

Der alles andere als einfache elektrische Stromkreis

H. Härtel

1 Einführung

Soll ein junger Mensch das Bergsteigen erlernen und zwar vor allem das anspruchsvolle Klettern in der Wand, dann ist es selbstverständlich, dass der Schwierigkeitsgrad in den Übungsphasen optimal zu wählen ist. Ist der Schwierigkeitsgrad unangemessen hoch, so kann das Scheitern beim Aufstieg einen sogenannten Teufelskreis in Gang setzen, bei dem der Zweifel an der eigenen Leistungsfähigkeit das nächste Scheitern wahrscheinlicher macht. Wird der Schwierigkeitsgrad zu niedrig gewählt, so kann für die Teilnehmer der Sinn der Übung als fragwürdig und wenig erstrebenswert erscheinen. Vielmehr ist anzustreben, dass möglichst jedes Mitglied der Gruppe das jeweils angestrebte Etappenziel erreicht und dies mit einem Gefühl der Stolz und tiefer Zufriedenheit über die individuell erbrachte Leistung. Vor allem durch ein solches subjektives Erfolgserlebnis und das dadurch gestärkte Vertrauen in die eigene Leistungsfähigkeit wird eine langfristige Motivation für das Klettern in der Wand erreicht. Übertragen auf den Physikunterricht ergibt sich eine Übereinstimmung hinsichtlich der Schwierigkeit der Aufgabe. So wie das Klettern in der Wand als schwierig, herausfordernd, aber auch als potential gefährlich eingestuft wird, so gilt Entsprechendes für den Physikunterricht als ein wichtiges und vor allem als das schwierigste aller Schulfächer. Erfolgreiche Abschlüsse in diesem Fach genießen hohe Anerkennung und entsprechend groß sind die Versagensängste nach Misserfolgserlebnissen. Wie beim Üben in der Wand, kommt damit der Wahl des Schwierigkeitsgrads eine entscheidende Bedeutung zu. Werden nur Kenntnisse und Handhabungen bestimmter Gesetze – zum Beispiel das Ohm'sche Gesetz und die Kirchhoff'schen Regel – verlangt, ohne ein tieferes Verständnis anzustreben, so verliert die Aufgabe ihren ernsthaften Charakter, und es droht Motivationsverlust und Desinteresse. Wird der Unterrichtsstoff in einer zu abstrakten und mathematisch anspruchsvollen Form präsentiert, so überfordert der Unterricht viele Schüler und

führt zu Misserfolgserlebnissen mit den bekannten negativen Folgen.

Auf dem Gebiet des elektrischen Stromkreises zeigen die Ergebnisse der Lernforschung der letzten 30 Jahre, dass die gesetzten Lernziele – der angestrebte Gipfel – von der Mehrzahl der Schüler nicht erreicht wird [1-3]. Zwar sind die Alltagsvorstellungen, welche die Schüler in den Unterricht mitbringen, ausführlich untersucht worden [4]. Es gelingt der Fachdidaktik aber offensichtlich nicht, einen längerfristigen Konzeptwechsel im Sinne einer physikalisch akzeptablen Perspektive zu bewirken. Die Schüler scheitern in der Mehrzahl an den gesteckten Lernzielen, die allbekanntesten Schülervorstellungen, z.B. die des Stromverbrauchs, erweisen sich als stabil und überdauernd, und das Interesse am Physikunterricht ist unverändert niedrig.

Dies liegt nach der hier vertretenen Auffassung vor allem an der Art und Weise, wie in den traditionellen Lehrbüchern in recht gleichförmiger Weise der Unterrichtsstoff dargestellt wird. Die Festlegung des Schwierigkeitsgrades ist teilweise zu niedrig, teilweise zu hoch. Darüber hinaus wird der Unterrichtsstoff unvollständig bzw. lückenhaft angeboten. Zu vereinfacht wird der Unterrichtsstoff durch eine mangelnde Betonung des Systemaspekts des Stromkreises. Zu abstrakt wird der Unterrichtsinhalt durch eine ausschließliche Behandlung des Begriffs der Spannung als Energie pro Ladung. Lückenhaft ist ein Unterricht, der ausschließlich stationäre Zustände behandelt, nicht auf die notwendige Existenz von Übergangsprozessen hinweist und damit die Schüler nicht zu einem sorgfältigen Denken anhält.

Da die meisten Lehrer sich in ihrem Unterricht von den ihnen vertrauten Lehrbüchern leiten lassen, ist ohne eine kritische Reflexion der dort angebotenen Inhalte kaum eine Besserung des Unterrichts zu erwarten. In drei folgenden Artikeln werden diese Darstellungen kritisch gewürdigt, die vorhandenen Defizite benannt und Möglichkeiten zur Durchführung eines Unterrichts aufgezeigt, welcher der Komplexität des Stoffes angemessenen ist.

2 Der elektrische Stromkreis als System

In den Lehrbüchern wird der elektrische Stromkreis üblicherweise als ein System eingeführt, bei dem Energie von der Spannungsquelle zum Verbraucher bzw. Widerstand übertragen wird. Die Energieübertragung erfolgt durch geladene Teilchen, den Elektronen, die sich im Innern des geschlossenen metallischen Leiterkreises gleichförmig bewegen. Diese driftenden Elektronen entziehen sich der direkten Wahrnehmung, und somit ist die Verwendung von geeigneten Analogien oder Modellen unumgänglich, um die Phänomene des elektrischen Stromkreises im Unterricht behandeln zu können.

Die Frage ist, welche Analogien bzw. Modelle geeignet sind. Ein extrem negatives Beispiel findet sich in einem amerikanischen Lehrbuch, in dem Bilder wie in Abb. 1 verwendet werden [5]. An dem Minuspol der Batterie werden sie angeblich mit einem Energiepaket aufgeladen, das sie dann in geordneter Reihenfolge zum Motor tragen, um danach „erschöpft“ zur Batterie zurückzukehren. Einer der zentralen Fehler dieses Modells im Vergleich zum elektrischen Stromkreis besteht darin, den Antrieb für die kreisförmige Bewegung in die einzelnen Teilchen zu verlegen. Damit erhält man ein System, in dem die Geschwindigkeit der Teilchen bestimmt, wie schnell sich die Wirkung des Stromes ausbreiten kann. Wie will man mit einem solchen Modell erklären, dass sich beim elektrischen Strom die Wirkung mit etwa Lichtgeschwindigkeit ausbreitet, während sich die Elektronen nur sehr langsam bewegen, beim Wechselstrom praktisch gar nicht von der Stelle kommen? Weitere fehlerhafte Aspekte kommen hinzu: Wie will man erklären, dass es bei einem Stromkreis in energetischer Hinsicht keinen Unterschied zwischen der Hin- und Rückleitung gibt? Wie will man erklären, dass sich nach dem Abschalten der Batterie keine Energie mehr auf der Leitung befindet? Wie will man erklären, dass alle Teilchen automatisch stehen bleiben, wenn an irgendeiner Stelle der Leiterkreis unterbrochen wird? Wie will man erklären, dass die Teilchen bei

