie klären die gewählten Symbole in den Darstellungsformen den Begriff „Energie“? Wie durchdringen und begleiten sie den Unterricht im weiteren Verlauf? Im Folgenden werden vier Lehrwerke exemplarisch näher betrachtet – für zwei Schulbücher der Einstieg in die Nutzung der Energieübertragungsketten, für zwei weitere die Progression während der gesamten Sekundarstufe I (Tab. 1 auf S. 37 und Tab. 2 auf S. 38).

Fokus

Das Lehrwerk „Fokus“ [10] führt den Energiebegriff anhand alltäglicher Bewegungen (Bahn, Bus etc.) erzählend ein. „Energie“ erspart Anstrengung. In alten Zeiten waren Pferde schnell erschöpft und brauchten lange, heute benötigt die Bahn von Köln nach München fünf Stunden. Dazu benötigt sie elektrische Energie. Andere Verkehrsmittel benötigen Diesel oder Erdgas. Weitere Überlegungen und Experimente führen zur Aussage: „Gegenstände, mit denen etwas bewegt werden kann, haben Energie.“ Nach der Nennung weiterer Energieformen, heißt es: „Gegenstände, mit denen etwas bewegt, erwärmt, geschmolzen, verdampft, hochgehoben, zum Leuchten oder zum Tönen gebracht werden kann, haben Energie.“

In Körpern steckende Energie – als Bild für eine Speicherform der Energie – kann Bewegungs-, Höhen-, Spannenergie sein oder auch thermische Energie und chemische Energie. Zur Aussage „Energie kann nicht erzeugt werden“ wird anhand einiger Beispiele eine erste Energieübertragungskette gezeichnet. Für die Energieübertragung von einem auf einen anderen Körper wird der „Energiewandler“ eingeführt.

In der in Abbildung 4 auf S. 36 wiedergegebenen Energieübertragungskette aus diesem Schulbuch wird die zugeführte Energie – wie allgemein üblich – durch einen breiten Pfeil



4 | Energieumwandlungskette bei einer Fahrradfahrerin

symbolisiert, der Wandler durch ein weißes Rechteck mit realem Bild (Pflanze, Radlerin). Es fällt auf, dass in der Energieübertragungskette die Speichergrößen (chemische Energie, thermische Energie, Bewegung) in/an den Pfeilen stehen (s. Abb. 4), ebenso wie Strahlungsenergie oder Wärme (Übertragungs- bzw. Prozessgrößen).

Der Energieerhaltungssatz wird im Lehrtext formuliert und in den Energieübertragungsketten durch die in der Summe gleichbleibenden Energiepfeilbreiten symbolisiert, allerdings wird dieser Sachverhalt im Lehrtext nicht angesprochen und ist auch durch die Darstellung im Bild nicht zwingend erkennbar.

Universum

Auch im Lehrwerk „Universum“ [11] wird Energie über Bewegung eingeführt, allerdings präziser über den Beschleunigungsvorgang. Nach der Beschleunigung hat der Körper Energie. Über die Vorgänge bei einer Achterbahn gelangt man zur Energie in einem höher gelagerten Körper. Ähnliche Überlegungen führen zur Energie, die in einem elastisch verformten Körper steckt. Beim Erhitzen eines Körpers wird vorrangig die Energieübertragung durch Wärme betrachtet, die Energie im

Inneren eines Körpers wird mithilfe der Teilchenbewegung erläutert. Bis auf den Fachbegriff „Wärme“ werden zunächst keine neuen Begriffe zu den Energieformen eingeführt, was ein Vorteil sein kann.

Im Folgekapitel „Energie unterwegs“ werden dann Energieübertragungsketten eingeführt. Die Objekte einer solchen Energieübertragungskette werden im Lehrtext parallel zur Grafik in Abbildung 5 ausführlich erläutert. Als Beispiel dient die Energieumwandlung bei einer Solaranlage. Energiespeicher (grün) und Energiewandler (rot) werden unterschieden und im Text erklärt.

Entsprechend der Differenziertheit der grafischen Darstellung wurden auch Eintragungen in die Teilsymbole vorgenommen: Energieübertragung durch Wärme oder elektrischen Strom, Speicherung im heißen Wasser. Übertragung durch „Drehbewegung“ soll möglicherweise den Begriff „Arbeit“ umschreiben, könnte aber mit Bewegungsenergie verwechselt werden. Die eingeführte Symbolik wird in kleinen Versuchen genutzt und eingeübt.

