

Die folgenden Seiten enthalten das Manuskript, das bei der Zeitschrift eingereicht wurde.

Die Endversion des Zeitschriftenartikels findet man unter:

BURDE, J.-P.; WILHELM, T.

***Modelle in der Elektrizitätslehre. Ein didaktischer Vergleich verbreiteter
Stromkreismodelle***

Naturwissenschaften im Unterricht Physik 28, Heft 157, Nr. 1/17, 2017, S. 8 - 13

Inhalt

Modelle in der Elektrizitätslehre	2
Ausgangslage	2
1. Spannung als Druckdifferenz	3
a) Der ebene, geschlossene Wasserkreislauf	3
b) Das Elektronengasmodell	5
2. Spannung als Höhendifferenz	6
a) Der offene Wasserkreislauf	6
b) Das Stäbchenmodell	7
3. Spannung als Antriebskraft	8
4. Spannung als transportierte Energie pro Ladung	9
Fazit	10
Literaturverzeichnis	10

Modelle in der Elektrizitätslehre

Von Jan-Philipp Burde und Thomas Wilhelm

Klasse	7 bis 10
Schulform	Hauptschule, Realschule, Gymnasium
Zeitungsfang	Variabel
Thema	Elektrizitätslehre, Stromkreise
Methode	Arbeiten mit Modellen
Weitere Materialien	www.einfache-elehre.de

Ausgangslage

Der elektrische Stromkreis stellt Schülerinnen und Schüler in der Sekundarstufe I vor große Herausforderungen. Einerseits besitzen die Lernenden eine Reihe stabiler vorunterrichtlicher Vorstellungen zu Stromkreisen, die der physikalisch korrekten Sichtweise häufig widersprechen und sich im Unterricht nur mühsam korrigieren lassen. Andererseits sind die Konzepte der Elektrizitätslehre überaus abstrakt und es handelt sich um ein sehr unanschauliches Gebiet der Physik, da sich die physikalischen Vorgänge wie die Elektronenbewegung der direkten Wahrnehmung entziehen. Insbesondere gelingt es vielen Schülerinnen und Schülern trotz intensiver unterrichtlicher Bemühungen häufig nicht, eine Systemvorstellung vom Stromkreis und ein angemessenes Spannungskonzept zu entwickeln. Stattdessen analysieren die Schüler Stromkreise häufig aus Sicht des Stroms, der ihre Vorstellung von Stromkreisen dominiert und diese in ihrer Vorstellung von der Batterie ausgehend sequentiell Lämpchen für Lämpchen durchströmt, wobei er zumindest teilweise verbraucht wird. Die elektrische Spannung erscheint den Schülern in diesem Zusammenhang nicht als eigenständige physikalische Größe, sondern wird von ihnen häufig lediglich als Eigenschaft bzw. als Bestandteil des elektrischen Stroms wahrgenommen [1].

Aus didaktischer Sicht ist dies problematisch, weil die elektrische Spannung die Ursache und nicht lediglich eine Eigenschaft des elektrischen Stroms ist und außerdem der Systemcharakter eine zentrale Eigenschaft von Stromkreisen darstellt. Ein angemessenes Verständnis elektrischer Stromkreise setzt also bei den Schülern zwingend voraus, dass diese den Systemcharakter begreifen und über ein adäquates Spannungskonzept verfügen. Da eine rein fachliche Einführung der elektrischen Spannung über den Feldbegriff und die felderzeugenden Oberflächenladungen wenig anschaulich ist und somit für den Anfangsunterricht unangemessen erscheint, hat sich in der Sekundarstufe I im Laufe der Jahrzehnte eine Vielzahl an unterschiedlichen Modellen etabliert. Die dahinterstehende Idee besteht darin, im Unterricht auf Analogien zwischen Modell und Stromkreis zurückzugreifen, um den Schülern das Verständnis der abstrakten Konzepte der Elektrizitätslehre durch den Vergleich mit etwas Bekanntem zu erleichtern. Während gute Modelle hierzu grundsätzlich geeignet sind, können inadäquate Elementarisierungen bei den Schülern Fehlvorstellungen fördern und verstärken. Im Folgenden wird daher ein Überblick über gängige Stromkreismodelle sowie ihre jeweiligen Vor- und Nachteile gegeben, wobei die Modelle danach unterschieden werden, wie die elektrische Spannung dargestellt wird.

1. Spannung als Druckdifferenz

Ein Ansatz, Schülern eine Vorstellung von der elektrischen Spannung zu vermitteln, besteht in Druckanalogien, wie sie beim geschlossenen Wasserkreislaufmodell und dem Elektronengasmodell verwendet werden. In beiden Fällen entspricht der Druck dem elektrischen Potenzial und der Druckunterschied somit der elektrischen Spannung.

a) Der ebene, geschlossene Wasserkreislauf

Der geschlossene Wasserkreislauf ist wahrscheinlich das bekannteste und meist genutzte Modell für den elektrischen Stromkreis (s. Abb. 1). Hierunter versteht man ein System aus dichten Wasserrohren mit gleichem Querschnitt, die in einer Ebene ohne Höhendifferenzen zu einem geschlossenen Wasserstromkreis zusammengesteckt sind, der in der Regel darüber hinaus sowohl eine Wasserpumpe als auch ein Wasserrad enthält. Dabei entspricht die Wasserpumpe der Spannungsquelle, das Wasserrad dem elektrischen Widerstand und die Wasserstromstärke der elektrischen Stromstärke. Der in den Rohren herrschende Druck entspricht dem elektrischen Potenzial und der am Wasserrädchen anliegende Druckunterschied somit dem an einem elektrischen Widerstand anliegenden Potenzialunterschied bzw. der dort anliegenden elektrischen Spannung.