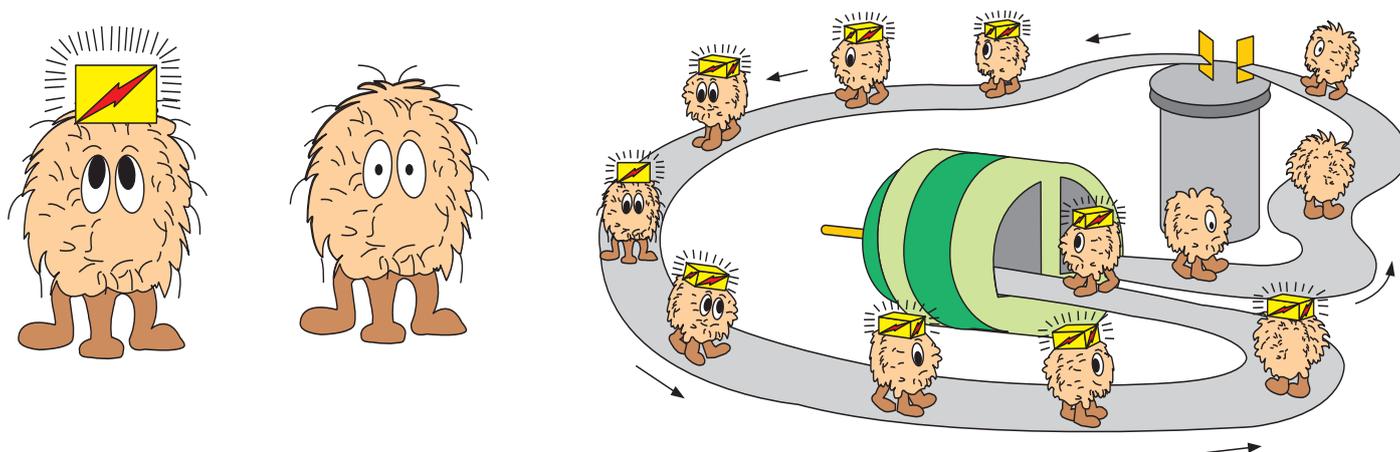


Abb. 1: Ein Fehlmodell für den elektrischen Stromkreis: Elektronen mit eigenem Antrieb tragen Energie von der Batterie zum Motor und kehren ohne Energie zum Motor zurück. Hier wird den Elektroteilchen ein in der Realität nicht existierender eigener Antrieb zugewiesen.

einer Reihenschaltung „wissen“, welchen Teil der Energie sie jeweils abzugeben haben? In relativ modernen deutschen Lehrbüchern werden Bilder gezeigt, auf denen, in Analogie zum elektrischen Strom, Skiläufer auf einer Loipe oder beladene Kraftwagen auf einer Autobahn zu sehen sind. Wiederum wird der Antrieb für die Bewegung des „Stromes“ in die einzelnen Teilchen verlegt. Daher gilt die gleiche Kritik und es bleiben die gleichen, oben aufgeführten Fragen unbeantwortbar.

Führt man die Warmwasserheizung als Analogie zum elektrischen Stromkreis ein, so ersetzt man den individuellen Antrieb einzelner Teilchen durch einen Systemantrieb (Wasserpumpe) und macht somit die An- und Abschaltvorgänge erklärbar. Wenn die Wasserpumpe stehen bleibt oder startet, stoppt oder startet der Wasserstrom im gesamten Kreislauf. Aber wiederum bleibt – im Gegensatz zu den Verhältnissen beim elektrischen Stromkreis – die Geschwindigkeit der Energieübertragung an die Fließgeschwindigkeit des Wassers gekoppelt, und die weiteren der oben aufgeführten Fragen bleiben ebenfalls ungeklärt.

Im Gegensatz zu Teilchen mit Eigenantrieb sind die Leitungselektronen in einem Leiterkreis zwar beweglich, aber ohne eigenen Antrieb. Die Übertragung von Energie erfolgt nicht in der Form energiereicher Materie, wie z. B. bei einer Warmwasserheizung, einem Blutkreislauf oder einem Förderband, sondern durch Kräfte, die durch die Spannungs- oder Energiequelle auf die Leitungselektronen aufgebracht werden (abstoßende Kräfte auf der Minusseite und anziehende Kräfte auf der Plusseite). Die Leitungselektronen übertragen diese Kräfte auf die im Stromkreis vorhandenen Widerstände, in denen dann in Verbindung mit der Bewegung der Leitungselektronen elektrische Arbeit verrichtet und somit

Energie übertragen wird. Treffenderweise sprechen wir, genauer als im angelsächsischen Sprachraum, nicht von einem Leistungs- oder Energiewerk (power plant), sondern von einem Kraftwerk. Die Leitungselektronen können diese Kräfte übertragen, da sie einen „steifen“ Ring bilden. Diese „Steifheit“ wird erzeugt durch ihre Wechselwirkung in der Form gegenseitiger Abstoßung sowie durch die Wechselwirkung mit den Gitterbausteinen des jeweiligen Leiters. Diese Wechselwirkung bedingt, dass im Innern jedes metallischen Leiters strikte Neutralität herrscht und an keiner Stelle ein Überschuss oder ein Mangel an Leitungselektronen auftritt.

Eine Fahrradkette oder ein Wasserkreislauf unter hohem Druck und mit geringer Fließgeschwindigkeit sind brauchbare Modelle für den elektrischen Stromkreis, da hier Kraft und Bewegung übertragen wird und nicht energiereiche Materie. Zu fordern ist, dass diese Tatsache, im Kontrast zu den oben aufgeführten Modellen bzw. Analogien, im Unterricht ausführlich und wiederholt besprochen und zur Deutung von Experimenten herangezogen wird. Dies stellt eine intellektuell anspruchsvolle Aufgabe dar, die nicht ohne Mühe und ausreichende Gelegenheit zum Üben gemeistert werden kann. Führt dieses Bemühen zum Erfolg, so besteht die Aussicht, ein tieferes Verständnis des vorliegenden Stoffes zu erreichen. Wird dagegen bei der Behandlung des elektrischen Stromkreises vor allem auf die abstrakte Funktion des Energietransport abgehoben und nur allgemein von Prozessen der Energieumwandlung gesprochen, so fehlt eine kausale Begründung der im gesamten Leiterkreis ablaufenden Prozesse. Beispielsweise wird nicht klar, warum die Energie sowohl in Richtung der strömenden Elektronen als auch entgegen ihrer

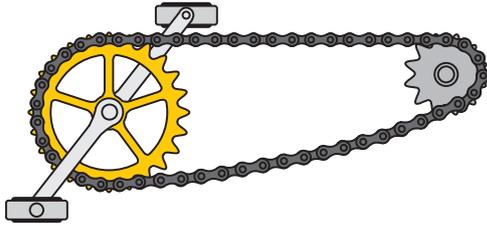
Stromrichtung übertragen wird. Auch können die an das obige Fehlmodell (Abb. 1) gestellten Fragen nicht in sich schlüssig beantwortet werden. Schließlich besteht die Gefahr, dass die Alltagsvorstellungen vom Energietransport = Transport energiereicher Materie und Energieverbrauch = Stromverbrauch nicht hinreichend problematisiert werden, sondern den Unterricht überdauern.

Der Satz von der Erhaltung der Energie ist in seiner Allgemeingültigkeit unübertröffen, aber auch in seiner Abstraktheit, und er ist daher als Grundlage für den Unterricht nur bedingt geeignet. Ein solcher Unterricht tendiert eher zu Beschreibungen als zu Erklärungen und bringt Schüler eher dazu, die vermittelten Inhalte hinzunehmen, als dass sie versuchen, sie zu verstehen. Vermutlich untergräbt ein solcher Unterricht Motivation und Interesse der Schüler.

