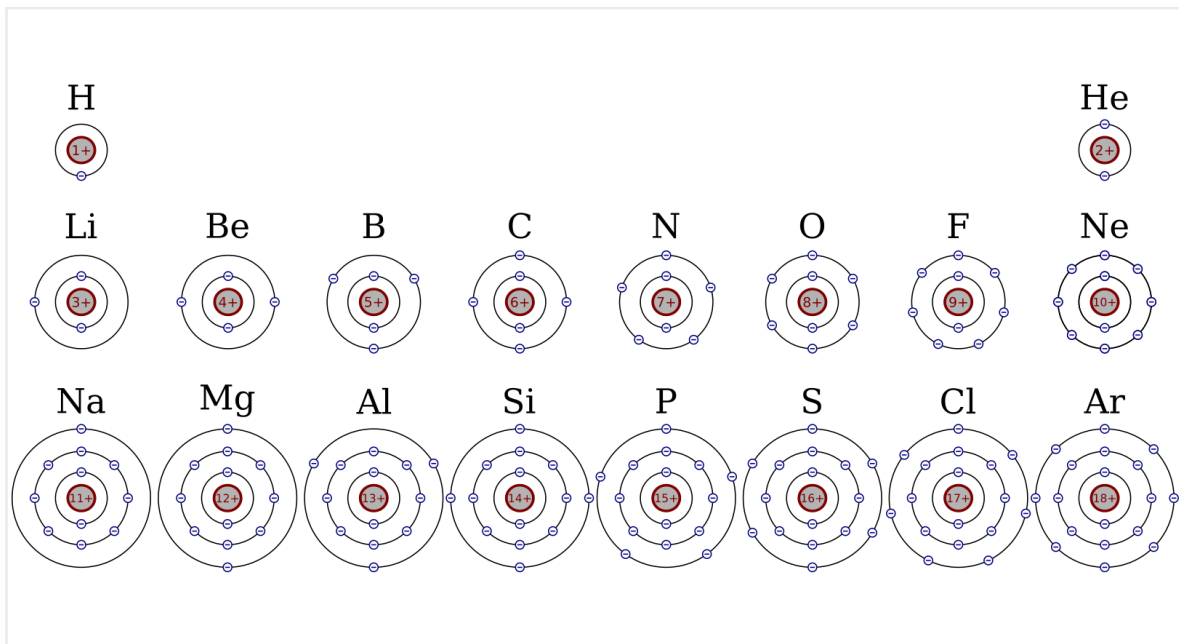


Elektrische Ladung

Alle Stoffe, die wir kennen, sind aus Atomen aufgebaut. Jedes dieser Atome besteht wiederum aus noch kleineren Bestandteilen. Für die Elektrizität und den Magnetismus sind insbesondere die positiv geladenen Protonen des Atomkerns sowie die negativ geladenen Elektronen der Atomhülle von Bedeutung



Vereinfacht lassen sich Elektronen als kleine Teilchen auffassen, die auf kugelartigen Bahnen den Atomkern umkreisen, ähnlich wie die Planeten unseres Universums die Sonne umkreisen.



Da die Elektronen auf den inneren Bahnen („Schalen“) sehr fest an den Atomkern gebunden sind, kommen sie als Ladungsträger für den elektrischen Strom nicht in Frage. Die elektrischen Eigenschaften eines Stoffes werden somit (fast) ausschließlich durch diejenigen Elektronen beeinflusst, die sich auf der äußersten Schalte befinden („Valenzelektronen“).

Allgemein gilt für jedes chemische Element:

- In einem Atom ist die Anzahl der Protonen gleich der Anzahl der Elektronen.

-
- Da jedes Atom gleich viele positive wie negative Ladungsträger besitzt, ist seine Gesamtladung, d.h. die Summe aller Ladungen, gleich null. Von außen betrachtet erscheint ein Atom deshalb als ein elektrisch neutrales Teilchen.
- Man hat als Einheit der elektrischen Ladung Q eine Ladungsmenge festgelegt, die so groß ist wie die elektrische Ladung von $6,2 \cdot 10^{18}$ Elektronen. Diese Einheit wird Coulomb (C) genannt

Ob ein Körper durch einen Reibungsvorgang positiv oder negativ aufgeladen wird, hängt von der Art der beteiligten Stoffe ab.

	Glas	Haare	Nylon	Wolle	Papier	Baumwolle	Bernstein	Hartgummi	Polyester	PVC	
--	------	-------	-------	-------	--------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----	--