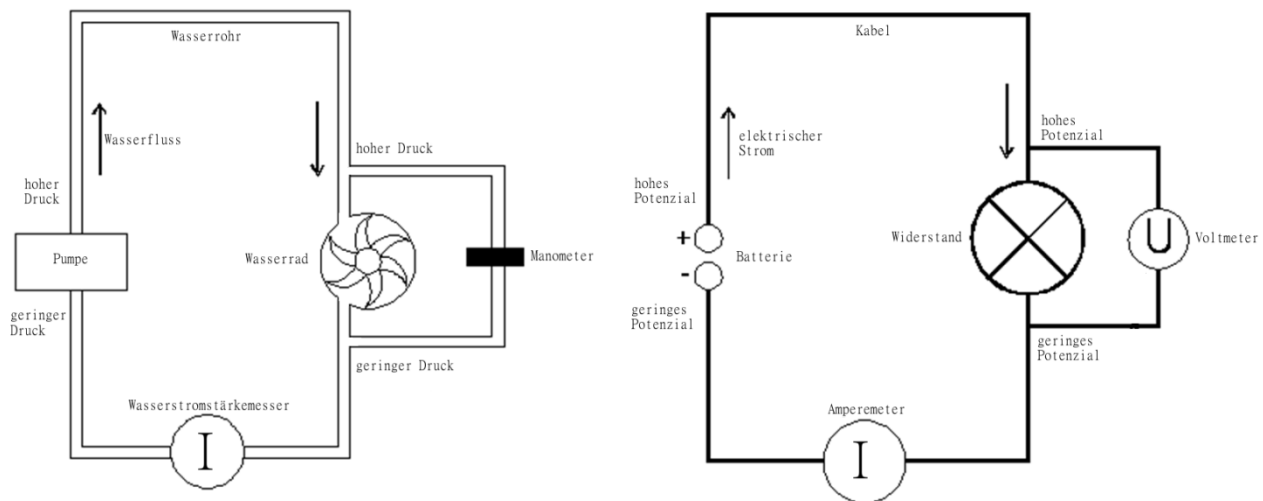


Abb. 1: Gegenüberstellung vom Modell des geschlossenen Wasserstromkreises und einem elektrischen Stromkreis

Offensichtlich sind die formalen Entsprechungen also sehr ähnlich zwischen dem Wasserstromkreis und dem elektrischen Stromkreis (die sogenannte Tiefenstruktur), was den Wasserstromkreis auf den ersten Blick als prädestiniertes Modell für elektrische Stromkreise erscheinen lässt. Doch aus didaktischer Sicht hat sich das Modell als problematisch erwiesen, da der geschlossene Wasserkreislauf Schülern aus ihrem Alltag nur wenig vertraut ist und die gleichen Fehlvorstellungen provoziert, die diese auch bei elektrischen Stromreisen haben (vgl. [2]). In verschiedenen Studien hat sich gezeigt, dass die Schüler keine adäquate Vorstellung vom Wasserdruck besitzen und ferner keine korrekte Kontinuitätsvorstellung von Strömungen haben, weshalb auch die Konstanz der Stromstärke ihnen folglich Probleme bereitet [3, 4].

Ein Grund für die Probleme könnte darin liegen, dass das Wasser von vielen Schülern als Kontinuum und als inkompressibel angesehen wird. Damit ist der Wasserdruck jedoch anschaulich nicht vorstellbar, da sich dann Wasser unter hohem Druck in nichts Sichtbarem von Wasser unter geringem Druck unterscheidet. Auch die experimentelle Demonstration des Wasserdrucks mit Hilfe von Druckmessern wie z.B.

einer Wassersäule ändert an diesem Problem wenig, da es für die Schüler ein neues Phänomen darstellt, „[...] dessen Verhalten bei komplexeren Schaltungen nicht vorhersagbar oder ableitbar ist, sondern von Fall zu Fall zur Kenntnis genommen und gelernt werden muss“ [5] S. 24. Solange den Schülern jedoch das Konzept des Wasserdrucks unklar und die Druckverteilung in einem Wasserstromkreis nicht bewusst ist, werden sie die Pumpe für den unmittelbaren Antrieb des Wasserstroms bzw. die Batterie für den unmittelbaren Antrieb des elektrischen Stroms halten. Damit besteht für sie aber auch keine Notwendigkeit mehr für einen Konzeptwechsel hin zu einer physikalisch korrekten Sichtweise, wonach die Wasserpumpe bzw. Batterie lediglich einen Druck- bzw. Potenzialunterschied an den Widerständen bewirkt, infolgedessen es dann zu einem (Wasser-)Strom kommt. In dem Fall sind jedoch Zweifel angebracht, inwiefern die geschlossene Wasserstromkreisanalogie geeignet ist, ein angemessenes Spannungskonzept in Stromkreisen zu fördern.

