

2 Gleichstromkreise

2.1 Grundbegriffe

Unsere Welt ist für uns ohne Elektrizität unvorstellbar. Ohne Strom kein Licht, kein Fernsehen, keine Computer, keine Handys, keine Autos, keine Maschinen, usw.

Erst im vergangenen Jahrhundert hat sich das mystische Dunkel um die meisten elektrischen Erscheinungen gelichtet.

Obwohl der Mensch nach außen sowohl elektrisch als auch magnetisch neutral erscheint, würde er ohne Elektrizität nicht „funktionieren“. Das gesamte „Nachrichtensystem“ im Menschen beruht auf dem Austausch von elektrischen Strömen und Impulsen. So werden unsere Bewegungen, Sinneswahrnehmungen, Gedanken, Organe... über elektrische Impulse gesteuert. Trotzdem tun sich die meisten Menschen schwer, die Elektrizität zu begreifen. Der Grund hierfür dürfte sein, dass die Menschen kein Sinnesorgan für elektromagnetische Phänomene besitzen (bisher wurde keines entdeckt).

2.1.1 Die elektrische Ladung

Jenes Teilgebiet der Elektrizitätslehre, das sich mit elektrischen Ladungen beschäftigt, heißt **Elektrostatik**. Dabei unterscheidet man zwei Arten elektrischer Ladungen - positive und negative elektrische Ladungen.

Alle Körper sind aus Atomen aufgebaut.

Aufbau eines Atoms Die Ausdehnung und die chemischen Eigenschaften eines Atoms werden durch die **Elektronenhülle** bestimmt. Sie trägt ungefähr **0,05% zur Masse des Atoms** bei, die fast bis zur Gänze im Kern des Atoms zentriert ist.

Das **Elektron** wurde von Sir Joseph John Thomson (1856-1940) mit Hilfe von Versuchen mit der Kathodenstrahlröhre nachgewiesen. Das Elektron ist **negativ** geladen. **Die Masse des Elektrons ist ca. $9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.**

Heute weiß man, dass die **Atomkerne aus Protonen und Neutronen** bestehen. Das Neutron wurde 1931 von Sir James Chadwick (1891-1974) entdeckt und das Proton von Ernest Rutherford (1871-1937). Protonen sind **positiv geladene** Teilchen und **Neutronen sind elektrisch neutral**.

Die Elementarladung **e** ist die **kleinste frei vorkommende elektrische Ladung**. Protonen tragen diesen Wert, Elektronen genau das negative davon. Sie ist in etwa gegeben durch

(2.1)

und wurde von Rutherford entdeckt.

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

Elektrische Ladung Die physikalische Größe **elektrische Ladung** gibt an, **wie stark ein Körper positiv bzw. negativ geladen ist**.

Die **Maßeinheit** für **elektrische Ladungen Q** ist das **Coulomb C** .

$$[Q] = 1 \text{ C} = 1 \text{ As}$$

Dabei handelt es sich um jene Ladungsmenge, die bei einer **Gleichstromstärke von 1 A** während der **Dauer von 1 s** durch einen Leiter fließt.

Tabelle: Träger der Elementarladung

Elementarteilchen	Elektronen	Protonen
Ladungsart	negativ	positiv
Formelzeichen	$-e$	e
Zahlenwert	$-1,602 \cdot 10^{-19}$	$+1,602 \cdot 10^{-19}$
Einheitenname	Coulomb	Coulomb
Einheitenzeichen	C	C

Tabelle 5: Träger der Elementarladung

Ein Atom ist nach außen hin elektrisch neutral (elektrisch ungeladen), wenn sich in der Atomhülle genauso viele Elektronen befinden wie im Kern Protonen vorhanden sind.

Atome, bei denen sich die Anzahl der Protonen und die Anzahl der Elektronen unterscheiden, nennt man Ionen. Wird ein Elektron aus der Atomhülle entfernt, so bleibt ein positiver Atomrumpf zurück - ein positives Ion. Hat das Atom mehr Elektronen in der Hülle als Protonen im Kern, ist es negativ geladen und wird negatives Ion genannt.

