

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](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](mailto: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

die Schüler zum genauen Beobachten und exakten Denken anzuhalten, wird dieser traditionelle Ansatz problematisch. Es kann nicht zufriedenstellen, dass die Schüler sich mit stationären Zuständen zufrieden geben und nicht Fragen stellen wie:

- Wieso „weiß“ die Batterie, dass in einiger Entfernung ein Widerstand geändert wurde und somit die Stromstärke angepasst werden muss?

oder

- Wie schnell wächst die Stromstärke an, wenn irgendwo im Stromkreis ein Kurzschluss auftritt?

Lernen unsere Schüler, dass schnell ablaufende Prozesse nicht wichtig sind? Lernen sie, dass man Fernwirkung annehmen darf, um solche Fragen zu beantworten? Falls die Schüler solche Fragen nicht stellen: Sollten sie nicht dafür sensibilisiert werden zu erkennen, dass es bei den kausalen Erklärungen zum elektrischen Stromkreis Lücken gibt, die nur unter Einbeziehung von Übergangsprozessen geschlossen werden können?

Moderne Simulationsprogramme bieten eine Möglichkeit, diese Defizite zu beseitigen, wie im Folgenden dargestellt wird.

## 2 Hinweise für den Unterricht

### 2.1 Experimentelle Demonstration

Experimentell lässt sich die Existenz solcher Übergangsprozesse zumindest für den Spezialfall einer Schaltung mit Kondensator vorführen (Abb. 2). Wird das Glühlämpchen nicht direkt an die Spannungsquelle angeschlossen (Abb. 2 rechts), sondern parallel zu einem Kondensator (links), so wird die Verzögerung durch das Auf- und Entladen des Kondensators deutlich sichtbar [2]. Damit dieser Versuch überzeugt, muss die Funktionsweise eines Kondensators im Prinzip bekannt sein. Dies ist umso wichtiger, als zum Verständnis von Oberflächenladungen die Erkenntnis grundlegend ist, dass die Leiter in jedem Stromkreis Kondensatoren darstellen, die auf Grund ihrer Oberfläche auf- bzw. umgeladen werden müssen.

Somit entspricht der obige Versuch qualitativ den gegebenen Umständen. Auch ohne den zugeschalteten Kondensator tritt eine - allerdings sehr kurzzeitige - Verzögerung auf, da die Leiterteile, die Quelle und Lampe verbinden, beim Ein- und Ausschalten mit Oberflächenladungen be- bzw. entladen werden müssen. Durch den parallel geschalteten Kondensator im obigen Versuch wird die zu be- und entladen-

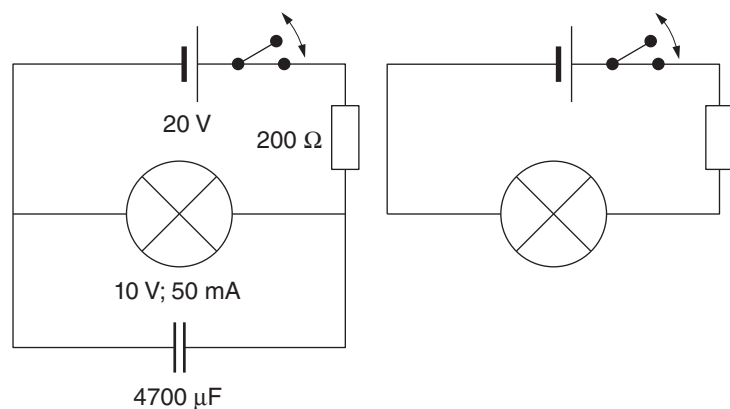
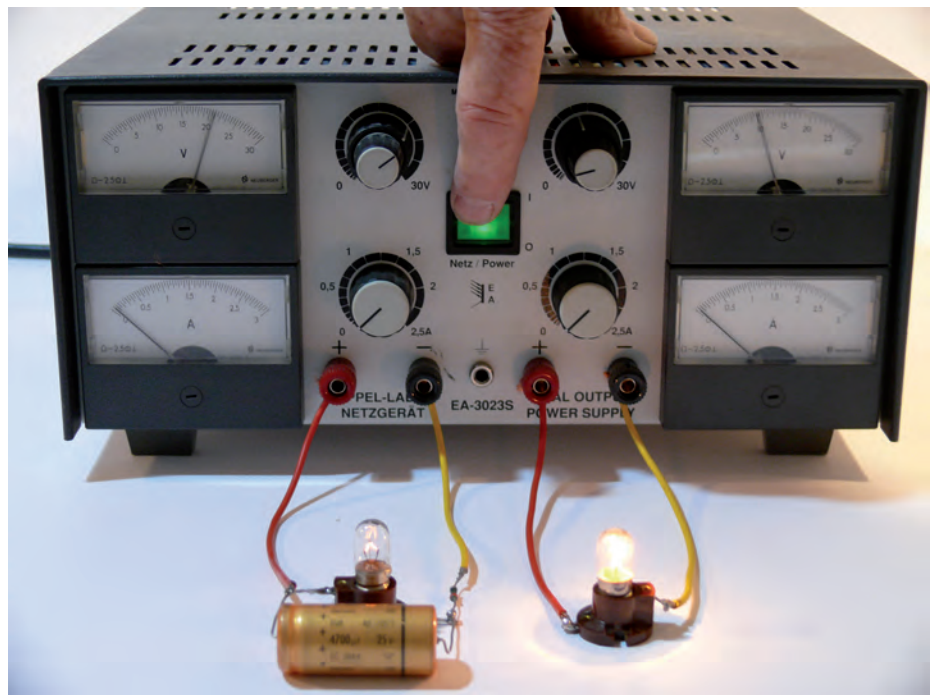