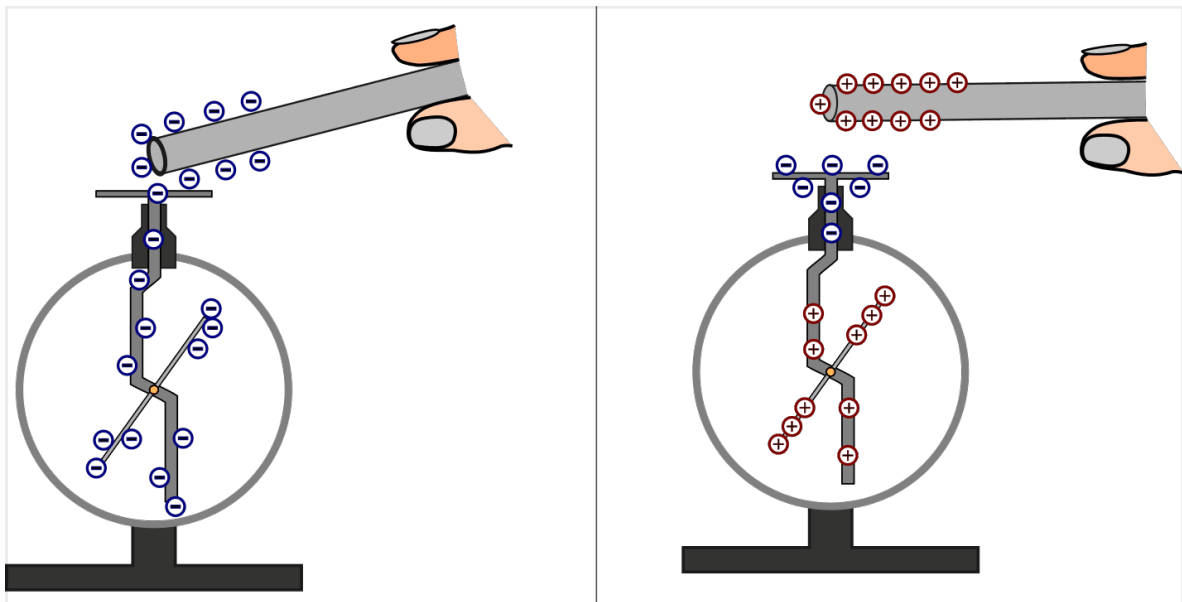
Ladungsausgleich und Ladungsnachweis

Wird ein geladener Körper über einen Metalldraht oder einen ähnlichen leitenden Kontakt mit dem Erdboden verbunden, so kommt es zu einer Entladung. Diesen Vorgang bezeichnet man als „Erden“.

- Wird ein negativ geladener Körper geerdet, so können überschüssige Elektronen vom Körper ins Erdreich abfließen. Die elektrische Spannung wird dabei abgebaut.
- Wird ein positiv geladener Körper geerdet, so fließen Elektronen vom Erdreich auf den Körper und gleichen den dort herrschenden Elektronenmangel aus.
- Gleichartig geladene Körper (Plus und Plus beziehungsweise Minus und Minus) stoßen einander ab.

- Unterschiedlich geladene Körper (Plus und Minus) ziehen einander an.
-
- Je stärker zwei Körper elektrisch geladen sind, desto stärker sind die Kräfte, die zwischen ihnen wirken. Quantitativ kann die zwischen zwei geladenen Körpern wirkende elektrostatische Kraft durch das Coulombsche Gesetz bestimmt werden, das im Abschnitt Elektrische Felder näher beschrieben ist.

Elektroskope



Ein Elektroskop besteht aus einem (meist gebogenen) Metallstab, an dem ein Zeiger leicht drehbar angebracht ist. Der Metallstab besitzt am oberen Ende eine Kontaktfläche und ist durch eine Halterung aus Kunststoff isoliert. Der drehbare Zeiger ist unten etwas schwerer, so dass er im Grundzustand senkrecht ausgerichtet ist.

Berührt man ein negativ geladenes Elektroskop mit einem positiv geladenen oder geerdeten Körper, so wird es wieder entladen. (Ein positiv geladenes Elektroskop lässt sich entsprechend durch Berührung mit einem negativ geladenen oder geerdeten Körper entladen.)

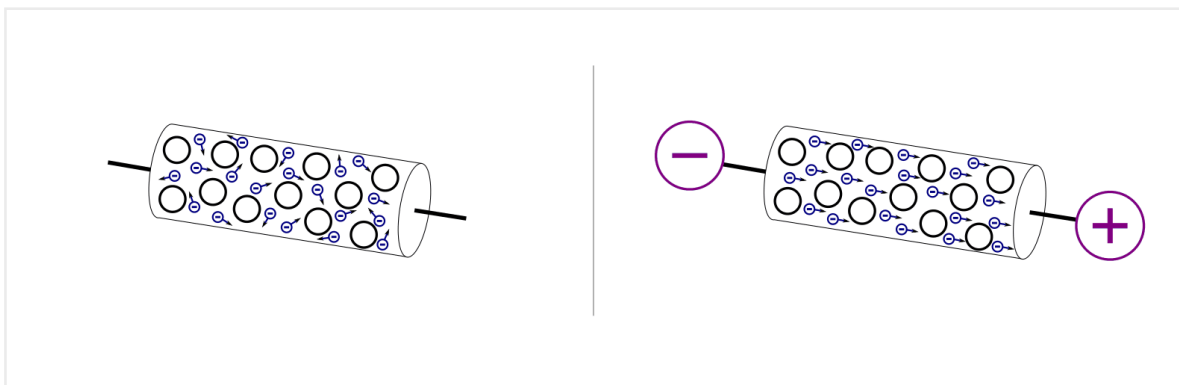
Mit einem Elektroskop kann man somit die Menge einer elektrischen Ladung messen, jedoch nicht, ob es sich um positive oder negative Ladung handelt.

Stromstärke, Spannung und Widerstand

Damit ein elektrischer Strom durch einen Körper fließen kann, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein:

In ihm müssen frei bewegliche Ladungsträger (beispielsweise Elektronen) vorhanden sein.

An ihm muss eine elektrische Spannung (Ladungsdifferenz) anliegen.



Ähnlich wie Wasser durch eine Pumpe in Bewegung versetzt werden kann, lassen sich Elektronen durch Stromquellen („Elektronenpumpen“) in Bewegung versetzen.

