Inhalt der Vorlesung Physik A2 / B2

3. Wärmelehre

Druck und Temperatur: Das ideale Gas

Wärmemenge, spezifische Wärme

Die Hauptsätze der Wärmelehre

- SEMESTERENDE -

4. Elektrizitätslehre, Elektrodynamik

Die Ladung und elektrostatische Felder

Elektrischer Strom

Magnetische Felder und Magnetostatik

Zeitlich veränderliche Felder, Elektrodynamik

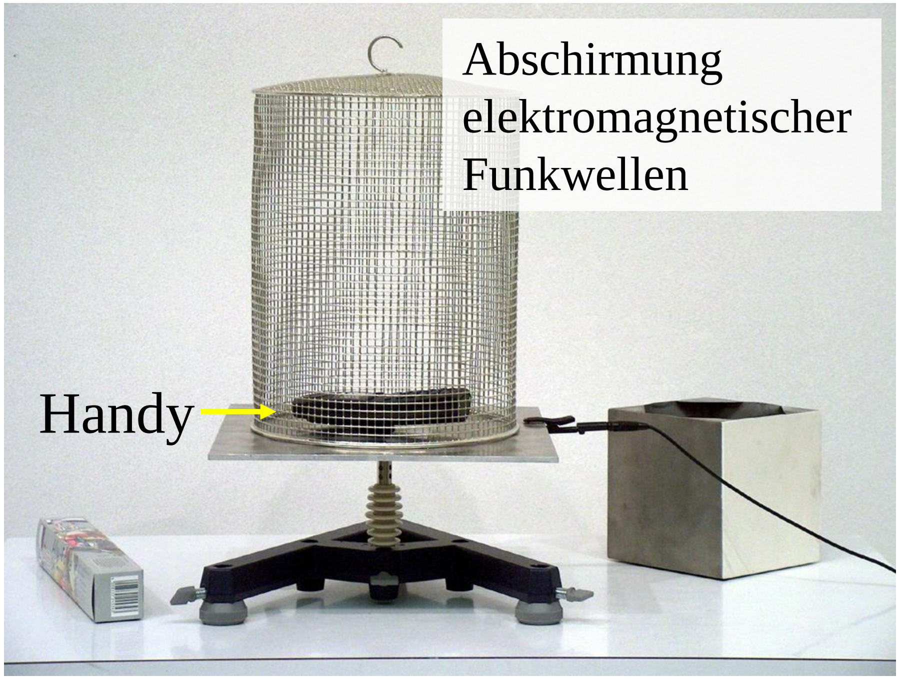
Wechselstromnetzwerke

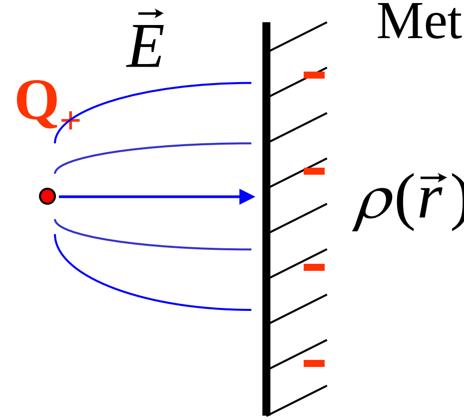
Die Maxwellschen Gleichungen

Elektromagnetische Wellen und Strahlung

Relativität der Felder – Relativitätstheorie

Experiment: *Abschirmung elektrischer Felder / Influenz*





Äußere elektrische Felder enden auf Metalloberflächen. Bei geschlossenen Oberflächen kann das elektrische Feld nicht in den Innenraum eindringen

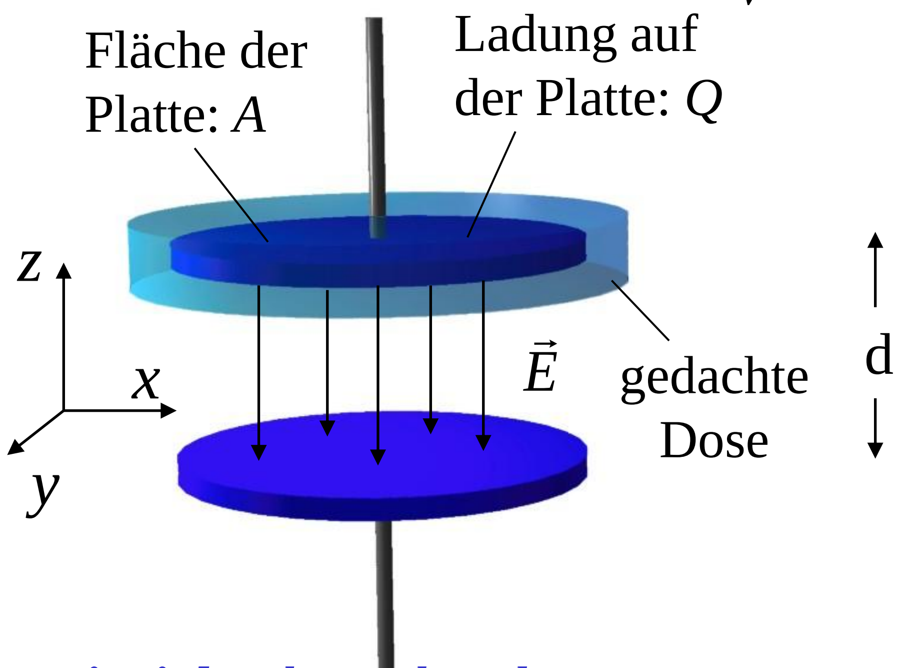
Faraday-Käfig

Influenz bezeichnet die Beeinflussung elektrischer Ladungen durch die Einwirkung eines elektrischen Feldes. Bei einem Leiter werden die beweglichen Ladungen – fast immer Elektronen – *auf der Oberfläche* verschoben, sie ändern ihren Platz. Die festsitzenden Atome werden davon nicht beeinflusst.

Kondensatoren

Kondensatoren sind 2-Elektrodensysteme, die die Ladung Q bei gegebener Potential-differenz bzw. Spannung U speichern. Sie besitzen die Kapazität $C = Q/U$.

$$Einheit: \quad 1\,F = 1\,Farad = 1\frac{As}{V}$$



Beispiel: *Plattenkondensator*

Die positiven und negativen Ladungen stehen sich auf den Innenseiten der Platten gegenüber, das elektrische Feld ist (abgesehen von den Randfeldern) auf den Innenraum beschränkt.

Damit gilt:

$$\oiint_{Dose} \vec{E}\cdot d\vec{a} = \iint_A E_z da = E_z \iint_A da$$

$$= E_z A = \frac{Q}{\varepsilon_0}$$

$$\Rightarrow E_z = \frac{Q}{A\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

σ ist die ***Flächenladungsdichte***.

Mit d als Plattenabstand und wegen des homogenen E-Feldes folgt dann

$$U = E_z \cdot d$$

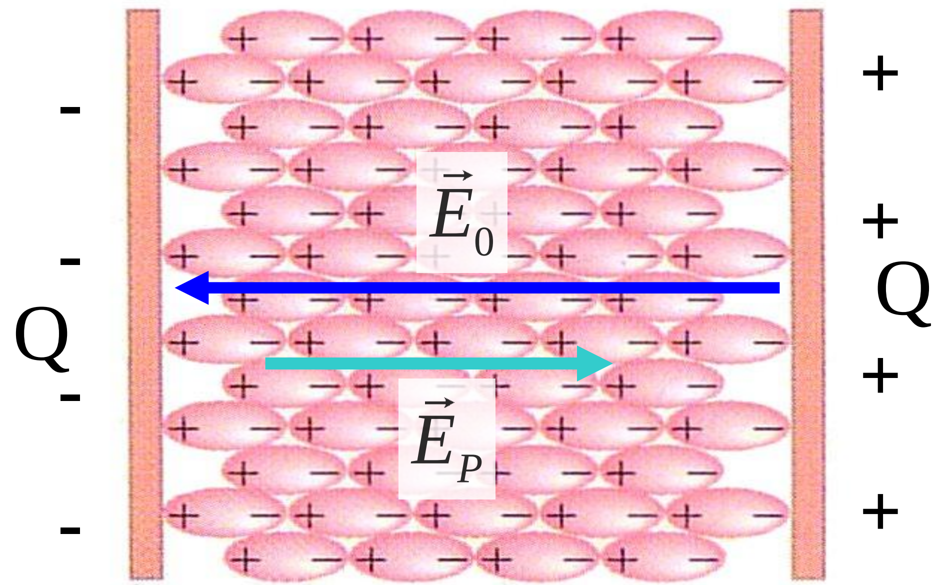
und schließlich für die Kapazität C

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{E_z A \varepsilon_0}{E_z d} = \varepsilon_0 \frac{A}{d}$$

Ist der Kondensator mit einem ***Dielektrikum*** gefüllt, so gilt (bei gegebenem Q ist die Feldstärke reduziert):

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d}$$

Bei gegebener Spannung kann so mehr Ladung gespeichert werden.



Ein Dielektrikum wird im elektrischen Feld polarisiert. Es entsteht ein der Ursache entgegen gerichtetes Feld, das durch die Polarisationsladungen erzeugt wird.

$$E = E_0 - E_P = \frac{E_0}{\varepsilon_r}$$

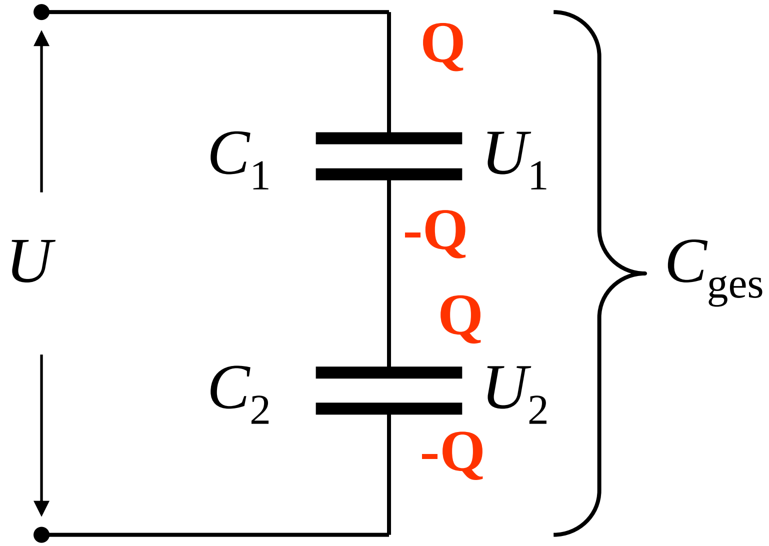
ε_r heißt ***relative Dielektrizitätskonstante***

Dielektrizitätszahlen und Durchschlagsfestigkeiten einiger Stoffe

Material	Dielektrizitätszahl ε_r	Durchschlagsfestigkeit/$kV \cdot mm^{-1}$
Bakelit	4,9	24
Glas	5,6	14
Glimmer	5,4	10 – 100
Luft	1,00059	3
Neopren	6,9	12
Papier	3,7	16
Paraffin	2,1 – 2,5	10
Plexiglas	3,4	40
Polystyrol	2,55	24
Porzellan	7	5,7
Transformatorenöl	2,24	12
Wasser (20 °C)	80	

Schaltung von Kondensatoren

a) ***Serienschaltung*** zweier Kondensatoren

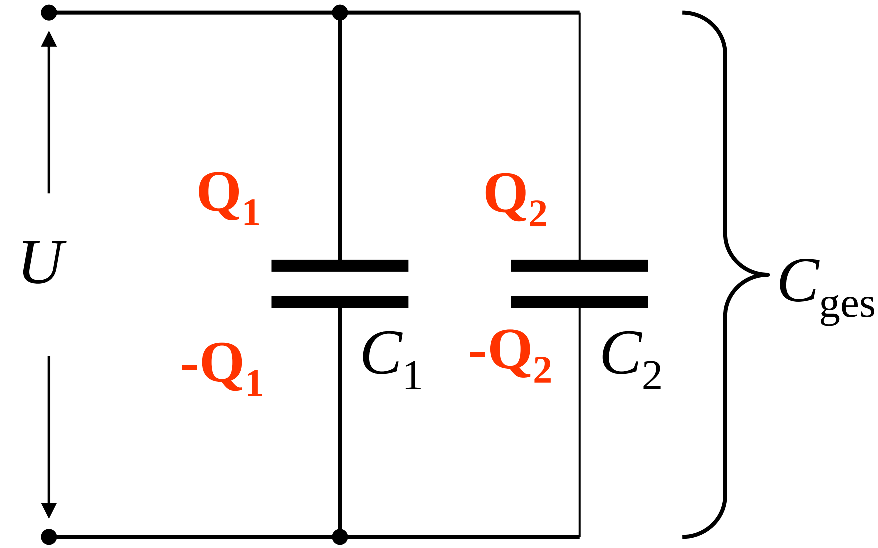


$$C_{ges} = \frac{Q}{U_1 + U_2} = \frac{Q}{\frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

oder

$$\frac{1}{C_{ges}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

b) ***Parallelschaltung*** zweier Kondensatoren



$$C_{ges} = \frac{Q_1 + Q_2}{U} = C_1 + C_2$$

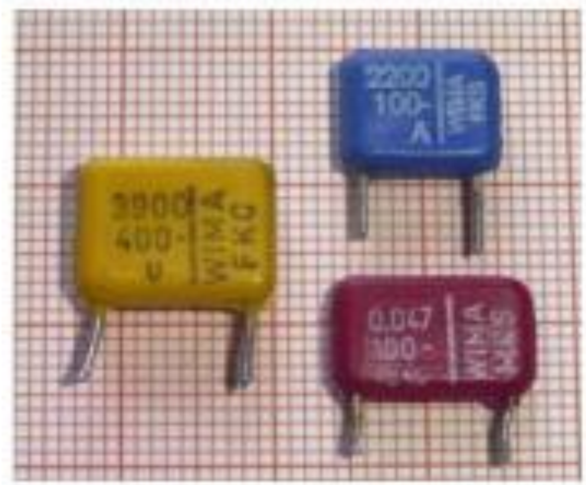
Ausführungen Kondensatoren I

Drehkondensator

Elektrolytkondensatoren (Elko)
Polung beachten !