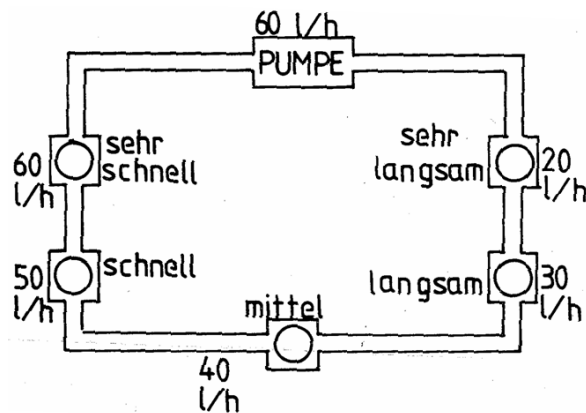


Abb. 2: Stromverbrauchsvorstellung beim geschlossenen Wasserstromkreis

Ein weiteres Problem besteht darin, dass Lernende trotz ihrer Alltagserfahrungen mit Flüssigkeiten in der Regel keine korrekte und konsistente Vorstellung von strömenden Flüssigkeiten besitzen. Insbesondere haben sie keine Kontinuitätsvorstellung zu Flüssigkeitsströmungen entwickelt. Die Untersuchungen von [3] zeigen beispielsweise, dass sehr viele Schüler davon ausgehen, dass in einem unverzweigten Wasserstromkreis die Wasserstromstärke mit zunehmendem Abstand von der Pumpe abnimmt (s. Abb. 2). Auch argumentieren die Schüler hinsichtlich der Druckverteilung in Wasserkreisen sequentiell, d.h. sie glauben eine Erhöhung des Widerstands durch eine Verengung des Schlauches führe nur zu einem Druckabfall nach dem Widerstand, nicht aber zu einem Druckanstieg davor, da die Strömung den Widerstand ja bereits passiert habe. Offensichtlich begreifen die Schüler den ebenen, geschlossenen Wasserkreislauf also nicht als zusammenhängendes System, sondern argumentieren sequentiell und glauben, dass der (Wasser-)Strom verbraucht wird. Soll das Modell des geschlossenen Wasserkreislaufs also die Grundlage für ein Verständnis der elementaren Elektrizitätslehre darstellen, so besteht die große Gefahr, dass Schüler diese Fehlvorstellungen auf den elektrischen Stromkreis übertragen.

Ein lernförderlicher Einsatz der Wasserkreislaufanalogie ist möglich, setzt aber zwingend eine zeitintensive Auseinandersetzung mit dem Modell voraus, wie Schwedes und Dudeck im Rahmen einer Unterrichtsreihe von zwölf Doppelstunden zeigen konnten [6]. Wenn aber erst im Anschluss daran der eigentliche Elektrizitätslehreunterricht stattfinden kann, stellt sich die Frage, inwiefern der geschlossene Wasser-

kreislauf unter Lehrplanaspekten praktikabel ist. Kircher geht sogar so weit zu fragen, „[...] ob das Lernen des Wassermodells schwieriger ist als das Lernen der Stromkreise selbst“ [7] S. 58.

b) Das Elektronengasmodell

Auch beim Elektronengasmodell entspricht die elektrische Spannung einem Druckunterschied. Anders als beim geschlossenen Wasserkreislauf, dem mit Wasser ein häufig als inkompressibel wahrgenommenes Kontinuum zu Grund liegt, baut das Elektronengasmodell auf der Vorstellung eines kompressiblen Fluides aus Einzelteilchen auf. Der Vorteil eines Gases gegenüber Wasser besteht insbesondere darin, dass die Teilchendichte und damit der Druck besser vorstellbar und visualisierbar werden. Zudem besitzen Schüler aus dem Alltag mehr Erfahrungen mit dem Luftdruck als mit dem Wasserdruck, denkt man z.B. an den in Fahrradreifen, Luftpumpen oder Fußbällen herrschenden Überdruck. Die Idee des Elektronengasmodells besteht nun darin, auf der alltäglichen Luftdruckvorstellung der Schüler im Sinne von „komprimierte Luft steht unter Druck, drückt gegen die Wände und hat das Bestreben sich auszudehnen“ aufzubauen, ohne jedoch den fachlichen Druckbegriff mit der in der Sek I teils schwierigen Differenzierung zwischen Druck und Kraft einzuführen.

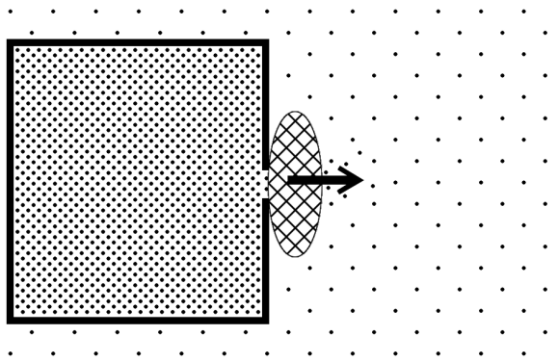


Abb. 3: Ein Luftdruckunterschied bewirkt eine Luftströmung durch einen Stoffwiderstand.

