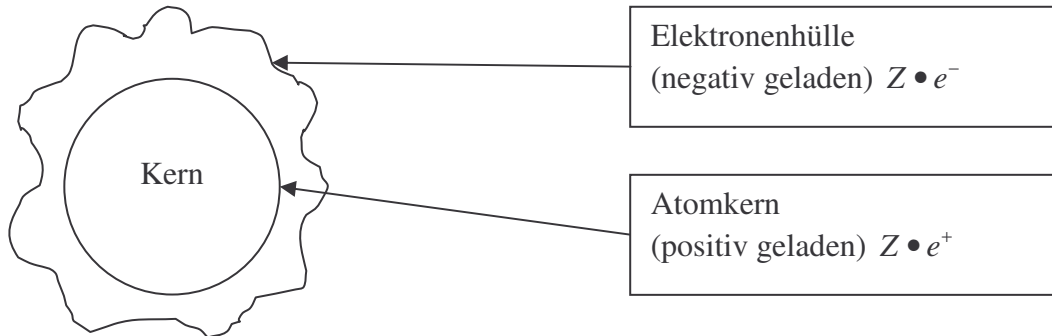


Physik ist eine Naturwissenschaft, die Erkenntnisse durch gezielte Beobachtungen erlangt

Einleitung

Herkunft von Ladungen: Atome

Rutherford (ende 19. Jahrhundert): Streuexperimente



Eine Physikalische Größe besteht aus „Wert“ und „[Einheit]“.

Einheit der Ladung $[Q] = 1 \text{ Coulomb} = 1\text{C} = 1\text{As}$ (Amperé-Sekunde)

Klassische Probleme:

Atome kann es nicht geben: Quantenmechanik à Quantendynamik

Atomkerne kann es nicht geben: Quantenmechanik à Quantenchromodynamik à Quarks

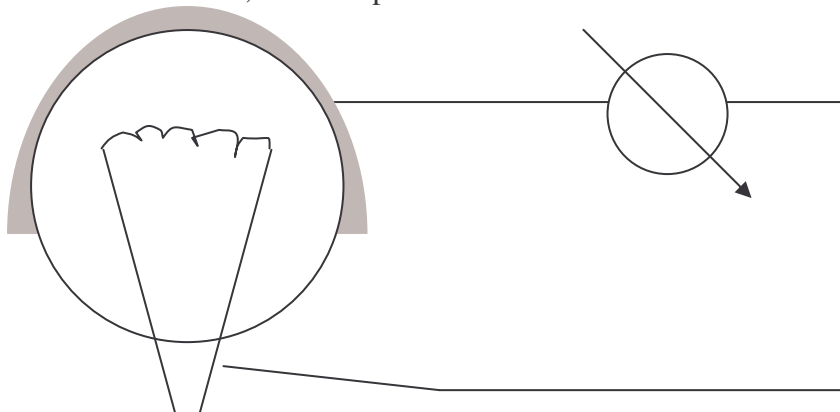
Existenz der Atome ist gesichert durch neue Theorie = Quantenmechanik.

Wechselwirkung der Elektronenhülle = Quantenelektrodynamik (z.B.: elektrische Effekte)

Existenz der Atomkerne = Quantenchromodynamik (Kernkräfte erklären; Ergebnisse der Teilchenbeschleuniger. Kernbestandteile (engl. Quarks)
Wechselwirkung der Quarks über Energiequanten (Gluonen)

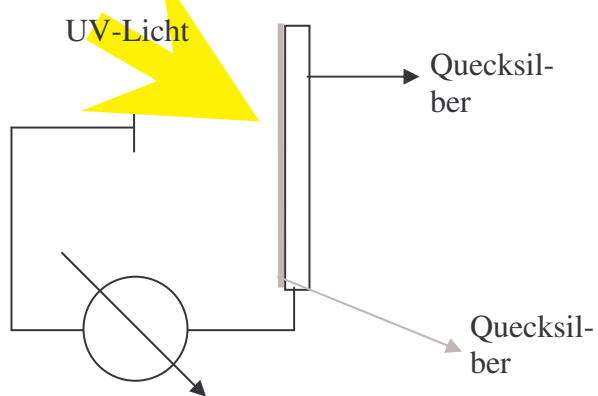
Versuche zur Ladungstrennung:

1. Reibungselektrizität: Katzenfell und Gummistab, Gewitter, Wasserfall, magnetische Glühlampe
2. Magnetfeld: EnBW
3. Glühemission: TV, Glühlampe



4. Innerer Fotoeffekt (Solarzelle), Halbleitereffekt

5. Äußerer Fotoeffekt



Effekt durch Einstein mit Quanten erklärt. Lichtquanten = Photonen

6. Elektrisches Feld (Feldelektronenmikroskop)

Änderung der Ladung pro Zeit:

$Q_{ges} = \text{konstant}$

$$\frac{d Q_{ges}}{d t} = 0 = \text{Knotensatz (erste Kirchhoffsche Regel)}$$

$$\sum_{i=1}^5 I_i = 0 = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5$$

$$I_{ges} = I_1 + I_2 + I_3 - I_4 - I_5 = 0$$

Elektrostatik

$$F = \frac{Q_{ges}}{r^2} \cdot \text{konstante} \rightarrow 1N = \frac{C \cdot C}{m^2} \cdot \text{konstante} \Rightarrow \text{konstante} = \left[\frac{1N \cdot m^2}{C^2} \right]$$

$$\Rightarrow \text{konstante} \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 (\leftarrow \text{Feldkonstante})} \cdot \left[\frac{1N \cdot m^2}{C^2} \right] (\leftarrow \text{Einheit})$$

$$\Rightarrow \text{Elektrische Feldkonstante} \rightarrow \left[\frac{C^2}{Nm^2} \right] \text{experimentell gefunden}$$

Kraft:

$\vec{F}$ ist ein Vektor

$$|\vec{r}_0| = 1$$

Betrag $|\vec{F}|$ wird durch Richtungsvektor $\vec{r}_0$ be-

$$[\vec{r}_0] = -1$$

stimmt.

Elektrisches Feld

Definition: $\vec{E}$ = Feldstärke

$$\vec{E} = \frac{F}{q}, \quad [\vec{E}] = 1 \frac{N}{C}$$

Definitionen sind Messvorschriften.

Beispiel: Elektrisches Feld einer Kugel Q

$$E = \frac{F}{q} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon} \cdot \frac{Q}{r^2}$$

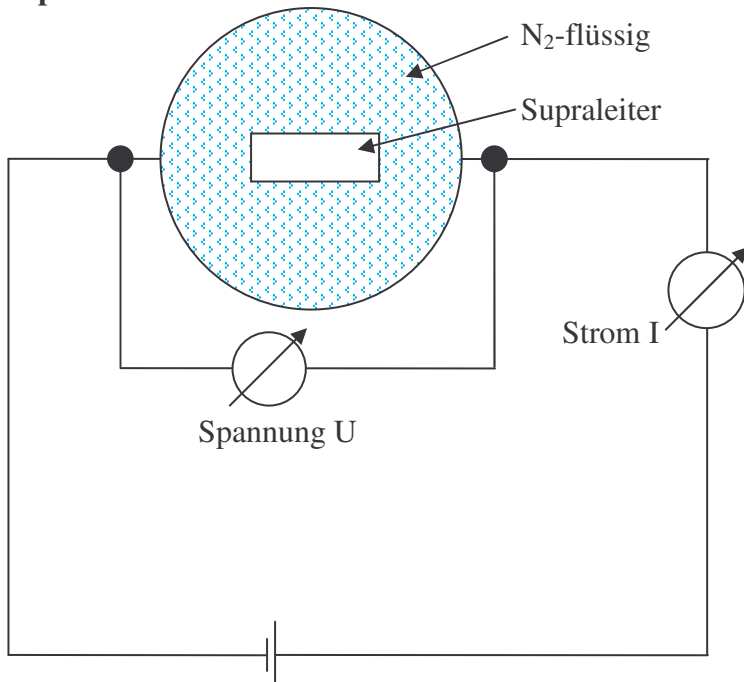
Richtung der Feldlinien = Richtung der Kraft auf eine positive Ladung. Die Größe der Kraft ist proportional der Dichte der Feldlinien.