Die Stromstärke

Ein elektrischer Strom tritt auf, wenn sich elektrische Ladungen bewegen. Die elektrische Stromstärke ist ein Maß dafür, welche Menge an elektrischer Ladung in einer bestimmten Zeit durch einen Körper fließt.

Wird ein Wasserhahn aufgedreht, so beginnt Wasser zu fließen. Umso weiter der Wasserhahn aufgedreht wird, desto mehr Wasser strömt in einer bestimmten Zeit aus ihm heraus. Diese Kenngröße könnten wir als „Wasserstromstärke“ bezeichnen.

Die Wasserstromstärke als Modell für die elektrische Stromstärke.

Physikalische und technische Stromrichtung

Die Bewegung von Ladungsträgern konnte erstmals in elektrisch leitenden

Flüssigkeiten („Elektrolyten“) in Form von positiv geladenen Ionen beobachtet werden

Diese Konvention wurde beibehalten, obwohl man später feststellte, dass in leitenden Festkörpern vor allem die Bewegung der negativ geladenen Elektronen von entscheidender Bedeutung für den Stromfluss ist. Da diese vom Minus-Pol ausgehen und sich in Richtung Plus-Pol bewegen, muss man stets zwischen der ursprünglich festgelegten („technischen“) und der tatsächlichen („physikalischen“) Bewegungsrichtung der geladenen Teilchen unterscheiden:

- Die „technische“ Stromrichtung verläuft stets von Plus nach Minus.
- Die „physikalische“ Stromrichtung gibt die tatsächliche Bewegungsrichtung der geladenen Teilchen an. Für positive Ladungsträger ist sie mit der technischen Stromrichtung identisch, für negative Ladungsträger zeigt sie in die entgegengesetzte Richtung.
- In der heutigen Elektronik wird stets die technische Stromrichtung als Norm für Schaltpläne und Beschriftungen verwendet. Auch wenn der Ladungstransport durch Elektronen erfolgt, so sagt man, dass der Strom „von Plus nach Minus“ fließe. Dies mag physikalisch unkorrekt sein; entscheidend ist allerdings vielmehr, dass von der Polung abhängige Bauteile (beispielsweise Dioden und Transistoren) immer nach dem gleichen Schema hergestellt werden.¹
- Die elektrische Spannung
Elektrischer Strom fließt nicht von selbst, sondern benötigt eine elektrische Spannung als Ursache. Elektrische Spannung wiederum ist das Ergebnis einer Ladungstrennung, beispielsweise einer Erhöhung der Konzentration an Elektronen an einer Stelle gegenüber einer anderen Stelle.
- Auch beim Autoverkehr ist weniger entscheidend, ob ein Links- oder ein Rechtsverkehr vorherrscht, sondern vielmehr, dass sich alle Verkehrsteilnehmer an die gleichen Grundregeln halten.. ;-)

Der elektrische Widerstand

In einem idealen elektrischen Leiter können sich die Ladungsträger völlig frei bewegen. In einem realen Leiter hingegen treten stets Wechselwirkungen zwischen den sich bewegenden Elektronen und den zurückbleibenden Atomrümpfen auf. Ähnlich wie bei der mechanischen Reibung wird dabei elektrische Energie in Wärmeenergie umgewandelt (siehe auch Abschnitt Wärmeentwicklung in elektrischen Bauteilen).

Nicht-Ohmsche Widerstände

Das Ohmsche Gesetz (154) ist in seiner Gültigkeit auf homogene Materialien begrenzt.

In Halbleiter-Bauteilen (z.B. Dioden, Transistoren, usw.) ist der Zusammenhang zwischen Stromstärke und Spannung nicht linear; vielmehr ist in diesen Bauteile erst ab einer bestimmten Spannung ein Stromfluss möglich, der bei einer weiteren Erhöhung der Spannung überproportional ansteigt (Abbildung Kennlinie einer Diode in Durchlass-Richtung).

Die elektrische Leitfähigkeit wird meist in der Einheit $S \cdot m$ angegeben. Je größer die elektrische Leitfähigkeit eines Materials ist, desto geringer ist sein elektrischer Widerstand bei gleicher Querschnittsfläche und Länge.

Der elektrische Leitwert wird in der Einheit „Siemens“ (Kurzzeichen S) angegeben, wobei $1S = 1\Omega^{-1} = 1VA$ gilt. Je größer der elektrische Leitwert eines Stromkreises ist, desto größer ist die Stromstärke bei gleicher anliegender Spannung.

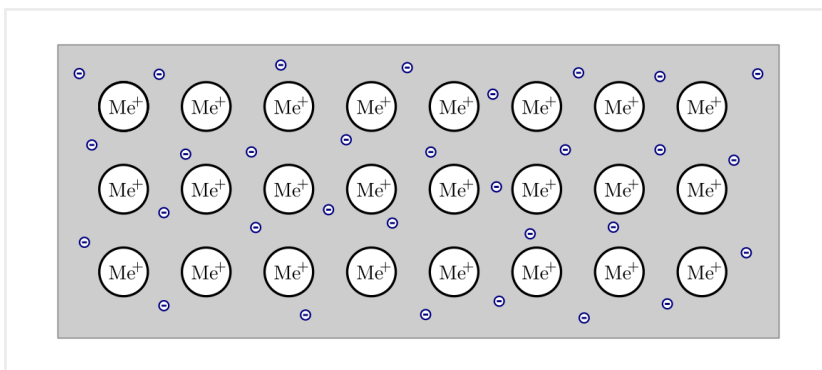
Leiter, Halbleiter und Isolatoren

Ob ein elektrischer Strom in einem Stoff fließen kann, hängt von der Anzahl der frei beweglichen Ladungsträger innerhalb des Stoffes ab.

