

Zur Einführung von Stromstärke und Spannung

D. Koller, Ch. Waltner, H. Wiesner

Die Elektrizitätslehre – und hier vor allem der Begriff der elektrischen Spannung – wird von den meisten Lehrkräften als besonders schwierig eingeschätzt. Dementsprechend gibt es seit Langem vielfältige intensive Bemühungen, diesen Inhaltsbereich den Schülerinnen und Schülern zugänglicher zu machen. Etwa seit Mitte der 70er Jahre wurden Schülervorstellungen zur elementaren Elektrizitätslehre in zahlreichen Studien untersucht, um einen besseren Einblick in die Lernschwierigkeiten zu bekommen und um von diesen Kenntnissen ausgehend erfolgreichere Lehrgänge entwickeln zu können. Einen gewissen Abschluss dieser Aktivitäten stellte 1984 die Präsentation der Ergebnisse auf dem Internationalen Workshop „Aspects of Understanding Electricity“ [1] dar. Im Folgenden wird zunächst ein Überblick über Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten, die die Begriffe Stromstärke und Spannung betreffen, gegeben. Daran schließen sich Hinweise auf unterschiedliche Konzeptionen für Einführungen in die Elektrizitätslehre an. Ausführlicher wird ein Lehrgang dargestellt, der sich in einer empirischen Untersuchung als recht erfolgreich bei der Vermittlung von Stromstärke und Spannung erwiesen hat.

1 || Schülervorstellungen zur Elektrizitätslehre

● Einige typische Schülervorstellungen, wie sie in zahlreichen Untersuchungen ermittelt wurden und die oft auch noch nach dem Unterricht auftreten, sind (vergl. [1], [2]):

Anschlussbedingung und Zweizuführungsvorstellung

Zu Unterrichtsbeginn sind einige Schüler (insbesondere jüngere) der Meinung, dass eine Leitung zwischen Generatoren und Elektrogeräten ausreicht. Das ist als allgemeine Vorstellung plausibel: Von der Bat-

terie muss etwas zum Lämpchen oder Motor kommen und es gibt zunächst keinen Grund dafür, dass eine Zuführungsleitung nicht ausreicht. Gestützt wird diese allgemeine Einordnung durch die Wahrnehmung, dass die Elektrogeräte im Haushalt scheinbar auch nur durch eine Leitung mit der Steckdose verbunden sind. Das Nichtfunktionieren mit nur einer Zuleitung wird zunächst zurückgeführt auf defekte Lämpchen, Batterien, ungeeignete („verstopfte“) Kabel u. Ä. Die Erfahrung, dass eine geeignet angebrachte zweite Verbindung das Lämpchen zum Leuchten bringt, wird oft mit einer „Zweizuführungsvorstellung“ erklärt: Die gleiche Elektrizität(ssorte) kommt aus beiden Batterieanschlüssen und damit erhält das Lämpchen ausreichend Elektrizität zum Leuchten. Gerade viele jüngere Schüler lehnen die Stromkreisvorstellung ab, weil es ihnen als sinnlos erscheint, dass die Elektrizität wieder in die Batterie zurückströmt und weil ja Batterien „leer“ werden.

Stromverbrauch

Jede Lehrkraft kennt die extrem resistente Stromverbrauchsvorstellung, die sehr viele Schüler haben: Im Elektrogerät wird ein Teil der zufließenden Elektrizität verbraucht. Das Lämpchen/der Motor braucht Strom/Elektrizität, und was man braucht, wird im Allgemeinen auch „verbraucht“. Gefördert wird diese Ansicht durch den im Alltag oftmals verwendeten Begriff des Stromverbrauches, durch die Bezeichnung von Elektrogeräten als Verbraucher oder auch vom alltäglichen Sprachgebrauch, dass eine Batterie irgendwann einmal leer wird und keinen elektrischen Strom mehr liefern kann. Werden mehrere gleiche Lämpchen in Reihe an eine Batterie angeschlossen wird oft von den Schülern prognostiziert, dass das erste Lämpchen (bezüglich der Stromrichtung) am hellsten leuchtet, die

anderen zunehmend dunkler, weil sie von immer weniger Elektrizität durchflossen werden.

Eine Batterie, ein Netzgerät o. Ä. liefert unabhängig von den angeschlossenen Elektrogeräten immer einen Strom gleicher Stärke

Eine Batterie ist nach Schülerauffassung dadurch gekennzeichnet, dass sie unabhängig von den angeschlossenen Geräten immer einen Strom gleicher Stärke liefert (sie wird nicht als Konstant-Spannungsquelle eingeordnet). Wird zu einem bereits angeschlossenen Lämpchen ein zweites Lämpchen gleicher Bauart parallel angeschlossen, erwarten viele Schüler, dass beide Lämpchen schwächer leuchten werden, da sich „der Strom nun auf zwei Lämpchen aufteilen muss“.

Lokales Denken

Das sogenannte „lokale Denken“ tritt beispielsweise auf, wenn Schaltkreise (mit baugleichen Lämpchen) wie in Abb. 1 dargestellt sind. Schüler tendieren in diesem Fall dazu, die Stromstärke lokal am ersten Knoten zur Hälfte aufzuteilen und dann am zweiten Knoten noch einmal.

Sequenzielles Denken

Wird in der Schaltung in Abb. 2 der Widerstand R_1 vergrößert, erwarten viele Schüler, dass die Stromstärke im Lämpchen kleiner wird. Wird der Widerstand R_2 vergrößert, erwarten sie dagegen, dass der Strom im Lämpchen gleich bleibt, weil „der Widerstand R_2 kommt ja erst hinter dem Lämpchen, da ist der Strom ja schon durch.“

Stromstärke und Spannung als synonyme Begriffe

Häufig werden die Begriffe Strom(stärke) und Spannung synonym benutzt. Manchmal wird die Spannung als eine zusätzliche

Eigenschaft des elektrischen Stromes betrachtet – und zwar in dem Sinne, dass die Spannung die Stärke der Strömung ist, so wie das Wasser eines schnell strömenden Baches „stärker“ ist als das Wasser dieses Baches an einer Stelle, an der es langsam fließt.

Oft sehen die Schüler den Begriff Spannung nicht als Differenzgröße an sondern ordnen die Spannung wie die Stromstärke lokal einem Punkt des Stromkreises zu. Diese Fehlvorstellung wird auch durch den Sprachgebrauch gefördert, wie z. B. „Spannung einer Batterie“.

Schwierigkeiten mit der Wasserkreislaufanalogie

Von Schwedes u. a. [3] wurde intensiv daran gearbeitet, Wasserkreisläufe in vielfältiger Art so zu gestalten, dass deren Systemeigenschaften als wirksame Analogie für elektrische Stromkreise herangezogen werden können. Dies hat sich als nicht so erfolgreich erwiesen wie erhofft [4]. Die Autoren urteilen aufgrund ihrer Bemühungen: „Wenn man sich die Fehler, Erklärungsmuster und Vorstellungen der Schüler zu den Strömungsverhältnissen im Wasserkreis ansieht, fällt eine große Ähnlichkeit zu Fehlern und Vorstellungen der Schüler zum elektrischen Stromkreis auf: Die Stromstärke, die im Reihenschaltkreis nicht konstant ist,/der Strom, der weniger wird (verbraucht wird),/der Strom, der von beiden Seiten der Quelle ausgeht,/das Hauptleitungssystem,/die Schwierigkeit, sich bei Parallelschaltungen die Gesamtstromstärke aus den Teilstromstärken zusammengesetzt zu denken.“ [3]

Von Haider wurde kürzlich in einer Untersuchung zur Wirksamkeit von Modellen im Sachunterricht für den elektrischen Stromkreis festgestellt, dass in Hinblick auf die Überwindung der Verbrauchsvorstellung das Wasserkreismodell deutlich schlechter abschneidet als mechanische Modelle (z. B. das Fahrradkettenmodell). [5]

2 | Unterrichtskonzepte zur Elektrizitätslehre

Vor ca. 100 Jahren wurde sowohl in der Mittelstufe wie in der Oberstufe die Elektrizitätslehre mit der Elektrostatik begonnen. Die Spannung wurde häufig über das Potenzial bzw. die Potentialdifferenz eingeführt (z. B. [6] oder in der bekannten Didaktik von Poske [7]), wobei oft begrifflich zwischen EMK und Spannungsabfall unter-

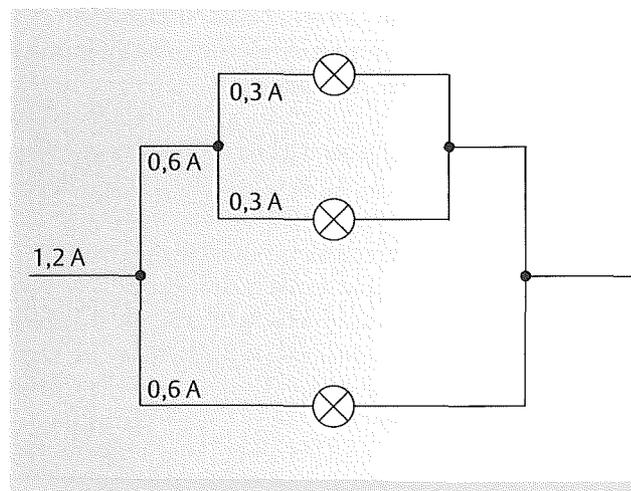


Abb. 1: Fehlvorstellung zur Knotenregel (sogenanntes „lokales Denken“)

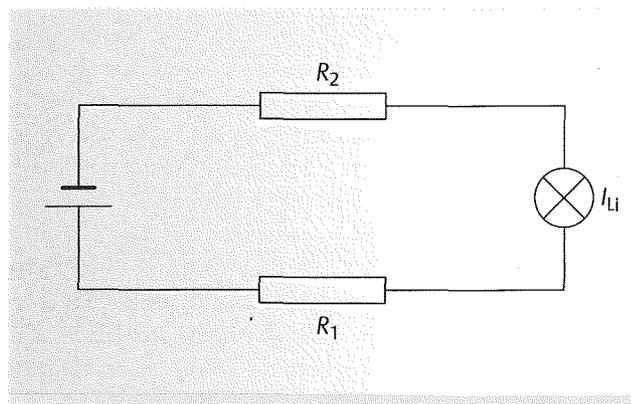


Abb. 2: Betrachtung der Helligkeit des Lämpchens bei Veränderung der Größe des Widerstandes R_1 oder R_2

schieden wurde. Nach dem 2. Weltkrieg wurde i. d. R. nicht mehr mit der Elektrostatik, sondern mit dem elektrischen Strom in einfachen Stromkreisen begonnen und das Potenzial wurde nur noch in der Oberstufe verwendet (z. B. [8]).