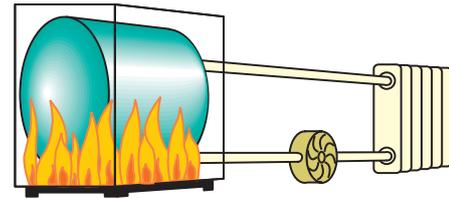
3 Hinweise für den Unterricht

3.1 Stromverbrauch versus Kraftübertragung

Bei einer erstmaligen Einführung des elektrischen Stromkreises, etwa im Sachunterricht der Grundschule oder in den Klassen 5/6 der Sekundarstufe I, werden die Bedingungen für das Fließen eines Stromes (Leiterkreis) erarbeitet, die Zuordnung von Bauelementen und Symbolen bekannt gemacht und zwischen Leiter und Nichtleiter unterschieden. Für einen Unterricht in einer zweiten Stufe, etwas für die Klassen 7 bis 9, kann zunächst auf die 1981 am IPN entwickelte Unterrichtseinheit verwiesen werden, die schon seit längerem nicht mehr aufgelegt wurde, seit kurzem aber wieder in leicht überarbeiteter und gekürzter Form im Netz verfügbar ist [6]. In dieser Unterrichtseinheit werden vier Abschnitte zu den Themen



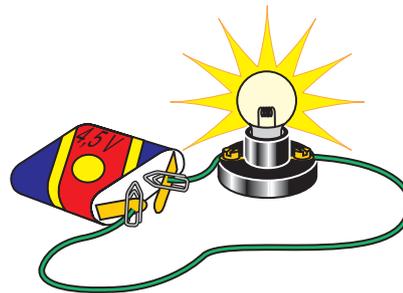
Übertragung von Kraft und Bewegung



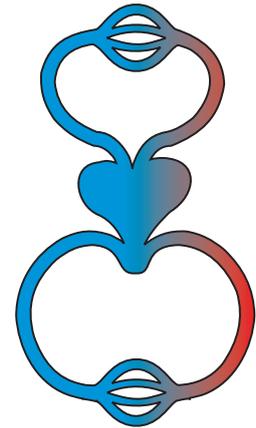
Übertragung von Wärme



Transport von Kohle



Übertragung von elektrischer Energie



Transport von sauerstoffreichem Blut

Abb. 2: Unterschiedliche Systeme zur Übertragung von Energie

- Strom und Widerstand in Reihen- und Parallelschaltungen
- Elektrische Spannung
- Ohm'sches Gesetz
- Anwendungen der Regeln des elektrischen Stromkreises

vorgeschlagen und jeweils mit detaillierten Hinweisen für den Unterricht versehen. Die Konzeption zu dieser Einheit basiert auf der Erkenntnis, dass beim elektrischen Stromkreis die Energieübertragung in einer Form stattfindet, die sich wesentlich von der allgegenwärtigen Alltagsvorstellung vom Stromverbrauch unterscheidet.

Die Alltagsvorstellung vom Stromverbrauch basiert auf der Idee der Übertragung von Energie als eine Art Stoff oder als Eigenschaft der transportierten Materie. Auf dieser Grundlage kann der Transport der Energie (oder energiereicher Materie) von dem Ort der Quelle über die Verbindung zum Verbraucher sequentiell verfolgt werden, ohne auf den Zusammenhang des Systems zu achten. Ein Verständnis der zu lernenden Regeln und Gesetze ist jedoch nur mit Hilfe von Zusatzannahme möglich.

Die Art der Energieübertragung bei einem elektrischen Stromkreis ist hiervon kategorial zu unterscheiden. Bei einem Stromkreis ist der Kraftschluss zwischen Energiequelle und Verbraucher wesentlich, und die Energie wird durch Bewegung des Elektronenringes unter Krafteinwirkung übertragen. Als Kraftschluss wird eine in

Leitungsrichtung steife Verbindung bezeichnet, die eine Übertragung von Zug- und Druckkräften ermöglicht. Um das Verhalten eines Stromkreises zu verstehen, muss der Zusammenhang des gesamten Systems, der dem Kraftschluss entspricht, gesehen und gedanklich verarbeitet werden. Gelingt dies, so lässt sich aus dieser Erkenntnis ein Verständnis aller zu lernenden Regeln und Gesetze ohne weitere Zusatzannahmen entwickeln.

Alle Anstrengung im Unterricht sollte darauf gerichtet sein, bei den Schülern nicht nur einen Wechsel der Vorstellung zu erreichen, sondern zusätzlich ein komplexes und systematisches Denken anzuregen.

3.2 Der unverzweigte Stromkreis

In der zitierten Einheit wird im Sinne dieser Zielsetzung am Beginn vorgeschlagen, eine ausführliche Diskussion mit den Schülern über Systeme der Energieübertragung zu führen und sich zunächst auf den unverzweigten Stromkreis zu beschränken. Dabei wird die Besonderheit der Fahrradkette im Vergleich mit anderen Kreisystemen hervorgehoben, bei denen in unterschiedlicher Weise energiereiche Materie transportiert wird.

Die Fahrradkette ist den Schülern vertraut und ist hilfreich als Modell für den elektrischen Stromkreis, um die Übertragung von Energie in Form von Kraft und

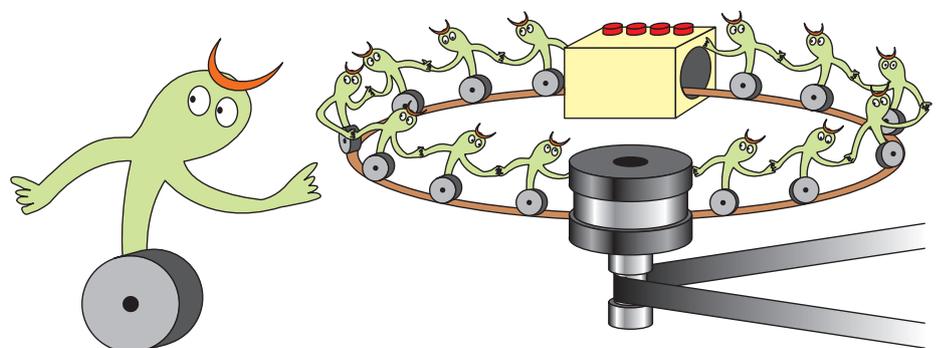


Abb. 3: Verbessertes Modell für den elektrischen Stromkreis, in dem der Zusammenhang zwischen den Teilchen und dem externen Antrieb verdeutlicht wird

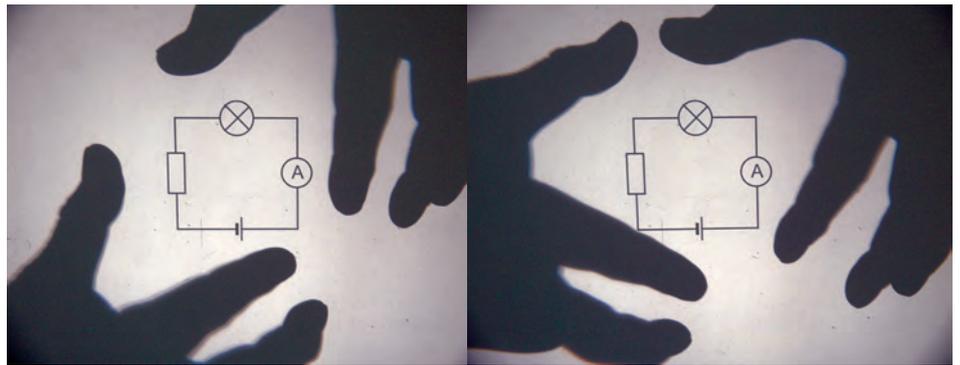
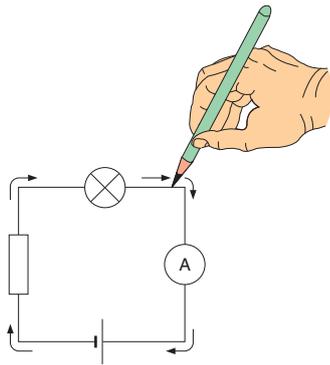