Elektrisch geladene Körper Alle Körper besitzen eine Vielzahl elektrischer Ladungen. Im Allgemeinen sind Körper nach außen hin „elektrisch neutral“. Die Anzahl der positiven und negativen Ladungen ist gleich. Ist die Anzahl der positiven und negativen Ladungen nicht gleich, so spricht man von einem geladenen Körper. Wir unterscheiden

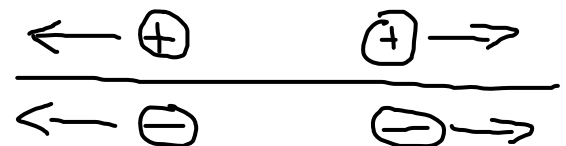
positiv geladen Ein elektrisch positiv geladener Körper besitzt einen Elektronenmangel.

negativ geladen Ein elektrisch negativ geladener Körper besitzt einen Elektronenüberschuss.

Durch Reiben zweier Körper können Elektronen von einem Körper auf einen anderen Körper übergehen, wobei beide Körper dann nicht mehr elektrisch neutral sind. Man spricht in diesem Fall von der so genannten Reibungselektrizität.

Zwischen den elektrisch geladenen Teilchen bzw. Körpern wirken Kräfte.

Gleichnamige Ladungen stoßen einander ab:



Ungleichnamige Ladungen ziehen sich an:



Wie wir bereits besprochen haben ist im SI die Stromstärke eine Grundgröße und damit das Coulomb eine abgeleitete Größe.

Für die Ladung Q gilt

$$Q = \underset{\text{Strom}}{I} \cdot \underset{\text{Zeit}}{t} = \underset{\text{Anzahl}}{n} \cdot e$$

(2.2)

dabei ist n die Anzahl der überschüssigen bzw. fehlenden Elektronen und e die Elementarladung. Alle in der Natur vorkommenden Ladungen treten messbar als ganzzahliges Vielfaches der Elementarladung auf. Ausgenommen sind Quarks (Bausteine der Protonen und Neutronen), die durch Ladungen $\pm \frac{e}{3}$ und $\pm \frac{2e}{3}$ gekennzeichnet sind. Da Quarks jedoch in unserer Umgebung nicht einzeln vorkommen, sondern immer zu zweit oder zu dritt gebunden sind, werden meist die Protonen und Neutronen als Kernbausteine genannt.

Ladungserhaltung In einem abgeschlossenen System ist die Summe aller Ladungen zeitlich konstant. Ladung kann weder erzeugt noch vernichtet werden.

Natürlich können Ladungen eines Vorzeichens isoliert und räumlich getrennt werden. Den damit verbundenen Ladungstransport nennt man elektrischen Strom. Die räumliche Trennung von Ladungen geschieht beispielsweise, wie oben besprochen, durch Reibung.

Versuche

1. Ein aufgeblasener Luftballon wird an einem Kleidungsstück gerieben und gegen eine Wand gehalten.
2. Ein Stab wird mit Wolle gerieben. Ein Wasserhahn wird ganz leicht aufgedreht und der Stab in die Nähe des Strahls gehalten.
3. Zwei Luftballons werden aufgeblasen, an jeweils einer Schnur befestigt und an einem Wollpullover gerieben. Anschließend lässt man die beiden Ballons nach unten fallen.