Hohe Kapazitätswerte
z.B. Netzteile

Folienkondensatoren
radial bedrahtet
(Platine)



Ausführungen Kondensatoren II

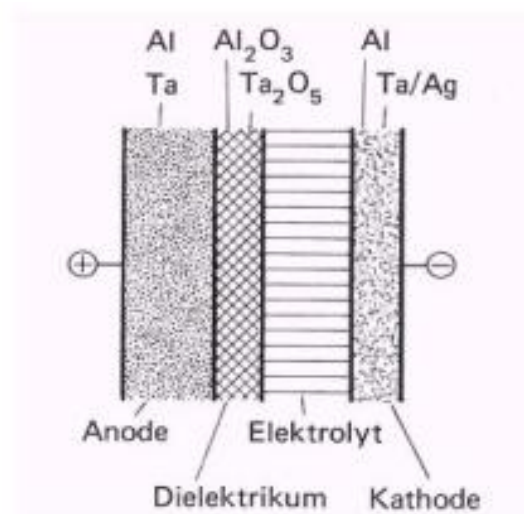
Kondensator

Drehkondensator

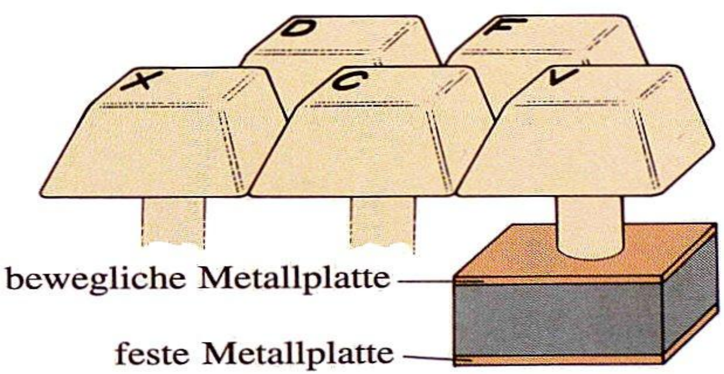
Trimmer

Elko

Tantal-Elko



Anwendungsbeispiel:



+ Seite gekennzeichnet

Die im elektrischen Feld gespeicherte Energie

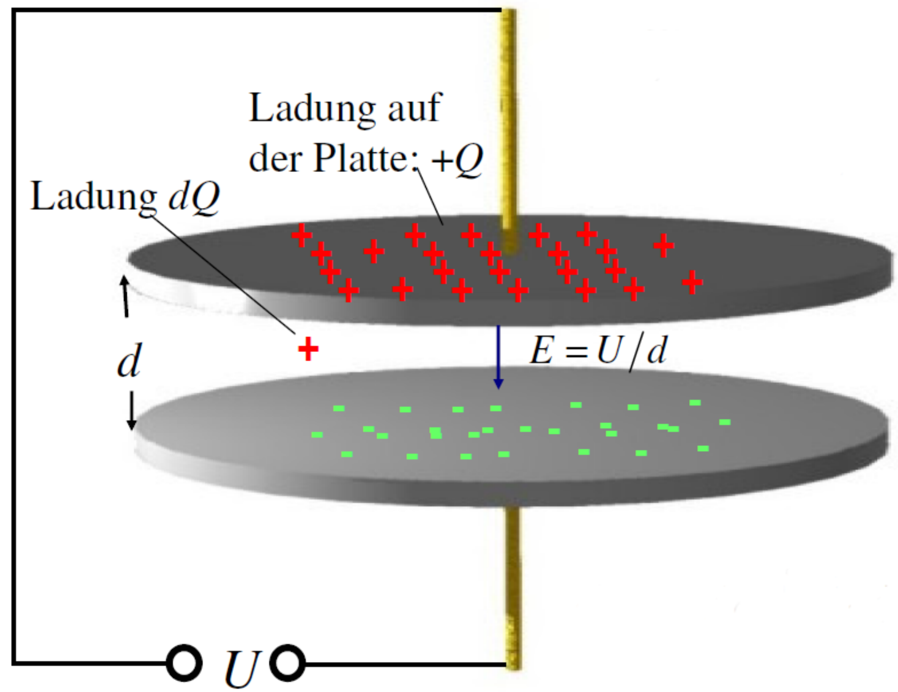
Wir betrachten einen Plattenkondensator mit Kapazität C, auf der sich die Ladung Q befindet und die Spannung U anliegt.

$$Q = CU$$

Wir verschieben nun die Ladung dQ von der negativen Platte auf die positive Platte. Die dazu aufzuwendende Arbeit dW beträgt:

$$dW = \int_d \vec{F} \cdot d\vec{r} = dQ \int_d \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

$$= dQ \frac{U}{d} d = UdQ = \frac{QdQ}{C}$$



Die gesamte aufzuwendende Arbeit W, um den Kondensator auf die Spannung U aufzuladen folgt aus der Integration

$$W = \int_0^{Q_0} \frac{Q}{C} dQ = \frac{1}{2C} Q_0^2 = \frac{1}{2} CU^2$$

Die im Kondensator mit der Spannung U gespeicherte Energie W_e beträgt daher

$$W_e = \frac{1}{2} C U^2$$

Wir wollen U durch E ersetzen und erhalten im Fall des Plattenkondensators

$$W_e = \frac{1}{2} C U^2 = \frac{1}{2} \left(\varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \right) (Ed)^2$$

$$= \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r E^2 (Ad) = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r E^2 V$$

mit dem Volumen des Kondensators V. Die ***Energiedichte des elektrischen Feldes*** folgt dann sofort zu

$$w_e = \frac{W_e}{V} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r E^2$$

Es überrascht nicht, dass dieses Ergebnis allgemein gilt

$$w_e = \frac{dW_e}{dV} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r E^2$$

Inhalt der Vorlesung Physik A2 / B2

3. Wärmelehre

Druck und Temperatur: Das ideale Gas

Wärmemenge, spezifische Wärme

Die Hauptsätze der Wärmelehre

- SEMESTERENDE -

4. Elektrizitätslehre, Elektrodynamik

Die Ladung und elektrostatische Felder

Elektrischer Strom

Magnetische Felder und Magnetostatik

Zeitlich veränderliche Felder, Elektrodynamik

Wechselstromnetzwerke

Die Maxwellschen Gleichungen

Elektromagnetische Wellen und Strahlung

Relativität der Felder – Relativitätstheorie

Der elektrische Strom / Die bewegte Ladung

Ein Masseteilchen mit der elektrischen Ladung q erfährt im elektrischen Feld die Kraft:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}$$

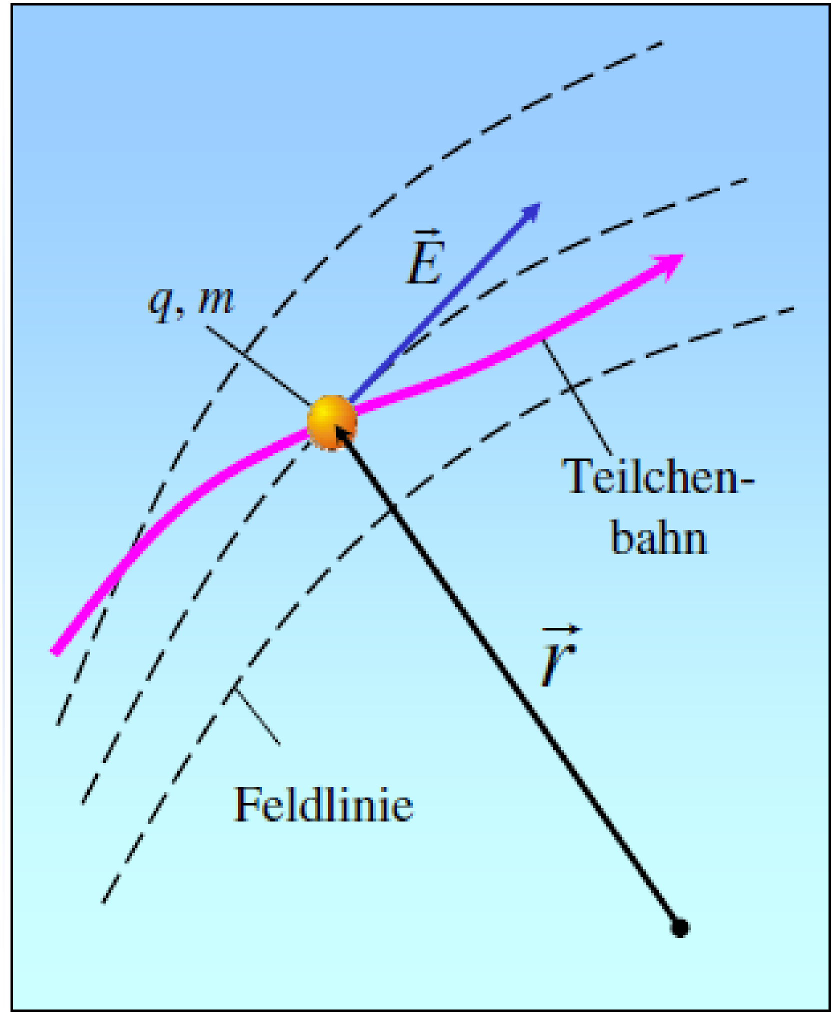
Das Teilchen mit Masse m erfährt nach Maßgabe des 2. Newtonschen Gesetzes eine Beschleunigung a und es gilt:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \dot{\vec{p}} = q \cdot \vec{E}$$

und weiter:

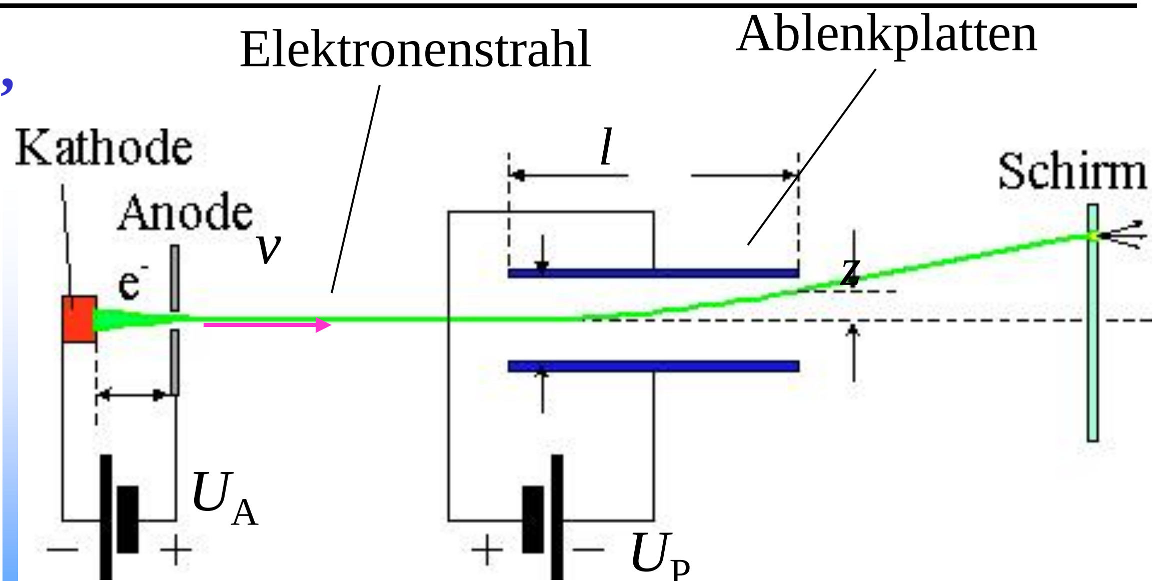
$$\dot{\vec{p}} = m\vec{a} = q \cdot \vec{E}$$

$$\rightarrow \vec{a} = \dot{\vec{v}} = \ddot{\vec{r}} = \frac{q}{m}\vec{E}$$



Bsp.: Dynamik geladener Teilchen, Braunsche Röhre

Freie Elektronen erzeugt man z.B. unter Vakuumbedingungen durch Glühemission. In einer Kondensatoranordnung können die Elektronen beschleunigt werden (Strahl !)



