

HANSER



Leseprobe

Wolfgang Nerreter

Grundlagen der Elektrotechnik

ISBN: 978-3-446-42385-5

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser.de/978-3-446-42385-5>

sowie im Buchhandel.

1 Grundbegriffe

1.1 Elektrischer Strom

„Sag mal, Jan, du bist doch schon im 5. Semester, kannst du mir erklären, was eigentlich Strom wirklich ist? Ich weiß zwar, dass er eine Wärmewirkung und eine chemische und eine magnetische Wirkung hat, aber wie das alles zusammenhängt, ist mir noch unklar.“

„Mir auch, aber es genügt, wenn du weißt, dass ein Gleichstrom eine Bewegung von Ladungen ist. Mehr will kein Prof in der Prüfung hören. Und wenn du dann noch daraufhinweist, dass die Wärmewirkung bei supercoolen Leitern entfällt, dann bist du gut drauf.“

So einfach soll das sein? Für uns bleibt da noch eine Reihe von Fragen offen:

- Was ist Ladung?
- Wie fließen diese Ladungen durch einen Draht?
- Wie transportiert der Strom die Energie?

Auf diese Fragen wollen wir im Folgenden eine Antwort finden.

1.1.1 Ladung

Seit mehr als zweitausend Jahren ist bekannt, dass sich bestimmte Gegenstände anziehen, wenn man sie reibt. Wird z. B. Bernstein mit einem Katzenfell gerieben, so zieht er leichte Gegenstände wie z. B. eine Flaumfeder an. Nach dem griechischen Wort ἤλεκτρο für Bernstein wurden um 1600 alle derartigen Erscheinungen **elektrisch** genannt. Man bezeichnet den Gegenstand, von dem die Kraftwirkung ausgeht, als „geladen“ und sagt, er trägt eine **Ladung (charge) Q** . Nach systematisch durchgeführten Experimenten erkannte man, dass es zwei Arten von Ladungen gibt, und formulierte:

Gleichartige Ladungen stoßen einander ab;
ungleichartige Ladungen ziehen einander an.

Die unterschiedlichen Arten der Ladung werden durch die Vorzeichen „+“ und „-“ gekennzeichnet.

Als erster führte DE COULOMB genaue Messungen durch; nach ihm werden die Kräfte als **COULOMB-Kräfte** bezeichnet. Die Einheit der Ladung ist:

$$[Q] = 1 \text{ Coulomb} = 1 \text{ C} \quad (1.1)$$

Wirkungen des Stromes:

- Die magnetische Wirkung liegt immer vor: Jeder Strom baut in seiner Umgebung ein Magnetfeld auf. Dies gilt allgemein: Jede Bewegung von Ladungen ist mit einem Magnetfeld verknüpft.
- Die Wärmewirkung entfällt bei Strömen in Supraleitern (s. Abschn. 1.4.7).
- Mit der chemischen Wirkung des Stromes befassen wir uns im Kap. 13.



Charles Augustin de Coulomb (1736 – 1806) aus Angoulême in Frankreich entwickelte genaue Torsionswaagen, führte mit ihnen Messungen durch und formulierte 1788 das Gesetz für Kräfte auf Ladungen.

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

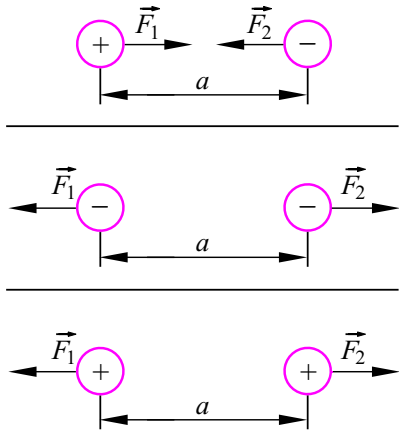


Bild 1.1 COULOMB-Kräfte auf Ladungen

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 mit Hilfe 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.