Abb. 2: Demonstration eines Übergangsprozesses

de Oberfläche nur stark vergrößert, um dadurch den Übergangsprozess direkt sichtbar zu machen.

### 2.2 Einsatz von CLOC

#### – Conceptual Learning Of Circuits

Zur expliziten Behandlung von Übergangsprozessen im Unterricht kann ein spezielles Simulationsprogramm mit der Bezeichnung CLOC (Conceptual Learning Of Circuits) hilfreich sein. Dieses Programm wurde ursprünglich entwickelt, um generell die Behandlung des elektrischen Stromkreises im Unterricht zu unterstützen [3]. Das Programm bietet dem Benutzer die Möglichkeit, eigene Stromkreise aus den Elementen Spannungsquelle, Widerstand, Schalter (interaktiv) und Leitungselement zu erstellen. Die Stromstärke wird graphisch und numerisch angezeigt. In einem getrennten Fenster sieht man in einer dreidimensionalen Darstellung die Verteilung des Potentials längs der gesamten Schal-

tung. Als Java-Programm ist CLOC als einzelne Anwendung und als Applet innerhalb von Web-Seiten einsetzbar [4], siehe Abb. 3. Durch die spezielle Art des implementierten Algorithmus wird dieses Programm interessant im Sinne der hier zur Diskussion stehenden Übergangsprozesse. Dieser Algorithmus basiert auf dem sogenannten Containermodell. In diesem Modell werden Widerstände als solche behandelt, während die benachbarten Leiterelemente als Behälter (Container) modelliert werden (Abb. 4).

Ist eine gegebene Schaltung nach diesem Verfahren in einzelne Teilsysteme zerlegt, so wird pro Rechenschritt zunächst jeweils die Differenz der Inhalte benachbarter Behälter ( $h_1 - h_2$ ) bestimmt und danach ein durch den Widerstand vorgegebener Prozentanteil dieser Differenz zwischen den Behältern ausgeglichen (im obigen Beispiel von  $C_1$  nach  $C_2$ ). Eine Ausnahme bildet die Batterie, die eine vorgegebene