Ferdinand Braun
1850 - 1918

Braunsche Röhre 1897

Entdeckung des Elektrons
J.J. Thomson 1897

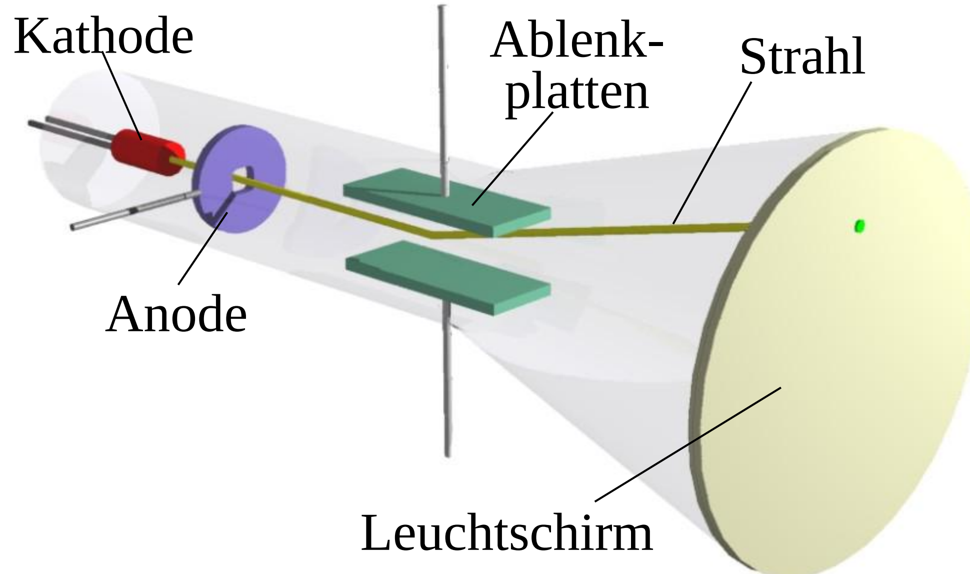
Elektronen, die auf dem Wege von der Kathode zur Anode die Potentialdifferenz = Spannung U_A durchlaufen haben, haben die kinetische Energie

$$E_{kin} = eU_A$$

gewonnen und erreichen dabei die Geschwindigkeit v.

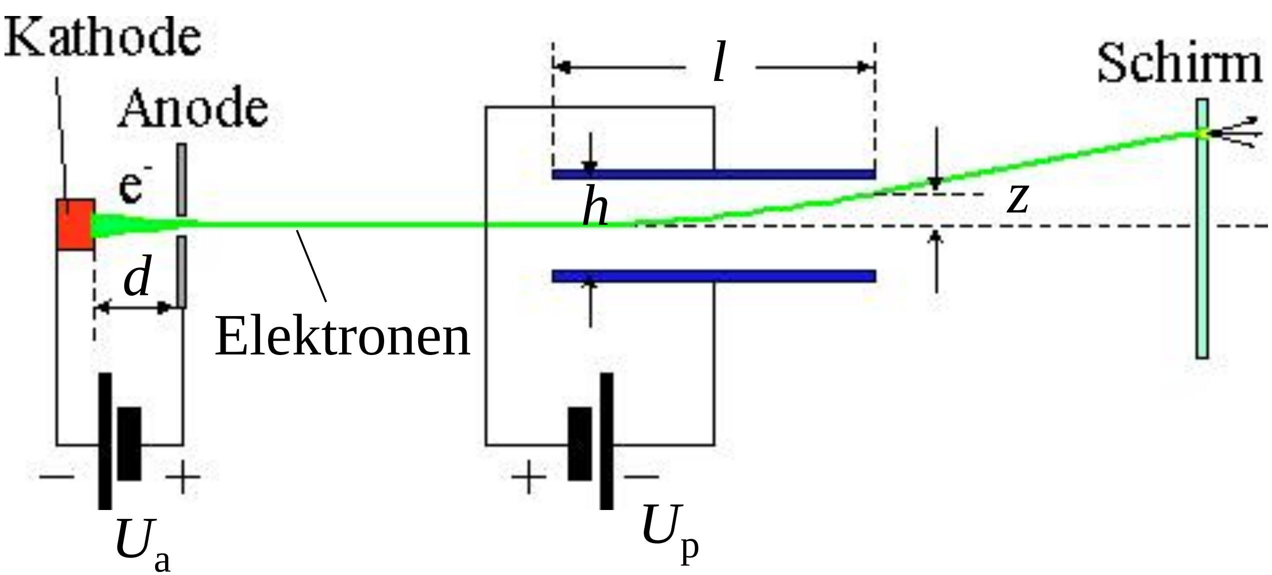
$$v = \sqrt{\frac{2eU_A}{m_e}}$$

Die ***Bewegungsgleichung*** der Elektronen zwischen Kathode und Anode ist gegeben durch:



$$F = m_e a = m_e \dot{v} = eE_a$$

$$\text{mit} \quad E_a = \frac{U_a}{d}$$



Die Ladung des Elektrons ist

$$Q_e = e$$

seine Masse

$$m = m_e$$

Ablenkung: In den Platten wirkt die transversale Kraft (a_p = Transversal-beschleunigung)

$$F_p = e E_p = e\frac{U_p}{h} \quad \Rightarrow \quad a_p = \frac{eU_p}{m_e h}$$

Die Flugzeit durch die Platten beträgt

$$t_p = \frac{l}{v_e} = l\sqrt{\frac{m_e}{2eU_a}}$$

daraus folgt für die Ablenkung

$$z = \frac{1}{2} a_p t_p^2$$

$$z = \frac{1}{2}\frac{eU_p}{m_e h} l^2 \frac{m_e}{2eU_a} = \frac{1}{4}\frac{U_p}{U_a}\frac{l^2}{h}$$

Anwendung als ***Spektrometer:***

Ein elektrostatisches Feld separiert geladene Teilchen nach Maßgabe ihrer kinetischen Energie !

später: Magnetfelder separieren nach dem Teilchenimpuls !

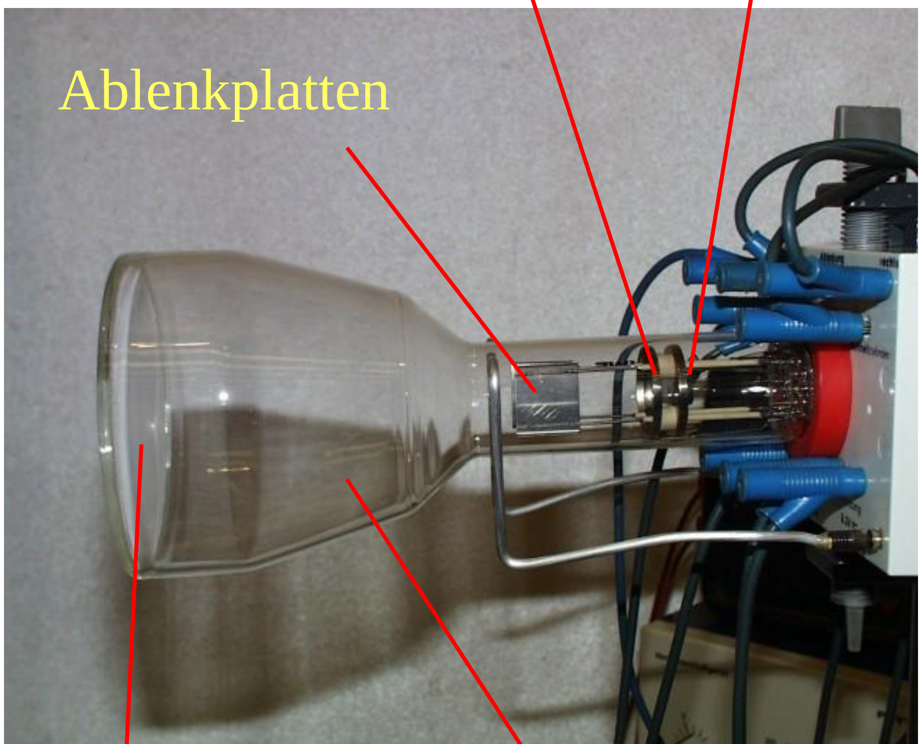
Beispiel:

e = $1.602\cdot10^{-19}$ C

U_a = 100 V,
m_e = $9.1\cdot10^{-31}$ kg
$\Rightarrow$ v = $5.9\cdot10^{6}$ m/s
U_p = 5 V
l = 5 cm,
h = 1 cm
$\Rightarrow$ z = 3.1 mm

