

Der Begriff Ladung ist nicht weiter erklärbar. Man kann auf Ladungen nur aufgrund der Kräfte schließen, die sie aufeinander ausüben.

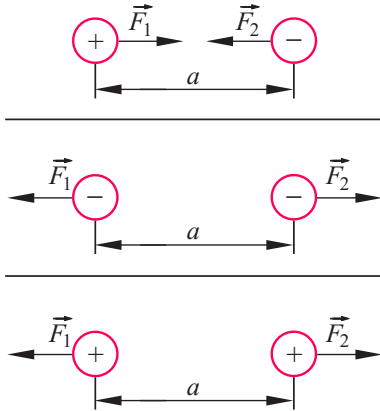


Bild 1.1 COULOMB-Kräfte auf Ladungen

Mit dem COULOMB-Gesetz für Kräfte auf Ladungen wollen wir uns im Abschn. 3.2 befassen. Vorweggenommen sei, dass der Betrag der Kraft, die zwei Ladungen  $Q_1$  und  $Q_2$  aufeinander ausüben, proportional dem Produkt der Ladungen und umgekehrt proportional dem Quadrat des Abstandes  $a$  der Ladungsschwerpunkte (Bild 1.1) ist:

$$F \sim \frac{|Q_1 Q_2|}{a^2} \quad (1.2)$$

Die COULOMB-Kräfte auf Ladungen sind formelmäßig analog zur Gravitationskraft, mit der sich zwei Massen  $m_1$  und  $m_2$  anziehen:

$$F \sim \frac{m_1 m_2}{a^2} \quad (1.3)$$

Im Gegensatz zur stets positiven Masse können Ladungen unterschiedliche Vorzeichen haben; es gibt bei ihnen anziehende und abstoßende Kräfte.

Zum Heben schwerer Lasten sind die COULOMB-Kräfte zwar nicht geeignet, aber es gibt wichtige technische Anwendungen; so werden z. B. beim Laserdrucker die elektrisch geladenen Tonerpartikel durch COULOMB-Kräfte an den vorbestimmten Stellen festgehalten, bis sie durch Erhitzen aufgeschmolzen und damit endgültig fixiert sind.

## 1.1.2 Ladungsträger

Jede Ladung ist an einen **Ladungsträger (charge carrier)** gebunden. Diese sind die Atombausteine Elektron und Proton; ihre Ladung wird **Elementarladung (elementary charge)**  $e$  genannt:

$$e = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad (1.4)$$

Jede Ladung  $Q$  ist ein ganzes Vielfaches der Elementarladung; so besteht z. B. die Ladung  $Q = 1 \text{ C}$  aus  $6,24 \cdot 10^{18}$  Elementarladungen.

Die Vorgänge im Bereich von Atomen sind sehr kompliziert. Man versucht deshalb, sie mithilfe eines Modells zu veranschaulichen.

Ein **Modell** ist ein gedankliches Hilfsmittel, das einen unanschaulichen Vorgang oder Zusammenhang in einfacher und damit leicht verständlicher Form beschreibt.

Ein Modell wird als brauchbar angesehen, wenn die sich daraus ergebenden Schlussfolgerungen mit den in der Natur beobachteten Erscheinungen übereinstimmen; dies ist oft nur bei einem Teil der Vorgänge der Fall.

Für die Beschreibung grundlegender Vorgänge der Elektrotechnik ist das **BOHRsche Atommodell** ausreichend; darin besteht ein Atom aus Protonen und Neutronen, die den **Atomkern** bilden, und aus Elektronen, die diesen in der **Elektronenhülle** auf Kreis- oder Ellipsenbahnen umlaufen. Die Protonen des Atomkerns binden die Elektronen durch COULOMB-Kräfte an das Atom.

Jedes Proton trägt eine positive, jedes Elektron eine negative Elementarladung; Neutronen sind ungeladen.

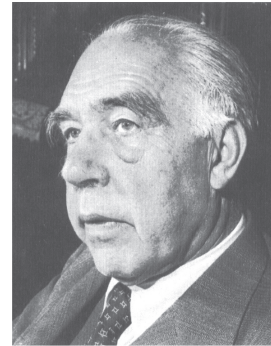
Man stellt sich vor, dass die Elektronen eines Atoms in *Schalen* angeordnet sind; das Bild 1.2 zeigt als Beispiel das Modell des Aluminiumatoms, bei dem sich drei Elektronen in der äußeren Schale befinden, die **Valenzelektronen** genannt werden. Wegen des höheren Abstandes vom Atomkern sind sie mit geringeren COULOMB-Kräften an den positiv geladenen Atomkern gebunden als die übrigen Elektronen auf den inneren Schalen.