Dichte der Feldlinien = Anzahl der Feldlinien, die durch die Oberfläche Δa gehen.

Kugeloberfläche = $Q = A = 4\pi \cdot r^2$

Die Dichte der Feldlinien = $\frac{\text{Linienanzahl } n}{4\pi \cdot r^2}$ ist proportional zu $|\vec{E}|$

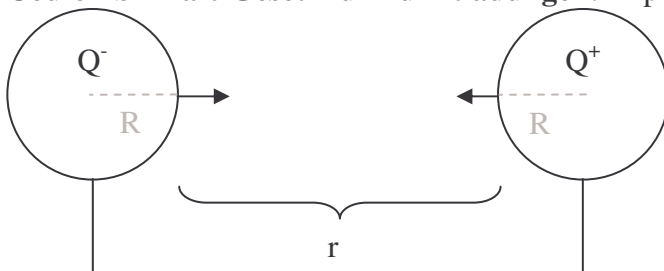
Supraleiter:



$$U = R \cdot I$$

Der Widerstand R wird 0 für Temperaturen unter der Sprungtemperatur.
Siedepunkt von N_2 -flüssig = -190°C

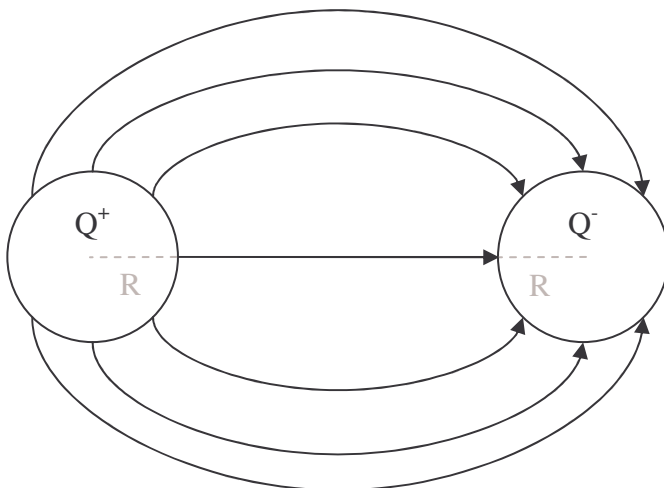
Coulomb-Kraft-Gesetz für Punktladungen: Experiment mit Kugelladungen:



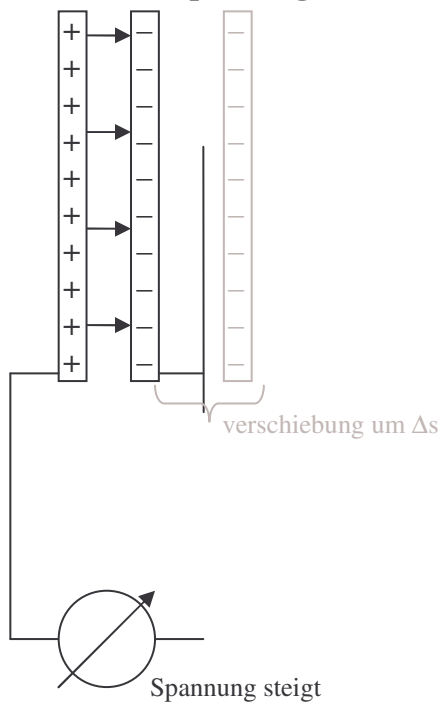
Kugelladungen gehen über auf Punktladungen, wenn $R1 \cdot R2 \ll r$.

Elektrische Feldlinien beginnen auf $Q+$ und enden auf $Q-$.

Feldstärkeinheit: N/C



Elektrische Spannung:



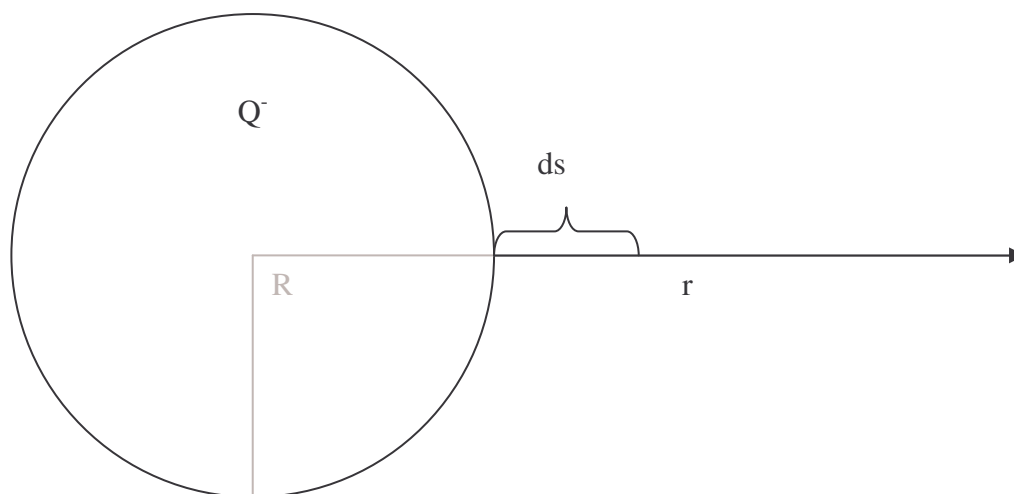
Aufgeladene Plattenkondensatoren

$\Rightarrow \vec{E} = \overrightarrow{\text{Konstant}} = \text{homogenes Feld}$

$$U_{1+2} = \frac{w_{1+2}}{q} = \text{Definition}$$

$$U_{1+2} = \frac{w_{1+2}}{q} = E \cdot S \mid E = \text{konstant}$$

Spannung im elektrischen Feld einer Kugelladung:



$$U_{1+2} = \frac{w_{1+2}}{q} = \frac{F(r) \cdot ?}{q}$$

$$dw = F(r) \cdot ds \Rightarrow W_{1+2} = \sum_i F(r) \cdot ds \Rightarrow$$

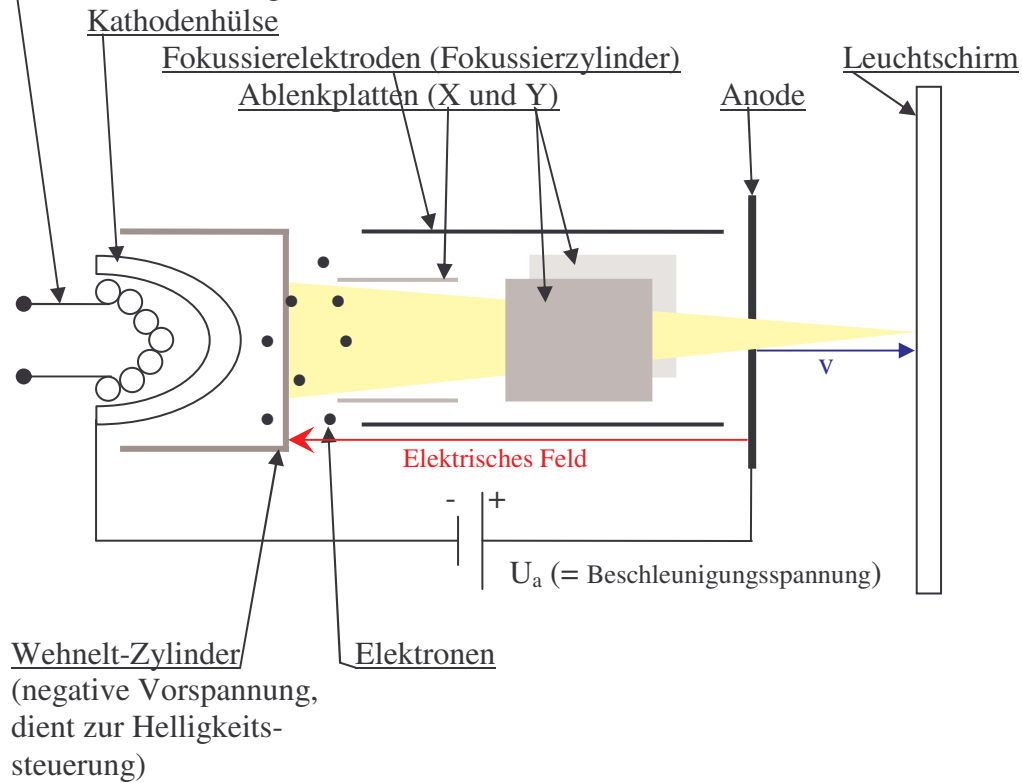
$$U_{1+2} = \frac{\sum_i F(ri) \cdot ds}{q} \Rightarrow U_{1+2} = \sum_i E(ri) \cdot ds$$