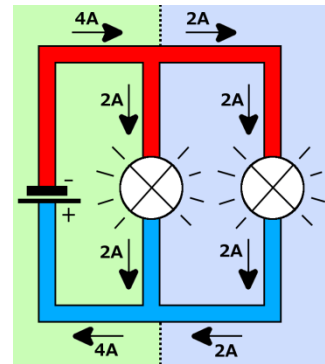


Abb. 4: Ein elektrischer Druckunterschied (= Spannung) bewirkt eine Elektronenströmung durch einen elektrischen Widerstand.

Anhand von bekannten Alltagsobjekten wie aufgeblasenen Fahrradreifen oder Fußbällen wird dann geklärt, dass Luftströmungen immer eine Folge von Luftdruckunterschieden sind und dass zwischen den beiden Größen Druck und Druckunterschied konzeptionell unterschieden werden muss (s. Abb. 3). Indem Schüler Luft durch unterschiedlich dicken bzw. dichten Stoff blasen (z.B. ein Schal, Tuch oder Ärmel) und merken, dass die Luftströmung hierdurch gehemmt bzw. behindert wird, entwickeln sie ferner eine erste Widerstandsvorstellung. Anschließend wird das so anhand von Luftdruckbeispielen gewonnene Verständnis auf elektrische Stromkreise übertragen, um zu klären, wie es überhaupt zum elektrischen Strom kommt. Grundidee des Elektronengasmodells ist dabei, dass sich in Metallen freie Elektronen in Teilchenform befinden und sich dort genauso frei bewegen können wie Luftteilchen in einem Schlauch. Wie bei der Luft auch, kommt es im Leiter zu einem von der Elektronendichte abhängigen elektrischen Druck, der fachlich gesehen eine Folge unterschiedlicher OberflächenElektronendichten ist (für eine fachliche Auseinandersetzung sei auf [8] und [9] verwiesen). Im Elektronengasmodell ist der elektrische Druck eine Folge einer durch die Batterie hervorgerufenen Ungleichverteilung der Elektronen im Stromkreis, wobei der Minuspol für einen Elektronenüberschuss und damit elektrischen Überdruck und der Pluspol für einen Elektronenmangel und damit elektrischen Unterdruck sorgt. Durch Gleichsetzen des elektrischen Drucks mit dem elektrischen Potenzial kann so die Spannung dann in Analogie zu Luftdruck-

unterschieden als elektrischer Druckunterschied und Antrieb des elektrischen Stroms eingeführt werden. Der in den Leitern herrschende elektrische Druck wird mit Hilfe eines an alltägliche Konventionen angelehnten Farbschemas (z.B. rot = hoher Druck, blau = tiefer Druck) direkt im Schaltplan dargestellt (s. Abb. 4) [10].

Empirische Untersuchungen zum Elektronengasmodell werden aktuell durchgeführt, so dass noch keine Endergebnisse vorliegen, allerdings baut es auf bisherigen Potenzialansätzen wie z.B. dem Münchener Stäbchenmodell auf, die sich in der physikdidaktischen Forschung als vergleichsweise lernförderlich erwiesen haben [4] S. 35, [11] S. 70. Das Konzept dürfte insbesondere dazu beitragen, dass die Schüler ein angemessenes Spannungskonzept entwickeln und ein qualitatives Verständnis der Wirkzusammenhänge im Stromkreis bekommen, wonach die Spannung den elektrischen Strom kausal bewirkt und der Widerstand diesen lediglich beeinflusst. Interessierte Kolleginnen und Kollegen können unter www.einfache-lehre.de eine ausgearbeitete Unterrichtsreihe auf Basis des Konzepts kostenfrei herunterladen.

2. Spannung als Höhendifferenz

Zur Veranschaulichung der elektrischen Spannung eignen sich auch verschiedenste Höhenanalogien wie der offene Wasserkreislauf oder das Münchener Stäbchenmodell, bei denen eine Höhe einem elektrischen Potenzial entspricht und somit ein Höhenunterschied einer elektrischen Spannung.

a) Der offene Wasserkreislauf

Im Gegensatz zu Wasserströmungen in ebenen geschlossenen Wasserkreisläufen, dürfte offen fließendes Wasser in Folge von Höhenunterschieden den meisten Schülern aus ihrem Alltag her bereits bekannt sein. In diesem Modell entspricht die Wasserhöhe dem elektrischen Potenzial, der Höhenunterschied der elektrischen Spannung und die Wasserströmung der elektrischen Stromstärke (s. Abb. 5). Die Spannungsquelle wird im Modell des offenen Wasserkreislaufs in der Regel mit einer Pumpe verglichen und der elektrische Widerstand wird häufig mit einem Wasserrad dargestellt, das von der Wasserströmung angetrieben wird.

