

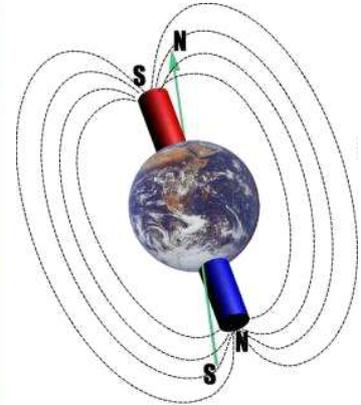
## **Hinweis:**

*Das vorliegende Skript ist als begleitendes Material für den Physik-Unterricht der 9. Klasse und nur für den eigenen Gebrauch bestimmt. Dieses Dokument darf nicht an andere Personen außerhalb des Unterrichts weitergegeben und verbreitet werden. Die in diesem Skript verwendeten Abbildungen sind aus dem Schulbuch "Physik Bayern Gymnasium 8 & 9", Duden Paetec Verlag und "Realschule Physik 9" C.C.Buchner Verlag entnommen und urheberrechtlich geschützt.*

# 1 Elektrik und Magnetismus

## 1.1 Magnetismus

### 1.1.1 Magnete



- ein Körper der auf Eisen, Kobalt, Nickel und bestimmte Legierungen aus diesen Metallen eine anziehende Kräfte ausübt, heißt **Magnet**
- **Dauermagnete (Permanentmagnete)** sind Legierungen aus Eisen-Nickel, Eisen-Aluminium, Eisen-Neodym etc. die diese Eigenschaft dauerhaft besitzen
- Stoffe die von einem Magneten angezogen werden, nennt man **ferromagnetisch** (Eisen, Kobalt, Nickel etc.)
- die Anziehungskraft eines Magneten wirkt durch nicht-ferromagnetische Stoffe hindurch
- die Anziehungskraft auf ferromagnetische Stoffe ist nicht an allen Stellen des Magneten gleich groß:
  - jeder Magnet weist stets zwei Bereiche stärkster Anziehungskraft auf  $\implies$  **Pole** genannt
  - in der Magnetmitte zwischen den beiden Polen, **indifferente Zone**, ist die Kraft sehr gering
- ein Magnet besitzt immer zwei verschiedene Magnetpole  $\implies$  ein Magnet ist ein **magnetischer Dipol**:
  - **Nordpol**: rot (*Nordpol der Kompassnadel zeigt zum geograph. Nordpol*)
  - **Südpol**: grün (*Südpol der Kompassnadel zeigt zum geograph. Südpol der Erde*)
- **gleichnamige** Pole stoßen sich ab, **ungleichnamige** Pole ziehen sich an
- je größer der Abstand zwischen den Polen ist, desto geringer ist die Kraftwirkung
- ungleichnamige Pole neutralisieren sich gegenseitig (heben ihre Kraftwirkung auf)

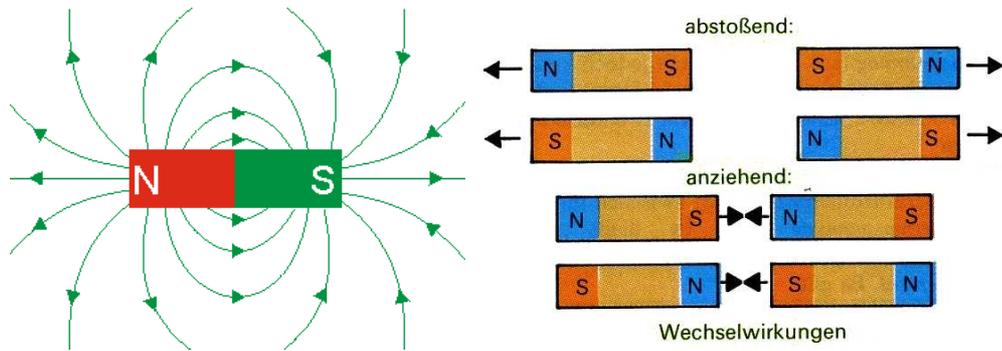


Abbildung 1: links: Stabmagnet mit magn. Nord- und Südpol; rechts: Wechselwirkung zwischen den magn. Polen

### 1.1.2 Modellvorstellung zum Magnetismus

- ein Magnet ist immer ein **magnetischer Dipol**
- bei der Zerteilung von Magneten entstehen immer wieder vollständige Magnete – es gibt keinen magnetischen Monopol!

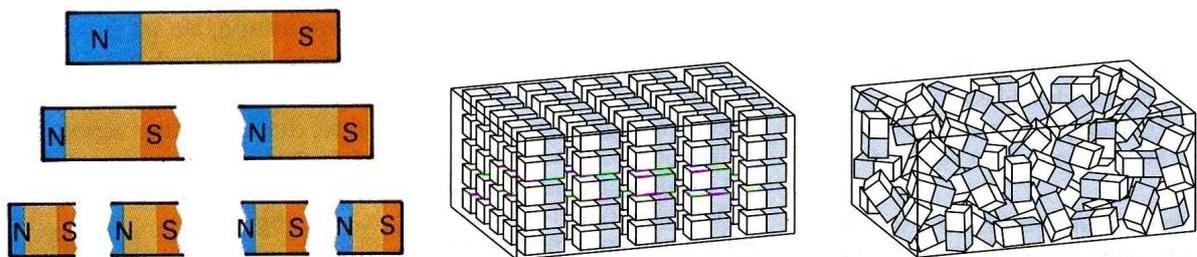
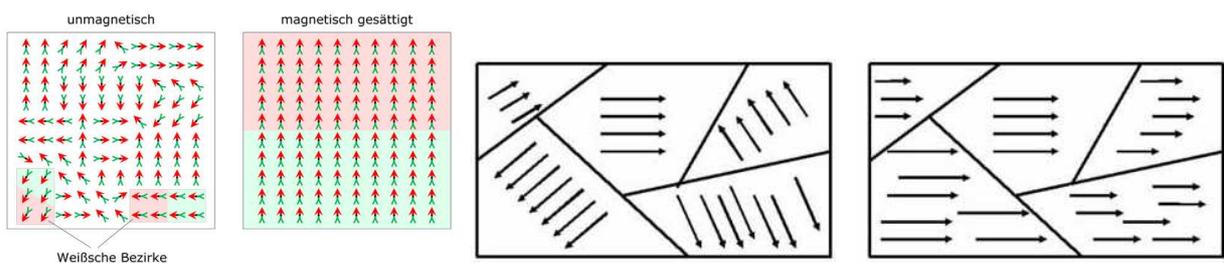


Abbildung 2: links: bei der Zerteilung von Magneten entstehen immer neue Dipole; rechts: Modell der Elementarmagnete

- in jedem ferromagnetischen Körper existieren kleinste magnetische Dipole, sogenannte **Elementarmagnete**
  - in einem Magneten sind alle Elementarmagneten ausgerichtet
  - in einem nicht-magnetischen Ferromagneten sind die Elementarmagneten ungeordnet
- in kleinen Raumbereichen bilden mehrere Elementarmagnete mit der gleichen Ausrichtung sogenannte **Weißsche Bezirke**



- ferromagnetische Körper (Eisen) können durch überstreichen mit starken Magneten in gleicher Richtung **magnetisiert** werden
- Magneten können durch Erschütterungen und beim Erhitzen über die **Curietemperatur entmagnetisiert** werden
- **magnetische Influenz**: unmagnetische ferromagnetische Stoffe (z.B. Eisen) werden in der Nähe von Magneten selbst zu Magneten  $\implies$  in der Nähe eines Nordpols entsteht ein influenzierter Südpol und umgekehrt

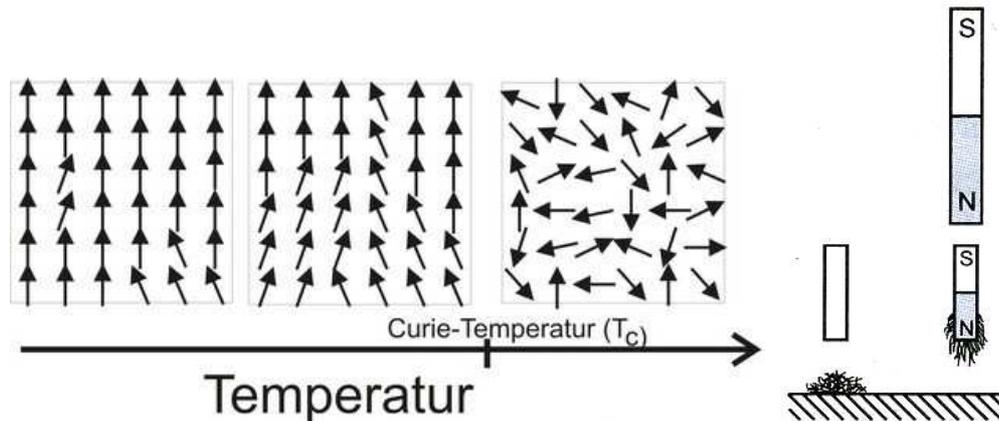


Abbildung 3: links: Entmagnetisierung durch Erhitzen eines Magneten über die Curietemperatur; rechts: magnetische Influenz

### 1.1.3 Magnetfelder

- der Raumbereich in der Umgebung eines Magneten, in dem auf ferromagnetische Stoffe Kräfte wirken, nennt man **magnetisches Feld** oder **Magnetfeld**
- das magnetische Feld wird durch magnetische **Feldlinien** (gedachte Linien) veranschaulicht

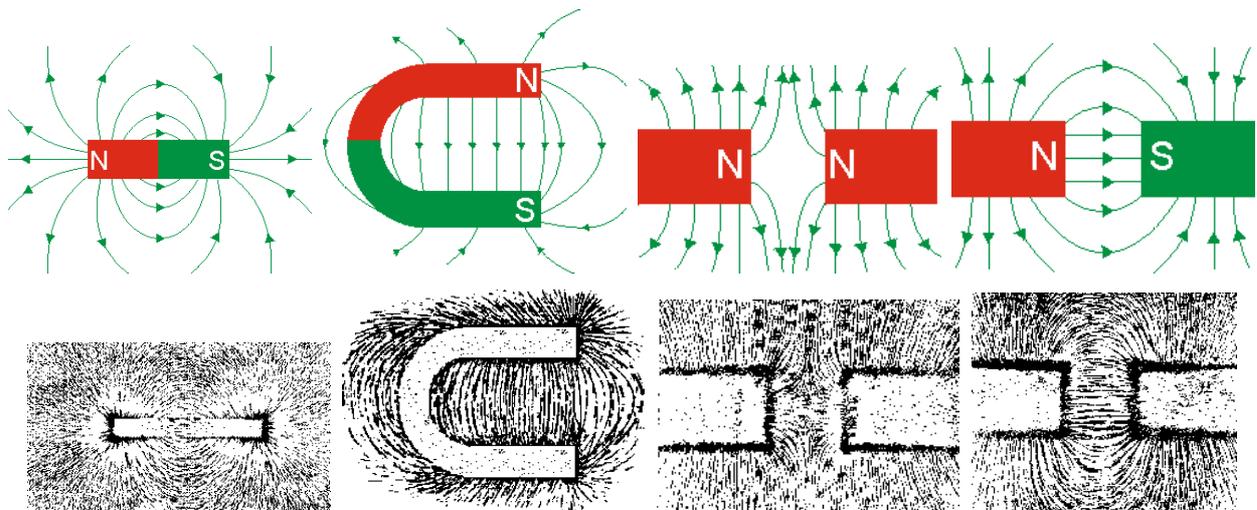


Abbildung 4: graphische Darstellung der Feldlinien und Darstellung durch Eisenspäne

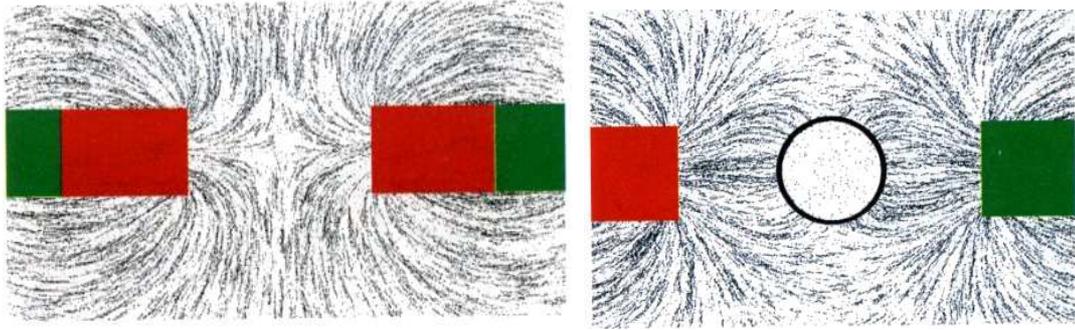


Abbildung 5: links: resultierendes Magnetfeld der Abstoßung rechts: Hohlkörper und Abschirmung des äußeren Magnetfeldes

