

Das Elektronengasmodell in der Sekundarstufe I

Jan-Philipp Burde*, Thomas Wilhelm*, Hartmut Wiesner[†]

*Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt

[†]Lehrstuhl für Didaktik der Physik, Ludwig-Maximilians-Universität, Theresienstr. 37, 80333 München
burde@physik.uni-frankfurt.de, wilhelm@physik.uni-frankfurt.de, hartmut.wiesner@physik.uni-muenchen.de

Kurzfassung

Trotz mehrjähriger unterrichtlicher Bemühungen besitzen viele Schüler am Ende der Sekundarstufe I kein ausreichend entwickeltes Verständnis der elementaren Elektrizitätslehre. Insbesondere die Entwicklung eines unabhängigen Spannungsbegriffs stellt Schüler in der Sekundarstufe I vor enorme Schwierigkeiten. Ein Grund hierfür könnte neben der zentralen Stellung des Stromkonzepts auch in der didaktisch unbegründeten Fokussierung auf die Differenzgröße Spannung im traditionellen Unterricht liegen. Im Gegensatz zum Potenzial, das einem Leiterabschnitt lokal zugeordnet werden kann, bezieht sich die elektrische Spannung nämlich immer auf die Differenz zweier Potenzialwerte in einem Stromkreis. Es ist daher naheliegend anzunehmen, dass eine bildhaft-anschauungsorientierte Vorstellung des Potenzials entscheidend zu einem besseren Verständnis elektrischer Stromkreise beitragen kann.

Das Elektronengasmodell stellt über die Gleichsetzung des Elektronengasdrucks mit dem elektrischen Potenzial einen vielversprechenden Ansatz dar, eine solche anschauliche Erklärung für das Potenzial zu liefern. Fachlich basiert das Elektronengasmodell auf den physikalischen Eigenschaften der wenig beachteten Oberflächenenergieelektronen in elektrischen Stromkreisen, die im Gegensatz zu Leitungselektronen vor und nach einem Widerstand unterschiedliche Dichten aufweisen. Nach einer Einordnung in bisherige Unterrichtsansätze wird im Artikel daher der fachliche Hintergrund des Elektronengasmodells näher beleuchtet, bevor die für die Schule nötigen didaktischen Elementarisierungen sowie mögliche Stärken und Schwächen des Modells diskutiert werden.

1. Motivation

Für viele Schüler stellt die Elektrizitätslehre eine große Herausforderung im Physikunterricht in der Sekundarstufe I dar. Insbesondere kommt es bei den meisten Schülern in Folge der Dominanz des Strombegriffs in der Mittelstufe nicht zur Entwicklung eines eigenständigen Spannungskonzepts. Stattdessen sehen viele Schüler die Spannung als Eigenschaft bzw. als Bestandteil des elektrischen Stroms [1]. Auch wenn die Ursachen für diese Lernschwierigkeiten vielfältig und komplex sein mögen, erscheint es doch plausibel, dass die starke Fokussierung auf das Strom- und Spannungskonzept ohne Behandlung des Potenzials in der Sekundarstufe I maßgeblich zu den Verständnisschwierigkeiten beitragen.

Historisch gesehen wurde die elementare Elektrizitätslehre nämlich bis Anfang des 20. Jahrhunderts vorrangig über die Elektrostatik und das Potenzial vermittelt (z.B. [2]), bis anschließend der Strom- und Spannungsbegriff Ausgangspunkt für die Einführung der E-Lehre in den meisten Lehrbüchern wurden. Problematisch an dieser Entwicklung ist hauptsächlich, dass sie ohne didaktische Begründung stattfand und mit der Spannung ein Konzept zum zentralen Lerngegenstand erhoben hat, das deutlich abstrakter ist als das Potenzial. Grund ist

hier, dass das Potenzial einem Punkt bzw. Leiterabschnitt zugeordnet werden kann, während sich die Spannung als Potenzialdifferenz immer auf zwei Punkte in einem Stromkreis bezieht. Das Paradoxe ist also, dass die Schüler im Anfängerunterricht mit der Spannung als Differenzgröße operieren sollen, ohne die dahinterstehende Größe selbst, nämlich das Potenzial, zu kennen oder zu verstehen [3, S.477]. Vor diesem Hintergrund überrascht es wenig, dass Schüler mit dem Spannungsbegriff und damit häufig der E-Lehre insgesamt überfordert sind.

Eine Alternative zur traditionellen Einführung der Elektrizitätslehre über den Spannungs- und Strombegriff stellt der bereits angesprochene Potenzialansatz dar, der in den 80er Jahren von Herrmann & Schmälzle [3] wiederentdeckt wurde und sich in verschiedenen Formen bewährt hat [4 – 9]. Der entscheidende Vorteil dieses Ansatzes liegt darin, dass das Potenzial im Gegensatz zur elektrischen Spannung keine Differenzgröße ist und daher einem Leiterabschnitt lokal zugeordnet werden kann. Wie in Abbildung 1 zu sehen, steht eine Farbe hier immer für einen Potenzialwert, wodurch sofort zu sehen ist, welche Leiterabschnitte auf gleichem Potenzial sind. Über Farbkodierung ermöglicht der Potenzialansatz also eine übersichtliche und suggestive Darstellung von Potenzialen in Schaltskizzen.

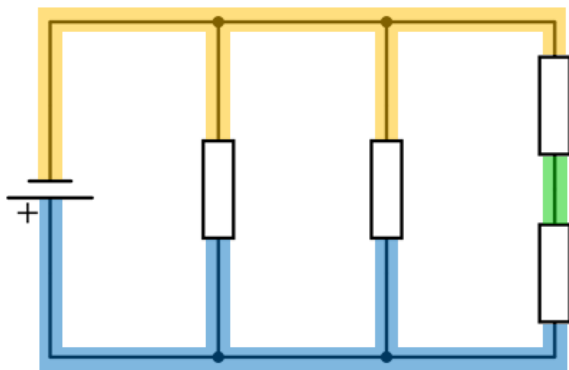


Abb. 1: Einfacher Stromkreis mit farblicher Markierung von Leiterabschnitten gleichen Potentials.