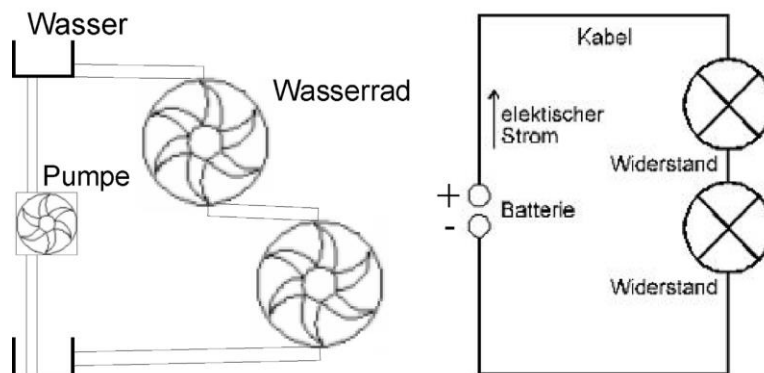


Abb. 5: Gegenüberstellung von offenem Wasserstromkreismodell und elektrischem Stromkreis

Positiv am Modell des offenen Wasserkreislaufs ist zunächst einmal, dass unmittelbar klar ist, dass es ohne Höhenunterschied keinen Wasserstrom gibt – dass die elektrische Spannung also den elektrischen Strom bewirkt. Auch haben sich visuelle Darstellung des Potenzials in der physikdidaktischen Forschung

als lernförderlich erwiesen [11]. Darüber hinaus ist bei diesem Modell der Wasserstrom für die Schüler sichtbar und es lassen sich sowohl Reihen- als auch Parallelschaltungen darstellen.

Problematisch ist hingegen, dass die Vorerfahrungen der Schüler bei diesem Modell leicht Fehlvorstellungen bzgl. elektrischer Stromkreise provozieren können, da offen fließendes Wasser im Alltag üblicherweise nicht im Kreis strömt. Stattdessen dürften die meisten Schüler schon einmal beobachtet haben, dass sich fließendes Wasser an Verzweigungen zu gleichen Teilen aufteilt, hinter einem Wasserrad eine geringere Strömungsgeschwindigkeit besitzt als davor und sich natürlich streckenweise auch anstaut (vgl. [12]). Werden diese Erfahrungen unreflektiert auf den elektrischen Stromkreis übertragen, so dürften sie insbesondere die lokale und sequentielle Argumentation unbeabsichtigter Weise fördern. Auch ist der offene Wasserkreislauf nicht geeignet, Schülern den Einschalt- bzw. Ausschaltvorgang bei Stromkreisen verständlicher zu machen, da das Wasser im Modell nach dem Einschalten erst mit einer merklichen Verzögerung beim Wasserrad ankommt bzw. auch nach dem Abschalten der Pumpe das Wasserrad noch einige Zeit antreiben kann. Dieses Verhalten steht nicht nur im Gegensatz zur Physik elektrischer Stromkreise, sondern fördert darüber hinaus noch die Stromaussendevorstellung, wonach der elektrische Strom zunächst in der Batterie gespeichert ist wie Öl in einem Ölfass und den Stromkreis dann ausgehend von einem Batteriepol Lämpchen für Lämpchen durchströmt. Während das Modell des offenen Wasserkreislaufs also prinzipiell die elektrische Spannung gut veranschaulichen kann, erscheint es eher ungeeignet, den Systemcharakter von Stromkreisen zu vermitteln. Dies gilt auch für das Rutschbahnmodell, bei dem die Stromstärke durch die Geschwindigkeit von Schülern auf Schwimmreifen in einer Wasserrutsche dargestellt wird. Ihre Geschwindigkeit wird durch die Höhendifferenz und die Anzahl von Steinen im Rutschweg bestimmt (vgl. [13]).

b) Das Stäbchenmodell

Das Münchener Stäbchenmodell (bzw. in einer modifizierten Version das Mauermodell [14]) stellt eine abstraktere Variante der Höhenanalogie dar, hat sich in Untersuchungen aber als verhältnismäßig lernförderlich erwiesen [15]. Beim Stäbchenmodell bekommt jedes Bauteil des elektrischen Stromkreises zwei Stäbchen zugewiesen, deren Höhe das elektrische Potenzial vor und nach dem Bauteil veranschaulicht (s. Abb. 6). Da die Spannung bzw. Potenzialdifferenz stets einer Höhendifferenz entspricht, lassen sich so leicht Spannungen an Parallel-, Reihen- und gemischten Schaltungen analysieren.

