

DIE ELEKTRISCHE SPANNUNG

(Möglichkeiten des Einsatzes von Computersimulationen)

von
Hermann Härtel
IPN Kiel

1. Zur Analogie von Spannung und Druckdifferenz

Der Begriff der elektrischen Spannung gehört zu einem der schwierigsten, der im Rahmen der Elektrizitätslehre auf der Sekundarstufe 1 unterrichtet wird. Während bei dem Begriff des elektrischen Stromes noch auf mechanische Vorstellungen vom kollektiven Fluß kleiner Partikel Bezug genommen werden kann, versagen beim Spannungsbegriff jegliche mechanische Analogien. Zwar wird in einigen Lehrbüchern noch versucht, anhand von getrennten Ladungen und mit Hilfe der aus der Elektrostatik bekannten Anziehungs- und Abstoßungskräfte einen besonderen elektrischen Zustand anschaulich zu machen, der dann zunächst als Spannung bezeichnet wird und für den Ausgleich der getrennten Ladungen sorgt. In einigen Fällen wird zur Erläuterung der Spannungsmessung an parallel und in Reihe geschalteten Spannungsquellen auch die Analogie zu Wasserreservoirs in unterschiedlicher Höhe herangezogen.

Die grundsätzliche Problematik bei all diesen mechanischen Analogien liegt jedoch in der Tatsache begründet, daß die Spannung eine Größe ist, die direkt mit dem Begriff des elektrischen Feldes verknüpft ist und somit ohne ein Feldkonzept und ohne eine Vorstellung der Wechselwirkung zwischen Feld und Ladung nicht verständlich werden kann.

Dagegen können Analogien zu mechanischen Phänomenen ohne eine explizite Behandlung des Feldkonzeptes das Spannungsverhalten an Reihen und Parallelschaltungen nur wie folgt plausibel machen:

Wenn die Druckdifferenz an den Enden zweier paralleler Wasserrohre gleich ist, warum soll die Spannung über zwei paralle-

len Widerständen nicht ebenfalls gleich groß sein?

Diese Art des Vergleichs und der Argumentation kann den elektrischen Phänomenen etwas von ihrer Fremdartigkeit nehmen und sie plausibel erscheinen lassen. Ein echtes Verständnis kann allerdings hierdurch nicht erreicht werden.

In den üblichen Lehrbüchern der Sekundarstufe 1 wird dieses Ziel, ein Verständnis für den Spannungsbegriff zu erreichen, durch Rückgriff auf das Energiekonzept gelöst. Spannung wird als Arbeitsfähigkeit von Ladungen bzw. eines Ladungssystems und mit Hilfe der Gleichung

$$U = \frac{W}{Q}$$

definiert. Wie wenig hiermit für ein Verständnis des Phänomens der elektrischen Spannung geleistet ist, läßt sich an einer mechanischen Analogie, und zwar an einer der Erdanziehung unterliegenden Wasserströmung verdeutlichen.

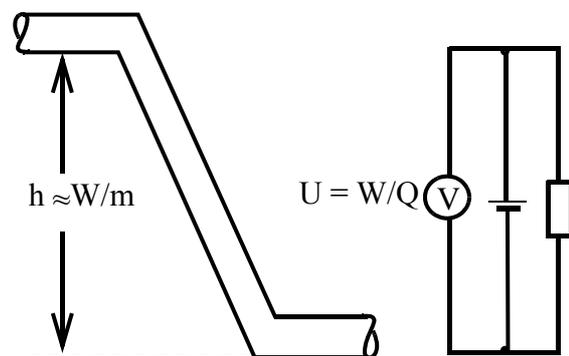


Abb. 1: Zur Analogie von Höhendifferenz und Spannung

Um diese Analogie deutlich zu machen, müs-

sen allerdings zweidimensionale Schüler vorausgesetzt werden, die die Dimension der Höhe nicht kennen und somit auch nicht das Phänomen der Erdanziehung, die aber dennoch verstehen möchten, warum das Wasser in dem Rohr strömt.