Abb. 4: Demonstration der Bewegung der Elektronen. Nicht punktweise von Minus nach Plus (links), sondern gemeinsam als Elektronenring

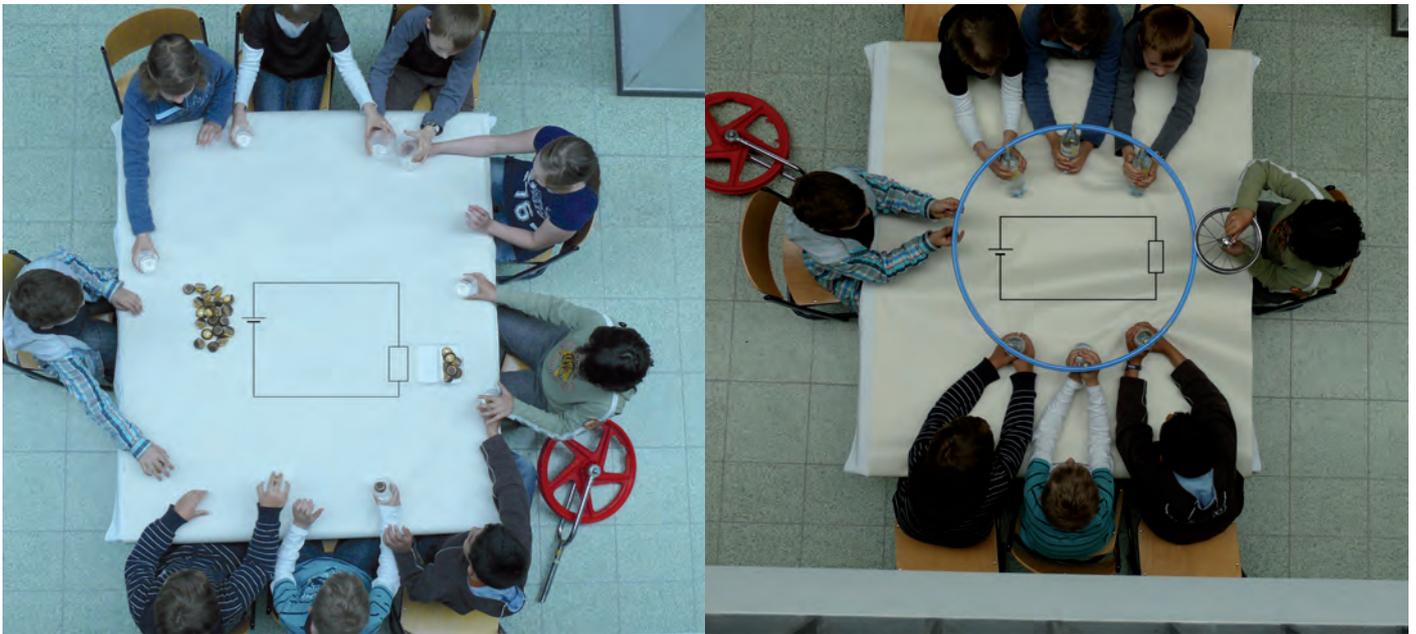


Abb. 5: Rollenspiel „Elektrischer Stromkreis (links: Fehlmodell „Energieriche Materie; rechts: korrektes Modell „Steifer Ring“) [8]

Bewegung im Vergleich zum Transport energiereicher Materie zu verdeutlichen [7]. Allerdings kann bei einer Kette nur an einer Seite gezogen werden, so dass ein deutlicher Unterschied zwischen der strammen Zugseite und der i. a. durchhängenden rücklaufenden Seite deutlich wird. Damit stößt dieses Modell an seine Grenzen, denn eine Batterie als Spannungsquelle übt in symmetrischer Weise Kräfte auf beide Leitungen aus. Ein steifer Ring, an dem sowohl gezogen als auch geschoben werden kann, hebt diesen Mangel des Fahrradkettenmodells auf und ist besser dazu geeignet, die Schüler in angemessener Weise an die Gegebenheiten beim elektrischen Stromkreis heranzuführen.

Bei der Entwicklung der IPN-Einheit wurde als Kontrast zu dem Fehlmodell von Abb. 1 eine verbesserte Alternative vorgestellt, die vor allem verdeutlichen sollte, dass die „Elektroteilchen“ einen zusammenhängenden Ring bilden, an dem die Batterie zieht und schiebt (Abb. 3). Es zeigt sich, dass der wesentliche Unterschied zwischen diesen beiden Modellen

nicht ohne weiteres von Schülern in seiner Bedeutung erkannt wird. Hinzu kommt, dass die Systeme zur Übertragung energiereicher Materie das sequentielle Denken unterstützen, das den Schülern geläufig ist und von ihnen in der Regel bei der Betrachtung des elektrischen Stromkreises angewendet wird. Bei diesem Denkansatz wird der Stromfluss sequentiell von der Batterie ausgehend im Kreis herum verfolgt, und es erscheint nahezu denknotwendig, dass vor und hinter einem Widerstand unterschiedliche Verhältnisse herrschen müssen. Schließlich wird in dem Widerstand etwas verbraucht, wenn nicht Strom, dann doch wenigstens Energie.

Die Übertragung von Kraft und Bewegung in einem System mit mehreren Widerständen ist mit einer einfachen sequentiellen Analyse nicht angemessen zu beschreiben. Vielmehr werden an die Schüler deutlich komplexere kognitive Anforderungen gestellt, da das gesamte System überblickt und in seinen gegenseitigen Beeinflussungen bedacht werden muss. Um das übliche sequentielle Analysieren nicht ungewollt

zu unterstützen, ist es ratsam, bei der Beschreibung des Stromflusses nicht die Bewegung eines einzelnen Punktes längs des Kreises zu beschreiben (Abb. 4 links). Auch sollte die Bedeutung der Stromrichtung (physikalisch von minus nach plus; technisch von plus nach minus) relativiert werden, um vielmehr, wann immer möglich, die gleichzeitige Bewegung aller Stromelemente zu betonen und entsprechend zu kennzeichnen (Abb. 4 rechts).

Um ein tieferes Nachdenken über den Unterschied zwischen diesen Modellen anzuregen, kann ein entsprechendes Rollenspiel durchgeführt werden. Zum Einen können Behälter im Kreis von jedem Schüler zum Nachbarn weitergereicht werden. Der als Quelle ausgewählte Schüler füllt jeden vorbeikommenden Behälter mit „energiereicher Materie“ (Münze, Süßigkeit). Der als Verbraucher ausgewählte Schüler entnimmt den Inhalt, um dann eine vorher verabredete „Arbeit“ zu verrichten (Abb. 5 links).

An ein solches Modell lassen sich verschiedene Fragen stellen:

- Wie lange dauert es nach dem Einschalten oder Umschalten, bis die Wirkung bei dem „Verbraucher“ ankommt?
- Was geschieht mit der „Energie“ auf der Leitung beim Ausschalten?
- Wieso kann der Verbraucher wissen, was mit der Energie geschehen soll?
- Warum bleibt der gesamte Kreis stehen, sobald er an einer beliebigen Stelle unterbrochen wird?
- ...?