$$\Rightarrow \int_1^2 E(r) \cdot dr \Rightarrow U_{1+2} = \frac{1 \cdot Q}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \int_R^r \frac{d1}{r^2} = \frac{Q}{4\pi \cdot \epsilon_0}$$

Oszilloskop

Eine Elektronenkanone erzeugt freie Elektronen über Glühemission und beschleunigt diese in der Kathode-Anode-Strecke.

Glühdraht (wird aufgeheizt → erhitzt Kathode → es entstehen freie Elektronen)



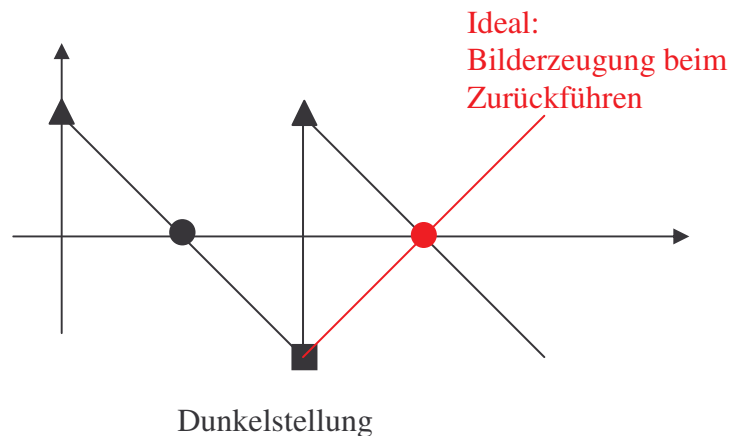
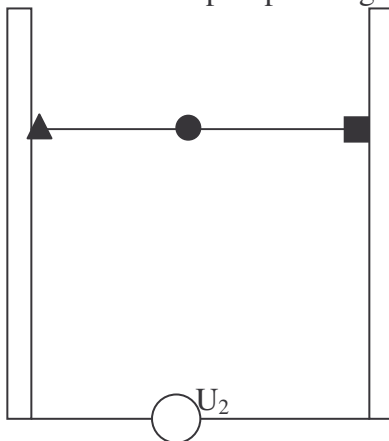
$$w(\text{freiwerdende Arbeit}) = e \cdot U_a$$

$$E_{\text{kinetisch}} (= \text{Bewegungsenergie} = e) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_a^2 \rightarrow v_a = \sqrt{\frac{2 \cdot U_a}{m}}$$

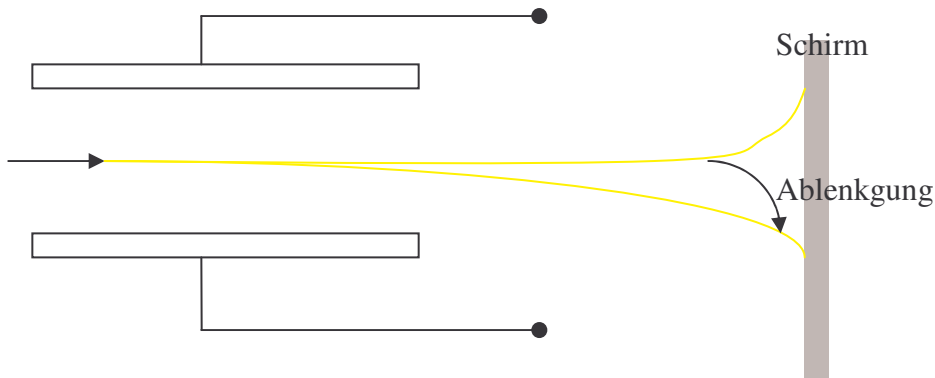
Bei TV ist U_a rd. 25 KV (Kilovolt)

Ablenkplatten:

X-Platten: Rampenspannung

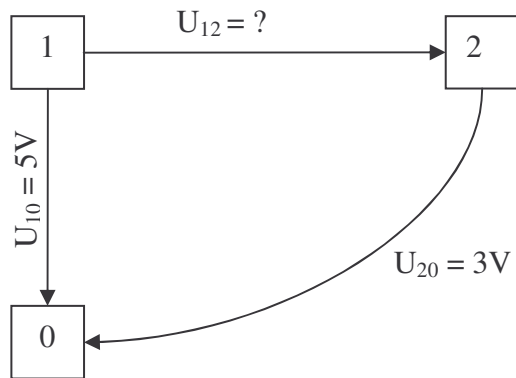


Y-Platten:



Potential

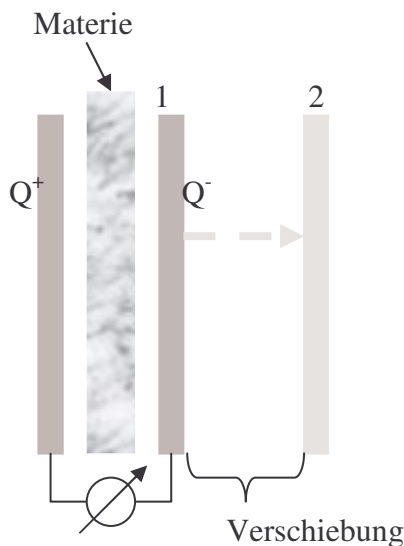
Spannungen in einer Schaltung werden auf einen gemeinsamen Bezugspunkt (Masse, Erde) bezogen.



$U_{12} = U_{10} - U_{20} = 5V - 3V = 2V \Rightarrow \Sigma$ aller Spannungen in einem geschlossenem Weg = 0
= Energieerhaltungssatz = Maschenregel = 2. Kirchhoffsches Gesetz

2. Kirchhoffsches Gesetz

In einer Masche ist die Summe der Spannungen gleich 0. Versuch:



ϵ_r = relative Dielektrizitätskonstante der Materie = Materialkonstante $\epsilon_r > 1$



$U_{12} = E_{\parallel} \cdot d_{12}$; $E_{\parallel}$ = Elektrisches Feld

Grund: Polarisation der Materie

- a) neutrale Atome im elektrischem Feld:
ohne Feld: Ladungsschwerpunkte fallen zusammen
mit Feld: Ladungsschwerpunkte werden auseinandergezogen

Polarisation (= E_{gegen})

$$\vec{E}_{\text{mit}} = \vec{E}_0 + \vec{E}_{\text{gegen}}$$

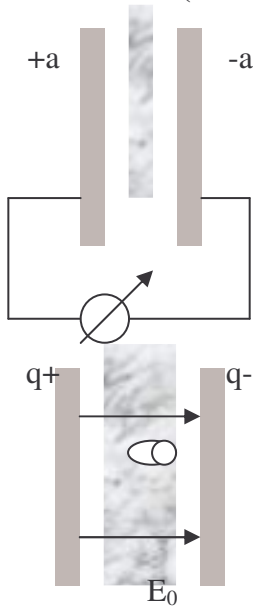
- a) Auseinanderziehen: Spannung steigt
- b) Materie zwischen die Platten schieben: U_{12} fällt

$$E \text{ mit Materie} = \frac{E \text{ ohne Materie}}{\epsilon_r} = \frac{E}{\epsilon_r} = E_m$$

wird kleiner

Materie im el. Feld

Polarisation (Ladungsverschiebung):



