

Spannung als Ladungsunterschied

Hermann Härtel

Der hohe Stellenwert von Schülerübungen im Unterricht und die dadurch erforderlichen Sicherheitsvorkehrungen haben dazu geführt, daß nahezu alle elektrischen Phänomene mit relativ niedriger Spannung vorgeführt werden. Eine Ausnahme bilden Effekte aus dem Gebiet der Elektrostatik, die aber dann in der Regel nicht auf strömende Elektrizität beim Stromkreis übertragen werden. Bei solchen niedrigen Spannungswerten ($U < 40V$) lassen sich die auftretenden Stromstärken recht gut messen, und alle Spannungswerte können dann mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes berechnet oder durch entsprechend geeichte Geräte angezeigt werden.

Es fällt jedoch in diesen Fällen ein sehr kleiner und für praktische Zwecke völlig unbedeutender Effekt unter den Tisch, der jedoch in didaktischer Hinsicht von Bedeutung sein kann. Gemeint ist hier das Auftreten von Oberflächenladungen im Zusammenhang mit einem stromdurchflossenen Leiter und das Auftreten von Volumenladungen in denjenigen Leiterquerschnitten (Lötstellen), in denen sich die Leitfähigkeit zwischen der Zuleitung und dem Widerstand radikal ändert.

Um diese Effekte sichtbar zu machen, ist es erforderlich, die im Unterricht üblichen Spannungswerte drastisch zu erhöhen und ebenfalls die Widerstandswerte, um die notwendige Leistung mit Hilfe der schulüblichen Geräte aufbringen zu können.

Eine sehr einfache und im Prinzip leicht nachzuvollziehende Anordnung hat Jefimenko [1] vorgeschlagen, die am IPN nachgebaut wurde und im folgenden kurz beschrieben wird. Zu Demonstrationszwecken werden die Teile eines Stromkreises aus transparentem Material und zwar aus unterschiedlich leitender Tinte gefertigt und auf eine Glasplatte aufgebracht. Über eine metallische Verbindung in Form von Aluminiumfäden wird eine Spannung von einigen 1000 Volt aufgebracht. Die elektrischen Felder im Außenraum sowie im Inneren der Strombahnen können dann durch aufgestreute Grassamen sichtbar gemacht werden. Für unter-

schiedliche Ausführungen des Stromkreises ergeben sich die Darstellungen der Abb. 1.

Diese Aufnahmen zeigen sehr deutlich, daß nicht nur im Innern des Leiters Feldlinien vorhanden sind, sondern daß der gesamte Außenraum davon erfüllt ist. Diesem Außenraum kommt also ebenfalls eine Bedeutung zu, die im allgemeinen bei der Verwendung niedriger Spannungswerte übersehen wird. Aus der Form dieses Feldlinienverlaufes ist für einen Physiker, der die Maxwellschen Gleichungen kennt und sie zu interpretieren weiß, sofort ersichtlich, daß sich auf der Oberfläche der Leitungen elektrische Ladungen befinden müssen. Ohne solche Oberflächenladungen ist der sprunghafte Verlauf der Feldlinien an der Oberfläche nicht zu erklären.

Die generelle Frage ist jedoch, ob und in welchem Umfang die explizite Behandlung dieser Oberflächenladungen sowie die dazu gehörenden Feldlinien den Schülern helfen, ein tieferes Verständnis von elektrischen Phänomenen und einen besseren Zugang zu den damit verbundenen Aufgabenstellungen zu erhalten.

Dem steht zunächst entgegen, daß das Feldkonzept in der Sek.I zwar benutzt (Erdanziehung, magn. Wechselwirkung), aber nicht explizit behandelt wird.

Außerdem dürfte die Behandlung eines solchen kleinen Effektes, der zudem in starkem Maße von geometrischen Anordnungen abhängt, ein hohes Maß an räumlichem Vorstellungsvermögen voraussetzen. Sollen die Schüler lernen, mit diesem Effekt konstruktiv umzugehen, so ist sicherlich die Entwicklung neuer Unterrichtsmaterialien erforderlich, die besonders den dynamischen Aufbau dieser Oberflächenladungen veranschaulichen und die die Bedeutung der geometrischen Anordnungen hervorheben.

An dieser Stelle bietet sich das neue Medium Computer an, und zwar insbesondere im Hinblick auf interaktive und bewegliche Grafiken. Am IPN sind erste Versuche in dieser Hinsicht unternommen worden (s. [2]). Hier wurden jedoch im wesentlichen nur statische Bilder der folgenden

Art entworfen.

Wie schon erwähnt handelt es sich bei diesem ersten Versuch nur um eine Abfolge statischer Bilder, die genau so gut durch übereinander gelegte Folien ersetzt werden können. Erst die Dynamisierung dieser Bilder und die Möglichkeit des Eingreifens und der Veränderung durch Schüler lassen computerspezifische Vorteile und damit verbundene Lernvorteile erwarten. Entsprechende Arbeiten werden in Zukunft in einer Arbeitsgruppe des IPN durchgeführt werden.