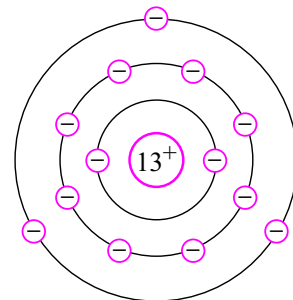


Bild 1.2 Modell des Aluminiumatoms

Ein Modell ist nicht unbedingt maßstäblich. Im Bild 1.2 ist z. B. der Atomkern viel zu groß dargestellt; bei maßstablicher 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 beein. ussen, 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) I** 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 m^3/s an. Entsprechend geht man beim elektrischen Strom vor und ermittelt die Ladungsmenge ΔQ , die sich in einer Zeitspanne Δt durch den Querschnitt z. B. eines Drahtes bewegt.

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

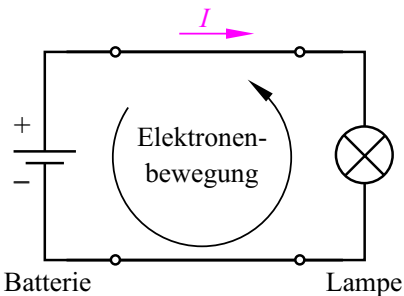


Bild 1.3 Einfacher Stromkreis

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 ΔQ_p als auch negative Ladungen ΔQ_n in der Zeitspanne Δt 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 ΔQ 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*.

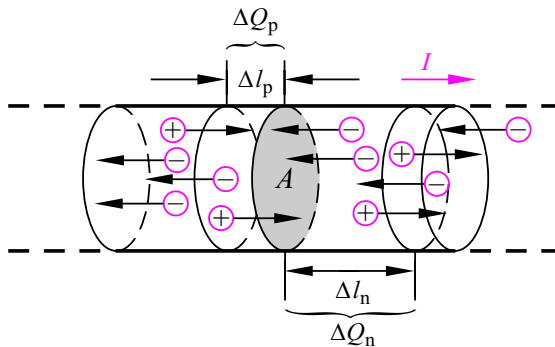


Bild 1.4 Bewegung positiver und negativer Ladungsträger durch den Querschnitt A eines Leiters und Richtungssinn des Stromes

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 u. a. die Kräfte, die zwei stromdurchflossenen Leiter aufeinander ausüben (s. Abschn. 3.3.9). Maxwell nannte ihn den „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).

In Bayern gab es lange die Isar-Amper-Werke, die nun zu E.ON Bayern gehören. Der Name hat nichts mit der Stromstärke zu tun, sondern mit dem Ab. uss des Ammersees, der Amper heißt.

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) $Q_n = -60$ C. Wir dividieren Q_n durch die Ladung eines Elektrons:

$$k = \frac{Q_n}{-e} = \frac{-60 \text{ C}}{-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}} = 3,75 \cdot 10^{20}$$

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 $M = 63,546$ g/mol (s. Tab. 13.2). Die Avogadro-Konstante¹⁾ $6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ 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:

¹⁾ 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 1875 von dem Österreicher Joseph Loschmidt (1821–1895) bestimmt.

$$I = \frac{\Delta Q_p - \Delta Q_n}{\Delta t} = e A \left(p \frac{\Delta l_p}{\Delta t} + n \frac{\Delta l_n}{\Delta t} \right) \quad (1.10)$$

In dieser Gleichung ist $\Delta l_p / \Delta t = v_p$ die Geschwindigkeit der positiven und $\Delta l_n / \Delta t = v_n$ die Geschwindigkeit der negativen Ladungsträger; bei einem Gleichstrom bezeichnet man jede dieser Geschwindigkeiten als **mittlere Driftgeschwindigkeit**. Damit gilt für den Strom:

$$I = e A (p v_p + n v_n) = I_p + I_n \quad (1.11)$$

Die mittleren Driftgeschwindigkeiten der Ladungsträger sind umso höher, je kleiner der Querschnitt A ist:

$$v_p = \frac{1}{e p} \cdot \frac{I_p}{A}; \quad v_n = \frac{1}{e n} \cdot \frac{I_n}{A} \quad (1.12)$$

Beispiel 1.3

Wir wollen die Driftgeschwindigkeit der Elektronen berechnen, die sich in einem Kupferdraht mit dem Querschnitt 1 mm^2 bewegen, in dem der Strom 1 A fließt. Der Kupferdraht wird aus Elektrolytkupfer (s. Kap. 13) mit der Dichte $\rho = 8,93 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ hergestellt.