2. Bisherige Unterrichtsansätze

Verschiedene bekannte und bewährte Unterrichtsansätze wie z.B. der geschlossene Wasserkreislauf mit Doppelwassersäule [11], Ladungsunterschiede [12] sowie das Stäbchenmodell [6] basieren auf dem Potenzialansatz. Entscheidend zum Lernerfolg hat in allen Fällen die visuelle Darstellung des Potentials beigetragen. So berichten Schwedes, Dudeck & Seibel [11, S.35], dass die Verwendung einer Doppelwassersäule statt einer Pumpe zum Erzeugen von Druckunterschieden im geschlossenen Wasserkreislauf zu einem deutlich höheren Lernerfolg führte. Gleixner [6, S.70] sieht in der „Visualisierung des Druckunterschieds [...] ein wesentliches Hilfsmittel zum Aufbau eines adäquaten mentalen Modells“ des Potentials und setzt daher bei dem von ihm entwickelten Stäbchenmodell (siehe Abb. 2) konsequent auf die Visualisierung von Potenzialen durch Stäbchenhöhen.

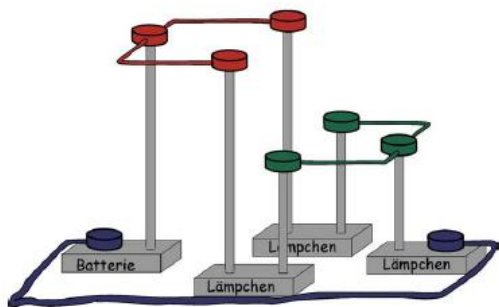


Abb.2: Visualisierung des Potentials über das Stäbchenmodell nach Gleixner (entnommen aus [8, S.122])

Nichtsdestotrotz haben sich diese bisherigen Ansätze lediglich zur Veranschaulichung einzelner Aspekte der Elektrizitätslehre bewährt. Das Stäbchenmodell von Gleixner liefert beispielsweise eine anschauliche Darstellung des Potentials, lässt aber offen, was das Potenzial ist und gibt keine anschauliche Erklärung für den elektrischen Strom. Beim geschlossenen Wasserkreislauf mit Doppelwassersäule ist zwar der Potenzialunterschied an der Batterie über die unterschiedlichen Pegelhöhen leicht visuell wahrnehmbar, die Druck- bzw. Potenzialunterschiede an Widerständen sind aber genauso wie die Wasserströ-

mung selbst nicht ohne weitere Hilfsmittel erkennbar.

Andere Analogien wie das Fahrradkettenmodell bzw. der starre Elektronenring eignen sich hingegen gut gegen die Stromverbrauchsvorstellung, können aber nicht den Spannungsbegriff erklären oder wie sich der Strom an einer Parallelschaltung aufteilt. Es mangelt also bisher an einem anschaulichen und dennoch erklärungsmächtigen Modell für ein so komplexes Thema wie die Elektrizitätslehre.

Ein in diesem Zusammenhang interessanter Ansatz ist die auf der Potenzialidee basierende Luftdruckanalogie von Clement & Steinberg [7, 10]. Die Grundannahme ist hier, dass Ladung fester Bestandteil von Leitern ist und sich dort ähnlich wie Luft unter Druck komprimieren lässt. Der große Vorteil eines solchen Vergleichs mit Luft liegt darin, dass der Luftdruck im Gegensatz zum Wasserdruck für Schüler direkt erfahrbar ist. Während sich der Wasserdruck beim geschlossenen Wasserkreislauf lediglich über ein Manometer ablesen lässt und sonst abstrakt und unzugänglich bleibt, können Schüler mit Hilfe von Luftpumpen, Spritzen und Fahrradreifen selber die Erfahrung sammeln, dass komprimierte Luft unter Druck steht, gegen die Wände drückt und so lange zu Bereichen niedrigeren Luftdrucks strömt, bis sich die Druckunterschiede aufgehoben haben. Das so gewonnene intuitive Druckverständnis ist elementar für die anschließende Übertragung auf elektrische Stromkreise. Wird beispielsweise ein Kondensator mit Hilfe einer Batterie geladen, so wird die Ladung in dieser Vorstellung von der Batterie von der einen zur anderen Kondensatorplatte gepumpt. In Folge kommt es in diesem Modell zu einem Überdruck auf der einen und einem Unterdruck auf der anderen Kondensatorplatte. Wird nun die Batterie entnommen, kommt es aufgrund der Druckunterschiede zwischen den beiden Kondensatorplatten zu einer Ausgleichsströmung der Ladungen von der oberen zur unteren Kondensatorplatte, bis sich die Drücke ausgeglichen haben (siehe Abb. 3).

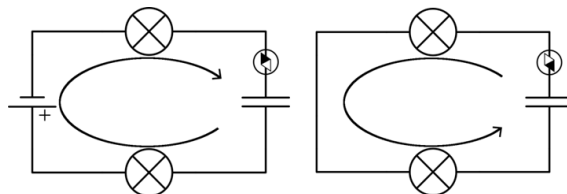


Abb. 3: Kondensatorladung und Kondensatorentladung als zentraler Lerngegenstand bei Clement & Steinberg [7]

In ersten Akzeptanzbefragungen von Clement & Steinberg [7, S.417] hat sich diese intuitive und erklärungsmächtige Analogie bewährt, da Schüler nicht nur zwischen Strom und Spannung unterscheiden konnten, sondern Druck- bzw. Potenzialunterschiede auch als Ursache für den elektrischen Strom erkannten. Im Gegensatz zu den zuvor vorgestellten und ebenfalls auf dem Potenzialbegriff aufbauenden

Unterrichtsansätzen verzichteten Clement & Steinberg aber auf eine anschauliche, visuelle Darstellung des Drucks bzw. des Potentials in ihrem Modell. Da aber gerade die visuelle Darstellung des Potentials ein entscheidender Faktor zum Verständnis des Potenzialbegriffs zu sein scheint, erscheint es sinnvoll, im Sinne von Design-Based-Research [13] auf dieser Erkenntnis aufzubauen und sie mit der Luftdruckanalogie von Clement & Steinberg zu verknüpfen. Eine Möglichkeit, die Ideen der Luftdruckanalogie mit der intuitiven, anschaulichen Darstellung des Potentials zu verbinden, stellt das Elektronengasmodell dar.