Aufgaben

1. Nennen Sie mindestens drei Alltagsbeispiele, wo elektrostatische Aufladung zu beobachten ist. Gehen Sie knapp auch auf die Ursache der Aufladung ein und nennen Sie eine Maßnahme, mit der man die Aufladung verhindern kann, wenn sie unerwünscht ist.
2. Wenn man eine Metallplatte aufladen will, benötigt man zum Halten der Platte einen Isolierstiel. Geben Sie hierfür eine Begründung.
3. Vier geladene Metallkugeln A, B, C und D hängen jeweils einzeln an einem dünnen Faden. Kugel D ist positiv geladen. Durch einen Versuch stellt man fest: Kugel A stößt B ab, A zieht C an und C stößt D ab. Welche Ladungsarten besitzen die Kugeln A, B und C? Fertigen Sie eine Skizze an!
4. Wie lässt sich ein geladener Körper neutralisieren?
5. Wie lange dauert es, bis eine Ladung von 459 C übertragen ist, wenn die mittlere Stromstärke 250 mA beträgt?
6. Durch einen elektrischen Leiter fließt in der Sekunde eine Ladung von 5,4 mC. Wie groß ist die Stromstärke?
7. Durch einen Leiter werden innerhalb von 2 s insgesamt $1,92 \cdot 10^{19}$ Elektronen bewegt. Berechnen Sie
 - (a) die Ladung Q.
 - (b) die Stromstärke.
8. Die Stromstärke in einem Blitz, der etwa 1/1000 Sekunde lang dauert, wird auf 20 kA geschätzt. Welche Elektrizitätsmenge wird aus diesem Grund in einem Blitz entladen?
9. Welche durchschnittliche Stromstärke ist notwendig, um in 5 Minuten eine Ladung von 15 C zu übertragen?

2.1.2 Der elektrische Strom (electricity)

Ladungsträger führen in elektrisch leitenden Stoffen ständig **unregelmäßige Bewegungen** aus. Werden diese Bewegungen durch eine Bewegung in eine **bestimmte Richtung** überlagert, so bezeichnet man dies als **elektrischen Strom**. Das **Fließen des elektrischen Stromes** ist **nur** in einem **geschlossenen Kreislauf** möglich. Dieser wird **elektrischer Stromkreis** genannt. Eine **Spannungsquelle** wird benötigt, um das Fließen des Stromes hervorzurufen.

Im einfachsten Fall fließen in jeder Sekunde **gleich viele Ladungen durch den Leiter**. Man spricht dann von konstantem Gleichstrom (**direct current, DC**). Ein **veränderlicher (Stärke und Richtung) Strom** wird als Wechselstrom (**alternating current, AC**) bezeichnet. Im Falle des Gleichstroms ist die durch den **Querschnitt A** des Leiters fließende **Ladungsmenge ΔQ** zur verstrichenen **Zeitdauer Δt** direkt proportional: **$\Delta Q = I \cdot \Delta t$** (siehe Abbildung).

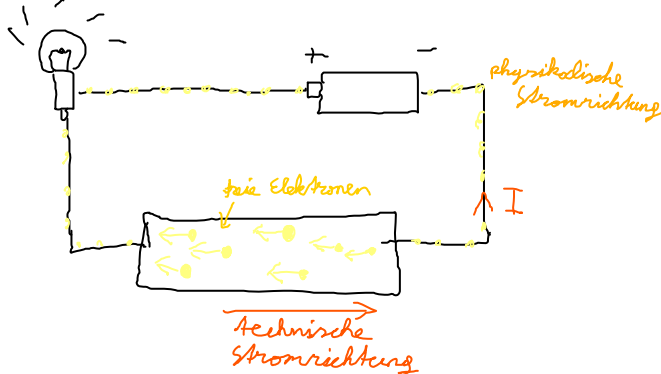


Abbildung 2.1: **Stromstärke I** : In der Zeit **Δt** fließt die Ladung **ΔQ** durch den Querschnitt **A** des Leiters. Die Stromrichtung ist allerdings entgegen den Bewegungen der negativen Ladungsträger definiert.

Der Proportionalitätsfaktor I heißt elektrische Stromstärke (kurz „elektrischer Strom I “).

- Der elektrische Strom gibt die transportierte Ladung pro Zeit an: $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$
- Die elektrische Stromstärke I ist im internationalen Maßsystem als SI-Einheit definiert.
- Die Einheit der elektrischen Stromstärke I ist als Basiseinheit mit 1 Ampere festgelegt.
- Damit kann die Einheit der Ladung Coulomb auch als Amperesekunde bezeichnet werden.