Von den in den letzten 40 Jahren vorgeschlagenen Unterrichtskonzepten zur Elektrizitätslehre sei hier stellvertretend aus der großen Zahl von Vorschlägen auf die folgenden Lehrgänge hingewiesen (wobei bei der Auswahl eine gewisse Willkür zugestanden wird):

- (a) Ausgangspunkt des IPN-Curriculums Physik [9] ist die Betrachtung des elektrischen Stromkreises unter dem Aspekt eines Systems zum Transport von Energie (Leitungselektronen als „steifer“ Elektronenring). Die Spannung als Antrieb des Elektronenringes wird in Beziehung gesetzt zum Druckunterschied in Wasserstromkreisen.
- (b) Gleichfalls vom Ausgangspunkt „Energieübertragung“ und mit einem ähnlichen Modell im Hintergrund startet der Unterrichtsansatz von Muckenfuß [10]. Der elektrische Stromkreis wird dabei zunächst in Analogie zur Energieübertragung mit einem Treibriemen gesehen. Die Stärke des elektrischen

Stroms ergibt sich als Gleichgewicht zwischen Antrieb durch die Quelle und Hemmung durch das angeschlossene Elektrogerät. Die Stromstärke wird über Ladung/Zeiteinheit und Spannung als Maß dafür eingeführt, „wie stark die einzelnen Elektronen von der Energiequelle angetrieben werden“. Die Definition der Spannung als physikalische Größe erfolgt dann endgültig über die Gleichung $U = P/I$.

- (c) Zentraler Punkt des Unterrichtsansatzes von Schwedes, Dudeck und Seibel [3] ist die extensive Nutzung der Analogien zwischen Wasserstromkreisen und elektrischen Stromkreisen, wobei dem E-Lehreunterricht eine ausgedehnte Einheit über Wasserkreisläufe vorangestellt wird.
- (d) Im Unterrichtskonzept von Jung und Wiesner u. a. [11], [12] wird eine begriffliche Trennung von Stromstärke und Spannung dadurch zu erreichen versucht, dass zum einen der elektrische Strom als Vorgang im Elektrogerät betrachtet wird, der mit mehr oder weniger großer Intensität (als Maß für die Stromstärke) vorstättgeht. Zum anderen wird die Spannung zunächst als Geräteeigenschaft (Antrieb) den Gene-

ratoren zugeordnet. Die elektrische Stromstärke wird über die magnetische Wirkung des elektrischen Stroms eingeführt. Dies bietet die Möglichkeit, die Invarianz der Stromstärke in einem unverzweigten Stromkreis ohne Eingriff von außen zu demonstrieren.

- (e) In dem Lehrgang von *Rhöneck und Völkers* [13] wird mit Simulationen für den Stromkreis gearbeitet, die Spannung wird über eine Höhenanalogie plausibel gemacht.
- (f) Von *Schmälzle und Herrmann* [14] wird mit einem Vorkurs über Druck und Strömungen von Flüssigkeiten und Gasen begonnen. Zur Einführung der elektrischen Spannung wird auf den Potenzialansatz zurückgegriffen und für die Sekundarstufe aufbereitet. Es wird der gleiche Satz von Regeln wie in [8] verwendet.
- (g) Eine interessante Variante der Druckanalogie benutzen *Steinberg und Clement* [15] in einer Untersuchung zum Konzeptwechsel bei elektrischen Stromkreisen: Die Elektrizität wird nicht mit Wasser, sondern mit einem Gas (Luft) verglichen. Gase lassen sich leicht komprimieren und verdünnen und die damit verbundenen Druckänderungen sind leicht nachvollziehbar. Der Gasdruck entspricht dem Potenzial und Druckunterschiede zwischen zwei Orten der Spannung. Ein vollständiges Unterrichtskonzept liegt u. W. bisher nicht vor und dementsprechend gibt es noch keine Erprobung. (In [11] wird ebenfalls die Gasanalogie im Zusammenhang mit der Behandlung des Kondensators vorgeschlagen.)
- (f) In einem Unterrichtsvorschlag von *H. Schwarze* u.a. [16] wird ausführlich mit der Analogie des Wasserkreislaufmodells gearbeitet. Die Einführung der Spannung erfolgt über die Potentialdifferenz als Antrieb.

3 Ein Unterrichtsvorschlag zur Einführung von Strom und Spannung in der 7. Klasse

Ausgehend von der Struktur zur Einführung der Spannung in [8] und [14] führte *Schuhmacher* [17] eine empirische Untersuchung zu dessen Wirksamkeit in Form einer Akzeptanzbefragung durch. Die Regel $I = \text{const.}$ wurde dabei über die magnetische Wirkung (s. [18]) begründet. Eine weitere umfangreichere Untersuchung von *Gleixner* [19] folgte. Eine wichtige Ergänzung von *Gleixner* bestand in der Einführung eines „Stäbchenmodells“ als Veranschaulichungshilfe zur Einführung des Spannungsbegriffs über die Höhen- bzw. Gravitationsanalogie (ausführlicher dazu später). Beide Untersuchungen wiesen nach, dass der Potenzialansatz eine sehr erfolgreiche Möglichkeit ist, die Grundbegriffe der Elektrizitätslehre einzuführen. Mit einer Kombination von Ideen aus [8], [13], [17]-[19] entwickelte *Koller* [20] ein Unterrichtskonzept und überprüfte seine Wirksamkeit in einem Unterrichtsversuch. Das Stäbchenmodell wurde verbessert und eine große Zahl von Arbeitsblättern, Folien usw. wurden von ihm produziert.¹ Wir beschränken uns hier auf die Darstellung der Einführung von Stromstärke und Spannung (als Potentialdifferenz) und die damit verknüpften Regeln.

3.1 Überblick über die Unterrichtseinheit

Die 15 Unterrichtsstunden (18 Std. sind im Lehrplan für das bayerische Gymnasium für die Elektrizitätslehre in der 7. Klasse vorgesehen) verteilen sich wie folgt auf die verschiedenen Themen:

¹ Alle Arbeitsblätter, Merkblätter und Folien und die Stundenplanungen (insgesamt über 100), die hier nur beispielhaft dargestellt werden können, sind über die Adresse www.didaktik.physik.uni-muenchen/materialien als veränderbare Worddokumente abrufbar.

1. Stunde

Unterscheidung von Elektrogeräten und Generatoren; Elektrizität (als Ladung); Elektrischer Strom als fließende Elektrizität; geschlossener Stromkreis; Wirkungen fließender Elektrizität; Schaltsymbole; Leiter und Isolatoren.

2. Stunde

Anschlussbedingung zwischen Elektrogeräten und Generatoren; Magnetische Wirkung fließender Elektrizität; Intensität der Wirkungen; elektrische Stromstärke.

3. Stunde

Elektrischer Widerstand als Eigenschaft von Elektrogeräten (qualitativ); Analogie Fahrradkette; Magnetische Wirkung an verschiedenen Stellen eines Stromkreises; Pole einer Batterie; Richtung der fließenden Elektrizität; Modellvorstellung zum elektrischen Stromkreis.

4. Stunde

Intensität der Wärmewirkung (Helligkeit des Lämpchens) und der magnetischen Wirkung; Hinführung zu Stromstärke.

5. Stunde

Messung der Stromstärke; Funktionsweise des Drehspulinstruments; Handhabung eines Vielfachmessgerätes.

6. Stunde

Stromstärke in Reihen- und Parallelschaltungen; $I = \text{const.}$ und Knotenregel.

7. Stunde

Elektrisches Potenzial (Analogien: Wasserstromkreis und Höhenanalogie); Höhenmodelle zur Veranschaulichung; Regeln zum Umgang mit dem Potenzial.

8. Stunde

Potentialdifferenz = Spannung;

9. Stunde

Übungen zur Spannung

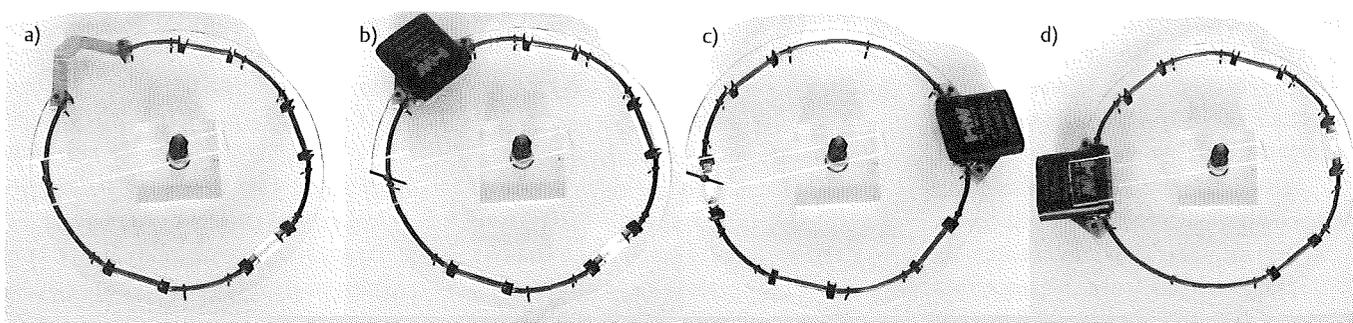
10. und 11. Stunde:

Lernstationen zu Stromstärke und Spannung

12. Stunde

Maschenregel

Abb. 3: Stromkreis mit Magnethöhle: (a) bei offenem Stromkreis das Modell so ausrichten, dass Nadel und Leitung parallel sind, (b) – (d) Auslenkung der Magnethöhle an verschiedenen Positionen des Stromkreises



13. und 14. Stunde

Übungen zu Stromstärke und Spannung in verschiedenen Schaltungen

15. Stunde

Hintereinander- und Gegeneinanderschaltung von Batterien

Im Folgenden werden zu einzelnen ausgewählten Stunden ausführlichere Hinweise gegeben.