3. Fachlicher Hintergrund

Ein in der Schule häufig genutzter elektrischer Leiter ist Kupfer. Dabei handelt es sich um einen metallischen Festkörper, der strukturell gesehen aus Kupferatomen besteht, die ein Metallgitter bilden. Entscheidend für die Leitfähigkeit des Kupfers ist, dass jedes der Kupferatome ein nur sehr leicht gebundenes Außenelektron besitzt, weshalb diese Elektronen oft als frei angesehen werden. Da der Festkörper aus ebenso vielen positiv geladenen Atomrümpfen wie negativ geladenen Elektronen besteht, kompensieren sich die Ladungen im Mittel, womit das Kupfer insgesamt elektrisch neutral ist. Allerdings sind weder die Atomrümpfe noch die Elektronen in Ruhe, sondern beide führen thermische Bewegungen aus. Während die Gitterrümpfe mit verschiedenen Amplituden um ihre festen Gitterplätze schwingen, bewegen sich die Elektronen in Folge ihrer thermischen Energie ungerichtet mit Geschwindigkeiten durch das Metall, die ihre Driftgeschwindigkeit von ca. 1 mm/s um den Faktor 10^9 übersteigen. Interessant ist, dass sich dabei nur ca. 1 % der Elektronen wirklich so frei bewegen können wie man dies von einem idealen Gas erwarten würde, da die Bewegung der restlichen Elektronen aufgrund der positiv geladenen Gitteratome hoch korreliert ist. Ein weiterer Unterschied zu einem idealen Gas besteht darin, dass das Elektronengas in Folge der großen elektrostatischen Kräfte kaum kompressibel ist [14, S.78; 15, S.181].

Wie aber kommt es zum elektrischen Strom im Leiter? Da Elektronen keine Oberfläche besitzen, kann ein gegenseitiges mechanisches Schieben der Elektronen durch den Leiter ausgeschlossen werden [15, S.183]. Aber auch die gegenseitige elektrostatische Abstoßung der Elektronen innerhalb des Leiters kommt nicht in Frage, da sich innerhalb eines Leiters nicht mehr freie Elektronen als Atomrümpfe befinden können und sich die Ladung der Elektronen und Gitteratome daher immer kompensieren [16, S.755]. Verantwortlich für die Driftbewegung der Elektronen ist vielmehr ein den Leiter durchziehendes elektrisches Feld, das im Falle eines gleichmäßig zylindrisch beschaffenen Leiters mit überall gleichem Leitwert homogen ist und auf jedes Elektron eine Kraft parallel zur Leiterachse ausübt, wodurch

es zu einer Elektronenbewegung in Leiterrichtung kommt. Käme es durch das elektrische Feld im Leiter zu einer konstanten Kraftereinwirkung auf die Elektronen, so müsste dies zu einer permanenten Beschleunigung der Elektronen führen. Durch Wechselwirkung der Elektronen mit den Gitterrümpfen und der damit einhergehenden Energieabgabe, welche zur Erwärmung des Kupfers führt, wird die Driftbewegung der Elektronen aber gehemmt und es stellt sich ein konstanter Elektronenstrom mit einer konstanten durchschnittlichen Driftgeschwindigkeit ein. Bei einem Kupferdraht von 1 mm^2 Querschnittsfläche und einem Strom von 10 A liegt die Driftgeschwindigkeit der Elektronen im Leiter typischerweise bei knapp 1 mm/s und ist damit sehr langsam [15, S.184].

In den meisten Schulbüchern wie auch der gängigen Fachliteratur wird allerdings die Frage übergangen, wie das im Leiter für den elektrischen Strom notwendige elektrische Feld überhaupt zustande kommt. Denkbar wäre einmal, dass das elektrische Feld im Leiter Folge eines Ladungsüberschusses bzw. Ladungsmangels an den Batteriepolen ist. Solche extern erzeugten Felder alleine mögen als Ursache des Elektronenstroms zunächst plausibel erscheinen, denkt man aber an kompliziert gewickelte Drähte, die nicht dem durch die externen Ladungen erzeugten dipolähnlichen Feldlinien folgen, wird schnell klar, dass die wahre Ursache im Leiter selbst zu suchen sein muss [16, S.757ff]. Die Tatsache, dass das Drahtstück selber für die Feldrichtung verantwortlich sein muss, ist auch daran erkennbar, dass der Strom und damit das elektrische Feld immer der Geometrie des Drahtverlaufs folgt, unabhängig davon, wie dessen Krümmung verändert wird. Wenn elektrische Felder die Folge von Ladungen sind, es im Leiter selbst aber nicht zu einem Elektronenüberschuss kommen kann und die Batteriepole alleine nicht für das elektrische Feld im Leiter verantwortlich sein können, bleibt die Frage, welche Ladungen das Feld innerhalb eines Leiters erzeugen.

Die Antwort sind Oberflächenladungen, also eine Elektronenanreicherung oder ein Elektronenmangel an der Oberfläche eines Leiters. Während im Inneren eines Leiters bei gleichmäßiger Verteilung von Ladungen an der Oberfläche Feldfreiheit herrscht, führt die ungleiche Verteilung von Oberflächenelektronen zu der Herausbildung eines elektrischen Feldes im Leiter. Soll im Inneren des Leiters ein homogenes elektrisches Feld entstehen, kommt nach Walz [17, S.407f] als einzige geeignete Anordnung aus Symmetrieüberlegungen gleichmäßig geladene, ringförmige Abschnitte an der Leiteroberfläche in Betracht. Denken wir uns hierzu ein langes, homogenes und zylindrisches Drahtstück mit einem nicht zu vernachlässigenden Widerstand, das an seinen Enden an die Pole einer Batterie angeschlossen ist. Aufgrund des Elektronenüberschusses an der Oberfläche des Minuspols und des Elektronenmangels an der Oberfläche des Pluspols der Batterie,

kommt es zu einer linear mit dem Abstand x zum Minuspol abnehmenden Dichte von Oberflächenelektronen auf dem Leiterstück (siehe Abb. 4).

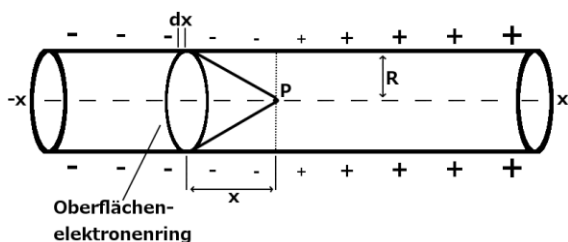


Abb. 4: Oberflächenladungen bei einem zylindrischen Draht mit überall gleichem Widerstand.