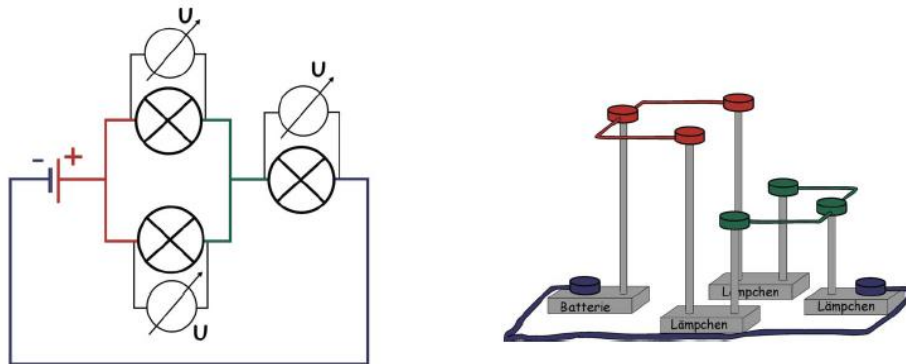


Abb. 6: Gegenüberstellung von Schaltplan und Stäbchenmodell

Anders als der offene Wasserkreislauf, eignet sich dieses Modell aber nicht zur Veranschaulichung des elektrischen Stroms, sondern lediglich zur Veranschaulichung des elektrischen Potentials bzw. der elektrischen Spannung. Eine tiefergehende Erklärung des elektrischen Potentials liefert das Modell ebenso nicht, weshalb offen bleibt, was man unter „elektrisch hoch“ bzw. „elektrisch tief“ zu verstehen hat. Insbesondere bei jüngeren Schülern ist abhängig von deren kognitiven Entwicklung zu befürchten, dass sie mit abstrakten Modellen überfordert sind und in Folge „keinen Zusammenhang und damit keinen Sinn in den Analogmodellen“ sehen [7] S. 58.

3. Spannung als Antriebskraft

Beim Fahrradkettenmodell wird der elektrische Stromkreis mit dem Kreislauf der Kettenglieder einer Fahrradkette verglichen. Dabei entspricht die konstante Antriebskraft an den Pedalen der elektrischen Spannung und die an anderer Stelle an der Kette reibenden Bremsklötze den in Reihe geschalteten elektrischen Widerständen (s. Abb. 7). In Folge der unrealistischerweise angenommenen Geschwindigkeitsabhängigkeit der Reibungskraft der Bremsklötze $F_{\text{Reib}} = \gamma v$ stellt sich so bei der Fahrradkette eine Gleichgewichtsgeschwindigkeit der Kettenglieder $v_G = F_{\text{Antrieb}} / \gamma$ ein, die im elektrischen Stromkreis der Stromstärke $I = U / R$ entspricht.

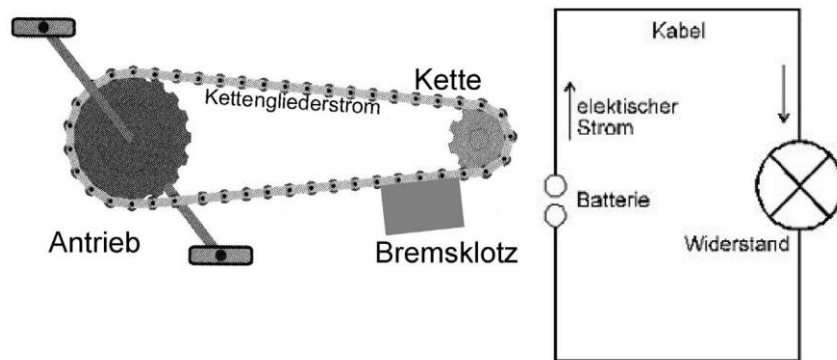


Abb. 7: Gegenüberstellung von Fahrradkettenmodell und Stromkreis

Das Fahrradkettenmodell knüpft unmittelbar an die Alltagserfahrungen der Kinder mit Fahrrädern an und scheint insbesondere geeignet zu sein, der Stromverbrauchsvorstellung zu begegnen und den Schülern den Systemcharakter von Stromkreisen näher zu bringen, wonach eine Änderung an einer Stelle im Stromkreis sich unmittelbar auf den gesamten Stromkreis auswirkt. Darüber hinaus ist das Modell prädestiniert, mit den Schülern den Unterschied zwischen Ladungsträgerstrom und Energiestrom in Stromkreisen zu erarbeiten [5]. In einer Variante verbindet ein Keilriemen zwei Wellräder, so dass deutlich wird, dass trotz umlaufendem Keilriemen die Energie von einem Wellrad zum anderen wandert [16].

Die Grenzen des Fahrradkettenmodells liegen einerseits darin, dass sich Parallelschaltungen mit ihm nicht sinnvoll veranschaulichen lassen, es andererseits aber auch nur ein sehr rudimentäres und für die Sekundarstufe I nicht angemessenes Konzept der Spannung als „Antrieb des elektrischen Stroms“ liefert. Auch findet im Fahrradkettenmodell die Energieübertragung ausschließlich über die stramme Zugseite der Kette statt, während eine Spannungsquelle in symmetrischer Weise Kräfte auf beide Leitungen im Stromkreis auswirkt. Ein steifer Ring wie z.B. ein Hula-Hoop-Reifen, an dem in einem Schülerversuch sowohl gezogen als auch geschoben werden kann, bietet sich daher als mögliche Alternative an [5].