- die Feldlinien:
  - sind immer in sich geschlossen  $\implies$  haben weder Anfangs- noch Endpunkt
  - kreuzen und berühren sich nicht
  - sind umso dichter, je stärker das Magnetfeld ist
  - verlaufen außerhalb eines Permanentmagneten vom Nord- zum Südpol, im Inneren vom Süd- zum Nordpol
  - können durch Eisenfeilspäne oder Magneten sichtbar gemacht werden
  - verlaufen parallel  $\implies$  Magnetfeld ist **homogen**
  - verlaufen nicht parallel  $\implies$  Magnetfeld ist **inhomogen**
- Magnetfelder können sich überlagern  $\implies$  resultierendes Magnetfeld
- ferromagnetische Hohlkörper schirmen äußere Magnetfelder ab  $\implies$  Hohlkörper wird selbst zum Magneten und neutralisiert durch Überlagerung das äußere Magnetfeld

## 1.1.4 Magnetfeld der Erde

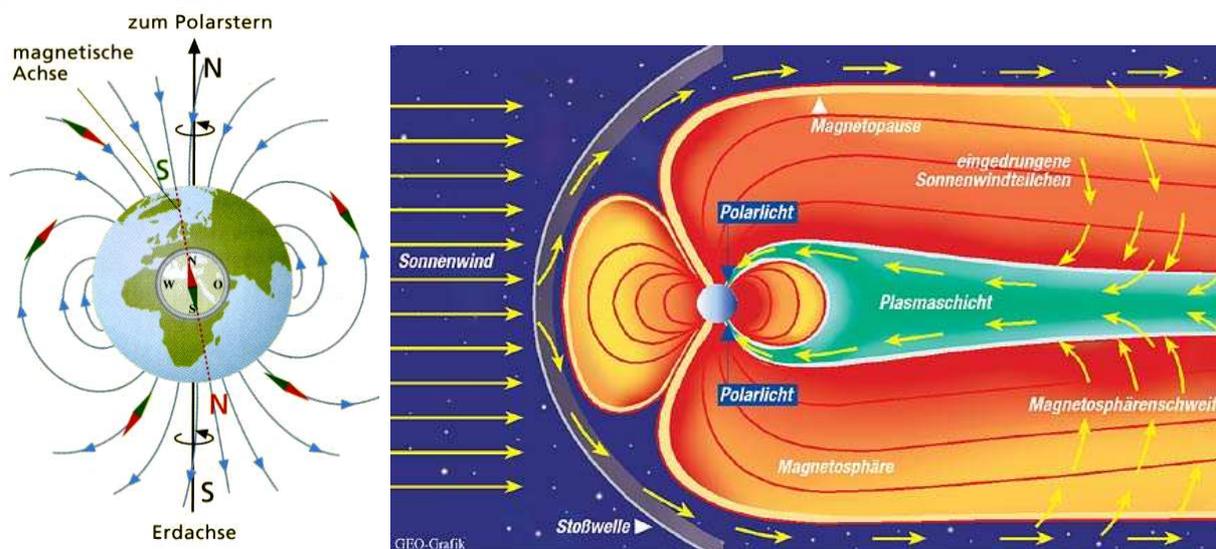


Abbildung 6: links: Nord und Südpol des Magnetfeldes rechts: Verformung des Magnetfeldes durch den Sonnenwind

- die Erde besitzt ein Magnetfeld, welches durch Strömungen im flüssigen Erdkern erzeugt wird
- der magnetische Südpol liegt in der Nähe des geografischen Nordpols und der magnetische Nordpol liegt in der Nähe des geografischen Südpols
- das Magnetfeld der Erde wird durch den Sonnenwind (Strom geladener Teilchen: Protonen, Elektronen, Heliumkerne) verformt und schützt die Erde vor diesen Teilchen
- durch die Ablenkung des Sonnenwindes entstehen die Polarlichter, da die geladenen Teilchen die Atome der Atmosphäre zum leuchten anregen

## 1.2 Elektrische Ladungen und Felder

### 1.2.1 Elektrisch geladene Körper

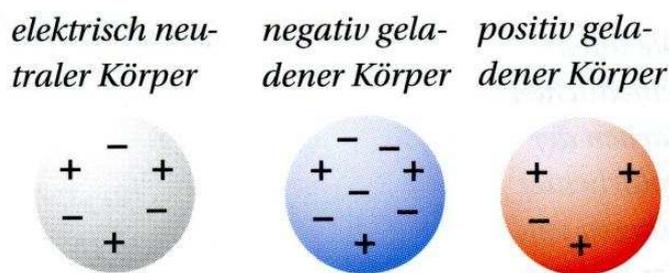


Abbildung 7: neutraler und geladene Körper

- es gibt zwei Arten elektrischer Ladung, **negative** und **positive Ladungen**

- Elektronenüberschuss auf einem Körper bedeutet, dass er **negativ**, Elektronenmangel, dass er **positiv** geladen ist
- gleiche Mengen positiver und negativer Ladungen auf einem Leiter neutralisieren sich
- elektrische Ladungen können durch Berührung von einem Körper auf einen andern übertragen werden
- geladene Körper werden entladen, wenn man sie leitend mit der Erde verbindet (Erdung)
- elektrische Ladungen können in elektrischen Leitern fließen
- gleichnamige elektrische Ladungen stoßen einander ab, ungleichnamige Ladungen ziehen sich an

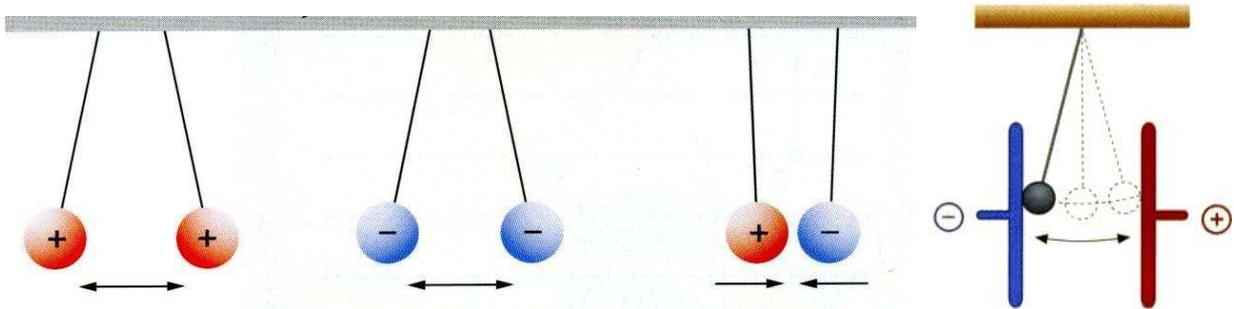


Abbildung 8: links: Abstoßung und Anziehung elektrisch geladener Körper rechts: Übertragung der Elektronen von der negativen zur positiven geladenen Kondensatorplatte durch eine Kugel

- Atom besteht aus positiv geladenen **Atomkern** und einer negativ geladenen **Atomhülle**

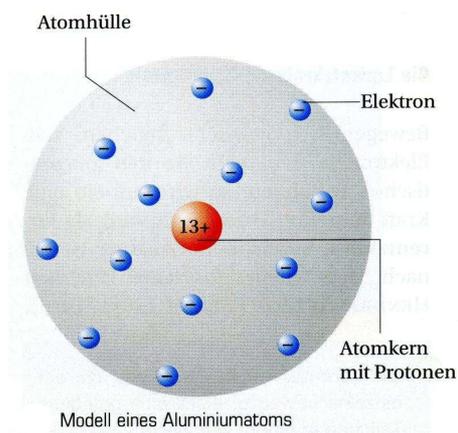


Abbildung 9: Atommodell am Beispiel von Aluminium

- im **Atomkern** befinden sich positiv geladene **Protonen** und ungeladene **Neutronen**
- die negativ geladenen **Elektronen** sind in der **Atomhülle** enthalten
- ein **neutrales** Atom besitzt gleich viele (negative) Elektronen wie (positive) Protonen

- fehlen dem Atom Elektronen, dann ist das es positiv geladen und wird als positives **Ion** bezeichnet
- die kleinste frei vorkommende Ladung wird als **Elementarladung**  $e$  bezeichnet
- jede in der Natur vorkommende elektrische Ladung ist stets ein ganzzahliges Vielfaches dieser Elementarladung  $e$
- mit einem **Elektroskop** kann die Ladungsmenge bestimmt werden

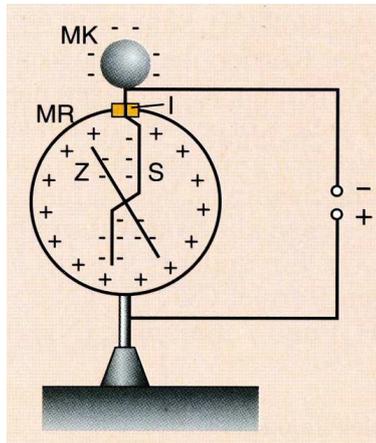


Abbildung 10: Elektroskop zur Bestimmung der Ladungsmenge

- der negative Pol der Ladungsquelle lädt die Metallkugel MK, die Stange S und den Zeiger Z negativ auf  $\implies$  Stange S und Zeiger Z stoßen sich ab
- der Ausschlag ist ein Maß für die geflossene Ladungsmenge
- der Metallring MR wird durch die Ladungsquelle positiv aufgeladen (Elektronen fließen zu Ladungsquelle ab)

### 1.2.2 Elektrische Felder

- in dem Raum um einen elektrisch geladenen Körper existiert ein **elektrisches Feld**
- in einem elektrischen Feld wirken **Kräfte** auf andere elektrisch geladene Körper

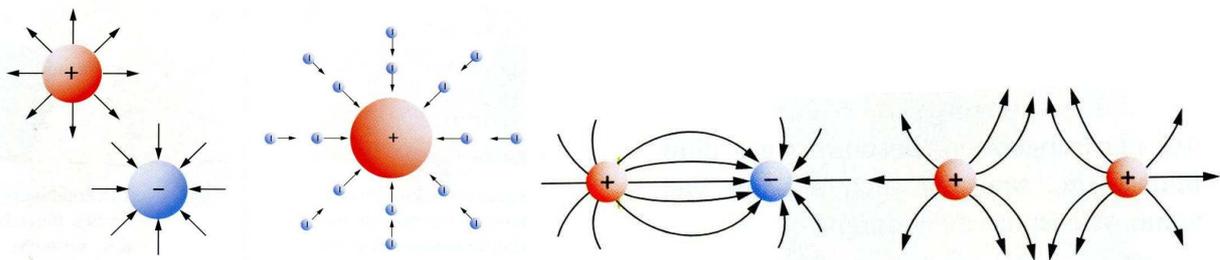


Abbildung 11: elektrische Felder; *links*: um geladene Kugeln (Kraft auf geladene Körper) *rechts*: zwischen geladenen Kugeln

- das elektrische Feld lässt sich mit einem **Feldlinienbild** – Modell des elektrischen Feldes – veranschaulichen

- die Feldlinien eines elektrischen Feldes verlaufen **von positiv zu negativ** ( $+ \rightarrow -$ ) und **treffen rechtwinklig auf den** (ungleichnamig) geladenen Körper
- der Verlauf der Feldlinien ist **abhängig** von der Geometrie der geladenen Körper (Kugel/Kugel, Platte/Platte, Spitze/Platte etc.) und der Art der Ladungen (gleichnamig, ungleichnamig)

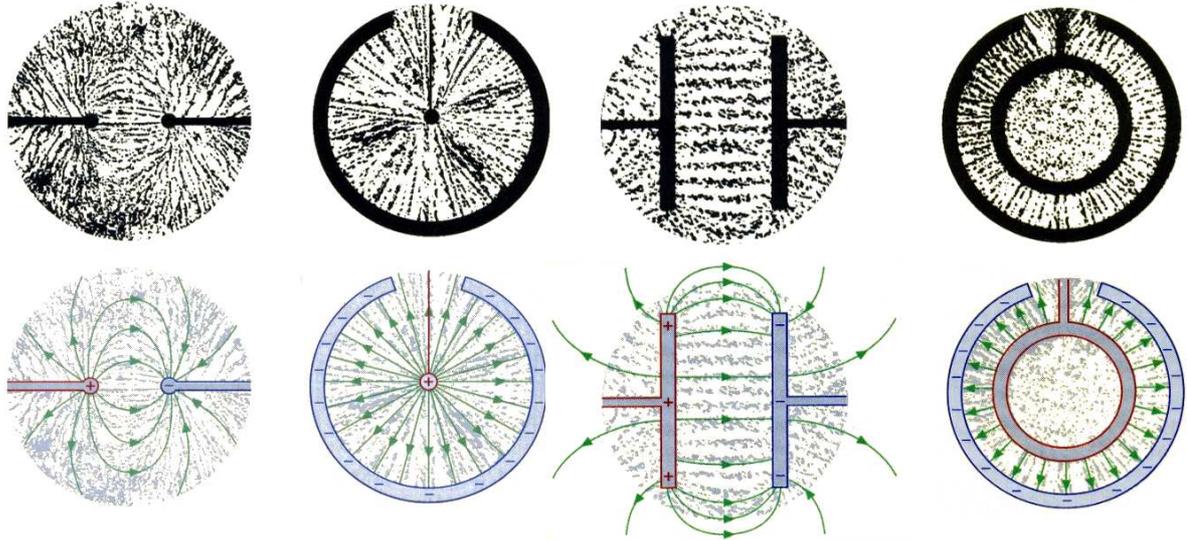


Abbildung 12: elektrische Felder (von links nach rechts): Dipolfeld, radialsymmetrisches Feld, homogenes Feld (zwischen Platten), feldfreie Zone (im Ring)