Es ist dieser linear abfallende Dichtegradient c an Oberflächenladungen σ zwischen Minus- und Pluspol der Batterie, der für die Erzeugung eines homogenen elektrischen Feldes im Inneren eines solchen Leiters verantwortlich ist [18, S.24f] und wie folgt beschrieben werden kann:

$$\sigma = c \cdot x \quad \{1\}$$

Für das durch die Oberflächenelektronen erzeugte elektrische Feld in horizontaler Richtung gilt dabei nach [19, S.177] (Herleitung siehe z.B. [6]):

$$E_x(x) = \frac{c \cdot R}{2\epsilon_0} \int_{-x}^{+x} \frac{x^2}{(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} dx \quad \{2\}$$

Wie man sieht, ist die Feldstärke u.a. abhängig davon, wie stark sich die Dichte der Oberflächenladungen in Leitungsrichtung verändert, d.h. wie groß also der Dichtegradient c ist. Nach [15, S.189f] ist für die Erzeugung eines verhältnismäßig großen Stroms von 10 A in einem Kupferdraht von 1,5 mm² Querschnittsfläche aufgrund der großen Konstante

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad \{3\}$$

im Coulombgesetz lediglich eine Änderung von wenigen hundert Oberflächenelektronen pro millimeterbreitem Oberflächenelektronenring nötig. Dies ist umso erstaunlicher, als dass auf ein Oberflächenelektron 10¹⁶ Leitungselektronen im Leiterinneren kommen, die Oberflächenelektronen also nur einen verschwindend geringen Anteil an den Elektronen in einem Draht haben [19, S.96].

An Krümmungen von Leitern ist die Verteilung der Oberflächenelektronen deutlich komplizierter und ist nicht mehr durch reine Symmetrieüberlegungen nachzuvollziehen. Nichtsdestotrotz gilt auch hier, dass die Oberflächenelektronen sich so anordnen, dass das durch sie erzeugte elektrische Feld immer in Drahtrichtung zeigt. Qualitativ ist das so vorstellbar, dass die Elektronen ähnlich wie Sandkörner in einer Biegung so lange an der Drahtoberfläche hängenbleiben, bis die durch sie bewirkte Abstoßung so groß ist, dass durch das nun in Richtung des Drahtes zeigende elektrische Feld keine weiteren Elektronen mehr steckenbleiben (siehe Abb. 5). Eine Anleitung zur einfachen Konstruktion von Oberflächenladungen findet sich in [20, S.12] sowie in [16, S.759ff].

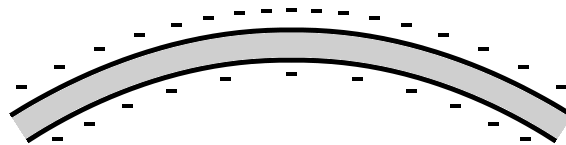


Abb. 5: Qualitative Darstellung der Verteilung von Oberflächenelektronen im Falle eines gekrümmten Leiters.

Wichtiger als die Verteilung der Oberflächenelektronen in Drahtkrümmungen für den schulischen Kontext ist ihre Verteilung vor und nach Widerständen. Da die Leitfähigkeit in einem Widerstand gegenüber einem Kupferdraht um viele Größenordnungen verringert sein kann und die Stromstärke in Draht und Widerstand dennoch gleich groß ist, muss das die Elektronen im Widerstand antreibende elektrische Feld deutlich größer sein als im Kupferdraht. Wie bereits gezeigt, sind Oberflächenladungen die Ursache für die elektrischen Felder in Leitern. Ist das elektrische Feld im Widerstand besonders groß, so ist dies eine Folge von Oberflächen- bzw. Grenzflächenladungen, die sich nach dem Einschalten so lange vor bzw. nach dem Widerstand ansammeln, bis das durch sie erzeugte elektrische Feld im Widerstand groß genug ist, um innerhalb des Widerstands zur gleichen Stromstärke zu führen wie davor oder danach [21, S.25; 16, S.765ff]. Ein starkes elektrisches Feld im Inneren des Widerstandes ist über den Zusammenhang

$$U = \int E ds \quad \{4\}$$

bekanntermaßen gleichbedeutend mit einer großen, am Widerstand anliegenden Spannung.

Wichtig ist, dass sich die Verteilung der Oberflächenelektronen in Stromkreisen mit Lichtgeschwindigkeit einstellt, da die Leitungselektronen nahezu inkompressibel sind und zusätzliche Ladungen daher zu einer Verdichtung oder Verdünnung an der Leiteroberfläche führen [21, S.29]. Die weitgehend unbekanntere Tatsache, dass stromführende Leiter durch Oberflächenladungen auch elektrostatisch geladen sind, lässt sich bei hohen Spannungen ab ca. 10 kV und der Verwendung von großen Widerständen über die daraus resultierende elektrostatische Abstoßung geladener Körper auch experimentell nachweisen [16, S.777f; 21, S.29].

4. Didaktische Elementarisierung

Modelle sind von Menschen zu einem bestimmten Zweck geschaffene Konstrukte, die prinzipiell eine Vereinfachung der Realität darstellen und diese nie in vollem Umfang abbilden können [22]. Insbesondere hängt die genaue Ausgestaltung eines Modells wesentlich davon ab, welches Ziel mit ihm verfolgt wird. Ist ein Modell primär dazu gedacht, das Erlernen bestimmter physikalischer Zusammenhänge in der Schule zu erleichtern, ist es nach [23, S.19] normal, dass „der fachliche Aspekt und der didaktische Aspekt [...] in Konkurrenz zueinander“ treten, da das Bestreben nach didaktischer Vereinfachung mit einer Reduktion von fachlicher Komplexität des

Modells einhergeht. Soll das Elektronengasmodell in der Sekundarstufe I zur Einführung in die elementare Elektrizitätslehre genutzt werden, müssen aufgrund der oben angesprochenen Komplexität der Thematik also einige didaktische Elementarisierungen vorgenommen werden. Ziel ist es, auf der einen Seite die Erklärungsmächtigkeit der Oberflächen-elektronen für den Spannungs- und Potenzialbegriff zu nutzen, um den Schülern einen besseren Zugang zu Spannung, Potenzial und Stromstärke zu ermöglichen, auf der anderen Seite aber die dazu nötigen fachlichen Erklärungen möglichst einfach zu halten. Das hier vorgeschlagene didaktische Modell verzichtet daher auf eine Unterscheidung zwischen Leitungs- und Oberflächen-elektronen und führt stattdessen ein Elektronengas ein, das sich ähnlich den Oberflächenladungen verhält. Insbesondere ist das Elektronengas komprimierbar und die dadurch an Widerständen auftretenden Druckunterschiede wirken wie bei Oberflächenladungen als treibende Kraft des Elektronenstroms.