Wenn man diesen Schülern nun die Definition für den physikalischen Begriff "Höhe" als Arbeitsfähigkeit des Wassers gemäß

$$h = \frac{E}{m}$$

vorgibt, so hat man damit im Grunde nichts über die Qualität der Dimension Höhe erklärt, sondern nur eine Meßvorschrift geliefert. Möglich ist, daß sich viele Lehrer hiermit zufrieden geben, sei es aus lerntheoretischen Überlegungen heraus, sei es aus Resignation gegenüber dem fehlenden Interesse bzw. der mangelnden Fähigkeit zur Abstraktion auf Seiten der Schüler.

Bevor im folgenden ein Ansatz zur weiteren Entwicklung und Bearbeitung dieses didaktischen Problems vorgestellt wird, sei noch auf eine mechanische Analogie verwiesen, die sich als hilfreich bei der Behandlung des Spannungsbegriffs herausgestellt hat. Dabei wird zunächst die bekannte Analogie von Stromkreis und Wasserkreislauf und speziell der Vergleich zwischen Spannung und Druckdifferenz vorausgesetzt. Ein solcher Vergleich bekommt seine besondere Schwierigkeit durch die Tatsache, daß Schüler in der Regel von dem Begriff Druck ein Alltagsverständnis und nicht das richtige physikalische Verständnis besitzen. Für sie bedeutet Druck im allgemeinen eine besondere Art von Kraft, nämlich das Entgegengesetzte einer Zugkraft. Somit steht man hier vor dem Dilemma, eine abstrakte elektrische Größe, die Spannung, mit einer zwar mechanischen, aber dennoch schwierigen physikalischen Größe, nämlich Druckdifferenz, vergleichen und "erklären" zu wollen. Bei dieser Schwierigkeit kann nun die Vorstellung von elastischen Rohrwandungen hilfreich sein.

In der Unterrichtseinheit des IPN-Curriculum Physik "Stromstärke, Spannung, Widerstand" (1981) ist ein solcher Wasserkreis mit elastischen Schläuchen abgebildet, wodurch die auftretende Druckdifferenz sofort abzulesen ist.

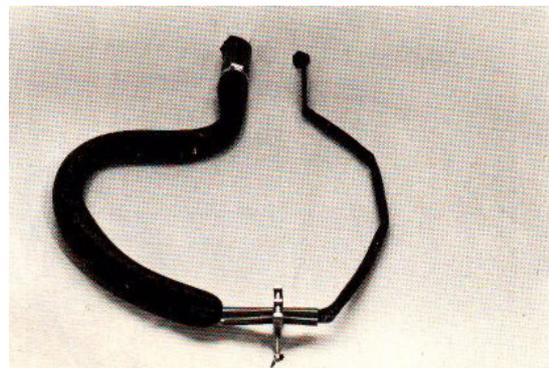
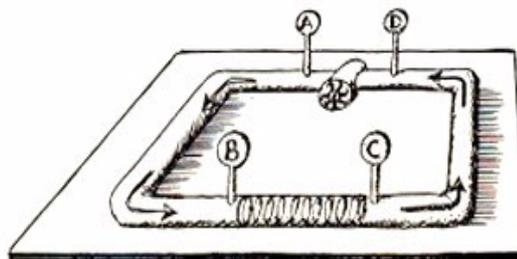


Abb. 2.

- a) Einfacher Wasserkreislauf mit Druckmessern
- b) Wasserkreis aus elastischen Schläuchen und einem Widerstand

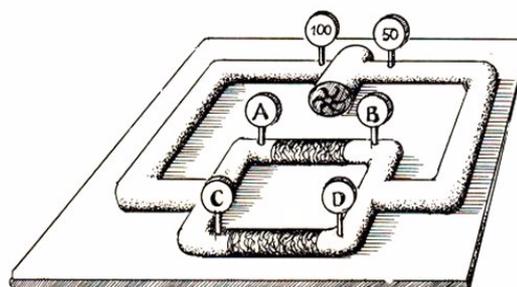


Abb. 3.

- a) Wasserkreislauf mit zwei parallelen Widerständen
- b) Wasserkreis aus elastischen Schläuchen

und zwei parallelen Widerständen

Diese Bilder haben sich als fruchtbar erwiesen, um den Druckverlauf längs einer schleichenden Wasserströmung einsichtig zu machen. Insbesondere konnte deutlich gemacht werden, daß der Druck unmittelbar vor dem Widerstand nicht größer ist als am Ausgang der Pumpe. Dies Ergebnis stellt einen wichtigen Lernschritt dar, denn sehr häufig fertigen Schüler auf Anfrage das folgende Bild eines mit elastischen Wandungen ausgestatteten Wasserkreises vor einem Widerstand an.