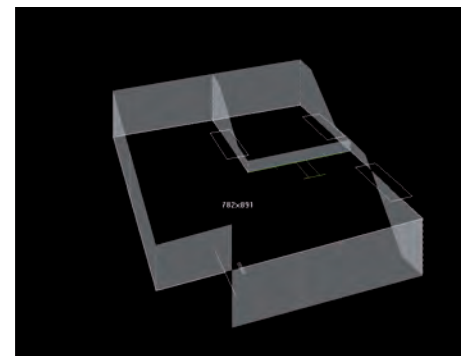
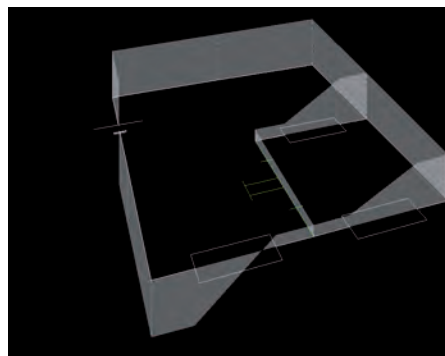
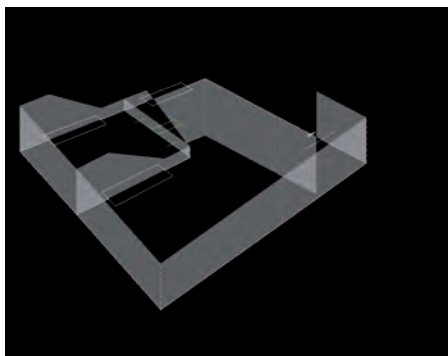
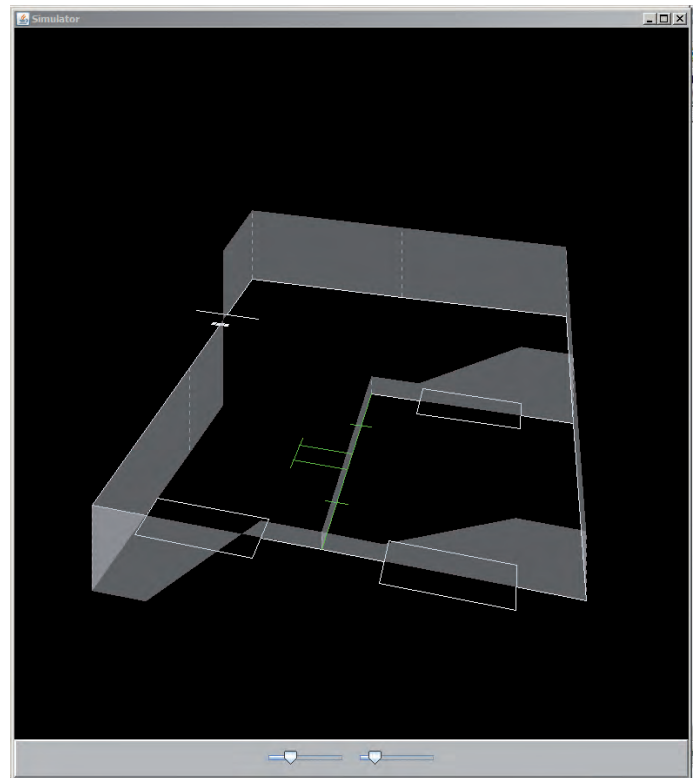
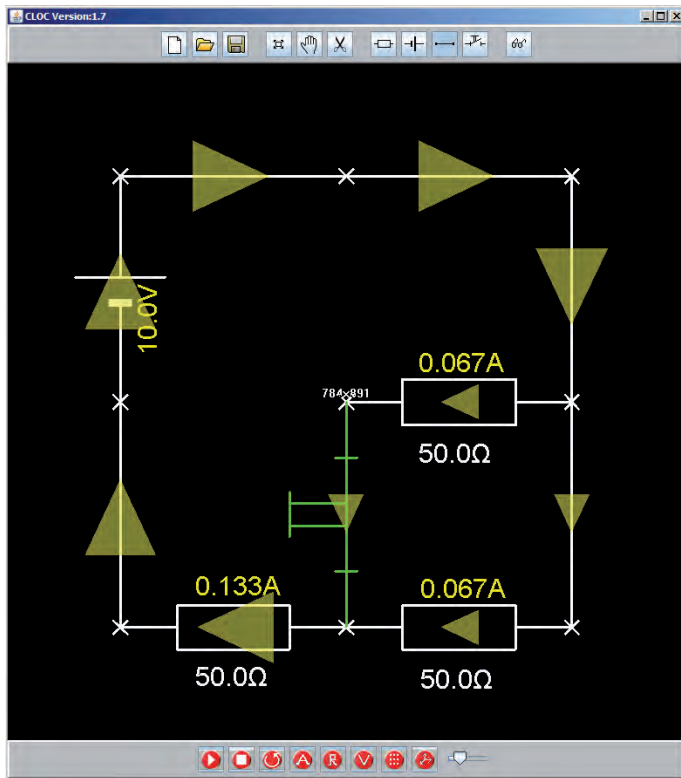


Abb. 3: Bildschirmausgabe des Simulationsprogramm CLOC (mit variabler Blickrichtung auf die 3D-Darstellung)

Differenz der Inhalte benachbarter Behälter aufrechterhält. Nach dem Einschalten breitet sich die von der Spannungsquelle ausgehende Umverteilung in den angeschlossenen Behältern schrittweise aus. Je nach der Zahl der Bauelemente und der Schnelligkeit des Computers zeigt sich für einige Sekunden ein Übergangsprozess, der sich über die gesamte Schaltung ausbreitet, bis das System einen stationären Endzustand erreicht hat. Dieser Endzustand stimmt in jedem Fall mit den zugehörigen Messungen überein.

Ein solcher Endzustand ließe sich mit Hilfe der Kirchhoff'schen Regeln direkt berechnen und dieses Verfahren wird in vielen Simulationsprogrammen angewendet. Ein solches Verfahren ist jedoch aus didaktischer Hinsicht zu kritisieren, denn es verweist wiederum ausschließlich auf die Bedeutung von stationären Zuständen, die bei Änderung von Parametern scheinbar sprunghaft eingenommen werden.

