

Elektrischer Strom und Energie – Physikalische Grundlagen und Modelle

1 Atommodell

Für ein Verständnis elektrischer Leitungsphänomene muss man den Aufbau der Stoffe kennen.

Alle Stoffe sind aus **Atomen** aufgebaut. Jedes Atom besteht aus einem positiv geladenen Atomkern im Zentrum, der von negativen Ladungen, den **Elektronen**, umgeben ist. Der Kern ist aus positiv geladenen und elektrisch neutralen Teilchen (Protonen und Neutronen) zusammengesetzt. Nach außen hin ist ein Atom elektrisch neutral; die Zahl der Elektronen in der „Hülle“ entspricht der Zahl der Protonen im Kern. Obwohl starke Anziehungskräfte zwischen den Teilchen mit unterschiedlicher Ladung bestehen, vereinigen sich die Elektronen in der Hülle nicht mit den Protonen im Kern. Abb. 1 zeigt ein schematisches Atommodell. Es zeigt Elektronen, die sich auf verschiedenen Bahnen um den Kern bewegen. Diese Bewegung ist sehr schnell und verhindert, dass die Elektronen in den Kern stürzen, und bewirkt damit u. a. die Stabilität des Atoms.

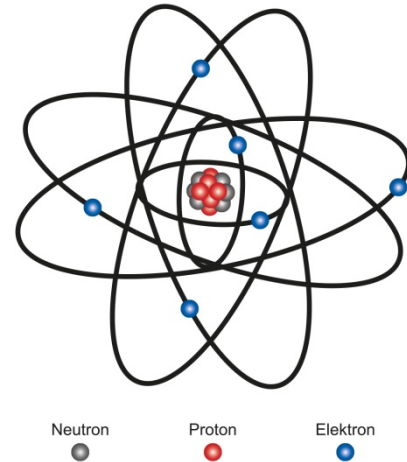


Abb. 1: Schematisches Atommodell.

Dieses Modell mit festen Elektronenbahnen ist veraltet, obwohl man es noch in vielen Büchern findet. In einem abstrakteren und tragfähigeren Modell nehmen die Elektronen aufgrund ihrer Welleneigenschaften nur ganz bestimmte Energiestufen im Atom ein. Die inneren kernnahen Elektronen sind sehr fest gebunden, die äußeren Elektronen lassen sich dagegen mit geringerem Energieaufwand vom Atom trennen. Dabei entsteht ein nicht mehr gebundenes („freies“) Elektron und ein positiv geladenes Atom (ein Ion).

2 Elektrische Leitfähigkeit

In einem Stoff sind unzählige Atome miteinander verbunden. Bei der Bindung spielen die äußeren Elektronen der Atome eine wichtige Rolle. Je nach Stoffklasse (z. B. Metalle, Salze, Kohlenstoffverbindungen) kommt es zu unterschiedlichen Bindungstypen. Sie bestimmen ganz wesentlich die Stoffeigenschaften (z. B. Festigkeit, Farbe, elektrische Leitfähigkeit).

Grundsätzlich benötigt ein Stoff, damit er elektrisch leitfähig ist, **bewegliche Ladungsträger**. Als Ladungsträger kommen negativ geladene **Elektronen** oder **Ionen** (positiv oder negativ geladene Atome) in Frage.

In einem **Metall** sind die freien Elektronen dafür verantwortlich, dass elektrischer Strom fließen kann. Die Metallatome sind in einer regelmäßigen Gitterstruktur angeordnet. Äußere Elektronen sind nicht mehr an bestimmte Atome gebunden, sondern bewegen sich als „Elektronengas“ im gesamten Metall. Wie die temperaturabhängige Bewegung der Teilchen eines Gases gleicht ihre Bewegung einem ungeordneten, chaotischen „Gewimmel“. Die Elektronen ändern beständig ihre Richtung aufgrund von Stößen mit Atomen und anderen Elektronen (Abb. 2).

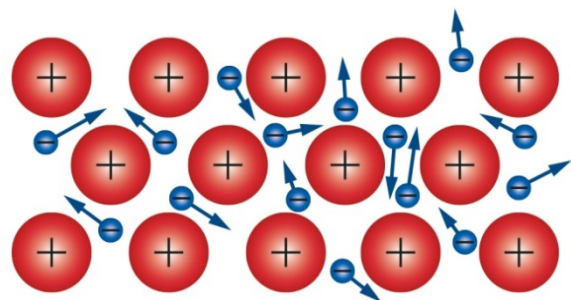


Abb. 2: Modell des Elektronengases im Metall.

Stoffe, in denen keine freien Ladungsträger vorkommen und die deshalb den Strom nicht leiten, nennt man **Isolatoren**, wie z. B. Kunststoff, Glas, Keramik oder Kochsalz. Kochsalzkristalle bestehen aus einer regelmäßigen Anordnung von positiv geladenen Natrium- und negativ geladenen Chlorionen. Erst wenn man das Salz stark erhitzt oder in Wasser auflöst, werden die Ionen beweglich und es kommt zur Ionenleitung. Der Strom wird dabei sowohl von den positiven als auch von den negativen Ionen getragen, die sich in entgegengesetzter Richtung bewegen.

Eine andere, in der Elektrotechnik und Elektronik wichtige Stoffgruppe sind die **Halbleiter**. Hier hängt die Zahl der freien Ladungsträger vom Reinheitsgrad des Stoffes ab. Sie lässt sich durch Zugabe von Fremdatomen (sog. Dotierung) und durch äußere Einflüsse (z. B. Temperatur, Licht) in weiten Grenzen beeinflussen. Anders als bei der Elektronenleitung in Metallen, können in Halbleitern auch positive Ladungen (Elektronenfehlstellen) zum Strom beitragen. Durch die Kombination von Halbleitermaterialien mit unterschiedlichen Leitungseigenschaften lassen sich Bauelemente mit komplexen Funktionen herstellen. Ohne die Stoffgruppe der Halbleiter gäbe es keine moderne Informations- und Kommunikationstechnik (Computer, Handy, Internet u.v.m.). Auch als Energiewandler spielen diese Bauelemente eine immer wichtigere Rolle. Experimento | 8+ geht bei den LEDs als Lichtquellen mit hohem Wirkungsgrad sowie bei der Nutzung der Strahlungsenergie der Sonne in Solarzellen darauf genauer ein.