Die *Energieerhaltung* wird anhand einiger Beispiele nahegelegt, bei denen Wärme in die Umgebung abgegeben wird. Dies bereitet die *Energieentwertung* vor – begründet

mit der Energie, die nun in der schnelleren Bewegung vieler Teilchen der Umgebung steckt und von dort nicht zurückgewonnen werden kann. Auch dazu gibt es genügend Übungsmaterial. Die eingeführten Energieformen und Energieübertragungsketten werden schließlich in einer Zusammenfassung noch einmal gesichert.

Vergleich

Zwischen den betrachteten Werken (s. Abschnitte „Fokus“ und „Universum“ sowie Tab. 1–2) bestehen Gemeinsamkeiten, aber auch zum Teil erhebliche Unterschiede im Zugang zum abstrakten Begriff Energie und bei der Visualisierung von Elementen einer Energieübertragungskette (wie Energiespeicher, Wandler) oder bei der Bedeutung der Elemente (Pfeile, Kästen, Kreise).

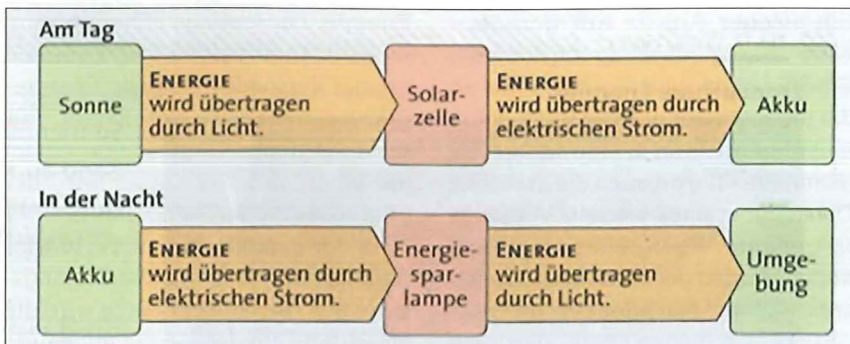
Wie deutlich ein Grundgedanke zur Vermeidung unnötigen Energie-„Verbrauchs“ im jeweiligen Lehrwerk dargeboten wird, ist letztlich teilweise auch Ansichtssache. Der Grundgedanke ist: Wenn man am Ende einer langen Energieübertragungskette den Energiestrom unterbricht, verschwindet dieser Energiestrom zusammen mit den Verlustströmen auch am Anfang der Kette. Dies ist geradezu eine Handlungsanweisung im Sinne des Umweltschutzes: Wer eine Lampe ausschaltet, erspart im Elektrizitätswerk das dafür – und für die längs der Energieübertragungskette entstehenden Energieverluste – nötige Verbrennen von Kohle.

Resümee und Ausblick

Die Vielzahl der Darstellungsformen energetischer Prozesse wurde mit den hier behandelten Visualisierungen nur teilweise abgedeckt. Jede dieser Darstellungen existiert zudem auch in vielen Varianten (vgl. z. B. die unterschiedlichen Visualisierungen von Energiespeichern und -wandlern bei den Energieübertragungsketten).

Dieses Heft stellt noch weitere Ansätze für die Darstellung energetischer Prozesse vor, z. B.:

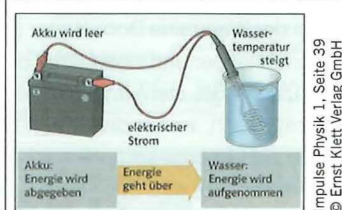
Beim Unterrichtseinsatz des „Würfelmodells“ auf S. 20–23 stehen ins-



5 | Energieumwandlungsketten für eine Solaranlage

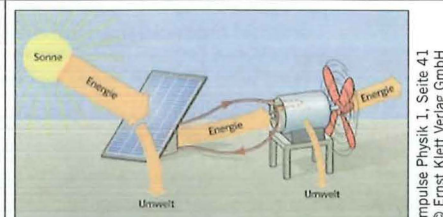
Im Lehrwerk „Impulse“ [12] wird – im Unterschied zum Lehrwerk „Fokus“ – nicht Bewegung als Kriterium für das Auffinden von Energie gewählt, sondern das Erhitzen: „Wenn ein Gegenstand die Temperatur von Wasser erhöhen kann, dann besitzt er Energie.“ Es schließt sich direkt der Entwertungsgedanke an: Beim Abkühlen heißen Wassers wird Energie an die Umgebung abgegeben und ist dort nicht mehr nutzbar.