4. Spannung als transportierte Energie pro Ladung

Häufig sind im Unterricht Modelle des elektrischen Stromkreises anzutreffen, bei denen einzelne Ladungsträger die Energie von der Batterie zum Lämpchen transportieren, dort abgeben und sich anschließend ohne Energie zurück zur Batterie bewegen. Bekannte Beispiele für diese Ladungsträgermodelle sind das Rucksackmodell, das Energiehutmodell und das Bienchenmodell [17]. Beim Rucksackmodell beispielsweise laufen Männchen auf einem vorgegebenen Weg im Kreis und bekommen an der Spannungsquelle ihren Rucksack mit einer gewissen Energieportion ΔE gefüllt und laufen von dort aus zum Lämpchen, an dem sie ihren Rucksack leeren (s. Abb. 8). Im Rucksackmodell entspricht die elektrische Stromstärke also der Anzahl der an einer Stelle vorbeilaufenden Männchen pro Zeit, während die Spannung gemäß der Gleichung $U = \Delta E / Q$ der Energieportion ΔE entspricht, die ein Männchen in seinem Rucksack mit sich trägt.

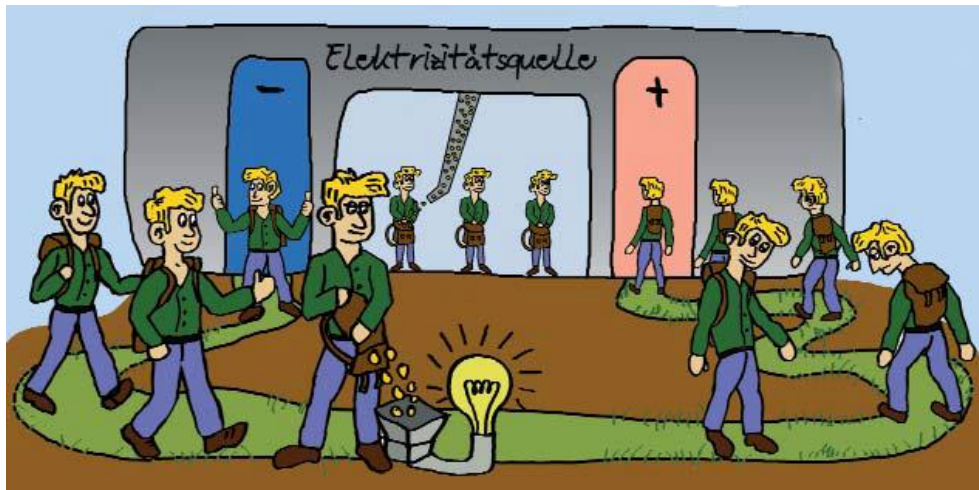


Abb. 8: Darstellung eines einfachen elektrischen Stromkreises im Rucksackmodell

Auch wenn dieses Modell auf den ersten Blick einleuchtend erscheint sowie Stromstärke (Männchen pro Zeit) und Spannung (Rucksackfüllung pro Männchen) konzeptionell klar voneinander trennt, hat es aus fachlicher und didaktischer Sicht eine Reihe gravierender Nachteile [17]. So wird die Energie fachlich gesehen nicht durch die Elektronen übertragen, sondern durch elektrische und magnetische Felder, wobei es hier entgegen der Modelldarstellung aus energetischer Sicht auch keinen Unterschied zwischen der Hin- und Rückleitung gibt [18]. Didaktisch problematisch ist insbesondere, dass das Modell bekannte Schülerfehlvorstellungen unterstützt statt ihnen entgegenzuwirken, da die Männchen von der Quelle aus den Stromkreis Bauteil für Bauteil durchlaufen. Das Modell verleitet die Schüler somit dazu, sich in die Lage der Männchen zu versetzen und fördert so zwangsläufig die lokale und sequentielle Denkweise bei elektrischen Stromkreisen statt bei den Schülern ein Systemdenken zu etablieren. Damit bleibt dann aber offen, woher die Männchen bei Reihenschaltungen wissen, an welchem Widerstand sie welche Energieportion abzugeben haben bzw. wie sie sich bei Parallelschaltungen an den Verzweigungspunkten aufteilen sollen. Da der Antrieb für die kreisförmige Bewegung in den einzelnen Männchen liegt, stößt das Modell auch bei Ein- und Ausschaltvorgängen sowie Wechselspannungen an seine Grenzen. Nimmt man eine Driftgeschwindigkeit der Elektronen in Kupfer von ca. 1 mm/s an, ist es im Modell unerklärlich,

warum eine Lampe nach dem Einschalten sofort angeht. Auch suggeriert das Modell fälschlicherweise, dass sich nach dem Ausschalten noch Energie auf der Hinleitung befinden müsse. Bei Wechselstromkreisen ist es zudem völlig unerklärlich, wie die Männchen immer wieder Energie am Lämpchen abgeben können, obwohl sie sich doch im Modell immer nur einen Schritt vor und zurück bewegen, ohne jemals wieder zurück zur Batterie zu kommen. Im Rucksackmodell besteht zudem die Gefahr, dass die Spannung von den Schülern nicht als Differenzgröße, sondern als Eigenschaft der Batterie aufgefasst wird und konzeptionell mit der elektrischen Energie verwechselt wird.