Vergleich Stromkreis und Wasserkreislauf

Stromkreis	Wasserkreislauf
Die Spannungsquelle (Batterie) verrichtet Arbeit und pumpt Elektronen in das Leitungsnetz. Durch das permanente Anliegen einer Spannung fließt elektrischer Strom durch einen Verbraucher.	Die Pumpe verrichtet Arbeit an den Wassertropfchen. Sie baut einen Druck auf, so dass fortlaufend Wasser fließen kann. Der Druck ist nötig, um den Strömungswiderstand zu überwinden.
Spannungsquelle	Pumpe
Spannung	Druck
Strom	Durchflussmenge pro Zeit
Elektrischer Widerstand	Strömungswiderstand

Ein elektrischer Stromkreis besteht aus **Quelle, Leitungen und Verbraucher!**

Die Quelle ist üblicherweise die **Spannungsquelle** und hat die **Aufgabe, Ladungen zu trennen! Leitungen bestehen meist aus metallischem Leitermaterial** (oft **Kupfer**) und stellen Wege für die bewegten Ladungsträger (Elektronen) dar. „**Verbraucher**“ sind meist Widerstände und **wandeln elektrische Energie in eine andere Energieform**

um. Aus diesem Grund ist der Ausdruck „Verbraucher“ auch nicht korrekt; „Energiewandler“ wäre die bessere Bezeichnung! Energieformen können sein: Wärme, Licht usw.

- Im elektrischen Stromkreis gilt das Ursache-Wirkungsprinzip: Spannung bewirkt Strom!
- Für die elektrischen Größen gilt: Spannung ist ein Zustand, Strom ist ein Vorgang und Widerstand ist eine Materialeigenschaft!

Abbildung 2.2: Vergleich Stromkreis und Wasserkreislauf

Stromrichtung Sind positive und negative Ladungen getrennt worden (die dazu notwendige Energie W pro Ladung ist die zugehörige Spannung), dann gibt es einen positiven Pol (positiver Ladungsüberschuss) und einen negativen Pol (negativer Ladungsüberschuss). Zwischen diesen Polen herrscht eine Spannung U . Werden diese Pole miteinander verbunden, so findet ein Ladungstransport und damit ein Stromfluss statt, und die Ladungsunterschiede gleichen sich aus. Für die Richtung des Stromflusses wurde festgelegt:

Die **technische Stromrichtung** zeigt im Verbraucher vom Plus- zum Minus-Pol, durch **Spannungsquellen vom Minus- zum Plus-Pol**.

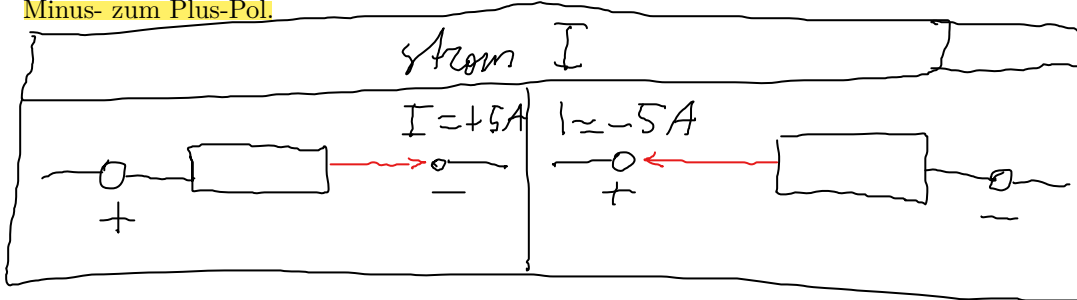


Abbildung 2.3: Pfeile und Vorzeichen für Ströme

- **Physikalische Stromrichtung:** Die **negativ geladenen Elektronen** bewegen sich entlang der Richtung **weg vom Minuspol der Quelle, durch den Verbraucher und weiter zum Pluspol der Quelle**. Diese Umlaufrichtung nennt man die physikalische Stromrichtung. Diese Bewegung kann man sich so vorstellen, dass Elektronen Atomhüllen verlassen und dadurch **positiv geladene Atomrümpfe entstehen**. Nun werden andere freie **Elektronen** durch die **positiv gewordenen Atomrümpfe** angezogen.
- **Isolatoren** besitzen **keine freien Elektronen**, daher kann in ihnen **kein Strom fließen**.
- Die **technische Stromrichtung** ist in **Richtung der Bewegung von positiven Ladungsträgern** definiert. (Historische Ursache: Die Konvention über die Stromrichtung geht auf Zeiten zurück, in denen man annahm, dass positive Ladungsträger für den Stromfluss verantwortlich sind.)
- In **elektrischen Stromkreisen** wird die **technische Stromrichtung eingezeichnet**.
- Die **Strom- oder Spannungsquelle** (z.B. Batterie, Akkumulator, Solarzelle, ...) ist eine **Energiequelle**, wie ein aufgeladener Kondensator.