Das BOHRsche Atommodell stimmt zwar nicht in jedem Detail, aber das überlassen wir mal den Physikern. Für uns bleibt zunächst noch die Frage, warum der Atomkern nicht auseinanderfliegt, wenn er mehr als ein Proton enthält, denn die Protonen stoßen doch einander aufgrund der COULOMB-Kräfte ab.

Der Durchmesser eines Atomkerns liegt in der Größenordnung  $10^{-15}$  m; er ist wesentlich kleiner als der Durchmesser des Atoms, der in der Größenordnung  $10^{-10}$  m liegt. Im Atomkern wirken auf die Protonen und Neutronen starke Anziehungskräfte geringer Reichweite; diese **Kernkräfte** sind wesentlich stärker als die COULOMB-Kräfte, mit denen die Protonen einander abstoßen.

### 1.1.3 Ionisation

Ein elektrisch neutrales Atom enthält genau so viele Elektronen wie Protonen; die Zahl der Protonen bzw. Elektronen ist übrigens die **Ordnungszahl** des Atoms. Wird jedoch z. B. ein Elektron durch Reiben des Stoffes von einem Atom entfernt, so überwiegt die positive Ladung und das Atom wirkt elektrisch geladen; man sagt, es ist **ionisiert**, und bezeichnet ein derartiges Atom als **Ion (ion)**.



**NIELS BOHR**  
(1885 – 1962), dänischer Physiker, formulierte im Jahr 1913 das erste brauchbare Atommodell und erhielt dafür 1922 den NOBEL-Preis. Ab 1916 war NIELS BOHR Professor für Physik an der Universität Kopenhagen. 1943 floh er vor den Nazis im Segelboot nach Schweden. Insgesamt gibt es von ihm 115 Publikationen. Nach NIELS BOHR ist das Transuran Bohrium mit der Ordnungszahl 107 benannt.

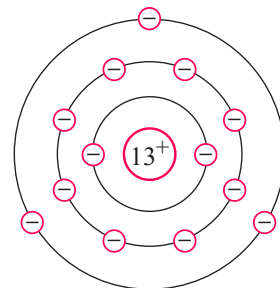


Bild 1.2 Modell des Aluminiumatoms

Ein Modell ist nicht unbedingt maßstäblich. Im Bild 1.2 ist z. B. der Atomkern viel zu groß dargestellt; bei maßstäblicher Darstellung wäre er nicht sichtbar.

In der Einzahl Ion liegt die Betonung auf dem „I“, in der Mehrzahl Ionen auf dem „o“.

Dass die elektrisch geladenen Kupferatome als Atomrümpfe bezeichnet werden, hat lediglich sprachliche Gründe. Der Begriff Ion stammt aus dem Griechischen, er bedeutet „gehend“. ARRHENIUS (s. Kap. 13) prägte diesen Begriff für geladene Moleküle in Flüssigkeiten, wo sie sich tatsächlich bewegen können. Im Kupferdraht aber bewegen sich die Atomrümpfe nicht, sie sind also keine „gehenden“ Ionen.

Andererseits stehen die Atomrümpfe auch nicht still, denn sie schwingen mit zunehmender Temperatur immer heftiger um eine Ruhelage. Diese Schwingungen stellen für die Leitungselektronen eine Bewegungshemmung dar.

Ein Ion kann auch negativ elektrisch geladen sein, dann überwiegt die Anzahl der Elektronen.

Infolge der COULOMB-Kräfte sind Ionen bestrebt, sich durch Einfangen freier Elektronen oder durch Anlagern an ungleichartige Ionen zu neutralisieren. Man bezeichnet dies als **Rekombination (recombination)**.

Wie aber wandern nun die Ladungen durch einen Kupferdraht?

In einem Festkörper wie z. B. einem Kupferkristall können sich die benachbarten Atome gegenseitig so beeinflussen, dass von jedem Atom ein Valenzelektron abgelöst wird, das **Leitungselektron** heißt. Die positiv geladenen Kupferionen werden **Atomrümpfe** genannt. Zwischen ihnen sind die Leitungselektronen frei beweglich.

Die Leitungselektronen sind zwar nicht an das einzelne Atom, aber durch COULOMB-Kräfte an die Atomrümpfe des Metalls gebunden. Sie können diesen Metallverband nur dann verlassen, wenn ihnen die **Austrittsarbeit (electron work function)  $W_A$**  zugeführt wird, die thermisch durch Aufheizen des Metalls oder optisch durch Licht zugeführt werden kann.