Leiter

Elektrische Leiter werden Stoffe genannt, in denen sich Ladungen leicht bewegen können. Die bekanntesten Leiter sind Metalle, Graphit, Säuren, Laugen und Salzlösungen.

In Metallen sind die einzelnen Atome in einer Gitterstruktur angeordnet, wobei sich die äußersten Elektronen („Valenzelektronen“) frei entlang des gesamten Gitters bewegen können („Metallbindung“, „Elektronengas“). Bei nur einem ungebundenem Elektron je Atom steht dabei eine enorme Zahl an Ladungsträgern – etwa 10^{19} Elektronen je Kubik-Millimeter! – für den Ladungstransport frei zur Verfügung.¹



Bei höheren Temperaturen führen die Atomrümpfe eines Metallgitters immer stärkere Wärme-Schwingungen um ihre Ruhelagen aus. Die freien Elektronen werden dadurch in ihrer Beweglichkeit eingeschränkt, was zu einem höheren elektrischen Widerstand führt

Hierbei gibt R_{20} den Widerstandswert bei Raumtemperatur ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$) an, ΔT entspricht der Temperaturdifferenz zu diesem Referenzwert (ebenfalls in $^{\circ}\text{C}$). Der so genannte „Temperaturbeiwert“ α ist materialabhängig und wird in $1/\text{K}$ angegeben.

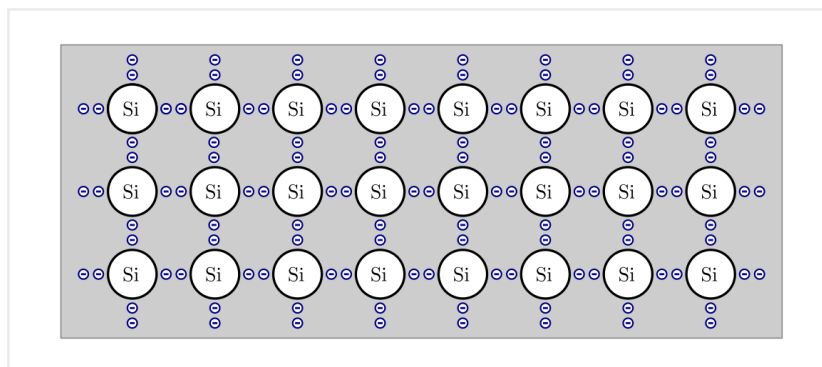
1 Die Leitfähigkeit eines Metalls ist rund 10 Milliarden (10^8) mal höher als die eines Halbleiters und rund 100 Billionen (10^{14}) mal höher als die eines Isolators!

Bei niedrigen Temperaturen nehmen die Wärme-Schwingungen der Atomrümpfe und der elektrische Widerstand entsprechend ab; in vielen Metallen verschwindet der elektrische Widerstand ab einer materialspezifischen Temperatur sogar vollständig („Supraleitung“).

In Flüssigkeiten können durch Lösungsvorgänge elektrisch geladene Atome und Moleküle („Ionen“) auftreten. Diese sind zwar bedeutend schwerer als Elektronen, können aber dennoch als freie Ladungsträger den elektrischen Strom leiten.

Halbleiter

In reinen Halbleiter-Materialien sind – im Gegensatz zu elektrischen Leitern – im Grundzustand (fast) keine freien Ladungsträger verfügbar. Beispielsweise bilden im wohl typischsten Halbleiter-Element Silizium (und auch in Germanium) alle vier Valenzelektronen kovalente Bindungen mit den vier benachbarten Atomen aus. Nur durch ein zeitweises Herauslösen der Valenzelektronen mittels Licht, Wärme oder ausreichender elektrischer Spannung lässt sich ein Ladungstransport in einem reinen Halbleiter erreichen.



Elementare Halbleiter befinden sich im Periodensystem der Elemente in der vierten Hauptgruppe und besitzen eine chemische Wertigkeit von vier. Nach dem gleichen Bindungsprinzip sind ebenso sogenannte Verbindungs Halbleiter möglich, bei denen die durchschnittliche chemische Wertigkeit vier beträgt:

Bei Gallium-Arsenid (GaAs), einem III-V-Halbleiter, trägt jedes Galliumatom drei und jedes Arsenatom fünf Valenzelektronen zu den kovalenten Bindungen bei.

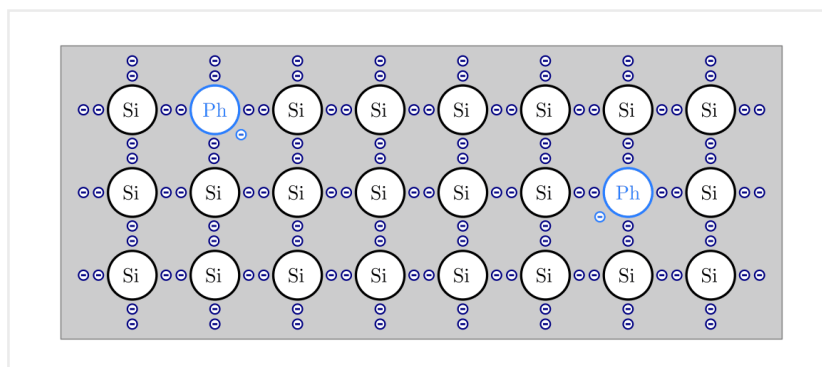
Bei Cadmium-Sulfid (CdS), einem II-VI-Halbleiter, trägt jedes Cadmium-Atom zwei und jedes Schwefelatom sechs Valenzelektronen zu den kovalenten Bindungen bei

Bei höheren Temperaturen lösen sich Elektronen häufiger aus den kovalenten Bindungen heraus; der elektrische Widerstand eines Halbleiters wird daher – anders als bei Metallen – durch eine Erwärmung zunächst geringer. Bei noch stärkerer Erwärmung überwiegt jedoch wieder der stromhemmende Effekt der Atomschwingungen, wodurch der elektrische Widerstand wiederum stark ansteigt.