Die Experimente zum Themenbereich A fokussieren auf die Elektronenleitung in Metallen. Bei der Untersuchung der Leitfähigkeit von Wasser (siehe Experiment A2) spielt die Ionenleitung eine Rolle.

3 Elektrischer Strom und Spannung

Obwohl sich im Inneren eines Metalldrahts die Elektronen sehr schnell bewegen, fließt kein von außen messbarer Strom, denn es strömen im Mittel ebenso viele Elektronen in die eine wie in die entgegengesetzte Richtung. **Elektrischer Strom** ist jedoch die Bewegung von Ladungsträgern in eine gemeinsame Richtung. Damit eine „gerichtete“ Bewegung zustande kommt, braucht es einen „Antrieb“ von außen – eine **elektrische Spannung**.

Ohne Spannung fließt kein Strom. Die Spannung ist die Ursache für den Strom.

Abb. 3 veranschaulicht den Strom in einem Leiter als gerichtete Bewegung der Leitungselektronen. Diese schematische Darstellung zeigt nur die zusätzliche mittlere Geschwindigkeit der Elektronen, die von der angelegten Spannung hervorgerufen wird. Die viel stärkere chaotische Bewegung des Elektronengases ist hier nicht dargestellt (siehe Abb. 2).

Für die erste Begegnung mit dem Spannungsbegriff im Rahmen der Einführung in elektrische Stromkreise reicht es aus, die Spannung als eine gegebene Größe anzunehmen („Spannung ist das, was auf der Batterie angegeben ist bzw. was ein Spannungsmesser anzeigt“). Sie wird in **Volt** (Abkürzung V) gemessen.

Die elektrische Spannung einer Batterie kommt dadurch zustande, dass am Minuspol ein Überschuss und am Pluspol ein Mangel an Elektronen herrscht. Werden die Pole leitend verbunden, fließen Elektronen vom Minus- zum Pluspol durch den Leiter. Dieser Strom würde die Ladungsdifferenz zwischen den Polen sehr schnell ausgleichen, doch die Batterie liefert weitere Ladungs-

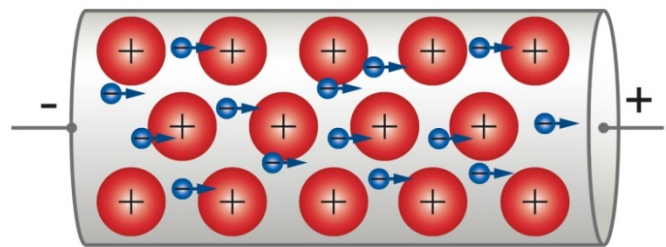


Abb. 3: Modell des elektrischen Stroms in einem metallischen Leiter.

träger nach. Im Inneren der Batterie laufen chemische Prozesse ab, welche die Ladungsdifferenz und damit auch die elektrische Spannung aufrechterhalten. Die Reaktionen sind komplex und können hier nicht im Detail geklärt werden. Im Ergebnis transportieren die chemischen Prozesse im Inneren der Batterie Elektronen vom Pluspol zum Minuspol. Sind die chemischen Stoffe „aufgebraucht“, dann ist die Batterie „leer“. Es wird keine elektrische Spannung aufgebaut und der Strom kommt zum Erliegen.

Das anschauliche Ursache-Wirkungsmodell, die kausale Vorstellung von der Spannung als Ursache, die im Leiter einen Strom bewirkt, ist tragfähig. Die Größe der Spannung, ihr Zahlenwert, ist ein Maß für die Stärke des Antriebs. Je größer die Spannung, desto mehr Elektronen fließen in der gleichen Zeit durch den Leiter, desto größer ist die Stärke des Stroms. Derartige einfache Je-Desto-Betrachtungen sollten durchaus im Unterricht angestellt werden, denn sie helfen, die Begriffe Spannung und Strom auszuschärfen und gegeneinander abzugrenzen. Sie sind anschlussfähig für künftige Vertiefungs- und Abstraktionsprozesse.

4 Stromkreis

Um elektrische Geräte wie Glühlampen oder Elektromotoren zu betreiben, muss immer ein geschlossener **Stromkreis** vorhanden sein: Die Elektronen fließen vom negativen Pol der Batterie über eine leitende Verbindung zum Gerät und über einen weiteren Leiter zurück zum positiven Pol der Spannungsquelle. Die chemischen Vorgänge im Inneren der Batterie schließen den Stromkreis.

Dass ein geschlossener Stromkreis vorliegt, ist den Schülerinnen und Schülern keinesfalls unmittelbar einsichtig. Zum einen sind nur die beiden äußeren Verbindungen von der Batterie zum Gerät sicht- und greifbar; die inneren Prozesse in der Batterie, die den Kreis schließen, bleiben unzugänglich und entgehen der Aufmerksamkeit. Zum anderen steht das Stromkreismodell im Konflikt mit intuitiven Alltagsvorstellungen, von denen man sich nur schwer löst. Mit Elektrizität verbinden viele (nicht nur Kinder) ein eher „energieartiges“ Bild: Sie wird erzeugt und wird verbraucht. Man nimmt dabei an, dass Elektrizität/Strom in der Batterie gespeichert ist, über das Kabel zum Gerät fließt und dort „verbraucht“ wird. Die im Alltag übliche Bezeichnung „Verbraucher“ für elektrische Geräte drückt diese Vorstellung aus. Die Verbrauchsvorstellung ist im Unterricht zu thematisieren und sowohl stofflich als auch energetisch zu hinterfragen. Es gehen keine Ladungsträger im „Verbraucher“ verloren, auch wird keine Energie verbraucht (Energiewandlung bzw. Energieumwandlung s. u.). Um die Schülerinnen und Schüler nicht zu überfordern, sollte man sich zunächst nur auf die stofflichen Aspekte und den geschlossenen Kreislauf der elektrischen Ladung (Stromkreis) beschränken (Experimente A1 bis A4). Die Betrachtung der energetischen Perspektive ist davon zu trennen (Experiment A5). Sie benötigt weitere konzeptuelle Klärungsprozesse.