### 1.1.4 Stromkreis

Die Erklärung „Bewegung von Ladungen“ für einen Strom ist sehr allgemein gefasst – man könnte darunter auch eine beliebige Bewegung weniger Ladungen oder die Bewegung der Elektronen um einen Atomkern verstehen.

Als **Strom (current)** bezeichnet man die *geordnete* Bewegung der Ladungen, die in einem geschlossenen **Stromkreis (circuit)** stattfindet. Bei einem einfachen Stromkreis, der z. B. aus einer Batterie, den Leitungen und einer Glühlampe besteht (Bild 1.3), bewegen sich die Leitungselektronen vom Minuspol der Batterie zur Glühlampe und weiter zum Pluspol und von dort zum Minuspol der Batterie.

### 1.1.5 Stromstärke

„Strom fließt“ sagt man, weil hierbei die Begriffe der Geografie auf die Elektrotechnik übertragen wurden. Wie viel Wasser in einem Fluss bzw. Strom, z. B. dem Rhein an Köln vorbeifließt, gibt man in der Einheit  $\text{m}^3/\text{s}$  an. Entsprechend geht man beim elektrischen Strom vor und ermittelt die Ladungsmenge  $\Delta Q$ , die sich in einer Zeitspanne  $\Delta t$  durch den Querschnitt z. B. eines Drahtes bewegt.

Den Quotienten aus diesen beiden Größen bezeichnet man als **elektrische Stromstärke (current intensity)  $I$** :

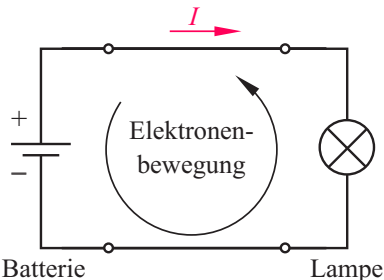


Bild 1.3 Einfacher Stromkreis

Das aus dem Griechischen stammende Wort Elektrotechnik kann man wortwörtlich mit *Bernsteinkunst* übersetzen.

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (1.5)$$

Die Einheit der Stromstärke ist:

$$[I] = \frac{1 \text{ C}}{1 \text{ s}} = 1 \text{ Ampere} = 1 \text{ A} \quad (1.6)$$

Im Allgemeinen bewegen sich in einem *beliebigen* Leiter sowohl positive Ladungen  $\Delta Q_p$  als auch negative Ladungen  $\Delta Q_n$  in der Zeitspanne  $\Delta t$  durch den Querschnitt  $A$ , für den die Stromstärke ermittelt wird. Die Bewegungsrichtung der positiven Ladungen stimmt dabei mit dem **Richtungssinn des Stromes** überein.

Da beide Ladungsträgerarten in *gleicher* Weise zum Strom beitragen und  $\Delta Q_p > 0$  sowie  $\Delta Q_n < 0$  ist, setzt man für die Ladung  $\Delta Q$  an:

$$\Delta Q = \Delta Q_p - \Delta Q_n \quad (1.7)$$

Damit ergibt sich für die Stromstärke  $I$  in der Gl. (1.5) ein positiver Wert. Wie bei einer zweispurigen Straße, bei der die in entgegengesetzter Richtung strömenden Fahrzeuge zur Erhöhung der Belastung beitragen, wird die Stromstärke durch die in entgegengesetzter Richtung strömenden Ladungen *erhöht*.

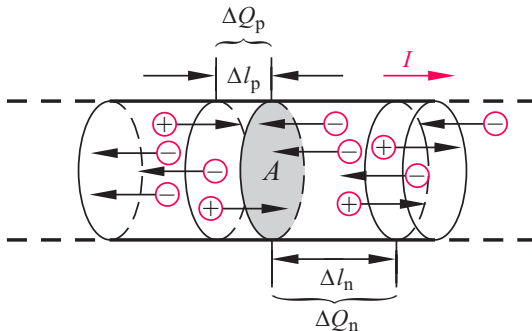


Bild 1.4 Bewegung positiver und negativer Ladungsträger durch den Querschnitt  $A$  eines Leiters und Richtungssinn des Stromes

Bewegen sich die Ladungsträger gleichmäßig mit konstanter Geschwindigkeit, so spricht man von einem **Gleichstrom (direct current, DC)**. Hierfür gilt entsprechend Gl. (1.5):

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1.8)$$



ANDRÉ-MARIE AMPÈRE (1775 – 1836), französischer Physiker, Chemiker und Mathematiker, untersuchte die Kräfte, die zwei stromdurchflossene Leiter aufeinander ausüben (s. Abschn. 3.3.9). MAXWELL bezeichnete ihn als „NEWTON der Elektrizität“. Die Federzeichnung wird AMPÈRE selbst zugeschrieben.