Im Gegensatz zur Übertragung energiereicher Materie kann die Übertragung von Kraft und Bewegung mit Hilfe eines steifen Plastikreifens („Hula-Hoop“) demonstriert werden, der von einigen Schülern gehalten und von zwei ausgewählten Schülern im Kreis bewegt bzw. abgebremst wird (Abb. 5 rechts). An diesem Modell können die obigen Fragen erneut diskutiert und offensichtlich in eine größere Übereinstimmung mit den realen Verhältnissen beim Stromkreis gebracht werden [9].

Am Abschluss der Diskussion sollte die Erkenntnis stehen, dass ein elektrischer Stromkreis in vereinfachter bzw. abstrakter Form durch die drei Begriffe

- Antrieb,
- In sich abgeschlossener Materiestrom,
- Behinderung

zu charakterisieren ist und symbolisch wie in Abb. 6 dargestellt werden kann. Eine solche symbolische Darstellung lässt sich auf den Fall eines Generators für Wechselspannung anwenden. Postuliert man einen Transformator als ein Gerät, das wie bei einem Getriebe eine große Bewegung mit kleiner Kraft in eine kleine Bewegung mit großer Kraft transformiert, so gelingt auch die Darstellung von Wechselstromkreisen mit Transformatorverbindung. Zentral ist

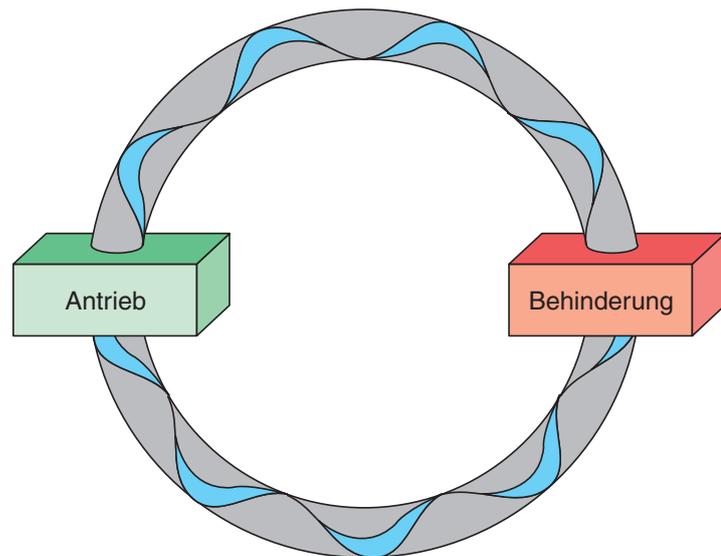


Abb. 6: Symbol für einen Stromkreis (ohne Verzweigung)

dabei vor allem die Idee, dass in jedem Augenblick ein Kraftschluss zwischen Antrieb und Behinderung vorhanden ist.

Schließlich kann dieses Bild auf die überregionale Versorgung mit elektrischer Energie übertragen werden, bei der zur Vermeidung von Leitungsverlusten die Spannung zunächst hoch und dann wieder herunter transformiert wird (Abb. 8). Hier kommt es wiederum vor allem darauf an, den Zusammenhang und damit den Kraftschluss innerhalb des gesamten Systems über die verschiedenen Stromkreise hinweg zu verdeutlichen.

3.3 Der verzweigte Stromkreis

Für eine Einbeziehung von Stromverzweigungen taugen die bisherigen Modelle (Fahrradkette oder steifer Ring) nicht, und es bietet sich zu diesem Zweck ein Wasserkreis als Modell zum elektrischen Stromkreis an. Um als Modell für den elektrischen Stromkreis zu dienen, dürfen bei ei-

nem Wasserkreis keine Turbulenzen sondern nur laminare Strömungen auftreten. Außerdem muss die kinetische Energie des strömenden Wassers möglichst klein gehalten werden, damit die Übertragung der Energie in Form von Kraft und Bewegung deutlich im Vordergrund steht. Eine nennenswerte Energieübertragung bei kleinen Fließgeschwindigkeiten wird dann durch die Annahme von relativ großen Druckunterschieden möglich.

Da unter diesen Bedingungen ein geschlossenes System kaum zu realisieren ist, wurde bei der Erprobung der IPN-Einheit ein sogenanntes Kolbenprobermodell entwickelt (Abb. 9). Denkt man sich die beiden Kolbenprober als zusammenhängend, so erhält man ein quasi geschlossenes System in Analogie zum elektrischen Stromkreis, in dem für jeweils kurze Zeit stationäre Ströme fließen können. Dieses Modell hat den Vorteil, dass die Schüler durch eigene Krafteinwirkung auf die Kol-

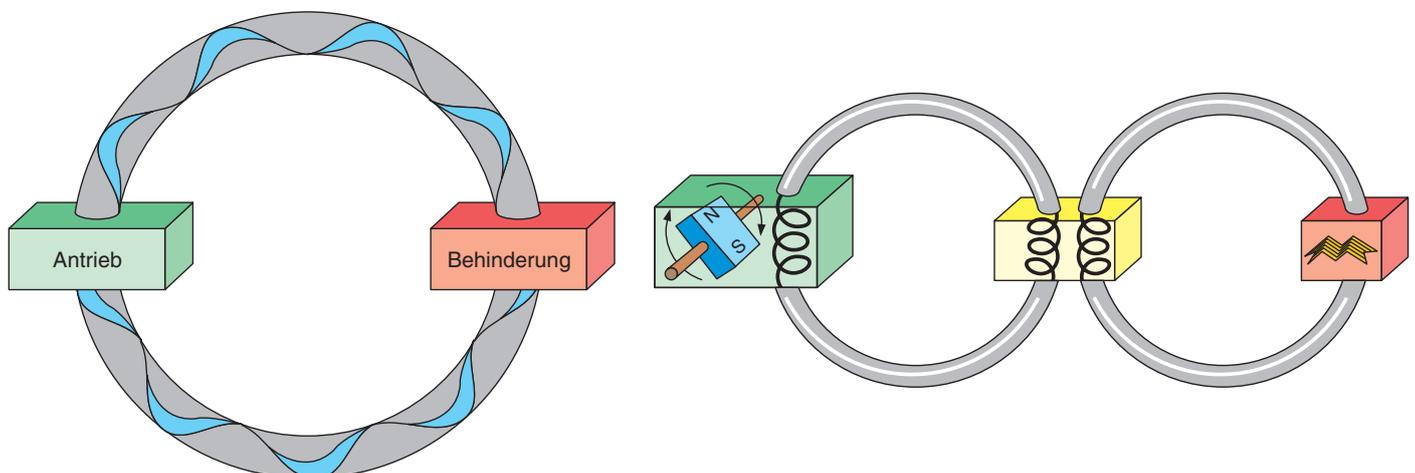


Abb. 7: Symbolische Darstellung von Wechselstrom ohne und mit Transformatoranschluss