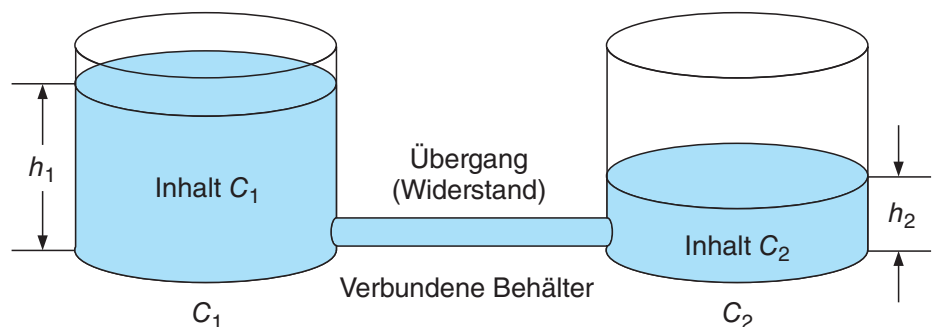


Abb. 4: Modell für einen Widerstand mit zwei Anschlüssen.

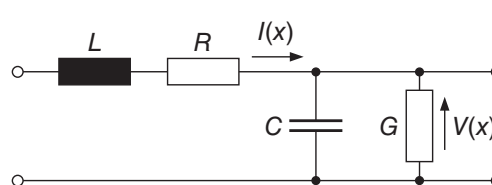


Abb. 5: Element einer Doppelleitung

- L: Induktivität des Leiterelements
- R: Verlustwiderstand der beiden Leiterelemente
- C: Kapazität zwischen den beiden Leiterelementen
- G: Leckwiderstand zwischen den Leitern ( $G = 1/R$ )

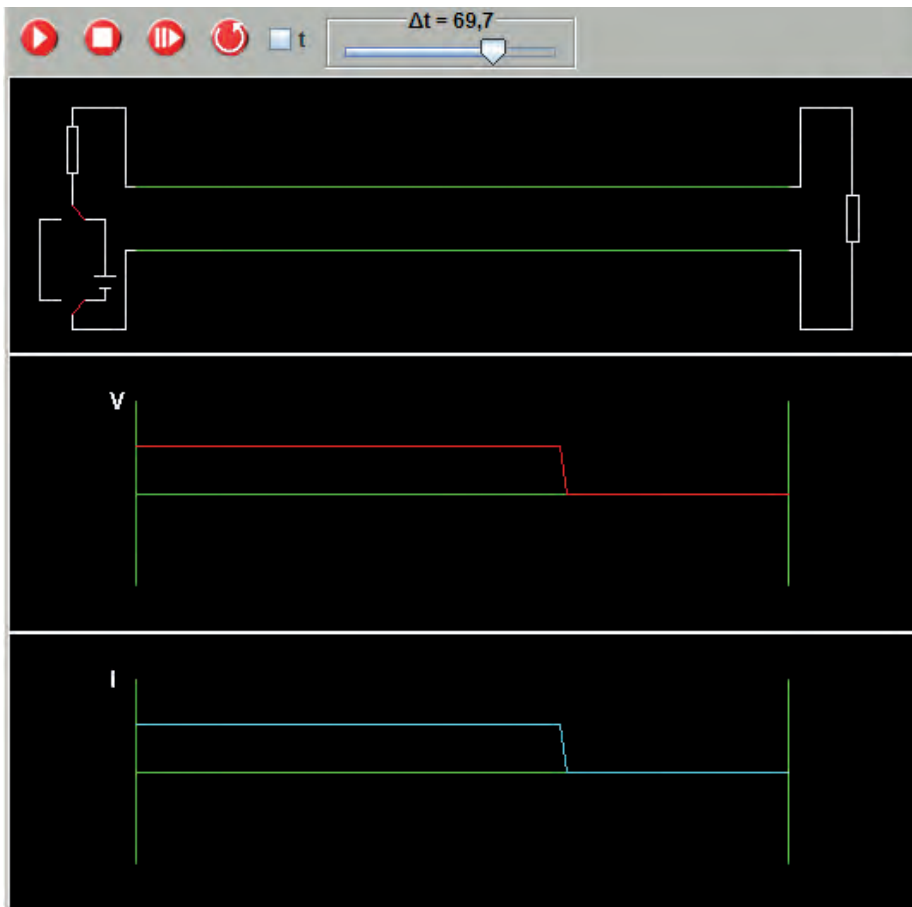
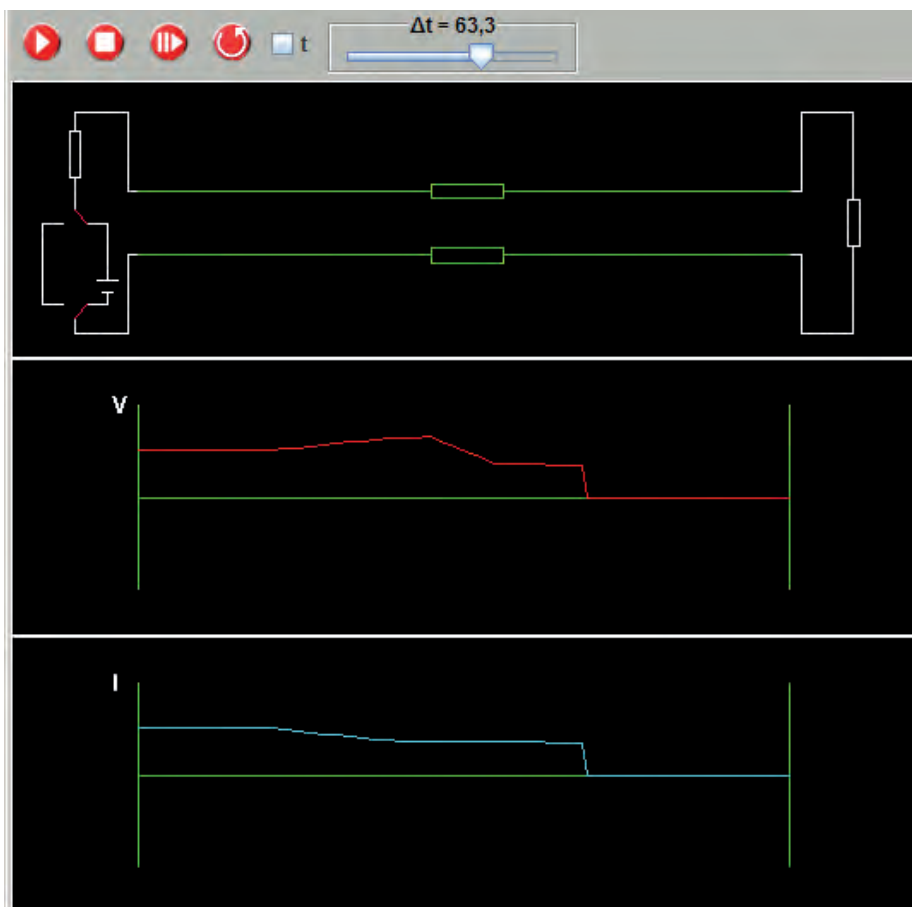