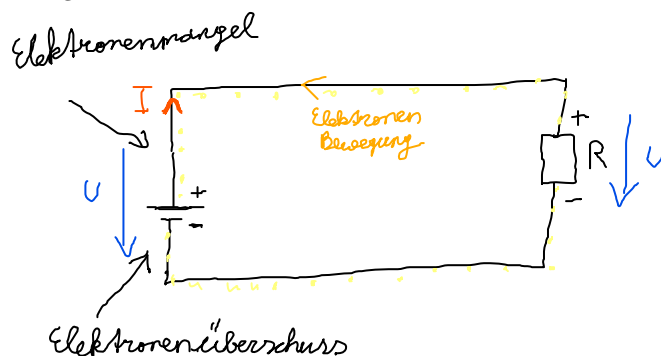


Abbildung 2.4: Symbolik eines einfachen Stromkreises (R = Verbraucher)

Wirkungen des elektrischen Stromes Der elektrische Strom lässt sich an seinen Wirkungen erkennen:

- Der elektrische Strom erwärmt Leiter (Wärmewirkung).
- Der elektrische Strom verursacht immer in seiner Umgebung eine magnetische Wirkung.
- Der elektrische Strom kann z.B. in einer Glühlampe, in einer Leuchtstofflampe oder durch einen Halbleiter Licht erzeugen. Der Strom hat eine Lichtwirkung.
- Der elektrische Strom kann leitende Flüssigkeiten zerlegen (chemische Wirkung).
- Der elektrische Strom hat auf Lebewesen eine physiologische Wirkung. Die positive Wirkung des elektrischen Stromes nutzt man in der Elektromedizin. Aber Vorsicht: Beim Berühren blanker elektrischer Leitungen kann durch den menschlichen Körper ein lebensgefährlicher Strom fließen. (Hinweis: Physiologie = Lehre von den Vorgängen im Körper von Lebewesen.)

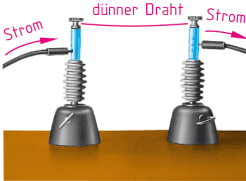
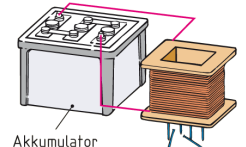
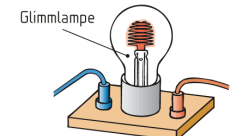
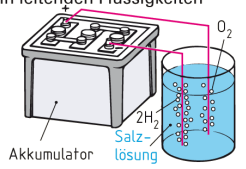

Tabelle: Stromwirkungen	
Wärmewirkung	Anwendungen
Tritt immer auf 	Elektroherde Bügeleisen Tauchsieder Warmwasserbereiter Lötcolben Schmelzsicherungen
Magnetische Wirkung	Anwendungen
Tritt immer auf 	Elektromagnete Elektromotoren Schütze, Relais Messinstrumente Klingeln Telefonhörer Lautsprecher Türöffner
Lichtwirkung	Anwendungen
Auftreten: in Gasen, in Halbleitern 	Leuchtstofflampen Leuchtröhren Glimmlampen Leuchtdioden Glühlampen
Chemische Wirkung	Anwendungen
Auftreten: in leitenden Flüssigkeiten 	Elektrolyse Galvanisieren Akkumulatoren
Wirkung auf Lebewesen (physiologische Wirkung)	Anwendungen
Auftreten: bei Menschen, Tieren 	Elektroweidezäune Viehbetäubung Elektromedizinische Geräte



Tabelle 6: Wirkungen des elektrischen Stromes

Strömungsgeschwindigkeit der Elektronen Gleiche Stromstärke heißt nicht gleiche Geschwindigkeit der Ladungsträger: Wenn relativ viele Ladungen langsam durch die Testfläche treten, kann dies die gleiche Stromstärke bedeuten, wie wenn sich relativ wenige Ladungen schnell durch die Testfläche bewegen. (Vergleiche Wasserkreislauf: auch dort gehen keine Wassermoleküle verloren, die transportierte Masse ist an jeder Stelle die gleiche. Bei geringerem Rohrquerschnitt erhöht sich die Wassergeschwindigkeit entsprechend, um den Massentransport zu gewährleisten.)