Die *n*-Dotierung

Bei einer *n*-Dotierung werden gezielt zusätzliche negativ geladene Ladungsträger in einen Halbleiter eingefügt.

Bringt man ein chemisch fünfwertiges Atom (beispielsweise Phosphor) in einen Halbleiter- Kristall (beispielsweise Silicium) ein, so können nur vier der fünf Valenzelektronen des Phosphors kovalente Bindungen mit den benachbarten Atomen aufbauen. Das fünfte Valenzelektron bleibt ungebunden am Phosphoratom zurück und lässt sich verhältnismäßig leicht ablösen. Somit steht es im weiteren Sinn als ein „freier“ Ladungsträger für den elektrischen Strom zur Verfügung.



n-Dotierung eines Silicium-Kristalls durch Einbringen von Phosphor-Atomen.

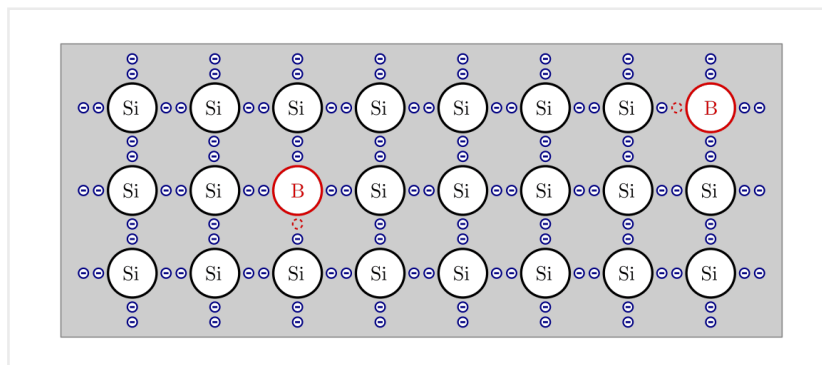
Typische chemisch fünfwertige Fremdatome („Donatoren“) sind beispielsweise Phosphor (P), Arsen (As) und Antimon (Sb). In üblichen *n*-Dotierungen wird ein Fremdatom auf etwa 1 bis 10 Millionen Halbleiter-

Atome eingebracht. Der Halbleiter bleibt durch die n -Dotierung weiterhin elektrisch neutral.

Die p -Dotierung

Bei einer p -Dotierung werden gezielt zusätzliche positiv geladene Ladungsträger in einen Halbleiter eingefügt.

Bringt man ein chemisch dreiwertiges Atom (beispielsweise Bor) in einen Halbleiter- Kristall (beispielsweise Silicium) ein, so bleiben an den Bor-Atomen „Löcher“ oder „Defektstellen“ in den kovalenten Bindungen zurück. Jedes Bor-Atom ist zwar fest im Halbleiterkristall eingebunden, doch stellt jedes Loch einen freien Platz für benachbarte Valenzelektronen dar, der verhältnismäßig leicht besetzt werden kann. Springt ein Valenzelektron aus einer anderen kovalenten Bindung in die Defektstelle, so ist das Loch an eine neue Stelle weiter gewandert. Somit können die eingebrachten Löcher im weiteren Sinn als freie, einfach positiv geladene Ladungsträger angesehen werden.



Typische chemisch dreiwertige Fremdatome („Akzeptoren“) sind beispielsweise Bor (B), Aluminium (Al), Gallium (Ga) sowie Indium (In). In üblichen p -Dotierungen wird ebenfalls ein Fremdatom auf etwa 1 bis 10 Millionen Halbleiter-Atome eingebracht. Auch durch die p -Dotierung bleibt der Halbleiter elektrisch neutral.

N-Type = Donatoren
P-Type = Akzeptoren

Der n - p -Übergang

Verbindet man einen n - mit einem p -dotierten Halbleiterkristall, so bildet sich entlang der Verbindungslinie ein neutraler Übergangsbereich aus, in der die zusätzlichen Elektro- nen der n -dotierten Schicht die Löcher der p -dotierten Schicht auffüllen. Die paarweise Aufhebung von Elektronen und Löchern wird als „Rekombination“, der entstehende Raum- bereich als „Raumladungszone“ oder „Grenzschicht“ bezeichnet.