Abb. 6: Einschaltvorgang eines Gleichstroms auf einer Doppelleitung

Abb. 7: Übergangsprozesse bei einer Reihenschaltung (Leitungswiderstände plus Abschlusswiderstand)



Kritik an dem Containermodell kann in zweifacher Hinsicht erhoben werden:

- Zum einen entspricht die gezeigte Verzögerung nur in angenäherter Form den Verhältnissen bei einem Stromkreis, in dem Kapazitäten dominieren. Angenähert soll heißen, dass in dem Containermodell Reflexionsprozesse nicht erfasst werden, die besonders bei Stromkreisen mit den üblichen kleinen Leitungskapazitäten dominieren.
- Zum zweiten wird jedes zusammenhängende Leiterelement als ein einzelner Behälter modelliert und damit entfallen Ausbreitungsvorgänge längs solcher Leiterelemente. Diese Einschränkungen erscheinen als akzeptabel, wenn man die mit dem Programm CLOC sichtbar gemachten Übergangsprozesse als eine Näherung und primär als ein didaktisches Hilfsmittel betrachtet, um die sonst stets übergangenen Übergangsprozesse hervorzuheben. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf das im folgenden vorzustellende Programm „TL-Transportleitung“, in dem für einen Spezialfall alle Übergangsprozesse exakt berechnet und angezeigt werden. Somit können die stark übertriebenen und vergrößerten Übergangsprozesse „à la CLOC“ als Zwischenschritt zur Demonstration realer Verhältnisse aufgefasst werden.

### 2.3 Das Simulationsprogramm „TL-Transportleitung“

Eine Visualisierung der Übergangsprozesse auf einer Doppelleitung bietet das Programm „TLTransportleitung“. Der verwendete Algorithmus stellt eine numerische Lösung der beiden folgenden Differentialgleichungen dar, die auch unter der Bezeichnung „Transportgleichungen“ bekannt sind.

$$\frac{\partial}{\partial x} I(x, t) = -C \frac{\partial}{\partial t} V(x, t) - V(x, t) G \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} V(x, t) = -L \frac{\partial}{\partial t} I(x, t) - I(x, t) R \quad (2)$$

Diese Gleichungen ergeben sich, in dem eine Doppelleitung zunächst als eine Aneinanderreihung identischer Elemente der in Abb. 5 dargestellten Form modelliert wird. Im Fall des Simulationsprogramms TL besteht die modellierte Doppelleitung aus 200 solcher Elemente. Auf jedes dieser Elemente wird die Knotenregel (Gleichung 1) und die Maschenregel (Gleichung 2) angewendet (mit  $L, R, C, G$  pro Längeneinheit) [5].