Abschließend sei zur weiteren Begründung dieses Ansatzes noch auf einige grundsätzliche Schwierigkeiten eingegangen, die bei der traditionellen Behandlung des Spannungsbegriffs auftreten und die bei dem hier vorgestellten Ansatz vermieden werden können. Gemeint ist die Tatsache, daß mit der Definition der Spannung als Arbeit pro Ladung keine mikroskopische Begründung, sondern nur eine makroskopische Beschreibung der Spannung geliefert wird. Die Definition "Arbeit pro Ladung" deutet nicht auf einen kausalen Zusammenhang hin, wie es das mikroskopische Bild getrennter Ladungen tut, das in der Elektrostatik mit dem Auftreten der elektrischen Spannung verknüpft wird. Beim Fließen einer elektrischen Ladung durch einen Widerstand fällt jedoch üblicherweise dieses mikrophysikalische Bild fort. Die Meßpunkte vor und hinter einem stromdurchflossenen Widerstand können mit dem von traditionellen Lehrbüchern angebotenen Wissen auf der mikrophysikalischen Ebene nicht differenziert werden. Die gleiche Anzahl von Elektronen driften mit gleicher Geschwindigkeit, angetrieben von einem gleich starken Feld, durch beide Leiterquerschnitte, und dennoch tritt ein makrophysikalischer Unterschied auf (s. Abb. 3). Die beiden Leiterquerschnitte sind energetisch nicht identisch, sie liegen auf unterschiedlichem Potential. Aber auch dieser Hinweis auf das Potential ist nur eine Beschreibung und gibt keine kausale Erklärung. Es stellt sich die Frage, ob Schüler diesen Mangel entdecken und was der Lehrer antwortet, wenn er in entspre-

chender Hinsicht gefragt wird.

Schließlich bleibt noch die Frage, die es zu untersuchen gilt, ob und wenn ja, von welchem Alter ab eine explizite Behandlung des Spannungsbegriffs auf mikro-physikalischer Ebene von den Schülern verarbeitet und konstruktiv verwendet werden kann.

Der Definition der Spannung als Arbeit pro Ladung kann als weiterer Nachteil angelastet werden, daß durch diese Definition das Bild von einem direkten Energietransport durch die bewegten Elektronen nahegelegt wird. Dieses- "Huckepackmodell", in dem die Elektronen ein Energiepaket tragen, findet sich sogar in verschiedenen Lehrbüchern, in denen z.B. eine Autobahn mit beladenen und leeren Autos als Analogie zum elektrischen Stromkreis herangezogen wird.

Dieses Modell muß zwangsläufig zu dem Schluß führen, daß die Energie genauso schnell fließt, wie die Elektronen selbst. Es ist zu fragen, wieviel Verwirrung in den Köpfen der Schüler gestiftet wird, wenn sie später erfahren, daß sich die Energie mit Lichtgeschwindigkeit bewegt, die Elektronen aber nur mit einigen mm/s dahindriften und bei Wechselstrom praktisch nicht von der Stelle kommen.

Die (nichtkausale) Beschreibung der Spannung als Energie pro Ladung läßt dann auch die Frage unbeantwortbar, warum das Feld im Außenraum einer geladenen Batterie nach Anschluß an einen Stromkreis nicht mehr von der Entfernung abhängig ist, sondern innerhalb des Drahtes einen konstanten, entfernungsunabhängigen und stets achsial gerichteten Wert annimmt und wieso dann über einem Widerstand plötzlich ein starkes Feld entsteht.

Schließlich entsteht ein weiteres Problem, wenn schnell ablaufende Vorgänge betrachtet werden sollen. Letztere gehören zwar nicht zum traditionellen Inhalt der Elektrizitätslehre der Sekundarstufe 1. Diese Prozesse geraten aber durch die Computertechnologie und durch das Bedürfnis von Schülern, die im Unterricht gelernten Konzepte auf diese Technologie anzuwenden, deutlicher ins Blickfeld. Pulsfrequenzen von einigen MHz und Anstiegsflanken im Nanosekundenbereich sind heute in jedem Mikroprozessor üblich, und es ist zu erwarten, daß für diese Prozesse ein wachsendes Erklärungsbedürfnis besteht. Das Wissen über Gleichgewichtszustände in der Form der Kirchhoffschen Regeln hilf hier naturgemäß nicht weiter, während das hier vorgestellte Konzept mit der Betonung der Oberflächenladungen über den Skin-Effekt einen bruchlosen Übergang zu hochfrequenten Vorgängen und zu Vorgängen des Energietransportes in Hohlleitern ermöglicht.

