

# Elektrizitätslehre

## 14. Elektrische und magnetische Größen

### 14.1 Einführung

- **elektrische Wechselwirkung** hauptsächlich verantwortlich für Bindungen in Materie, d.h. ihrer Struktur; auch chemische Reaktionen
- **Energieübertragung** überwiegend in elektrischer Form (auch: Wärme, Licht, Schall, mech. und chem. Energie)
- **Informationsübermittlung** (elektromagnetische Wellen)
- Computertechnik, Informationsverarbeitung
- Labormesstechnik: Umwandlung fast aller Messgrößen in elektrische Signale

### 14.2 Ladung

- **Ladung an Masse gebunden**, aber nicht jedes Massenelement ist geladen
- **positive** und **negative** Ladungen können sich aufheben
- kleinste Ladungseinheit: Ladung des Elektrons, ist **Elementarladung**  $e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$ ;  $1 \text{ C (Coulomb)} = 1 \text{ As}$ ; Proton hat gleiche Ladung mit umgekehrtem Vorzeichen
- Blitz: hat Ladung von etwa  $20 \text{ C}$  in  $10^{-3} \text{ s}$ ; Strom ca.  $20000 \text{ A}$ ; Spannung ca.  $10^9 \text{ V}$ ; Energie ca.  $E = 5 \text{ MWh}$  (Ladung einer AA-Zelle:  $7200 \text{ C}$ , aber  $E = 3 \text{ Wh}$ )
- Ladungen kann man durch **Ladungstrennung** erhalten
- gegenseitige Kraftwirkung zweier Ladungen viel größer als Gravitationskraft

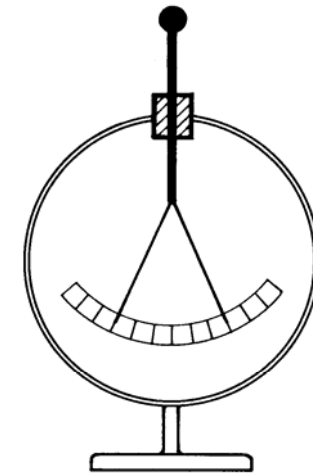
- Kraft zwischen zwei Ladungen heißt **Coulomb-Kraft**, ist für 2 Elektronen  $10^{42}$  mal größer als Gravitation, für zwei Punktladungen gilt:

$$F = \gamma \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

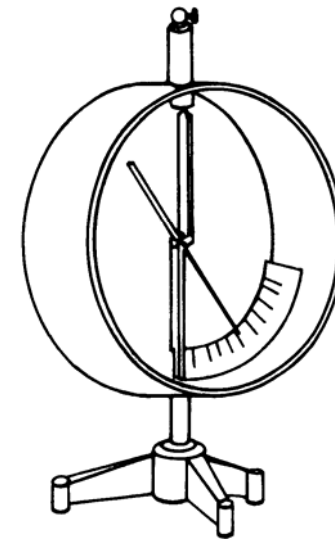
$$\gamma = (4\pi\epsilon_0)^{-1} = 8,987 \times 10^9 \text{ VmC}^{-1}$$

$\epsilon_0$  ... elektrische Feldkonstante ( $8,855 \times 10^{-12} \text{ Cm}^{-1}\text{V}^{-1}$ )

- gleiche Ladungen stoßen sich ab, ungleiche Ladungen ziehen sich an (im Gegensatz zur Gravitation)
- **elektrische Ladung Q** eines Körpers ist **Summe** der in ihm erhaltenen **Elementarladungen**, wobei Vorzeichen berücksichtigt werden müssen
- **Atome** erscheinen nach außen elektrisch neutral (Zahl Elektronen = Zahl der Protonen)
- entzieht man Atom eine Elementarladung, entsteht **Kation** (nach außen positiv), fügt man ein Elektron hinzu entsteht **Anion** (negativ)
- **Satz von der Erhaltung der Ladung**: Ladung kann nicht erzeugt oder vernichtet werden; Ladung in abgeschlossenem System ist **konstant**
- obwohl Ladung gequantelt (nur in diskreten Schritten zu ändern), erhält man bei großer Ladung quasikontinuierliche Änderung
- Nachweis der Ladung mittels Elektroskop, Quantifizierung mit Elektrometer