Aus der numerischen Lösung dieser Differentialgleichungen für alle  $n$  Elemente der Leitung, zusammen mit den entspre-

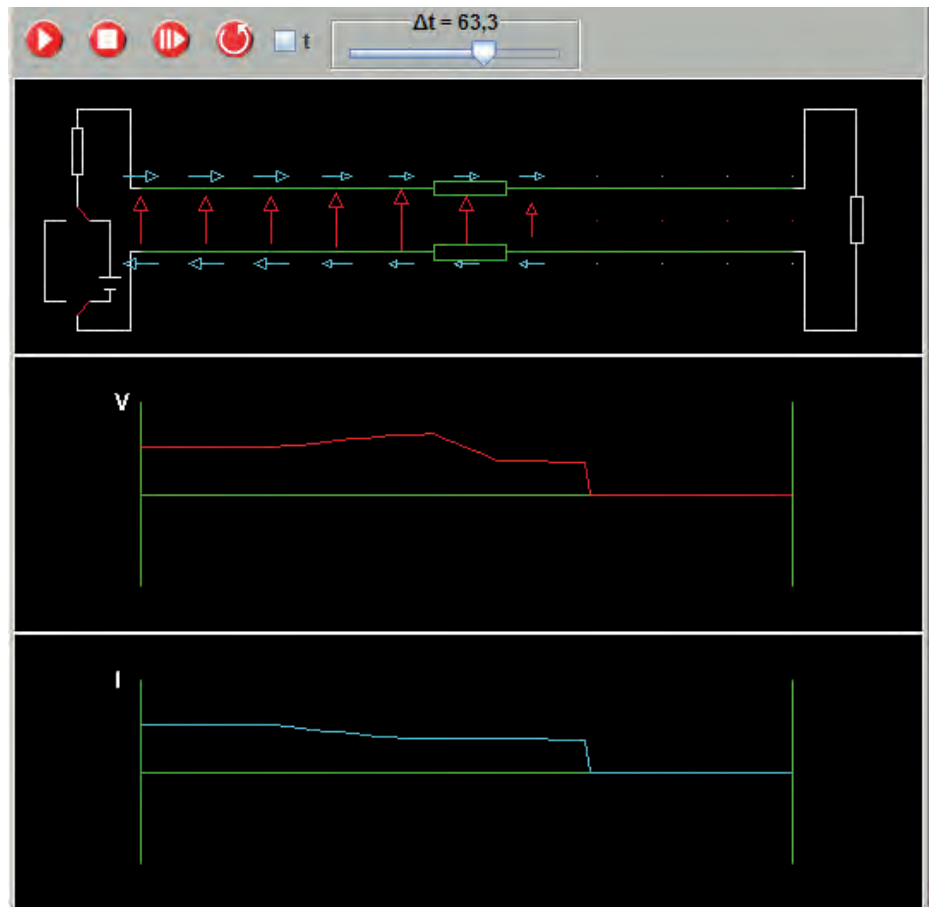
chenden Rand- und Anfangsbedingungen, ergeben sich die Funktionen  $V(x)$  und  $I(x)$ . Deren zeitliche Veränderung wird in dem Simulationsprogramm TL in entsprechenden Diagrammen parallel zu der Doppelleitung dargestellt (Abb. 6). Bei dieser eindimensionalen Lösung wird eine geradlinige Doppelleitung vorausgesetzt, bei der Änderungen senkrecht zur Längenausdehnung zu vernachlässigen sind. Der implementierte Algorithmus hat sich unter allen Rand- und Anfangsbedingungen als stabil erwiesen, ohne Anzeichen irgendwelcher, nur numerisch bedingter und damit unrealistischer Effekte. Ursprünglich ist dieses Programm entwickelt worden, um die Behandlung von Wellenausbreitungen zu unterstützen [3]. Als Java-Programm ist TL als einzelne Anwendung und als Applet innerhalb von WEB-Seiten einsetzbar [6].

Im Zusammenhang mit dem hier interessierenden Stromkreis in der Form von Reihen- und Parallelschaltungen erhält dieses Programm seine Bedeutung durch die Möglichkeit, diese beiden Schaltungstypen in einfacher Form darzustellen und Übergangsprozesse realitätskonform simulieren zu können. Die beiden symmetrisch angeordneten Widerstände in der Mitte bilden mit dem Abschlusswiderstand eine Reihenschaltung mit variierbaren Widerstandswerten (Abb. 7). Beim Auftreffen einer Strom-/ Spannungsflanke lassen sich alle einsetzenden Reflexionen bis zum Erreichen des stationären Endzustandes verfolgen. Zur weiteren Unterstützung der Anschauung lassen sich Spannungs- und Stromverhältnisse auf den Leitungen durch Pfeile kennzeichnen (Abb. 8). Anstelle der Widerstände in der Mitte der Doppelleitung besteht die Möglichkeit, in einem eng begrenzten Gebiet beide Leitungen mit einem einstellbaren Widerstand zu verbinden. Dadurch entsteht zusammen mit dem Abschlußwiderstand eine Parallelschaltung, an der wiederum alle ablaufenden Reflexionen bis zum Erreichen des stationären Endzustandes verfolgt werden können (Abb. 9).