3.2 Hinweise zur Unterrichtsgestaltung

In dem vorgeschlagenen Unterrichtskonzept wird zunächst auf Ladungsorten und auf Elektronen verzichtet und der relativ neutrale übergeordnete Begriff Elektrizität verwendet. Die Vorzeichenschwierigkeiten durch die negativen Elektronen werden damit in der Einführungsphase vermieden. Energiebetrachtungen werden erst später durchgeführt (in Bayern im 8. Schuljahr).

1.-3. Stunde

Die magnetische Wirkung um stromdurchflossene Leiter herum wird besonders betont. Sie liefert überzeugende Argumente für die Stromkreisvorstellung und gegen den Verbrauch von Elektrizität (schon Drittklässler können die Argumente nachvollziehen und anwenden!). Die Änderung der magnetischen Wirkung beim Umpolen (ein Motor ändert seine Drehrichtung; eine Magnetnadel unter einem Kabel schlägt in die andere Richtung aus) ist mit einer Zweizuführungsvorstellung nicht verträglich, aber mit einer Stromkreisvorstellung. Letztere wird weiter bestärkt durch die Beobachtung, dass die Auslenkung zweier Magnetnadeln unter den Kabeln dicht vor und hinter einem Lämpchen in die gleiche Richtung erfolgt und auch vom gleichen Betrag ist. Das kann so interpretiert werden, dass vor und hinter dem Lämpchen in den Zuleitungen „das Selbe los ist“, die Elektrizität in die gleiche Richtung fließt und es gleich viel fließt. Ein qualitatives Maß für die Stromstärke liefert die gleichsinnige Änderung von Helligkeit eines Lämpchens und der Auslenkung der Magnetnadel. Als sehr überzeugend hat sich der Stromkreis in Abb. 3 erwiesen [18]. Der Stromkreis wird unter der Magnetnadel hindurchgedreht und die Auslenkung bleibt an jeder Stelle gleich, bei den Leitungen, der Sofittenglühlampe und sogar bei der Batterie (d.h., die Batterie pumpt die gleiche Elektrizitätsmenge durch sich selbst hindurch wie auch durch den äußeren Stromkreis!).

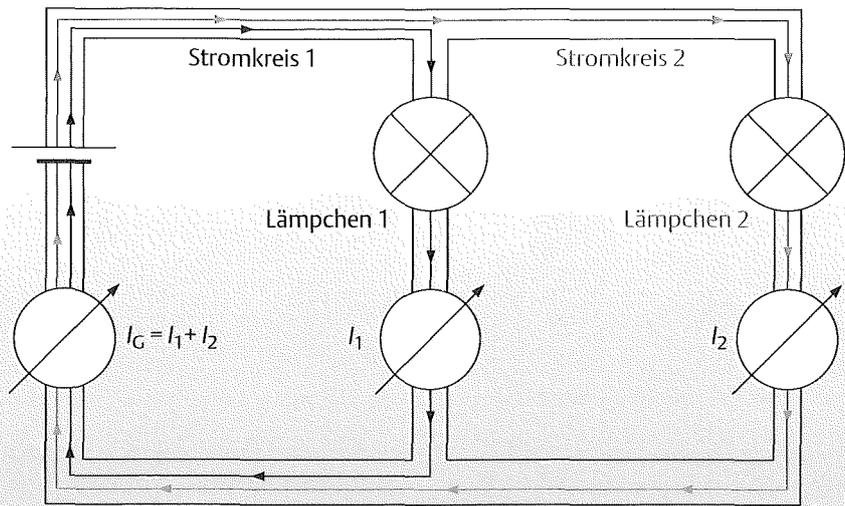
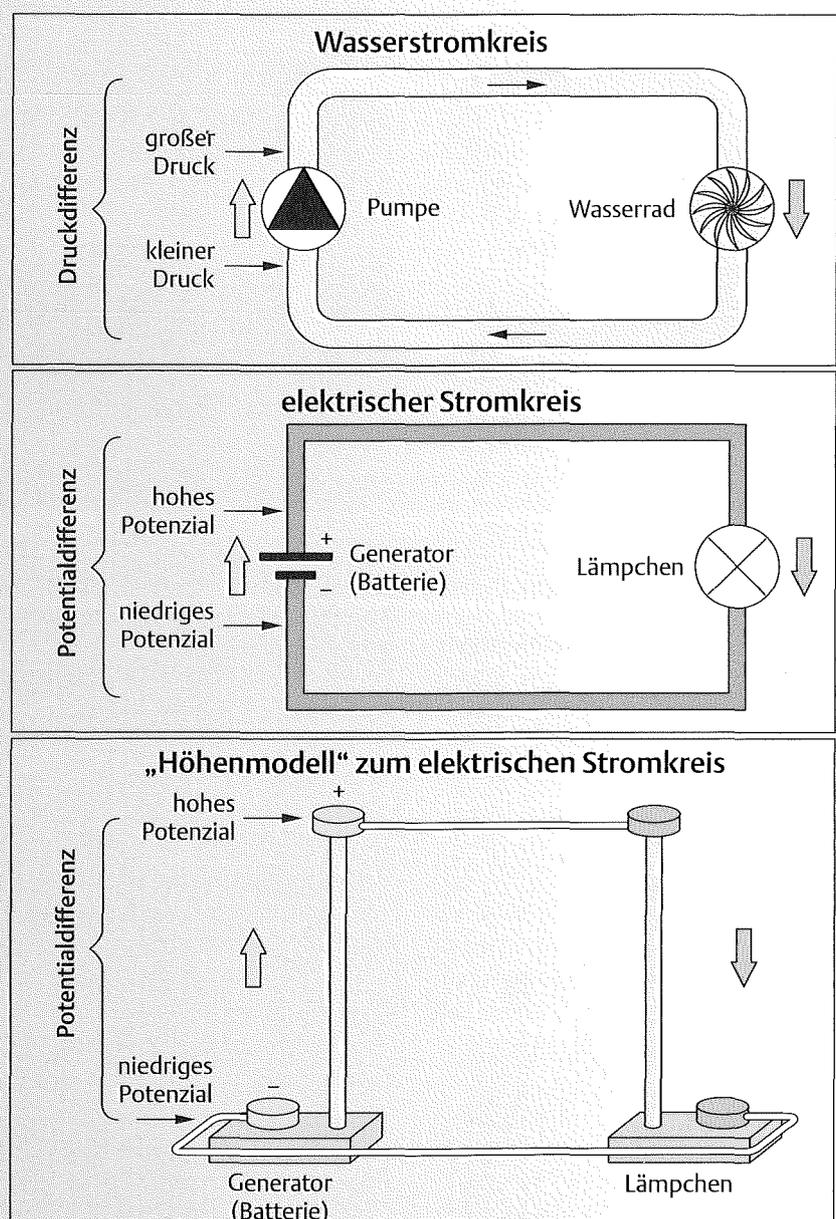


Abb. 4: Folie mit einer Veranschaulichung der Knotenregel

Abb. 5: Analogie von Wasserkreislauf, Stromkreis und Stäbchenmodell



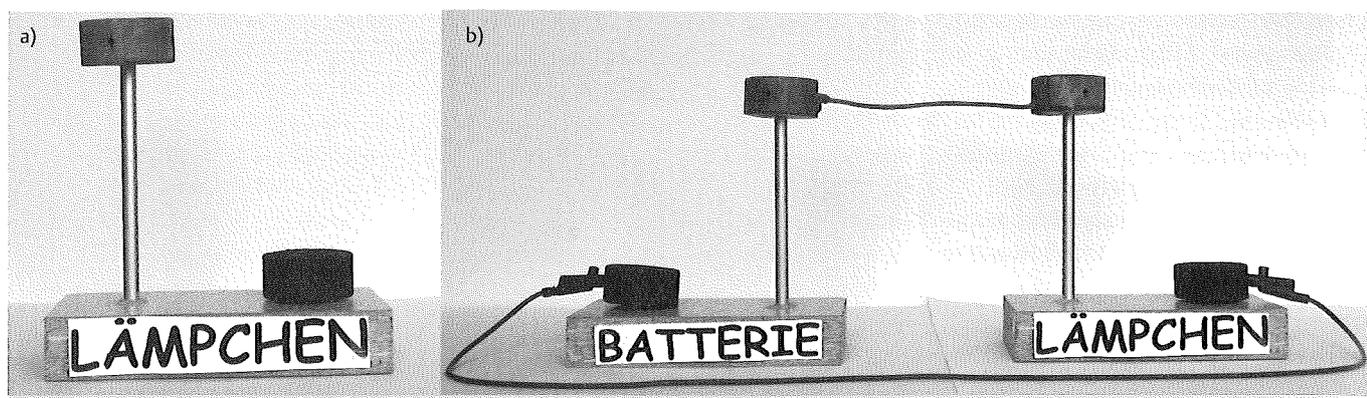


Abb. 6: Das Stäbchenmodell. Modell eines Lämpchens (a) und Modell eines geschlossenen Stromkreises mit einer Batterie und einem Lämpchen (b)

4.-6. Stunde

Hier geht es vertiefend und präzisierend um die Einführung der Stromstärke als Maß für die Intensität des Vorgangs in einem Elektrogerät. Auch wenn das Prinzip des Drehspulmessgeräts als nicht mehr zeitgemäß für ein Messinstrument angesehen

werden kann, ist es zur Einführung didaktisch von hohem Wert. In einer Reihenschaltung von Lämpchen und Motor dient die Helligkeit des Lämpchens zunächst als Indikator für die Elektrizitätsmenge, die durch das Lämpchen in jeder Zeitspanne hindurchfließt. Die Drehung des Motors

wird durch einen Federkraftmesser verhindert, dessen Auszug von der Stromstärke abhängt (Achtung: die Stromstärke kann bei abgebremstem Motor leicht dessen zulässige Stromstärke überschreiten und die Wicklung durchbrennen). Diese Idee wird auf das Drehspulmessinstrument bezogen, bei dem die Spulendrehung ja ebenfalls durch eine Feder abgebremst wird.