Auch wenn die Schülerinnen und Schüler in den Experimenten erkannt haben, dass zwei leitende Verbindungen zwischen Spannungsquelle und elektrischem Gerät zu dessen Betrieb erforderlich sind, impliziert das keinesfalls automatisch die Akzeptanz des Stromkreismodells. Die Schülerinnen und Schüler benutzen oft eine Art Zwei-Komponenten-Modell als Zwischenstufe. Aus dem Plus- und Minuspol kommen in diesem Modell zwei verschiedene Arten von Elektrizität. Sie werden von den beiden Leitungen zum Gerät transportiert, treffen dort zusammen und ihr „Verbrauch“ treibt das Gerät an. Um das Verbrauchsmodell zu widerlegen und das Stromkreismodell zu stützen, kann die Lehrkraft mit einem zusätzlichen Strommessgerät demonstrieren, dass vor und hinter dem vermeintlichen „Verbraucher“ der Strom (genauer die Stromstärke) gleich ist und dass die Stromrichtung davor und dahinter mit dem Stromkreismodell in Einklang steht. Die Experimente alleine reichen nicht aus, um die Kinder vom Stromkreiskonzept zu überzeugen. Neben der experimentellen ist umfangreiche konzeptuelle Unterstützung seitens der Lehrkraft erforderlich, um ein

tragfähiges Stromkreismodell zu entwickeln und zu festigen. Wichtig ist es, dass die Schülerinnen und Schüler lernen, das Stromkreiskonzept erfolgreich anzuwenden (z. B. bei dem Aufbau komplexerer Schaltungen, bei der Fehlersuche usw.). So wird das Modell allmählich gefestigt und verinnerlicht.

5 Elektrischer Widerstand

Wie „stark“ der elektrische Strom (d. h. wie groß die Stromstärke) im Stromkreis ist, hängt zum einen von der angelegten Spannung ab. Zum anderen bestimmt die Beschaffenheit der angeschlossenen Geräte und der Verbindungskabel die Stärke des Stroms. Durch einen dicken Kupferdraht fließt bei gleicher Spannung ein stärkerer Strom als durch einen dünnen Draht. Ein Eisendraht leitet schlechter als ein Kupferdraht von gleichem Durchmesser und gleicher Länge. Durch eine Glühlampe fließt ein stärkerer Strom als durch eine gleich helle LED. Die Eigenschaft von Stoffen sowie elektrischen Geräten, den Strom zu hemmen, nennt man **Widerstand**. Bei gleicher Spannung ist die Stärke des Stroms durch ein Gerät oder durch einen Leiter umso größer, je kleiner der Widerstand ist. Gute Leiter (Kupfer, Gold) besitzen einen niedrigen Widerstand. Bei sehr niedrigen Temperaturen verschwindet der Widerstand von manchen Leitern völlig, sie werden zu Supraleitern. Der Widerstand eines Isolators ist (fast) unendlich groß.

Stromstärke und Widerstand werden in den Materialien nur qualitativ thematisiert, um den Lehrkräften Freiraum für die Unterrichtsgestaltung einzuräumen. Je nach Lernfortschritt der Schülerinnen und Schüler und der konzeptuellen Sicherheit der Lehrkraft können auch weitergehende quantitative Überlegungen angestellt werden, die für den weiteren Lernverlauf anschlussfähig sind. Über die Je-Desto-Formulierung hinaus sind viele Schülerinnen und Schüler in der Lage, in einfachen proportionalen Zusammenhängen zu argumentieren. Eine Verdopplung der Spannung bewirkt eine Verdopplung des Stroms (genauer der Stromstärke). Die Vorstellung einer Proportionalität zwischen Stromstärke und Spannung beinhaltet bereits das Ohmsche Gesetz, ohne dass dazu eine Formel bemüht werden müsste. Der Weg zu einer späteren quantitativen Formulierung des Zusammenhangs zwischen Spannung, Stromstärke und Widerstand wird in dieser Formulierung bereits geebnet.

6 Analogien und Modelle zum Strom

Da man den Strom nicht sehen kann, wird oftmals versucht, den Schülerinnen und Schülern das Stromkonzept durch die Verwendung von Analogien zu erklären und durch möglichst einfache und eingängige Modelle zu veranschaulichen. Grundsätzlich versteht man unter einer Analogie die Übereinstimmung von Objekten oder Prozessen bezüglich bestimmter Merkmale. In der Physik sind Analogien insofern hilfreich, als sie es ermöglichen, Erfahrungen und Erkenntnisse aus einem vertrauten Phänomenbereich zur Erschließung eines neuen, unbekannten oder weniger zugänglichen Bereichs zu nutzen. Modelle beruhen ebenfalls auf Ähnlichkeitsbeziehungen, haben aber noch vielfältigere Funktionen als Analogien. Kinder kennen Modelle beispielsweise durch das Puppenhaus oder die Modelleisenbahn. Anders als bei diesen Modellen, die zumeist eine naturgetreue Abbildung der Wirklichkeit anstreben, geht es bei physikalischen Modellen darum, die Wirkungszusammenhänge der ablaufenden Prozesse möglichst gut zu beschreiben.