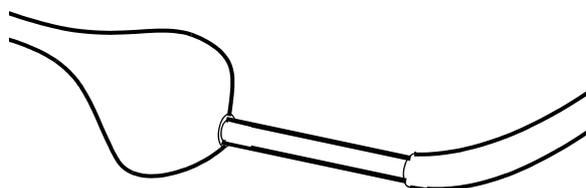


Abb. 4: Eine "typische" Schülerzeichnung (zum Druckverlauf vor einem Widerstand) Hier klingen sicherlich Alltagserfahrungen von Stauungen vor Engpässen an. Sollen diese Vorerfahrungen den weiteren Lernerfolg nicht behindern bzw. blockieren, so müssen sie im Unterricht explizit besprochen und auf ihre Widersprüchlichkeit hin untersucht werden.

2. Beispiele für Verständnisschwierigkeiten mit dem Begriff Spannung

An einem einfachen Beispiel läßt sich aufzeigen, welche Problematik mit dem Spannungsbegriff und seiner Vermittlung in der Schule und auch der Hochschule verknüpft ist. Dabei ist vorausgesetzt, daß die Schüler aus der Elektrostatik gelernt haben, daß Spannung zwischen getrennten Ladungen auftritt und daß sie wissen, daß die Stromstärke in einem unverzweigten Stromkreis überall gleich groß ist.

Was antwortet dieser Schüler oder ein Lehrerstudent auf die Frage:

Warum messe ich zwischen den Punkten A und B (Abb. 5) eine Spannung und nicht auch zwischen den Punkten B und C? Alle drei Leiterquerschnitte sind mikroskopisch gesehen identisch, denn durch all drei Querschnitte fließt die gleiche Anzahl von Elektronen mit gleicher Geschwindigkeit.

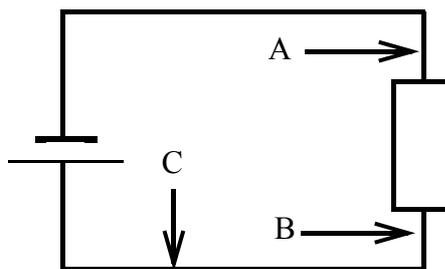


Abb. 5: Zum Potentialverlauf an einem einfachen elektrischen Stromkreis

Die Lehrerstudenten werden vielleicht antworten, daß die Punkte B und C auf gleichem Potential liegen im Gegensatz zum Punkt A. Was aber sagen diese Studenten, wenn man darauf hinweist, daß die elektrische Feldstärke an allen drei Querschnitten gleich groß und sehr klein ist (im Fall eines Supraleiters sogar gleich Null)?

3. Oberflächenladungen in elektrischen Stromkreisen

Es ist erstaunlich, daß die Fachdidaktik die Tatsache der Existenz von Oberflächenladungen, die den Stromfluß in einem Festkörper begleiten, nicht aufgegriffen hat, um die oben beschriebenen Lern- und Verständnisbarrieren abzubauen bzw. zu verringern. Die Existenz dieser Oberflächenladungen wird in einigen Lehrbüchern und Fachzeitschriften beschrieben, in der Regel wird diese Tatsache aber im Unterricht oder im Studium nicht erwähnt.

Es gibt sicherlich mehrere Gründe für dieses Verhalten. Die Tatsache, daß es sich hier um einen wahrlich vernachlässigbar kleinen Effekt handelt, mag eine besondere Rolle gespielt haben. So klein und vernachlässigbar der hier angesprochene Effekt aber auch ist, so stellt sich doch die Frage, ob er für ein Verständnis nicht wichtig, eventuell sogar wesentlich ist.