Ähnlich zu der zu Beginn angesprochenen Luftdruckanalogie von Clement & Steinberg [7] wird im Elektronengasmodell also postuliert, dass sich in Metallen Elektronen in Teilchenform befinden und sich dort frei bewegen können. Im Gegensatz zu den „Luftteilchen“ sind die Elektronen aber negativ geladen und werden daher durch Abstoßung so weit wie möglich auseinandergetrieben, weshalb sie den ihnen zur Verfügung stehenden Platz im gesamten Leiter gleichmäßig ausfüllen. Mit Hilfe einer Batterie und einem Widerstand, der die Beweglichkeit der Elektronen stark einschränkt, lässt sich aber eine Ungleichverteilung der Elektronen erreichen, da es in Folge der verringerten Beweglichkeit am Widerstand zu einem „Elektronen-Rückstau“ kommen kann. Ursächlich für die Ungleichverteilung der Elektronen im Leiter sind aber die Pole der Batterie. Da am Minuspol ein Elektronenüberschuss herrscht, kommt es in dem mit ihm verbundenen Leiterabschnitt zu einer erhöhten Elektronendichte und damit zu einem erhöhten „Elektronendruck“. Der positiv geladene Pluspol hingegen „saugt“ ähnlich einem Staubsauger die negativen Elektronen aus dem mit ihm verbundenen Leiterabschnitt, weshalb es hier zu einer verringerten Elektronendichte und damit einem geringeren Elektronendruck kommt. Durch Gleichsetzen des Elektronengasdrucks mit dem elektrischen Potenzial kann so die Spannung als Elektronengasdruckunterschied interpretiert werden, ohne auf den Feldbegriff zurückgreifen zu müssen, welcher in der Mittelstufe zu einer Überforderung der Schüler führen würde. Je größer also der Unterschied der Elektronendichten, desto größer der Druckunterschied und desto größer die am Widerstand anliegende Spannung.

Wie in der Abbildung 6 mit Hilfe der Strompfeile illustriert, steigt dabei die elektrische Stromstärke bei konstantem Widerstand entsprechend der Druck- bzw. Potenzialunterschiede proportional an.

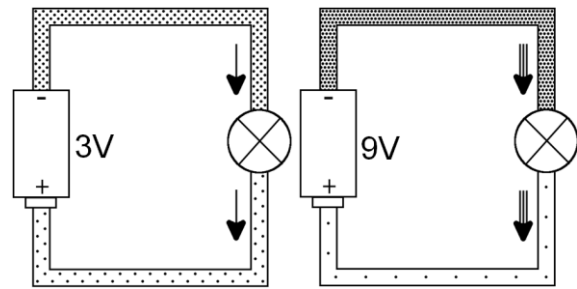


Abb. 6: Visualisierung unterschiedlich großer Potentiale mit Hilfe verschiedener Punktedichten.

Auch Parallel- und Reihenschaltungen lassen sich mit Hilfe des Elektronengasmodells gut visualisieren. Wie in Abbildung 7 gezeigt, stechen im Falle der Parallelschaltung Leitungsabschnitte gleichen Potentials dank der dort gleichen Punktedichten direkt ins Auge. Da damit an allen drei Lämpchen der gleiche Druck- bzw. Potenzialunterschied anliegt, ist für die Schüler leicht ersichtlich, dass bei gleichem Widerstand durch alle Lämpchen der gleiche Strom fließen muss. Um der Stromverbrauchsvorstellung entgegenzuwirken, wird im vorliegenden Beispiel durch entsprechende Strompfeile visuell hervorgehoben, dass durch jeden zusätzlichen Zweig ein zusätzlicher Teilstrom entsteht [15, S.125].

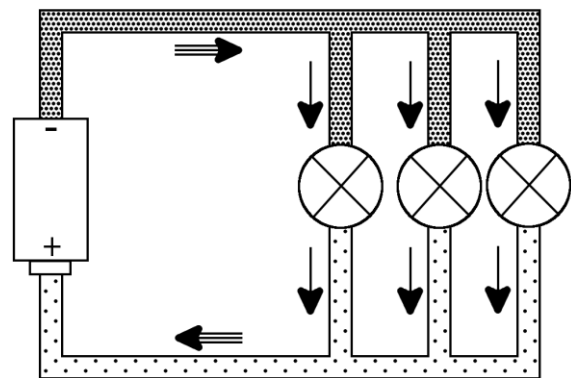


Abb. 7: Darstellung einer Parallelschaltung im Elektronengasmodell mit Strompfeilen.

Auch wenn die hier vorgestellte Darstellungsform des Elektronengasmodells über die Dichte- bzw. Druckvorstellung eine sehr plausible und intuitive Erklärung für die Ursache des elektrischen Stroms liefert, sind alternative Visualisierungen des dahinterliegenden Konzepts denkbar. Beispielsweise könnte der Druck bzw. das Potenzial statt über Punktedichten auch über Farb- bzw. Graustufen dargestellt werden, während der elektrische Strom über Punkte mit gleichmäßiger Dichte und konstanter Driftgeschwindigkeit visualisiert werden könnte. Eine solche Darstellung hätte den Vorzug, dass das Spannungs- und Stromkonzept auch visuell klar getrennt wären [10]. Eine andere Möglichkeit bestünde darin, Ladungsüberschuss bzw. Ladungsmangel wie in Abb. 4 durch unterschiedlich viele „+“- oder „-“-Zeichen seitlich der Leiter zu darstellen [16]. Beide Varianten hätten zwar den Vorteil, dass auf unterschiedliche Strömungsgeschwin-

digkeiten der Elektronen in Folge unterschiedlicher Dichten verzichtet werden könnte, die Modelldarstellung aber einen Teil ihre Erklärungsmächtigkeit verlieren würde. Während es nämlich leicht einzusehen ist, dass dicht beieinander liegende Elektronen unter hohem Druck stehen und in Bereiche mit niedrigerer Elektronendichte und damit geringerem Druck strömen, bleibt in den anderen Modelldarstellungen sowohl die Frage offen, warum es überhaupt zu einer Elektronenströmung kommt, als auch wie man sich diese vorstellen kann.