Im Beispiel 1.2 sind wir zu dem Ergebnis gekommen, dass in 1 g Kupfer $9,5 \cdot 10^{21}$ Atome enthalten sind. Die Ladungsträgerdichte ist:

$$n \approx 9,5 \cdot 10^{21} \text{ g}^{-1} \cdot 8,93 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 8,5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$$

Mit der zweiten Gleichung der Gln. (1.12) berechnen wir:

$$v_n = \frac{1}{e n} \cdot \frac{I}{A} \approx 0,074 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

Obwohl man sagt, dass Strom „fließt“, ist die Driftgeschwindigkeit der Leitungselektronen im Kupferdraht sehr niedrig.

Man bezeichnet den Quotienten aus der Stromstärke I und der Querschnittsfläche A des Leiters als **Stromdichte (current density) J** :

$$J = \frac{I}{A} \quad (1.13)$$

Wie die Geschwindigkeit ist auch die Stromdichte ein **Vektor**, also eine physikalische Größe, der eine Richtung zugeordnet wird.

Die Einheit der Stromdichte ist zwar 1 A/m^2 , aber da Leiterquerschnitte im Allgemeinen in mm^2 angegeben werden, verwendet man für J meist die Einheit 1 A/mm^2 .

Wir kennzeichnen einen Vektor durch einen Pfeil, den wir über das Formelzeichen setzen; im Bild 1.1 haben wir die Kräfte \vec{F}_1 und \vec{F}_2 als Vektoren dargestellt.

Auch die Fläche ist ein Vektor \vec{A} mit dem Betrag A ; dieser Vektor steht senkrecht auf der Fläche.

Die Stromstärke I ist eine ungerichtete Größe; man bezeichnet eine solche Größe als **Skalar**. Der *Richtungssinn* des Stromes ist eine willkürlich gewählte Größe, die keine geometrische Bedeutung hat.

In der Gl. (1.13) ist lediglich der Zusammenhang für die Beträge der Vektoren angegeben. Für den Zusammenhang zwischen der Stromstärke und den Vektoren \vec{J} und \vec{A} gilt:

$$I = \vec{J} \cdot \vec{A} \quad (1.14)$$

Die mathematische Operation in dieser Gleichung ist das **Skalarprodukt** zweier Vektoren, das als Produkt aus den Vektorbeträgen und dem Kosinus des von den Vektoren eingeschlossenen Winkels α definiert ist:

$$I = \vec{J} \cdot \vec{A} = |\vec{J}| \cdot |\vec{A}| \cdot \cos \alpha = J \cdot A \cdot \cos \alpha \quad (1.15)$$

Im einfachsten Fall haben die Vektoren \vec{J} und \vec{A} gleiche Richtung und es ist $\alpha = 0$; dabei ergibt sich die Gleichung $I = J A$ für die Beträge der Vektoren, die man auch der Gl. (1.13) entnehmen kann (Bild 1.5).

Haben wie bei einem Gleichstrom die Ladungsträger konstante Geschwindigkeit, so liegt der **stationäre Zustand (steady state)** des Systems vor; dabei bleiben seine *charakteristischen Parameter* wie z. B. die Stromstärke I zeitlich konstant.

Die Stromdichte J (und nicht etwa die Stromstärke I) ist die wichtigste Beanspruchungsgröße für das Leitermaterial; sie darf nicht zu hoch gewählt werden, weil sonst der Leiter entfestigt wird oder sogar schmilzt.