Ist der Stromkreis offen, bewegen sich die Elektronen in verschiedenste Richtungen. Sobald eine Batterie angeschlossen wird, baut sich im Leiter (beinahe mit Lichtgeschwindigkeit) ein elektrisches Feld auf. Und dieses Feld beeinflusst die Bewegung der freien Leiterelektronen. Sie werden durch das angelegte Feld in Richtung auf das Ende der Schaltung beschleunigt, das an die positive Batterieklemme angeschlossen ist. Die Elektronen bremsen an Atomen und aneinander ab und verlieren kinetische Energie (der Leiter erwärmt sich). Danach werden die

Elektronen erneut beschleunigt und verlieren wiederum Geschwindigkeit durch gedachte Stoßvorgänge. Es stellt sich eine mittlere Geschwindigkeit (Driftgeschwindigkeit) ein.

Die Driftgeschwindigkeit der Elektronen (= Geschwindigkeit der Elektronenwanderung) der Elektronen ist wegen ihrer zahlreichen Zusammenstöße mit den Atomrümpfen sehr klein (z. B. $0,1 \text{ mm/s}$). Die Geschwindigkeit der Ladungen hängt von der Art des Metalls und vom Durchmesser des Drahtes ab.

Vergleich 1: Wenn der Schlauch noch leer ist und wir den Wasserhahn aufdrehen, dauert es einige Sekunden bis das Wasser vom Hahn zum Schlauchende fließt. Ist der Schlauch aber schon voll, so fließt das Wasser praktisch sofort. Der Wasserdruck im Hahn drückt auf ein Wasserelement, das auf das nächste drückt usw. Jedes Wasservolumenelement, das am Hahn in den Schlauch einfließt, schiebt ein entsprechendes vorne aus dem Schlauch heraus.

Das Verhalten der Leitungselektronen ist sehr ähnlich. Wenn der Schalter betätigt wird, breitet sich im Draht ein elektrisches Feld mit fast Lichtgeschwindigkeit aus. Die Leitungselektronen erreichen ihre Driftgeschwindigkeit fast sofort. Ladungen, die am Ende eines bestimmten Bereichs des Drahtes austreten, werden am Beginn des Bereichs aufgefüllt.

Vergleich 2: Stelle dein Fahrrad auf den Kopf, sodass sich die Räder frei drehen können. Versetze das Vorderrad nun in schnelle Drehung. Wenn du das Rad drehst, dann belädt deine Hand das ganze Rad auf einmal mit Energie. Nun lege deine Hand leicht auf den Reifen, das sich drehende Rad wird langsamer und abgebremst durch Reibung. Deine Hand wird heiß. Deine Hand entzieht dem ganzen Rad Energie und das ganze Rad wird langsamer.

Ein Stromkreis ist wie das Rad des Fahrrads. Die Batterie verursacht die Bewegung aller Elektronen im Draht, sie belädt den gesamten Stromkreis auf einmal mit Energie. Sobald sich die Elektronen bewegen, leuchtet die Glühlampe auf, auch wenn sie von der Batterie weit entfernt ist. Genauso wie die Hand das ganze Rad abbremst und durch Reibung warm wird, dasselbe macht die Glühlampe. Es bremst alle Elektronen im ganzen Stromkreislauf und sie entzieht dem ganzen Stromkreis Energie.