Wenn im folgenden vorgeschlagen wird, das Auftreten von Oberflächenladungen bei der Behandlung des sogenannten einfachen elektrischen Stromkreises ausführlich zu besprechen, so werden damit drei Ziele verfolgt:

- Es ist zu hoffen, daß Lehrer ein besseres Verständnis der Begriffe Spannung, Potential und Feld erzielen und von daher mit mehr Phantasie und Sicherheit unterricht-

ten können.

- Das Bewußtsein über die Komplexität des sogenannten einfachen elektrischen Stromkreises wird erhöht und sollte zu einem behutsameren Vorgehen im Unterricht und zu mehr Verständnis für vorhandene Lernschwierigkeiten der Schüler führen.
- Schließlich gibt es immer einige Studenten ,bzw. Schüler, die mehr über Spannung und Potential wissen wollen und die sich nicht mit Messungen und dem Entdecken von Regeln zufrieden geben. Für diesen Fall sollte der Lehrer die Kenntnis und das entsprechende didaktisch aufbereitete Material zur Verfügung haben, um in angemessener Weise das Vorhandensein dieser Oberflächenladungen zu erklären und um somit die Suche nach Erkenntnis zu unterstützen und die Neugier für weitere physikalische Erklärungen aufrecht zu erhalten.

4. Vorschläge für eine Behandlung von Oberflächenladungen im Unterricht

Die theoretischen Grundlagen zu den hier beachteten Oberflächenladungen sind in mehreren Lehrbüchern wie Sommerfeld, Bergmann-Schaefer, oder Rosser behandelt worden. Für spezielle Informationen zu diesem Thema muß auf diese Publikationen verwiesen werden (siehe auch Walz 84). Im folgenden sollen nur einige Ideen zur Behandlung dieses Effektes anhand von Computersimulationen vorgestellt und einige vorläufige Beispiele diskutiert werden.

Der Einsatz von Computersimulation bringt mehrere Vorteile:

- Will man die hier betrachteten Phänomene im Realexperiment nachweisen, so ist dies nur mit einigem Aufwand möglich und setzt prinzipiell die Kenntnis des Feldbegriffes und einen entsprechenden mathematischen Aufwand voraus (Hecht 80).
- Bei Computersimulationen lassen sich die Einschalteteffekte zeitlich derart verzögern, daß nicht nur die stationären Endzustände, sondern auch ihre Entstehung und zeitliche Veränderung in den Blick geraten. Es stellt sich die Frage, ob dadurch auf Seiten der Schüler nicht eine neue Einsicht in den Systemzusammenhang erzielt, neue Fragen

gestellt und neue Hypothesen erzeugt werden, die dann zu vertieften Untersuchungen am realen Experiment führen.

- Bei Computersimulationen können die graphisch dargestellten Oberflächenladungen beliebig an- und abgeschaltet werden und unterstützen so die nötigen Rückmeldungen an einzelne Schüler während der Phase des Übens und Ausprobierens.

Es sei noch einmal betont, daß es sich bei den hier angesprochenen Effekten um unvorstellbar kleine Größenordnungen handelt. Diese Größenordnung kann durch folgende Rechnung abgeschätzt werden.

Berechnet man die zusätzliche Oberflächenladung an einem abgewinkelten Leiter, die notwendig ist, um einen Strom von 1 A um einen Winkel von 90 Grad umzulenken, so erhält man als Ergebnis bei durchschnittlicher Leiterdicke etwa die Ladung, die der eines einzelnen Elektrons entspricht.

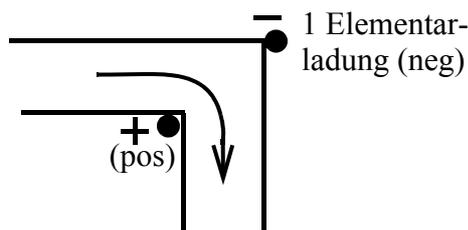


Abb. 6: Umlenkung eines elektrischen Stromes durch zusätzliche Oberflächenladungen. Bei einem Verhältnis von $1 : 10^{19}$ ist dieser Effekt in der Praxis wahrlich vernachlässigbar, nicht aber in der Theorie.

Ohne dieses eine zusätzliche Elektron kann nicht erklärt werden, warum die strömenden Elektronen umgelenkt werden.