Experiment: Braunsche Röhre Oszilloskop

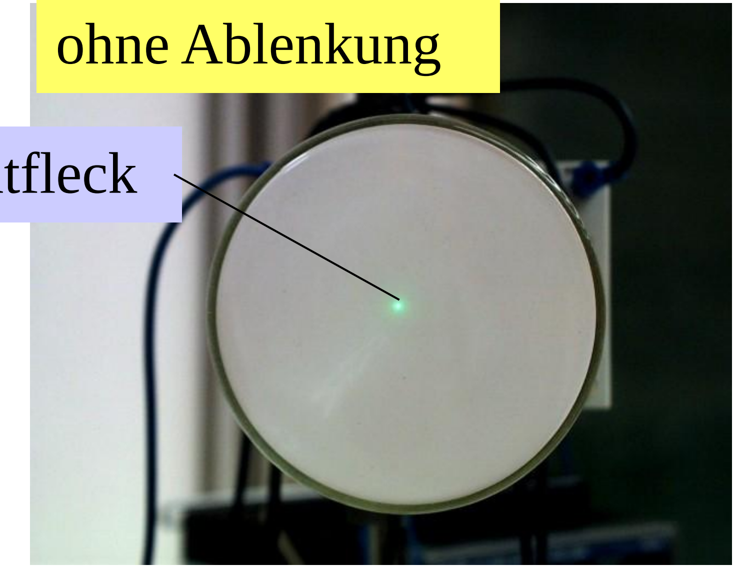
Anode Kathode



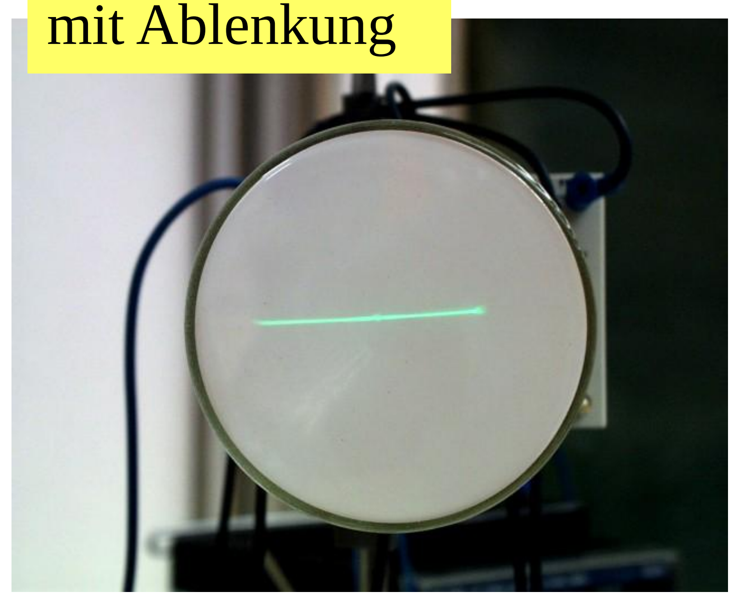
Leuchtschirm Glaskolben

ohne Ablenkung

Leuchtfleck

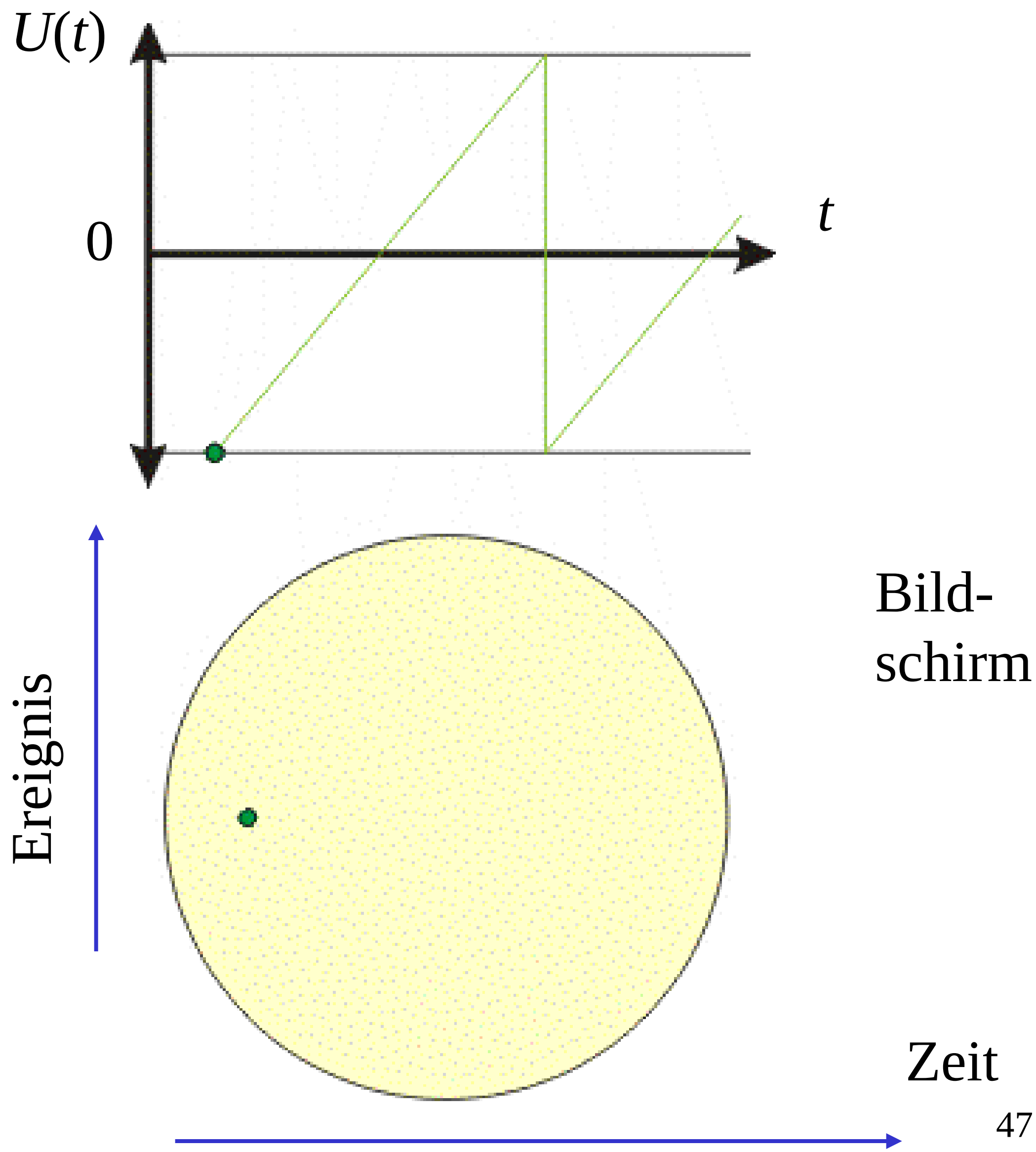


mit Ablenkung



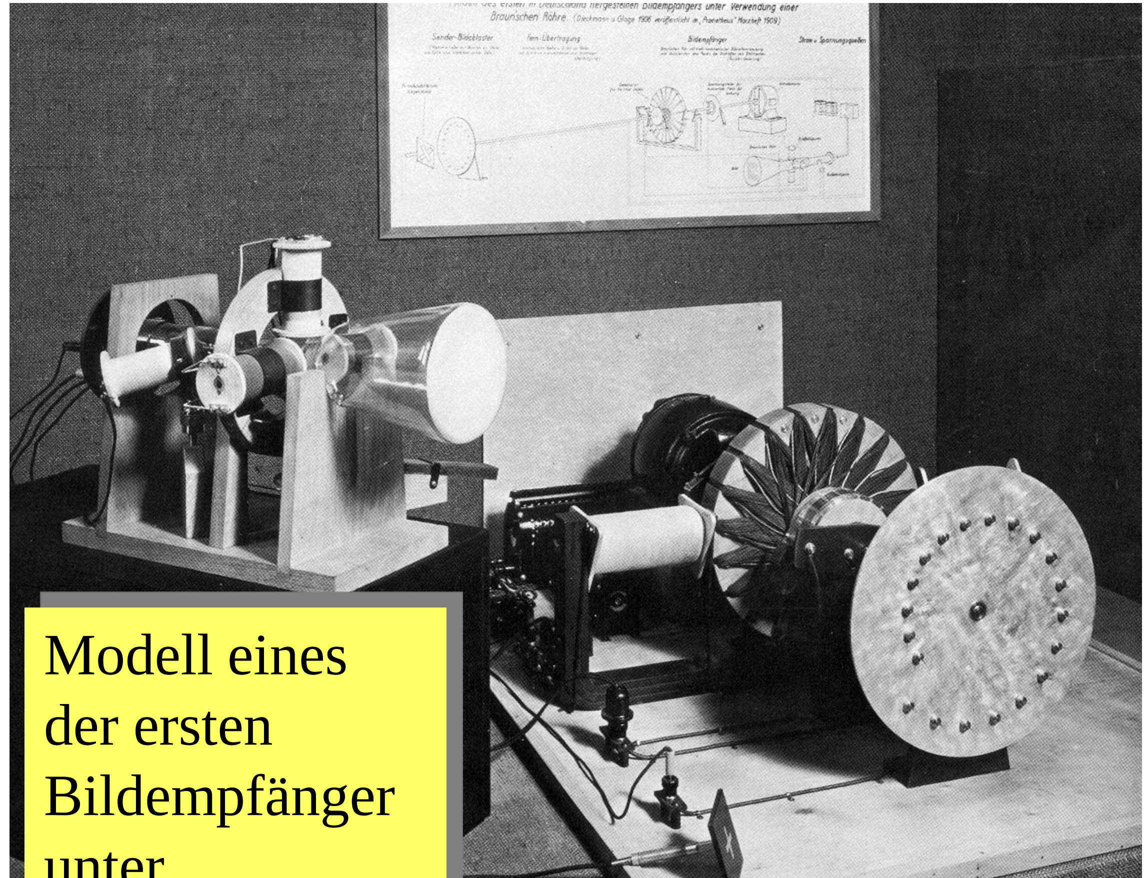
Beispiel: Messung schneller Signale:

Wenn man an die Ablenkplatten der Oszilloskop-Röhre eine mit der Zeit linear ansteigende Spannung $U(t)$ legt, schreibt der Leuchtfleck eine horizontale Linie, die proportional zur Zeit verläuft. Benutzt man ein zweites senkrecht dazu wirkendes Platten-paar, kann man daran Signale *S(t)* anschließen, die dann als Funktion der Zeit auf dem Schirm dargestellt werden. Das kann extrem schnell erfolgen in Zeitintervalle bis etwa $\Delta t = 1$ ns.



Erzeugung von freien Elektronen:

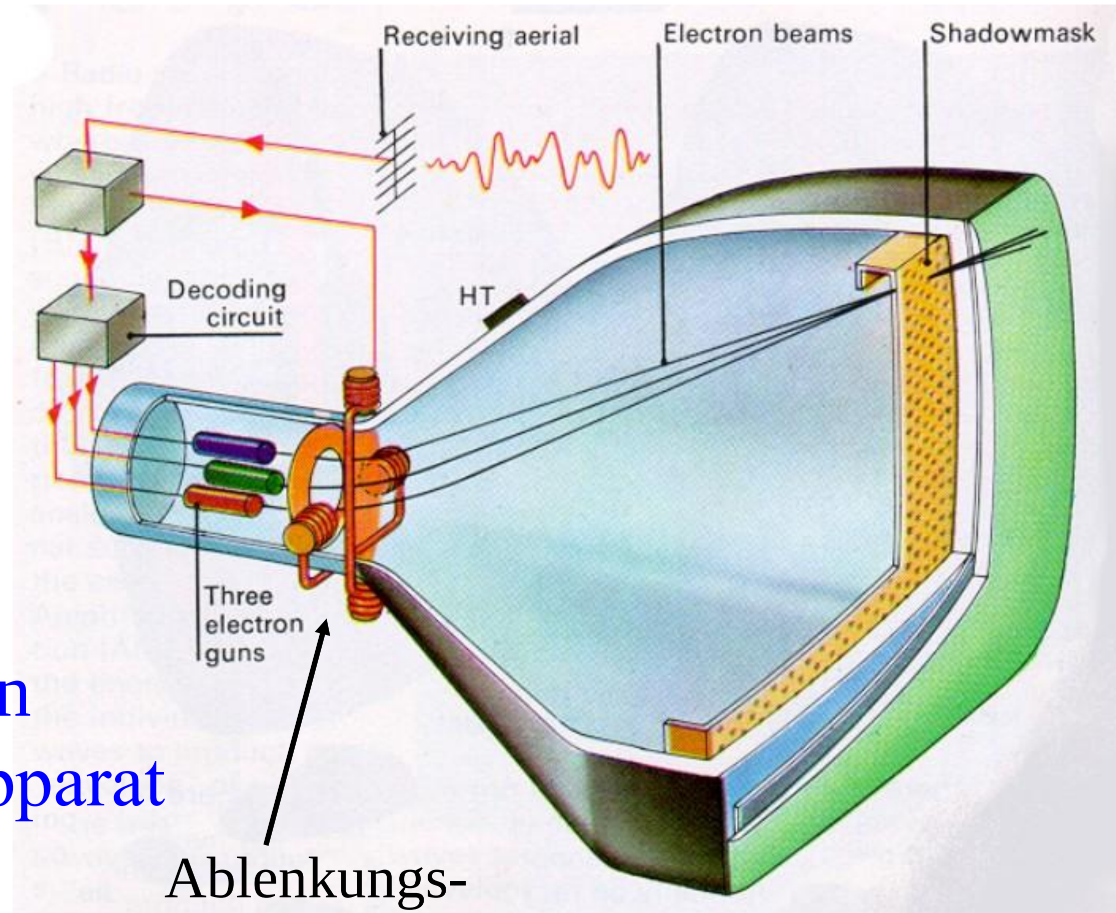
Die Elektronen sind in den Metallen gebunden und können diese bei normaler Zimmertemperatur nicht verlassen. Das gelingt nur durch Anlegen extrem hoher elektrischer Feldstärken („Feldeffekt“) oder durch Aufheizen auf Temperaturen über T>1000 ºK („Glühemission“). Eine weitere Methode ist der Beschuss des Metalls mit einem Laserstrahl („Laseremission“)



Modell eines der ersten Bildempfänger unter Verwendung einer Braunschen Röhre

RGB-Farbbildröhre

$U_a \sim 25$ kV

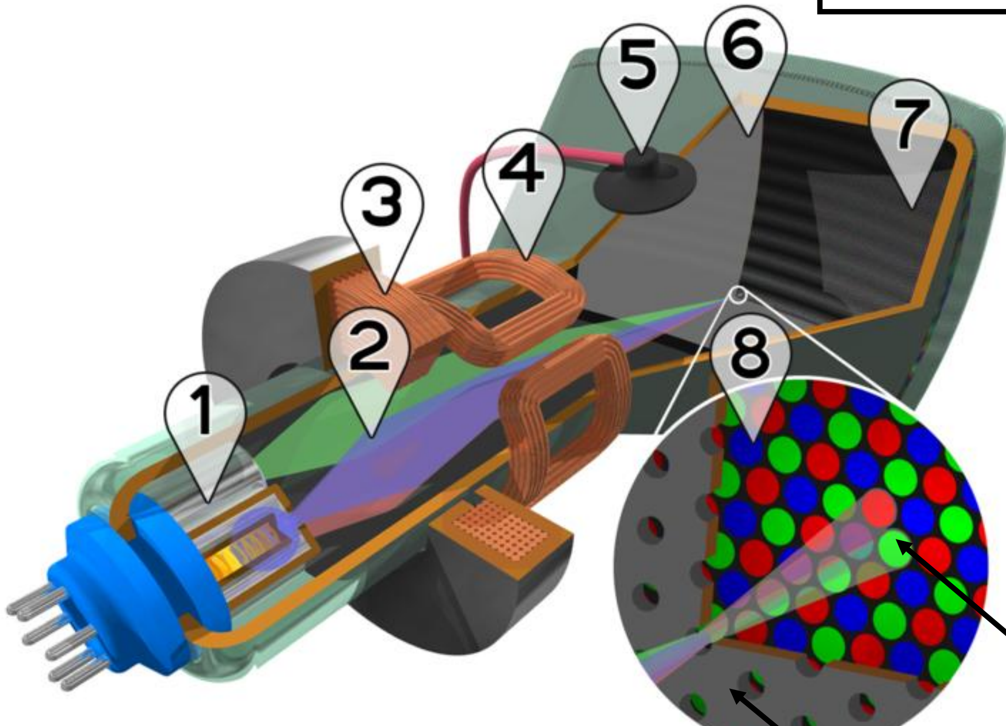


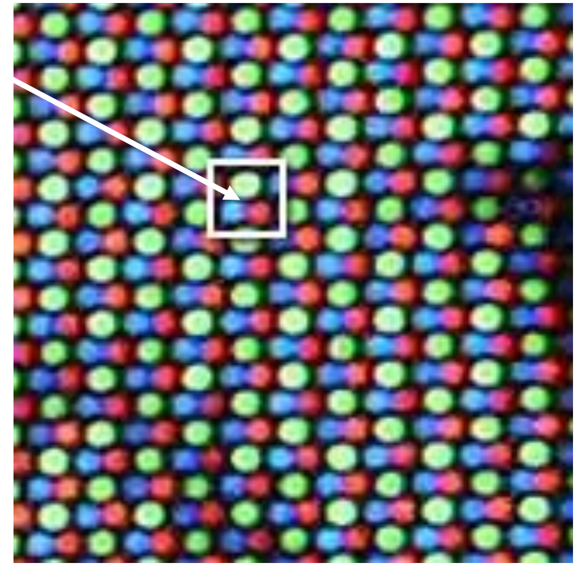
Ablenkungs-
einheiten

Anwendung der Braunschen Röhre im „alten“ Fernsehapparat

Innerer Aufbau Farb-Bildröhre

1 Pixel/Bildpunkt





z.B. bei 1024x768 Pixel
0,3 mm Durchmesser

beschichteter Bildschirm
3 Fluoreszenz-Punkte
oder –Streifen pro Pixel

Lochmaske

Quelle: wikipedia.de

Elektrische Ströme und Stromverteilungen

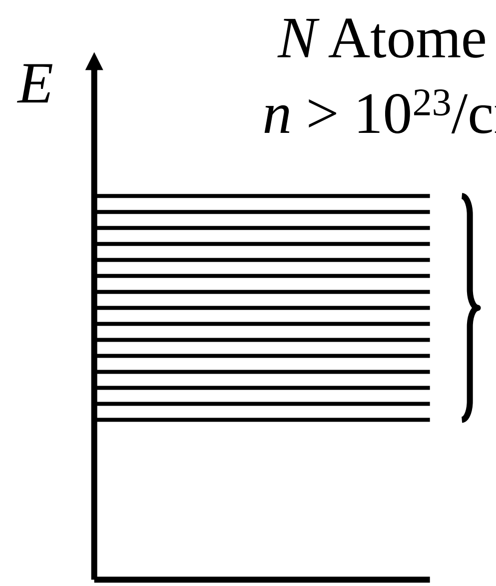
Sind in Materialien freie Ladungsträger vorhanden, so kommt es bei Vorliegen eines elektrischen Feldes zur Ausbildung eines elektrischen Stromes (***Leiter***). Sind die Ladungsträger fest im Material gebunden, so findet kein Stromfluss statt (***Isolator***).