5. Didaktische Überlegungen zur Umsetzung

Für die Nutzung des Elektronengasmodells in der Schule müssen einige grundlegende Entscheidungen hinsichtlich der genaueren Ausgestaltung des Modells getroffen werden. Zunächst stellt sich die Frage, ob man von Elektrizität, Ladungen, Ladungsteilchen oder Elektronen in den Leitern sprechen sollte. Da es in metallischen Leitern die Elektronen sind, die sich bewegen und die Schüler dem Elektronenbegriff in Schule oder Medien bereits begegnet sind bzw. es in Zukunft werden, erscheint es gerade in einem Teilchenmodell sinnvoll, direkt von Elektronen zu sprechen. Dies bedeutet aber konsequenterweise auch, dass von Anfang an die physikalische statt der technischen Stromrichtung unterrichtet werden sollte.

Aufgrund der negativen Ladung der Elektronen sind Bereiche mit großer Elektronendichte stark negativ geladen und haben daher ein stark negatives Potenzial. Da im Modell aber argumentiert wird, dass in Bereichen großer Elektronendichte ein großer Elektronendruck herrscht, erscheint es kontraintuitiv hier dann von einem negativen Potenzial zu sprechen. Es bietet sich in der Sekundarstufe I an, dieses Problem sprachlich zu umgehen, indem zunächst statt von negativen und positiven, von großen und kleinen Potenzialen gesprochen wird. Dies hat den Vorteil, dass Bereichen großer Elektronendichte und damit großen Elektronendrucks ein großes Potenzial zugeordnet werden kann und Elektronen somit von großen zu kleinen Potenzialen strömen.

Auch stellt sich die Frage, welche Rolle Atomrümpfen im Elektronengasmodell zukommen sollte. Denkbar ist auf der einen Seite, das Elektronengasmodell als Nur-Elektronen-Modell zu konzipieren und somit die Regeln des elektrischen Stromkreises einzig über die gegenseitige Abstoßung der Elektronen und ihre unterschiedliche Dichte plausibel zu machen. Auf der anderen Seite wäre aber auch eine Realisierung in Form eines Elektronen-Atomrumpf-Modells möglich, wonach ein neutraler Leiter aus gleich vielen ortsfesten Atomrümpfen und freien Elektronen besteht. Während ein Überschuss an Elektronen in diesem Modell zu einem negativ geladenen Leiterabschnitt führt, bedeutet ein Mangel an Elektronen aufgrund der dann in Überzahl vorhandenen Atomrümpfe, dass der Leiterabschnitt positiv geladen ist. Zwar entspricht das Elektronen-

Atomrumpf-Modell eher der fachlichen Vorstellung, zur bloßen Erklärung von Potenzialunterschieden als Antrieb für den elektrischen Strom stellt es aber aufgrund der zusätzlich zu beachtenden ortsfesten, positiven Atomrümpfe eine Verkomplizierung der Zusammenhänge dar. Nichtsdestotrotz erscheint es aus mindestens zwei Gründen im Unterricht sinnvoll zu sein, Atomrümpfe zumindest kurzzeitig anzusprechen, auch wenn Atomrümpfe keine Voraussetzung für das Verständnis von Elektronendrücken bzw. Potenzialen sind. So kann über das Drude-Modell mit Hilfe von Atomrümpfen eine mikroskopische Erklärung für die geringere Leitfähigkeit von Widerständen gegeben werden, indem gezeigt wird, dass die Elektronen auf ihrem Weg durch den Widerstand abhängig von Temperatur, Legierung und geometrischer Form häufig gegen die Atomrümpfe stoßen [15, S.137]. Außerdem kann dadurch der durch das Nur-Elektronen-Modell möglicherweise provozierten Vorstellung entgegengewirkt werden, dass alle Leiterabschnitte grundsätzlich negativ geladen seien.

6. Mögliche Stärken und Schwächen

Bevor auf die verschiedenen Stärken der hier vorgestellten Visualisierung des Elektronengasmodells aus didaktischer Sicht eingegangen wird, sollen zunächst mögliche didaktische Schwächen der Darstellung kritisch beleuchtet werden. Wie in Abbildung 8 zu sehen, nimmt im Modell die Dichte der Elektronen mit jedem Lämpchen vom Minuspol der Batterie aus gesehen weiter ab. Auch wenn diese Illustration eine angemessene Visualisierung des abnehmenden Elektronendrucks darstellt, ist doch zu befürchten, dass dies gerade in einer wie hier vorliegenden statischen Darstellungsform bei Schülern zu einer Stärkung der Stromverbrauchsvorstellung führt. Konkret könnten Schüler sich in der z.B. von Maichle [24, S.386] dokumentierten Ansicht bestärkt fühlen, dass die Lämpchen sich in einer Reihenschaltung den Strom teilen bzw. dass jedes Lämpchen ein bisschen Strom verbraucht.

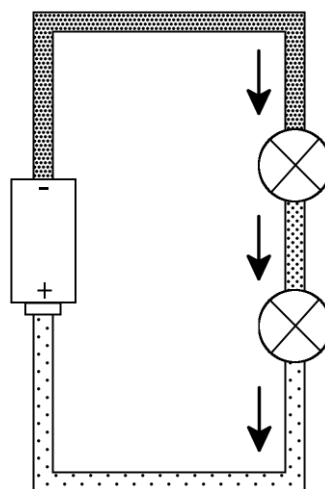


Abb. 8: Abnehmende Elektronendichte in Reihenschaltungen provoziert ggf. die Stromverbrauchsvorstellung

Mit Hilfe geeigneter dynamischer Animationen lässt sich dem Problem aber schon bei der Einführung begegnen, indem gezeigt wird, dass die Strömungsgeschwindigkeit in dem Maße zunimmt, wie die Dichte abnimmt, und die Stromstärke daher im gesamten Stromkreis konstant sein muss. Erklärt werden kann dies im Modell damit, dass der positiv geladene Pluspol der Batterie die negativen Elektronen im Leiter anzieht wie ein Staubsauger. Wie in der obigen Darstellung gezeigt, kann die so bei den Schülern gewonnene Erkenntnis dann in statischen Darstellungen über entsprechende Strompfeile vor und nach Widerständen immer wieder ins Gedächtnis gerufen werden.