Spannung fällt mit Materie

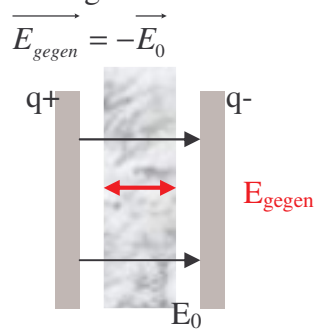
$\epsilon_n = \frac{E_0(\text{ohne Materie})}{E_r}$, E_r = Dielektrizitätskonstante $E_r > 1$ (Materialabhängig)

$$\vec{E}_{mit} = \vec{E}_0 + \vec{E}_{gegen} \quad (\text{Vektorform})$$

$$E_m = E_0 - E_{gegen} \quad (\text{Betragsform})$$

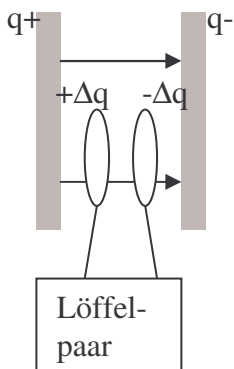
Metalle im el. Feld (Influenz)

Metalle verfügen über frei bewegliche Elektronen. Die Elektronen werden von den Plus-Atomrümpfen dabei getrennt → es bildet sich ein Gegenfeld aus, bis die Kraft auf die Elektronen = 0 wird ⇔



$$\vec{E}_0 + \vec{E}_{gegen} = 0 = \vec{E}_{gesamt}$$

$$\Rightarrow \vec{F}_{elktrisch} = g \cdot \vec{E}_{ges} = 0; g = \text{Ladung}$$



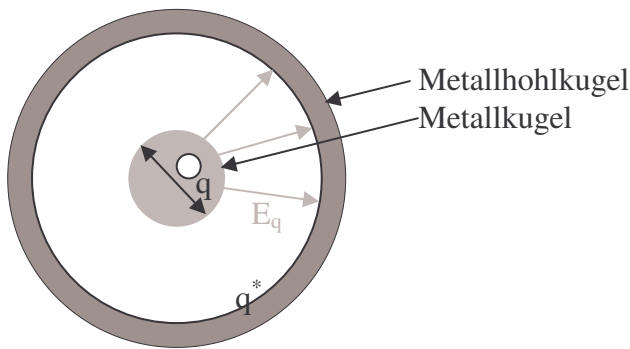
Die getrennte Ladung hängt von der Fläche ab, d.h. doppelte Fläche → doppelte Ladung.

Definition Flächenladungsdichte τ

$$\sigma = \frac{\Delta q}{\Delta A}; [\sigma] \text{ Einheit von Sigma in } 1 \frac{\text{C}}{\text{m}^2}$$

$$\rightarrow \sigma \sim E_0$$

$$\sigma(\text{Sigma}) = E_0 \cdot \text{Konstante}$$



$$E_{\text{gegen}} = -\vec{E}_q(r) \Rightarrow -\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} = E_q \cdot r$$

$$\sigma = \frac{q^*}{A_{\text{Kugel}}} = \frac{q^*}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = \text{Konstante} =$$

$$\frac{q}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{1}{\epsilon_0} \Rightarrow \text{Konstante} = \epsilon_0; q^* = q$$

$$\text{Sigma } \sigma = \epsilon_0 \cdot E_0 \text{ im Vakuum}$$

Definition:

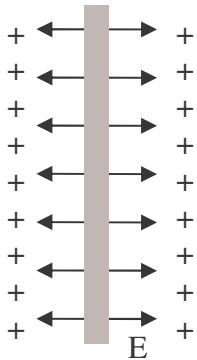
$$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \vec{E}_0 = \text{Elektrische Verschiebungsdichte}$$

$$|\vec{D}| = \sigma, \text{ Richtung von } \vec{D}$$

$$[D] = [\sigma] \cdot 1 \frac{C}{m^2}$$

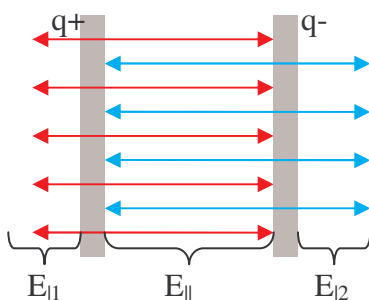
Anwendung: Berechnung elektrischer Felder

Elektrisches Feld einer ausgedehnten Platte, aufgeladen mit q = Gleichverteilung



$$E_0 = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q}{2 \cdot A \cdot \epsilon_0}$$

$E_{||}$ = Elektrisches Feld eines Plattenkondensators mit zwei Platten



$$E_{||} = E_{l1} + E_{l2}$$

$$E_{||} = 2 \cdot E_1 = \frac{2 \cdot Q}{2 \cdot A \cdot \epsilon_0}$$

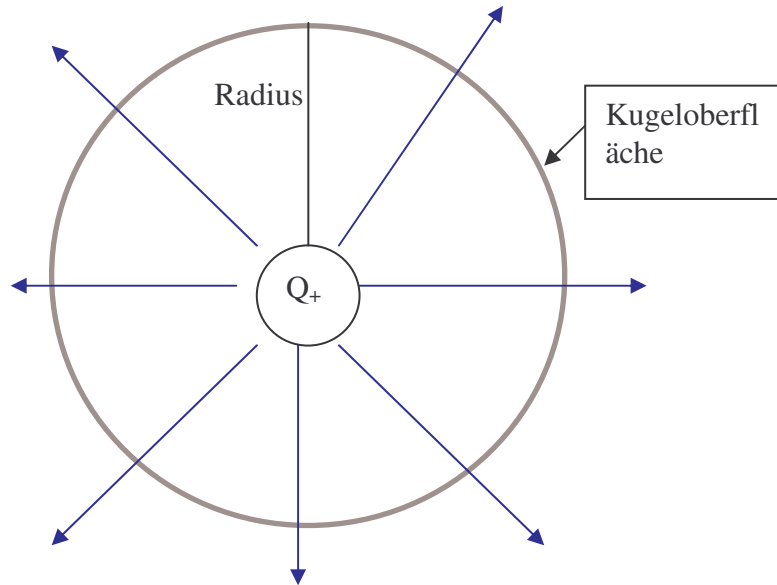
$$\frac{Q}{A} = E_{||} \cdot \epsilon_0 = \sigma (\text{Sigma})$$

Ladung sitzt innen

Gaußsches Gesetz

Oberflächenladungsdichte: $\sigma = \epsilon_0 \cdot E$ (im Vakuum)

Elektrische Verschiebungsdichte: $\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \vec{E}$ (im Vakuum)