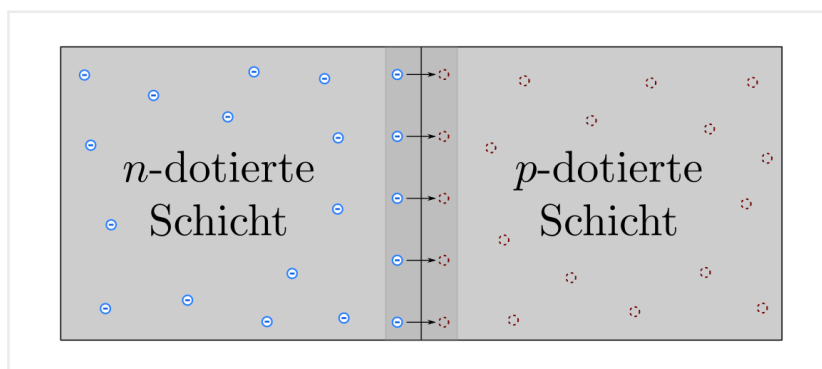
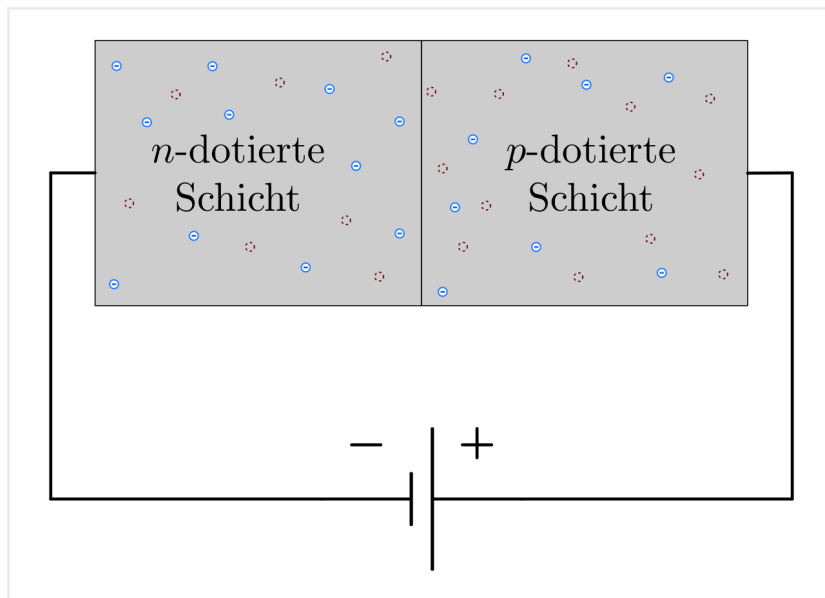


Abb. 189: Prinzip eines n - p -Übergangs.

In Silizium-Kristallen beträgt die Drift-Spannung rund $U_{D, Si} \approx 0,7 \text{ V}$, in Germanium- Kristallen rund $U_{D, Ge} \approx 0,3 \text{ V}$. Die Dicke der Raumladungszone hat bei typischen Dotierungen eine Größenordnung von $0,001 \text{ mm}$.

- In der Elektronik werden n - p -Übergänge in Halbleiter-Bauelementen verwendet. Ein einzelner n - p -Übergang erfüllt die Funktion einer Diode. Doppelte beziehungsweise dreifache n - p -Übergänge finden in Transistoren und Triacs Anwendung.



- Trifft ausreichend energiereiches Licht auf einen Festkörper, so können durch die Lichteinwirkung Elektronen aus den Festkörper-Bindungen herausgelöst werden („Photo-Effekt“).
- Bei ausreichend hohen Temperaturen lösen sich Elektronen aus Metallen heraus („Glühemission“).

Elektrisches Feld eines Plattenkondensators

Ein elektrisches Feld mit gleichmäßig verteilten und in die gleiche Richtung zeigenden Feldlinien erhält man, wenn man zwei metallische, zueinander parallel angeordnete Platten mit entgegengesetzten Ladungsträgern bestückt. Im Inneren eines solchen „Plattenkondensators“ ist die elektrische Feldstärke an allen Stellen gleich („homogen“).²

Magnetismus

Bereits seit der Antike kennen und nutzen die Menschen magnetische Erscheinungen. Insbesondere die Verwendung von dünnen, drehbar gelagerten Magnetscheiben in Computern war in vielerlei Hinsicht „richtungsweisend“ für die Entwicklung der Menschheit. Inzwischen sind insbesondere Elektromagnete, Elektromotoren, Generatoren und Trans-

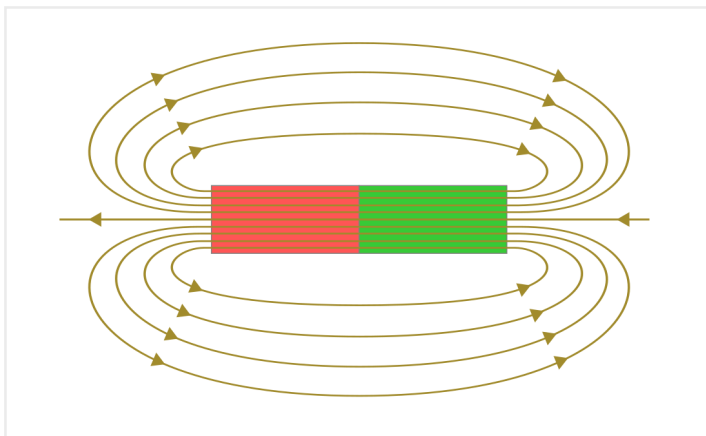
formatoren aus unserer modernen Gesellschaft nicht mehr wegzudenken.

Permanentmagnete

Wohl am bekanntesten ist die anziehende Wirkung von Magneten auf Eisen. Stoffe, die ebenso wie Eisen von Magneten angezogen werden und dabei selbst magnetisiert werden, bezeichnet man nach dem lateinischen Namen von Eisen („ferrum“) als „ferromagnetisch“ oder umgangssprachlich kurz als „magnetisch“. Hierzu zählen Kobalt, Nickel, Neodym, und wenige Legierungen.