In einer Computersimulation können diese Oberflächenladungen in unterschiedlicher Form, eventuell auch mit farblicher Unterstützung dargestellt werden. Dabei sollte es ohne weiteres möglich sein, den allmählichen Übergang von einer sichtbaren Belegung bis hin zu einer nicht mehr sichtbaren darzustellen, um so beständig an die Kleinheit dieses Effektes zu erinnern.

In den Versuchen am 1PN wurden für neutrale und geladene Leiter die folgenden Darstellungen gewählt. Dabei handelt es sich bisher nur um statische Bilder. Ein Programm zur dynamischen Darstellung dieses Vorgangs

ges befindet sich in der Entwicklung.

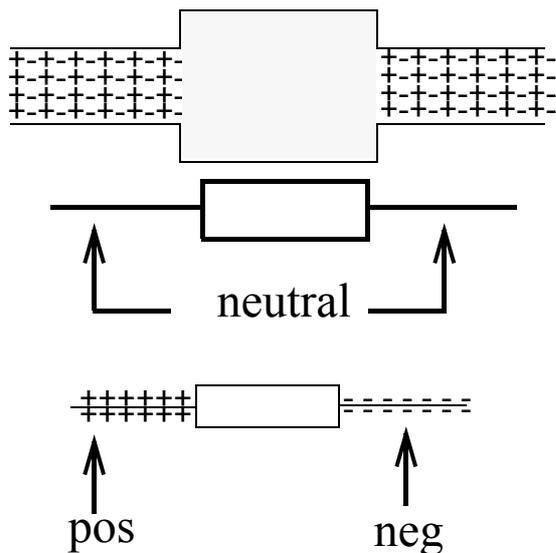


Abb. 7: Symbolische Darstellung von Leitern mit und ohne Oberflächenladungen
Wie Wals gezeigt hat, ergibt eine Verteilung von Oberflächenladung gemäß der Gleichung

$$\sigma = \sigma_0 + cx$$

ein homogenes elektrisches Feld innerhalb eines geraden Leiters, wobei x die Koordinate in axialer Richtung bedeutet.

Die Konstante c ändert sich in Abhängigkeit der Leitfähigkeit.

Bei einem Widerstand ergibt sich somit ein stärkerer Gradient in der Ladungsverteilung und dementsprechend ein stärkeres elektrisches Feld innerhalb des Widerstandsdrahtes. Inwieweit die Besonderheit der Kontaktstelle zwischen Zuleitung und Widerstand (gepunkteter Bereich) gesondert betrachtet werden muß, wird sich im Laufe der weiteren Entwicklung in Zusammenarbeit mit Lehrern und Schülern zeigen.

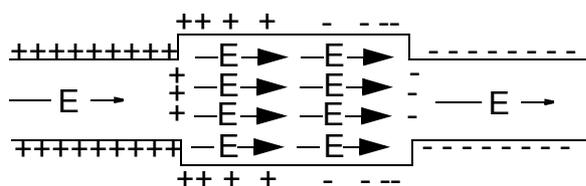


Abb. 8: Oberflächenladungen längs eines Widerstandes

Auch bei dieser Darstellung ist zu hoffen, daß die Möglichkeit der Variation dieses Gradienten dem Lernenden dazu verhilft, den Zusammenhang zwischen Oberflächenladung und

elektrischer Feldstärke zu verdeutlichen und damit verständlicher zu machen.

Vernachlässigt man sämtliche Übergangseffekte, die sich wegen der elektrostatischen Influenz bei der Annäherung eines Leiters an eine geladene Batterie ergeben, sondern setzt man Idealerweise eine momentane Verbindung voraus, so läßt sich der Aufbau der Oberflächenladungen längs eines Stromkreises mit einem einzelnen Widerstand etwa folgendermaßen darstellen:

Im ersten Augenblick ist das elektrische Feld nicht axial gerichtet und führt dazu, daß sich Elektronen auf die Oberfläche zu bewegen.