- in einem elektrischen Feld wirkt auf Ladungsträger (z.B. Elektronen) eine (Coulomb-) **Kraft**, diese ist in einem homogenen elektr. Feld konstant

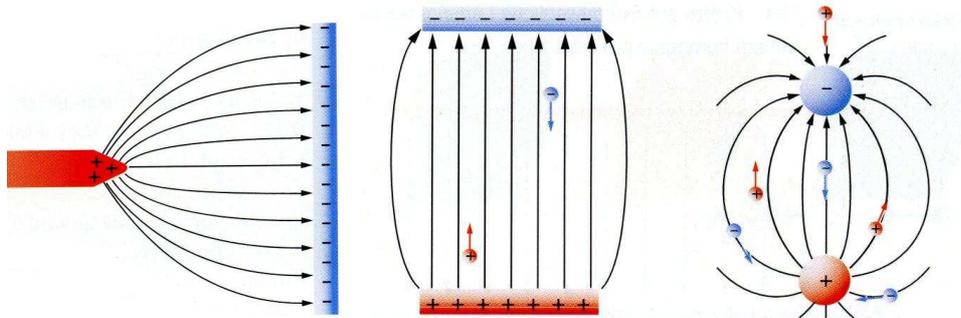


Abbildung 13: Kraft auf eine Probeladung in elektrischen Feldern: Spitze/Platte (inhomogen), Platte/Platte (homogen) und Kugel/Kugel (inhomogen)

- die Kraft ist **umso größer**, je stärker das elektr. Feld ist und je größer die Ladung der Ladungsträger ist
- frei bewegliche Ladungsträger werden in Feldrichtung bzw. entgegengesetzt der Feldrichtung **beschleunigt** (siehe auch Abb. 13)

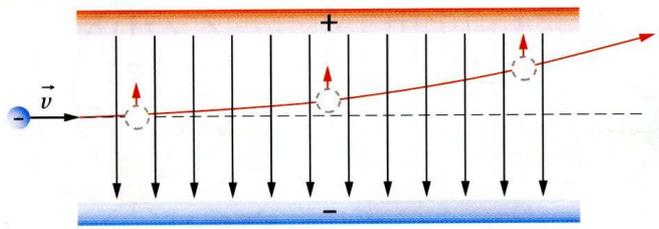


Abbildung 14: Ablenkung von freien Elektronen bei der Bewegung **senkrecht** zu einem homogenen elektrischen Feld

### 1.2.3 Elektrische Influenz, Polarisation und Oberflächenladung

- **elektrische Influenz** bezeichnet die Ladungsverschiebung in einem Metallkörper (elektrischer Leiter) durch ein äußeres elektrisches Feld (*nur die frei-beweglichen Elektronen verschieben sich!*  $\implies$  in Richtung Oberfläche)
- die elektrische Influenz führt zu einer Ladungstrennung  $\implies$  Aufladen von Metallkörpern

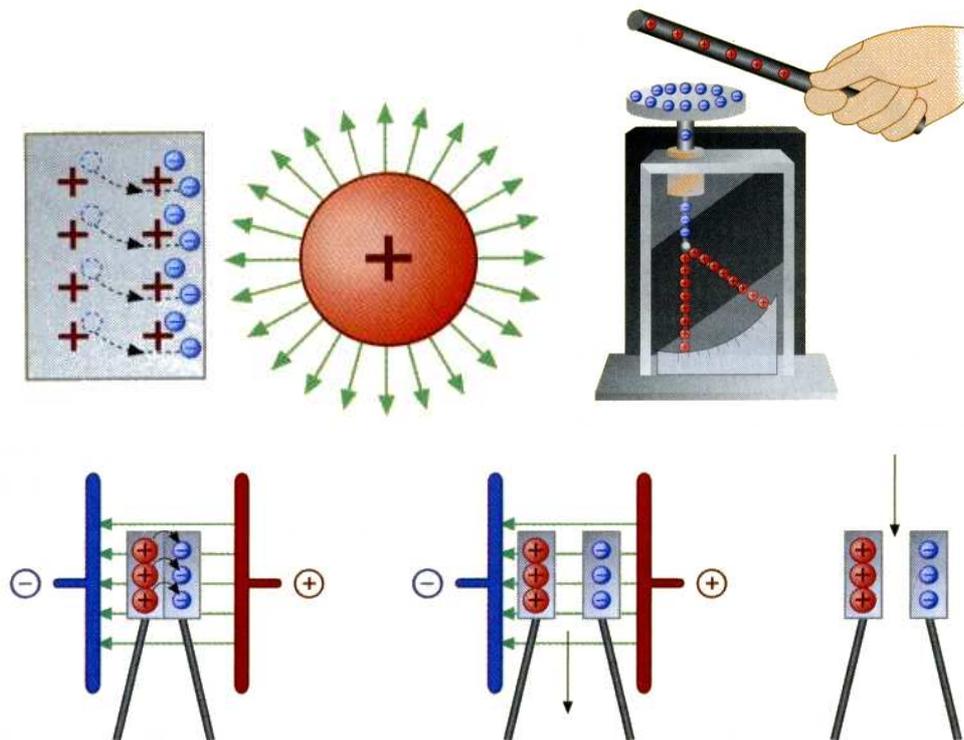


Abbildung 15: elektrische Influenz: Ladungstrennung durch ein äußeres elektrisches Feld: Metalloberfläche, Elektroskop, Platten im Kondensator

- **Polarisation** bezeichnet die Ladungsausrichtung in Nichtleitern (Glas, Kunststoff, etc.) durch ein äußeres elektrisches Feld entlang der Feldlinien (*am Atom gebundene Elektronen richten sich zum positiven Pol aus*)
- überschüssige Ladungen (Elektronen!) in Metallkörpern befinden sich immer auf deren Oberfläche, nicht im Inneren

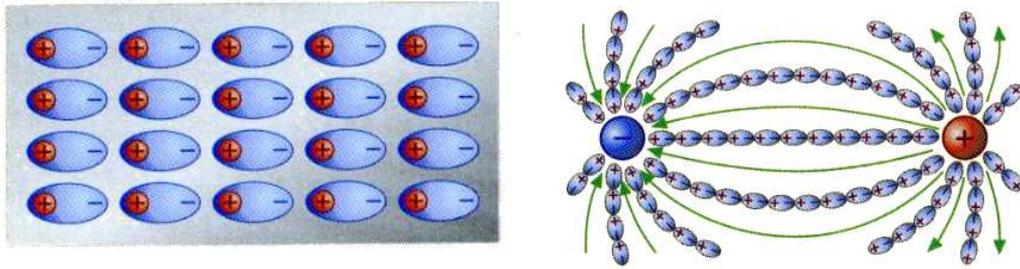


Abbildung 16: Polarisation: Ladungsausrichtung im Inneren von Nichtleitern durch ein äußeres elektrisches Feld

- $\implies$  ein Metallkörper ist nur an der Oberfläche aufgeladen (**Oberflächenladung**), im Inneren befindet sich kein elektrisches Feld
- $\implies$  ein **Faradayscher Käfig** schützt vor äußeren elektrischen Feldern
- die Ladungsverteilung hängt von der Oberfläche ab:
  - auf einer Kugeloberfläche ist die Ladung gleichmäßig verteilt
  - an Kanten und an Spitzen ist Ladungsansammlung am größten

#### 1.2.4 Elektrische Ladung $Q$

- die kleinste frei vorkommende Ladung wird als **Elementarladung**  $e$  bezeichnet,  $e = 1,6022 \cdot 10^{-19}C$
- **elektrische Ladung** (eines Körpers)
  - durch Elektronenmangel

$$Q = +n \cdot e$$

- durch Elektronenüberschuß

$$Q = -n \cdot e$$

mit  $n$  der Anzahl der fehlenden oder überschüssigen Elektronen

- Einheit der elektrischen Ladung ist das **Coulomb**  $[Q] = 1 C = 6,242 \cdot 10^{18}e$
- die elektrische Ladung eines Körpers ist stets da Vielfache der Elementarladung
- das **Elektron** ist der Träger der kleinsten negativen Ladung  $-e = -1,6022 \cdot 10^{-19}C$
- das **Proton** ist der Träger der kleinsten positiven Ladung  $e = 1,6022 \cdot 10^{-19}C$
- **Beispiele:**
  - Ladung eines metallischen Körpers

*Eine Metallkugel hat auf der Oberfläche  $n = 4,5 \cdot 10^{15}$  überschüssige Elektronen. Wie groß ist die Ladung der Kugel?*

$$Q = n \cdot e = 4,5 \cdot 10^{15} \cdot 1,6022 \cdot 10^{-19}C = 7,2 \cdot 10^{-4}C$$

- Anzahl überschüssiger Ladungen eines geladenen Körpers

Eine Metallkugel ist mit  $Q = 5,3 \cdot 10^{-9} C$  negativ aufgeladen. Wie viele überschüssige Elektronen befinden sich auf der Kugeloberfläche?

$$n = \frac{Q}{e} = \frac{5,3 \cdot 10^{-9} C}{1,6022 \cdot 10^{-19} C} = 3,3 \cdot 10^{10} \text{ Elektronen}$$

### 1.2.5 Ladungserhaltung

- elektrische Ladungen können weder erzeugt, noch vernichtet werden
- in einem abgeschlossenen System gilt die Ladungserhaltung
- ungeladene Körper haben gleich viele positive und negative Ladungen (z.B. Elektronen und Protonen)
- Spannungsquelle: am Minuspol herrscht Elektronenüberschuss, am Pluspol Elektronenmangel
- zur Ladungstrennung ist Arbeit gegen die elektrostatische Anziehungskraft erforderlich

### 1.2.6 Technische Anwendung elektrischer Felder

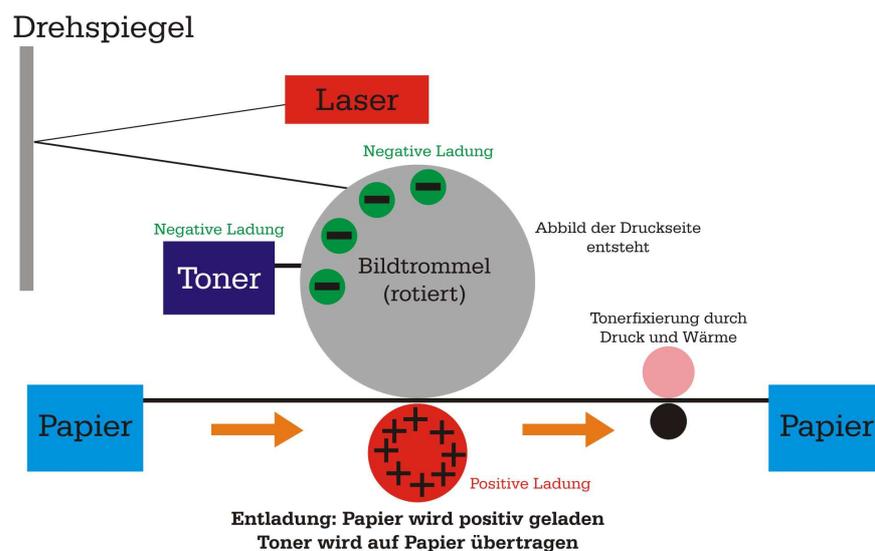


Abbildung 17: Aufbau und Funktionsweise Kopierer

#### • Fotokopierer & Laserdrucker

- wichtigstes Bauteil ist die Bildtrommel (lichtelektrische Halbleiter-Oberfläche)
- **Aufladen**: der Bildtrommel (OPC) durch eine Ladungseinheit (negative Ladungen)
- **Belichten**: der Bildtrommel durch Abtastung mit Laserstrahl  $\implies$  die Ladung auf der Trommel bleibt nur dort erhalten, wo nicht belichtete wird  $\implies$  die verbliebenen Ladungen auf der Bildtrommel entsprechen den "dunklen" Bild- / Textstellen des Originals

- **Entwickeln:** der Toner wird aufgebracht und die Tonerpartikel haften nur an den noch geladenen Stellen der vorbeilaufenden Bildtrommel
- **Übertragen:** das seitenverkehrte Tonerstaubbild wird von der Bildtrommel auf das elektrisch positiv geladene Papier seitenrichtig übertragen
- **Fixieren:** durch Erhitzen  $\implies$  die Tonerpartikel werden weich und verschmelzen mit dem Papier
- **Reinigen:** der Bildtrommel von Tonerpartikeln durch entladen