Fazit

Die gängigen Modelle und Analogien in der Elektrizitätslehre eignen sich zwar, um einzelne Aspekte des elektrischen Stromkreises anschaulicher und damit verständlicher zu machen, jedoch existiert kein Modell, das vorbehaltlos für den Unterricht empfohlen werden kann. Dies liegt einerseits daran, dass jedes Modell seine Grenzen hat, da es eine vereinfachte und damit unvollständige Abbildung der Realität darstellt, es andererseits aber bisher auch an umfassenden empirischen Vergleichsuntersuchungen mangelt. Wichtig ist beim Einsatz von Modellen daher, sich der Schwächen des jeweiligen Modells bewusst zu sein und die Schüler auf die Modellgrenzen hinzuweisen, um möglichen Verständnisproblemen vorzubeugen.

Auch bietet es sich an, für verschiedene Aspekte der Elektrizitätslehre verschiedene Analogien zu benutzen, also für jedes Einzelthema die hierfür jeweils beste Analogie heranzuziehen. Zur Veranschaulichung der Konstanz der Stromstärke sowie des Systemcharakters von Stromkreisen bietet sich beispielsweise das Fahrradkettenmodell an, während sich Potenzialansätze wie das Münchner Stäbchenmodell mit entsprechenden Farbkodierungen zur Darstellung des Potenzial- bzw. Spannungsbegriffs bewährt haben. Eine vielversprechende Alternative hierzu stellt auch das bisher weniger bekannte Elektronengasmodell dar, das zur Illustration von Potenzial und Spannung auf dem intuitiven Luftdruckkonzept der Schüler aufbaut.

Literaturverzeichnis

- [1] RHÖNECK, C. v.: *Vorstellungen vom elektrischen Stromkreis und zu den Begriffen Strom, Spannung und Widerstand*. In: *Naturwissenschaften im Unterricht - Physik* 34 (1986), Nr. 13, S. 10–14
- [2] BURDE, J.-P. ; WILHELM, T.: *Moment mal... (22) Hilft die Wasserkreislaufanalogie?* In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 65 (2016), Nr. 1, S. 46–49
- [3] SCHWEDES, H. ; SCHILLING, P.: *Schülervorstellungen zu Wasserstromkreisen*. In: *Physica Didactica* 10 (1983), 159-170
- [4] SCHWEDES, H. ; DUDECK, W.-G. ; SEIBEL, C.: *Elektrizitätslehre mit Wassermodellen*. In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 44 (1995), Nr. 2, S. 28–36
- [5] HÄRTEL, H.: *Der alles andere als einfache elektrische Stromkreis*. In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 61 (2012), Nr. 5, S. 17–24
- [6] SCHWEDES, H. ; DUDECK, W.-G.: *Lernen mit der Wasseranalogie. Eine Einführung in die elementare Elektrizitätslehre*. In: *Naturwissenschaften im Unterricht - Physik* 4 (1993), Nr. 16, S. 16–23

- [7] KIRCHER, E.: *Analogmodelle für den elektrischen Stromkreis*. In: *Der Physikunterricht* 18 (1984), Nr. 2, S. 46–61
- [8] BURDE, J.-P. ; WILHELM, T. ; WIESNER, H.: *Das Elektronengasmodell in der Sekundarstufe I : Didaktik der Physik – Frühjahrstagung Frankfurt 2014*. In: *PhyDid-B* (2014). URL www.phydid.de
- [9] HÄRTEL, H.: *Spannung und Oberflächenladungen : Was Wilhelm Weber schon vor mehr als 150 Jahren wusste*. In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 61 (2012), Nr. 5, S. 25–31
- [10] BURDE, J.-P. ; WILHELM, T.: *Mit elektrischem Druck die Spannung verstehen lernen*. In: *PLUS LUCIS* (2015), 1-2, S. 28–33
- [11] GLEIXNER, C.: *Einleuchtende Elektrizitätslehre mit Potenzial*. LMU München. Dissertation. 1998
- [12] WODZINSKI, R.: *Lernhilfe oder Lernhindernis? Modelle von Leitungsvorgängen in Stromkreisen unter der Lupe*. In: *Unterricht Physik* 23 (2013), Nr. 133, S. 12–16
- [13] GROB, K. ; RHÖNECK, C.v. ; VÖLKER, B. ; WETTERN, K.: *Die Gravitationsanalogie zur Einführung des Spannungsbegriffs*. In: *Naturwissenschaften im Unterricht. Physik/Chemie* 36 (1988), Nr. 31, S. 14–19
- [14] BIERWIRTH, R.: *Untersuchung von Lernproblemen zum elektrischen Potential*. 2014
- [15] KOLLER, D. ; WALTNER, C. ; WIESNER, H.: *Zur Einführung von Stromstärke und Spannung*. In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 57 (2008), Nr. 6, S. 6–18
- [16] MUCKENFUß, H. ; WALZ, A.: *Neue Wege im Elektrikunterricht*. Zweite bearbeitete Auflage. Köln : Aulis Deubner, 1997
- [17] WILHELM, T.: *Moment mal... (18): Elektronen als Energieträger?* In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 64 (2015), Nr. 6, S. 47–49
- [18] BACKHAUS, U.: *Der Energietransport durch elektrische Ströme und elektromagnetische Felder*. In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik* 36 (1987), Nr. 3, S. 30–35