Nach der Mitteilung, dass die Einheit der Stromstärke durch die magnetische Wirkung festgelegt wird, führen die Schülerinnen und Schüler Messübungen an Reihen- und Parallelschaltungen durch. Die Aussagen über die Stromstärke im unverzweigten Stromkreis und die Knotenregel werden als Merkregel formuliert. Folien wie in Abb. 4 dienen der Veranschaulichung.

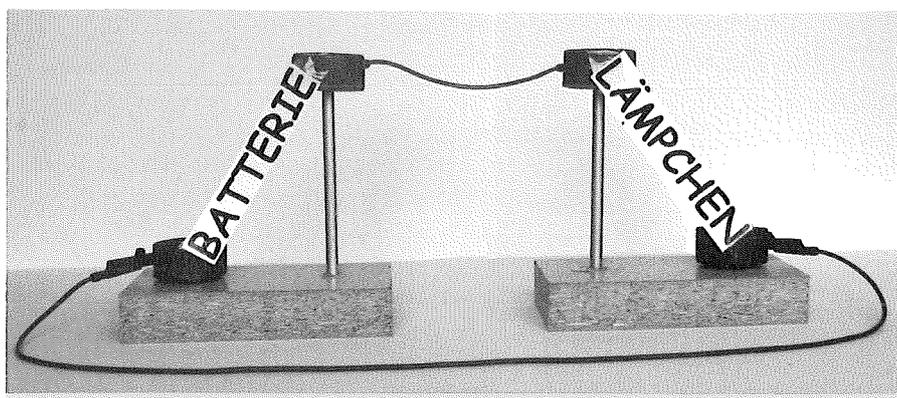
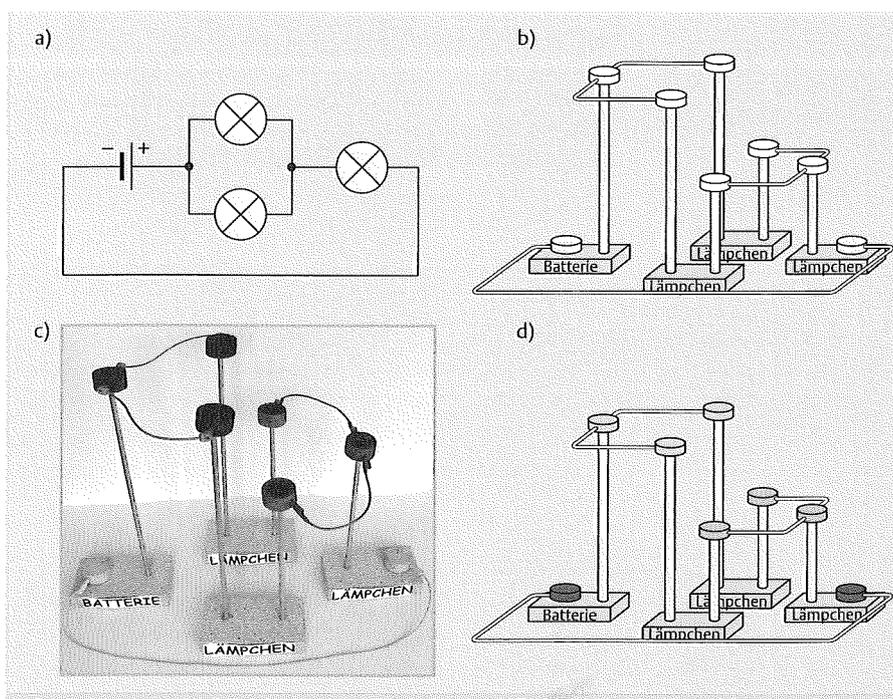


Abb. 7: Variante des Stäbchenmodells

Abb. 8: Darstellung einer gemischten Schaltung mit dem Stäbchenmodell. Der gleichen Farbe oder dem gleichen Grauwert entspricht gleiches Potenzial (d).



7.-12. Stunde

Ohne dass das Verhalten von Wasserstromkreisen ausführlich thematisiert wird², wird als Hinführung zu Potentialdifferenz als Antrieb des Elektrizitätsflusses die Analogie benutzt, dass eine Pumpe zwischen ihrem Ein- und Ausgang eine Druckdifferenz erzeugen muss um Wasser durch einen Kreis zu drücken (Hinweise auf Warmwasserheizung und Wasserkühlung beim Automotor). Entsprechend erzeugt eine Batterie zwischen ihren beiden Anschlüssen eine Potentialdifferenz im Sinne einer elektrischen Druckdifferenz auf die Elektrizität. Zur weiteren Veranschaulichung wurde das Stäbchenmodell von Gleixner in überarbeiteter Form genutzt (siehe Abb. 6). Den Zusammenhang der Analogie des Wasserkreislaufs, Stromkreis und Stäbchenmodell zeigt die Folie in Abb. 5.

² Untersuchungen von Schwedes u.a. [4] haben ergeben, dass (a) das Wasserkreislauf nicht so einfach zu verstehen ist, (b) der Transfer auf den elektrischen Stromkreis nicht gut gelingt und (c) dieser Weg viel Zeit kostet, die besser für Übungen verwendet wird.

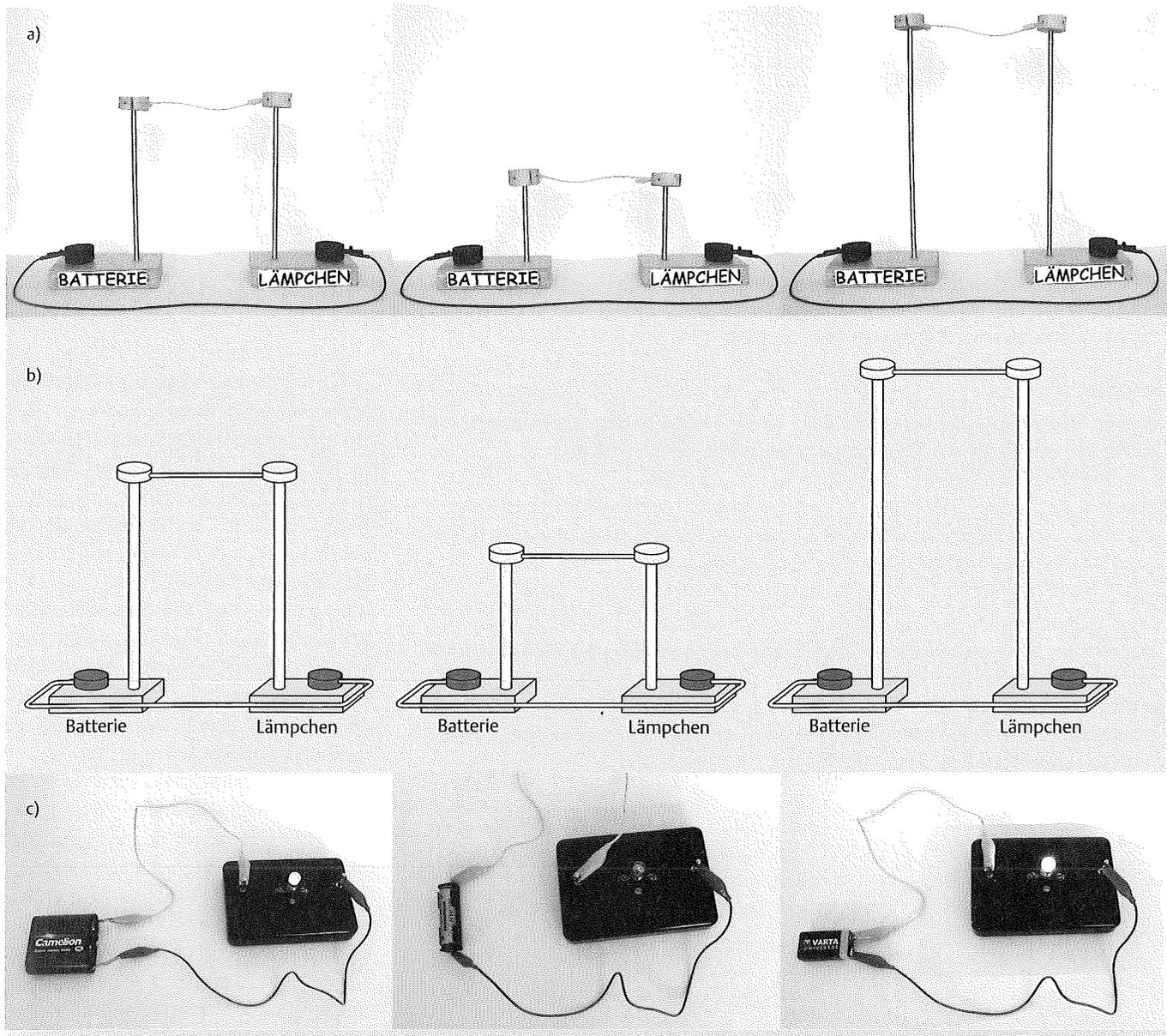


Abb. 9: Darstellung einer Schaltung auf drei Arten: Reales Stäbchenmodell (a), gezeichnetes Stäbchenmodell (b) und Realschaltung (c). Bei Verwendung unterschiedlicher Generatoren variiert die Höhe im Stäbchenmodell (von links nach rechts)

Möglicherweise sind schräg zwischen den beiden Potentialhöhen angebrachte Bezeichnungen, wie in Abb. 7 zu sehen, noch günstiger (allerdings benötigt man dann je nach Potentialunterschied unterschiedlich lange Beschriftungen). Diese Variante haben wir nicht erprobt. Die Anordnungen nach Abb. 6 sind unseren Erachtens einfacher zu handhaben und wir haben keinerlei Schwierigkeiten beim Aufbau durch die Schülerinnen und Schüler feststellen können.