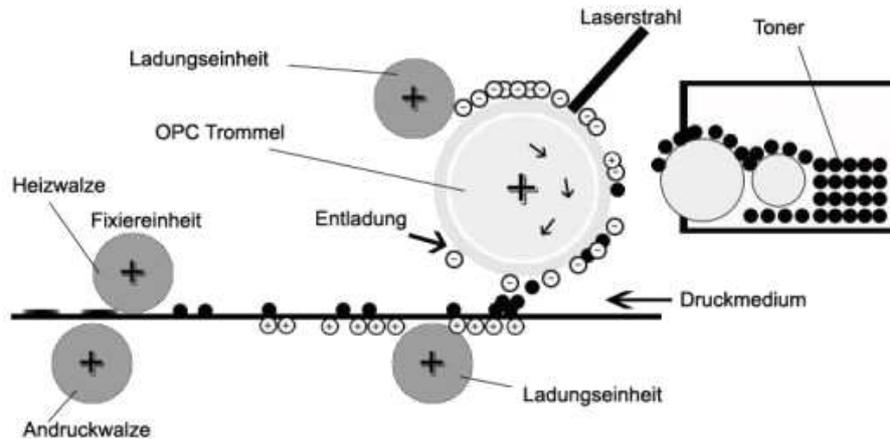


Abbildung 18: Aufbau und Funktionsweise Laserdrucker

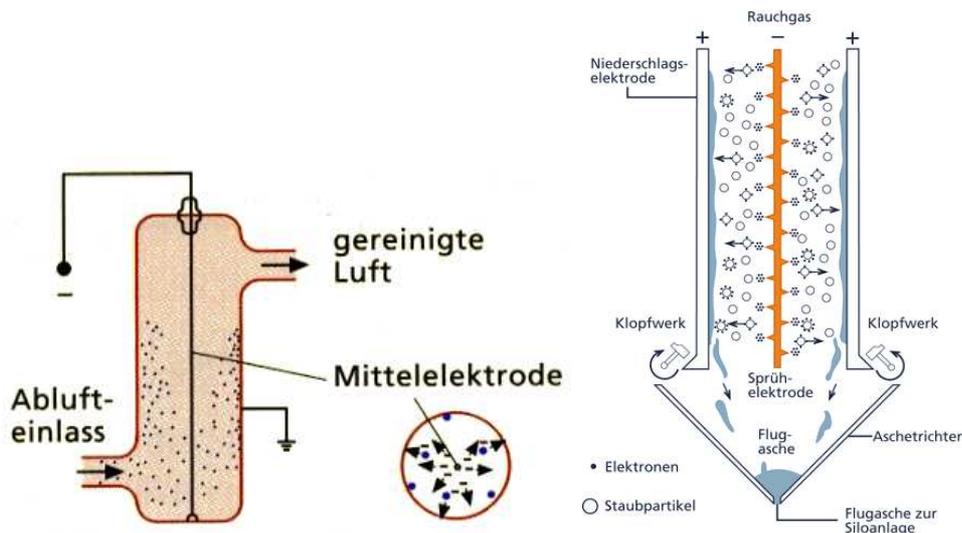


Abbildung 19:

### • Elektrofilteranlage

- aus der Abluft von Kohlekraftwerken etc. können 99% der Staubpartikel durch eine Elektrofilteranlage herausgefiltert werden
- eine negativ geladene Mittelelektrode ( $U = 50 \cdot 10^3 V$ ) gibt Elektronen an die Umgebung ab
- die Elektronen haften an dem Staubpartikeln an und werden von den positiv geladenen Wänden der Filteranlage angezogen  $\implies$  Staubpartikel werden zu den Wänden transportiert

– durch ein Klopfwerk werden die Staubpartikel in eine Auffangvorrichtung geleitet

• **elektrostatische Lackierung**

– elektrostatisches Lackieren von Karosserieteilen etc.

– negativ geladene Karosserieteile werden durch ein positiv geladenes Lackbad geleitet  $\implies$  Lackpartikel haften gleichmäßig an

### 1.3 Strom und bewegte elektrische Ladungen

#### 1.3.1 Stromkreis und Kurzschluss

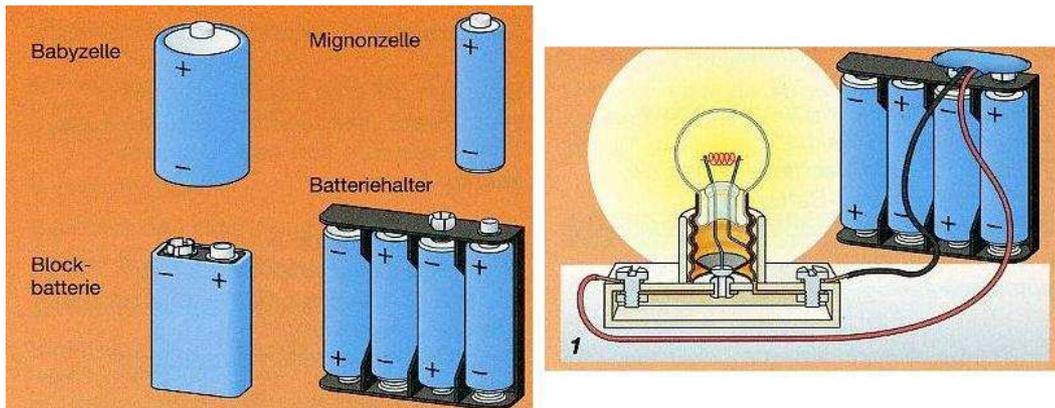


Abbildung 20: Batteriearten und Glühlampe als Verbraucher

- die Batterie ist eine chemische Stromquelle (verdünnte Schwefelsäure)
- der Akku unterscheidet sich von der Batterie durch die Fähigkeit zur Wiederaufladung
- Batterien (Akkus) können in Kombinationen eingesetzt werden
- für den Betrieb von elektrischen Geräten (Glühlampe, Wasserkocher, Computer etc.) benötigt man Stromquellen (Batterie, Steckdose, Solarzellen etc.)

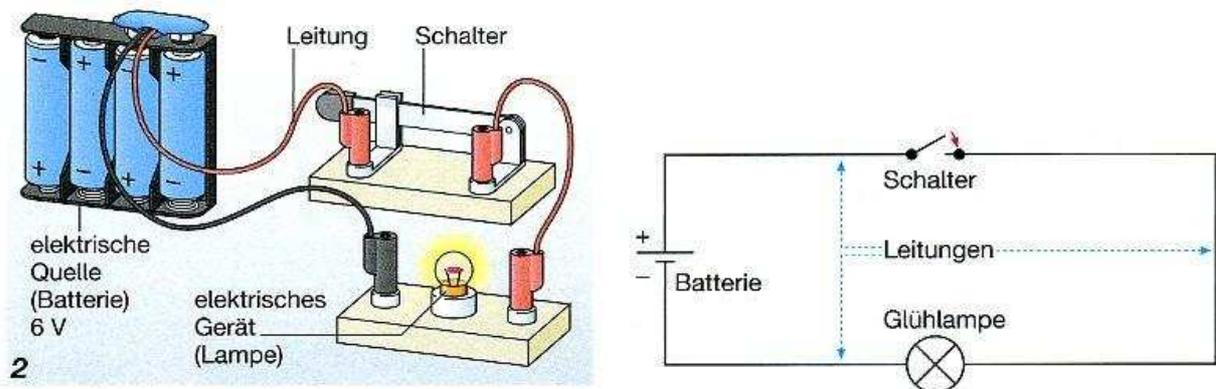


Abbildung 21: geschlossener Stromkreis und Darstellung im Schaltbild

- elektrische Geräte und Stromquellen haben zwei Anschlüsse (Anschlusspole)
- zum Betrieb elektrischer Geräte benötigt man einen **geschlossenen Stromkreis** (Leitungen) und eine Stromquelle
- verbindet man die Pole einer Stromquelle direkt miteinander (ohne Verbraucher) so entsteht ein **Kurzschluss**
- um Schäden an elektrischen Geräten zu verhindern werden **Sicherungen** verwendet, die den Stromkreis unterbrechen
- unsachgemäße Verwendung von elektrischen Strom kann zu Verbrennungen, Lähmungen oder zum Tode führen

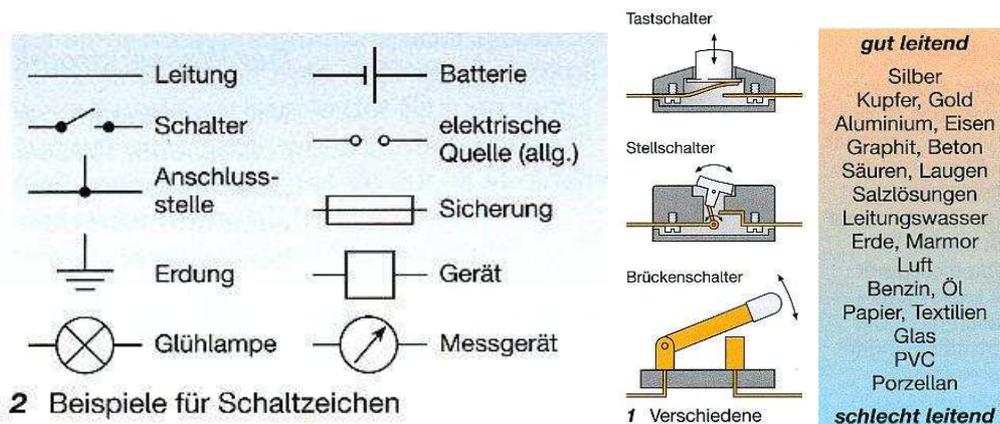


Abbildung 22: Schaltelemente, verschiedene Schalter, Leiter und Nichtleiter

### 1.3.2 Leiter und Nichtleiter

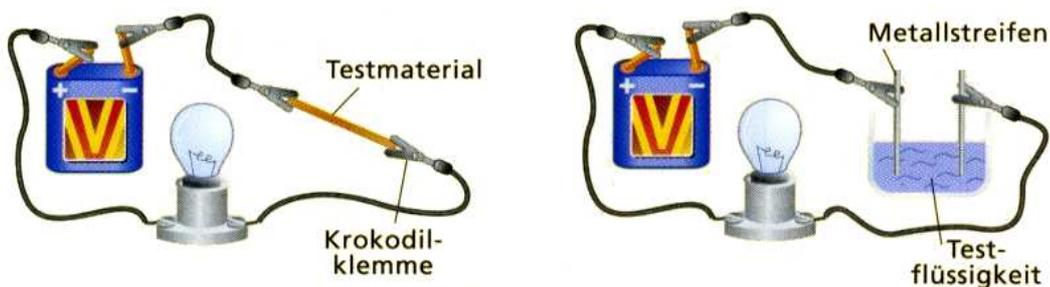


Abbildung 23: Batteriearten und Glühlampe als Verbraucher

- verschiedene Materialien leiten den Strom unterschiedlich gut
- Metalle, Flüssigkeiten (wässrige Lösungen von Salzen, Säuren, Laugen) sind gute elektrische Leiter
- Porzellan und PVC sind **Isolatoren** (Nichtleiter), leiten den Strom nicht und verhindern Kurzschlüsse
- einige Gase können auch leitend werden (Leuchtstoffröhre, Glimmlampe)

### 1.3.3 Modellvorstellung elektrischer Stromkreis

- elektrischen Stromkreis kann mit einem Wasserkreislauf vergleichen

Wasserkreis	Stromkreis
Wasserrohre	elektrische Leitungen
Pumpe	Spannungsquelle (Batterie)
Absperrventil	Schalter
Wasserrad	elektrisches Gerät (Glühlampe)
Durchflusszähler (Wasseruhr)	Stromstärkemesser
Wasser	elektrische Ladungen (Elektronen)

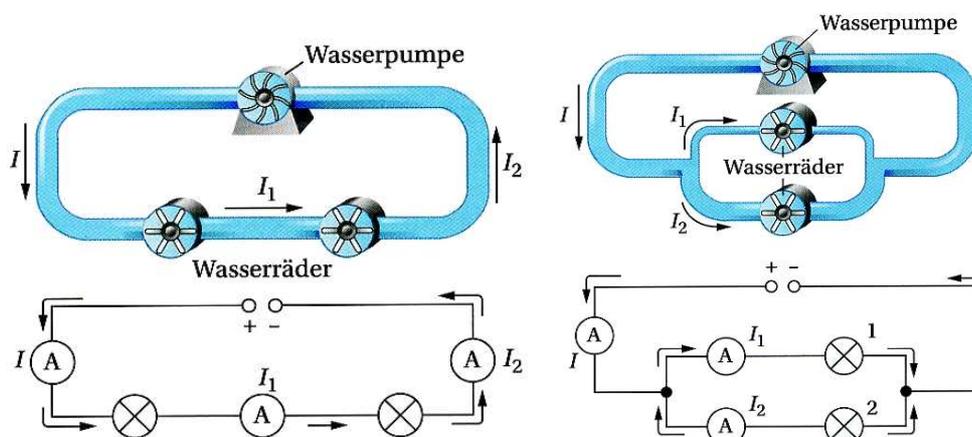


Abbildung 24: Wasser- und Stromkreis als Reihen- und Parallelschaltung (siehe Kap. 1.3.4)

- Wasserkreislauf: Wasser wird mit Pumpe durch Wasserrohre zum Wasserrad befördert – die Durchflussmenge wird mit einem Durchflusszähler gemessen
- Stromkreis: elektrische Ladungen werden mit der Spannungsquelle durch elektrische Leitungen zum elektrischen Gerät befördert – die elektrischen Ladungen werden mit einem Stromstärkemesser gemessen