Damit Analogieüberlegungen und Modelle wirksam eingesetzt werden können, sollten sie sowohl sach- als auch kindgerecht sein. Allerdings ist ihre Akzeptanz sehr individuell ausgeprägt, weshalb kein Patentrezept für die unterrichtspraktische Umsetzung formuliert werden kann. Wesentlich ist, dass sie zur Vorstellungswelt der Kinder passen. Der den Modellen und Analogien zugrunde

liegende Erfahrungsbereich (der Basisbereich) sollte hinreichend vertraut und die Beziehungen zum Zielbereich sollten einsichtig sein. Der Weg über das Modell darf das zu klärende Phänomen nicht verstellen. Das modellierte System (die Wirklichkeit) darf nicht mit dem Modell verwechselt werden. Um möglichen Fehlvorstellungen entgegenzuwirken, sind die Grenzen der Modellierung zu reflektieren, was unbedingt durch die Lehrkraft angeregt und unterstützt werden muss. Damit ergeben sich im einführenden Unterricht enge Grenzen in der Anwendung von Modellen und Analogien. In den Experimento | 8+ Materialien wurde bewusst auf die explizite Darstellung bestimmter Modelle verzichtet, um den Rahmen der Experimentieranleitungen nicht zu sprengen und den Lehrkräften den Freiraum zu geben, eine der Lerngruppe adäquate Modellierungsebene zu wählen. Ohne den Rückgriff auf Modellvorstellungen lässt sich der Bereich Strom und Energie nicht vermitteln.

7 Vermittlung eines anschlussfähigen Energiekonzepts

Wie kaum ein anderes Gebiet steht die Energiethematik im Zentrum gesellschaftspolitischer Diskussionen. Energie bewegt, verändert, ermöglicht, treibt an. Sie ist Motor aller dynamischen Prozesse in der natürlichen und der vom Menschen gemachten Welt. Auch die gesellschaftliche Entwicklung ist energiegetrieben. Sie hängt nicht nur in unserem Land, sondern auch global wesentlich davon ab, wie gut es gelingt, die Umgestaltung der Energiesysteme im Spannungsfeld von Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit intelligent voranzutreiben. Angesichts dieser vielfältigen Herausforderungen rückt die Energiethematik in den Fokus von Bildungsprozessen. Dass bereits im einführenden Unterricht Energie thematisiert werden sollte, darüber besteht mittlerweile weitgehender Konsens. Die Frage, inwieweit dabei bereits auf ein tragfähiges physikalisches Energiekonzept hingearbeitet werden sollte, wird dagegen noch immer kontrovers diskutiert.

Der Energiebegriff ist komplex und entzieht sich einer einfachen Definition. Entgegen unserer Intuition kann Energie weder erzeugt noch vernichtet werden. In allen Prozessen, die bislang wissenschaftlich erforscht wurden, wird Energie nur von einer Energieform in eine andere umgewandelt. Die Menge der Energie bleibt dabei erhalten. Energie ist unzerstörbar. Materie kann dagegen in Energie gewandelt oder aus ihr erzeugt werden. Ein umfassendes Verständnis eines universellen Energiekonzepts hat sich erst spät in der Entwicklung der Wissenschaft herausgebildet. Es ist mit abstrakten Symmetrie- und Erhaltungsprinzipien verbunden.

Wie kann ein wissenschaftlicher Strukturbegriff, der den Gipfel einer theoretischen Entwicklung markiert, sinnvoll in die Anfänge des schulischen Lernens integriert werden? Inwieweit kann ein solcher Unterricht die Themen, die in der aktuellen Diskussion eine Rolle spielen (z. B. Energiesparen, Verminderung des „Energieverbrauchs“ von Haushaltsgeräten, erneuerbare Energien, nachhaltige Energieversorgung), auf eine nachhaltige Weise vermitteln? Diese Fragen sind für den Grundschulbereich bislang noch unzureichend geklärt. Die Experimento | 8+ Materialien bieten dazu experimentelle Hilfestellungen für den Unterricht an. Sie schaffen vielfältige Lerngelegenheiten, doch der Aufbau einer tragfähigen Wissensbasis muss von der Lehrkraft auf angemessene Weise unterstützt werden.

Trotz ihrer abstrakten Natur als physikalische Erhaltungs- und Bilanzierungsgröße äußert sich die Energie in höchst konkreten Erscheinungsformen, die auf vielfältige Weisen unser Leben durchdringen. Ein Zugang, der sich an der Vielfalt energetischer Phänomene und ihrer lebensweltlichen Bedeutung orientiert, ist für die Grundschule angemessen. In der Didaktik besteht weitgehender Konsens über ein kumulatives Modell des Lernens über Energie, das als orientierender Leitfaden dienen kann und dessen Struktur in Abb. 4 dargestellt ist. Es geht von Energiephänomenen und

deren qualitativer Beschreibung aus. Darauf aufbauend werden die unterschiedlichen Facetten des Energiekonzepts entwickelt, zunächst die Energiewandlung und der Energietransport als Prozesse, die Veränderungen beschreiben. Weiterführend schließt sich in dieser Systematik die Entwertung und die Erhaltung von Energie an, theoretische Konzepte, die den Wandlungsprozessen unterliegen und die diese qualitativ und quantitativ beschreiben und erst im Unterricht der Sekundarstufe I eine Rolle spielen. Der einführende Unterricht beschränkt sich weitgehend auf die ersten beiden Stufen in Abb. 4. Allerdings sollte die Lehrkraft in der Lage sein, auf weiterführende Fragen der Schülerinnen und Schüler adäquat zu reagieren und auch die Perspektive der Anschlussfähigkeit nach oben im Blick zu behalten.