Unter Anwendung der nachfolgend beschriebenen Regeln zum elektrischen Potenzial: „Am Pluspol einer Batterie oder eines Netzgerätes ist der Potenzialwert größer als am Minuspol“ und „sind zwei Stellen durch eine Leitung miteinander verbunden, so hat das Potenzial an beiden Stellen den-

selben Wert“, können mit Hilfe dieses Modells übersichtlich und einfach Parallel-, Reihen- und gemischte Schaltungen aufgebaut werden und die Potenzialwerte und Potenzialdifferenzen veranschaulicht werden (s. Abb. 8). Bei der Serienschaltung von Lämpchen wird damit auf intuitive Weise klar, dass der durch die Batterie vorgegebene Potenzialunterschied sich auf die in Reihe geschalteten Lämpchen verteilen muss. Bei der Parallelschaltung kann man leicht erarbeiten, dass zwischen den Verzweigungspunkten jeweils die gleiche Höhendifferenz, entsprechend einer gleichen Potenzialdifferenz, vorhanden ist.

Neben der Veranschaulichung von Demonstrationsexperimenten mit Hilfe dieses Modells wurde es im Unterricht auch zur Gruppenarbeit und in Lernzirkeln eingesetzt.

Hierfür wurde zusätzlich eine graphische Darstellung des Höhenmodells für die Verwendung in Arbeits-, Merk- und Übungsblätter verwendet.

Im Unterricht werden parallel die Realschaltungen, das zugehörigen Stäbchenmodell und die symbolische Stäbchenmodell darstellung präsentiert (siehe Abb. 9). Die Vorschläge in [7] und [13] aufgreifend wurden folgende sechs Regeln – in Anlehnung an die Druck- und Höhenanalogie – für das elektrische Potenzial festgelegt (siehe Kasten 1: Potenzialregeln).

Regel (3) wird zum besseren Verständnis auch wie folgt formuliert: „Solange man ein Verbindungskabel (eine Leitung) mit dem Finger entlang fahren kann und auf kein Elektrogerät und keinen Generator stößt, ändert sich der Potenzialwert nicht.“

Potenzialregeln

Regel (1)

Am Pluspol eines Generators ist der Potenzialwert größer als am Minuspol.

Regel (2)

Außerhalb von Generatoren fließt die Elektrizität von Stellen mit hohem Potenzialwert zu Stellen mit niedrigem Potenzialwert.

Regel (3)

Sind in einem Stromkreis zwei Stellen nur durch ein Verbindungskabel miteinander verbunden, so hat das elektrische Potenzial an beiden Stellen denselben Wert.

Regel (4)

Solange nichts anderes angegeben ist (z. B. bei der Verwendung mehrerer Generatoren in einer Schaltung), beträgt der Potentialwert am Minuspol eines Generators null Volt.

Regel (5)

Je größer die Spannung (Potentialdifferenz) zwischen den Anschlüssen des Generators ist, desto größer ist die Stromstärke durch das angeschlossene Elektrogerät.

Regel (6) Maschenregel:

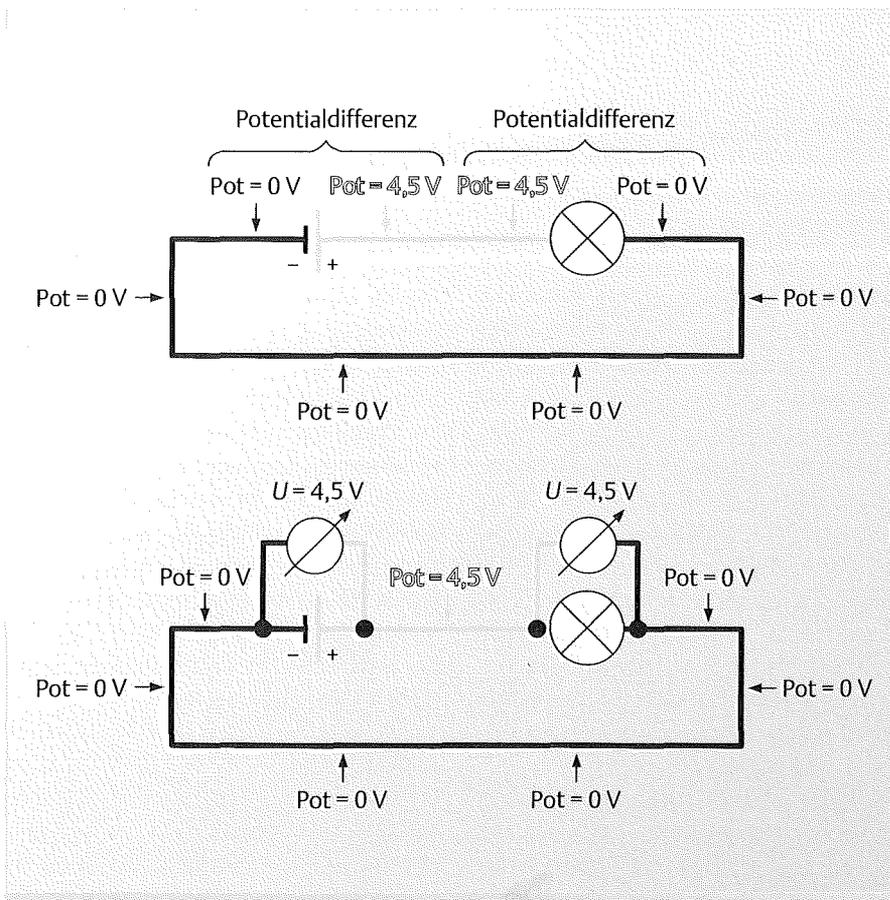
Wenn in einer Schaltung eine Masche durchlaufen wird, kommt man stets wieder bei dem Potentialwert an, bei dem man begonnen hat.

In einer Reihenschaltung gilt:

Die Spannung zwischen den Polen des Gesamtgenerators ist gleich der Summe der Spannungen über den jeweiligen Anschlüssen der Elektrogeräte.

Kasten 1: Potenzialregeln

Abb. 10: Darstellung einer Schaltskizze mit Farbkodierung von Regel 3



Um die Übersichtlichkeit von Schaltskizzen zu verbessern und Stellen gleichen und verschiedenen Potentials besser voneinander unterscheiden zu können, wird an dieser Stelle Regel 3 in folgender Weise angewandt: Mit einem Farbstift werden in der Schaltskizze alle Leitungsabschnitte nachgezeichnet, die direkt, also nicht über irgendein elektrisches Gerät, miteinander verbunden sind (siehe Abb. 10). Für unterschiedliche Potentialwerte werden verschiedene Farben verwendet (Diese sehr nützliche Farbkodierung für das Potential ist von Herrmann und Schmälzle [13] für den Unterricht vorgeschlagen worden).

Um einen Potentialnullpunkt in Stromkreisen festzulegen, wird durch Regel 4 folgende Festlegung getroffen (es kann auch die in der Elektronik übliche Festlegung gewählt werden, dass die Erde das Potential Null hat), siehe Kasten 1.

Im folgenden Unterricht wird die Bezeichnung Spannung für die Potentialdifferenz eingeführt und immer wieder beide Begriffe synonym verwendet. Damit wird klargestellt, dass sich eine Spannung immer auf zwei Punkte bezieht.

In Analogie zur Druckdifferenz als Maß der Stärke einer Pumpe wurde die Potentialdifferenz als Stärke eines Generators eingeführt. Verschieden starke Generatoren führen in dem gleichen Gerät zu unterschiedlich intensiven Vorgängen, d. h. zu unterschiedlichen Stromstärken. Daraus ergibt sich auch die Idee für ein Messverfahren: Verglichen werden die Effekte in einem „Standardgerät“. Dass kann wieder die Kraft auf eine Feder sein, die ein durch die Feder gebremster Motor ausübt. Damit wäre man wieder beim Prinzip des Drehspulmesswerks (bzw. wie bei der Stromstärkemessung bei den aktuellen Vielfachmessinstrumenten als Black Box). Eine überzeugende Wahl der Maßeinheit kann man am besten später im Zusammenhang mit elektrischer Energie bzw. Leistung begründen.

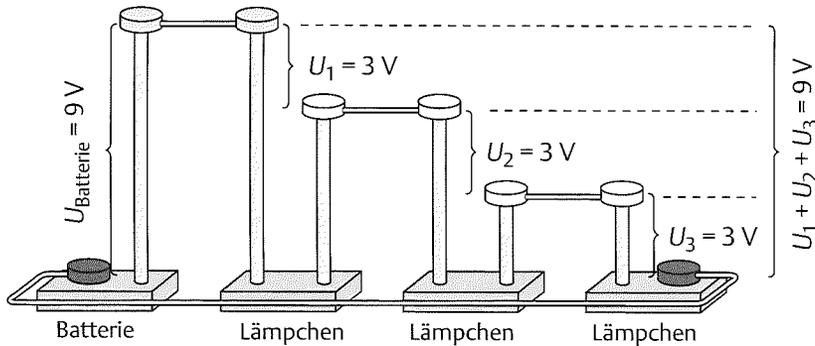
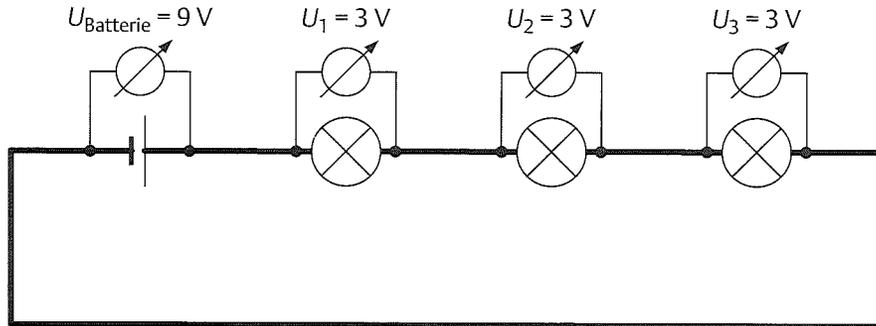
Es schließen sich Übungen im Messen von Spannungen an.