### 1.3.4 Stromkreise und Schaltungsarten

- Elektrische Pole: die Anschlüsse einer Spannungsquelle (Batterie, Steckdose) sind der **Minuspol** “-” und der **Pluspol** “+”
- **Gleichstrom** wird durch eine Spannungsquelle mit unveränderlichen Polen (Batterie) erzeugt
- **Wechselstrom** wird durch eine Spannungsquelle mit veränderlichen Polen (Steckdose) erzeugt (“-” und “+” werden ständig vertauscht)
- **Schutzleiter**
  - das moderne Haushaltsnetz besteht aus drei verschiedenfarbigen Leitern: braun / schwarzer **Außenleiter (Phase)**, blauer **Nullleiter**, grünelber **Schutzleiter**

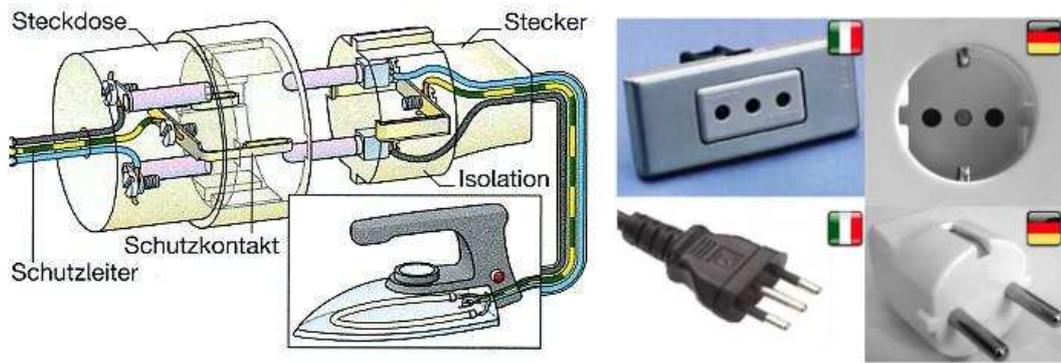


Abbildung 25: Schutzkontaktleitung und -stecker für Gerät mit Metallgehäuse – verschiedene Ausführung von Italien und Deutschland

- ein **Schutzkontaktstecker** (*Schuko*) besitzt diese drei verschiedenen Leiter
- Elektrogeräte mit einem Metallgehäuse werden nur mit Schutzkontaktstecker ausgestattet und der Schutzleiter (grüngelb) ist mit dem Metallgehäuse verbunden
- ist ein stromführendes Kabel im Metallgehäuse defekt und berührt das Metallgehäuse, so fließt der Strom über den Schutzleiter (Erdung) ab und die Sicherung wird ausgelöst (Kurzschluss  $\Rightarrow$  Stromkreis unterbrochen)
- fehlt bei einem defekten Gerät die Schutzkontaktleitung, steht das Metallgehäuse unter Spannung und der Strom fließt bei Berührung über den Menschen in die Erde  $\Rightarrow$  lebensgefährlicher Stromschlag

### • Reihenschaltung

- elektrische Geräte werden hintereinander in den Stromkreis eingebunden (z.B. Christbaumbeleuchtung)
- wird ein Gerät entfernt oder ausgeschaltet, wird der Stromkreis unterbrochen – alle nachfolgenden Geräte gehen aus
- Sicherheitsschaltung mit zwei Schaltern

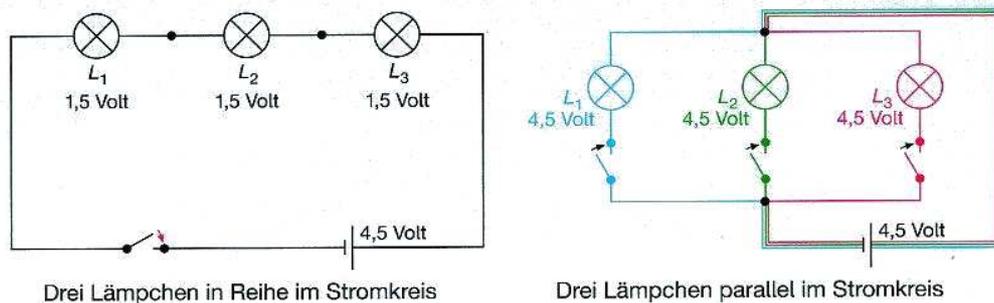


Abbildung 26: Reihenschaltung und Parallelschaltung von Lampen

### • Parallelschaltung

- elektrische Geräte werden zueinander parallel in den Stromkreis eingebunden
- jedes parallel geschaltete Gerät hat seinen eigenen "Teil"stromkreis – wird ein Gerät ausgeschaltet, bleiben die anderen Geräte an

- Reihen- und Parallelschaltungen werden oft kombiniert:

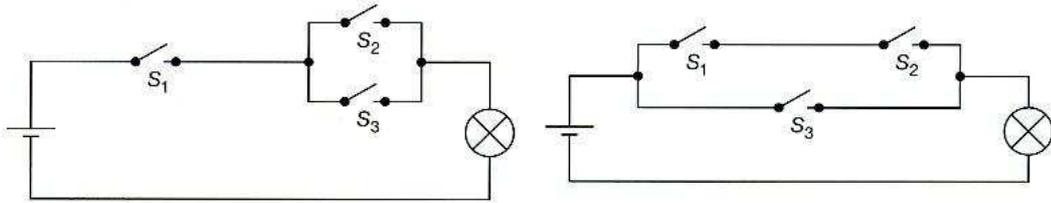


Abbildung 27: Kombination von Reihen- und Parallelschaltung von Schaltern

- **Wechselschaltung** zur Steuerung von Fußgängerampeln oder 2 Schalter an verschiedenen Orten für eine Lampe (Treppenhaus, Keller etc.)

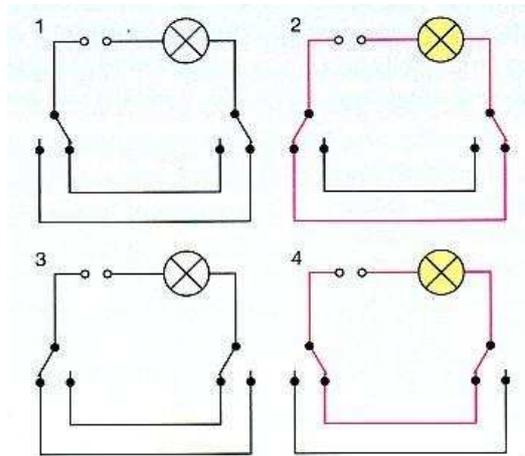


Abbildung 28: Wechselschaltung

### 1.3.5 Strom als bewegte Ladungen

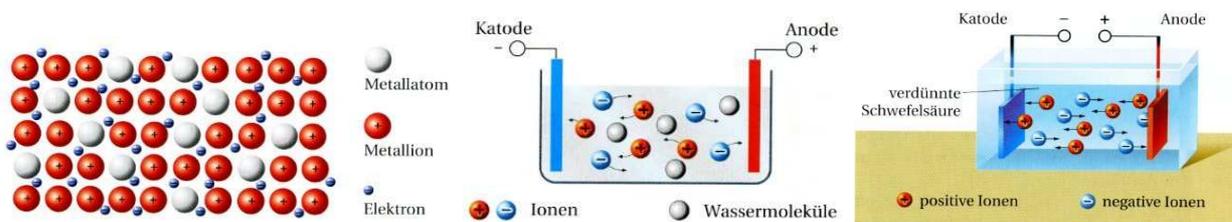


Abbildung 29: links: metallischer Leiter Mitte: leitende Flüssigkeit rechts: Aufladen eines Akkus

- Elektrischer Strom ist die gerichtete Bewegung von Ladungsträgern (Elektronen, positive und negative Ionen) in einem Stromkreis  $\implies$

**elektrischer Strom = bewegte elektrische Ladung**

- metallischer Leiter: freie Elektronen bewegen sich im Metall vom negativen zum positiven Pol (einer Spannungsquelle)  $\implies$  Stromfluss

- Nichtleiter: es gibt keine freien Ladungsträger  $\implies$  kein Stromfluss möglich
- Flüssigkeit: positive und negative Ionen (z.B. Salze) bewegen sich gerichtet zur entsprechenden Elektrode
- Gase: durch Erhitzen entstandene Ionen bewegen sich gerichtet zur entsprechenden Elektrode
- Akku: beim Laden eines Akkus bewegen sich die Ionen zu den Elektroden (Katode, Anode)  $\implies$  Ladungstrennung

### 1.3.6 Stromstärke

- es gibt verschiedene physikalische Größen, die zur Beschreibung eines Stromkreises herangezogen werden: elektrische **Stromstärke**, **Spannung** & **Widerstand**

Stromstärken in Natur und Technik		Stromstärke	Wirkung	Elektrische Spannungen in Natur und Technik	
Fotozelle	10 $\mu$ A			0,5 mA	gerade wahrnehmbar
Radio (batteriebetrieben)	10 mA	bis ca.	keine Schäden, eventuell	Knopfzelle	1,35 V
<b>lebensgefährliche Stromstärke</b>	<b>&gt; 25 mA</b>	15 mA	Muskelverkrampfungen	Monozelle, Mignonzelle	1,5 V
Glühlampe einer Taschenlampe	0,2 A	ca. 15 – 20 mA	Loslassen in der Regel unmöglich	Flachbatterie	4,5 V
60-W-Glühlampe (bei 230 V)	0,26 A	ca. 25 – 50 mA	starke Krämpfe, unregelmäßiger Herzschlag, hoher Blutdruck	Fahrraddynamo	6 V
100-W-Glühlampe (bei 230 V)	0,43 A	über 50 mA	Bewusstlosigkeit, kann schon bei 1s Einwirkdauer tödlich sein (Kammerflimmern)	Autobatterie	12 V
Bügeleisen	5 A			Modelleisenbahn	bis 24 V
Elektrolokomotive	300 A			Haushaltssteckdose	230 V
Elektroschweißgerät	500 A			Straßenbahn	500 V
Elektroschmelzofen	15 000 A			Zitteraal	bis 800 V
Blitz	bis 100 000 A			Elektrolokomotive	15 kV
				Generator im Kraftwerk	15 kV
				Überlandleitung	bis 380 kV
				zwischen Wolken und Erde (Gewitter)	bis $10^9$ V

Abbildung 30: Größen des Stromes links: Stromstärke Mitte: schädliche Stromstärke rechts: Spannung

- die elektrische **Stromstärke** gibt an, wie viele Ladungsträger (z.B. Elektronen) sich in jeder Sekunde durch den Querschnitt eines Leiters bewegen

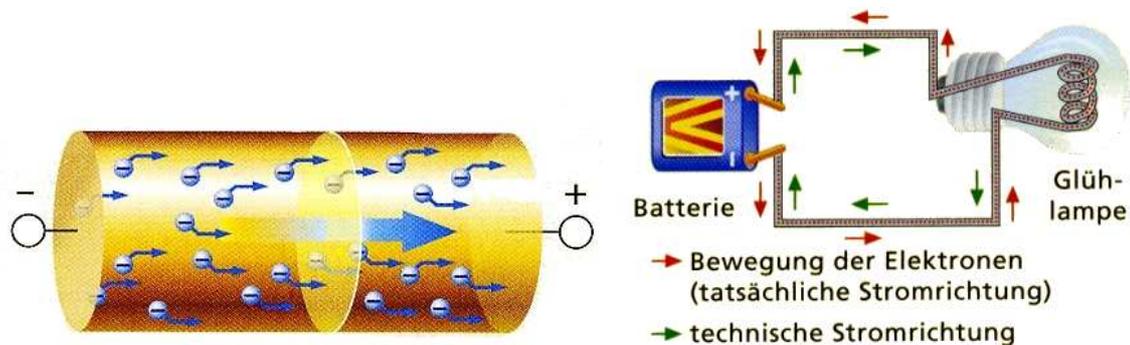


Abbildung 31: links: Elektronen durch die Querschnittsfläche des Leiters; rechts: **Elektronenrichtung** ( $- \implies +$ ) und **technische Stromrichtung** ( $+ \implies -$ ) im Stromkreis

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{\text{Anzahl der Ladung}}{\text{Zeit}}$$

- Formelzeichen:  $I$
- Einheit:  $[I] = 1 \frac{C}{s} = 1 A = 1 \text{ Ampere}$

- durch jeden beliebigen Querschnitt fließt bei der Stromstärke  $1 A$  in einer Sekunde  $s$  die Ladung  $1 C$
- die elektrische Stromstärke wird mit Stromstärkemessgeräten gemessen