Betrachtet man die Strömungsgeschwindigkeit der Elektronen vor und nach einem Widerstand, so muss diese wie bereits angemerkt nach dem Widerstand aufgrund der dort verringerten Dichte zunehmen, damit die Stromstärkekonstanz gewahrt bleibt. Um dieses Phänomen im Modell plausibel zu machen, ist es wichtig, den Systemaspekt von Stromkreisen zu betonen und lokalem Denken entgegenzuwirken. Wird der Stromkreis nämlich als System aufgefasst, ist leicht nachvollziehbar, dass der Pluspol der Batterie ähnlich einem Staubsauger eine anziehende Wirkung auf die Elektronen nach dem Widerstand ausübt und ihre Strömungsgeschwindigkeit daher zunimmt. Ignoriert man hingegen den Einfluss des Pluspols auf den Stromkreis und fokussiert sich lediglich auf den Widerstand, verharrt also in lokalen Denkmustern, so liegt es nahe, die Ursache für die Beschleunigung der Elektronen im Widerstand zu suchen, was zweifelsohne kontraintuitiv erscheint.

Der große Vorteil des Elektronengasmodells liegt darin, dass es über die Verknüpfung der Druck- und Potenzialvorstellung und einer entsprechenden visuellen Darstellung über Elektronendichten eine intuitive und anschauliche Erklärung für die sonst abstrakten Begriffe Potenzial, Spannung und Stromstärke liefert. Insbesondere wird über die Vorstellung der Spannung als Unterschied des Elektronendruckes für Schüler plausibel, dass die Funktion einer Spannungsquelle darin besteht, eine Elektronenungleichverteilung und damit Druckunterschiede im Stromkreis hervorzurufen und beizubehalten und dass diese Druckunterschiede den Antrieb der Elektronenströmung darstellen. Die im Modell genutzten Vorstellungen sind in den Alltagserfahrungen der Kinder verankert und bauen auf einem intuitiven Druckverständnis im Sinne von „ein komprimiertes Gas drückt stark gegen die Wände“ auf, wie es Schüler beispielsweise beim Umgang mit aufgepumpten Fahrradreifen oder Luftpumpen entwickeln [25]. Wenn auch kein spezielles physikalisches Vorwissen für das Elektronengasmodell benötigt wird, sind Vorkenntnisse im Bereich Wärmelehre (Modell des idealen Gases) und Elektrostatik (Kräfte auf geladene Körper) sicherlich hilfreich.

Durch die große Ähnlichkeit von Schaltplan und Modelldarstellung ist es ferner denkbar, dass Schüler dem Elektronengasmodell einen höheren Wirklichkeitsgrad zuschreiben als anderen Modellen. Somit würde das von Kircher [26, S.58] im Zusammenhang mit dem Wassermodell identifizierte „ontologische Problem“ von Schülern gemildert, wonach diese „keinen Zusammenhang und damit keinen Sinn in den Analogmodellen und insbesondere in den Analogversuchen“ sehen. Es besteht auch die Hoffnung, dass Schülern mit weniger stark ausgeprägter Fähigkeit zum formalen Denken aufgrund des geringen Unterschieds zwischen „Oberflächen- und Tiefenstruktur“ der Analogieschluss zwischen Modelldarstellung und realen Schaltungen leichter gelingt [27].

Zu den weiteren Stärken des Modells zählt, dass auch Übergangsprozesse z.B. nach dem Ein- oder Ausschalten bis zur Einstellung eines stationären Gleichgewichtszustands diskutiert werden können, was zu einem besseren qualitativen Verständnis der Vorgänge in Stromkreisen beitragen kann [7]. Auch kann mit Hilfe des Modells der Systemcharakter von Stromkreisen nachvollzogen werden, z.B. wenn sich aufgrund einer Unterbrechung in einer Reihenschaltung die Drücke überall angleichen und der Stromfluss somit zum Erliegen kommt. Des Weiteren bietet das Modell eine Reihe Anknüpfungspunkte, um zum Beispiel auf Oberflächenladungen einzugehen, und eignet sich hervorragend, um den Lade- und Entladevorgang am Kondensator zu besprechen. Damit stellt das Elektronengasmodell einen vielversprechenden Ansatz dar, mit dessen Hilfe Schülern nicht nur eine plausible Erklärung für die elektrische Spannung und den elektrischen Strom geliefert werden kann, sondern auch eine bildhaft-anschauungsorientierte Vorstellungen der dahinterstehenden Konzepte.

7. Ausblick

Neben den hier präsentierten Darstellungsformen des Elektronengasmodells sind noch weitere Darstellungen denkbar, die ihre eigenen Stärken und Schwächen mitbringen. Statt den elektrischen Druck bzw. das elektrische Potenzial über die Elektronendichte zu repräsentieren, könnte dies alternativ auch über unterschiedliche Farben bzw. Graustufen erreicht werden (siehe Abb. 1). Auch wäre die von Chabay & Sherwood [16] verwendete Notation mit einer je nach Potenzial unterschiedlich großen Anzahl an „+“-Zeichen oder „-“-Zeichen links und rechts des Leiters (siehe Abb. 4) oder eine Kombination dieser Ansätze denkbar. Vor der Entwicklung und Evaluation eines entsprechenden Unterrichtskonzepts und der Erarbeitung entsprechender Unterrichtsmaterialien soll daher zunächst über Teaching Experiments untersucht werden, welche Darstellungsform von Schülern am ehesten akzeptiert wird und möglichst wenig Fehlvorstellungen provoziert. Ziel ist dann zu untersuchen, inwiefern ein Unter-

richtskonzept auf Grundlage des Elektronengasmodells zu einem besseren Verständnis der elementaren Elektrizitätslehre bei den Schülern führt.