Ebenso wird ein energetischer Vorgang innerhalb der Energieübertragungsketten hier anders gewichtet: Bei „Impulse“ stehen die (grauen) Rechteckkästen durchweg für Energiespeicher (s. **Abb. 6**), bei „Fokus“ dagegen repräsentieren Kästen Energiewandler.



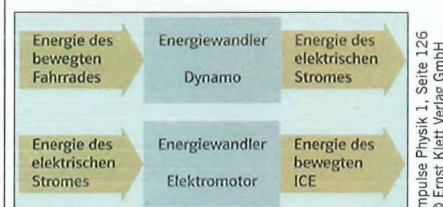
6 | Energieübertragungskette für die Erwärmung von Wasser

Eine realistische Zeichnung oberhalb der Energieübertragungsketten (s. **Abb. 7**) liefert eine anschauliche Erklärung der abstrakten Symbolik der Energieübertragung, unterstützt durch einen kindgemäßen Text in der Energieübertragungskette: „Energie wird abgegeben ... Energie geht über ... Energie wird aufgenommen“. Bei der Einführung weiterer Energieformen greift man nun nicht mehr direkt auf das Erhitzen zu, wohl aber indirekt: Elektrizität kann nicht nur Wasser erhitzen, sondern auch etwas bewegen oder hochheben. Der Begriff „Wandler“ kommt zunächst nicht vor, vielmehr werden die Geräte konkret benannt (Quelle und Gerät) und auch realistisch gezeichnet.



7 | Energieübertragungskette mit realistischer Zeichnung des Prozesses

Im nachfolgenden Kapitel „Temperatur und Energie“ kommen – überraschend – Energieübertragungsketten gar nicht vor, dafür aber später wieder in „Energie unterwegs mit Licht“. Nun aber tauchen verschiedenfarbige Kästen als Energiewandler auf, indirekt angesprochen im Lehrtext. Am Ende des Buches beginnt ein eigenes Kapitel zur Energie. Hier werden die Energiewandler gesondert thematisiert, sie werden jetzt auch so genannt. In den Energieumwandlungsketten werden sie durch graue Kästen symbolisiert (diese visualisierten vorher Speicher). In den Übertragungspfeilen (s. **Abb. 8**) steht sowohl eine Speicherform der Energie (Energie des bewegten Fahrrades bzw. des bewegten ICE) als auch eine Übertragungsform (Energie des elektrischen Stromes).



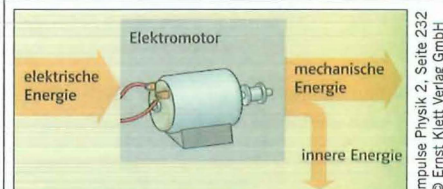
8 | Energieübertragungskette mit Speicher- bzw. Übertragungsenergieformen in den Pfeilen

Der Band 2 des Lehrwerks „Impulse“ bleibt zunächst bei der Visualisierung „grauer Kasten = Wandler“, wobei das Wort „Wandler“ jetzt allerdings nicht mehr benutzt wird. Die Pfeilsymbolik taucht wieder bei der Reihenschaltung auf.

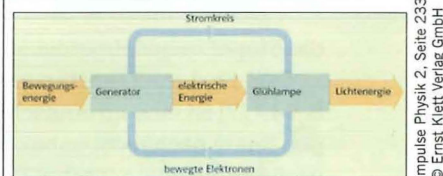
In der Mechanik finden sich erneut Energieübertragungsketten. Die grauen Kästen stellen hier nun wieder Energiespeicher dar („Energie des fahrenden Autos“) bzw. auch Vorgänge anstelle der inneren Energie beteiligter Körper („Temperatur der Bremsen steigt“). Die mechanische Arbeit wird – losgelöst von der bisherigen Energiebetrachtung – eingeführt. Die Speicherform Lageenergie wird als „Arbeitsvermögen, das ein Körper auf Grund einer erhöhten Lage hat“ definiert. Im gleichen Sinne wird auch die Bewegungsenergie (noch einmal) eingeführt.