### 3 Zusammenfassung

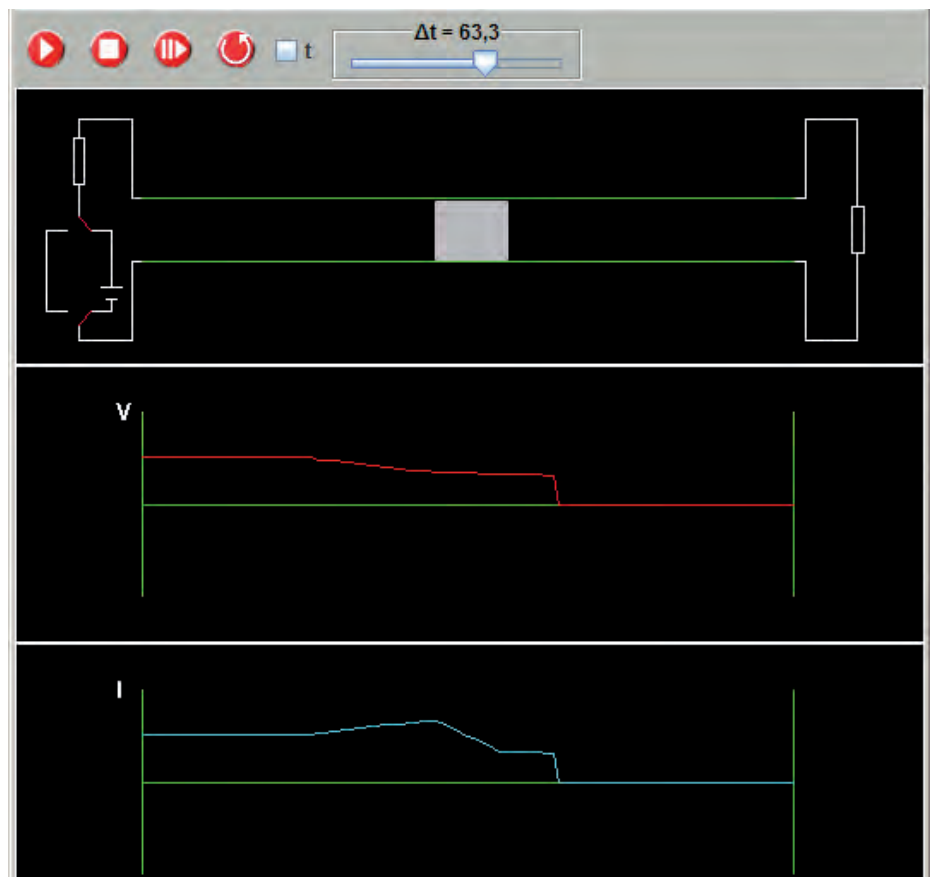
Der elektrische Stromkreis kann im praktischen Umgang als ein sehr einfaches System betrachtet werden. Entweder liegt eine Spannung an oder sie liegt nicht an. Entweder fließt ein Strom oder er fließt nicht. Auch stellen die Gesetze zur Beschreibung stationärer Zustände keine besonderen mathematischen Anforderungen.

Will man aber verstehen, wie der Stromkreis wirklich funktioniert, so steht man vor einer anspruchsvollen Aufgabe. Man



**Abb. 8:** Kennzeichnung der Richtung und Stärke des elektrischen Feldes (rot) und der Stromstärke (grün) längs einer Doppelleitung

**Abb. 9:** Übergangsprozesse bei einer Parallelschaltung (Leitende Region zwischen den Leitungen plus Abschlusswiderstand)



muss die Zusammenhänge erfassen, die dem ganzen System zugrunde liegen und nachvollziehen, was ein Kraftschluss in einem geschlossenen System bedeutet und welche Folgen daraus abzuleiten sind. Man muss erkennen, warum sich auf jedem stromdurchflossenen Leiter Oberflächenladungen bilden und wie diese in Rückkopplung mit den strömenden Leitungselektronen und der antreibenden Batterie dafür sorgen, dass ein konstanter Strom fließen und sich ein stationärer Zustand einstellen kann. Schließlich gehört zu jeder Untersuchung von stationären Zuständen die Erkenntnis, dass Übergangprozesse existieren, deren Art und Eigenschaften im Prinzip erkannt sein sollten.

Welche dieser Inhalte sollen für den Unterricht ausgewählt werden und in welcher Tiefe und Ausführlichkeit? Im Ver-

gleich mit dem Bergsteigen entspricht dies der Frage nach dem Schwierigkeitsgrad und damit der Entscheidung, wann Überforderung und Versagen und wann Unterforderung und Motivationsverlust drohen. Diese Entscheidung kann nur von einem Bergführer getroffen werden, der alle potentiellen Gefahrenquellen kennt und jede notwendige Unterstützung in kritischen Situationen bieten kann. ■

#### Literatur

[1] Härtel, H. et al.: Test about Voltage - A Basic Term in Electricity. Results.