Die elektrische Stromdichte Der elektrische Strom, der durch eine Glühlampe fließt, erhitzt die dünne Drahtwendel der Lampe bis zur Weißglut, erwärmt jedoch die Zuleitungen kaum. Bei gleicher Stromstärke bewegen sich durch einen großen und durch einen kleinen Leiterquerschnitt gleich viele Elektronen je Sekunde. Im Leiter mit kleinerem Querschnitt fließen folglich die Elektronen mit höherer Geschwindigkeit und erwärmen ihn durch Reibung stärker.

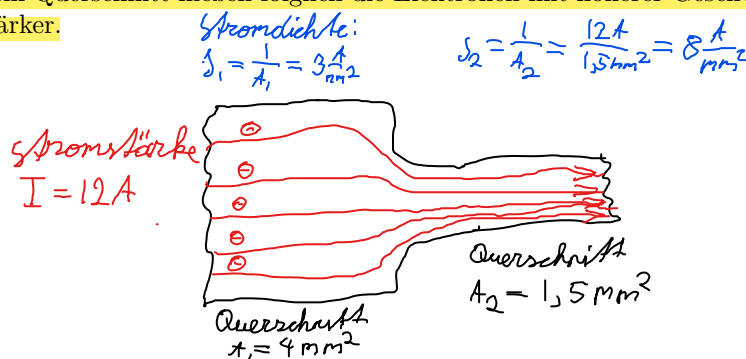


Abbildung 2.5: Elektronenbewegungen in verschiedenen Leiterquerschnitten

Die Stromstärke je mm^2 Querschnitt nennt man **Stromdichte** J (Einheit A/mm^2).

$$J = \frac{I}{A}; [J] = \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \quad (2.3)$$

Beispiel. Durch eine Glühlampe fließt ein Strom $I = 0,2 \text{ A}$. Wie groß ist die Stromdichte J a) in der Zuleitung mit $1,5 \text{ mm}^2$ und b) im Glühdraht mit $0,03 \text{ mm}^2$ Durchmesser? (a) $0,133 \text{ A/mm}^2$; b) $282,9 \text{ A/mm}^2$)

Beispiel. Zwei Heizwiderstände liegen parallel an 230 V und werden von jeweils $4,35 \text{ A}$ durchflossen. Der eine Heizleiterdraht hat einen Durchmesser von $0,45 \text{ mm}$, der andere hat einen Durchmesser von $0,35 \text{ mm}$. Berechnen Sie die Stromdichte in den Heizwiderständen. ($27,4 \text{ A/mm}^2$; $45,2 \text{ A/mm}^2$)

Ein Leiter erwärmt sich umso mehr, je größer die Stromdichte in ihm ist.

In Leitungen, in Wicklungen von Spulen, Transformatoren oder Motoren darf die Stromdichte auf Dauer nicht zu groß werden, damit die Isolation der Drähte nicht zu heiß wird und keine Brandgefahr auftritt. Für die Leiterquerschnitte sind deshalb höchstzulässige Stromstärken festgelegt.

Die zulässige Stromdichte richtet sich nach dem Leiterquerschnitt, dem Werkstoff und nach der Abkühlungsmöglichkeit.

