

Spannung und Oberflächenladungen

Was Wilhelm Weber schon vor mehr als 150 Jahren wusste

H. Härtel

1 Spannung – einer der schwierigsten Begriffe

Während man den elektrischen Strom qualitativ als driftende Elektronen kennzeichnet, fehlt bei der Einführung des Begriffs „Spannung“ bzw. „Potenzialdifferenz“ in den Lehrbüchern in aller Regel eine entsprechende qualitative Deutung. Die Spannung wird als Arbeitsfähigkeit einer elektrischen Energiequelle beschrieben und quantitativ definiert als Energie pro Ladung. An diesem mathematisch eleganten Verfahren ist aus physikalischer Sicht nichts auszusetzen, sie ist jedoch nicht geeignet, daraus eine kausale Begründung für Vorgänge im elektrischen Stromkreis abzuleiten.

Zum Beispiel bleibt die einfache Frage unbeantwortet, woran sich die Potenzialdifferenz zwischen den Anschlüssen A und B eines stromdurchflossenen Widerstands mikrophysikalisch festmachen lässt (Abb. 1). Auch die Frage nach dem Ursprung des starken Feldes innerhalb eines Widerstandes im Vergleich zum sehr schwachen Feld in den zuführenden Leiterstücken kann aufgrund der Definition „Energie pro Ladung“ nicht beantwortet werden (Abb. 2).

Auch folgendes Problem liegt nahe: Eine Batterie stellt aufgrund ihrer Spannung zunächst nur getrennte Ladungen an ihren Anschlüssen bereit. Wieso kann dadurch ein konstanter Strom durch einen Widerstandsdraht hervorgerufen werden, der sogar unabhängig von der Krümmung

und Länge des Drahts ist? Die Kraft, welche die Leitungselektronen durch den Draht antreibt, muss dazu überall konstant und axial ausgerichtet sein. Wie kann das durch eine Batterie bewirkt werden? Noch dazu, wenn die Kraftwirkung ihrer getrennten Ladungen dem Coulomb'schen Gesetz gehorcht (Abb. 3)?

Wie Testergebnisse zeigen [1], können diese und ähnliche Fragen von der großen Mehrheit der Schüler/innen und sogar von vielen Physiklehrkräften nicht beantwortet werden. In Interviews zeigt sich, dass der Begriff der Spannung als einer der schwierigsten und unverständlichsten angesehen wird. Bemühen sich Jugendliche um ein Verständnis des Begriffs, ist ihr Scheitern nicht unwahrscheinlich. Es ist zu befürchten, dass sie sich dann leicht vom Fach Physik abwenden werden. Es ist unverständlich, dass wir eine aus didaktischer Sicht höchst unbefriedigende Situation so hinnehmen, besonders da seit langem eine Alternative bekannt ist.

2 Spannung und Oberflächenladungen

Die Lösung der hier vorliegenden, didaktischen Aufgabe wurde im Prinzip schon vor über 150 Jahren entdeckt. Im Jahr 1852 hat *Wilhelm Weber* darauf hingewiesen, dass ein stromdurchflossener Leiter zwar insgesamt neutral ist, auf seiner Oberfläche aber eine unterschiedliche Dichte von Ladungen aufweist [2]. Die Spannung zwischen zwei Punkten in einem Stromkreis hängt mit einem Unterschied an Oberflächenla-

dungen zusammen. Mit dieser Erkenntnis lassen sich die obigen Fragen beantworten:

Zu Abbildung 1: Die Leiterabschnitte bei A und B tragen positive bzw. negative Oberflächenladungen.

Zu Abbildung 2: In dem Leiterquerschnitt vor und hinter einem Widerstand ändert sich die Leitfähigkeit um viele Größenordnungen. Dort sammeln sich Leitungselektronen bzw. positive Ladungsträger (positive Gitterionen) an. Das zu diesen Ladungen gehörige Feld treibt den Strom durch den Widerstand (Abb. 4). Die Gültigkeit dieser Aussage kann unmittelbar aus dem Gaußschen Gesetz abgeleitet werden: Nach Gauß ist der Fluss durch eine geschlossene Oberfläche proportional zu der von dieser Oberfläche eingeschlossenen Ladung. Platziert man eine zylinderförmige Oberfläche innerhalb von Leiter und Widerstand so, dass die Grenzfläche eingeschlossen wird (gestrichelt dargestellt in Abb. 5), ergibt sich ein unterschiedlicher Fluss durch die beiden Stirflächen A und B. Daraus folgt eine entsprechende Ladung innerhalb des Übergangsbereichs zwischen hoher und geringer Leitfähigkeit.

Zu Abbildung 3: Auf der Basis des Coulombschen Gesetzes kann abgeleitet werden, dass im Innern eines unendlich langen, geradlinigen Leiters ein axial gerichtetes, konstantes elektrisches Feld erzeugt wird, wenn die Dichte der Oberflächenladungen einen linearen Gradienten aufweist (Abb. 6). Bei einem gekrümmten Lei-

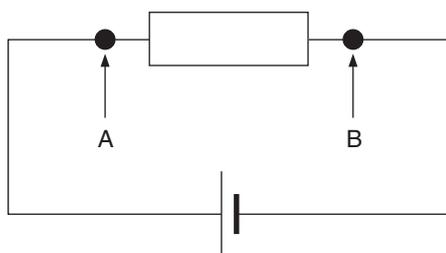


Abb. 1: Wodurch unterscheiden sich die Leiter bei A und B?

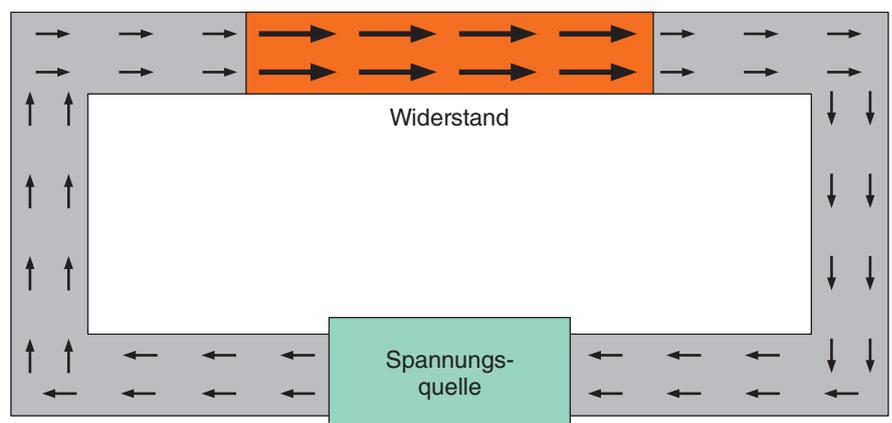


Abb. 2: Durch welche Ladungen wird das starke Feld innerhalb des Widerstandes erzeugt?

