

19. Elektrische Energie und der Fluss der Elektronen in Leitern

Rainer Hauser

Februar 2012

1 Einleitung

1.1 Elektromagnetismus

Eine der grossartigsten Leistungen des neunzehnten Jahrhunderts war die Entwicklung der modernen Elektrodynamik und elektromagnetischen Lichttheorie durch James Clerk Maxwell, wodurch die drei physikalischen Gebiete Elektrizität, Magnetismus und Optik zu einer einheitlichen Theorie zusammenwuchsen. Noch heute träumen Physiker davon, auf ähnlich elegante Weise die starke und schwache Wechselwirkung sowie die Gravitation mit der elektromagnetischen Wechselwirkung zu einer einheitlichen Theorie zusammenfassen zu können.

Die starke Wechselwirkung hält die Protonen und Neutronen im Atomkern zusammen und ist damit die dominierende Kraft innerhalb eines Atomkerns. Die Gravitation andererseits ist die dominierende Kraft in astronomischen Dimensionen, weil sie zwar die schwächste der vier Wechselwirkungen ist, aber im Gegensatz zur starken und schwachen Wechselwirkung beliebig weit reicht und im Gegensatz zur elektromagnetischen Kraft immer anziehend ist. Im menschlichen Alltag ist die elektromagnetische Kraft eher eine Randerscheinung, weil sich die positiven und negativen Ladungen mehr oder weniger gegenseitig aufheben. Im atomaren Bereich aber ist sie die dominante Kraft. Sie bewirkt den Zusammenhalt von Atomkern und Atomhülle zu einem Atom einerseits und zwischen den Atomen in Molekülen und festen Körpern oder Flüssigkeiten andererseits.

1.2 Eigenschaften der elektrischen Energie

Auch wenn die elektromagnetische Kraft in unserem Alltag eher eine Randerscheinung ist, sind die technischen Anwendungen der elektrischen Energie aus unserem Leben nicht mehr wegzudenken. Wir beleuchten unsere Wohnungen, bewegen Eisenbahnzüge und kochen die Mahlzeiten mit ihr. Durch ihre vielseitigen Anwendungen ist sie eine der wichtigsten Energieformen für die menschliche Gesellschaft geworden.

Die elektrische Energie ist zudem über Starkstromleitungen leicht transportierbar, wenn auch nicht ohne Verluste, und sie ist auf verschiedene Weise produzierbar. Mit Wasser-, Wind- und Kernkraft, aber auch mit Kohle oder Erdölprodukten lässt sich elektrische Energie erzeugen. Sie ist aber nicht speicherbar. Deshalb benutzt man billigen Nachtstrom, um Wasser in die Stauseen zu pumpen, sodass man zu Zeiten grosser Nachfrage damit teuren Strom herstellen kann.

2 Elektrischer Strom

2.1 Elektrische Ladung

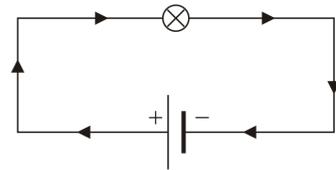
Elektrische Ströme haben *elektrische Energie*. Sie setzt sich aus potenzieller Energie durch die elektromagnetische Kraft und aus kinetischer Energie durch die ständige Bewegung der Elektronen zusammen. Bewegt sich eine elektrische Ladung bestehend aus Elektronen durch einen Kupferdraht, so fliesst darin ein elektrischer Strom.

Es sind also die Elektronen, die den elektrischen Strom bewirken. Sie sind elektrisch negativ geladene Teilchen. Die *elektrische Ladung* Q eines Körpers misst man in *Coulomb* mit der Abkürzung C. Die elektrische Ladung eines Elektrons ist bis auf das Vorzeichen gleich gross wie diejenige eines Protons. Man nennt diese Grösse die *Elementarladung*. Sie beträgt $e = 1.60219 \cdot 10^{-19}$ C. Die Ladung eines Protons ist $Q_{Proton} = e$, und die Ladung eines Elektrons ist $Q_{Elektron} = -e$.

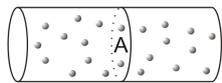
2.2 Elektrischer Stromkreis

Wenn man das eine Ende eines Kupferdrahts an den positiv geladenen Plus-Pol einer Batterie und das andere Ende an den negativ geladenen Minus-Pol hält, werden die Elektronen vom Minus-Pol elektrisch abgestossen und vom Plus-Pol elektrisch angezogen. Sie bewegen sich also auf den Plus-Pol zu, und es kommt zu einem elektrischen Strom. Aus historischen Gründen wurde aber festgelegt, dass der Strom ausserhalb der Batterie in entgegengesetzter Richtung vom Plus-Pol zum Minus-Pol fliesst.