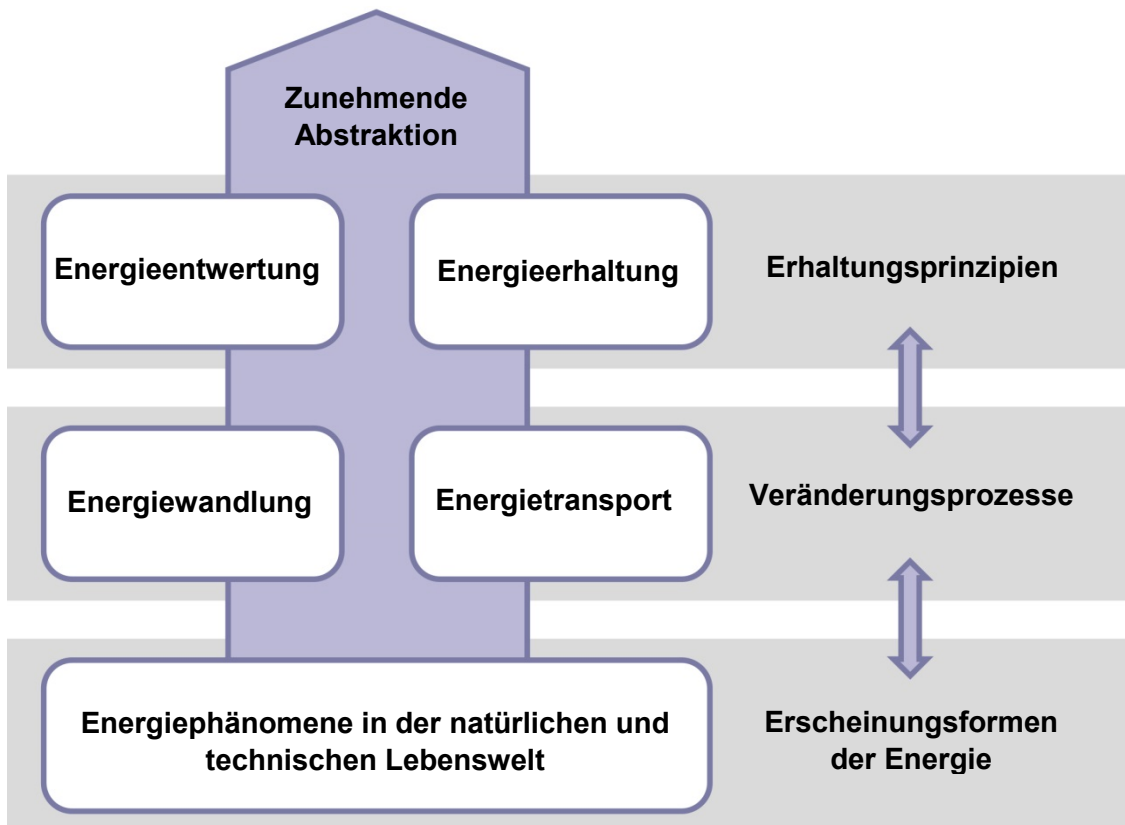


Abb. 4: Stufenmodell zur Entwicklung des Energiekonzepts im Unterricht.

Die Experimento | 8+ Materialien laden zum Erforschen von Prozessen der Wandlung elektrischer Energie und zum weiterführenden Lernen über die Bedeutung der Energie in der natürlichen und der gemachten (technischen) Welt ein. Sie orientieren sich am Forschungszyklus und fördern den Erwerb von erfahrungsbasiertem prozeduralem Wissen (**Wissen, wie** etwas funktioniert). Der Aufbau von konzeptuellem Wissen (**Wissen, was** Sache ist) und seine Reflexion (**Wissen, warum** etwas geschieht) bedürfen umfassender Hilfestellung seitens der Lehrkraft. Sie sollte die Schülerinnen und Schüler bei der Verknüpfung der vielfältigen Facetten der Energie und beim Aufbau tragfähiger Modellvorstellungen unterstützen, die im Verlauf des Lernfortschritts in Anlehnung an Abb. 4 allmählich zu einem umfassenden Energiekonzept zusammengeführt werden.

Energiephänomene beschreiben

Auf einer phänomenologischen Ebene sollten im Umfeld der Experimente folgende Aspekte angesprochen, von den Schülerinnen und Schülern beschrieben und in ihrem Zusammenwirken vertieft werden:

- Beschreibung der Wirkungen von Energie: Energie ist notwendig, um Strom, Licht, Wärme, Bewegung zu erzeugen und um Körper anzuheben.
- Umgekehrt steckt Energie in Strom, Licht, Wärme, in bewegten sowie in angehobenen Körpern. Auch Brennstoffe (Heizöl, Benzin, Gas) sowie Nahrungsmittel enthalten Energie.
- Das Enthaltensein von Energie in einem Stoff oder einem System führt zum Energieträgermodell, das bei der Betrachtung von Transport- und Wandlungsprozessen hilfreich ist.
- Benennung verschiedener Energieträger bzw. Erscheinungsformen der Energie, die bei Energiewandlungsprozessen im Alltag vorkommen.

Typische Energieformen sind: Chemische Energie, elektrische Energie, thermische Energie (Wärme), magnetische Energie, mechanische Energie (Lage und Bewegungsenergie), nukleare Energie und Strahlungsenergie.

Typische Energieträger sind: Licht (Strahlungsenergie), Erdöl (chemische Energie), Wind (Bewegungsenergie der Luft), Wasser (Bewegungsenergie oder thermische Energie) usw.

- Beschreibung von Energietransportprozessen: Energie lässt sich von einem Ort zu einem anderen transportieren, indem man den Energieträger transportiert (z. B. Erdöl in einem Tanker, Erdgas in einer Gasleitung).
- Energietransport funktioniert aber auch ohne Materietransport; so kommt die Energie der Sonne durch den leeren Raum als Strahlungsenergie (Licht, Wärmestrahlung) zur Erde.
- Präzisierung der besonderen Rolle der elektrischen Energie: Sie ist bequem und vielfältig nutzbar und lässt sich relativ einfach über Stromleitungen transportieren.

Mit Strom lässt sich Energie sehr komfortabel und relativ verlustarm über große Strecken transportieren. Aber Strom ist nicht gleich Energie. Strom und Energie begrifflich klar zu trennen ist eine zentrale Herausforderung, denn im Alltag werden Strom und elektrische Energie weitgehend synonym verwendet. Ein Rückgriff auf mechanische Modelle zur Energiewandlung zur Klärung der Zusammenhänge ist naheliegend. Aber auch dieser Zugang muss gegen unscharfe Alltagsvorstellungen ankämpfen. In der Mechanik wird die Kraft häufig mit der Energie verwechselt. Eine klare Abgrenzung zwischen Energie und Kraft erweist sich als schwierig. Vieles bleibt im Unterricht zunächst eine Art Sprachspiel, wobei auf die exakten Begriffe Wert zu legen ist.