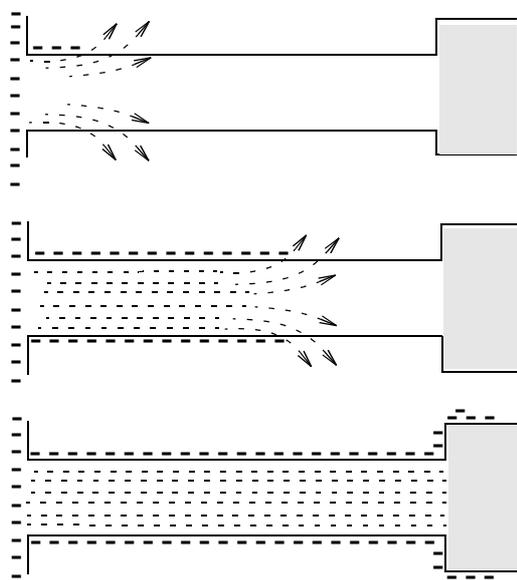


Abb. 9; Zeitlicher Aufbau von Oberflächenladungen längs eines Leiters

Dieser Prozeß bewegt sich mit Lichtgeschwindigkeit nach rechts und erreicht einen stationären Endzustand, wenn die Feldlinien innerhalb des Leiters axial gerichtet sind, so daß sich ein stationärer Strom gemäß der Gleichung $j = E \cdot \sigma$ einstellt.

Dieser Endzustand kann für verschiedene Stromkreise etwa wie folgt dargestellt werden. (Abb. 12)

Schließlich erlauben Computersimulationen auch die Erzeugung von Kunstwelten, in denen andere Gesetze gelten als im realen elektrischen Stromkreis. Gerade die Untersuchung solcher Kunstwelten, die zwar mit Alltagsvorstellungen konform sein mögen, den

Ergebnissen eines Realexperimentes aber widersprechen, kann dazu führen, das Einmalige und Besondere der physikalischen Gesetze und der Realität deutlich und eindringlich ins Bewußtsein zu heben.

Abschließend sei noch einmal betont, daß es sich hier nur um einen ersten Schritt auf dem Wege zu einer Revision der Behandlung des Spannungsbegriffs handelt.

Es sollte jedoch deutlich geworden sein, wie der Einsatz von Computersimulationen neue Ideen anregen, neue Entwicklungen von Methoden der Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Fachdidaktik ermöglichen und schließlich auch zu besseren Lernprogrammen führen kann.

$U = 30\text{ V}$

Literatur:

SOMMERFELD, A. Elektrodynamik
Leipzig 1964, S.113-117

BERGMANN-SCHAEFER

Bd. 11: Elektrizitätslehre

ROSSER, W.C. Classical Electromagnetism
via Relativity; Butlerworths, London, 1968

HÄRTEL, H. Zur Einführung des Spannungsbegriffs in der Sek.I;

In: Härtel (Hrsg.): Zur Didaktik der Physik
und Chemie, Schrödel. 1979, S. 154-156

WALZ, A. E-Felder um stationäre Ströme;
PU 2-1984, 5S. 61-68

HECHT, K. Energieumwandlung und Ener-
gietransport im einfachen elektrischen
Stromkreis; MNU, 1980, S.22-32

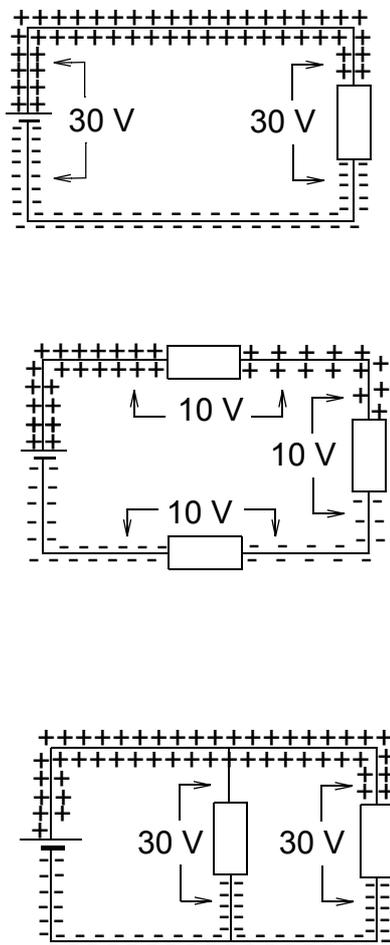


Abb. 10: Schematische Darstellung von Oberflächenladungen längs Reihen- und Parallelschaltungen