8. Literatur

- [1] Rhöneck, C. v. (1986). Vorstellungen vom elektrischen Stromkreis und zu den Begriffen Strom, Spannung und Widerstand, *Naturwissenschaften im Unterricht-Physik*, 34 (1986) 13, S.108-112. In: Müller, R; Wodzinski, R; Hopf, M. (Hrsg.): *Schülervorstellungen in der Physik*, Aulis Verlag, Köln, 2004, S.167-171
- [2] Jochmann, E.; Hermes, O.; Spies, P. (1914). *Grundriss der Experimentalphysik und Elemente der Chemie sowie der Astronomie und mathematischen Geographie*. Berlin: Winckelmann & Söhne
- [3] Herrmann, F.; Schmäzle, P. (1984). Das elektrische Potential im Unterricht der Sekundarstufe I, *MNU*, 37 (1984) 8, S.476-482
- [4] Steinberg, M. S.; Wainwright, C. L. (1993). Using Models to Teach Electricity – The CASTLE Project. In *The Physics Teacher*, 31 (1993) 6, S.353-357
- [5] Schumacher, M.; Wiesner, H. (1997). Erprobung des Potentialansatzes in der Elektrizitätslehre in Form einer Akzeptanzbefragungssequenz. In: *Vorträge Physikertagung, Deutsche Physikalische Gesellschaft, Fachausschuss Didaktik der Physik, Tagung 1996*, S.573-578
- [6] Gleixner, C. (1998). *Einleuchtende Elektrizitätslehre mit Potenzial*, Dissertation LMU München
- [7] Clement, J. J.; Steinberg, M. S. (2002). Step-Wise Evolution of Mental Models of Electric Circuits: A „Learning-Aloud“ Case Study. In: *The Journal of The Learning Sciences*, 11 (2002) 4, S.389-452
- [8] Koller, D. (2008). *Entwurf und Erprobung eines Unterrichtskonzepts zur Einführung in die Elektrizitätslehre*. Zulassungsarbeit am Lehrstuhl Didaktik der Physik der LMU München. Unterrichtsmaterialien verfügbar unter http://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/archiv/inhalt_materialien/einf_elektrizitaet/ [zuletzt aufgerufen: 20.01.2014]
- [9] Späth, S. (2009). *Überarbeitung und empirische Untersuchung eines Unterrichtskonzepts zur Einführung in die Elektrizitätslehre*
- [10] Jung, W. (1981). *Beiträge zur Methodik und Didaktik der Physik – Elektromagnetismus für die Sekundarstufe I*. Frankfurt am Main: Diederweg
- [11] Schwedes, H.; Dudeck, W.-G.; Seibel, C. (1995). *Elektrizitätslehre mit Wassermodellen, Praxis der Naturwissenschaften – Physik*, 44 (1995) 2, S.28-36
- [12] Rhöneck, C.13 v.; Völker, B. (1982). *Einfache Elektrizitätslehre zwischen physikalischem Anspruch und Lernschwierigkeiten*. In: *Naturwissenschaften im Unterricht P/C*, 30 (1982) 11, S.406-412
- [13] Wilhelm, T.; Tobias, V.; Waltner, C.; Hopf, M.; Wiesner, H. (2011). *Design-Based Research am Beispiel der zweidimensional-dynamischen Mechanik*. In: Bernholt, S. (Hrsg.): *Konzepte fachdidaktischer Strukturierung für den Unterricht, Jahrestagung der GDCP in Oldenburg 2011, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 32*, Lit-Verlag, Münster, 2012, S.31-47
- [14] Kircher, E.; Härtel, H.; Häussler, P. (1975). *IPN Curriculum Physik für das 9. und 10. Schuljahr*. Stuttgart: Klett
- [15] Muckenfuß, H.; Walz, A. (1992). *Neue Wege im Elektriunterricht*. Köln: Aulis Verlag Deubner
- [16] Chabay, R. W.; Sherwood, B. A. (2011). *Matter & Interactions*. Hoboken N.Y.: Wiley
- [17] Walz, A. (1985). *Fields that accompany currents*. In: Duit, R.; Jung, W.; Rhöneck, C.v.: *Aspects of Understanding Electricity: Proceedings of an International Workshop*, Kiel: IPN/Schmidt & Klaunig, S.403-412
- [18] Assis, A.; Hernandes, J. (2007). *The Electric Force of a Current*. Montreal: Apeiron. Verfügbar unter: <http://www.ifi.unicamp.br/~assis/the-electric-force-of-a-current.pdf> [zuletzt aufgerufen: 30.04.2014]
- [19] Muckenfuß, H.; Walz, A. (1997). *Neue Wege im Elektriunterricht*. (zweite überarbeitete Auflage). Köln: Aulis Verlag Deubner
- [20] Müller, R. (2012). *Was ist Spannung?* In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule*, 61 (2012) 5, S.8-16
- [21] Härtel, H. (2012). *Spannung und Oberflächenladungen*. In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule*, 61 (2012) 5, S.25-31
- [22] Mikelskis-Seifert, S.; Kasper, L. (2011). *Modellieren in der Physik – im Alltag und im Unterricht*. In: *Naturwissenschaften im Unterricht Physik – Themenheft „Modelle“*, 22 (2011) 122, S.4-12
- [23] Kircher, E.; Duit, R. (1975). *Modelle des elektrischen Stromkreises in der Sekundarstufe I - das Wassermodell und das Elektronenmodell*. In: *Der Physikunterricht*, 9 (1975) 4, S.17-42
- [24] Maichle, U. (1982). *Schülervorstellungen zu Stromstärke und Spannung*. In: *Naturwissenschaften im Unterricht P/C*, 30 (1982) 11, S.383-387
- [25] Wodzinski, R. (1999). *Neuere Konzepte zur Behandlung des Drucks in der Sekundarstufe I*. Verfügbar unter: <http://www.solstice.de/cms/upload/Vortrag/wodzinski/vortra99.pdf> [zuletzt aufgerufen: 30.04.2014]

- [26] Kircher, E. (1984). Analogmodelle für den elektrischen Stromkreis. In: Der Physikunterricht, 18 (1984) 2, S.46-61
- [27] Wilkinson, D. J. (1972). A Study of the development of Flow with Reference to the Introduc-

tion of Electric Current in the early years of the Secondary School. M.A. Research Exercise. Leeds