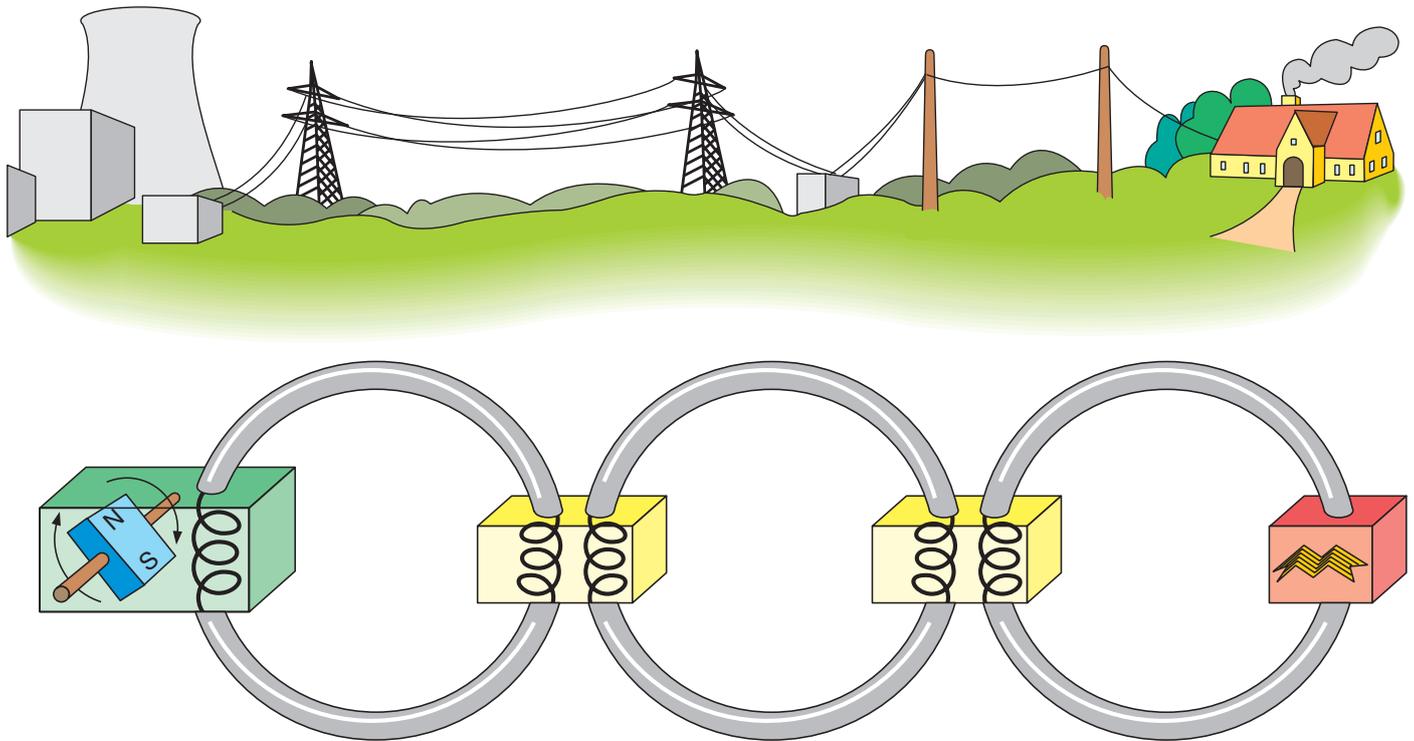


Abb. 8: Symbolische Darstellung des Zusammenhanges zwischen Kraftwerk und Haushalt

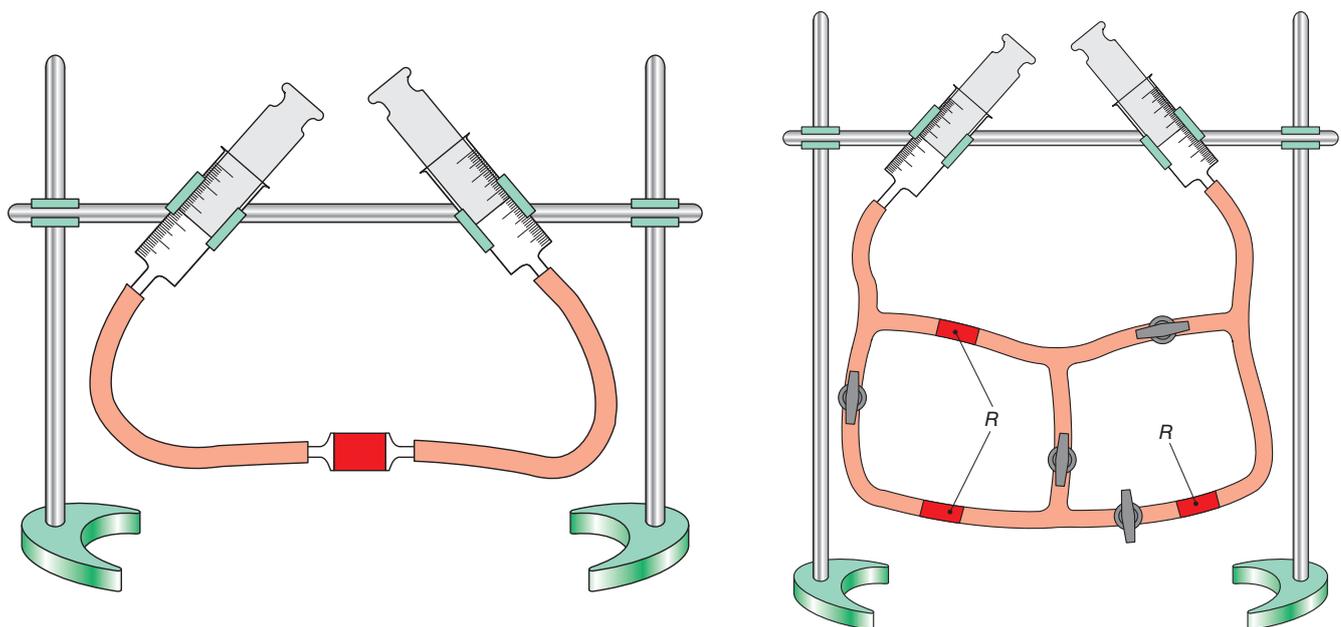


Abb. 9: Kolbenprobermodelle als Ersatz für geschlossene Stromkreise

benprober in direkter Weise den Unterschied zwischen dem Strömungswiderstand einer Reihen- und Parallelschaltung erfahren können. Zusätzlich kann dieser Unterschied auch durch Messungen bestimmt werden, für die das Modell in einfacher Weise umgebaut wird und Ge-

wichtskraft, Wasservolumen und Zeitdauer bestimmt werden [9], siehe Abb. 10.

Die Erfahrung aus den verschiedenen Erprobungsphasen hat gezeigt, dass die Behandlung einer Wasserströmung in Reihen- und Parallelschaltungen hilfreich für Schüler ist, um sich in Analogie zu diesem

konkreten Gegenstand eine adäquate Vorstellung von dem nicht direkt zugänglichen Objektbereich „Stromkreis“ zu erarbeiten. Frühere Studien haben jedoch die Grenzen dieser Hilfe aufgezeigt [10]. Das gedankliche Erfassen der Verhältnisse in einem Wasserkreis mit mehreren hinterein-

ander oder parallel geschalteten Widerständen ist keinesfalls trivial, nur weil man sich den Wasserfluss konkret vorstellen kann. Was den Schülern in der Regel fehlt, ist eine adäquate Vorstellung von dem, was unter dem Druck in einer Wasserströmung zu verstehen ist. Diese Schwierigkeit kann mit Hilfe der folgenden Abbildung eines realen Versuchs etwas verringert werden (Abb. 11), bei dem ein Fahrradschlauch an die Wasserleitung angeschlossen und das Wasser durch eine Engstelle gedrückt wird. Die elastischen Schlauchwandungen zeigen direkt den jeweils vorhandenen Druck an und es wird z.B. deutlich, dass vor der durchströmten Engstelle nicht, wie häufig von Schülern vermutet wird, ein Stau vorhanden ist. Weiterhin kann mit einer entsprechend geänderten Versuchsanordnung gezeigt werden, dass sich der Druck entgegen der üblichen Vermutung hinter einer Verzweigung nicht verringert, sondern den gleichen konstanten Wert beibehält (Abb. 12).