Bei der Reihenschaltung von Lämpchen wird auf intuitive Weise klar, dass der durch den Generator vorgegebene Potentialunterschied sich auf die in Reihe geschalteten Lämpchen verteilen muss (Kasten 1; Regel 6). Bei der Parallelschaltung kann man leicht erarbeiten, dass zwischen den Verzweigungspunkten jeweils die gleiche Höhendifferenz, entsprechend einer gleichen Potentialdifferenz, auftaucht (Abb. 12).

Merkblatt 8

Maschenregel (1. Formulierung)

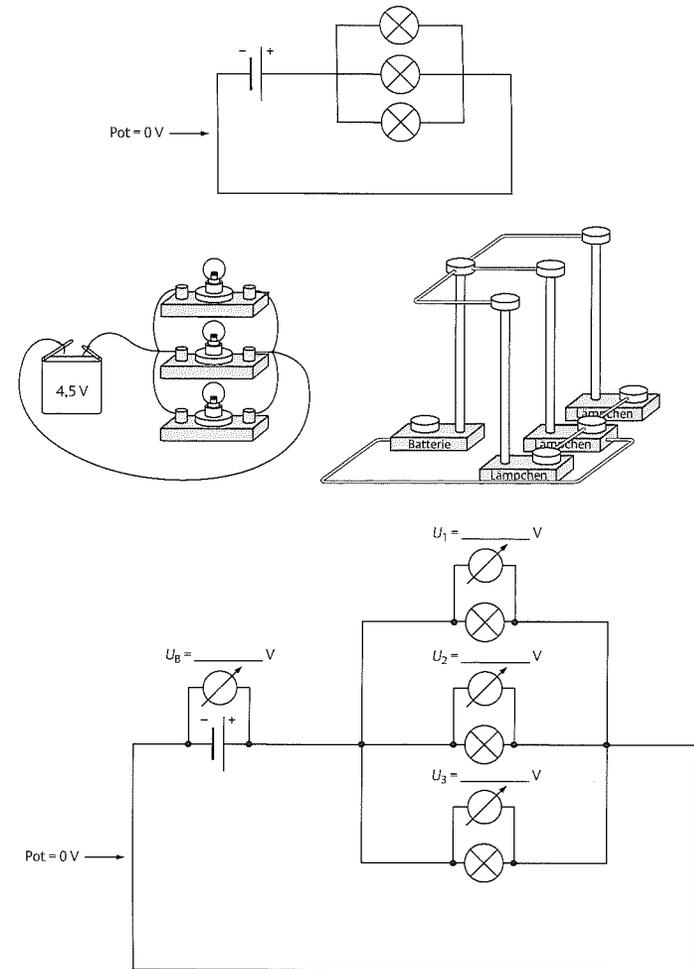
In einer Reihenschaltung mit dem Generator gilt:
Die Spannung zwischen den Polen des Generators ist gleich der Summe der Spannungen über den jeweiligen Anschlüssen der Elektrogeräte.



Wenn wir in einer Schaltung einen Rundweg (eine Masche) durchlaufen (z. B. Start und Ziel am Minuspol eines Generators), so kommen wir stets wieder bei dem Potenzialwert an, bei dem wir losgelaufen sind.

Abb. 11: Arbeitsblatt zur Einführung der Maschenregel mit dem Stäbchenmodell

Folie 16



Was kannst du über das Verhältnis der Spannungen U_2 , U_3 und U_4 zueinander sagen? Notiere:

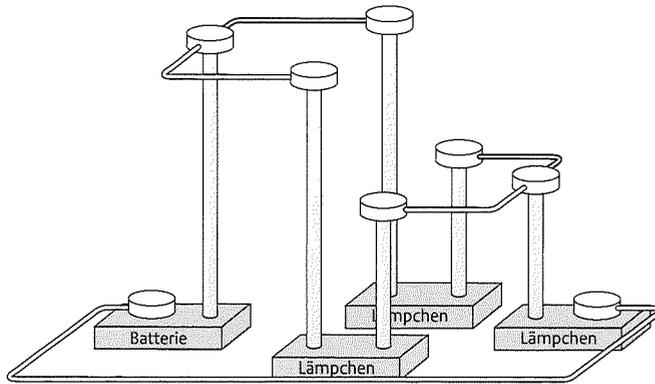
Wie verhält sich die Spannung U_1 zu den Spannungen U_2 , U_3 und U_4 ? Notiere:

Abb. 12: Parallelschaltung, auf unterschiedliche Weise visualisiert

Aufgabe 1

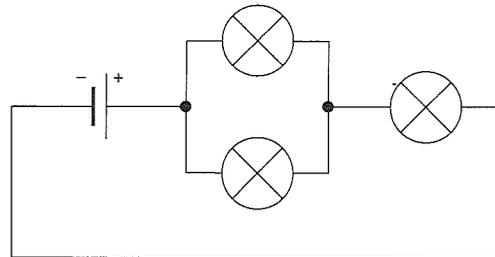
Station 1

- Baue vorsichtig mit den Materialien, die an deiner Station ausliegen, das Höhenmodell so auf, wie es auf dem Bild dargestellt ist.
- Achte darauf, dass du dich oder andere mit den Stangen nicht verletzt.



- Färbe im Bild des Höhenmodells unterschiedliche Potenzialwerte mit verschiedenen Farben.
- Verwende dafür bitte nur die Farben Rot – Grün – Blau.

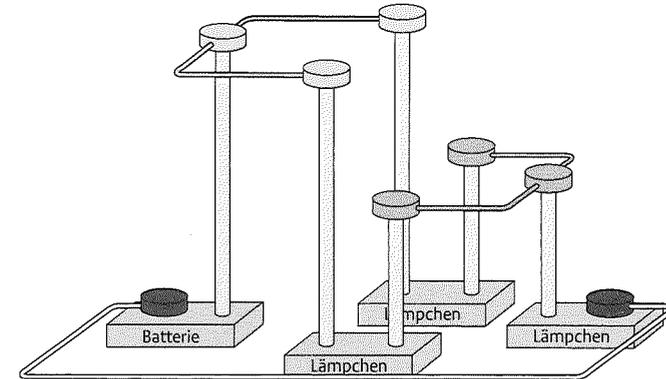
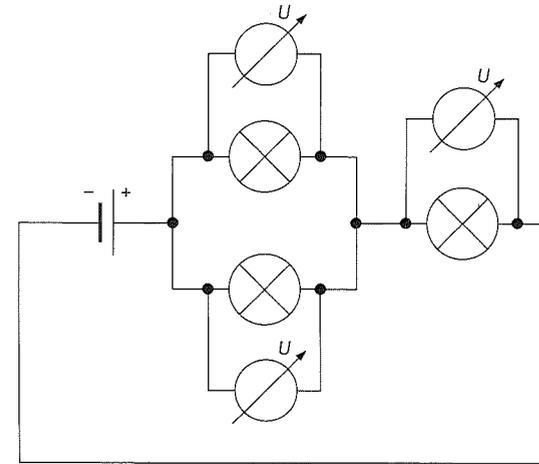
- Die rechte Schaltskizze stellt denselben Stromkreis wie oben dar. Färbe auch hier unterschiedliche Potenzialwerte mit verschiedenen Farben.



- Verwende dabei für einen bestimmten Potenzialwert dieselbe Farbe wie beim Höhenmodell.
- Überlege dir mithilfe des Höhenmodells, an welchen Stellen der Schaltung sich Potentialdifferenzen ungleich Null befinden, d. h. zwischen welchen Punkten eine elektrische Spannung U gemessen werden kann.
- Zeichne in die Schaltskizze Voltmeter ein, die dir eine elektrische Spannung anzeigen würden!
- Baue das Höhenmodell vorsichtig auseinander und lege die Materialien zurück.

Abb. 13: Station für eine komplexere Schaltung eines Lernzirkels

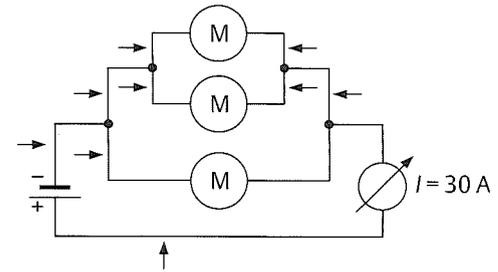
Lösungsvorschlag Station 1



- Die Wahl der Farben kann bei jeder Gruppe anders sein. Wichtig ist dabei, dass gleiche Potenzialwerte mit gleichen Farben und unterschiedliche Potenzialwerte mit unterschiedlichen Farben gekennzeichnet sind

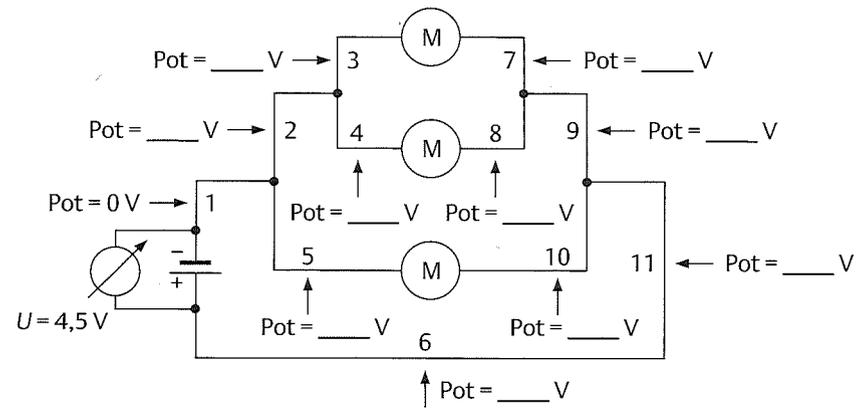
Abb. 14: Lösungen für den Arbeitsauftrag von Abb. 13

Übungsblatt 7



In der Schaltskizze sind alle Motoren von gleicher Bauart.