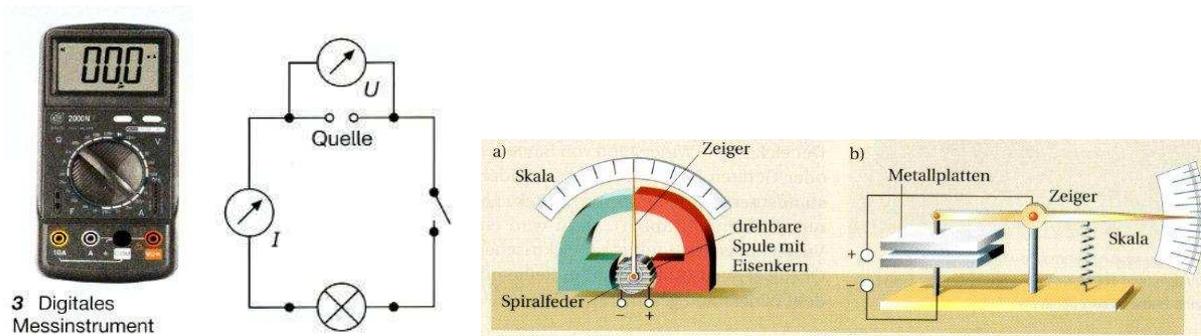


Abbildung 32: links: Mehrfachmessinstrument; Mitte: Reihenschaltung des Amperemeters; rechts: Drehspulinstrument (a) und Spannungswaage (b)

- das Stromstärkemessgerät (Amperemeter) wird in Reihe zu den Bauelementen des Stromkreises geschaltet (eingebaut)
- als Stromstärkemessgerät wird ein Drehspulinstrument verwendet:
  - drehbar gelagerte Spule in einem Magnetfeld eines Dauermagneten
  - fließt ein Strom durch die Spule  $\implies$  entsteht ein Magnetfeld in und um die Spule  $\implies$  Spule mit Zeiger dreht sich im Magnetfeld des Dauermagneten

## 1.4 Magnetfeld und stromdurchflossene Leiter

### 1.4.1 Magnetfeld von geraden Leitern und Spulen



Abbildung 33: Magnetfeld um stromdurchflossenen Leiter und Spule, dargestellt durch Eisenspäne

- ein stromdurchflossener Leiter ist von einem **räumlich ausgedehnten Magnetfeld** umgeben!
- Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters:

- die magnetischen Feldlinien eines geraden stromdurchflossenen Leiters sind **konzentrische Kreise** in Ebenen senkrecht zum Leiter

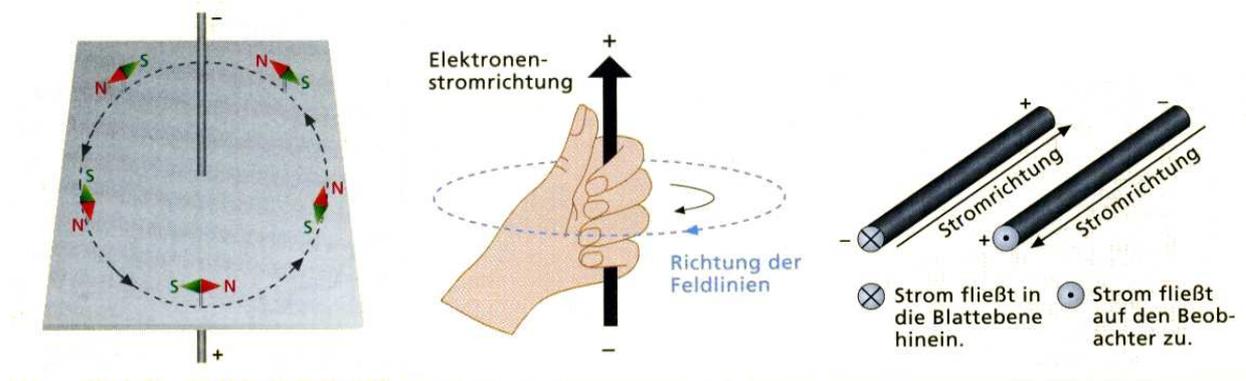
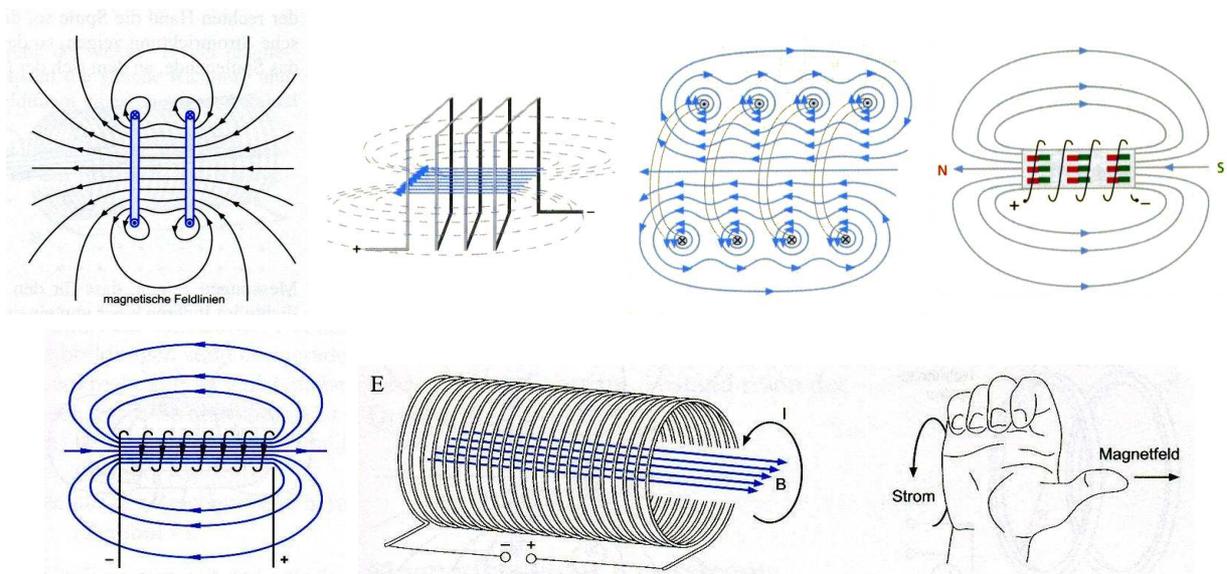


Abbildung 34: Linke-Hand-Regel und Konvention (Kreuz und Punkt) für die Elektronen-Stromrichtung

- **Linke-Hand-Regel:** Umfasst man mit gekrümmten Fingern der linken Hand den Leiter so, dass der ausgestreckte Daumen in die **Elektronen-Stromrichtung** ( $- \rightarrow +$ ) zeigt, dann geben die Finger den Verlauf der Magnetfeldlinien an.
- **Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule:**
  - das Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule ähnelt im Außenraum dem eines Stabmagneten, im Inneren befindet sich ein **homogenes** Magnetfeld
  - das Magnetfeld einer Spule ist umso größer, je größer die Stromstärke ist, je größer die Windungszahl der Spule ist und je kürzer die Spule ist
  - ein Eisenkern in der Spule verstärkt das Magnetfeld erheblich (Elektromagnet)



- der Daumen der rechten Hand zeigt in Richtung Nordpol, wenn die gekrümmten Finger die technische Stromrichtung anzeigen.

### 1.4.2 Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter

- auf stromdurchflossene Leiter in einem Magnetfeld wirkt eine Kraft senkrecht zum Stromfluss und senkrecht zur Richtung des Magnetfeldes
  - die Kraft ist umso größer, je größer die Stromstärke und/oder das Magnetfeld ist

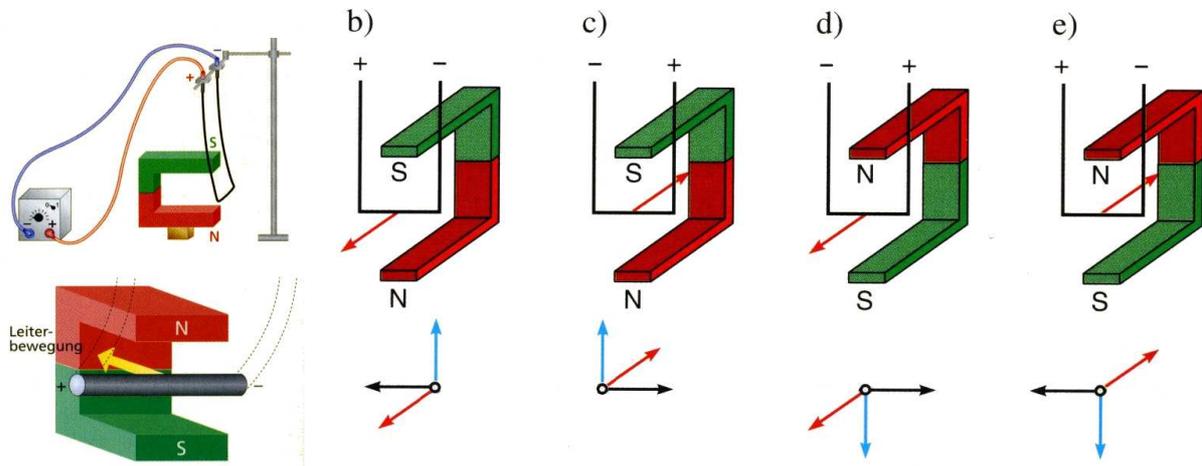


Abbildung 35: Kraft auf stromdurchflossene Leiterschaukel im Magnetfeld eines Hufeisenmagneten

- Drei-Finger-Regel der linken Hand (UVW-Regel):

- die UVW-Regel beschreibt den Zusammenhang von Stromrichtung, Magnetfeldrichtung und Krafrichtung
- zeigt der Daumen in die Elektronenstromrichtung  $- \rightarrow +$  (Ursache) und der Zeigefinger in die Magnetfeldrichtung  $N \rightarrow S$  (Vermittlung), so weist der Mittelfinger in die Richtung der Kraft (Wirkung)

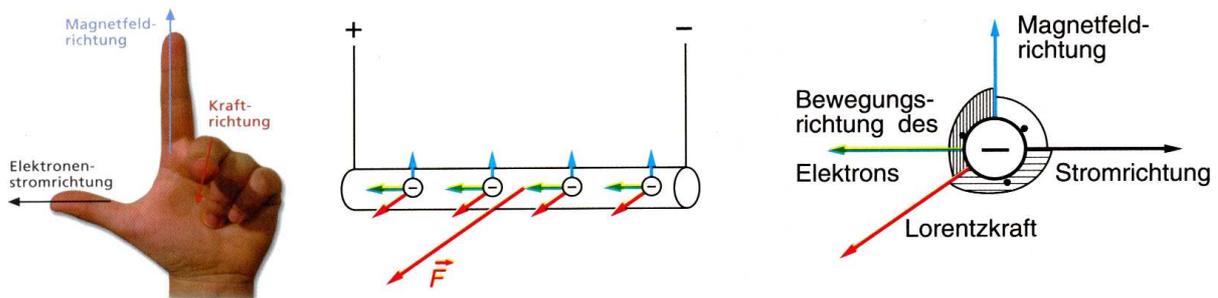


Abbildung 36: Kraft auf stromdurchflossene Leiterschaukel und UVW-Regel der linken Hand

- Kraft zwischen stromdurchflossenen Leitern:

- werden zwei parallele gerade Leiter gleichsinnig (gleiche Stromrichtung) von Strömen durchflossen, dann ziehen sich die Leiter an  $\iff$  die unterschiedliche Magnetfeldrichtung zwischen beiden Leitern hebt die Kraftwirkung teilweise auf
- bei entgegengesetzter Stromrichtung stoßen sich die Leiter ab  $\iff$  die gleiche Magnetfeldrichtung zwischen beiden Leitern verstärkt die Kraftwirkung

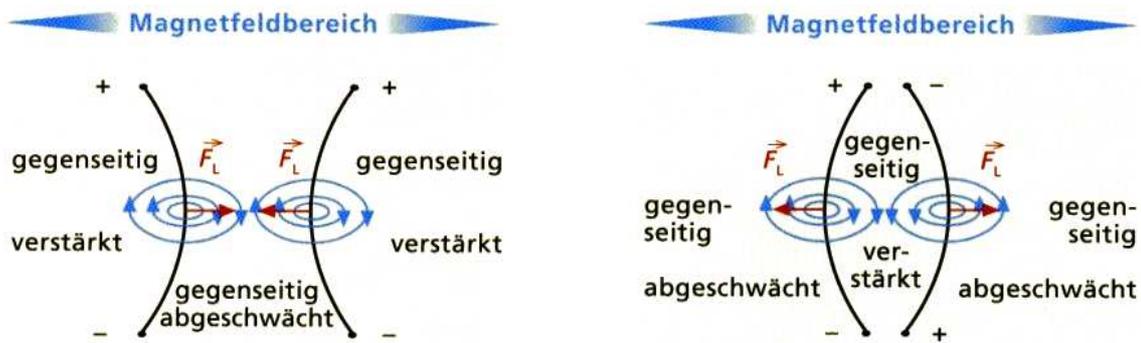
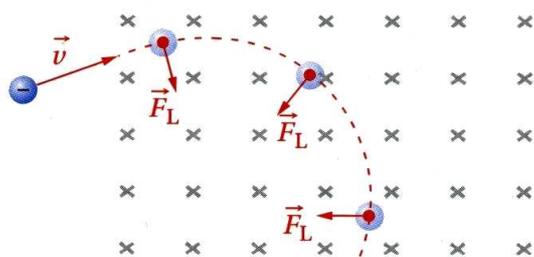


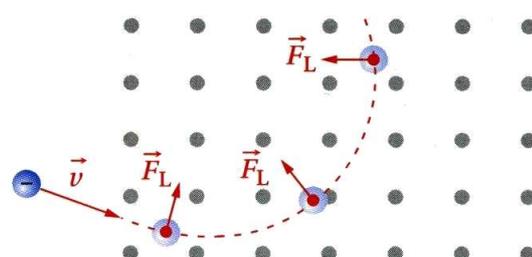
Abbildung 37: Kraft auf parallele stromdurchflossene Leiter mit gleichsinniger und gegensinniger Stromrichtungen

### 1.4.3 Lorentzkraft auf elektrische Ladungen

- auf ein Elektron, welches sich in einem Magnetfeld senkrecht zur Magnetfeldrichtung bewegt, wirkt eine Kraft, die **Lorentzkraft**
- die Richtung der Lorentzkraft ist **senkrecht zur Bewegungs- und Magnetfeldrichtung**



1 ▶ Bewegung von Elektronen (Das Magnetfeld zeigt in die Zeichenebene hinein.)