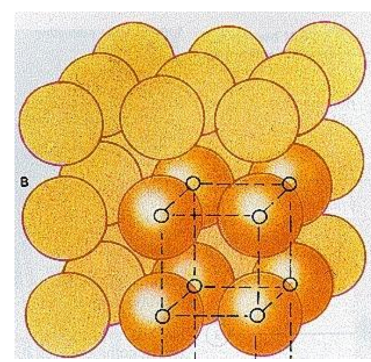
Beispiele:

Elektronenstrom in Metallen,
Ionenstrom in Flüssigkeiten,
Ionenstrom in Gasen,
Elektronen- und positiver Ladungsstrom (Löcher) in Halbleitern
Elektronen und Ionen im Vakuum

Vereinfachtes Modell Elektronenleitung im Festkörper:

Elektronen müssen in einem System alle unterschiedliche Energien besitzen. Elektronen sind ***Fermionen***. Die Energiezustände der Elektronen sind daher Bänder (später mehr !!):

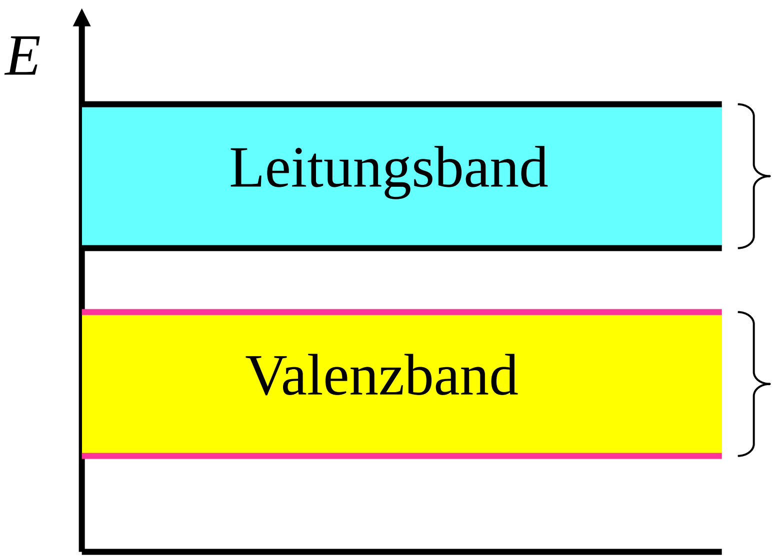




Bändermodell:

Das letzte, komplett mit Elektronen gefüllte Band nennt man das ***„Valenzband“.***

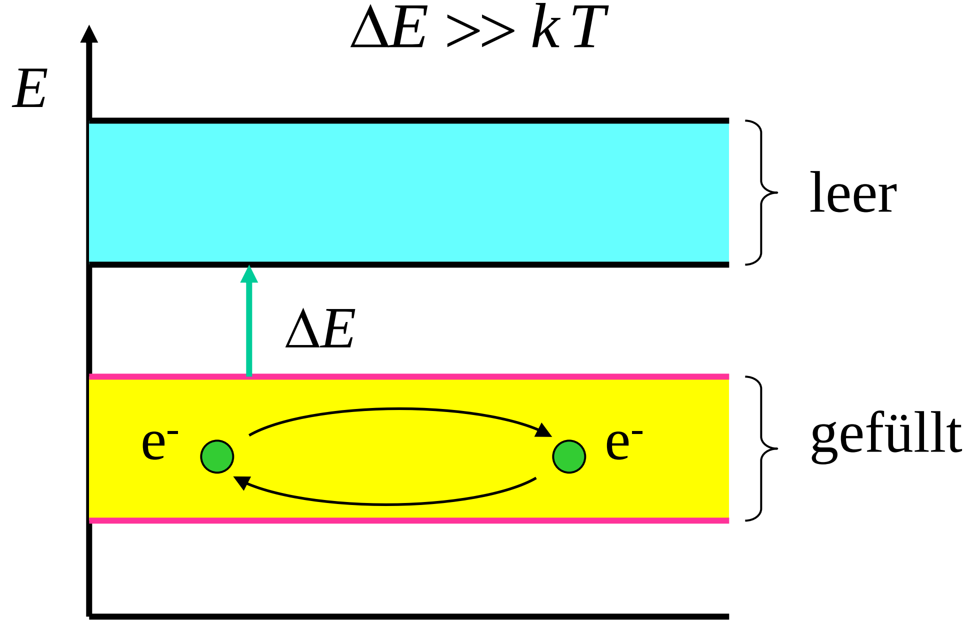
Das darüber befindliche nächste leere Band ist das ***„Leitungsband“***



Wir erinnern uns an die Thermodynamik: mittlere innere Energie eines Teilchens entspricht ungefähr $k_B T = kT$

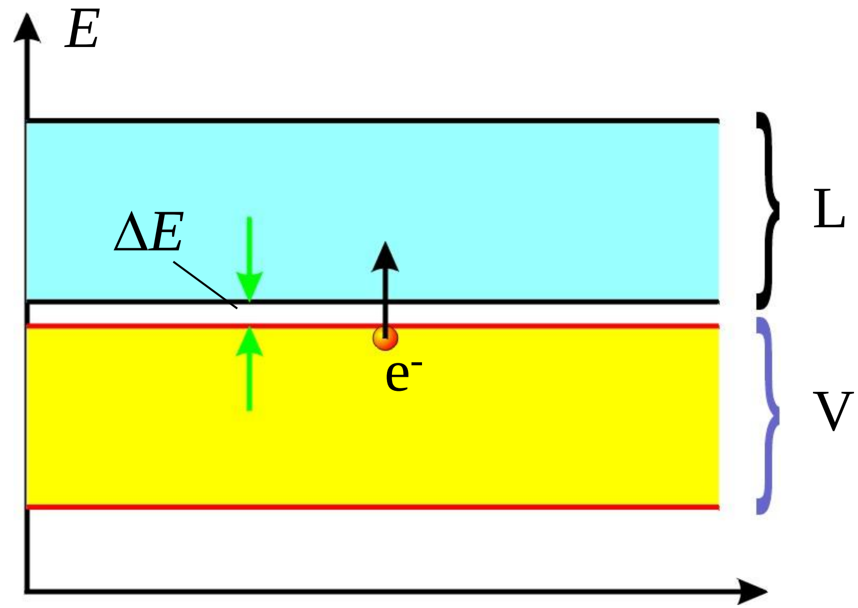
Beim Isolator ist zwischen dem gefüllten Leitungsband und dem Valenzband ein relativ großer Energieabstand

$$\Delta E >> k\,T$$



Die Elektronen können nicht durch thermische Anregung ($E_T = kT$) in das Leitungsband gelangen. Hier gibt es also keine frei beweglichen Ladungen.

Im voll besetzten Valenzband können sich Elektronen nur in eine Richtung bewegen, wenn gleichzeitig entsprechend viele in die Gegenrichtung strömen. Im statistischen Mittel gibt es also keine Ladungsbewegung. Die Ladungen sind fest.

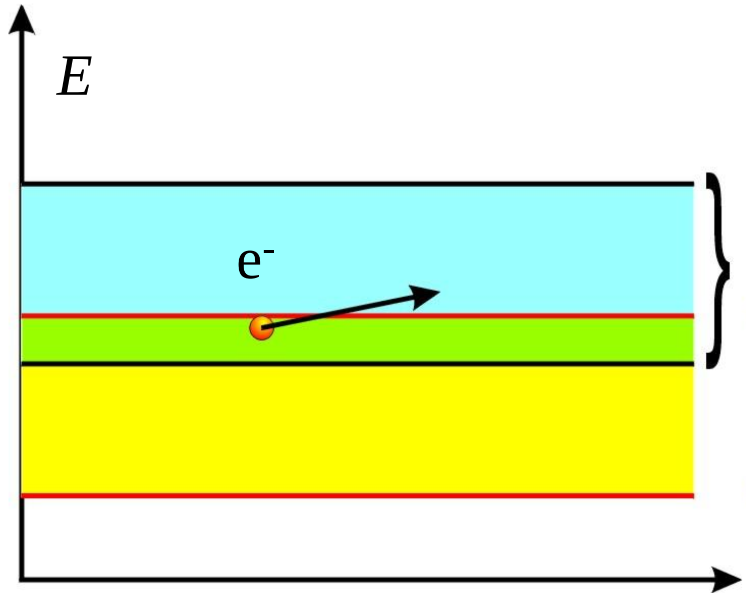


Es gibt verschiedene Arten von Leitern:

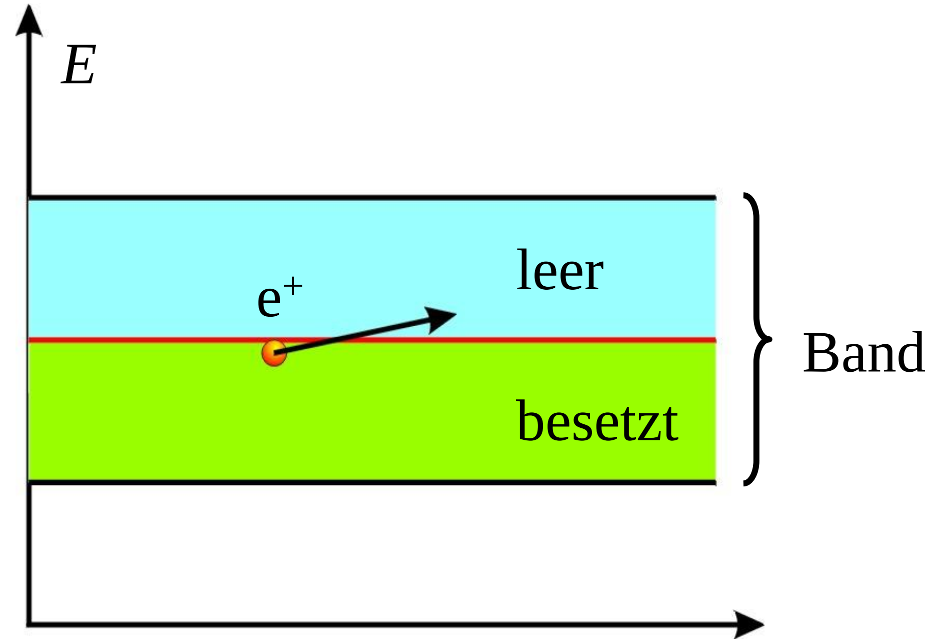
Wenn Valenz- und Leitungsband energetisch sehr dicht beieinanderliegen, also

$$\Delta E \approx kT$$

dann gelangen Elektronen in das freie Leitungsband und sind da beweglich. Dies trifft auf Halbleiter zu. Ihre Leitfähigkeit ist dann stark von T abhängig.



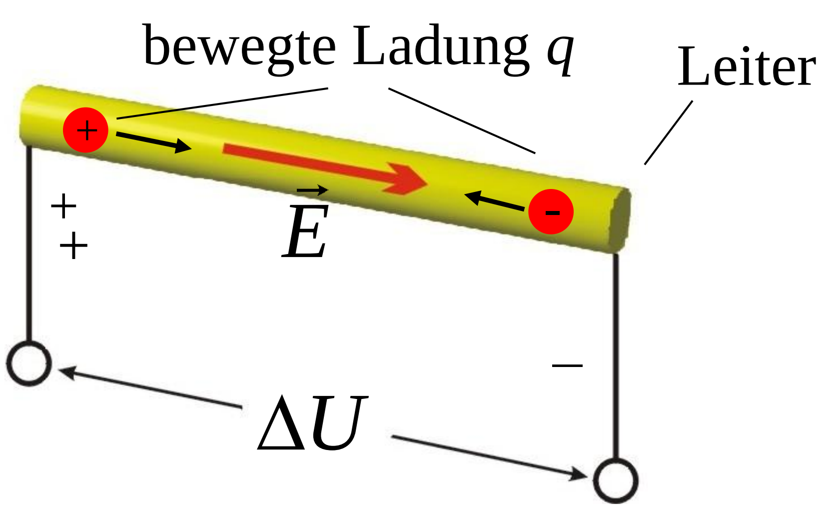
Wenn das Valenz- und das Leitungsband überlappen, können Elektronen ohne Energieaufwand in das Leitungsband gelangen und sich dort frei bewegen.