„Mit Arbeit wird Energie umgewandelt“ könnte nun zur differenzierteren Darstellung der Energieübertragungsketten führen, mit Arbeit als Übertragungsgröße und Bewegungsenergie als Speichergröße. Im Kapitel „Arbeit und Energie“ gibt es jedoch keine Darstellungen mit Energieübertragungsketten. Ausschnitte aus Energieübertragungsketten findet man erst wieder im Kapitel „Innere Energie“. Wieder sind hier die Kästen Energiespeicher. Auf den kurz vorher eingeführten Begriff „Arbeit“, den man nun in die Übertragungspfeile schreiben könnte, verzichtet die Darstellung und wählt stattdessen „mechanische Energie“, „Bewegungsenergie“ oder „Höhenenergie“. Man spart so Begriffe, nimmt aber Verwechslungen in Kauf.

Zur Illustration des Wirkungsgrades eines Energiewandlers dienen verzweigte Energieübertragungsketten. Da es dabei auf den Wandler (also das Gerät) ankommt, wird dieser wieder in den Vordergrund gerückt und als grauer Kasten dargestellt (und nicht die Energiespeicher; s. a. **Abb. 9**). In den Pfeilen bleibt man bei einer Mischung aus Speicherformen und Übertragungsformen (Zustands- und Prozessgrößen, s. **Abb. 10**).



9 | Energieübertragungskette mit Verzweigung zur Visualisierung des Wirkungsgrades



10 | Energieübertragungskette mit Zustands- bzw. Prozessgrößen in den Pfeilen

Tab. 1 | Impulse 1/2: Progression der Nutzung von Energieübertragungsketten im Lauf der Sekundarstufe I

besondere die Energieerhaltung und -umwandlung im Zentrum. Das Würfelmodell zeigt auf der zum Betrachter orientierten Würfelseite eine Energie-

form. Findet eine Energieumwandlung statt, wird eine andere Seite des Würfels zum Betrachter gedreht. Je nach Situation können mehrere Wür-

fel mit derselben Energieform sichtbar sein. Das Würfelmodell knüpft an das Kontomodell an. Konten mit unterschiedlichen Füllstandshöhen lassen

In der Werkreihe Dorn-Bader [13] beginnt die Überlegung zur Energie – anknüpfend an Alltagserfahrungen – mit der Aussage: „Temperaturerhöhung bedeutet Energiezufuhr“. Sie steht im weiteren Verlauf als Kriterium für die Qualität „Energie“. Man fragt auch, woher die Energie kommt, die einen Körper erhitzen kann, und gelangt so zur „Energiesprache mit Kontobildern“.

Als Konzept wird deutlich: Ein Zustand, der die Energieübertragungskette rückwärts verlängern kann, entspricht einer Energie. In der Bewegung eines Körpers steckt Energie, denn beim Bremsen wird ein anderer Körper wärmer, dessen Konto für innere Energie wird aufgefüllt – usw. (s. **Abb. 11**). Auch Lageenergie oder Spannenergie entdeckt man auf die gleiche Art.

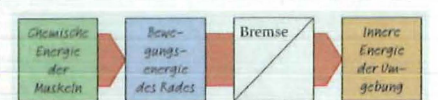
Bald wird deutlich, dass bei der Betrachtung der Energieübertragung noch etwas fehlt: Es gibt nicht nur *Energiespeicher* (Konten), es gibt auch *Energiewandler*. Ein Fahrrad bekommt Energie aus den Muskeln (s. **Abb. 12**). Eine Bremse wandelt die Energie (in Wärme) und füllt damit das Konto „innere Energie der Umgebung“. Das Füllen dieses Kontos ist unumkehrbar und kommt damit einer Entwertung der Energie gleich.

Man erkennt die abweichende Funktion des Wandlers innerhalb der Energieübertragungskette an redundanten Merkmalen: Das Rechteck ist weiß, es hat eine Diagonale und der Energiepfeil läuft ohne Pfeilspitze hindurch (s. **Abb. 13**; [14]).

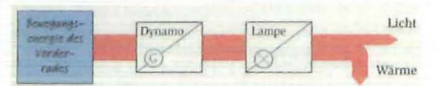
In allen Werken (einer Ausgabengeneration) wird dieselbe Symbolik verwendet und dies durch alle Teilgebiete der Physik. Im Folgeband des Dorn-Bader [15] für die Sek. I tauchen die Energieübertragungsketten an einzelnen Stellen wieder auf. Die Pfeile werden jetzt ergänzt um die Bezeichnungen der Prozessgrößen (Arbeit, Wärme, elektrische Energie, Licht ...), wenn auch nicht durchgehend (s. **Abb. 14**). Eine besondere Bedeutung gewinnt die symbolhafte Darstellung der Energieströme noch einmal beim Wirkungsgrad von Energiewandlern, insbesondere beim thermodynamischen Wirkungsgrad der Wärmekraftmaschinen.