Es bleibt die Frage, welche maximale Stromdichte man bei einem Anwendungsfall wählen darf. Dies hängt von der Erwärmung, der Temperaturfestigkeit des Leiters und der Isolation sowie von der Kühlung ab. Mit dem zuletzt genannten Problem wollen wir uns im Kap. 11 befassen.

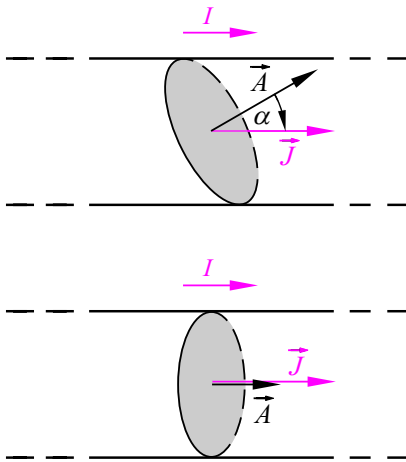


Bild 1.5 Bei unterschiedlicher Richtung von Stromdichtevektor und Flächenvektor muss die Stromstärke mit der Gl. (1.14) berechnet werden; bei gleicher Richtung von Stromdichtevektor und Flächenvektor ist $I = J A$

1.1.7 Richtungssinn und Bezugssinn

Beim einfachen Stromkreis (Bild 1.3) ist der Richtungssinn des Stromes bekannt: Der Strom I fließt außerhalb der Batterie von ihrem Pluspol zum Minuspol und innerhalb der Batterie von ihrem Minuspol zum Pluspol.

In einer umfangreichen Schaltung mit Stromverzweigungen ist häufig der Richtungssinn von Strömen nicht von vornherein bekannt. In diesem Fall nimmt man *willkürlich* einen **Bezugssinn** an und vereinbart:

Ist der Zahlenwert eines durch einen Bezugspfeil beschriebenen Stromes positiv, so stimmt der Richtungssinn mit dem Bezugssinn überein; ist der Zahlenwert eines Stromes negativ, so sind Richtungssinn und Bezugssinn einander entgegengesetzt.

Der Bezugssinn wird durch einen **Bezugspfeil** dargestellt, den wir stets in den Leitungszug zeichnen.

So ist z. B. in der Schaltung 1.6, die als **Brückenschaltung (bridge network)** bezeichnet wird, der Richtungssinn der Ströme $I_1 \dots I_4$ von vornherein bekannt, aber der Richtungssinn des Stromes I_5 ist zunächst unbekannt. Wir zeichnen daher für diesen Strom willkürlich einen Bezugspfeil z. B. von links nach rechts. Ergibt eine Berechnung z. B. die Stromstärke $I_5 = 0,6 \text{ mA}$, so hat der Strom den Richtungssinn von links nach rechts; bei einem Ergebnis $I_5 = -0,6 \text{ mA}$ hat der Strom den Richtungssinn von rechts nach links.

Ein Bezugssinn kann auch durch einen Doppelindex angegeben werden. Benennt man z. B. in der Schaltung 1.6 die Brückeneckpunkte mit „A“ und „B“, so kann man den Strom I_5 durch den Strom I_{AB} ersetzen; in diesem Fall ist ein Bezugspfeil für den Strom $I_{AB} = I_5$ nicht erforderlich.

Unerlässlich ist die Angabe des Bezugssinns bei einem Wechselstrom. Damit werden wir uns im Kap. 4 befassen.

1.1.8 Strommessung

Eine Strommessung wird im Allgemeinen mit einem **Strommesser** durchgeführt, der auch als **Amperemeter (ammeter)** bezeichnet wird. Das Bild 1.7 zeigt das Schaltzeichen und die Klemmenbezeichnungen für Gleichstrom. Statt „+“ wird auch „HI“ oder „mA“ geschrieben und statt „-“ ist dementsprechend „LO“ oder „COM“ üblich.