Es gibt auch Leiter, bei denen das äußerste Band nur halb gefüllt ist. Dann reicht die kleine thermische Energie, um ein freies Niveau zu erreichen.

Elektrische Leitfähigkeit und Ohmsches Gesetz

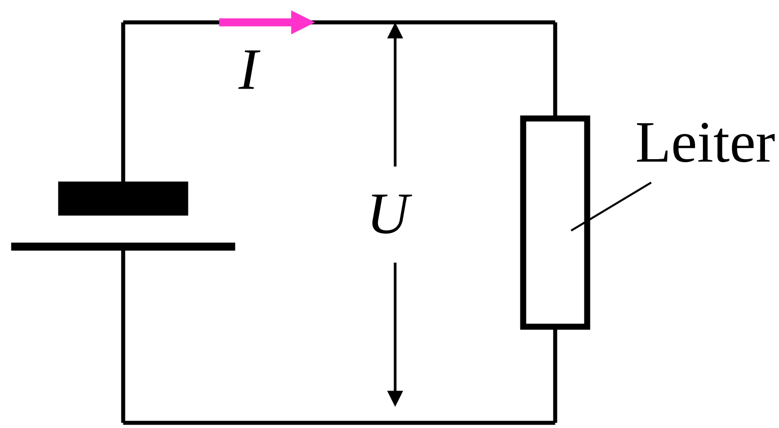
In einem ***Leiter*** sind elektrische Ladungen frei beweglich. Legt man an solch einen Leiter eine Spannung ΔU (elektrisches Potential), geraten die Ladungen in Bewegung, es fließt ein ***elektrischer Strom I.***



Definition und Einheit des Stroms I

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad \text{Einheit: } 1A\ (Ampere) = 1\frac{C}{s}$$

Idealisiertes Ersatzschaltbild:



Spannungsquelle: U = const.

 = verlustfreie Zuleitungen

d.h. die Eigenschaft des Stromkreises wird nur durch den Leiter bestimmt.

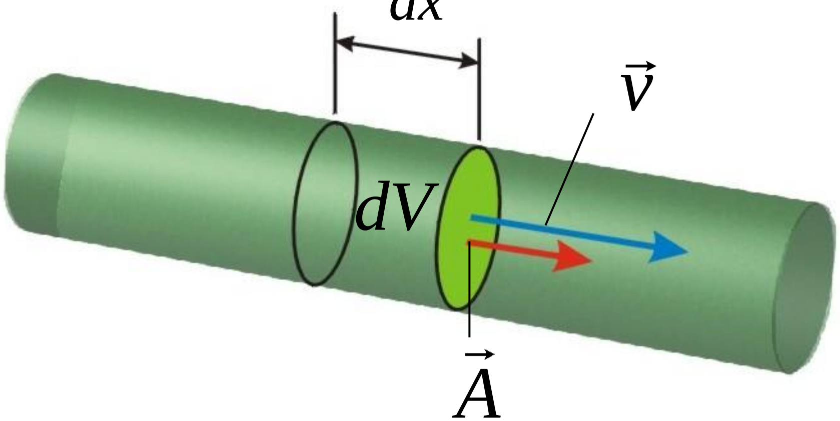
Die Ladung im Teilvolumen dV mit

$$dV = \left|\vec{A}\right| dx$$

ist gegeben durch

$$dQ = \rho \left|\vec{A}\right| dx$$

mit ρ als Dichte der Ladungsträger



Die Ladungen bewegen sich in der Zeit *dt* um die Strecke *dx*. Dann gilt

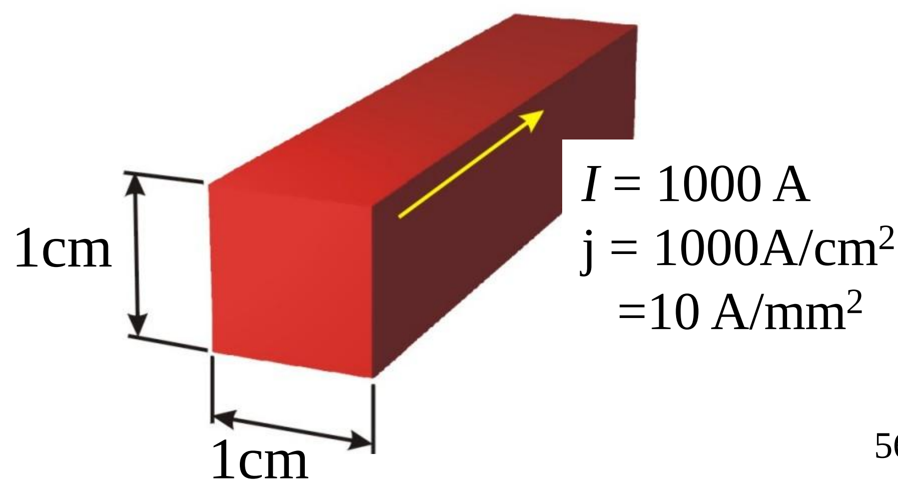
$$I = \frac{dQ}{dt} = \rho\left|\vec{A}\right|\frac{dx}{dt} = \rho A v$$

Als ***Stromdichte j*** definieren wir den Vektor des Stromes bezogen auf eine Querschnittsfläche

$$\vec{j} = \rho\vec{v} = n \cdot q \cdot \vec{v}$$

Die Einheit von *j* ist 1 A/m^2. *q* ist die Ladung des einzelnen Ladungsträgers und *n* die Ladungsträgerdichte.

Beispiel: Leiter aus Cu



In 1 cm^3 Kupfer sind $8 \cdot 10^{22}$ Atome. Wenn jedes Atom ein frei bewegliches Elektron liefert, ist die Ladungsdichte

$$\rho = \frac{Q}{V}$$

$$= \frac{8 \cdot 10^{22} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C}}{1\mathrm{cm}^3} = 1.28 \cdot 10^4\ \frac{\mathrm{C}}{\mathrm{cm}^3}$$

Damit wird die Elektronengeschwindigkeit im Leiter

$$v = \frac{j}{\rho} = \frac{1000\ C\ cm^3}{1.28 \cdot 10^4 s\ cm^2\ C}$$

$$= 0.078 \frac{cm}{s} = 0.78 \frac{mm}{s} \quad (!!)$$

Das ist überraschend wenig.

Beispiele für Leiter und Halbleiter:

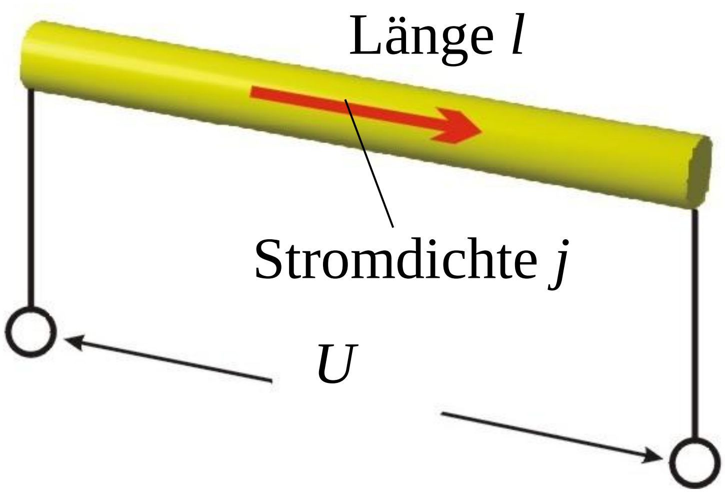
- Metalle, vor allem Cu und Ag
- Quecksilber, bei $T < 10$ K sogar „Supraleiter“
- Dotiertes Si und Ge (Halbleiter)
- Salzlösungen
- ionisierte Gase (Lichtbogen)
- Vakuum (wenn freie Elektronen vorhanden)

Beispiele für Nichtleiter

- Keramik, Kunststoffe
- Gase bei niedriger Temperatur
- reines Vakuum
- Glas (bei nicht zu hohen Temperaturen)

Das Ohmsche Gesetz

Legt man an einen Leiter eine Spannung *U*, so entsteht in ihm ein homogenes elektrisches Feld *E*.



Alle Experimente zeigen:

Im elektrischen Feld existiert eine Stromdichte j mit

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

Ohmsches Gesetz

σ ist eine Materialkonstante und heißt elektrische Leitfähigkeit.

$$\textit{Einheit } \sigma: \quad 1\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{Vm}} = 1\frac{1}{\Omega m}$$

mit der Abkürzung 1Ω = 1 V/A = 1 Ohm

Beispiele für Leitfähigkeit (bei 0° C):

Material	σ [1/Ωm]
Cu	$6.5 \cdot 10^7$
Ag	$6.7 \cdot 10^7$
Al	$4.0 \cdot 10^7$
Fe	$1.1 \cdot 10^7$
Bi	$0.09 \cdot 10^7$

Nehmen wir im Leiter der Länge *l* ein homogenes elektrisches Feld an. Dann ist die Potentialdifferenz U gegeben durch

$$U = \left|\vec{E}\right| l = \frac{\left|\vec{j}\right|}{\sigma} l = \frac{l}{\sigma}\frac{I}{A}$$

mit A als Querschnittsfläche des Leiters. Dann folgt

$$U = R \cdot I$$

Der Ausdruck

$$R = \frac{1}{\sigma}\frac{l}{A} = \rho\frac{l}{A}$$

beschreibt den ***ohmschen Widerstand*** des Leiters.

Er gibt den Zusammenhang von Strom *I* und Spannung *U* wieder.
Generell gilt aber

$$U = R(U, I, T, \ldots) \cdot I$$

d.h. der ohmsche Widerstand hängt von mehreren Größen ab.

ρ ist hier der ***spezifische Widerstand*** des Leiters. Er ist definiert als Kehrwert der ***spezifischen Leitfähigkeit*** $\boldsymbol{\sigma}$

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

$$Einheit\,\rho: \quad 1\ \Omega m = 1\ \frac{V}{A} m$$

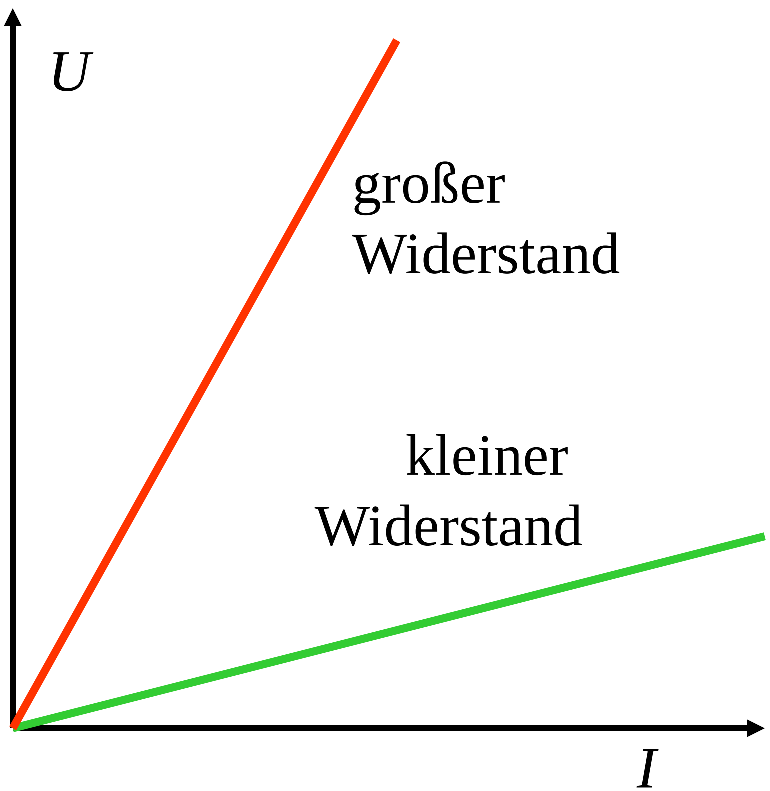
Die Leitfähigkeit σ bzw. ***der spezifische Widerstand ρ*** ist eine der Größen in der Physik, die über einen riesigen Wertebereich schwankt (mehr als 20 Größenordnungen)

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad [\rho] = \Omega\,\mathrm{m}$$