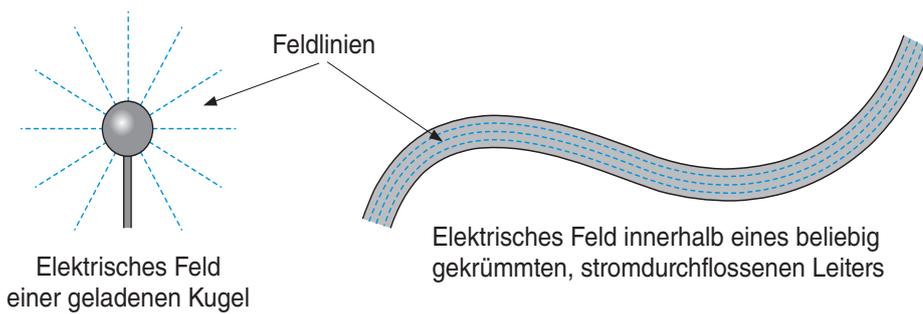


Abb. 3: Was ist die Ursache für das konstante, axial ausgerichtete Feld innerhalb eines beliebig gekrümmten, stromdurchflossenen Leiters?

ter weicht der Gradient der Ladungsdichte von der Linearität ab. An der Außenseite einer Krümmung sammeln sich mehr Elektronen an als an der Innenseite und bewirken dadurch eine gekrümmte und genau axial ausgerichtete Bahn der driftenden Leitungselektronen. Das gleiche gilt entsprechend umgekehrt für positiv geladene Leiterteile (Abb. 7).

In der Literatur finden sich zahlreiche Hinweise auf den Zusammenhang zwischen Spannung und Oberflächenladungen [3-8], die bisher innerhalb der Fachdidaktik kaum Beachtung gefunden haben. Die Hypothese, dass dieser Zugang eine Chance für einen erfolgreicherer Unterricht darstellt, sollte durch eine entsprechende Untersuchung überprüft werden. Eine ausführliche Darstellung der geschichtlichen Entwicklung des Wissens über Oberflächenladungen, Experimente zu deren Nachweis und eine ausführliche theoretische Ableitung findet sich bei Assis [9].

3 Hinweise für den Unterricht

Soll der Begriff der elektrischen Spannung zunächst im Zusammenhang mit Oberflächenladungen eingeführt und erst danach quantitativ als Energie pro Ladung behandelt werden, so müssen bestimmte Kenntnisse vorausgesetzt oder notwendige Lernschritte anhand entsprechender Versuche und unterrichtlicher Hilfe erarbeitet werden.

3.1 Ladung, Coulombkraft, Aufladung von Metallen (Faraday Käfig)

Zunächst sind Kenntnisse über das Phänomen Ladung und über die Art der Wechselwirkung zwischen Ladungsträgern unterschiedlicher Polarität erforderlich. Weiterhin muss bekannt sein, dass sich im Innern eines metallischen Leiters keine zusätzlichen Ladungen befinden. Ein geladener Leiter trägt zusätzliche, nicht neutralisierte Ladungsträger immer nur auf seiner Oberfläche. Warum die Oberfläche eines Metalls eine Barriere für Elektronen darstellt, ist nicht einfach zu erklären und muss zunächst als Tatsache mitgeteilt werden. Allerdings kann darauf hingewiesen werden, dass diese Barriere nicht unüberwindlich ist. In den früher gebräuchlichen Elektronenröhren wurden freie Elektronen durch Erhitzen eines Drahtes im Vakuum erzeugt.

3.2 Funktionsweise einer Spannungsquelle

Weiterhin muss bekannt sein, dass eine Batterie oder allgemeiner eine Spannungsquelle stets zwei metallische Anschlüsse aufweist und die Eigenschaft besitzt, auf Grund

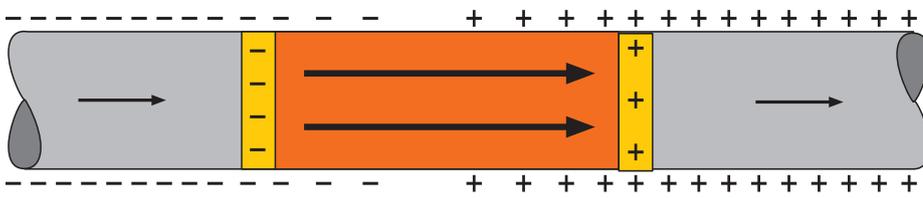


Abb. 4: Geladene Trennschichten zwischen Widerstand und Leiter

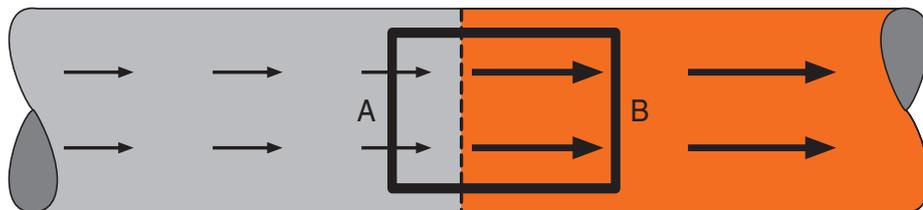


Abb. 5: Anwendung des Gauß'schen Gesetzes auf die Grenzfläche zwischen Leiter und Widerstand

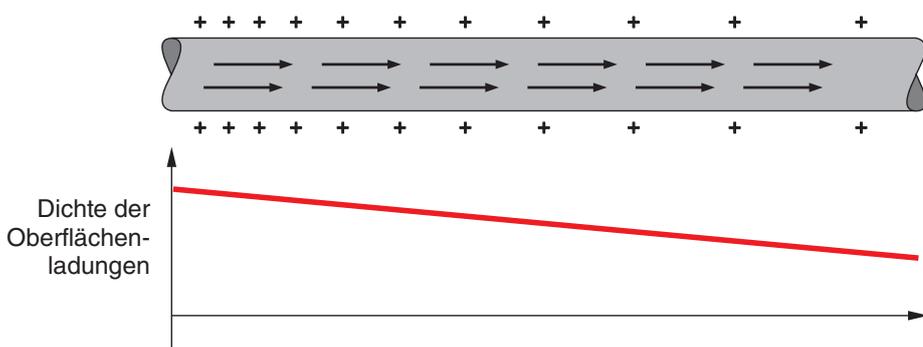


Abb. 6: Linearer Gradient der Oberflächenladungsdichte zur Erzeugung eines konstanten elektrischen Feldes im Innern eines geradlinigen Leiters