Aufgaben

1. Thomas hat vergessen, die Innenraumbeleuchtung seines KFZs abzuschalten. Die voll geladene 12 V Autobatterie hat eine Ladungsmenge laut Typenschild von 35 Ah.
 - (a) Wie lange kann sie Strom für die Innenraumbeleuchtung liefern, wenn diese dauernd einen Strom von 1,5 A zieht, bis die Batterie vollkommen entladen ist? (23 h 20 min)
 - (b) Wie viel Ladung in Amperesekunden fasst die Batterie und wie vielen verschiebbaren Elementarladungen entspricht dies? (126000 C, $n = 7,9 \cdot 10^{23}$)
 - (c) Welche Arbeit verrichtet die Batterie bis zur Entladung? (1,5 MJ)
2. Warum wird der Buchstabe I für die Stromstärke verwendet?
3. Je mehr Elektronen (Ladungsträger) pro Zeiteinheit durch einen Leiter fließen, desto _____ (größer oder kleiner?) ist die Stromstärke ("der Strom").
4. Ein dünner und ein dicker Draht sind hintereinander in einen Stromkreis geschaltet. Ab einer gewissen Stromstärke beginnt einer der Drähte zu glühen. Welcher und warum?
5. Eine Batterie liefert eine Stunde lang einen Strom von 1 A. Wie viele Elektronen fließen dabei durch die Batterie? (2,25 · 10²² Elektronen)
6. Beim Start eines Autos wird durch den Zündschlüssel ein Gleichstromkreis zwischen dem positiven und negativen Pol der Autobatterie geschlossen. Wie lange benötigt die Wirkung der fließenden Elektronen für den Motorstart?
 - (a) ganz minimale Zeit, da der Motor im Allgemeinen sofort anspringt.
 - (b) etwa 10 Sekunden, da der Motor erst vorgewärmt werden muss.
 - (c) etwa 4 Minuten, da einzelne Ladungen und Atome den Weg behindern.
 - (d) etwa 4 Stunden, da die Ladungen auf ihrem Weg ständig mit Atomen und auch untereinander zusammenstoßen.
7. In einem geschlossenen Stromkreis bewegen sich die Elektronen mit
 - (a) Lichtgeschwindigkeit
 - (b) Schallgeschwindigkeit
 - (c) einer Geschwindigkeit von einigen Zentimetern pro Sekunde
 - (d) einer Geschwindigkeit von Bruchteilen von Zentimetern pro Sekunde
8. Calculate the current: $2\mu\text{C}$ flows through a light-emitting diode in 1 ms. (2 mA)
9. Der Startermotor eines 4-Taktmotors zieht beim Startvorgang ca. 300 A Strom aus der Autobatterie.
 - (a) Wie lange kann mit einer voll geladenen 12 V Autobatterie und 45 Ah Lade-Kapazität der Startvorgang ausgeführt werden? (9 min)
 - (b) Welche Energie wird dem Startermotor dabei zugeführt? (Beachten Sie, dass beim Starten die Batteriespannung auf durchschnittlich 8 V absinkt.) (1,3 MJ)

2.1.3 Die elektrische Spannung

Ursache für den Transport der elektrischen Ladungen ist die elektrische Spannung U . Die notwendige Arbeit W zur Trennung der Ladung Q bestimmt die Spannung U .

Die **elektrische Spannung** U zwischen zwei Punkten in einem Raum ist gleich der Arbeit ($\mathbf{F} \cdot \mathbf{l}$) pro Einheitsladung, die zum Verschieben der Ladung zwischen diesen Punkten notwendig ist.

(2.4)

(2.5)

Die Einheit der elektrischen Spannung trägt die Bezeichnung **Volt** (Symbol: V).

In elektronischen Schaltungen und in Simulationsprogrammen verwendet man den Begriff des **elektrischen Potenzials** φ . Man wählt einen Bezugspunkt in der Schaltung, der Masse genannt wird, und per Definition das Potenzial $\varphi=0$ V erhält. Jeder Knotenpunkt der Schaltung trägt dann gegenüber diesem Bezugspunkt eine Spannung, die als Potenzial bezeichnet wird.

Die Spannung ist in elektronischen Schaltungen daher die Differenz zweier Knotenpotenziale:

(2.6)

Die von einer Spannungsquelle gelieferte Spannung U wird in Schaltplänen durch einen Richtungspfeil angegeben. Er zeigt meist vom **Pluspol** (+) zum **Minuspole** (-). Diese Richtung wird als **Richtungssinn der Spannung** bezeichnet. Der Strom I fließt außerhalb der Spannungsquelle in der Regel vom Pluspol zum Minuspole (technische Stromrichtung).

Abbildung 2.6: Pfeile und Vorzeichen für Strom und Spannung

Arten der Spannungserzeugung

Spannung kann unterschiedlich erzeugt werden:

- Bei der Induktion werden durch magnetische Energie elektrische Ladungen getrennt.
- Im galvanischen Element trennt eine chemische Reaktion elektrische Ladungen.
- Im Thermoelement trennt die Wärme elektrische Ladungen.
- In der Solarzelle (Fotoelement) trennt die Strahlungsenergie des Lichtes elektrische Ladungen.
- Bei manchen Kristallen, z.B. Quarz, können durch Druck elektrische Ladungen getrennt werden.