Auf nicht-ferromagnetische Stoffe zeigen Magnete (fast) keine Wirkung.

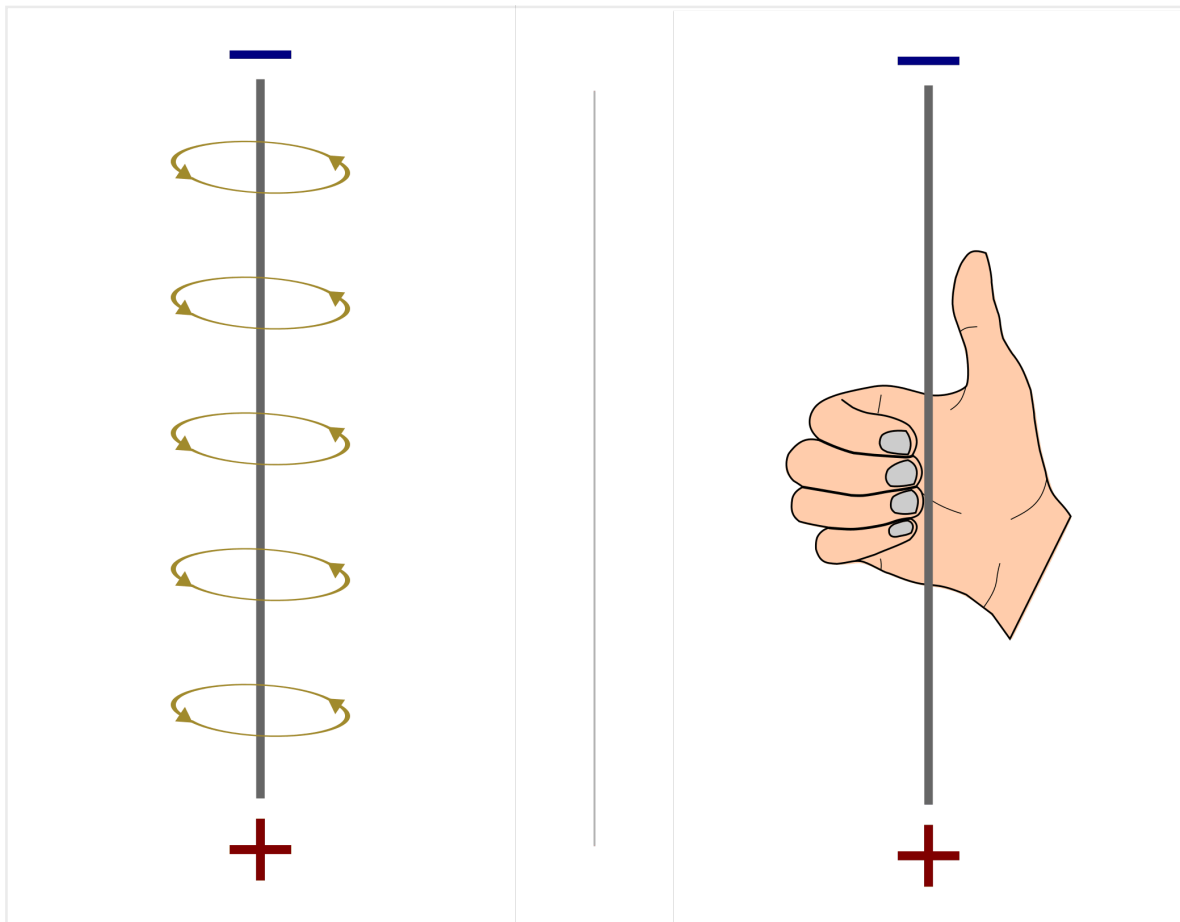
- Die Abhängigkeit der Magnetkräfte von der Form des Magneten lässt sich am leichtesten mit Hilfe von Eisenfeilspänen beobachten. Diese werden an unterschiedlichen Stellen um den Magneten herum verschieden stark ausgelenkt bzw. angezogen, so dass sich jeweils ein für die Form des Magneten charakteristisches Muster ergibt.



- Die geschlossenen Linien, die sich in den Mustern der Eisenfeilspäne um den Magneten herum ergeben, deuten somit jeweils auf die Richtung der Magnetkraft hin. Man bezeichnet diese räumliche Verteilung der Magnetkräfte um den Magneten herum als „Magnetfeld“ und stellt sie in technischen Zeichnungen (etwas vereinfacht) durch einige stets geschlossene Linien dar. Oftmals werden noch entlang dieser „Magnetfeldlinien“ kleine Pfeile eingezeichnet, die jeweils am Nordpol aus dem Magneten aus- und am Südpol wieder eintreten.