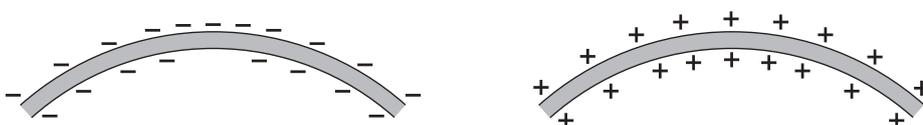


Abb. 7: Verteilung von Oberflächenladungen bei gekrümmten Leitern (qualitativ)

spezieller Kräfte Elektronen von einem Anschluss abzuziehen und zu dem anderen Anschluss hin zu verschieben. Je nach Art der Spannungsquelle sind diese Kräfte von unterschiedlicher Natur: Z.B. chemische Kräfte bei einer Batterie oder elektromagnetische Kräfte bei einem Generator.

Die Wirkung dieser Kräfte ist stets die gleiche: An einem der metallischen Ausgänge entsteht ein Überschuss an Elektronen, am anderen Kontakt fehlen diese Elektronen und die festen Gitterbausteine treten dort wegen der fehlenden Elektronen als positive Ionen in Erscheinung (Abb. 8). Je größer die Dichte der negativen Ladungen auf den Oberflächen der metallischen Kontakte einer Spannungsquelle ist, desto größer wird auf Grund der Coulomb-Wechselwirkung ihre gegenseitige Abstoßung. Entsprechendes gilt für die positiven Ladungsträger, welche die sich entfernenden Elektronen festhalten. Von einer bestimmten, für jede Spannungsquelle charakteristischen Größe an verhindern diese Coulombkräfte jede weitere Erhöhung der Dichte an zusätzlichen Ladungsträgern. Es kommt zu einem Gleichgewichtszustand, d.h. einem stationären Zustand zwischen der Kraft der Spannungsquelle und den rücktreibenden Coulombkräften.

3.3 Oberflächenladungen auf Leitungen

Werden die Kontakte der Spannungsquelle mit metallischen Leitern verbunden, so ist dies gleichbedeutend mit einer Vergrößerung der Oberfläche dieser Kontakte (Abb. 9). Auf Grund der gegenseitigen Abstoßung zwischen den Ladungsträgern verteilen sich die Oberflächenladungen auf diese vergrößerte Oberfläche, wobei sich ihre Dichte kurzzeitig verringert. Damit wird für diesen kurzen Augenblick das Gleichgewicht zwischen der Kraft der Spannungsquelle und den Coulombkräften zu Gunsten der ersteren aufgehoben. Es fließen zusätzliche Elektronen auf die vergrößerte Oberfläche, bis die für die Spannungsquelle charakteristische Dichte erreicht und damit das Gleichgewicht der Kräfte wieder hergestellt ist.

3.4 Oberflächenladungen im geschlossenen Stromkreis

Werden nun die Enden der Leitungen über einen Widerstand verbunden, und ist die Spannungsquelle in der Lage, die abfließenden Elektronen nachzuliefern, so werden die gesamten freien Elektronen im Inneren der Leiter langsam im Kreis herum fließen (Abb. 10). Solange die Spannungsquelle „unverbraucht“ ist und die Kraft zur

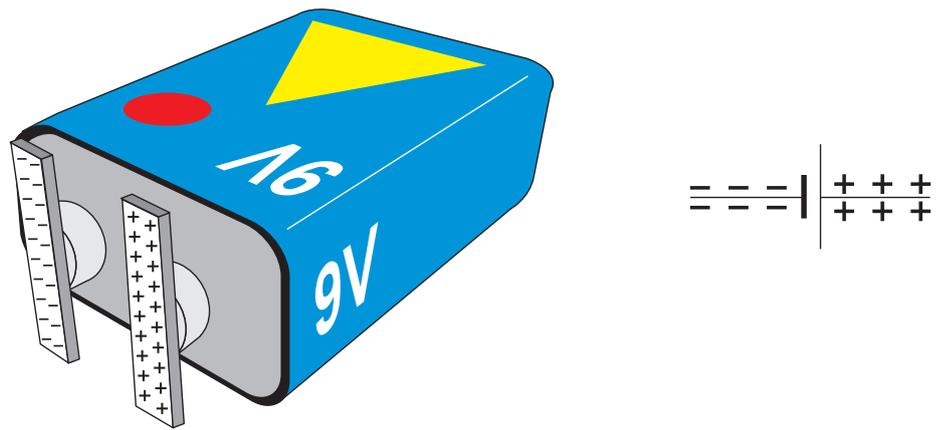


Abb. 8: Batterie als Spannungsquelle mit Oberflächenladungen auf den metallischen Kontakten