[http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~hhaertel/Spannung/voltage\\_test\\_result.pdf](http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~hhaertel/Spannung/voltage_test_result.pdf)

[2] Ein Video zu diesem Versuch findet sich unter <http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~hhaertel/PUB/Lampe-Kondensator.htm>

[3] Härtel, H.: Der sogenannte einfache elektrische Stromkreis - Computerunterstützte Lernmaterialien. <http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~hhaertel>

[4] Härtel, H. & Divjak, S.: Simulationsprogramm CLOC - Conceptual Learning Of Circuits Dokumentation. [http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~hhaertel/CLOC\\_doc/CLOC\\_doc\\_de/index.htm](http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~hhaertel/CLOC_doc/CLOC_doc_de/index.htm)

[5] Das gleiche Ergebnis folgt aus den Maxwell'schen Gleichungen als eindimensionale Lösung.

[6] Härtel, H.; Martin, E. & Esquembre, F.: Simulationsprogramm TL-Transportleitung Dokumentation [http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~hhaertel/TL\\_doc/TL\\_doc\\_de/index.htm](http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~hhaertel/TL_doc/TL_doc_de/index.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](mailto:haertel@astrophysik.uni-kiel.de)

# Wie dreht er denn nun?

## Grundsätzliches zur Lorentzkraft

### M. Hopf

#### 1 Der einfachste Elektromotor der Welt

Diese Anordnung (Abb. 1) ist inzwischen allgemein bekannt. Sie hat es sogar schon auf das Titelbild dieser Zeitschrift geschafft [1]. Etwas ausführlicher diskutieren Ucke und Schlichting [2] diesen Motor, einen guten Überblick über seine Geschichte, den Aufbau, die Erweiterung dieser Anordnung mit zwei Magneten zu einem Roller sowie über die Literatur bietet Stewart [3]. Wieso ist es also immer noch sinnvoll, über den einfachsten Motor der Welt zu schreiben? In meinen Augen bietet die Diskussion des Motors eine wunderbare Gelegenheit, grundlegende Aspekte und Verständnisprobleme zu Kräften auf stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld zu bearbeiten. Wie sich im Folgenden zeigen wird, ergeben sich hier grundlegende Probleme der Erklärung besonders im Zusammenhang mit den verschiedenen Modellebenen der Elektrodynamik, die in den wenigsten Lehrbüchern explizit angesprochen werden. Für aktiv mitarbeitende Schülerinnen und Schüler ergeben sich dadurch erhebliche Verständnisschwierigkeiten. Wie schwer diese wiegen, habe ich zum ersten Mal auf dem

International Young Physicist Tournament 2009 festgestellt und seither in vielen Gesprächen mit Jugendlichen und Erwachsenen bestätigt gefunden. Bei dem Wettbewerb dieses Jahres war folgendes Problem gestellt worden:

“16. Electromagnetic motor: Attach a strong light magnet to the head of a steel screw. The screw can now hang from the terminal of a battery. Completing the circuit by a sliding contact on the magnet causes the screw to rotate. Investigate the parameters that determine the angular velocity of the screw.” [4]

Es war beeindruckend zu erleben, auf welch hohem Niveau die teilnehmenden Schülerinnen und Schüler im Vorfeld zu den Aufgaben recherchiert, experimentiert, modelliert, gerechnet und dokumentiert hatten und wie intensiv sie darüber auf der Bühne diskutierten. Aber gerade bei diesem Problem kam es zu erbitterten und bis zum Ende des Turniers eigentlich nicht wirklich geklärten Diskussionen zwischen Schülerinnen und Schülern und auch zwischen Jurorinnen und Juroren. Ausgangspunkt war die Drehrichtung des Motors.

#### 2 Drehrichtung

Zunächst erscheint es ja ganz einfach, das Drehen des Motors vorherzusagen: Es gibt einen stromdurchflossenen Leiter und ein Magnetfeld. Also wirkt – falls nicht beide parallel sind – eine Kraft. Zur Erinnerung: Auf einen stromdurchflossenen Leiter (und nicht, wie manchmal argumentiert, auf den Strom) im Magnetfeld wirkt eine Kraft, es gilt:

$$\vec{F} = \vec{I} \times \vec{B} \quad (1)$$

Da sich der Motor beginnt zu drehen, wirkt offenbar ein Drehmoment und damit eine Kraft. Da es sich in der Regel beim Motor aufgrund der Form der Schraube um eine geometrisch relativ komplizierte Anordnungen handelt, soll für die folgende Diskussion ein vereinfachtes Modell verwendet werden. Der Magnet ist mit der Batterie wie in Abb. 2 verbunden: Eine Leitung berührt den Magneten genau in der Mitte der Oberseite, die andere Leitung berührt den Magneten am Rand des Zylinders. Der Nordpol des Magneten ist der Batterie zugewandt und mit dem Minuspol der Batterie verbunden. Das Feld des Zylindermag-