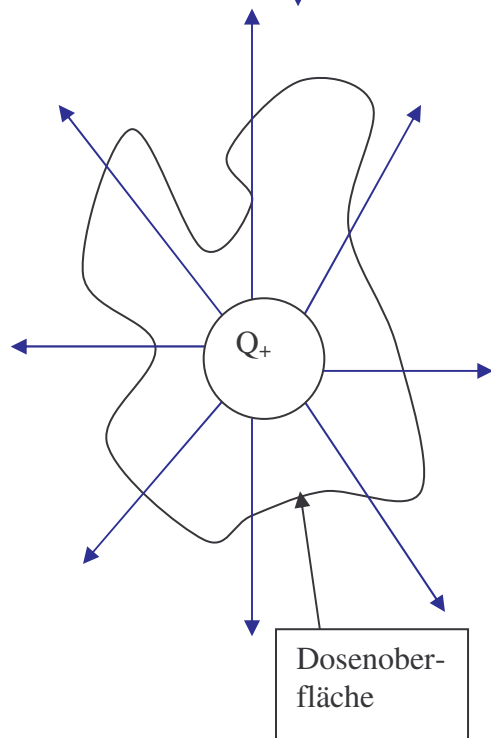


$E_{(R)}$ = elektr. Feldstärke auf der Oberfläche der Kugel

$$E_{(R)} = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{Q}{R^2}$$

$$D_{(R)} = \epsilon_0 \cdot E = \frac{Q}{4\pi \cdot R^2}$$

$$D_{(R)} \cdot \underbrace{4\pi \cdot R^2}_{\text{Kugeloberfläche}} = Q_{\text{eingeschlossen}}$$



$$\vec{D} \cdot \vec{dA}_i = Q_{\text{geschlossen}}$$

el. Flussdichte

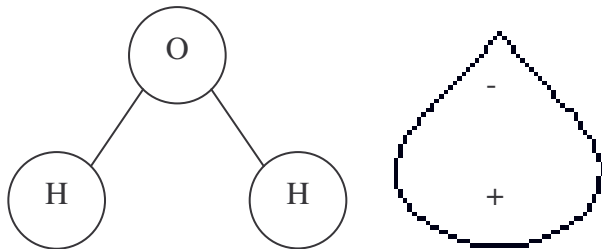
Einfach $\vec{D} = \text{konstant}$

$$D \cdot \sum_i dA_i = D \cdot A = Q_D$$

$$\vec{D} \cdot \vec{dA} = D \perp \cdot dA$$

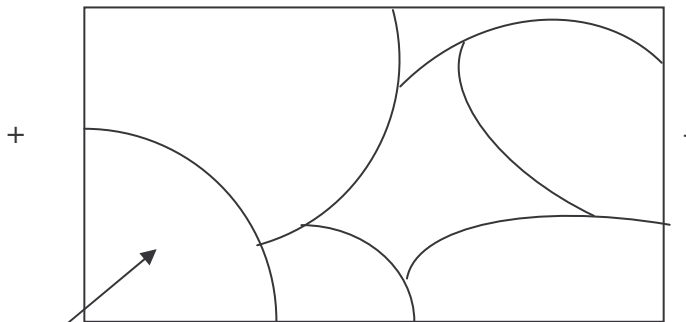
Nichtleiter im el. Feld

1. Nicht-polare Stoffe, dielektrika $\epsilon_0 < 10$
z.B.: Isolatoren, neutrale Gase, Trafo-Öle (Öle zur Isolation)
Glas hat einen $\epsilon_0 \approx 5$ (atomare/molekulare Verschiebungspolarisation (VP))
2. Polare Stoffe $\epsilon_0 > 10$
Wasser hat einen $\epsilon_0 \approx 81$



Moleküle mit permanenten Di-Polen
VP + Orientierungspolarisation

3. Ferro-Elektrische Stoffe (Festkörper)
z.B.: Bariumtitanat (BaTiO_3) hat einen $\epsilon_0 > 100$



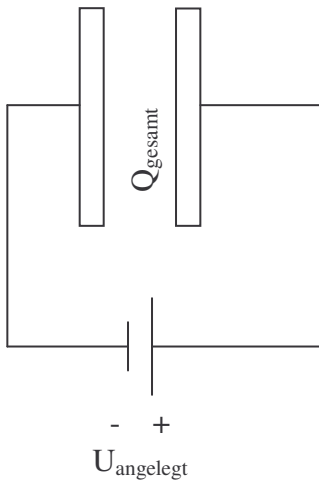
Weiß'sche Bereiche

Spontane Polarisation, d.h. keine Einwirkung von Außen nötig. Sie bleiben immer parallel zueinander in Richtung des Minus-Pols

Kondensator und Kapazität

Definition der Kapazität:

$$C = \frac{Q_{\text{gespeichert}}}{U_{\text{angelegt}}}$$



Einheiten

$$[C] = 1 \frac{C(\text{oulomb})}{V(\text{olt})} = 1F(\text{arad})$$

$$10^{-3} F = 1mF(\text{milifarad})$$

$$10^{-6} F = 1\mu F(\text{mikrofarad})$$

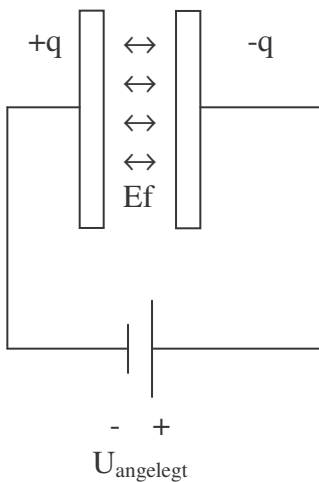
$$10^{-9} = 1nF(\text{nanofarad})$$

$$10^{-12} F = 1pF(\text{pikofarad})$$

$$10^{-15} F = 1fF(\text{fentofarad})$$

$$Q_{\text{gespeichert}} = C \cdot U_{\text{angelegt}}$$

Versuch Ultra-Cap:



$$120F \cdot 2V = 240C$$

$$C_{\parallel} = ? = \frac{Q}{U_{1,2}}$$

$$U_{1,2} = E_{\parallel} \cdot d$$

$$E_{\parallel} = \frac{Q}{A \cdot \epsilon_0}$$

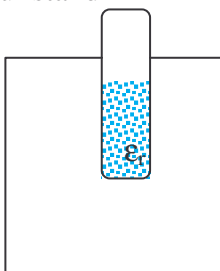
$$C_{\parallel} = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$$

$$C_{\parallel \text{ mit}} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$$

$$E_{\parallel \text{ mit}} = \frac{E_{\parallel 0}}{\epsilon_r}$$

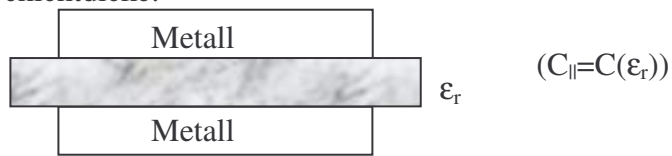
Messtechnische Anwendung von C's

1. Füllstand

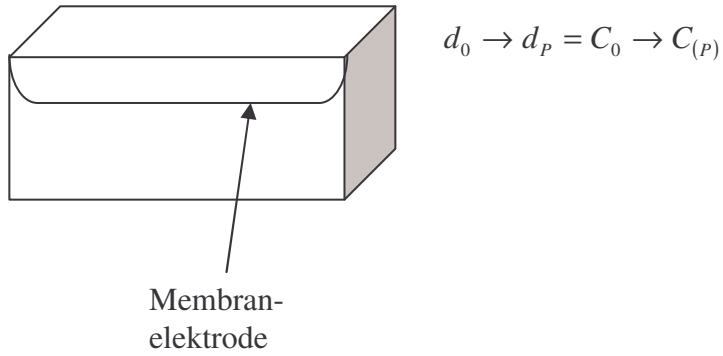


$$C_{\text{ges}} = C_{\text{gefüllt}} + C_{\text{ungefüllt}}$$

2. Schichtdicke:



3. Drucksensor:



Kapazität: $C = \frac{Q_{\text{gespeichert}}}{U_{\text{angelegt}}}$

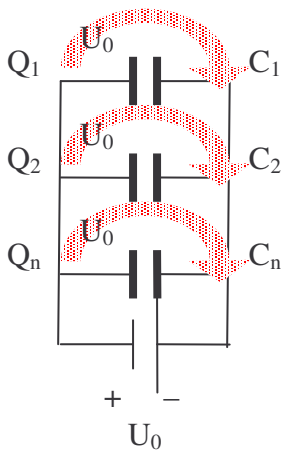
Kapazität eines Parallelplattenkondensators: $C_{\parallel} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$

ϵ_0 = Elektrische Feldkonstante; ϵ_r = Konstante der Isolierschicht;

A = Fläche; d = Kondensatorplattenabstand

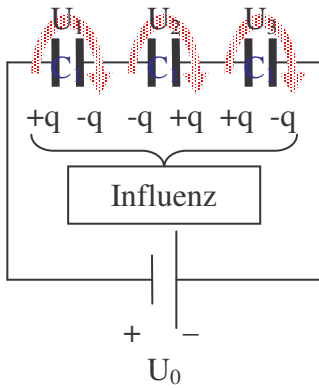
Schaltung für Kondensatoren:

Parallelschaltung:



$$\left. \begin{aligned} Q_{\text{gesamt}} &= \sum_{i=1}^n Q_i \\ Q_i &= C_i \cdot U_0 \end{aligned} \right\} Q_{\text{gesamt}} = U_0 \cdot \sum_{i=1}^n C_i$$

Reihen- oder Serienschaltung:



$$\left. \begin{aligned} U_0 &= \sum_{i=1}^n U_i \\ U_i &= \frac{Q_i}{C_i} = \frac{Q}{C_i} \end{aligned} \right\} U_0 = Q \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$$

$$\frac{Q_{\text{gesamt}}}{C_{\text{gesamt}}} = \frac{Q}{C_{\text{gesamt}}} \Rightarrow \frac{1}{C_{\text{gesamt}}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} \leftarrow \begin{array}{l} \text{Ergebnis umdrehen,} \\ \text{um } C_{\text{gesamt}} \text{ zu bekommen} \end{array}$$

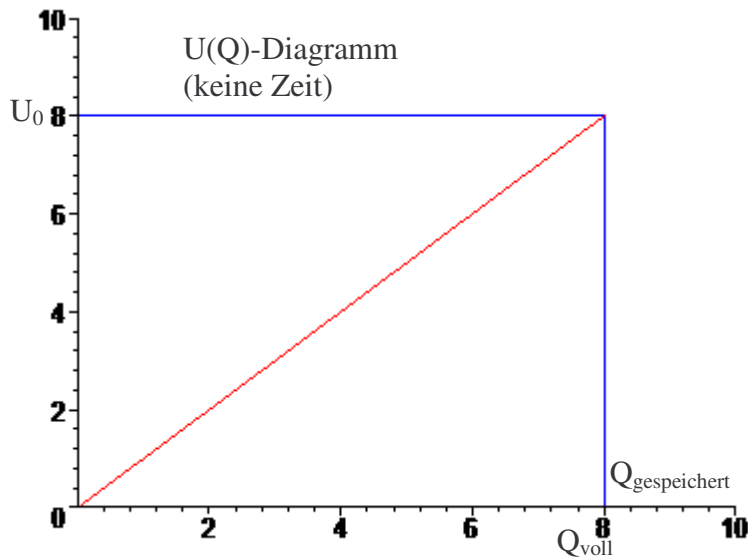
Energie im Kondensator

Versuch: Aufladen und Entladen des Kondensators

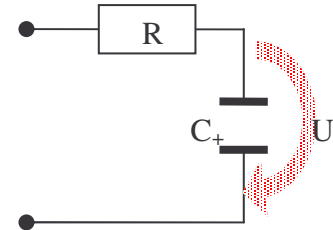
Vorüberlegung: $U_{1/2} = \frac{\text{Trennarbeit}}{\text{Ladung}} = \frac{E_{el}}{Q_{getrennt}} \Rightarrow E_{el} = U_{1/2} \cdot Q_{getrennt}$

Aufladediagramm:

$$U_{\text{Kondensator}} = \frac{Q}{C}$$



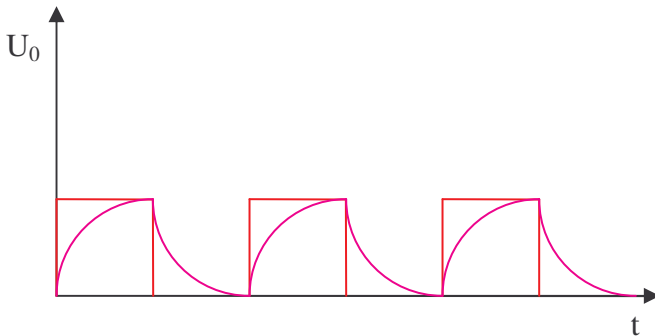
Versuch:



Aufladen eines Kondensators.
Wenn er voll ist, kann $Q_{\text{gespeichert}}$ nicht weiter ansteigen.

Mittlere Spannung:

$$U_{\text{Mittel}} = \frac{U_0}{2} \Rightarrow E_{el} = \frac{U_0}{2} \cdot Q_{\text{getrennt}} = \frac{U_0}{2} \cdot U_0 \cdot C = \frac{1}{2} \cdot U_0^2 \cdot C$$



Stationäre Ströme

Strom = bewegte Ladung

Vor allem Ströme in Metallen: bewegte, freie Elektronen

Stromstärke I

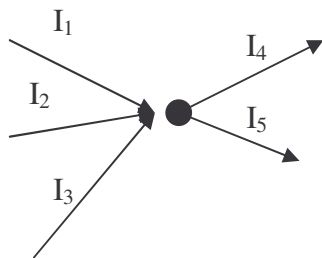
$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \leftarrow \text{Ladungsmenge} = \frac{dQ}{dt} \leftarrow \text{Momentaner Wert} = \text{Messwert des stationären Stroms} \quad [I] = \frac{C}{s} = 1A$$

Ladungserhaltung:

Im abgeschlossenen System ist $Q_{\text{ges}} = \text{konstant}$

$$\Rightarrow \frac{\Delta Q_{\text{ges}}}{\Delta t} = I_{\text{ges}} = 0$$

1. Kirchhoffsche Regel (Knotensatz):



$$I_{\text{ges}} = \sum_{i=1}^n I_i = 0 \quad I_i = \text{Einzelstrom}$$

$$\Rightarrow I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 = 0 \Rightarrow I_1 + I_2 + I_3 = -(I_4 + I_5)$$

$$\Rightarrow \sum \text{der einfließenden Ströme} = \sum \text{der ausgehenden Ströme}$$

Widerstand

Leiter: Material mit frei beweglichen Ladungen (z.B.: Metall: freie Elektronen)

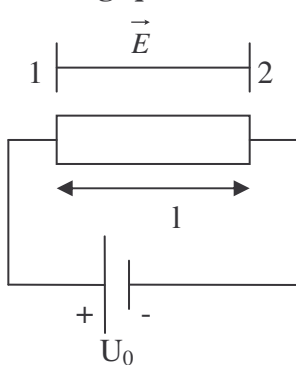
Kraft auf Ladung (um sie zu beschleunigen) = elektrisches Feld

$$\vec{F}_{el} = Q \cdot \vec{E} \Rightarrow \text{je größer } \vec{E}, \text{ umso mehr werden die Ladungen beschleunigt}$$

→ umso größer wird die Geschwindigkeit der Ladungen im Leiter

→ Driftgeschwindigkeit $v_{\text{drift}} = \mu \cdot E$ experimentell linearer Zusammenhang (μ = Konstante; Beweglichkeit der Ladung im betrachteten Material)

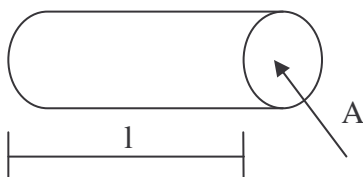
Ladungsquelle: Batterie, Akku, Steckdose (= Spannungsquelle)



Erzeuge Feld $\vec{E}$ homogen im Leiter

$$U_0 = U_{1/2} = E \cdot l \Rightarrow E = \frac{U_0}{l}$$

$$v_{\text{drift}} = \mu \cdot \frac{U_0}{l} \rightarrow [\mu] = \left[\frac{v_{\text{drift}} \cdot l}{U_0} \right] = 1 \frac{m}{s} \cdot \frac{m}{V} = 1 \frac{m^2}{sV}$$