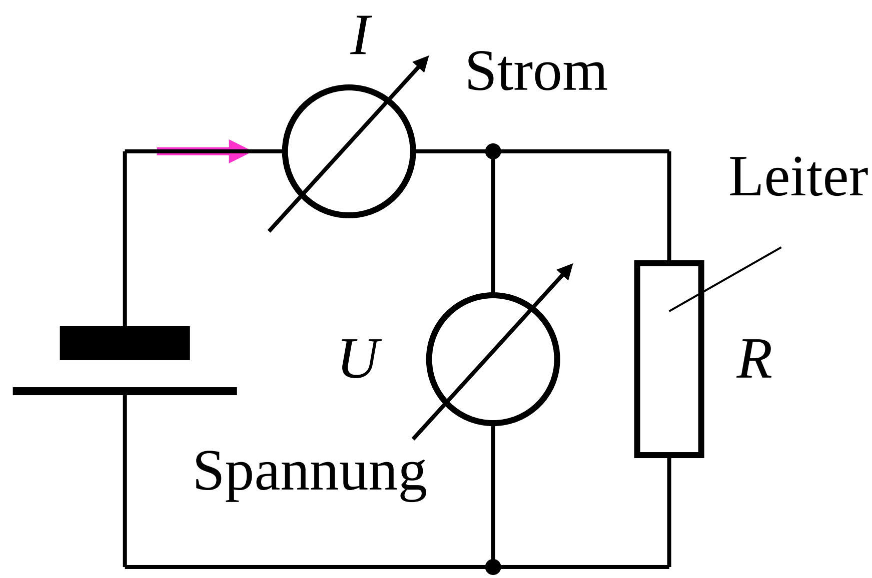
Material	spezifischer Widerstand ϱ bei 20 °C/$\Omega \cdot$ m
Silber	$1{,}6 \cdot 10^{-8}$
Kupfer	$1{,}7 \cdot 10^{-8}$
Aluminium	$2{,}8 \cdot 10^{-8}$
Wolfram	$5{,}5 \cdot 10^{-8}$
Eisen	$10 \cdot 10^{-8}$
Blei	$22 \cdot 10^{-8}$
Quecksilber	$96 \cdot 10^{-8}$
Chrom-Nickel-Stahl	$100 \cdot 10^{-8}$
Kohlenstoff	$3500 \cdot 10^{-8}$
Germanium	0,45
Silicium	640
Holz	$10^{8} \ldots 10^{14}$
Glas	$10^{10} \ldots 10^{14}$
Hartgummi	$10^{13} \ldots 10^{16}$
Bernstein	$5 \cdot 10^{14}$
Schwefel	$1 \cdot 10^{15}$

Bei bestimmten Leitern ist der Widerstand praktisch konstant. Dann gilt das ***„Ohmsche Gesetz"***

$$U = R \cdot I \quad (R = \text{const.})$$



Genereller Aufbau eines Stromkreises

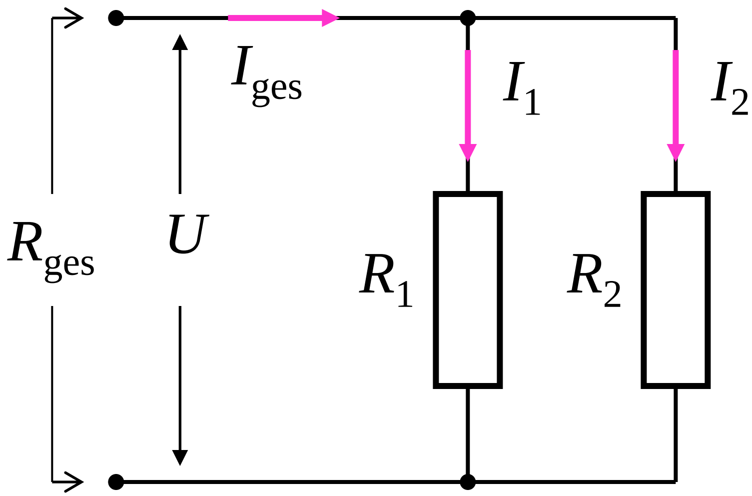


Widerstand wird durch Messung von Spannung *U* und Strom *I* ermittelt.

Bei der Strommessung liegt das Messgerät in der Leitung („Durchflussmessung"), bei Spannungsmessung zwischen den Kontakten.

Parallel- und Serienschaltung von Widerständen

- *Parallelschaltung*



Die Teilströme durch die Widerstände sind gegeben durch

$$I_1 = \frac{U}{R_1} \quad \text{und} \quad I_2 = \frac{U}{R_2}$$

Für den Gesamtstrom gilt dann

$$I_{ges} = I_1 + I_2 = U\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$$

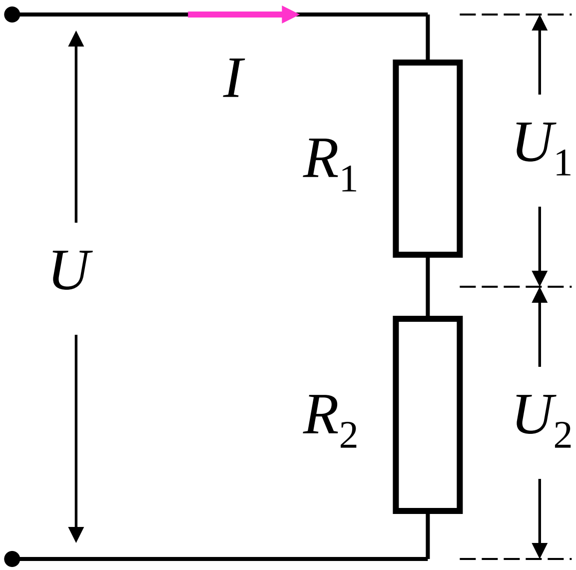
und für den Gesamtwiderstand

$$R_{ges} = \frac{U}{I_{ges}} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

oder allgemein für eine beliebige Anzahl n parallel geschalteter Widerstände

$$R_{ges}^{(P)} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i}}$$

• *Serien- oder Reihenschaltung*



Für die Gesamtspannung folgt

$$U = U_1 + U_2$$

Außerdem gilt

$$U_1 = R_1 I \quad \text{und} \quad U_2 = R_2 I$$

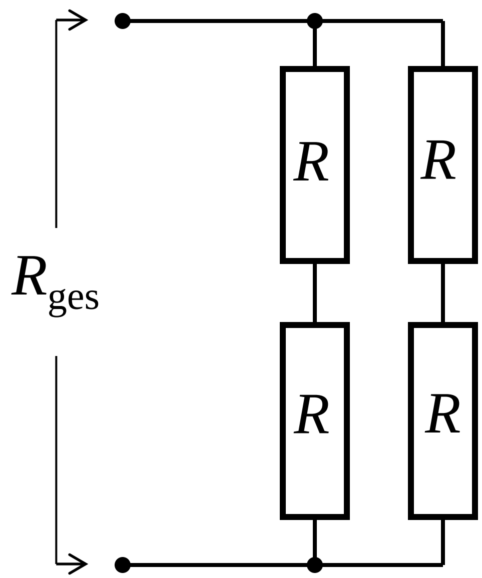
$$\Rightarrow U = I\left(R_1 + R_2\right) = I\, R_{\text{ges}}$$

Daraus folgt sofort

$$R_{\text{ges}} = R_1 + R_2$$

und für n Widerstände in Serie

$$R_{\text{ges}}^{(\text{S})} = \sum_{i=1}^{n} R_{\text{i}}$$



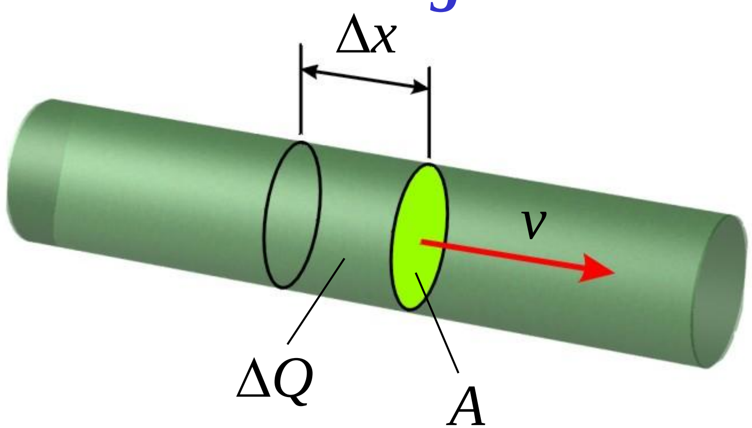
Beispiel:

$$R_{\text{ges}} = ?$$

Lösung:

$$R_{\text{ges}} = \frac{(2R)(2R)}{(2R)+(2R)} = \frac{4R^2}{4R} = R$$

Elektrische Leistung



Die Geschwindigkeit der Ladungen im Leiter ist (s.o)

$$v = \frac{I}{\rho A} = \text{const.}$$

Die Kraft auf die Ladung ist

$$F = \Delta Q \cdot E = \Delta Q \frac{U}{\Delta x}$$

Die geleistete Arbeit ist dann

$$\Delta W = F \quad \Delta x = \Delta Q \cdot U = \rho \cdot A \Delta x \cdot U$$

Die Laufzeit ist

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{v} = \frac{\rho A}{I} \Delta x$$

Damit folgt die Leistung zu

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{\rho A \Delta x}{\rho A \Delta x} I \cdot U = I \cdot U$$

Am Widerstand R liegt die Spannung U an, also wird

$$\boxed{P = I \cdot U = I^2 R = \frac{U^2}{R}}$$

Einheit P: *1 VA = 1 W (Watt)= 1 J/s*

Die geleistete Arbeit ist

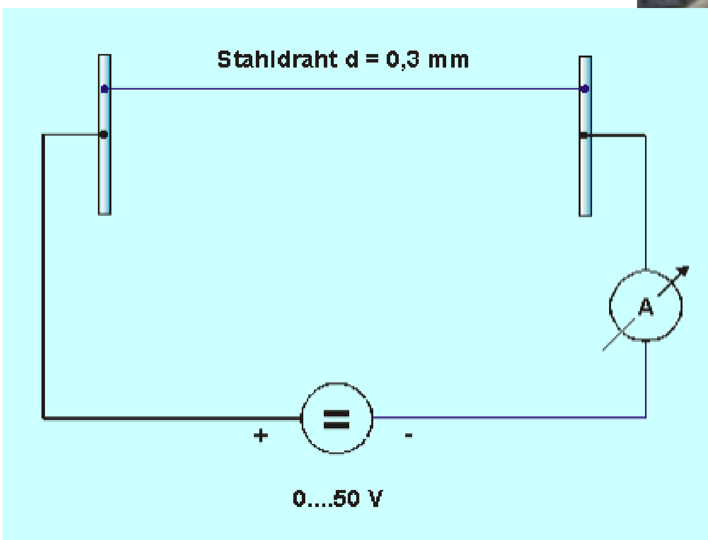
$$W = \int_0^t P d\tau = P \cdot t$$

mit der Einheit Wattsekunde = *Ws*

oder Kilowattstunde = *kWh*

Experiment:

Joule´sche Wärme
Ohmsche Verluste im Leiter



I/A	U/V	Beobachtung
2,75	30	Rotglut
4	46	Draht brennt durch

83 W
184 W

Umwandlung von elektrischer Energie in Wärmeenergie

elektrische Verlustleistung

$$P = U \cdot I = \frac{U^2}{R} = R \cdot I^2$$

Inhalt der Vorlesung Physik A2 / B2

3. Wärmelehre

Druck und Temperatur: Das ideale Gas

Wärmemenge, spezifische Wärme

Die Hauptsätze der Wärmelehre

4. Elektrizitätslehre, Elektrodynamik

Die Ladung und elektrostatische Felder

- SEMESTERENDE -

Elektrischer Strom

Magnetische Felder und Magnetostatik

Zeitlich veränderliche Felder, Elektrodynamik

Wechselstromnetzwerke

Die Maxwellschen Gleichungen

Elektromagnetische Wellen und Strahlung

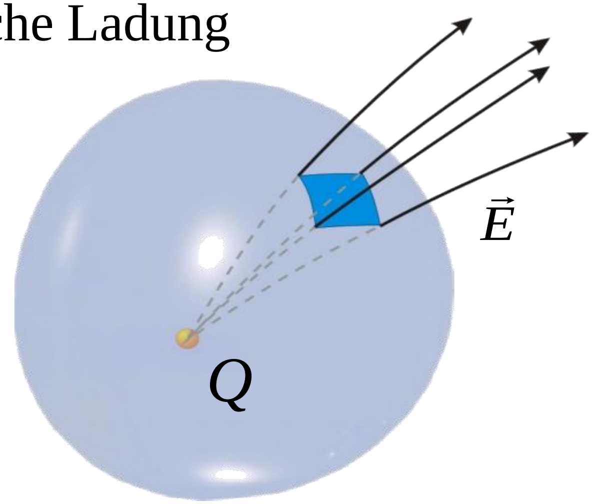
Relativität der Felder – Relativitätstheorie

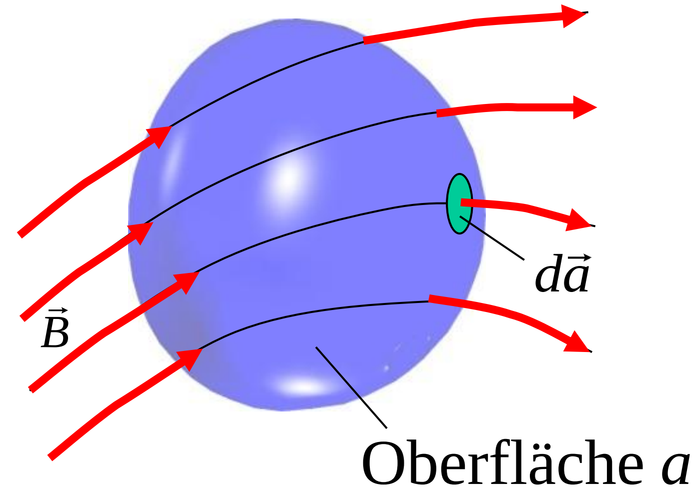
Magnetische Felder / Magnetostatik

Seit über 2000 Jahren bekannt: Eisenhaltige Materialien ziehen sich an bzw. es findet eine Kraftwirkung statt (Magnetit).

