

Jan-Philipp Burde<sup>1</sup>  
 Thomas Wilhelm<sup>1</sup>  
 Hartmut Wiesner<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Goethe-Universität Frankfurt am Main  
<sup>2</sup>Ludwig-Maximilians-Universität München

## Das Elektronengasmodell und Möglichkeiten seiner Visualisierung

Die Entwicklung eines unabhängigen Spannungsbegriffs stellt Schülerinnen und Schüler in der Sekundarstufe I vor enorme Schwierigkeiten. Nach bisherigem Forschungsstand kann die Einführung der Spannung als Potenzialdifferenz als sehr erfolgversprechend angesehen werden (u.a. Schumacher & Wiesner, 1997; Gleixner, 1998; Clement & Steinberg, 2002). Da die Spannung eine Differenzgröße ist, die sich aus der Differenz zweier Potenzialwerte ergibt, erscheint der Aufbau einer bildhaft-anschauungsorientierten Vorstellung des Potenzials als Grundlage der elektrischen Spannung didaktisch sinnvoll.

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. Im Folgenden wird das Elektronengasmodell inkl. vier möglicher Visualisierungen sowie erste Ergebnisse aus „Teaching Experiments“ vorgestellt. Dieser Artikel beschränkt sich dabei zunächst auf die Frage, welche Darstellungsformen von Schülern akzeptiert werden.

### Motivation

Trotz mehrjähriger unterrichtlicher Bemühungen besitzen viele Schülerinnen und Schüler am Ende der Mittelstufe kein angemessenes Spannungskonzept. Stattdessen wird die elektrische Spannung häufig als Eigenschaft bzw. als Bestandteil des in der Vorstellung der Schüler dominierenden elektrischen Stromes verstanden (Rhöneck, 1986). Bisherige physikdidaktische Forschung (u.a. Schumacher & Wiesner, 1997; Gleixner, 1998; Clement & Steinberg, 2002) deutet darauf hin, dass eine der Ursachen für diese Lernschwierigkeit darin zu suchen sein könnte, dass seit Anfang des 20. Jahrhunderts nicht mehr das Potenzial Ausgangspunkt der E-Lehre ist, sondern Lehrbücher größtenteils ohne didaktische Begründung das Strom- und Spannungskonzept zum zentralen Lerngegenstand erhoben haben. Problematisch daran ist, dass sich die Spannung als Potenzialdifferenz immer auf zwei Punkte in einem Stromkreis bezieht und damit komplexer ist als das Potenzial, das einem Punkt bzw. Leiterabschnitt zugeordnet werden kann. Das Paradoxe ist also, dass von Schülern im Anfangsunterricht erwartet wird, mit der Spannung als Differenzgröße zu operieren, ohne die dahinterstehende Größe selbst, nämlich das Potenzial, zu kennen, geschweige denn zu verstehen (Herrmann & Schmälzle, 1984, S.477).

### Das Elektronengasmodell

Bei verschiedenen Unterrichtsansätzen wie dem geschlossenen Wasserkreislauf mit Doppelwassersäule oder dem Stäbchenmodell, die alle auf einem Potenzialansatz basieren, hat sich die visuelle Darstellung des Potenzials als entscheidender Faktor für den Lernerfolg erwiesen (Schwedes, Dudeck & Seibel, 1995, S.35; Gleixner, 1998, S.70). Aufbauend auf der von Clement & Steinberg (2002) erfolgreich erprobten Luftdruckanalogie, versucht das hier vorgeschlagene Elektronengasmodell daher im Sinne von Design-Based-Research (Wilhelm et al., 2011) auf diesen Erkenntnissen aufzubauen und die Luftdruckvorstellung mit einer bildhaft-anschauungsorientierten Vorstellung des Potenzials zu verknüpfen.

Die Grundidee des Elektronengasmodells ist, 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

Raum im gesamten Leiter gleichmäßig ausfüllen. Im Leiter kommt es aufgrund der gegenseitigen Coulomb-Abstoßung der Elektronen zu einem von der Elektronendichte abhängigen Elektronengasdruck (für eine fachliche Auseinandersetzung sei auf Burde et al. (2014) verwiesen). Ursächlich für die Ungleichverteilung der Elektronen im Leiter sind dabei 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.