Soll der Druckverlauf längs einer laminaren Strömung nicht nur gemessen, sondern erklärt werden, so stellt dies eine anspruchsvolle didaktische Aufgabe dar. Zu einer solchen Erklärung gehört zunächst die Erkenntnis, dass Wasser, entgegen einer weit verbreiteten Überzeugung, durchaus kompressibel ist. Unter Umständen hilft in diesem Zusammenhang die Mitteilung, dass die Oberfläche der Weltmeere um etwa 40 m ansteigen würde, falls das Wasser völlig inkompressibel wäre und sich nicht auf Grund seines Eigengewichts zusammendrücken ließe. Bei einer laminaren Strömung herrscht vor und hinter einer Engstelle ein unterschiedlicher Druck. Dieser entsteht dadurch, dass das Wasser unterschiedlich stark zusammengedrückt wird und mit entsprechenden elastischen Gegenkräften reagiert. Weiterhin muss erkannt werden, dass in einem stromdurchflossenen Widerstand, an dem ein konstanter Druckunterschied anliegt, das Wasser am Ausgang mit einer etwas geringeren Dichte (und einer etwas vergrößerten Geschwindigkeit) herausfließt, als es beim Eingang hineinfließt. Dabei darf die relative Geringfügigkeit der Dichteänderung nicht dazu verleiten, diesen Effekt als vernachlässigbar anzusehen. Er ist denkwürdig und durch keine andere Vorstellung über den Ursprung des Drucks in einer laminaren Strömung zu ersetzen.

Wenn diese Zusammenhänge gedanklich verarbeitet worden sind, wird verständlich, warum es bei einer schleichen Wasserströmung keinen Flaschenhals-effekt gibt, warum vor dem größten Wider-

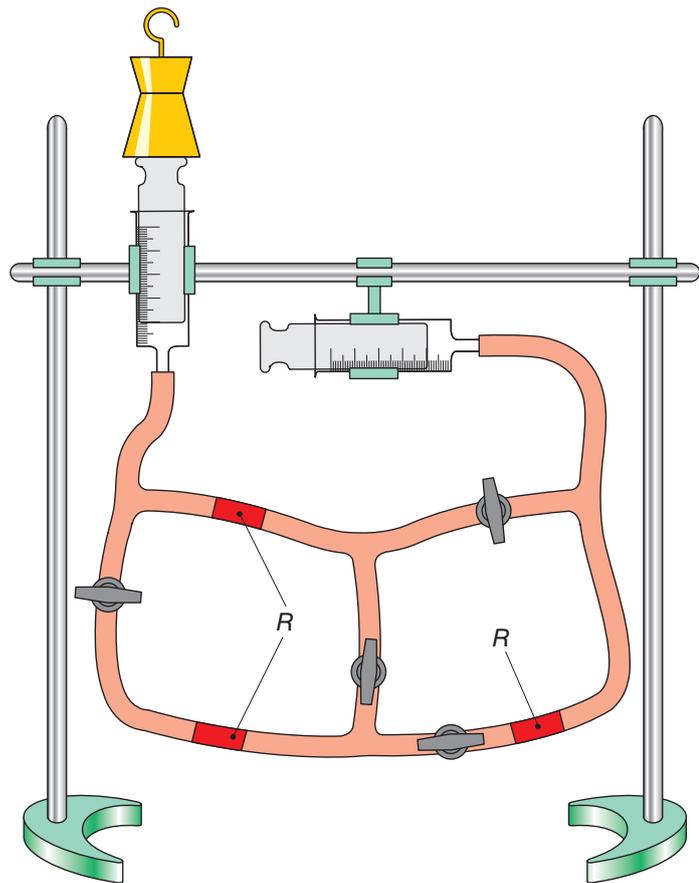


Abb. 10: Umgebautes Kolbenprobermodell zur Messung der Stromstärke (Gewichtskraft, Wasservolumen, Zeitdauer)