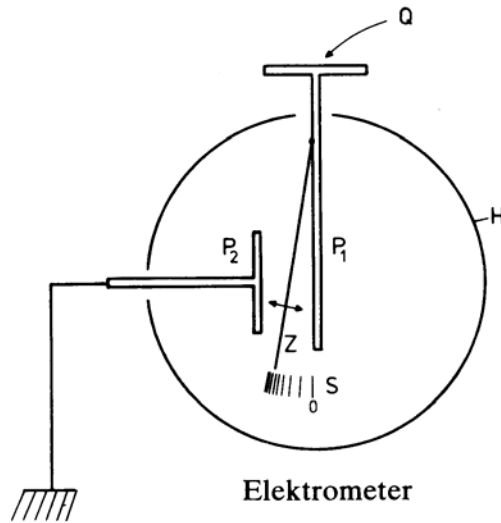


Blättchen-Elektroskop

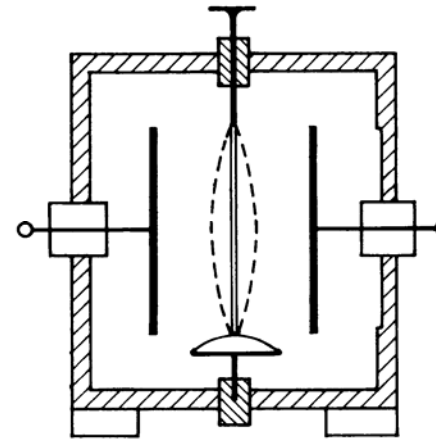


Braunsches Elektrometer

Versuch E3 und E13  
Ladungstrennung



Elektrometer



Zweifadenelektrometer nach Wulf

- mit empfindlichen Elektrometern: bis zu einigen  $100 e^-$  nachweisbar
- wenn Körper ausgedehnt: alle **Kräfte** zwischen Punktladungen **vektoriell addieren**
- einige Sonderfälle:

Probenform	Abstandsabhängigkeit der Kraft
<p>zwei Punktladungen</p>	$F \sim \frac{1}{r^2}$
<p>Punktladung vor ebener Metallplatte</p>	$F \sim \frac{1}{r^2}$
<p>zwei Dipole</p>	$F \sim \frac{1}{r^4}$

## Versuch E11

Ladung wirkt bis ins Innere einer Glasröhre

## 14.3 Spannung

### Die Definition der elektrischen Spannung

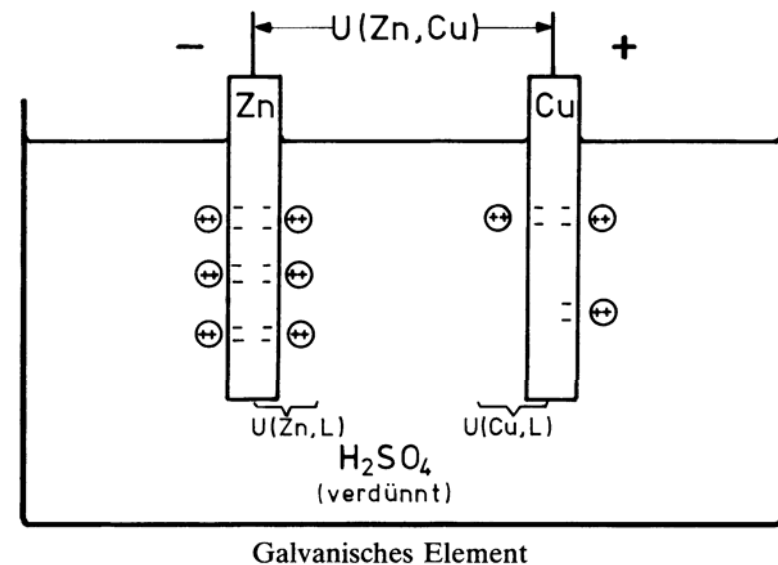
- wenn wir zwei **Punktladungen** entgegengesetzten Vorzeichens gegeneinander verschieben, muss **Arbeit** verrichtet werden: 
$$W = \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{F} d\vec{r}$$
- Arbeit wird als potentielle Energie gespeichert
- Man definiert den Quotienten der Arbeit pro Ladung als **Spannung (Potentialdifferenz)**

$$U = \frac{W}{Q_1} = \frac{1}{Q_1} \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{F} d\vec{r}$$

- SI-Einheit ist J/C oder V (Volt)
- verschiebt man eine Elementarladung  $e$  gegen Spannung von 1V benötigt man die Energie  $W = 1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$