2 ▶ Bewegung von Elektronen (Das Magnetfeld zeigt aus der Zeichenebene heraus.)

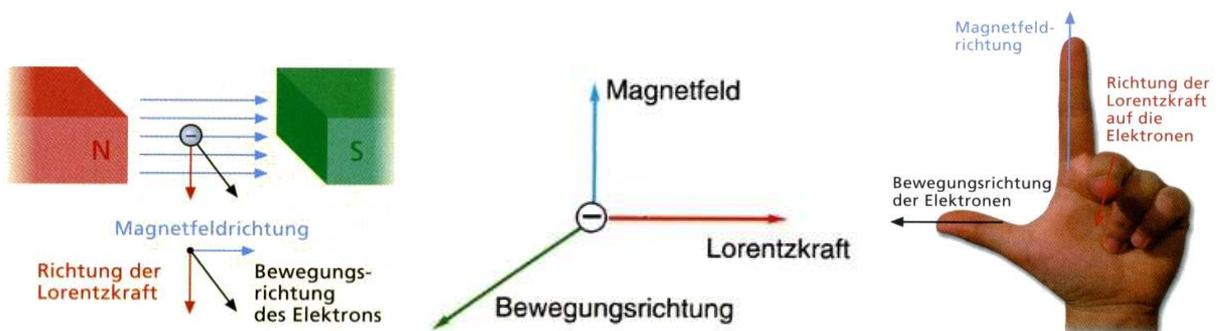


Abbildung 38: Darstellung der Lorentzkraft auf ein bewegtes Elektron

- die Lorentzkraft ist umso größer, je größer die elektrische Ladung des Teilchens ist, je größer seine Geschwindigkeit ist und je stärker das Magnetfeld ist
- bei der Drei-Finger-Regel (UVW-Regel) ist zu beachten, dass die **Bewegungsrichtung** von **positiven** Ladungen (z.B. Protonen) *dem Daumen der linken Hand entgegen gerichtet ist!*

### 1.4.4 stromdurchflossene Spule im Magnetfeld

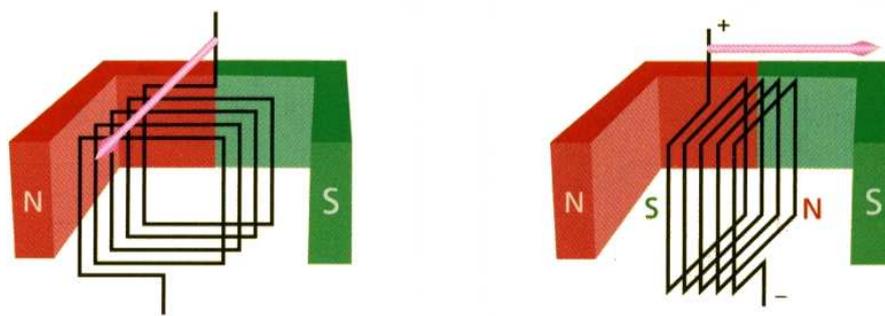


Abbildung 39: eine Spule im äußeren Magnetfeld dreht sich um die eigene Achse, wenn diese vom Strom durchflossen und ein eigenes Magnetfeld aufbaut

- eine Spule die von Strom durchflossen wird, baut ein Magnetfeld auf  $\implies$  Anwendungen: Drehspulinstrument, Lautsprecher, Elektromotor, Generator etc.
- **Drehspulinstrument** zum Messen der Stromstärke
  - befindet sich die Spule in einem äußeren Magnetfeld, so wechselwirken die Magnetfelder und auf die Spule wirkt ein **Drehmoment**  $\implies$  je nach Stromrichtung dreht sich die Spule nach recht oder links
  - durch eine Feder wird ein rücktreibendes Drehmoment erzeugt, dass der Drehbewegung entgegenwirkt  $\implies$  **Begrenzung des Drehwinkels** ( $-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ )
  - $\implies$  der Drehwinkel ist ein **Maß für die Stärke und die Richtung** des fließenden Stroms
  - an der Spule ist ein Zeiger befestigt der durch die Drehung die Stromstärke auf einer Skala anzeigt
  - Wechselströme müssen vor der Messung durch einen Gleichrichter in Gleichstrom umgewandelt werden

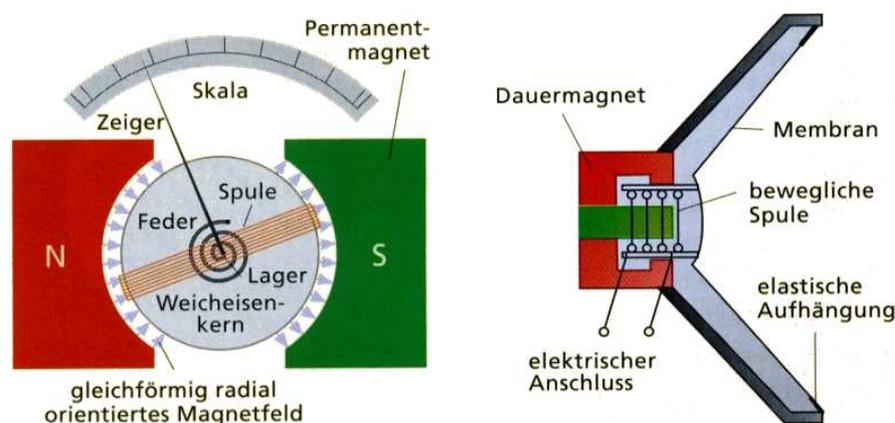


Abbildung 40: Anwendung für eine Strom durchflossene Spule, links: als Drehspulinstrument (Spule mit Eisenkern) und rechts: als Lautsprecher (horizontal bewegliche Spule)

- **Lautsprecher**

- horizontal bewegliche Spule ist fest mit der Lautsprechermembran verbunden und befindet sich im Magnetfeld eines umgebenden Topfmagneten
- fließt Strom durch die Spule, baut diese ein Magnetfeld auf und die Spule & Membran wird vom äußeren Magnetfeld abgestoßen bzw. angezogen
- $\implies$  bei schnell wechselnder Stromrichtung schwingt die Spule & Membran hin und her
- die schwingende Membran erzeugt durch die Bewegung in der Luft, die Schallwellen, die sich im Raum ausbreiten

### 1.4.5 Elektromotor

- der Elektromotor ist eine umlaufende Maschine, die durch Lorentzkräfte elektrische Energie in mechanische Energie umwandelt

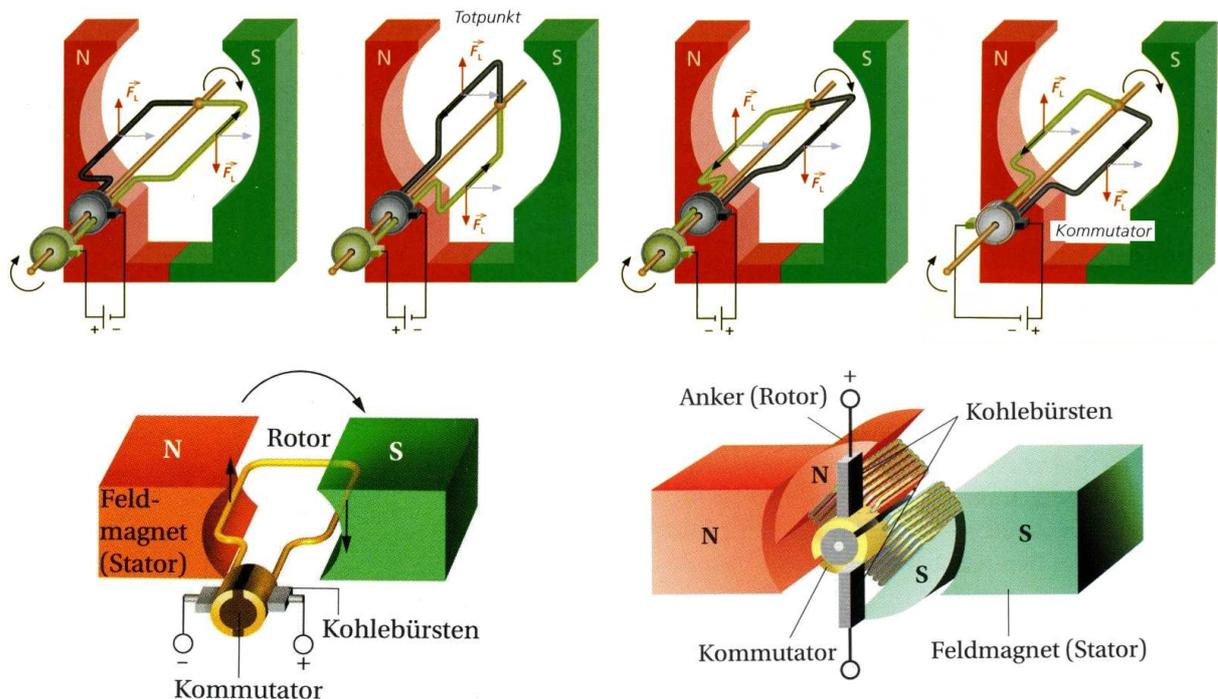


Abbildung 41: Wirkungsweise (oben) & Aufbau (unten) des Gleichstrommotors

- **Aufbau:**

- Dauermagnet (Gleichstrommotor) oder Elektromagnet (Wechselstrommotor) als **Stator**  $\implies$  erzeugt stationäres bzw. wechselndes Magnetfeld
- Spule(n) auf Eisenkern (bzw. Leiterschleife) als drehbar gelagerter **Rotor**
- **Kommutator** (Polwender) und Kohlebürsten für die Stromzufuhr

- **Wirkungsweise:** (Gleichstrommotor)

- der von einem Gleichstrom (über Kohlebürsten und Kontakte) durchflossene Rotor (Leiterschleife, Spule) erfährt senkrecht zu den Magnetfeldlinien Lorentzkräfte  $\implies$  Drehmoment auf Rotor  $\implies$  Rotor dreht sich

- in dem Moment – **Totpunkt** –, in dem die Leiterschleife senkrecht steht (bzw. Spulenfläche senkrecht von Feldlinien durchsetzt wird) kehrt der Kommutator die Stromrichtung um  $\implies$  Rotor (Anker) dreht sich zusammen mit dem Eigenschwingung in ursprünglicher Richtung weiter
- bei der technischen Realisierung ersetzt man die Drehspule durch einen **Trommelanker**
  - mehrere Ebenen der Drahtwindungen sind gegeneinander geneigt  $\implies$  nur ein kleiner Teil der Spule ist im Totpunkt
  - $\implies$  ruhiger und gleichmäßiger Lauf des Rotors
  - $\implies$  der Rotor läuft in jeder Stellung an



Abbildung 42: verschieden aufgebaute Elektromotoren

- Elektromotoren erreichen einen Wirkungsgrad  $\eta \approx 90\%$  (Benzin-, Dieselmotoren  $\eta < 90\%$ ) und liefern Leistungen  $P \approx mW \rightarrow 50MW$
- bei Belastung läuft der E-Motor langsamer  $\implies$  je langsamer er läuft, umso mehr Strom nimmt der E-Motor auf
- **Wechselstrommotor:** Elektromagnet (Stator) und Rotor werden mit der gleichen Wechselstromquelle betrieben  $\implies$  Stator und Rotor ändern im gleichen Rhythmus ihre Magnetpole  $\implies$  Drehrichtung bleibt erhalten
- **Homopolarmotor:**
  - besteht aus einer Monozelle, Schraube, Neodym-Magnet und Kabel
  - die Schraube (+ Neodym-Magnet) hängt mit der Spitze am Minuspol der Monozelle
  - verbindet man den Pluspol der Monozelle mittels Kabel seitlich mit dem Neodym-Magneten, so beginnt sich die Anordnung zu drehen  $\implies$  kleiner Elektromotor