Vorstellung wie in der Elektrostatik:
Kraftfeld wird durch Magnetfeld B vermittelt.

Problem I: Das Gegenstück zur isolierten elektrischen Probeladung Q, etwa eine magnetische Ladung existiert nicht.





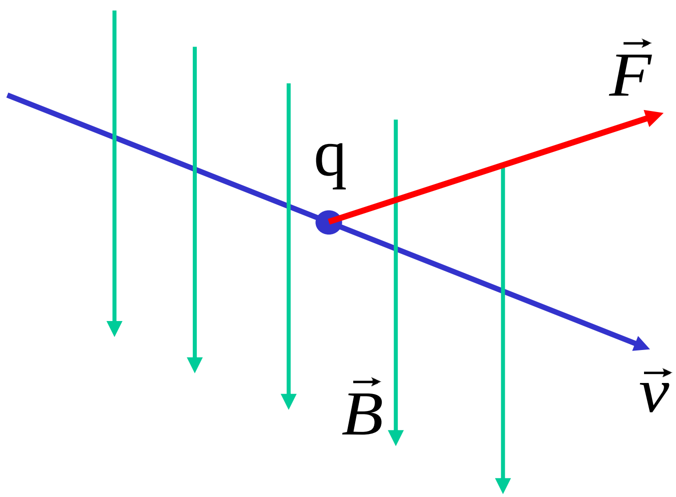
Magnetfelder B haben keine Quellen, sind daher ringförmig geschlossen, damit nicht wirbelfrei.
Was erzeugt also B ????

und **Problem II**

Wie wirken magnetische Kräfte, die das Magnetfeld B als Ursache haben ???

Auf bewegte Ladungen wirkt die Lorentzkraft

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$



Wie kann nun B bestimmt und gemessen werden ?

Lösung I: Wählen bewegte elektrische Probeladung q als Probekörper und messen Lorentzkraft. Wenig praktikabel.

Lösung II: Wählen magnetischen Dipol (etwa Kompassnadel oder Eisenspäne) als Probekörper. Damit gelingt Visualisierung des B-Feldes in Analogie zur Elektrostatik !
Erste Untersuchungen durch Oerstedt.

Kompassnadeln oder magnetisierte Eisenspäne (magnetische Dipole) richten sich entlang der B-Feldlinien aus.

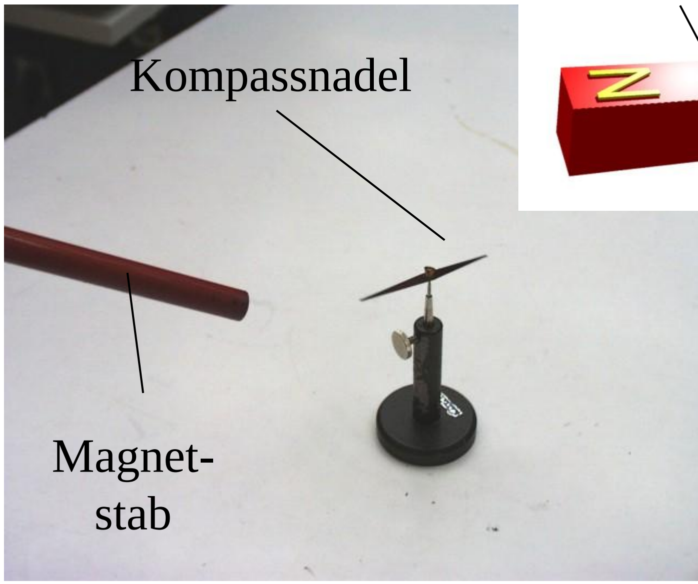
Erzeugung von Magnetfeldern durch

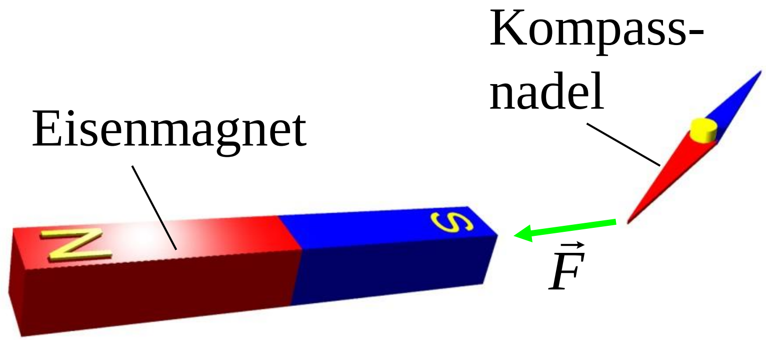
- **magnetisierte Materie**

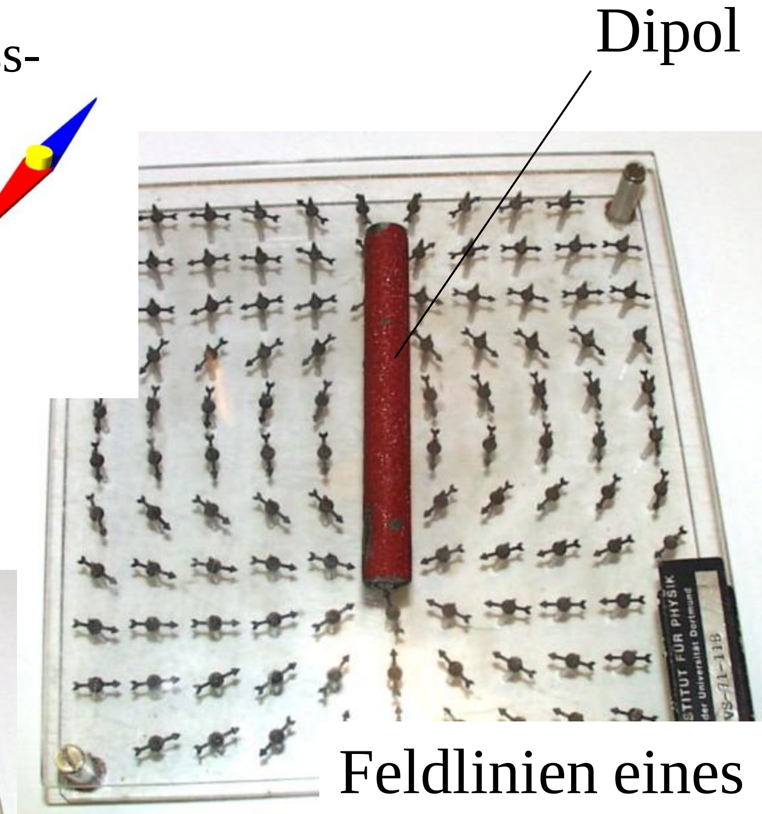
  (diese Magnetisierung kann durch mikroskopische Stromverteilungen erklärt werden)

- **makroskopische elektrische Ströme**

- **Magnetfelder magnetisierter Materie**

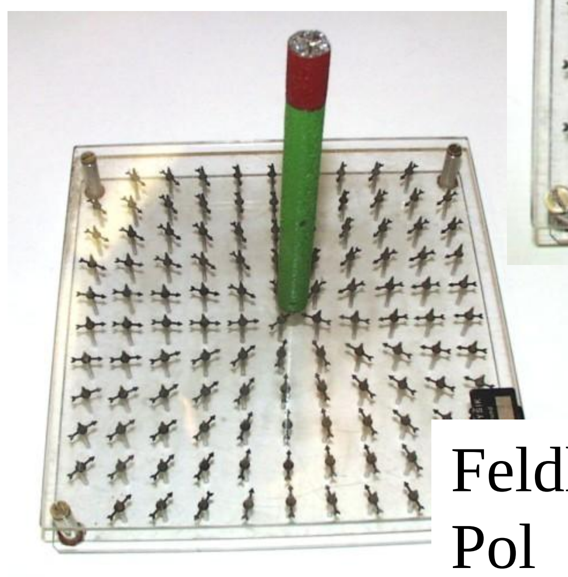






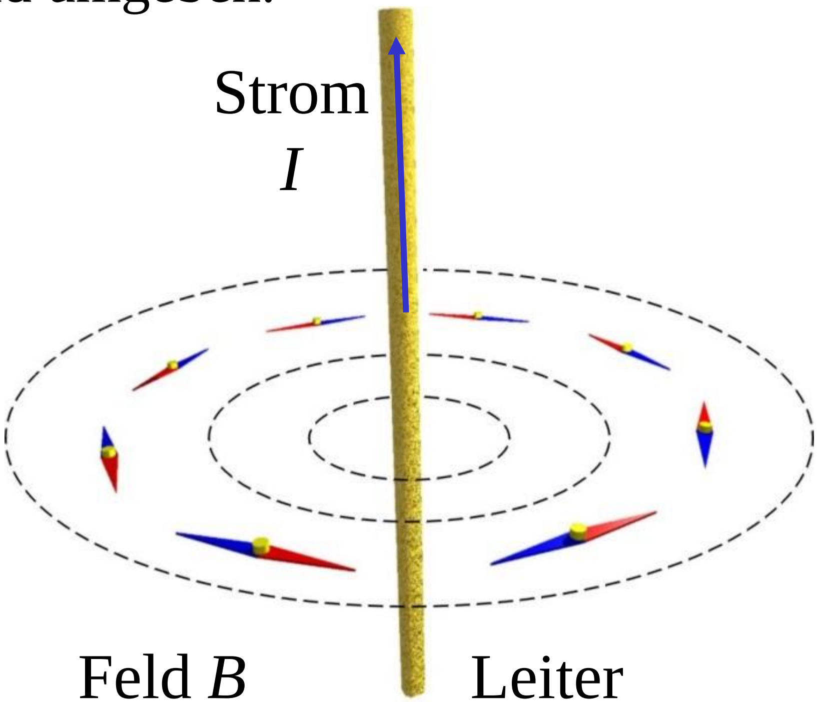
Feldlinien eines magnetischen Dipols

Zwischen Kompassnadel und Magnetstab wirkt eine Kraft. Das ist ein Nachweis des magne-tischen Kraftfeldes

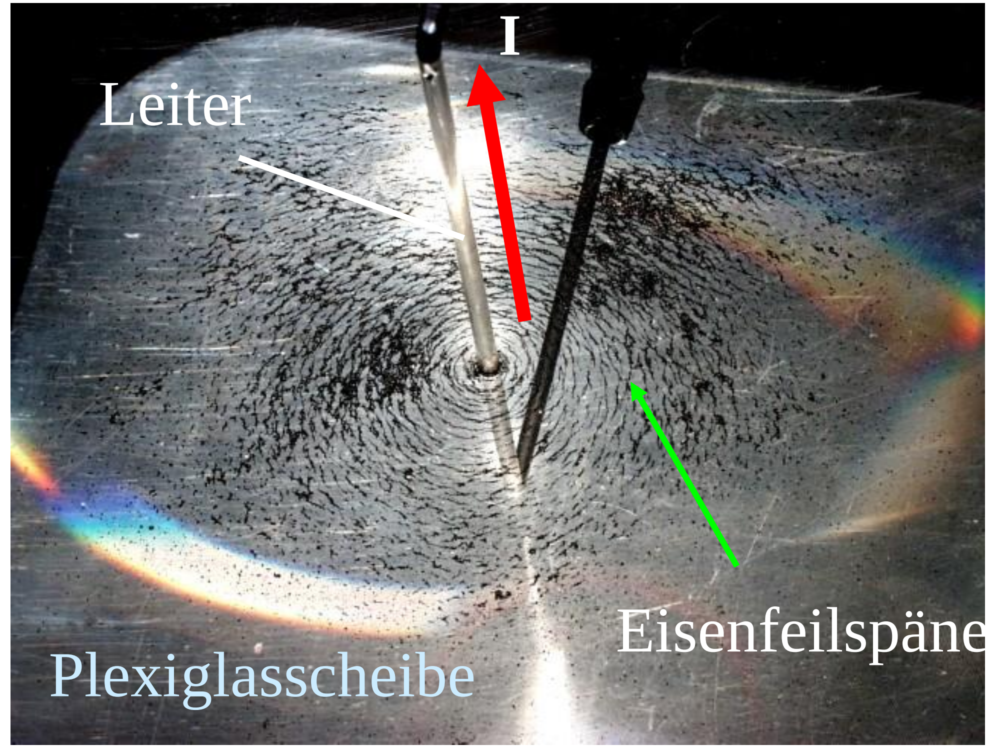


Feldlinien an einem Pol

Ein stromdurchflossener Leiter ist von einem kreisförmigen Magnetfeld umgeben.



Es gibt <u>geschlossene</u> Feldlinien, die man z.B. durch Kompassnadeln anzeigen kann.



<u>Experiment:</u>
Feldlinien eines stromdurchflossenen Leiters