Wenn ein Strom fliesst, gibt es immer einen Kreislauf, den so genannten *elektrischen Stromkreis*. Ein Strom fliesst nur, wenn es einen Stromkreislauf gibt. In der nebenstehenden Abbildung ist ein schematischer Stromkreislauf gezeigt, bei dem eine Batterie eine Glühbirne zum Leuchten bringt. Das Zeichen unten bedeutet die Batterie mit dem Plus-Pol links und dem Minus-Pol rechts, und das Zeichen mit dem Kreuz in einem Kreis oben im Kreislauf stellt die Glühbirne dar.



2.3 Stromstärke



Weil ein elektrischer Strom durch die Bewegung der Elektronen im Draht entsteht, ist die *elektrische Stromstärke* I durch die Bewegung von elektrischer Ladung durch einen Drahtquerschnitt A wie in der nebenstehenden Abbildung gezeigt festgelegt. Genauer ist die Stromstärke I definiert durch die Ladung Q , die im Zeitintervall Δt an einer Stelle des Drahtes vorbei fliesst. Die Stromstärke

$$I = \frac{Q}{\Delta t} \quad (1)$$

wird in *Ampere* abgekürzt als A gemessen. Es gilt $1 \text{ A} = 1 \frac{\text{C}}{\text{s}}$. Die SI-Einheit Ampere ist eine Grundeinheit der Physik. (Besteht die Ladung Q aus N Elektronen, so gilt $Q = N \cdot Q_{Elektron}$.)

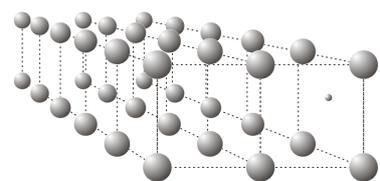
Beispiele:

Durch eine an einer Steckdose angeschlossenen 80-Watt-Glühbirne fliesst ein Strom von 0.5 A, und durch eine 3-Watt-Glühbirne an einer 6-Volt-Batterie fliesst ein Strom von 0.35 A. Bei einem Gewitter können in Blitzen Ströme mit Stromstärken bis zu 50 kA fließen.

3 Leiter und Isolatoren

3.1 Kollisions-Modell

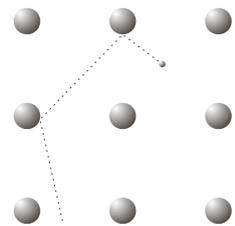
In festen Körpern liegen die Atome nahe bei einander. Weil dabei die äussersten Elektronen in der Atomhülle nicht nur vom eigenen Kern, sondern auch von den Kernen in der näheren Umgebung angezogen werden, kann es passieren, dass sich einzelne Elektronen aus der Atomhülle lösen und sich frei zwischen den verbleibenden Ionen bewegen. Solche Elektronen nennt man *freie Elektronen*. Weil sich diese Elektronen wie ein Gas zwischen den Ionen bewegen, spricht man von einem Elektronengas. In der nebenstehenden Abbildung ist ein einzelnes freies Elektron gezeigt, das sich im Raum zwischen den regelmässig als Gitter angeordneten Atomen beziehungsweise Ionen bewegen kann.



Solche freie Elektronen bestimmen, ob in einem Material ein Strom fließen kann oder nicht. In einem *Leiter*, in dem ein Strom fließen kann, befinden sich in der Größenordnung von 10^{20} freie Elektronen pro Kubikmillimeter, während sich in einem *Isolator*, in dem kein Strom fließen kann, nur in der Größenordnung von einem freien Elektron pro Kubikmillimeter befindet. Unter den Leitern findet man Eisen, Kupfer und alle übrigen Metalle, während die meisten Kunststoffe und Keramiken, aber auch Glas, reines Wasser und Gase zu den Isolatoren gehören. Ein Kabel besteht aus einem Draht aus Kupfer und einer Isolationsschicht darum herum. Längs des Kabels kann so isoliert nach aussen ein Strom fließen.

Schliesst man das eine Ende eines Drahts an den Plus- und das andere Ende an den Minus-Pol einer Batterie an, so fließt ein Strom. Die freien Elektronen werden vom negativ geladenen Minus-Pol abgestossen und vom positiv geladenen Plus-Pol angezogen. Sie bewegen sich mit der so genannten Driftgeschwindigkeit vom Minus- zum Plus-Pol.

Die Bewegung der freien Elektronen ist aber nicht geradlinig. Sie stossen wie in der nebenstehenden Abbildung gezeigt dauernd mit Ionen zusammen, werden dadurch abgebremst und abgelenkt. (Bei einem Zusammenstoss mit einem Ion kommt ein freies Elektron der Restelektronenhülle des Ions so nahe, dass es durch deren Elektronen abgestossen wird.) Die freien Elektronen verlieren dabei dauernd einen Teil ihrer kinetischen Energie. Durch die *Beschleunigungsarbeit* der Batterie werden diese Verluste ersetzt. Trennt man aber den Draht von der Batterie, kommt der elektrische Strom durch die Kollisionen der freien Elektronen mit den Ionen praktisch sofort zum Stillstand.