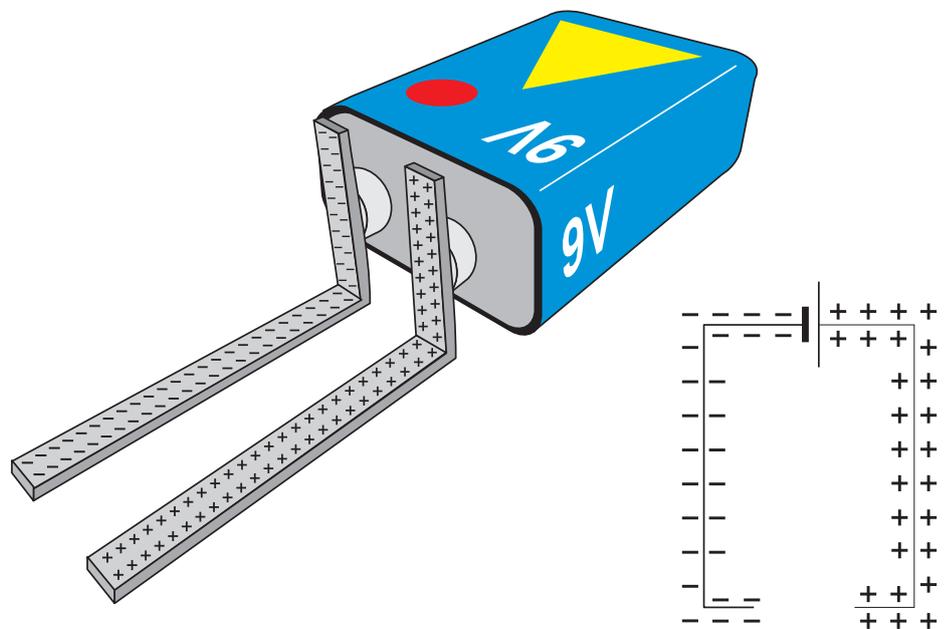


Abb. 9: Spannungsquelle mit angeschlossenen Leitern und Oberflächenladungen

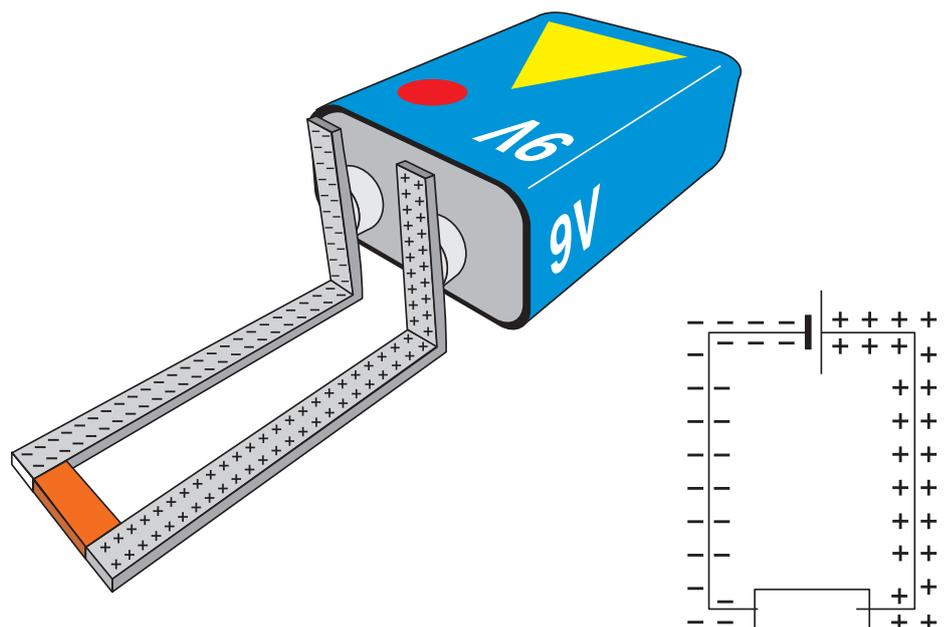


Abb. 10: Geschlossener Stromkreis mit Oberflächenladungen auf den Leitern

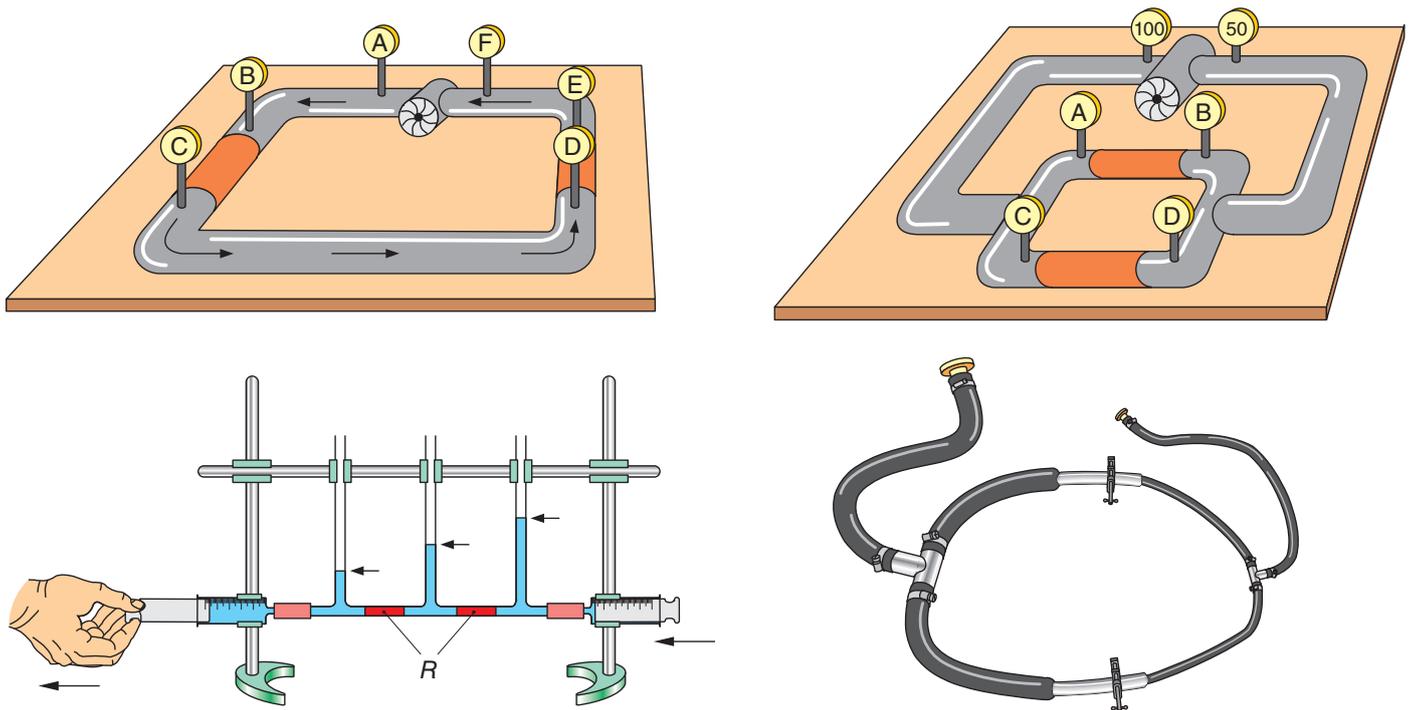


Abb. 11: Abbildungen bzw. Anlagen zur Demonstration der Druckunterschiede bei Wasserkreisen