Aus didaktischer Sicht besteht die Hoffnung nun einerseits darin, dass die Vorstellung vom Elektronengasdruck mit Alltagserfahrungen zum Luftdruck (z.B. Luftpumpen, Spritzen und Fahrradreifen) verknüpft werden kann und andererseits darin, über die Vorstellung der Spannung als Unterschied des Elektronendrucks eine für die Schüler plausible Erklärung zu liefern, dass im Normalfall die Elektronenströmung eine Folge von Druckunterschieden ist.

### Verschiedene Visualisierungsformen des Elektronengasmodells

Aufgrund der Bedeutung der Visualisierung des Potenzials auf den Lernerfolg wurden in einem ersten Schritt vier verschiedene Darstellungsformen des Elektronengasdrucks entwickelt. Im Rahmen von „Teaching Experiments“ wurde anschließend u.a. untersucht, inwiefern diese Darstellungen von Schülern akzeptiert werden.

Eine naheliegende Visualisierung stellt die Punktedichtedarstellung dar, bei der die Elektronen durch Punkte repräsentiert werden. Dabei gilt: Je höher die Dichte der Punkte bzw. Elektronen und je größer damit die gegenseitige Abstoßung ist, desto größer ist der Druck und damit das Potenzial. Eine etwas simplifizierte Visualisierung stellt die Farbdarstellung dar, bei der auf eine Darstellung von Elektronen verzichtet und stattdessen direkt über die Farbe der Druck bzw. das Potenzial ersichtlich gemacht wird. Dabei gilt, dass der Druck bzw. das Potenzial umso höher ist, je intensiver das Rot ist (Andersherum: der Druck ist umso kleiner, je intensiver das Grün ist). Eine weitere Variante dieser Visualisierung ist die Graustufendarstellung, für die gilt: Je dunkler das Grau, desto größer der Druck bzw. das Potenzial.

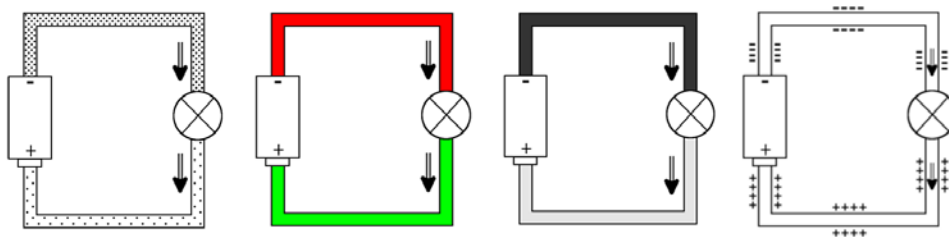


Abb. 1 (v.l.n.r.): Punktedichtedarstellung, Farbdarstellung, Graustufendarstellung, Plus-Minus-Zeichen-Darstellung

Etwas abstrakter hingegen ist die Visualisierung über Plus- bzw. Minuszeichen seitlich eines Leiters, wie sie z.B. im amerikanischen Lehrbuch Chabay & Sherwood (2011, S.760ff) verwendet wird. Die Idee ist hier, einen Elektronenüberschuss durch Minuszeichen und einen Elektronenmangel durch Pluszeichen neben den Leitern zu symbolisieren. Dabei ist die Anzahl der Plus- und Minuszeichen proportional zum Elektronenmangel bzw. Elektronenüberschuss und damit zum Druck bzw. Potenzial. Viele Minuszeichen stehen also für einen großen Elektronenüberschuss verglichen mit der Anzahl der positiv geladenen

Atomrümpfe, damit für einen Elektronenüberdruck und damit für einen hohen Potenzialwert. Viele Pluszeichen stehen hingegen für einen großen Elektronenmangel und damit netto positiv geladenen Leiter, damit für einen Elektronenunterdruck und damit für einen niedrigen Potenzialwert.