- a) Welche Stromstärken werden an den mit Pfeilen gekennzeichneten Stellen gemessen?
- b) Färbe in der folgenden Schaltskizze unterschiedliche Potenzialwerte mit verschiedenen Farben.



- c) Gib die Werte des Potentials an den mit Pfeilen gekennzeichneten Stellen an.
- d) Welche Potentialdifferenzen bzw. Spannungen können zwischen den folgenden Punktepaaren gemessen werden?

Punktepaar	Potentialdifferenz/Spannung
1-6	
3-4	
3-7	
4-8	
5-10	
2-9	
1-11	

Abb. 15: Arbeitsblatt zu Stromstärken, Potenzialen und Spannungen bei einer Parallelschaltung

Folie 26

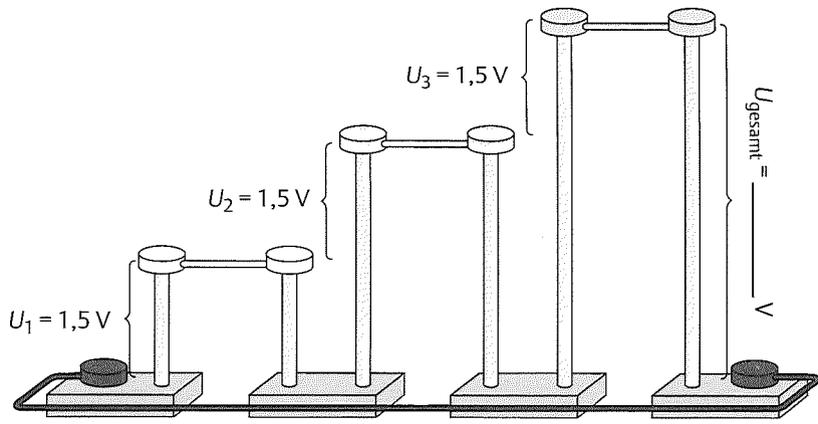
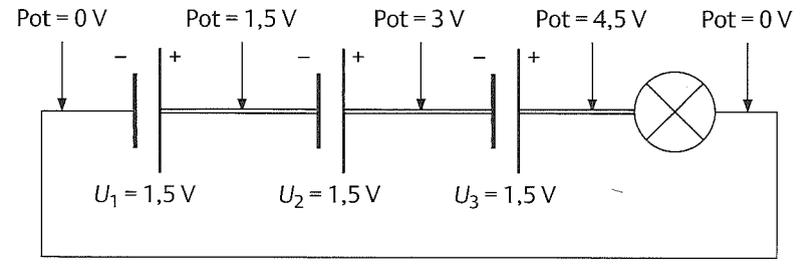
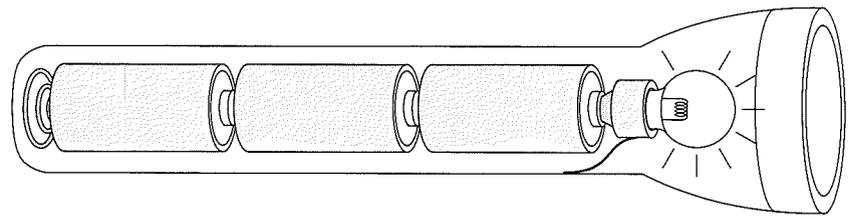
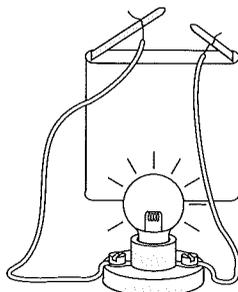


Abb. 16: Arbeitsblatt zur Hintereinanderschaltung von Batterien

Arbeitsblatt

Aufgabe 1

Du siehst hier ein Lämpchen an eine Batterie angeschlossen. Das Lämpchen leuchtet. Lies jeden der untenstehenden Sätze und kreuze an!

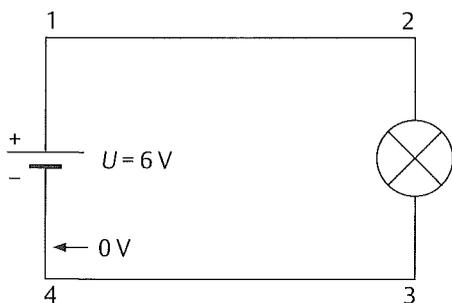


- | | stimmt | falsch | weiß nicht |
|---|---|---------------------------------------|---------------------------------|
| 1. Die Lampe verbraucht den elektrischen Strom vollständig | <input type="checkbox"/>
16% (27%) | <input type="checkbox"/>
72% | <input type="checkbox"/>
12% |
| 2. Die Lampe verbraucht ein bisschen den elektrischen Strom | <input type="checkbox"/>
23,5% (51%) | <input type="checkbox"/>
70,5% | <input type="checkbox"/>
6% |
| 3. Der elektrische Strom von der Batterie zur Lampe kommt völlig unverbraucht von der Lampe zur Batterie zurück | <input type="checkbox"/>
69% (26%) | <input type="checkbox"/>
25% (57%) | <input type="checkbox"/>
6% |

Abb. 17: Testaufgabe zur Erhaltung des Stroms im geschlossenen Stromkreis

Aufgabe 6

Betrachte die folgende Schaltung:



Bestimme den Potenzialwerte an

Stelle 1: 6 V 96 %

Stelle 2: 6 V 96 %

Stelle 3: 0 V 94 %

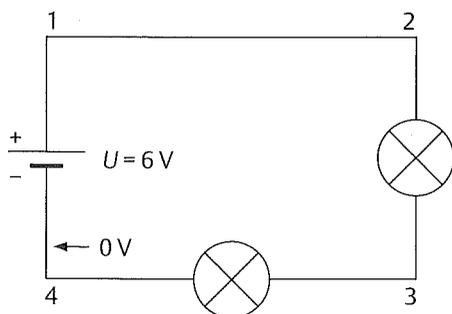
Wie groß ist in diesem Stromkreis die Spannung zwischen den Punkten:

1 und 2: 0 V 69 %

2 und 3: 6 V 88 %

3 und 4: 0 V 94 %

Zwischen den Punkten 3 und 4 wird ein zweites Lämpchen der gleichen Sorte zugeschaltet:



Bestimme im Stromkreis mit zwei Lämpchenden Potenzialwerte an

Stelle 1: 6 V 96 %

Stelle 2: 6 V 96 %

Stelle 3: 3 V 80 %

Wie groß ist in diesem Stromkreis die Spannung zwischen den Punkten:

1 und 2: 0 V 71 %

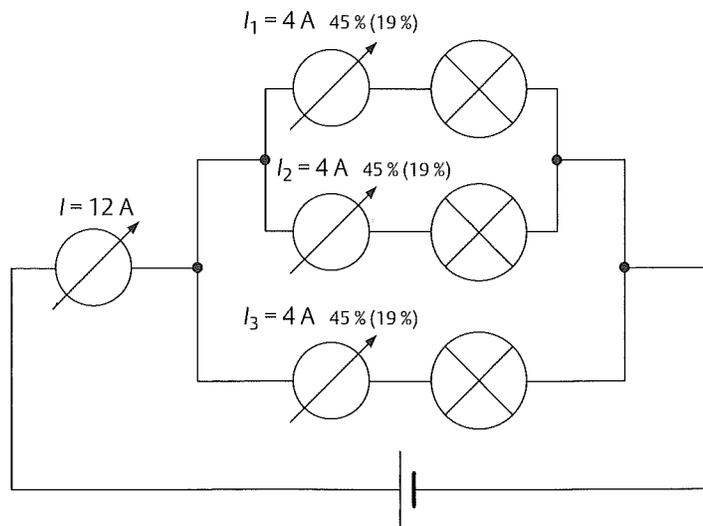
2 und 3: 3 V 72 %

3 und 4: 3 V 76 %

Abb. 18: Testaufgabe zur Bestimmung und Unterscheidung von Potenzial und Spannung

Aufgabe 5

Die Lämpchen in folgenden Stromkreis sind alle gleich.



Ergänze die Stromstärken an den Verzweigungen.

Abb. 19: Testaufgabe zum „lokalen Denken“

Aufgabe 9

Bei der nachfolgenden Schaltung handelt es sich jeweils um gleich gebaute Lämpchen und Batterien.

Verfahre nach folgenden Schritten:

- Welche Stromstärke I zeigen die eingezeichneten Stromstärkemessgeräte jeweils an.
- Bestimme die Potenzialwerte an den mit Pfeilen gekennzeichneten Stellen der Schaltung.
- Welche Spannungen misst man an den eingezeichneten Spannungsmessgeräten?