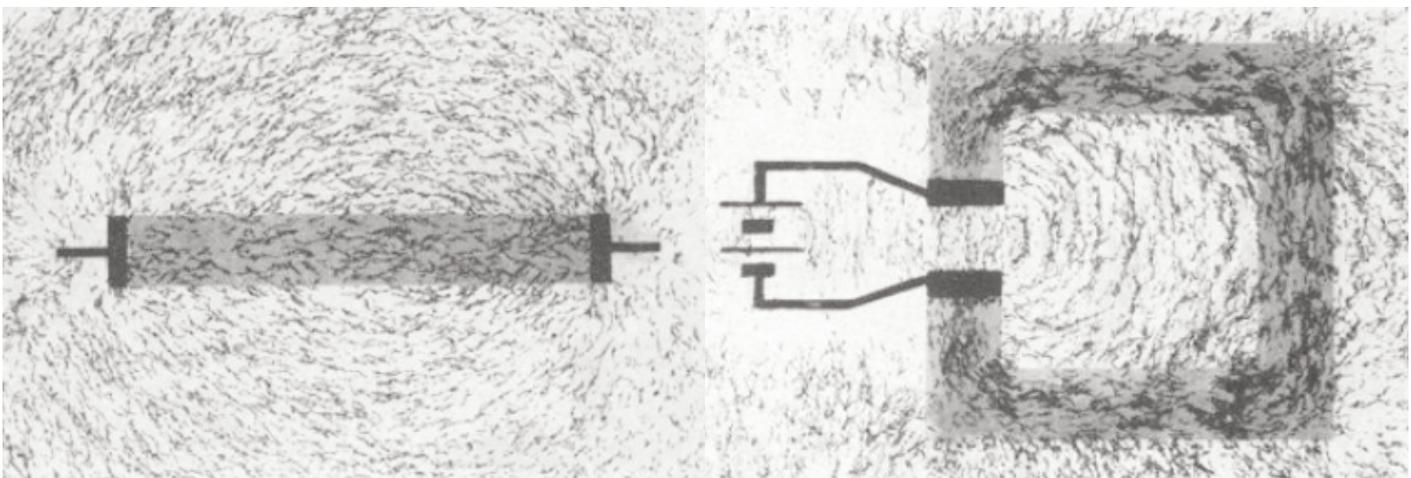


Abb. 12: Elektrische Felder innerhalb und außerhalb unterschiedlicher Widerstände (sichtbar gemacht durch aufgestreute Grassamen)[12]

Trennung und Verschiebung von Ladungen nicht nachlässt, werden sich weiterhin zusätzliche Ladungen auf den Oberflächen der Leitungen befinden, die nun an der Fließbewegung der Leitungselektronen im Innern teilnehmen.

4 Elektrische Spannung und Druckdifferenz in einem Wasserkreislauf

Ein mechanisches Modell wie der Wasserkreislauf bietet sich als Modell für den elektrischen Stromkreis an, da an ihm die Strömungs- und Druckverhältnisse im Gegensatz zum elektrischen Fall direkt wahrnehmbar sind. Als ein solches Modell eignen sich Wasserkreise, in denen die kinetische Energie des strömenden Wassers zu vernachlässigen ist und nur kleine Fließgeschwindigkeiten auftreten. Um dennoch

einen merkbaren Energieumsatz zu erreichen, müssen entsprechend große Druckunterschiede vorausgesetzt werden. An einem solchen Modell lässt sich vor allem anhand von Druckmessern oder besser noch Wassersäulen der Druckverlauf bei Reihen- und Parallelschaltungen aufzeigen, um die Ergebnisse dann auf den elektrischen Stromkreis zu übertragen.

Dieses Verfahren wurde ebenfalls bei der Entwicklung einer IPN-Unterrichtseinheit zum elektrischen Stromkreis angewendet [10] und mit Hilfe folgender Abbildungen bzw. Demonstrationen unterstützt (Abb.11). Die Erfahrung während der Entwicklung der Unterrichtseinheit hat gezeigt, dass das Wassermodell hilfreich für die Kommunikation zwischen Lehrer und Schüler ist, um sich eine Vorstellung von

dem nicht direkt zugänglichen Objektbereich „Stromkreis“ zu erarbeiten.

Wie schon in einem früheren Artikel ausführlich dargestellt, kann von der Analogie zwischen Druckdifferenz und Spannung nicht zu viel erwartet werden. Dies bestätigen auch frühere Studien [11]. Der unterschiedliche Druck in einer Flüssigkeit wird durch die Kompressibilität verursacht: Die Flüssigkeit wird an unterschiedlichen Orten verschieden stark komprimiert. Diese Tatsache ist in der Regel den Schülern nicht bekannt und es genügt sicherlich nicht, diese Tatsache nur mitzuteilen. Vielmehr bedarf es einer sehr sorgfältigen und anspruchsvollen Analyse, um den Zusammenhang zwischen Druckverlauf längs einer Reihen- und Parallelschaltung und unterschiedlichen Dichten des