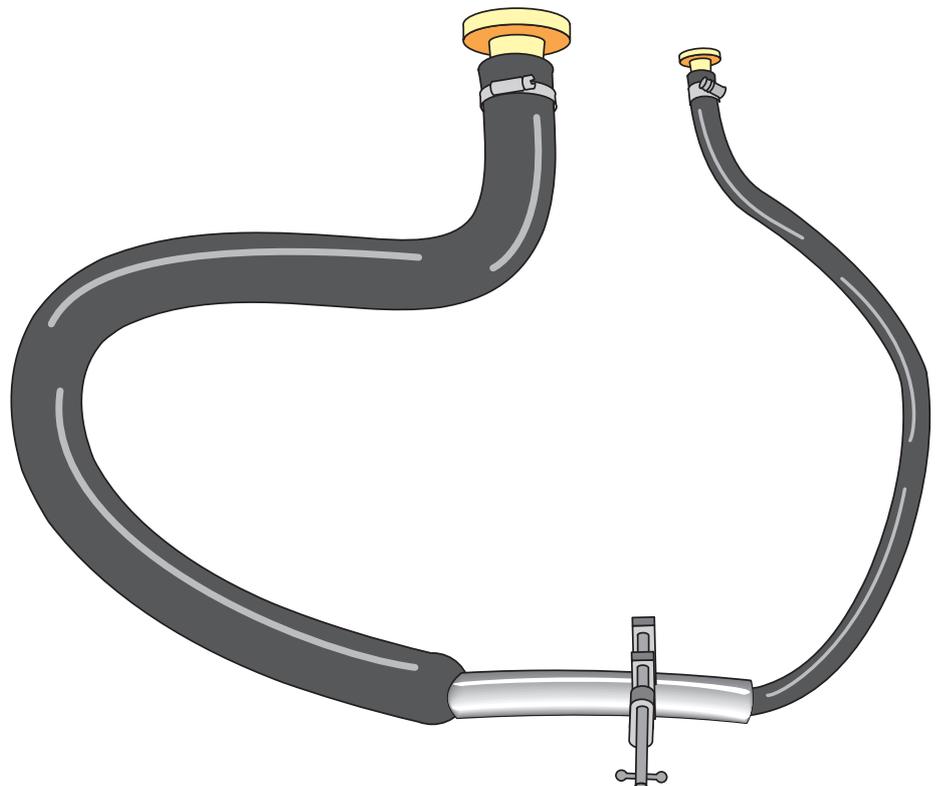


Abb. 11: Wasserströmung durch einen elastischen Schlauch mit Engstelle

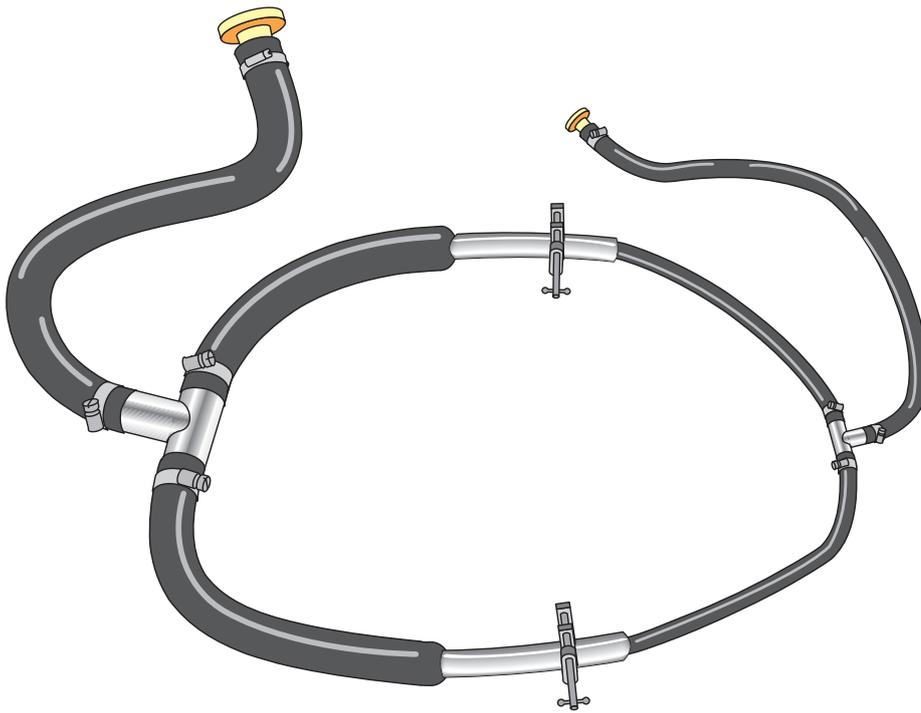


Abb. 12: Wasserströmung durch einen elastischen Schlauch mit zwei parallelen Engstellen

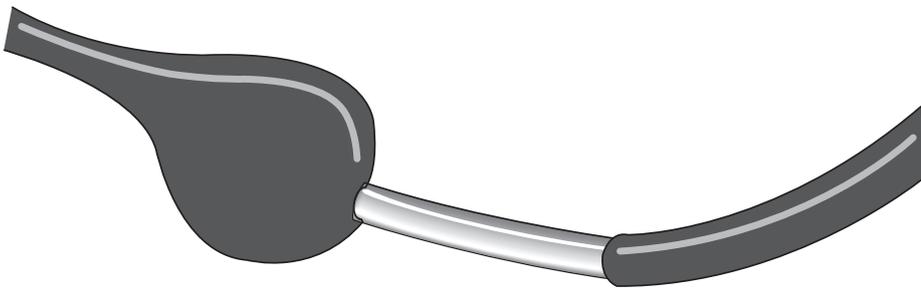


Abb. 13: Eine häufig anzutreffende Schülerzeichnung (zum Druckverlauf vor und hinter einem Widerstand)

stand in einer Reihenschaltung kein besonderer Stau entsteht und deshalb ein kleinerer Widerstand nicht, wie z.B. beim Straßenverkehr, von einem größeren Widerstand überdeckt wird.

In gleicher Weise lässt sich ableiten, wie sich der Druck bei einer Parallelschaltung verteilt und warum sich, trotz unterschiedlicher Widerstände in den Parallelschaltungen, der gleiche Druckunterschied über alle Parallelwiderstände einstellt. Den Schülern dürfte in der Regel der Zusammenhang zwischen Druck und Kompressibilität des Wassers unbekannt sein. Dieser Erkenntnis steht auch, wie schon erwähnt, die bekannte Alltagsregel „Wasser ist inkompressibel“ entgegen. Wird der Druck in einer Wasserströmung anhand von Druckmessern (z.B. als Wassersäule) eingeführt, so entspricht dies der Einführung eines neuen Phänomens, dessen Verhalten bei komplexeren Schaltungen nicht vorhersagbar oder ableitbar ist, sondern von Fall zu Fall zur Kenntnis ge-

nommen und gelernt werden muss. Eine Unterstützung durch das Wassermodell als Analogie zum elektrischen Stromkreis ist deshalb nur in begrenztem Maße zu erwarten.

Diese Begrenzung wird an einer häufig anzutreffenden Schülerantwort deutlich, wenn nach dem Druckverlauf bei einer durchflossenen Engstelle gefragt wird (Abb. 13). Zunächst ist diese Zeichnung zutreffend, wenn man an den Beginn einer Strömung denkt. Beim Einschalten einer Strömung entsteht kurzzeitig ein Stau, der eine Reflexion hervorruft und schließlich zu einem stationären Zustand mit jeweils konstantem Druck in beiden Leiterteilen führt. Eine solche Zeichnung sollte also nicht sofort als unzutreffend charakterisiert werden, sondern kann als ein willkommener Anlass dienen, den Unterschied zwischen einem Übergangsprozess und einem stationären Zustand aufzuklären.

Die Frage, ob eine ausführliche Diskussion des Zusammenhangs zwischen Druck

und Kompressibilität bei einer laminaren Strömung sinnvoll ist, stellt sich erneut bei der Einführung des Begriffs der elektrischen Spannung im Zusammenhang mit Oberflächenladungen. Auch hier zeigt sich, dass ein tieferes Verständnis nur erlangt werden kann, wenn man die Leitungselektronen als eine Art „Elektronengas“ auffasst, das eine spezifische Kompressibilität aufweist und beim Anlegen einer äußeren Spannung mit der Ausbildung von Oberflächenladungen reagiert, die sich einer weiteren Kompression widersetzen. Über diesen Zusammenhang, zusammen mit Vorschlägen für eine unterrichtliche Umsetzung, wird in einem Folgeartikel berichtet. ■

Literatur

- [1] Wiesner, H.; Jung, W.; Kiowski I & Weber, E. (1982): Zur Einführung von Stromstärke und Spannung. In: *Naturwissenschaft im Unterricht P/C S.* 388-394
- [2] v. Rhöneck, Chr. & Völker, B. (1982): *Einfache Elektrizitätslehre zwischen physikalischem Anspruch und Lernschwierigkeiten. Naturwissenschaft im Unterricht P/C 30, S.* 406-412
- [3] Symposium „Research as a guide to improving university-level instruction on electricity and magnetism“; GIREP-Conference 2010
- [4] Müller, R.; Wodzinski, R. & Hopf, M. (2004): *Schülervorstellungen in der Physik. Köln: Aulis.*
- [5] Florida State University (1970): *Probing the Natural World. Intermediate Science Curriculum Study, Silver Burdett Company*
- [6] Härtel, H. (1981): *IPN-Unterrichtseinheit „Stromstärke, Spannung, Widerstand“ für das 7. bis 8. Schuljahr, Klett (Überarbeitete und gekürzte Fassung verfügbar unter <http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~hhaertel/PUB/Stromkreis.htm>)*
- [7] Ein ähnlicher Ansatz unter Verwendung eines Treibriemens wurde von Muckenfuß vorgeschlagen: Muckenfuß, H. (1992): *Neue Wege im Elektrizitätsunterricht. Aulis Verlag*
- [8] Ein Video zu diesen Rollenspielen findet sich unter <http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~hhaertel/PUB/Rollenspiel.htm>
- [9] Ein Video zur Demonstration des Kolbenprobers findet sich unter: <http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~hhaertel/PUB/kolbenprober.htm>
- [10] Schwedes, H., Dudeck, W.-G. & Seibel, C. (1995): *Elektrizitätslehre mit Wassermodellen. In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik, 44, S.* 28-36

Anschrift des Verfassers

Dr. Hermann Härtel, Gastwissenschaftler am ITAP - Institut für Theoretische Physik und Astrophysik, Universität Kiel
E-Mail: haertel@astrophysik.uni-kiel.de