Im Alltag ist Energie häufig mit vitalistischen Vorstellungen verbunden. Für viele (nicht nur Schülerinnen und Schüler) ist „biologische“ Energie etwas völlig anderes als „physikalische“ Energie. Die Vorstellung, dass die gleichen Wandlungsprozesse der Energie, die in unbelebten natürlichen und technischen Systemen vorkommen, auch in Organismen eine Rolle spielen, stößt auf vielfältigen Widerstand. Insofern ist es wichtig, auch die Energiewandlungsprozesse im Organismus in die Überlegungen einzubeziehen. Auch in der Gesundheitserziehung ist es von zentraler Bedeutung, den Energiegehalt von Nahrungsmitteln (ihren „Brennwert“) zu thematisieren.

Wandlung und Erhaltung von Energie

Vor diesem Hintergrund bietet es sich an, Wandlungsprozesse der Energie mit körperlichen Erfahrungen der Schülerinnen und Schüler in Verbindung zu bringen. So ist der Fahrraddynamo gut geeignet, körperlich zu erfahren, dass die Wandlung von Bewegungsenergie in elektrische Energie etwas kostet. Ist der Dynamostromkreis geschlossen, dann muss man wesentlich kräftiger am Rad drehen als bei unterbrochenem Kreis.

Auch die Wandlung der beiden grundlegenden mechanischen Formen der Energie (Bewegungsenergie, Lageenergie) lässt sich sehr gut in der Erfahrung verankern und anschließend verallgemeinern:

- Beim Fahrradfahren muss man kräftig in die Pedale treten und mit den Beinmuskeln Arbeit verrichten, um immer schneller zu werden. Dabei gewinnt man Bewegungsenergie.
- Die verrichtete Arbeit entspricht der Zunahme an Bewegungsenergie.
- Fährt man bergauf, dann gewinnt man mit zunehmender Höhe Lageenergie.
- Die Lageenergie wird bei der Bergabfahrt in Bewegungsenergie gewandelt.

Ergänzend zu der sprachlichen Beschreibung der Prozesse ist eine bildliche Darstellung in Form von Energiewandlungsketten sinnvoll. Die Darstellung ist einprägsam, ausbaufähig und unterstützt den Aufbau abstrakter Vorstellungen. In den Wandlungsketten werden die beteiligten Energieformen als Kästen dargestellt, die Wandlungsprozesse werden durch Pfeile symbolisiert. Abb. 5 zeigt eine vereinfachte Darstellung beim Bergauffahren. Sie bezieht die Energie der Nahrung (chemische Energie), die für die Muskeltätigkeit erforderlich ist, in die Energiewandlungskette ein. Mit zunehmendem Lernfortschritt können diese Darstellungen der Energieumwandlungsketten weiter präzisiert werden, z. B. geben die Muskeln Wärme an die Umgebung ab. Widerstandsprozesse (Reibung an den Reifen, Luftwiderstand) entziehen Bewegungsenergie, die ebenfalls als Wärme in die Umgebung abgegeben wird. Es wird empfohlen, zu den besprochenen Wandlungsprozessen und den Experimenten Energiewandlungsdiagramme anzufertigen.



Abb. 5: Vereinfachte Energiewandlungskette beim Bergauffahren mit dem Fahrrad.

Nutzenergie und Energieeffizienz

Energie entsteht nicht aus dem Nichts, ebenso wird sie nicht verbraucht und verschwindet nicht spurlos. Vor diesem Hintergrund ist die Herkunft und das Wesen der Energie im gesamten Universum auch heute noch ein großes, wissenschaftlich nicht geklärtes Rätsel. Die Erhaltung der Energie als Erfahrungssatz kann den Schülerinnen und Schülern nur mitgeteilt werden. Im Unterricht der Grundschule liegt der Fokus darauf, dass jegliche Nutzung von Energie auf bereits vorhandener Energie aufbaut. Die umgangssprachliche „Energieerzeugung“ bzw. „Energiegewinnung“ ist ebenso eine Energiewandlung wie der „Energieverbrauch“ in elektrischen Geräten, die in der Alltagssprache, aber auch in manchen technischen Darstellungen als „Verbraucher“ bezeichnet werden.

Der Begriff Verbraucher sollte so weit als möglich vermieden und seine Unzulänglichkeit thematisiert werden. Statt von Energieerzeugung kann man neutraler von der Bereitstellung von Energie oder auch von einer Energiequelle sprechen. Man sollte sich allerdings nicht davon täuschen lassen, dass dieses „Sprachspiel“ bereits angemessene Vorstellungen impliziert. Erst wenn die Schülerinnen und Schüler in der Lage sind, mit den Begriffen auch adäquate Modelle zu verbinden, verlieren sich allmählich die eingefahrenen Fehlvorstellungen.

Bei der Energiewandlung entsteht neben der nutzbaren Energie auch immer ein gewisser Anteil an nicht weiter nutzbarer Energie. Beim Betrieb einer Glühlampe wird elektrische Energie in Licht gewandelt (Nutzenergie). Gleichzeitig gibt der erhitzte Glühfaden Energie als Wärme ab, die ungenutzt an die Umgebung entweicht. Abb. 6 visualisiert die jeweiligen Energiemengen, die bei den Wandlungsprozessen umgesetzt werden, durch verschieden breite Pfeile.

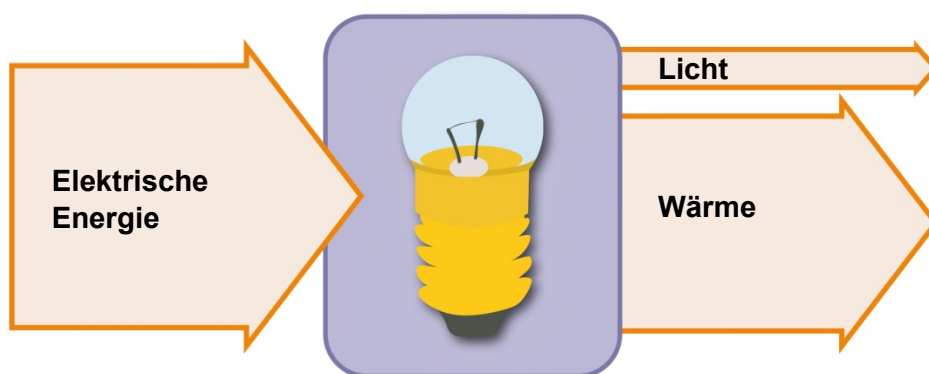


Abb. 6: Energiewandlung bei einer Glühlampe.