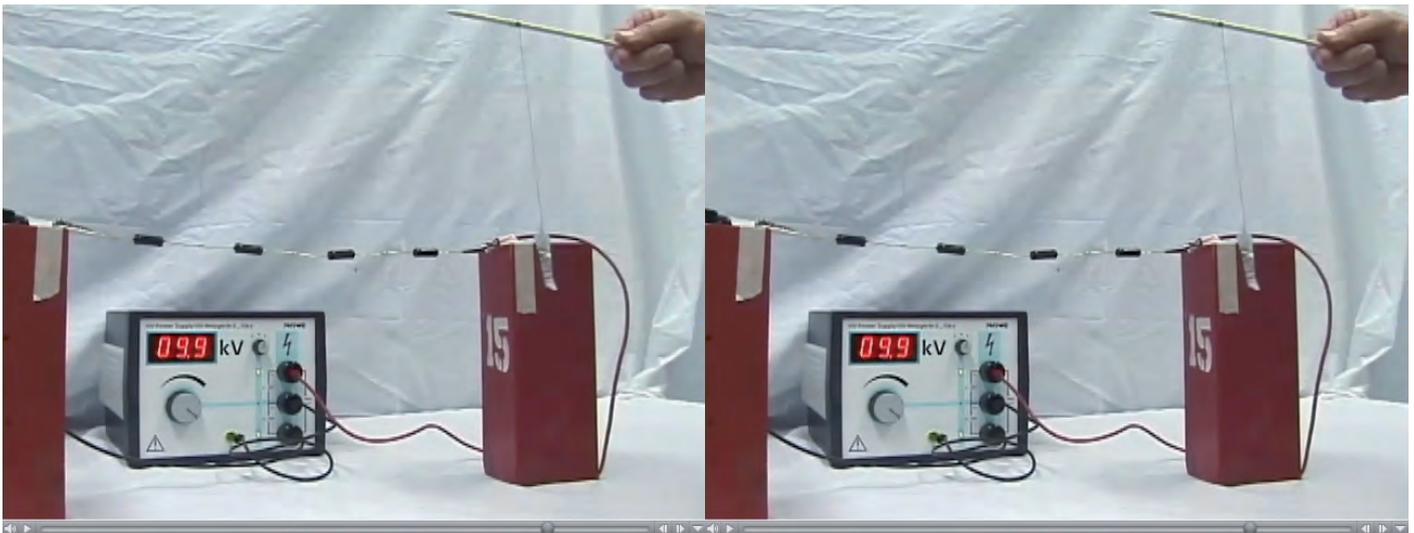


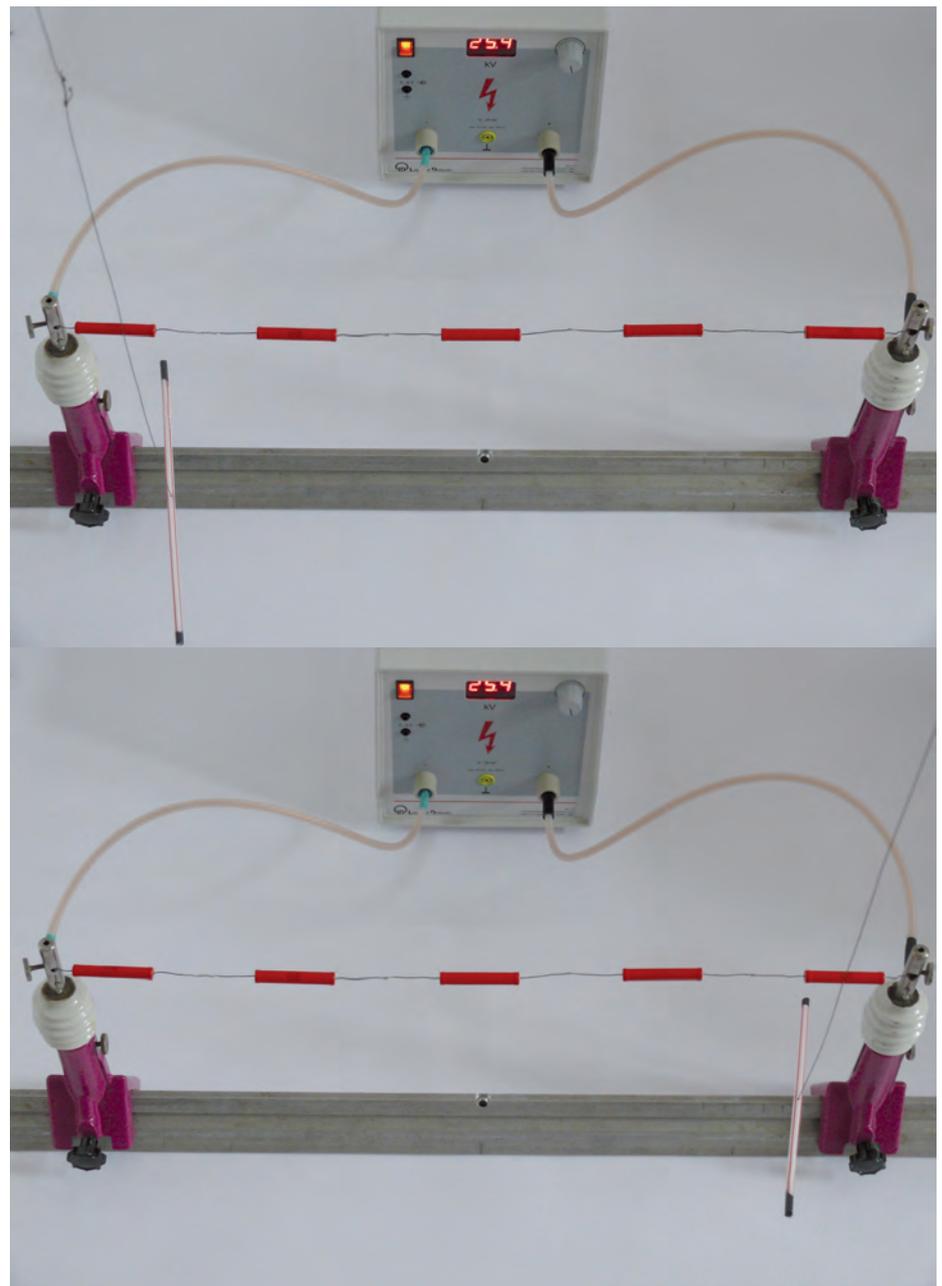
Abb. 13: Wechselwirkung zwischen einem stromführenden Leiter und einer geladenen Metallfolie zur Demonstration von Oberflächenladungen

Wassers aufzuzeigen und die Bedingungen für einen stationären Zustand zu erklären.

Soll eine solche Analyse durchgeführt werden, so kann es hilfreich sein, in Gedanken den Start einer Wasserströmung als Front einer Verdichtungswelle zu verfolgen. Trifft diese Wellenfront auf einen Widerstand, so bildet sich dort kurzfristig ein Stau, der eine rücklaufende Welle auslöst. Dadurch wird der weitere Zufluss so weit abgebremst, bis ein Gleichgewicht zwischen Zu- und Abfluss erreicht ist. Damit dauerhaft Wasser abfließen kann, muss notwendigerweise am Ausgang des Widerstands beständig ein geringerer Druck herrschen als am Eingang. Dies bedeutet, dass das Wasser am Ausgang eine etwas geringere Dichte aufweist als am Eingang, es sich beim Durchgang durch den Widerstand etwas entspannt. Das Gleiche ereignet sich bei jedem weiteren Widerstand, auf den die Wellenfront trifft. Als Endergebnis kann sich nur ein stationärer Zustand einstellen, bei dem über jedem Widerstand eine dazu proportionale Druckdifferenz auftritt.