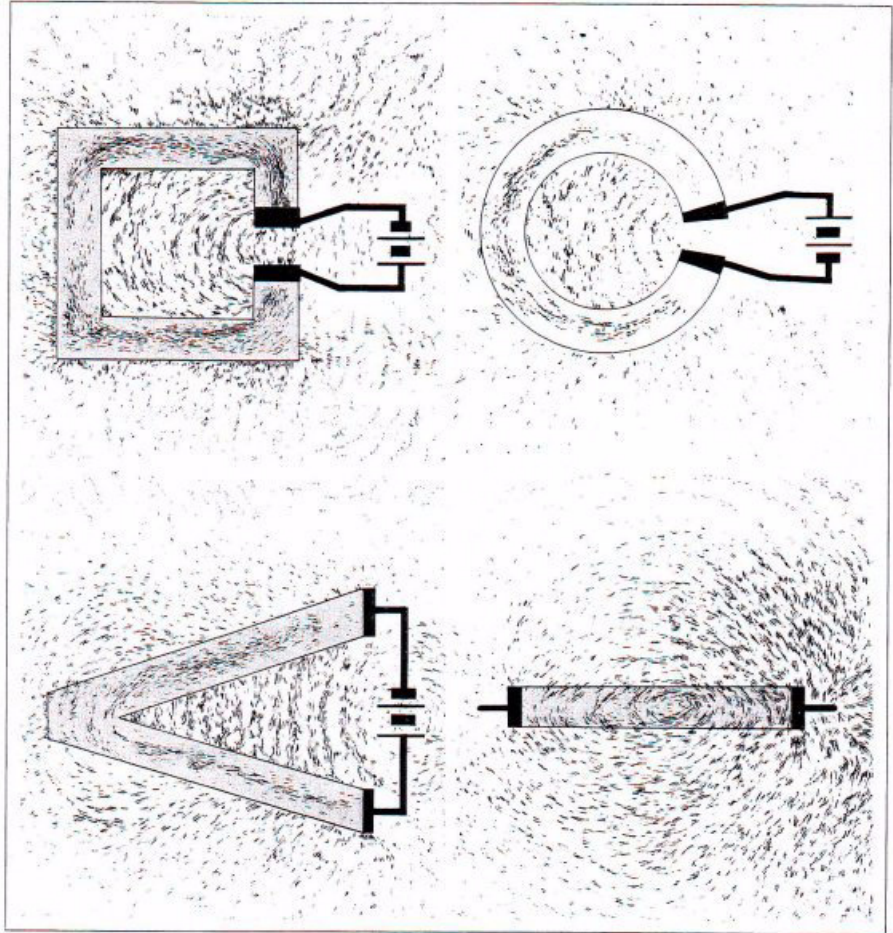


Abb. 1: Elektrisches Feld innerhalb und außerhalb verschieden geformter Stromkreise

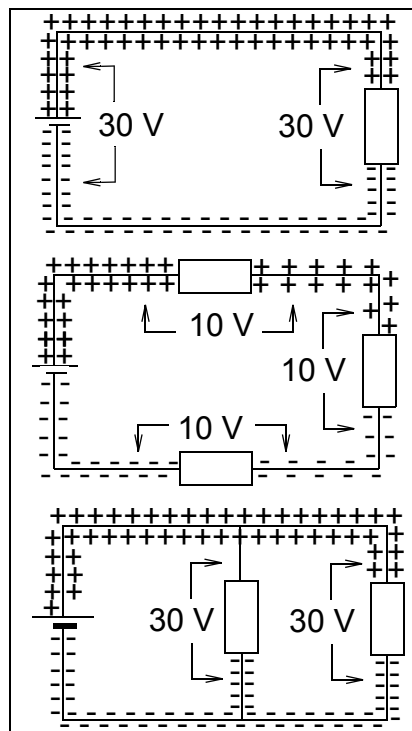
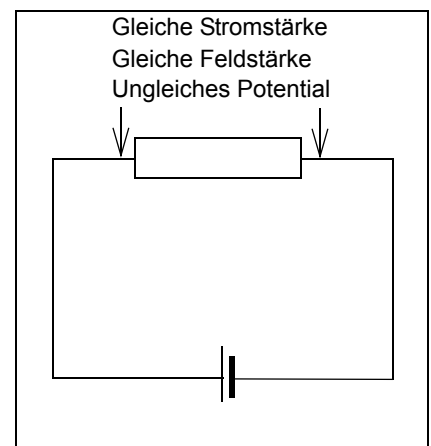


Abb.2: Schematische Darstellung von Oberflächenladungen längs Reihen- und Parallelschaltungen



Literatur

- [1] Jefimenko, O.: Amer. J.Phys .30, 1962, S.19/21
- [2] Härtel, H.: Die elektrische Spannung. In physica didactica, 12, 1985, 3, S. 47-52.
- [3] Härtel, H.: Zur Einführung des Spannungsbegriffs in der Sek. I. In: Härtel, H. (Hrsg.): Zur Didaktik der Physik und Chemie, Hannover: Schroedel, 1980, S. 154-156.