### Spannungsquellen

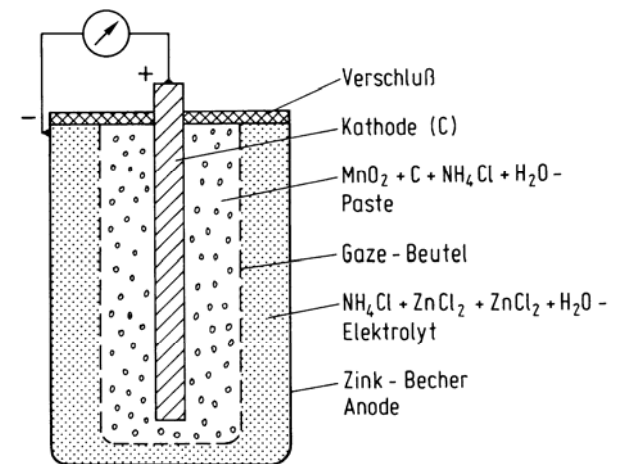
- galvanische Elemente waren erste Labor-Quellen elektrischer Energie; beruht auf **unterschiedlicher Löslichkeit** verschiedener Materialien in einem Elektrolyten
- durch Adhäsionskräfte mit Elektrolyten gehen einzelne Ionen in Lösung  $\Rightarrow$  Ladungstrennung  $\Rightarrow$  elektrisches Feld  $\Rightarrow$  Spannung
- heißt auch **elektromotorische Kraft (EMK)**



- unterschiedliche Metalle gehen „verschieden stark“ in Lösung (**Lösungstension**)  $\Rightarrow$  Spannung zwischen zwei Elektroden (z.B. Cu und Zn); ist Differenz der Spannungen an den einzelnen Elektroden:  $U(\text{Zn,Cu}) = U(\text{Zn,Lösung}) - U(\text{Cu,Lösung})$
- Zinkelektrode:  $\text{Zn} \rightleftharpoons \text{Zn}^{2+} + 2e^-$   
Kupferelektrode:  $\text{Cu} \rightleftharpoons \text{Cu}^{2+} + 2e^-$
- in der Summe:  $\text{Zn} + \text{Cu}^{2+} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + \text{Cu}$
- in Wasser ist Löslichkeit sehr gering, daher bspw.  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ; heißt **galvanisches Element**
- höhere Löslichkeit des Zn  $\Rightarrow$  ist negativer Pol (**Elektrode**)
- **Gleichgewicht durch Coulomb-Kraft** zwischen Metallionen und Elektroden
- andere galvanische Elemente:  $[\text{Pb}, \text{PbO}_2, \text{H}_2\text{SO}_4; 2\text{V}]$  und **Trockenbatterie (1,5 V)**  $[\text{Zn}, \text{C}, \text{Ammoniumchlorid in feuchter Füllmasse}]$ ; höhere Spannungen durch mehrere Zellen
- **elektrochemische Spannungsreihe** oder **Voltaische Spannungsreihe**: wird gegen **Standardwasserstoff-Elektrode** gemessen; besteht aus platinierter Platinelektrode über die Wasserstoff perlt in Säure von 1 Mol pro Liter

Standardpotentiale  $E^\circ$

Vorgang	$E^\circ$ in Volt	Vorgang	$E^\circ$ in Volt
$\text{Li} \rightleftharpoons \text{Li}^+ + e^-$	-3,02	$\text{Pb} \rightleftharpoons \text{Pb}^{2+} + 2e^-$	-0,13
$\text{K} \rightleftharpoons \text{K}^+ + e^-$	-2,92	$\text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}^+ + 2e^-$	0,000
$\text{Mg} \rightleftharpoons \text{Mg}^{2+} + 2e^-$	-1,55	$\text{Sb} \rightleftharpoons \text{Sb}^{3+} + 3e^-$	+0,2
$\text{Mn} \rightleftharpoons \text{Mn}^{2+} + 2e^-$	-1,01	$\text{Cu} \rightleftharpoons \text{Cu}^{2+} + 2e^-$	+0,345
$\text{Zn} \rightleftharpoons \text{Zn}^{2+} + 2e^-$	-0,76	$\text{Cu} \rightleftharpoons \text{Cu}^+ + e^-$	+0,51
$\text{Fe} \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+} + 2e^-$	-0,44	$\text{Ag} \rightleftharpoons \text{Ag}^+ + e^-$	+0,81
$\text{Ni} \rightleftharpoons \text{Ni}^{2+} + 2e^-$	-0,25	$\text{Hg} \rightleftharpoons \text{Hg}^+ + e^-$	+0,86
$\text{Fe} \rightleftharpoons \text{Fe}^{3+} + 3e^-$	-0,04	$\text{Au} \rightleftharpoons \text{Au}^{2+} + 2e^-$	+1,5