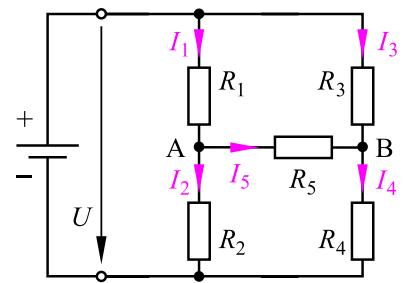


Bild 1.6 Brückenschaltung

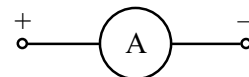


Bild 1.7 Schaltzeichen Amperemeter mit Klemmenbezeichnungen für eine Gleichstrommessung



Bild 1.8 Anzeige eines digitalen Multimeters in der Betriebsart Strommessung

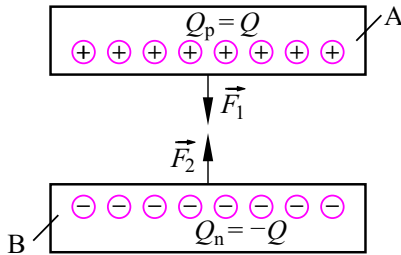


Bild 1.9 Elektronenmangel bewirkt die positive Ladung des Körpers A und Elektronenüberschuss die negative Ladung des Körpers B



Alessandro Volta (1745–1806) aus Como in Italien konnte Galvanis Froschschkelversuche (s. Kap. 13) erklären, denn er erkannte, dass zwischen zwei sich berührenden Metallen eine Spannung entsteht. Volta konstruierte aus Zink-Kupfer-Elementen die erste Batterie. Napoleon war von seinem Experimentalvortrag 1801 begeistert und ernannte Volta im Jahr 1804 zum Grafen.

Durch die Klemmenbezeichnungen ist der Bezugssinn von „+“ nach „-“ (bzw. von „HI“ nach „LO“ oder von „mA“ nach „COM“) festgelegt. Zeigt das Messgerät einen positiven Wert an, so stimmt der Richtungssinn des Stromes mit diesem Bezugssinn überein, andernfalls ist er dem Bezugssinn entgegengesetzt.

1.2 Elektrische Spannung

1.2.1 Ladungstrennung

Ist ein Körper ungeladen, so heißt das nicht etwa, dass er keine Ladung enthält, sondern vielmehr, dass sich die (stets vorhandenen) Ladungen nach außen in ihrer Wirkung aufheben; dies ist z. B. bei einem elektrisch neutralen Atom der Fall.

Die Ladungen heben sich jedoch nur dann nach außen in ihrer Wirkung auf, wenn die Schwerpunkte der positiven und der negativen Ladungen zusammenfallen. Ist dies nicht der Fall, so liegt ein **Dipol (dipole)** vor. Viele Moleküle, z. B. das Wasser H_2O , sind Dipole. Wir werden uns damit im Kap. 3 befassen.

Bei einem geladenen Körper gibt man nur die jeweils überzähligen Ladungen an. Das Bild 1.9 zeigt als Beispiel einen positiv geladenen Körper A mit der Ladung $Q_p = +Q$ und einen negativ geladenen Körper B mit der Ladung $Q_n = -Q$, bei denen die COULOMB-Kräfte eine Anziehung bewirken. Sollen nun die beiden Körper entgegen der Krafrichtung weiter voneinander entfernt werden, so wird hierfür *Energie* benötigt. Wir stellen fest:

Eine Ladungstrennung erfordert eine Energiezufuhr.

Man könnte nun, um die Ladungstrennung quantitativ zu beschreiben, die hierfür erforderliche Energie W angeben. Diese Energie sagt jedoch nichts darüber aus, wie viel Ladung getrennt worden ist. Deshalb wird der Quotient aus Energie und Ladung gebildet, der **elektrische Spannung** oder kurz **Spannung (voltage)** U genannt wird:

$$U = \frac{W}{Q} \quad (1.16)$$

Die Einheit der Spannung U ist:

$$\frac{1 \text{ J}}{1 \text{ C}} = \mathbf{1 \text{ Volt}} = 1 \text{ V} \quad (1.17)$$