Die gleiche Analyse lässt sich auch auf die Entstehung und Verteilung von Oberflächenladung bei einem Stromkreis anwenden. Die Leitungselektronen können als eine Art „Elektronengas“ angesehen werden, das sich durch eine Spannungsquelle etwas zusammendrücken bzw. auseinanderziehen lässt. Allerdings entsteht hierdurch nur eine Verdichtung oder Verdünnung an den Oberflächen der Leiter und nicht, wie im mechanischen Fall einer Wasserströmung, über den gesamten Querschnitt. Wassermoleküle reagieren auf Grund kurzreichweitiger Kräfte nur mit ihren nächsten Nachbarn und somit lässt sich Wasser insgesamt verdichten. Elektronen unterliegen weitreichenden Coulomb-

Abb. 14: Wechselwirkung zwischen einer stromführenden Leiterkette und einem geladenen Strohhalm zur Demonstration von Oberflächenladungen



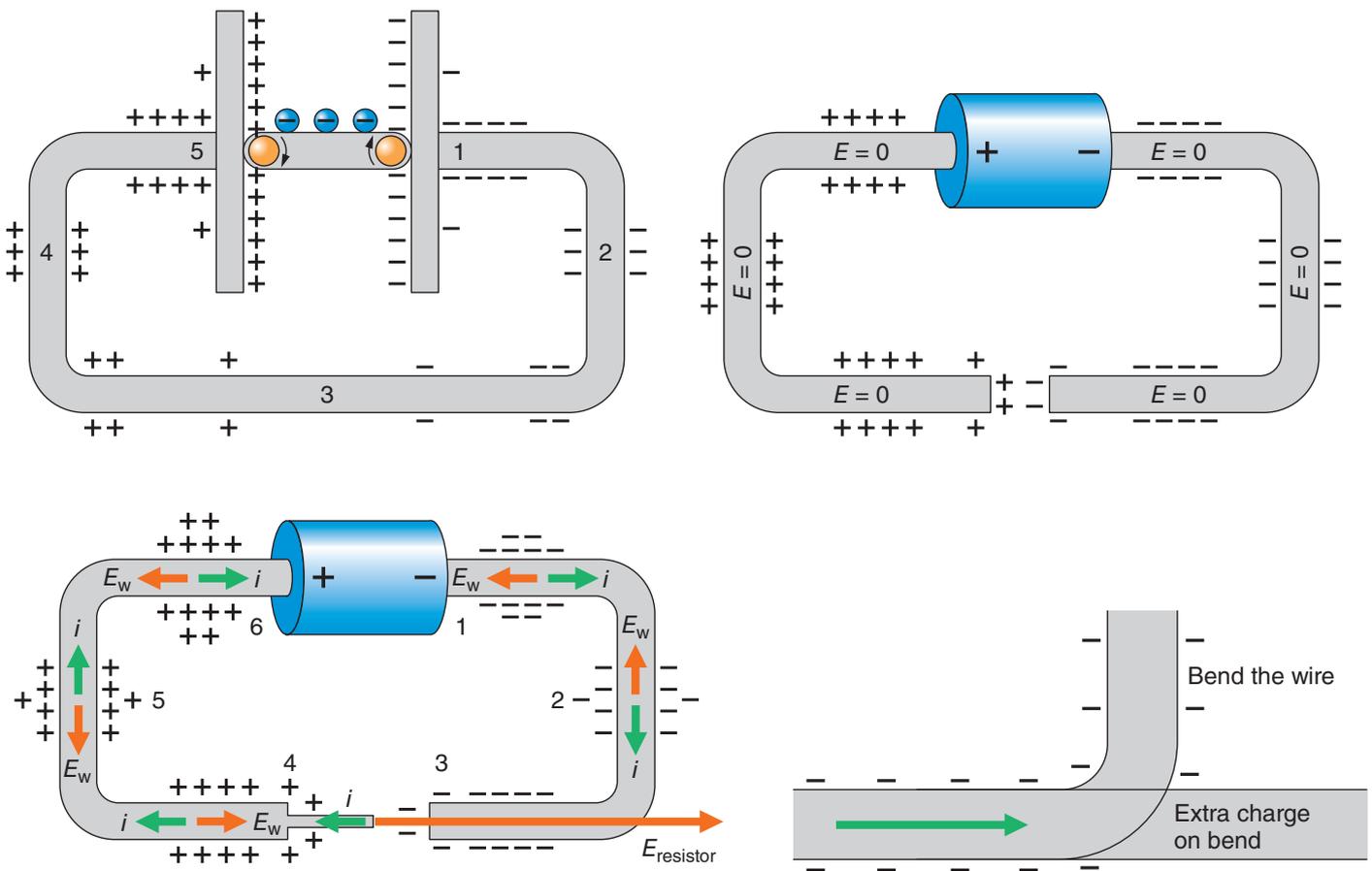


Abb. 15: Abbildungen aus einem amerikanischen Lehrgang zur Darstellung der Verteilung von Oberflächenladungen [13]

kräften, sie stoßen sich gegenseitig ab und können im Innern eines metallischen Leiters nur durch eine genau gleiche Anzahl positiver Ladungen neutralisiert werden.

5 Experimentelle Möglichkeiten

5.1 Demonstration von Oberflächenladungen

Schon im Jahr 1962 hat *Jefimenko* gezeigt, wie mit relativ einfachen Mitteln die Existenz von Oberflächenladungen bei stromführenden Widerständen demonstriert werden kann (Abb.12) [12]. Als Widerstände wurden Streifen aus roter Tinte auf eine Glasscheibe aufgebracht, an die eine relativ hohe Spannung (> 10 kV) angelegt wurde. Die Anzeige eines elektrischen Feldes außerhalb und innerhalb des Widerstandes erfolgte durch aufgestreute Grassamen, die sich im elektrischen Feld entsprechend ausrichten. Grassamen zeichnen sich durch äußerst feine Spitzen an ihren Enden aus, die bei Vorhandensein eines elektrischen Feldes die Ausbildung eines relativ großen Dipolmomentes begünstigen. Hinzu kommen die kleine Auflagefläche von Grassamen und die dadurch bedingte geringe Reibung, die durch Vibrationen an der Glasscheibe noch weiter reduziert werden kann.

5.2 Wechselwirkung von Oberflächenladungen mit externen Ladungen

Der direkte Nachweis einer Wechselwirkung von Oberflächenladungen mit externen Ladungen gelingt, wenn relativ große Widerstände und große Spannungswerte eingesetzt werden [13]. Unter diesen experimentellen Bedingungen zeigt sich eine deutlich sichtbare Ablenkung eines beweglichen Metallplättchens längs einer Kette von Widerständen. In diesem Experiment wird eine Spannung von 10 kV an eine Reihenschaltung bestehend aus vier Widerständen angelegt und die Wechselwirkung zwischen den Oberflächenladung auf den Leiterteilen zwischen den einzelnen Widerständen und einem Metallfähnchen untersucht.

Deutlich wird, dass in der Mitte der Widerstandsreihe das Metallfähnchen nicht reagiert, während an den beiden Enden nach Berührung eine Aufladung erfolgt und dadurch eine Abstoßung sichtbar wird. Wird das Metallfähnchen ersetzt durch einen geladenen Nichtleiter (mittig aufgehängten Strohhalm), so lässt sich auch die unterschiedliche Polarität der Oberflächenladungen an den beiden Enden der Widerstandsreihe nachweisen [15], siehe Abb. 14.