Die eingesetzte elektrische Energie ist gleich der Summe aus der Nutzenergie und der ungenutzten Energieverluste bei der Wandlung. Bei der Glühlampe werden weniger als 10 % der elektrischen Energie in Licht gewandelt. Der Anteil an ungenutzter Energie bei einer LED-Leuchte ist dagegen geringer. Sie besitzt einen höheren Wirkungsgrad, ihre Energieeffizienz ist größer, aber auch ihre Anschaffungskosten sind beträchtlich höher. Beim Kauf eines elektrischen Gerätes sollte man darauf achten, dass der Nutzpfeil im Vergleich zum Verlustpfeil möglichst groß ist und dass die Anschaffungskosten in einer vernünftigen Relation zu den eingesparten Energiekosten stehen. Die Einteilung in verschiedene Klassen der Energieeffizienz bei elektrischen Geräten gibt dafür Anhaltspunkte (A+++ steht für ein besonders effizientes Gerät, B, C...G für abnehmende Effizienz).

Erneuerbare Energie

Im Kontext von Energiewandlung und Energieerhaltung ist auch der Begriff der „erneuerbaren Energie“ zu thematisieren. Vielen Menschen ist nicht klar, dass auch erneuerbare Energien eine Energiequelle benötigen, die für Nachschub sorgt. Die bei uns verbreiteten erneuerbaren Energien gehen letztlich auf die Energie unserer Sonne zurück. Das ist bei Fotovoltaik und Solarthermie unmittelbar einsichtig, denn hier wird die Strahlung der Sonne direkt in Strom oder Wärme gewandelt. Bei der Biomasse wird chemische Energie genutzt. Sie stammt von energiereichen Stoffen, die durch die Photosynthese in Pflanzen gebildet worden ist. Die Pflanzen benötigen dazu Wasser, das sie über die Wurzeln aus dem Boden aufnehmen, Kohlenstoffdioxid aus der Luft, das sie über die Blätter aufnehmen, und das Licht der Sonne, das in den Blattfarbstoffen absorbiert wird und dessen Energie chemische Prozesse antreibt. Oft findet sich dagegen die Fehlvorstellung, dass die Energie der in den Pflanzen gespeicherten Stoffe aus den Nährstoffen des Bodens stammt.

Unser Organismus lebt ebenfalls auf der Basis erneuerbarer Energie, die von der Sonne stammt und viele Wandlungsketten durchlaufen hat, bevor wir sie über unsere Nahrung aufnehmen.

Auch Wasser- und Windkraftwerke werden letztlich von der Sonne angetrieben. Eine Diskussion des von der Sonne angetriebenen Wasserkreislaufs und der Windströmungen ist in der Grundschule sehr gut möglich und vermittelt Schülerinnen und Schülern erste grundlegende und tragfähige Einsichten in globale Zusammenhänge. Die Anfertigung von Diagrammen zu den zugrundeliegenden Stoffkreisläufen und die Verknüpfung mit Energieflussdiagrammen unterstützen das verständnisvolle Lernen.

8 Stromkreismodelle und die Richtung des Energietransports

Die begriffliche Trennung von Strom und Energie lässt sich durch geeignete Modelle unterstützen. Zwei Beispiele werden vorgestellt.

Das erste, das **Wasser-Strom-Modell**, wird häufig im Unterricht genutzt. Es veranschaulicht den geschlossenen Stromkreis mittels Wasserkreislauf. Der Wasserstrom wird durch eine Pumpe angetrieben. Der Antriebsteil baut einen Druckunterschied auf. Er entspricht der Spannungsquelle. Der Flüssigkeitsstrom treibt eine Turbine (Wasserrad) an. Sie entspricht einem elektrischen Gerät im Stromkreis. Das Wasser strömt im Kreis, die Energie fließt jedoch nur in eine Richtung von der Pumpe zur Turbine. Abb. 7 zeigt die „Einbahnstraße“ der Energie im Kontrast zum geschlossenen Wasserkreislauf. Ganz analog fließt der elektrische Strom in einem geschlossenen Kreis, doch die Energie fließt nur in eine Richtung von der Energiequelle (z. B. Generator, Batterie) zum elektrischen Gerät (z. B. Motor, Lampe).