Zusammenhang zwischen v_{drift} und I

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = n \cdot q \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

n = Anzahl der Ladungsträger je m^3

q = Ladung eines Ladungsträgers

$$\Delta v = A \cdot l$$

$$I = n \cdot q \cdot A \cdot v_{\text{drift}} = n \cdot q \cdot A \cdot \mu \cdot \frac{U_0}{l} \Rightarrow I = n \cdot q \cdot \underbrace{\frac{A}{l}}_{\text{Widerstand des Leiters}} \cdot \mu \cdot U_0 = \frac{1}{R} \cdot U_0 \Rightarrow R = \underbrace{\frac{l}{A}}_{\text{Geometrie des Leiters}} \cdot \underbrace{\frac{1}{n \cdot q \cdot \mu}}_{\vartheta \text{ (spezifischer Widerstand)}}$$

Widerstand eines homogenen Leiters:

$$\rightarrow R \cdot \vartheta \cdot \frac{E}{A}$$

Einteilung der Substanzen nach ϑ :

Isolator: $\vartheta > 10^9 \text{ m}\Omega$

Halbleiter

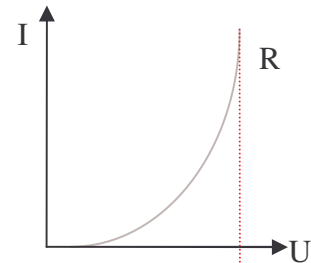
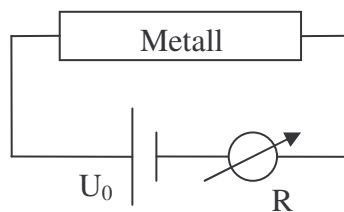
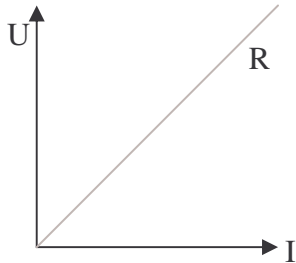
Leiter

Supraleiter

$$U_0 = R \cdot I = \text{Definition von } R$$

Metalle: Ohmsches Gesetz: R ist konstant bei konstanter Temperatur

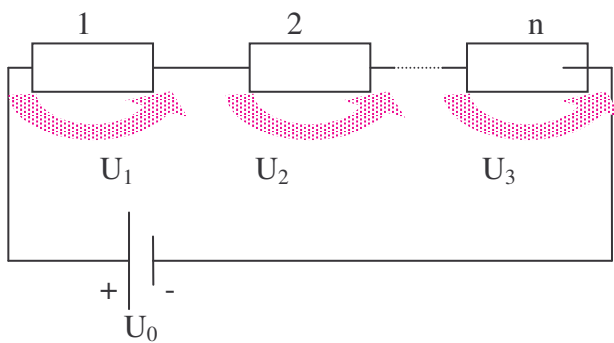
$$U = R \cdot I \Rightarrow \text{Konstante} \cdot I = \text{Konstant}$$



Beim Halbleiter:
 $U_{\text{schwell}} =$
Schwellspannung $\approx$
0,7 V

Schaltung von Widerständen

Serien- oder Reihenschaltung:



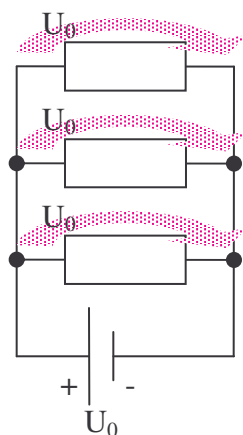
$$U_0 = U_{\text{ges}} = \sum_{i=1}^n U_i \equiv I \cdot \sum_{i=1}^n R_i = I \cdot R_{\text{ges}}$$

Versuch:

$$\left. \begin{array}{l} R_1 = 98,5 \Omega \\ R_2 = 101,4 \Omega \end{array} \right\} \text{ergibt } 199,9 \Omega \text{ theoretisch}$$

Messwert: 199,4 Ω

Parallelschaltung:



$$I_i = \frac{U_0}{R_i}$$

$$I_{\text{ges}} = \sum_{i=1}^n I_i = U_0 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$$

$$I_{\text{ges}} = \frac{U_0}{R_{\text{ges}}} \rightarrow \frac{1}{R_{\text{ges}}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$$

Metall: $R_{(T)}$ steigt mit Temperatur

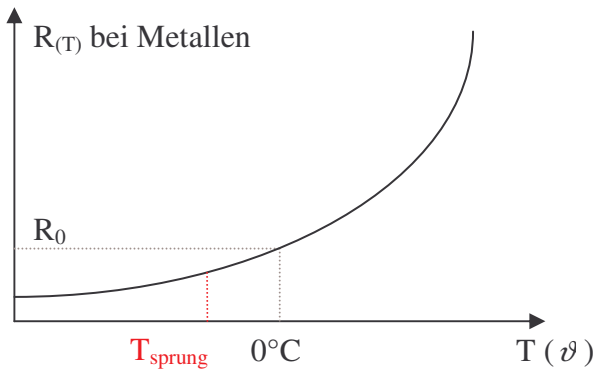
Siliziumscheibe: $R_{(T)}$ sinkt, wenn Temperatur steigt

Physik

Georg Fischer

Informatik Diplom, Semester 1

28.06.03



Supraleiter:

Hochtemperatur-Supraleiter ($T_{\text{Sprung}} \geq -190^\circ\text{C}$; erreichbar beispielsweise durch flüssigen Stickstoff)

Normaler Supraleiter ($T_{\text{Sprung}} < 20^\circ\text{K} \approx -253^\circ\text{C}$)

Referenztemperaturen beim Metall: $R_0 = 0^\circ\text{C}$

$$R_\vartheta \cong R_0 + R_0 \cdot \alpha \cdot \vartheta + R_0 \cdot \alpha \cdot \vartheta^2 + \dots$$

α = Linearer Temperaturkoeffizient des el. Widerstandes

Beispiel: Platin-Widerstand (Verwendung: Temperatursensor)

Pt100, d.h. $R_{(0^\circ\text{C})} = 100 \Omega$

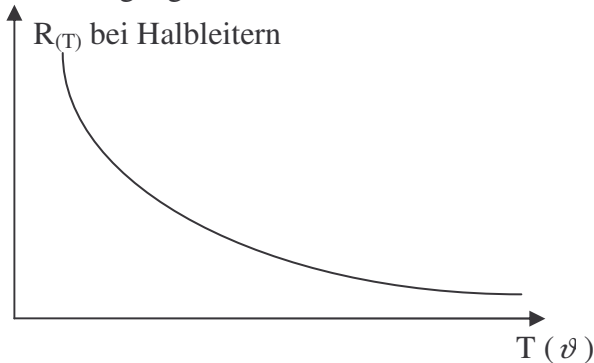
Gemessen: $R_\vartheta = 110 \Omega$

$$R_\vartheta = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \vartheta) \Rightarrow \frac{R_\vartheta}{R_0} = 1 + \alpha \cdot \vartheta \Rightarrow \frac{R_\vartheta}{R_0} - 1 = \vartheta \Rightarrow \frac{R_\vartheta}{R_0} \cdot \frac{1}{\alpha} - 1 = \vartheta \Rightarrow \frac{R_\vartheta}{R_0 \cdot \alpha} - 1 = \vartheta$$

Temperatur ist ein Maß für die Bewegungsenergie der Atome und Moleküle einer Substanz (Temperaturschwingung im Festkörper)

Metall: Freie Leitungselektronen (~ ein freies Elektron je Atom)

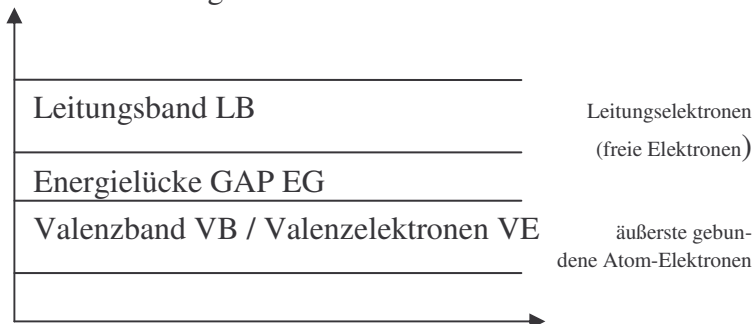
Driftbewegung der Elektronen wird durch die Temperaturschwingung mehr und mehr behindert.