Die Stromstärke ist eine der sieben Basiseinheiten des Internationalen Einheitensystems „Système International d’Unités“ (s. Anhang A2). Eine solche Basiseinheit wird kurz als **SI-Einheit** bezeichnet.

In Metallen strömen nur Elektronen und es ist  $\Delta Q_p = 0$ ; dabei ist der Richtungssinn des Stromes  $I$  entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung der Leitungselektronen festgelegt. Dies liegt daran, dass man den Richtungssinn des Stromes lange vor der Erkenntnis definiert hatte, dass sich in einem Metalldraht negative Ladungen bewegen.

Wir zeichnen für den *Richtungssinn* des Stromes einen Pfeil *neben* die Leitung (siehe auch Bild 1.3).

Ein Strom ist eine geordnete Bewegung von Ladungen; diesem Oberbegriff kann man kein Formelzeichen zuordnen. Das Formelzeichen  $I$  und die Einheit 1 A gehören zur elektrischen Stromstärke. In der Praxis vermeidet man jedoch die umständliche Ausdrucksweise „es fließt ein Strom der Stromstärke 1 A“ und sagt kurz: „Es fließt ein Strom 1 A.“

### Beispiel 1.1

Wir wollen für einen Gleichstrom  $I = 1$  A, der durch einen Metalldraht fließt, die Ladung  $Q$  und die Anzahl  $k$  der Elektronen berechnen, die sich in einer Minute durch einen Querschnitt bewegen.

Mit der Gl. (1.8) berechnen wir:

$$Q = It = 60 \text{ A s} = 60 \text{ C}$$

Im Draht ist  $Q_p = 0$  und gemäß Gl. (1.7)  $Q_n = -60 \text{ C}$ . Wir dividieren  $Q_n$  durch die Ladung eines Elektrons:

$$k = \frac{Q_n}{-e} = \frac{-60 \text{ C}}{-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}} = 3,745 \cdot 10^{20}$$

### Beispiel 1.2

Wir wollen abschätzen, wie viele Leitungselektronen in 1 g Kupfer enthalten sind. Die Zahl der Leitungselektronen ist bei Kupfer etwa gleich der Zahl der Atome.

Kupfer hat die molare Masse  $M = 63,546 \text{ g/mol}$  (s. Tab. 13.2). Die Avogadro-Konstante<sup>1)</sup>  $6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  gibt an, wie viele Atome eines Stoffes in 1 Mol enthalten sind. In 1 g Kupfer sind demnach  $6,022 \cdot 10^{23} / 63,546 = 9,5 \cdot 10^{21}$  Atome und damit etwa  $9,5 \cdot 10^{21}$  Leitungselektronen enthalten.

## 1.1.6 Stromdichte

Ein Stoff, in dem sich Ladungsträger gut bewegen können, wird als **Leiter (conductor)** bezeichnet. In einem Volumen  $V$  eines Leiters befinden sich  $pV$  positive Ladungsträger und  $nV$  negative Ladungsträger mit je einer Elementarladung; dabei ist  $p$  bzw.  $n$  die Anzahl der Ladungsträger je Volumen. Die Größe  $p$  bzw.  $n$  wird auch als **Ladungsträgerdichte** bezeichnet. Wir setzen an:

$$\Delta Q_p = p \Delta V_p e; \quad \Delta Q_n = -n \Delta V_n e \quad (1.9)$$

Nun untersuchen wir die Strömung der Ladungsträger durch den Querschnitt  $A$  eines Leiters, wobei  $\Delta V_p = A \Delta l_p$  und  $\Delta V_n = A \Delta l_n$  gilt (Bild 1.4). Wir setzen voraus, dass der Leiter **homogen** (d. h. sein Material und dessen Eigenschaften sind gleichmäßig verteilt) und sein Querschnitt konstant ist. Mit den Gln. (1.5 und 1.7) ergibt sich:

<sup>1)</sup> AMADEO AVOGADRO (1776 – 1856), italienischer Physiker und Chemiker, war im Jahr 1811 zu der Erkenntnis gekommen, dass 1 Mol jedes Stoffes stets die gleiche Anzahl Moleküle enthält. Diese zunächst unbekannt Zahl wurde erstmals im Jahr 1865 von dem Österreicher JOSEPH LOSCHMIDT (1821 – 1895) bestimmt.