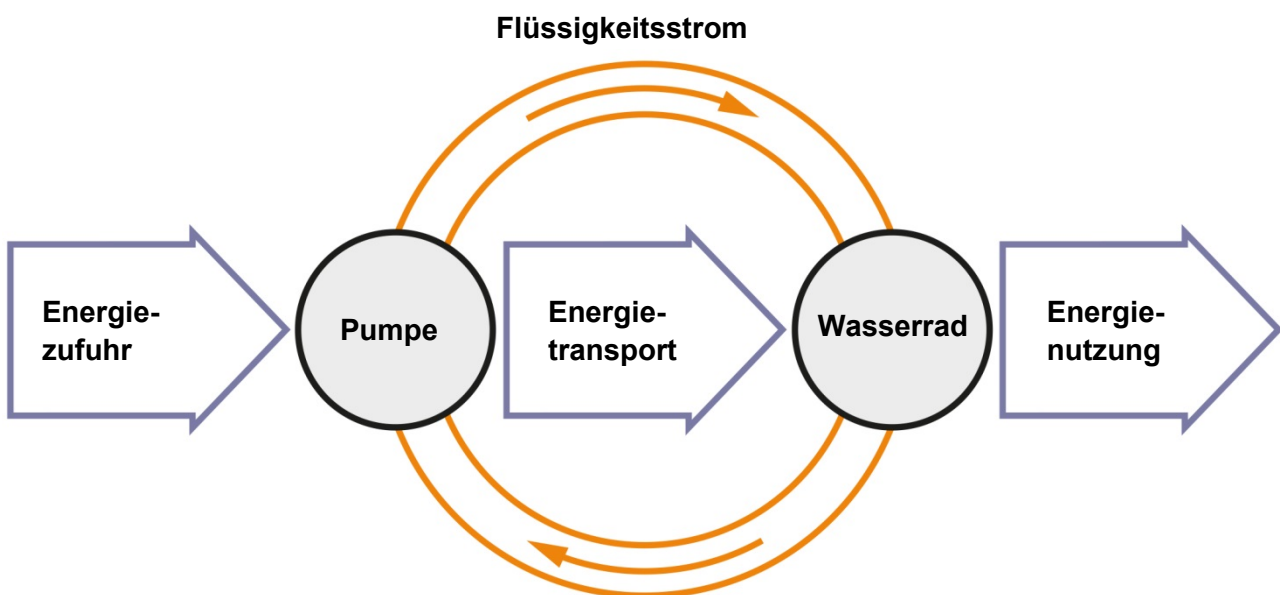


Abb. 7: Wasserstromkreismodell und die „Einbahnstraße“ des Energietransports.

Das zweite Modell, das **Kugelbahnmodell**, ist etwas komplexer und visualisiert die Lageenergie als Höhe über den gesamten Stromkreis. Am negativen Pol der Batterie herrscht Überschuss an negativen Ladungen. Man muss Energie aufbringen, um ein Elektron vom positiven zum negativen Pol zu transportieren. Mechanisch entspricht dies dem Anheben einer Kugel vom Boden auf eine gewisse Höhe. Dort verfügt die Kugel über Lageenergie. Sie kann eine Rinne hinab rollen, verliert dabei Lageenergie und gewinnt Bewegungsenergie. Diese kann genutzt werden, um ein Gerät zu betreiben. Abb. 8 zeigt das Modell mit einem Aufzug als Antrieb, der die Kugeln nach oben

befördert, und einem Flügelrad. Das Flügelrad wird von den Kugeln angetrieben und ist als Motor nutzbar. Der Aufzug entspricht dem Elektronentransport in der Batterie.

Das Kugelbahnmodell und die Modellierung der Batterie als „Aufzug“ beruhen darauf, dass die elektrische Spannung mit der Lageenergie in Beziehung gesetzt wird. Diese Vorstellung entspricht der Spannungsdefinition (elektrische Spannung als Potenzialdifferenz). In diesem Modell lassen sich weitere Details diskutieren. Man erkennt im Modell, dass in den Leitungen Energie „verlorengeht“. Die beiden Rinnen sind leicht geneigt, um die Kugeln gegen die Reibungskräfte transportieren zu können. Dadurch verfügt der Flügelradmotor über eine geringere Energie als unmittelbar am Aufzug vorhanden. Der Höhenunterschied entlang der Rinne entspricht dem Spannungsabfall bei einer elektrischen Leitung. Er hängt vom Leitungswiderstand ab und verringert die nutzbare Energie beim angeschlossenen Gerät.

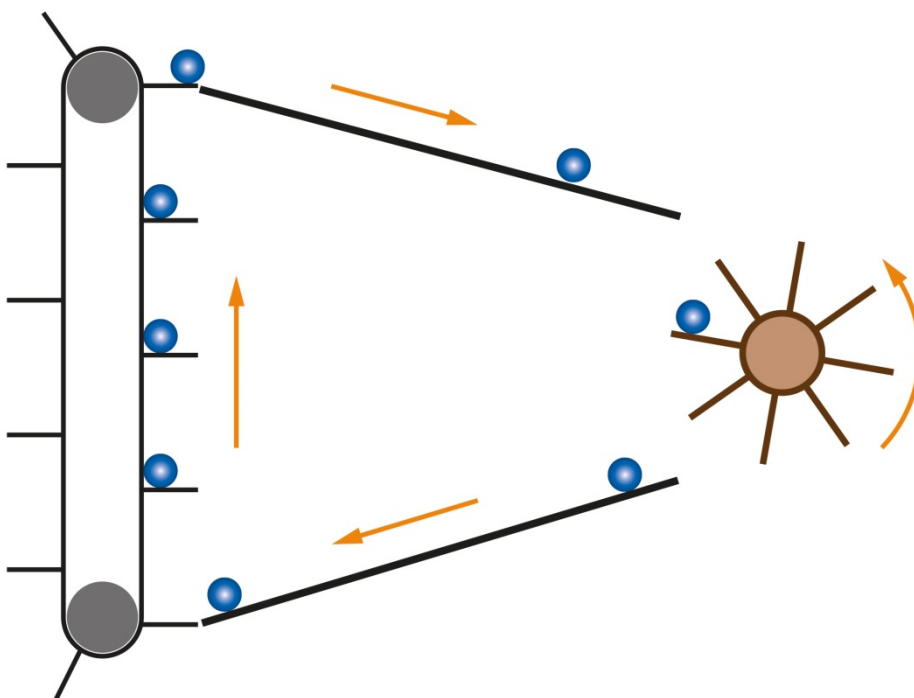


Abb. 8: Kugelbahnmodell des elektrischen Stroms.

Das Kugelbahnmodell ist primär als theoretischer Hintergrund für die Lehrkräfte gedacht. Je nach der eigenen Vertrautheit mit den Zusammenhängen, können unterschiedlich ausgefeilte Modelle im Unterricht benutzt werden. Beispielsweise kann der Kugelaufzug als Spannungsquellenmodell die Wirkungen der Parallel- und Reihenschaltung von Batterien in Bezug auf Spannung, Stromstärke und die pro Zeit umgesetzte Energie, die elektrische Leistung, veranschaulichen. Die Lehrkräfte werden explizit ermutigt, verschiedene Modelle im Unterricht zu erproben, auf ihre Tauglichkeit zur Lernunterstützung zu testen und ihre Erfahrungen im Kollegium auszutauschen. Nur so lassen sich die Lernwirksamkeit der Materialien und der eigene Unterrichtserfolg optimieren.