## 1.5 Physikalische elektrische Größen

### 1.5.1 Arbeit

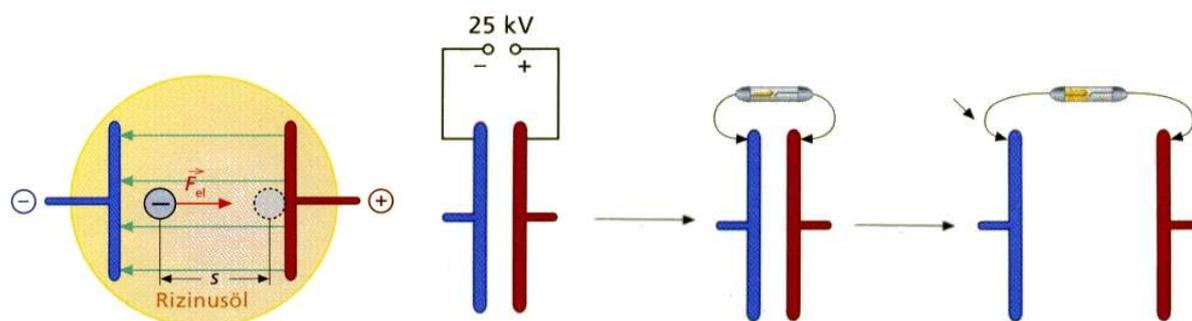
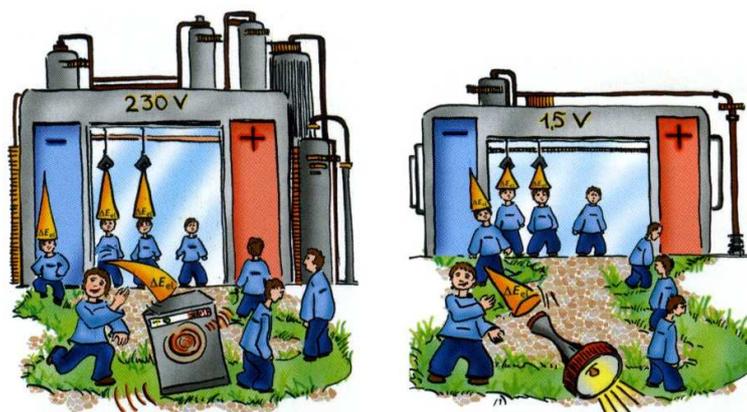


Abbildung 43: elektrische Arbeit: links: Reibarbeit (in Öl) bei der Bewegung einer negativ geladenen Kugel im elektrischen Feld rechts: Arbeit beim Stromfluss in der Glühlampe durch den Kurzschluß der Platten

- im elektrischen Feld wirkt zwischen den Elektroden eine **elektrische Kraft**  $F_{el}$
- bei der Bewegung im elektrischen Feld wird entlang des Weges **elektrische Arbeit**  $W_{el}$  verrichtet:

$$W_{el} = F_{el} \cdot s = \Delta E_{el}$$

- elektrischer Strom verrichtet elektrische Arbeit  $W_{el}$ , dabei nimmt die **elektrische Energie**  $E_{el}$  des Systems ab
- im geschlossenen Stromkreis liefert die Spannungsquelle die elektrische Energie an die Ladungsträger
- **Energiehut-Modell**



- im geschlossenen Stromkreis geben Elektronen einen Teil ihrer Energie beim Durchlauf durch ein elektrisches Gerät ab “*sie geben ihren Energiehut ab*”, damit dieses betrieben werden kann
- bei der Rückkehr zur Spannungsquelle nehmen die Elektronen neue Energie auf “*sie setzen einen neuen Energiehut auf*”

- **Beispiele** für elektrische Arbeit:

- i) Bewegung einer geladenen Kugel im elektrischen Feld in Öl  $\implies$  Reibarbeit Kugel / Öl
- ii) beim Kurzschluß elektrisch geladener Platten durch eine Glühlampe wird beim kurzzeitigen Stromfluss Arbeit verrichtet  $\implies$  bei größerem Plattenabstand ist die verrichtete Arbeit größer

### 1.5.2 Energie und Wirkungsgrad

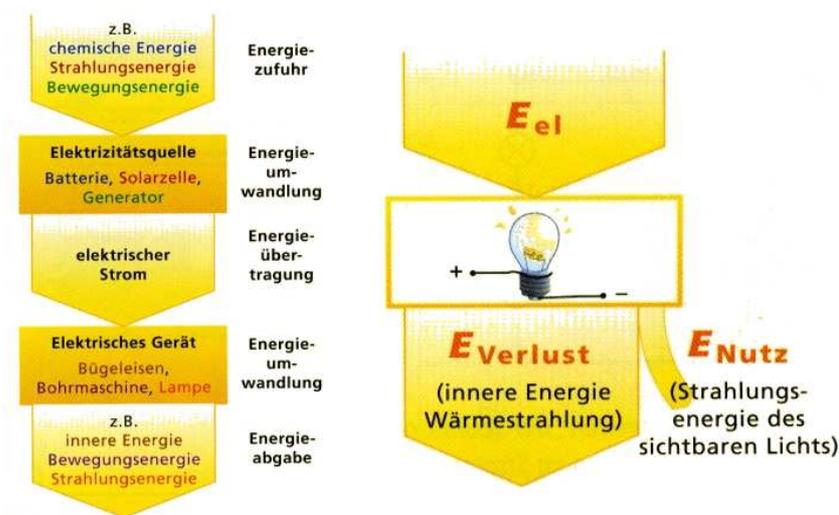


Abbildung 44: Energieumwandlung links: im Stromkreis rechts: bei der Glühlampe

- die Spannungsquelle stellt die **elektrische Energie**  $E_{el}$  im Stromkreis zur Verfügung

$$E_{el} = Q \cdot U$$

- der elektrische Strom überträgt die elektrische Energie von der Spannungsquelle an das elektrische Gerät (Verbraucher)
- das elektrische Gerät wandelt die elektrische Energie in eine andere Energieform um:
  - innere Energie (Heizgeräte, Kochgeräte, Schmelzöfen)
  - mechanische Energie (Maschinen mit Elektromotoren)
  - magnetische Energie (Elektromagnet, Lautsprecher, Festplatte)
  - chemische Energie (Akku, Batterie)
  - Strahlungsenergie (Glühlampe, Leuchtstoffröhren, Leuchtdiode)
  - elektrische Energie (Kondensator)
- die Effizienz der Energieumwandlung wird durch den **Wirkungsgrad**  $\eta$  angegeben:

$$\eta = \frac{E_{nutz}}{E_{el}}$$

- für den Wirkungsgrad gilt:  $\eta < 1$  bzw.  $\eta < 100\%$

### 1.5.3 Spannung

- die **elektrische Spannung**  $U$  zwischen zwei Punkten im Stromkreis gibt die elektrische Arbeit  $W_{el}$  an, die pro Ladung  $Q$  verrichtet wird (bzw. die elektrische Energie  $E_{el}$  die umgewandelt wird)

$$U = \frac{W_{el}}{Q} = \frac{\Delta E_{el}}{Q}$$

Einheit:  $[U] = 1 \frac{J}{C} = 1V$  (Volt)

- die Spannung einer Spannungsquelle (Akku, Batterie, Steckdose) ist durch den Ladungsunterschied zwischen den Polen bestimmt
- die Spannung ist ein Maß für den “Antrieb” der Elektronen im Stromkreis (im Energiehut-Modell  $\implies$  Größe der Energiehüte)

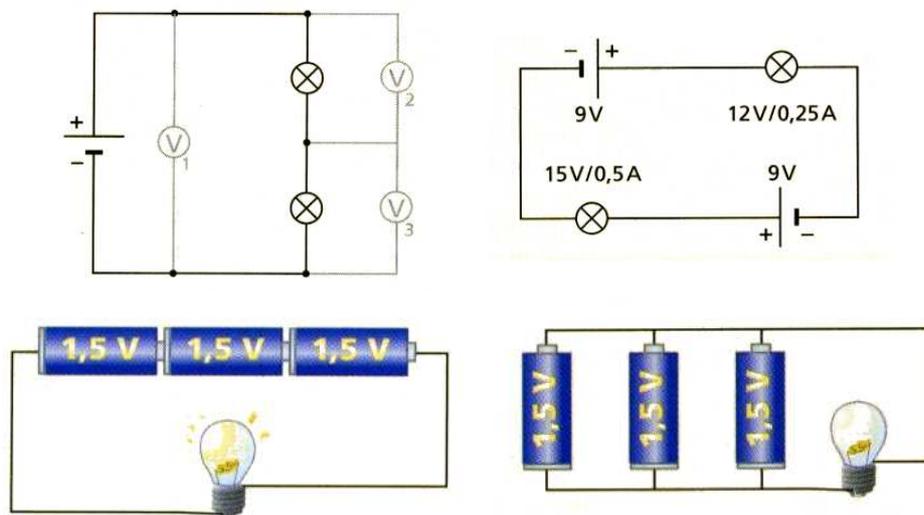


Abbildung 45: oben: Messen der Spannung zwischen zwei Punkten und Spannungsabfall an verschiedenen Verbrauchern unten: Reihen- und Parallelschaltung von Spannungsquellen

- die Spannung wird durch eine Parallelschaltung des Messgerätes (Voltmeter) zu dem Verbraucher oder der Spannungsquelle im Stromkreis gemessen
- Spannungen von  $U > 25V$  können lebensgefährlich sein!  
(Siehe Tabelle 30 in Kap. 1.3.6)

### 1.5.4 Leistung

- die Belastbarkeit eines elektrischen Gerätes bzw. dessen Umsatz elektrischer Energie wird durch die elektrische Leistung beschrieben
- die **elektrische Leistung**  $P_{el}$  ist die umgewandelte Energie  $E_{el}$  pro Zeiteinheit  $t$ :

$$P_{el} = \frac{\Delta E_{el}}{t} = \frac{U \cdot Q}{t} = \frac{U \cdot I \cdot t}{t} = U \cdot I$$

Einheit:  $[P_{el}] = 1VA = 1W$  (Watt)

- durch die allgemeine Definition der Leistung ergibt sich für die elektrische Arbeit  $W_{el}$ :

$$W_{el} = P_{el} \cdot t = U \cdot I \cdot t$$

- im Haushaltsgeräte haben Leistungen  $1W - 2kW = 2 \cdot 10^3W$  und Industriemaschinen  $1kW - MW = 2 \cdot 10^6W$

Taschenrechner	0,3 mW	Haartrockner	1,5 kW
Stand-by-Betrieb	2 W	Waschmaschine	2,2 kW
Energiesparlampe	15 W	Straßenbahn	100 kW
Glühlampe	75 W	ICE	5 MW
Computer	300 W	Kernkraftwerk (Grafenrheinfeld)	1340 MW
Bohrmaschine	800 W		

- Energieversorger rechnen statt der Leistung die Energie in **Kilowattstunden** ab

$$1kWh = 1 \cdot 10^3 \cdot 3600 Ws = 3,6 \cdot 10^6 J = 3,6 MJ$$

### 1.5.5 Messung der elektrischen Arbeit

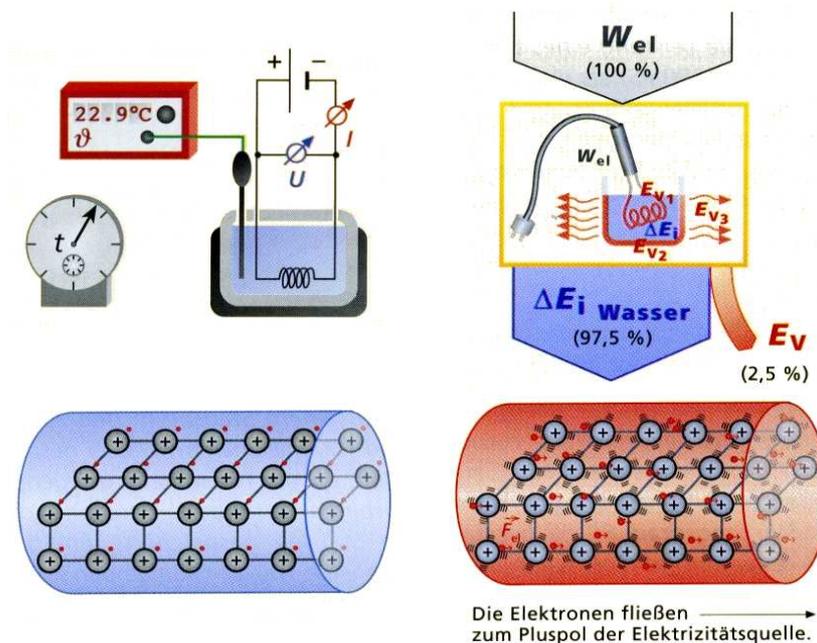


Abbildung 46: oben: Umwandlung von elektrischer Energie in innere Energie (Wasserkocher etc.) unten: Temperaturerhöhung eines Leiters bei Stromfluß

- die elektrische Arbeit kann über die physikalischen Größen  $U$ ,  $I$ , und  $t$  gemessen werden, aber auch durch die umgewandelte Energie (z.B. in innere Energie)

$$W_{el} = U \cdot I \cdot t = c \cdot m \cdot \Delta T = \Delta E_{el}$$

- der Stromfluß in einem Leiter führt zu dessen Temperaturerhöhung
- die Leitungselektronen geben durch Stöße einen Teil ihrer kinetischen Energie an das Ionengitter ab  $\implies$  Verstärkung der Schwingungen der Gitter-Ionen  $\implies$  Temperaturerhöhung  $\Delta T \implies$  Erhöhung der inneren Energie  $E_i$