Zusammenfassung:

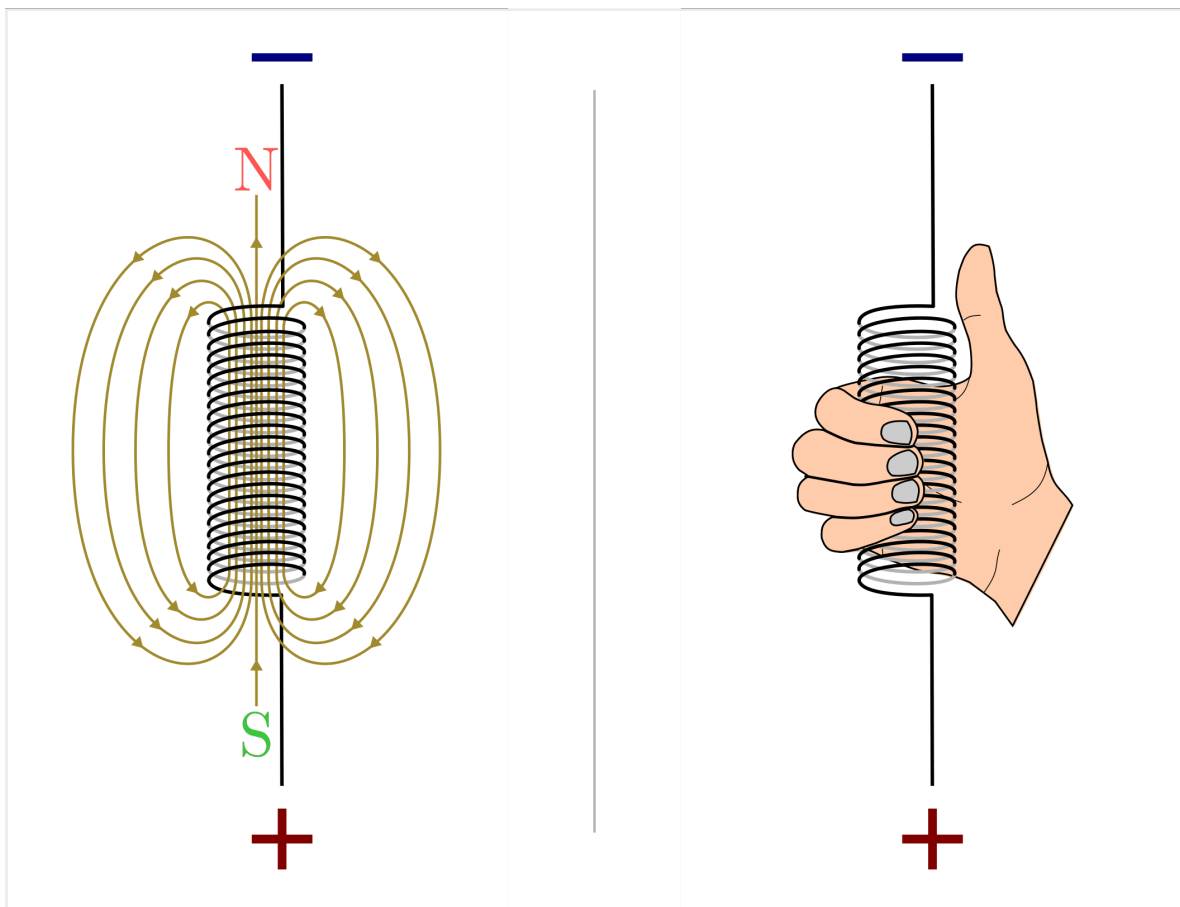
- Magnetpole treten stets paarweise auf. Entlang diesen verlaufen die Magnetfeldlinien auf stets geschlossenen Bahnen.
- Die Pfeile der Magnetfeldlinien zeigen innerhalb des Magneten in Richtung Nordpol, außerhalb des Magneten in Richtung Südpol.
- Gleiche Magnetpole stoßen sich ab, unterschiedliche Magnetpole ziehen sich an.
- Die magnetische Wirkung nimmt mit zunehmendem Abstand von den Magnetpolen ab.
- Rechte-Hand-Regel (für Leiterbahnen):
Umfasst man einen stromdurchflossenen geraden Leiter mit der rechten Hand so, dass der ausgestreckte Daumen entlang der technischen Stromrichtung (von + nach -) zeigt, dann geben die übrigen Finger die Richtung der magnetischen Feldlinien an.



Das Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule

Rechte-Hand-Regel (für Spulen):

Umfasst man die Windungen einer Spule mit der rechten Hand so, dass die Finger in die technische Stromrichtung zeigen, dann liegt der magnetische Nordpol der Spule in Richtung des ausgestreckten Daumens.



- Eine zweite wichtige Größe zur Beschreibung von magnetischen Feldern ist die so ge- nannte magnetische Flussdichte \vec{B} . Sie gibt anschaulich an, wie viele Feldlinien durch ei- ne bestimmte Fläche hindurchgehen. Zwischen der magnetischen Flussdichte, welche die räumliche Verteilung der Feldlinien kennzeichnet, und die magnetische Feldstärke, welche die Kraftwirkung auf andere Magneten beschreibt,

gibt es folgenden Zusammenhang:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} \Leftrightarrow \vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \vec{B} \quad (172)$$

Hierbei bezeichnet $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ V} \cdot \text{s} / \text{A} \cdot \text{m}$ die magnetische Feldkonstante. Für die magnetische Flussdichte ergibt sich damit als Einheit:

$$[B] = 1 \text{ V} \cdot \text{s} / \text{A} = 1 \text{ Tesla} = 1 \text{ T}$$

- Beispielsweise beträgt die magnetische Flussdichte der Erde rund 0,04 mT.
- Die Lorentz-Kraft

Drei-Finger-Regel:

Zeigt der Daumen der rechten Hand in Richtung der technischen Stromrichtung (von + nach -) und der Zeigefinger in Richtung des Magnetfeldes, so gibt der Mittelfinger die Richtung der wirkenden Kraft an.