11 | Energieübertragungskette für einen Bremsvorgang



12 | Energieübertragungskette mit Energiespeichern und -wandlern



13 | Energieübertragungskette mit Wandlern: weiße Rechtecke und durchlaufender Energiepfeil



14 | Energieübertragungskette mit Bezeichnungen der Prozessgrößen in den Energiepfeilen

sich z. B. dadurch visualisieren, indem man zu einem bestimmten Zeitpunkt alle Würfel mit gleicher angezeigter Energieform aufeinander stapelt und die Stapel nebeneinander stellt.

Der System-Transfer-Ansatz (s. S. 24–27) ist eine im deutschsprachigen Raum noch recht unbekannte Visualisierung energetischer Vorgänge. Der Schwerpunkt liegt hier auf dem Transfer von Energie zwischen Systemen und nicht auf der Energietransformation selbst. Der Systembegriff ist daher von zentraler Bedeutung.

Verschiedene Energiedarstellungen schließen sich nicht gegenseitig aus, sondern werden im Unterricht und in Lehrwerken ergänzend nebeneinander verwendet. Beispielsweise zeigt eine reine Energieübertragungskette nicht den dahintersteckenden zeitlichen Verlauf. Dieses Manko wird in einzelnen Werken erkannt und durch eine Energiekontodarstellung

in mehreren zeitlichen Phasen ergänzt. Kraus weist speziell auf die Uneinheitlichkeit der Energieflussdiagramme (hier: Energieübertragungsketten) hin und hält eine Vereinheitlichung der Darstellungsformen für notwendig ([2], S. 30). In jedem Fall müssen Schülerinnen und Schüler die Nutzung und eigene Anfertigung von Energiedarstellungen schrittweise erlernen. Sie müssen dazu konkrete Konstruktions- und Lesehilfen erhalten sowie bei der Interpretation dieser Visualisierungen energetischer Vorgänge unterstützt werden.

Literatur

- [1] Kerncurriculum Niedersachsen Physik 5–10. Hannover: 2015.
- [2] Kraus, M.E.: Pfeile in der Physik. Die Schwierigkeiten beim ikonischen Modellieren. In: PdN Physik in der Schule 65 (2016), Nr. 6, S. 25–32.
- [3] <https://phet.colorado.edu/de/simulation/legacy/energy-skate-park>
- [4] Schmidt, M.: Der Einsatz von Sankey-

Diagrammen im Stoffstrommanagement. Ausgabe 124 von Beiträge der Hochschule Pforzheim. Pforzheim: Verlag Hochschule Pforzheim, 2006..

- [5] Baehr, H. D.: Thermodynamik. Heidelberg/New York, Springer, 1978 (4. Aufl.).
- [6] Richtlinien und Lehrpläne für das Gymnasium – Sekundarstufe I – in Nordrhein-Westfalen, Physik. Frechen: Ritterbach-Verlag, 1993
- [7] Kernlehrplan für das Gymnasium – Sekundarstufe I in Nordrhein-Westfalen, Physik. Nordrhein-Westfalen. Frechen: Ritterbach-Verlag, 2008.
- [8] Bildungsstandards und Inhaltsfelder. Das neue Kerncurriculum für Hessen. Sekundarstufe I – Gymnasium, Physik. Hessisches Kultusministerium, 2012.
- [9] Bildungsplan des Gymnasiums, Physik. Baden-Württemberg. Villingen-Schwenningen: Neckar-Verlag, 2016.
- [10] Fokus Physik. Ausgabe Nordrhein-Westfalen. Berlin: Cornelsen, beginnend in 2008.
- [11] Universum Physik, Band 1 NRW. Berlin: Cornelsen, 2013.
- [12] Impulse Physik 1. Ausgabe Nordrhein-Westfalen. Stuttgart: Klett, 2008.
- [13] Dorn-Bader NI 7/8. Braunschweig: Schroedel, 2009.
- [14] Dorn-Bader Physik 1 SI, NW. Braunschweig: Schroedel, 2009.
- [15] Dorn-Bader Physik 2 SI, NW. Braunschweig: Schroedel, 2009.