6 Ein erfolgreicher Lehrgang als Anregung

In den USA ist ein Lehrgang zum Thema „Electric and Magnetic Interaction“ erschienen, in dem ausführlich mit Bildern wie in Abb. 15 gearbeitet wird [13].

An Hand dieser Bilder wird erklärt, wie die Kraftwirkung auf die Leitungselektronen in einem beliebig geformten Widerstandsdraht zustande kommt, warum eine Verringerung des Leiterquerschnitts einen erhöhten Widerstand darstellt, wodurch das Feld innerhalb eines Widerstandes hervorgerufen wird u. Ä. Solche Abbildungen können – auch in halbfertiger Ausführung – als Anregungen für ein Klassengespräch oder als Übungsaufgabe dienen, um sich einen genaueren und detaillierten Einblick in die Zusammenhänge beim elektrischen Stromkreis zu erarbeiten.

7 Fazit

Die Einführung der elektrischen Spannung als Arbeitsfähigkeit und ihre quantitative Definition als Energie pro Ladung ist einseitig in ihrer mathematischen Ausrichtung. Aus didaktischer Sicht ist dieser Ansatz als zu abstrakt und unanschaulich zu kritisieren. Er unterschlägt den Zusammenhang zwischen Spannung und Oberflächenla-

dungen und nimmt somit den Schülern die Möglichkeit, sich eine anschauliche Vorstellung zu erarbeiten. Sofern die Schüler nicht von alleine danach fragen, was Spannung eigentlich ist, sollten sie zu solchen Fragen ermutigt werden, um dann die obigen Überlegungen im Unterricht nachzuvollziehen. Auf alle Fälle gehören solche Überlegungen zu einer qualifizierten Unterrichtsplanung, um als Lehrkraft jederzeit auf entsprechende Fragen angemessen reagieren zu können oder zu solchen Fragen anzuregen. ■

Literatur

- [1] Härtel, H. et. al. (2005): Test about Voltage - A Basic Term in Electricity Results. http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~hhaertel/Spannung/voltage_test_result.pdf
- [2] Weber, W. (1993): Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere Widerstandsmessungen. Abhandlungen der Königl. Sächs. Gesellschaft der Wissenschaften, mathematisch-physische Klasse, 1, S.199–381, 1852. Nachdruck in Wilhelm Weber's Werke, Vol. 3, Weber, H. (ed.), Berlin: Springer, S. 301-471.
- [3] Marcus, A. (1942): The electric field associated with a steady current in a long cylindrical conductor. In: American Journal of Physics, 9, 225-226
- [4] Rosser, W.G.V. (1963): What makes an electric current flow. In: American Journal of Physics, 31, 884-885
- [5] Sommerfeld, A. (1964): Elektrodynamik. Leipzig, S. 113-117
- [6] Härtel, H. (1979): Zur Einführung des Spannungsbegriffs in der Sek. I. In: Härtel, H. (Hrsg.), Zur Didaktik der Physik und Chemie, Hannover: Schroedel, S. 154-156
- [7] Walz, A. (1984): Felder um stationäre Ströme. In: Physikunterricht, 2, 5, S. 61-68
- [8] Härtel, A. (1985): The electric voltage: What do students understand? What can be done to help for a better understanding? In: Duit, R; Jung, W. & v. Rhöneck, C. (Hrsg.), Aspects of Understanding Electricity. Proceedings of an International Workshop, IPN-Arbeitsberichte 59, Kiel: IPN, 353-362.
- [9] 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>)
- [10] Härtel, H. (1981): IPN-Unterrichtseinheit „Stromstärke, Spannung; Widerstand“ für das 7. bis 8. Schuljahr. Stuttgart: Klett (Überarbeitete und gekürzte Fassung verfügbar unter <http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~hhaertel/PUB/UE-7.pdf>)
- [11] Schwedes, H., Dudeck, W.-G. & Seibel, C. (1995): Elektrizitätslehre mit Wassermodellen. In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik, 44, S. 28-36
- [12] Jefimenko, O. (1962): American Journal of Physics, 30 (1962), S.19ff.
- [13] R. Chabay, B. Sherwood: Matter and Interaction, Volume II: Electric & Magnetic Interaction, John Wiley, 2002.
- [14] Ein Video zu diesem Versuch findet sich unter <http://www.astrophysik.uni-kiel.de/hhaertel/PUB/Strohhalm.htm>

Anschrift des Verfassers:

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

Die Natur macht keine Sprünge – auch nicht beim Ohm'schen Gesetz

H. Härtel

1 Stationäre Zustände ohne Übergang – ein didaktisches Problem

Das Thema „Elektrischer Stromkreis“ ist Bestandteil des Physikunterrichts in praktisch allen Ländern. Dabei ist ein gleichartiges Vorgehen festzustellen, in dem nur stationäre Zustände und die zugehörigen Gesetze behandelt werden, während die naturgemäß immer vorhandenen Übergangsprozesse ohne Beachtung bleiben. In einem in mehreren europäischen Ländern durchgeführten Test wurde Schülern und Studenten folgende Aufgabe gestellt:

Gegeben sei ein elektrischer Stromkreis, der aus einer Batterie und einem Widerstand besteht und in dem ein Strom fließt, dessen Stärke durch das Ohm'sche Gesetz gegeben ist (Abb. 1). Wenn der Widerstand plötzlich vergrößert wird, so verringert sich die Stromstärke derart, dass ein neuer stationärer Zustand erreicht wird, der wiederum durch das Ohm'sche Gesetz gegeben ist.

Frage: Wie erfolgt dieser Prozess des Übergangs von einem stationären Zustand zum anderen?

Das Ergebnis war eindeutig negativ [1]. Die überwiegende Anzahl der Schüler war noch nie mit der Existenz von Übergangsprozessen bekannt gemacht worden, noch hatten sie etwas von deren Existenz vernommen. Übergangsprozesse in elektrischen Stromkreisen sind normalerweise sehr kurzzeitig und nur mit einigem Aufwand experimentell zu bestimmen. Dieser Umstand mag ein Anlass dafür gewesen sein, diese Prozesse aus der Betrachtung im Unterricht auszuschließen. Sofern das Ziel des Physikunterrichts darin besteht,



Abb. 1: Stromkreis aus Batterie und Widerstand