3.2 Elektrischer Widerstand

Durch die Kollisionen mit den freien Elektronen nimmt die kinetische Energie und damit die thermische Bewegung der Ionen zu. Somit erwärmt sich der Draht. In einer Glühbirne beginnt der Wolfram-Draht zu glühen, und eine Herdplatte erhitzt sich so, dass man auf diese Weise Wasser kochen kann. Das sind beabsichtigte Wirkungen. Als unerfreuliche Wirkung kann aber auch ein Wohnungsbrand entstehen, wenn sich ein Kabel zu sehr erhitzt, zu glühen beginnt und die isolierende Schicht schmilzt.

Die Kollisionen zwischen Elektronen und Ionen bewirken das, was man den *elektrischen Widerstand* nennt. Er ist in verschiedenen Leitern verschieden stark, hängt aber auch von der Temperatur ab. Sind die Ionen in einem leitenden Material als Gitter regelmässig angeordnet, ist der Widerstand kleiner als in einem unregelmässig angeordneten Material. In einem Stromkabel sollte der Widerstand so klein wie möglich sein, damit der Draht sich möglichst wenig erwärmt und den Strom mit wenig Verlust leitet, während der Widerstand in einer Herdplatte gross sein muss, damit es zu einer Erhitzung kommt.

Der elektrische Widerstand hängt deshalb von der Temperatur ab, weil bei grösserer Temperatur die thermische Bewegung der Ionen stärker ist und damit die Anzahl Kollisionen mit freien Elektronen zunimmt. Schnellere Zitterbewegung der Ionen hat zur Folge, dass sie in der kurzen Zeit, in der sich ein freies Elektron in ihrer Umgebung aufhält, ein grösseres Gebiet abdecken, in dem es zu Kollisionen kommen kann.

3.3 Supraleitung

Metalle und leitende keramische Materialien werden bei tiefen Temperaturen supraleitend, und der elektrische Strom fliesst ohne elektrischen Widerstand verlustfrei. In einem supraleitenden, ringförmigen Draht fliesst der Strom weiter, auch wenn man ihn von der Batterie trennt. Das einfache Kollisionsmodell kann das Phänomen der Supraleitung nicht erklären. Selbst bei einer Temperatur nahe bei 0 K müssten die freien Elektronen noch mit den Ionen kollidieren und abgebremst werden.

3.4 Driftgeschwindigkeit

Obwohl die Momentangeschwindigkeit eines Elektrons in der Größenordnung $v_M = 10^9 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ ist, resultiert nur eine Driftgeschwindigkeit von ungefähr $v_D = 0.1 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$, denn ein Elektron kollidiert etwa 10^{14} -mal pro

Sekunde mit einem Ion, ändert somit ebenso oft seine Richtung und bewegt sich auf einem Zickzackweg, der alles andere als zielgerichtet ist. Die freien Elektronen bewegen sich auch nicht nur immer in Richtung auf den Plus-Pol der Batterie zu, sondern fast ebenso häufig in die Gegenrichtung.

Man kann die Bewegung der freien Elektronen mit der Bewegung von Menschen in einem Einkaufszentrum vergleichen. Zu gewissen Zeiten ist die Anzahl Leute, die herein kommt, etwa gleich gross wie die Anzahl Leute, die heraus geht, und innerhalb des Einkaufszentrums bewegen sich die Menschen ungeordnet zwischen und in den verschiedenen Läden. Zu anderen Zeiten wie etwa gegen Ladenschluss bewegen sich die Leute zwar immer noch in und zwischen den Geschäften, aber es ist ein gewisser Trend zu den Ausgängen zu bemerken. Auf ähnliche Weise bewegen sich die freien Elektronen in einem an einer Batterie angeschlossenen Draht ungeordnet in allen Richtungen, haben aber eine sehr kleine Tendenz sich eher dem Plus-Pol als dem Minus-Pol zu nähern, sodass netto ein bisschen mehr freie Elektronen in die Richtung zum Plus-Pol streben.

Wenn die Driftgeschwindigkeit viel weniger als ein Millimeter pro Sekunde ausmacht, stellt sich die Frage, weshalb das Licht sofort angeht, wenn wir einen Stecker an einem Kabel mit einer Lampe in eine Steckdose stecken. Der Grund ist der, dass im Kabel auch freie Elektronen sind. Es ist wie bei einem Wasserschlauch, wenn man den Wasserhahn aufdreht. Ist schon Wasser im Schlauch, kommt vorne sofort Wasser heraus. Ist der Schlauch aber leer, so dauert es eine Weile, bis Wasser kommt.

Man kann sich die Situation auch mit der nebenstehenden Abbildung klar machen. Füllt man eine Röhre vollständig mit Erbsen und drückt weitere Erbsen hinein, so kommen auf der anderen Seite der Röhre Erbsen heraus. Eine einzelne Erbse legt nur einen kurzen Weg zurück, aber jede Erbse drückt andere Erbsen zur Seite, sodass der kleine Weg einer einzelnen Erbse dazu führen kann, dass eine andere Erbse weit entfernt aus der Röhre fällt.