Typisch-Negativer Koeffizient $\alpha < 0$: NTC Temperatursensor (nicht dotiertes Silizium)

Oxyd - Keramik - NTC $\begin{cases} \text{MgO}_2 + \\ \text{NiO}_3 \end{cases}$

Halbleiter: Energie Δe der Elektronen



$E_{\text{GAP}} > 5\text{eV}$: Isolator

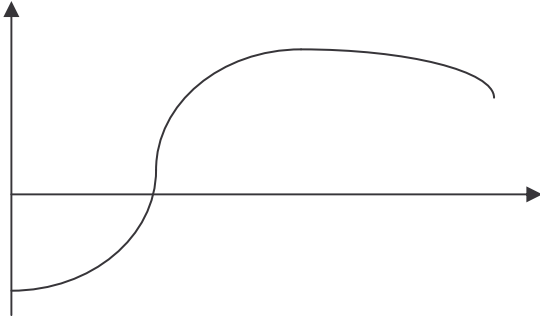
$E_{\text{GAP}} < 5\text{eV}$ und $> 0\text{eV}$: Halbleiter (reines Silizium)

$E_{\text{GAP}} = 0$: Metall

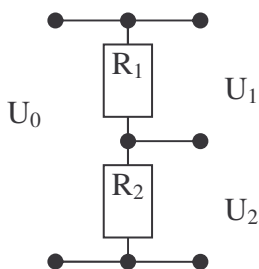
(LB und VB überlappen sich) (bei Zimmertemperatur)

Halbleiter: Wird die Temperatur erhöht $\Rightarrow$ Temperaturschwingung nimmt zu $\Rightarrow$ mehr und mehr Valenzelektronen werden losgeschlagen und die Zahl der Leitungselektronen nimmt zu $\Rightarrow$ R fällt

Ausnahme-Halbleiter: PTC-Therstoren (BaTiO_3 -Keramik); positiver Temperaturkoeffizient



Spannungsteiler



$$U_0 = U_1 + U_2$$

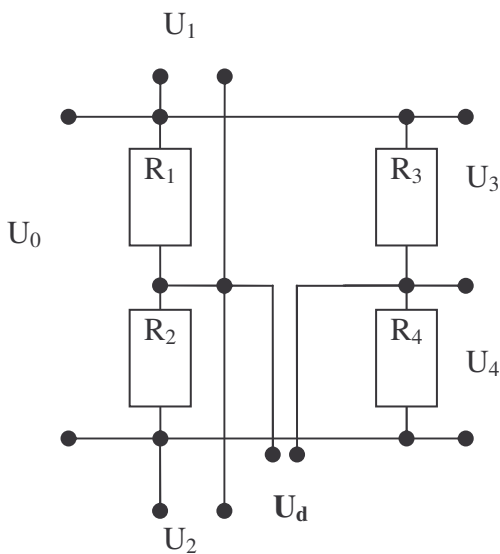
$$I_{ges} = \frac{U_0}{R_1 + R_2} \left(= \frac{U_1 + U_2}{R_1 + R_2} \right)$$

$$\left. \begin{array}{l} U_1 = R_1 \cdot I_{ges} \\ U_2 = R_2 \cdot I_{ges} \end{array} \right\} U_1 \text{ durch } U_2 \text{ teilen} \Rightarrow \frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

$$U_1 = R_1 \cdot \frac{U_0}{R_1 + R_2} = U_0 \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$U_2 = R_2 \cdot \frac{U_0}{R_1 + R_2}$$

Leadstone-Brücke



$$U_{20} = U_0 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$U_{40} = U_0 \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

Diagonalspannung/Brückenspannung/Differenzspannung U_d

$$U_d + U_4 - U_2 = 0$$

$$U_d = U_{20} - U_{40}$$

$$= U_0 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} - U_0 \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

Pt100 = Element, das bei 0°C einen Widerstand von 100Ω hat. Je nach Temperaturunterschied (in Kelvin) und Temperaturkoeffizient ändert sich der Widerstand. Formel: $R_{neu} = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \tau)$

α = Temperaturkoeffizient; τ = Temperaturunterschied in Kelvin

Magnetostatik

(konstantes magnetisches Feld)

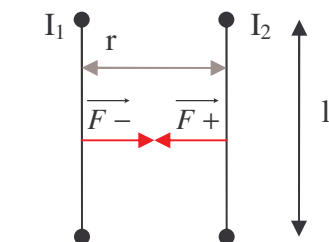
Elektrisches Feld: Kraft auf ruhende Ladung: $\vec{F}_{el} = q \cdot \vec{E}$

Ausgehend vom Coulomb-Gesetz: $\vec{F}_{el} = \text{konstante} \cdot \frac{Q \cdot q}{r^2}$

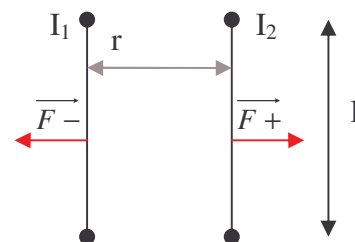
Für Punktladungen: Elektrische Feldstärke $E = \text{konstante} \cdot \frac{Q}{r^2}$

Oersted-Grundgesetz

Magnetfeld B wirkt eine Kraft auf bewegte Ladung (Strom) aus.



Stromrichtung gleich



Stromrichtung verschieden

$$F = \text{konstante} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{r} \cdot l = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{r} \cdot l; \mu_0 = \text{magnetische Feldkonstante}$$

$$[\mu_0] = \left[\frac{2\pi \cdot F}{I_1 \cdot I_2} \cdot \frac{r}{l} \right] = 1 \left[\frac{N \cdot m}{A^2 \cdot m} \right] = 1 \left[\frac{N}{A^2} \right] = 1 \left[\frac{Vs}{Am} \right] \quad \text{Einheit von } \mu_0$$

$$\frac{\vec{F}_{el}}{l} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1}{r} \cdot I_2 \cdot \vec{r}_0; \quad \vec{r}_0 = \text{Einheitsvektor}$$

Strom I_1 erzeugt ein Magnetfeld B (I_1, r).

Definition der magnetischen Induktion:

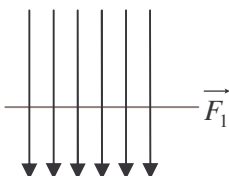
$$B_{(I_1, r)} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1}{r}$$

$$[B] = \frac{N}{A^2} \cdot \frac{A}{m} = 1 \frac{N}{Am} = 1 \text{ Tessler (T)}$$

$$F = B_{(I_1, r)} \cdot I_2 \cdot l$$

$$F = l \cdot I \cdot B_{(r)}$$

Magnetfeld B



F steht $\perp$ auf B und auf I

Richtung Rechtsschraube: Drehe I gegen B, dann liegt E in Richtung der Rechtsschraube

oder 3-Finger-Regel $\Leftrightarrow$ Vektorprodukt (Kreuzprodukt)

Definition magnetische Feldstärke:

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{I_1}{2\pi \cdot r}$$

$$[H] = 1 \frac{A}{m}$$

$$F = l \cdot \vec{I} \cdot \vec{B}$$

$$|F| = l \cdot |\vec{I}| \cdot |\vec{B}| \cdot \sin\left(\frac{I}{B}\right)$$

$$\text{Bei uns ist } \sin\left(\frac{I}{B}\right) = \sin(90^\circ) = 1$$

Bei radiellen Magnetfeldern bleibt der Winkel von Strom und Magnetfeld immer gleich.

Anwendung: Elektromotor

Versuch: Stromschaukel

Elektromotor (Gleichstrommotor mit Bürsten/Kohlen auf Kommutator

Drehspulenampéremeter

Drehspuhlvoltmeter

Beim Drehspulenampéremeter und Drehspuhlvoltmeter braucht man lediglich die Skala zu vertauschen.

Funktionsweise und Aufbau ist der selbe.