### Erste Ergebnisse der Akzeptanzbefragung

In „Teaching Experiments“ mit neun Schülern einer sechsten Gymnasialschulklasse vor deren ersten Elektrizitätslehreunterricht zeigte sich, dass das Elektronengasmodell und die mit ihm verbundene Atom- und Druckvorstellung von den Schülern weitgehend akzeptiert und verstanden wurde. Zur Evaluation der vier vorgestellten Visualisierungen wurden die Schüler u.a. gefragt, die verschiedenen Darstellungen nach ihrer Verständlichkeit zu ordnen und selber Potenziale in Stromkreisen einzuzichnen. Dabei zeigte sich relativ deutlich, dass die Punktedichtedarstellung gefolgt von der Farbdarstellung von den Schülern für am verständlichsten empfunden wurde, während die Graustufendarstellung und insbesondere die Plus-Minus-Darstellung bei den Schülern als Visualisierung auf keine Akzeptanz stoß.

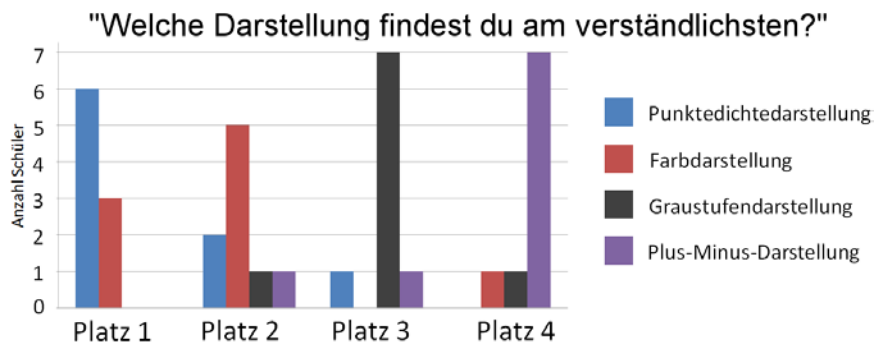


Abb. 2: Rangfolge der Verständlichkeit der verschiedenen Visualisierungen nach Einschätzung der Schülerinnen und Schüler

Interessant ist ferner, dass die Schüler beim Lösen von Aufgaben mehrheitlich nicht auf die Punktedichtedarstellung zurückgriffen (nur 3 Schüler), sondern auf die Farbdarstellung (6 Schüler). Es ist zu vermuten, dass hier praktische Erwägungen eine entscheidende Rolle gespielt haben, da sich das farbliche Einfärben eines Stromkreises mit Farbstiften als deutlich unkomplizierter erwiesen hat als das Einzeichnen unzähliger Punkte per Hand.

### Literatur

- Burde, J.-P.; Wilhelm, T.; Wiesner, H. (2014). Das Elektronengasmodell in der Sekundarstufe I. In: PhyDid-B - Didaktik der Physik – Frühjahrstagung Frankfurt 2014, [www.phydid.de](http://www.phydid.de)
- Chabay, R. W.; Sherwood, B. A. (2011). Matter & Interactions. Hoboken N.Y.: Wiley
- 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
- Gleixner, C. (1998). Einleuchtende Elektrizitätslehre mit Potenzial, Dissertation LMU München
- Herrmann, F.; Schmälzle, P. (1984). Das elektrische Potential im Unterricht der Sekundarstufe I. In: MNU 37 (1984) 8, S.476-482
- 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.
- Schumacher, M.; Wiesner, H. (1997). Erprobung des Potentialansatzes in der Elektrizitätslehre in Form einer Akzeptanzbefragungssequenz. In: Vorträge Physikertagung, DPG Tagung 1996, S.573-578
- Schwedes, H.; Dudeck, W.-G.; Seibel, C. (1995). Elektrizitätslehre mit Wassermodellen, Praxis der Naturwissenschaften – Physik, 44 (1995) 2, S.28-36
- Wilhelm, T.; Tobias, V.; Waltner, C.; Hopf, M.; Wiesner, H. (2011). Design-Based Research am Beispiel der zweidimensional-dynamischen Mechanik. In: Bernholt, S. (Hrsg.): Jahrestagung der GDGP in Oldenburg 2011, Lit-Verlag, Münster, 2012, S.31-47