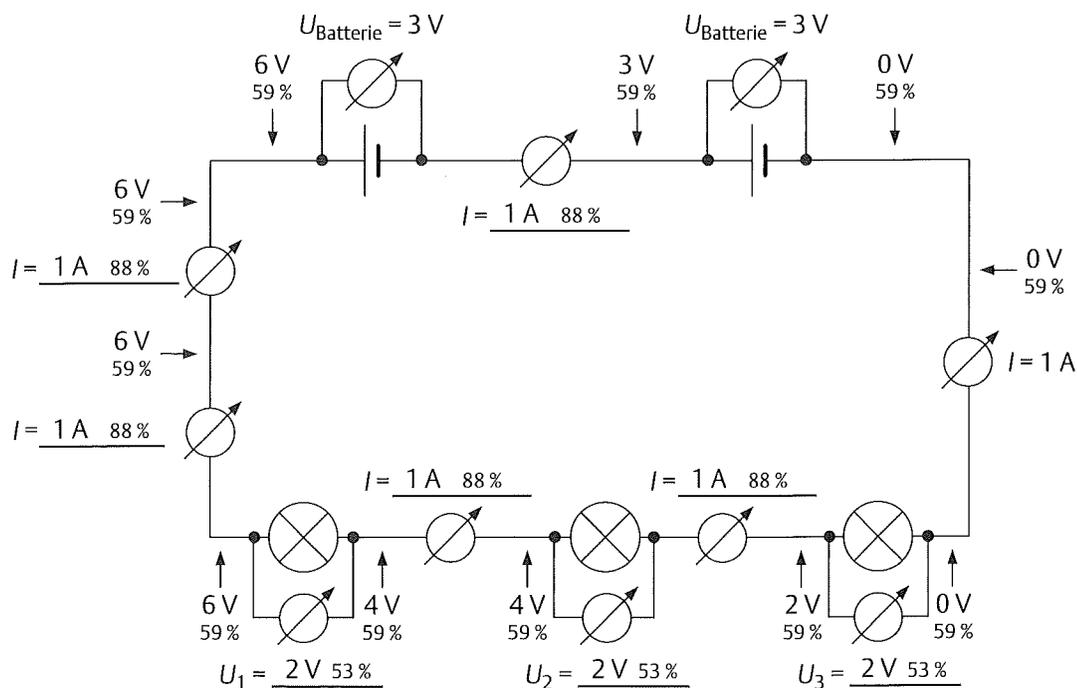


Abb. 20: Testaufgabe zur Bestimmung und Unterscheidung von Stromstärke, Potenzial und Spannung

13.- 15. Stunde

In diesen Stunden werden Potenziale, Spannungen und Stromstärken in etwas komplizierteren Stromkreisen eingeübt (siehe Abb. 15).

Unter anderem können zur Vertiefung mehrere Generatoren in eine Schaltung eingefügt werden, als einfachster Fall eine Reihenschaltung gleicher Batterien in einer Stablampe (siehe Abb. 16).

4 | Einige Ergebnisse der Erprobung

Die obige Unterrichtssequenz wurde mit geringfügigen Änderungen in zwei siebten Klassen ($N = 51$) eines Gymnasiums erprobt und durch einen abschließenden Test überprüft, inwiefern die angestrebten Ziele erreicht und fehlerhafte Vorstellungen überwunden werden konnten. Wenn möglich werden die Ergebnisse mit denen einer Untersuchung [2] aus dem Jahr 1986 von 414 europäischen Zehntklässlern, die alle Unterricht in Elektrizitätslehre hatten, verglichen. Die Ergebnisse weisen in eine klare Richtung: Das Unterrichtskonzept war in dem Sinne erfolgreich, dass die Schüler und Schülerinnen der beiden siebten Klassen erfolgreich zwischen den Begriffen Strom und Spannung differenzieren können, die Vorstellung vom Stromverbrauch weitgehend ablehnen, lokal argumentieren können und Potenzialwerte, Spannungswerte und Stromstärken in verschiedenen Schaltungen angeben können. Im Vergleich zu den Zehntklässlern sind sie dabei in fast allen vergleichbaren Aufgaben deutlich erfolgreicher. Durch die Darstellung einiger Beispielitems soll dies im Folgenden veranschaulicht werden. Wenn Ergebnisse aus den Tests der Zehntklässler vorlagen, sind diese in den Aufgaben zum Vergleich immer in Klammern neben den Ergebnissen der Siebtklässler angegeben.

a) 69% der Schüler und Schülerinnen aus der 7. Klasse mit Unterricht nach dem obigen Konzept können richtig angeben, dass in einem einfachen elektrischen Stromkreis der elektrische Strom von einer Batterie zu einem Lämpchen völlig unverbraucht vom Lämpchen zur Batterie zurückkommt (Abb. 17). Dieses Ergebnis mag auf den ersten Blick noch recht unbefriedigend erscheinen. Im Vergleich zu der europäischen Untersuchung, in der lediglich 26% der Zehntklässler eine richtige Antwort geben, ergibt sich eine völlig andere Bewertung.

b) Die Aufgaben im Test bezüglich Potenzial und Spannung werden recht erfolgreich bearbeitet. In Aufgabe 6 zum Beispiel (Abb. 18) bearbeiten von den Zehntklässlern den ersten Teil zur Angabe der Spannungswerte nur 43% und den 2. Teil zur Angabe der Spannungswerte nur 29% richtig. Dagegen bearbeiten von den Siebtklässlern den ersten Teil 71% und den 2. Teil 61% richtig. Die eingezeichneten Prozentwerte zu den Aufgaben in Abb. 18 zeigen, dass bei den einzelnen Teilaufgaben immer über 2/3 der Schüler und Schülerinnen der beiden siebten Klassen den richtigen Potenzialwert und die richtigen Spannungsdifferenzen angeben können.

c) Die Aufgabe 5 (Abb. 19) zur Lernschwierigkeit „lokales Denken“ wird von mehr als doppelt so vielen Siebtklässlern wie Zehntklässlern richtig gelöst.

d) Die sehr komplexe Aufgabe 9 (siehe Abb. 20), die ein Verständnis für alle drei Begriffe Stromstärke, Potenzial und Spannung erfordert, wurde erstaunlich gut von den Schülern und Schülerinnen der Versuchsgruppe bearbeitet (Vergleichsergebnisse liegen nicht vor).

Auch in den anderen Aufgaben zeigen sich gute Lernerfolge. Die Maßnahmen zur Förderung der Stromkreisvorstellung über die magnetische Wirkung und der Potentialansatz mit dem unterstützenden Stäbchenmodell sind deshalb nach unserer Einschätzung eine sehr erfolgreiche Möglichkeit zur Verbesserung der Lernerfolge bei der Einführung in die elementare Elektrizitätslehre.

Literatur

- [1] Duit, R., Jung, W., v. Rhöneck, C. (Eds.): Aspects of Understanding Electricity, IPN, Kiel, 1984
- [2] v. Rhöneck C.: Vorstellungen vom elektrischen Stromkreis und zu den Begriffen Strom, Spannung und Widerstand, Naturwissenschaften im Unterricht-Physik; 34, Heft 13, 1986, S.108-112; abgedruckt in R. Müller, R. Wodzinski, M. Hopf (Hrsg.): Schülervorstellungen in der Physik, Aulis Verlag, Köln, 2004, S.167 - 171
- [3] Schwedes, H., Dudeck, W.-G., Seibel, C.: Elektrizitätslehre mit Wassermodellen, Praxis der Naturwissenschaften – Physik, 44, 1995, S.28-36
- [4] Schwedes, H., Schilling, P.: Schülervorstellungen zu Wasserstromkreisen, physica didactica 10, 1983, S.159 – 170; abgedruckt in R. Müller, R. Wodzinski, M. Hopf (Hrsg.): Schülervorstellungen in der Physik, Aulis Verlag, Köln, 2004, S. 172 – 183
- [5] Haider, M.: Der Stellenwert von Analogien für den Erwerb naturwissenschaftlicher Erkenntnisse, Dissertation Universität Regensburg, 2008
- [6] Jochmann, E., Hermes, O., Spies, P.: Grundriß der Experimentalphysik und Elemente der Chemie sowie der Astronomie und mathematische Geographie, Berlin (Winkelmann & Söhne), 1914

[7] Poske, F.: Didaktik des physikalischen Unterrichts. Leipzig und Berlin, B.G.Teubner, 1915

[8] Höfiling, O.: Lehrbuch der Physik, Ausgabe A, 1955, Dümmlers Verlag

[9] IPN (Hrsg.): IPN Curriculum Physik – Unterrichtseinheiten für die Orientierungsstufe, Unterrichtseinheit OS 1 – der elektrische Stromkreis, Stuttgart Klett, 1974

[10] Muckenfuss, H.: Neue Wege im Elektrikunterricht; Aulis Verlag Deubner, Köln, 1992

[11] Jung, W.: Elektromagnetismus für die Sekundarstufe I, Diesterweg, Frankfurt am Main, Berlin, München 1981

[12] Wiesner, H., Jung, W., Kiowski, I., Weber, E.: Zur Einführung von Stromstärke und Spannung. Naturwissenschaften im Unterricht, P/C, (1982), S. 388-394

[13] v. Rhöneck, C., Völker, B.: Einfache Elektrizitätslehre zwischen physikalischem Anspruch und Lernschwierigkeiten. Naturwissenschaften im Unterricht P/C 30 (1982) S. 406-412

[14] Herrmann, F., Schmälzle, P.: Das elektrische Potential im Unterricht der Sekundarstufe I, MNU, 37 (1984) 8, S.476 – 482

[15] Steinberg, M.S., Clement, J.J.: Evolving Mental Models of Electric Circuits. In: H. Behrendt et al. (eds.) Research in Science Education – Past, Present, and Future, Kluwer 2001, S. 235-240

[16] Schwarze, H. (Hrsg.): Unterricht Physik Bd. 15: Elektrischer Stromkreis, Antrieb und Widerstand, Aulis Verlag Deubner, 2007

[17] Schuhmacher, M.: Konzeption und Durchführung einer Untersuchung zur Elektrizitätslehre in der Sekundarstufe 1 unter Berücksichtigung des Potenzialansatzes, Staatsexamensarbeit, Universität Frankfurt am Main, 1995

[18] Wiesner, H.: Ein einfaches Gerät zur Demonstration von „ $I = \text{const}$ “. Naturwissenschaften im Unterricht P/C 33 (1985), S. 74-76

[19] Gleixner, C.: Einleuchtende Elektrizitätslehre mit Potenzial, Dissertation LMU München, 1998

[20] Koller, D.: Entwurf und Erprobung eines Unterrichtskonzepts zur Einführung der Elektrizitätslehre, Staatsexamensarbeit LMU München, 2008

Anschrift der Verfasser

D. Koller, Ch. Waltner, Prof. Dr. Dr. H. Wiesner, Lehrstuhl für Didaktik der Physik, Universität München, Schellingstr. 4, 80799 München,
E-Mail: Christine.Waltner@physik.uni-muenchen.de