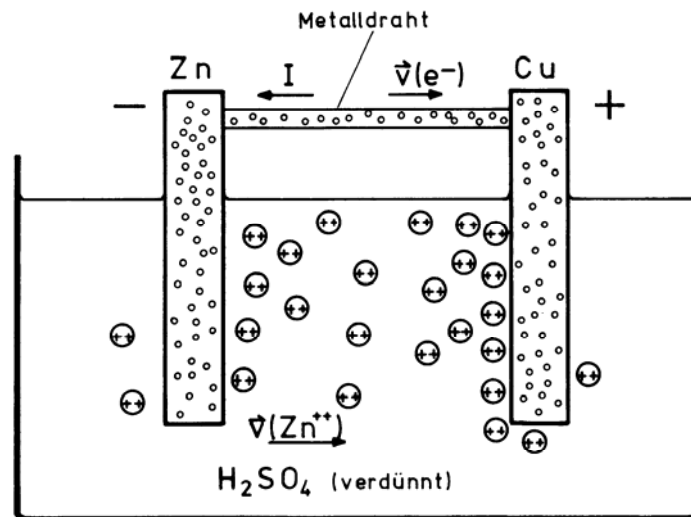
Leclanché-Element (Trockenbatterie)

- galvanische Elemente erzeugen **Gleichspannung**; Stromnetz: **Wechselspannung** 230V/50Hz
- wird mit **Generatoren** (Dynamo-Prinzip) erzeugt (Kap. 16.2)
- biologische Spannungen (z.B. Herzmuskel) ca. 100 mV (Wechselspannung)
- einige Fische (z.B. Zitteraal): Spannungen bis 500 V

## 14.4 Strom

- **Elektroden** eines galvanischen Elementes mit Metall **verbinden**  $\Rightarrow$  elektrischer **Strom** fließt

- Strom durch Bewegung von frei beweglichen Elektronen im Metall von negativer Zn-Elektrode zur positiven Cu-Elektrode (**physikalische Stromrichtung**)



Elektrischer Strom im Galvanischen Element (Zn-Cu-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>): negative Ladungen (Elektronen) fließen durch den Metalldraht und positive Ladungen (Zn<sup>2+</sup>-Ionen) durch die verdünnte Schwefelsäure vom Zn- zum Cu-Stab. ( $\vec{v}$  ist die Geschwindigkeit der Ladungsträger.)

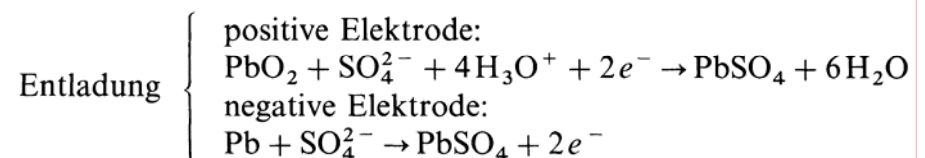
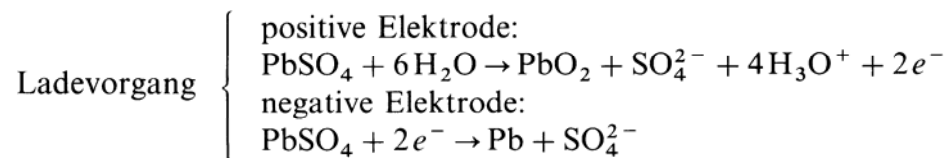
- **technische Stromrichtung** aber von Plus nach Minus
- Pluspol gewöhnlich **rot**, Minuspol **schwarz** gekennzeichnet
- eine gerichtete Bewegung von Ladungsträgern ist **elektrischer Strom I**
- Strom ist pro Zeit durch Leiter fließende Ladung:
- Strom ist Basisgröße des SI-Systems; Einheit **Ampere (A)**

$$I = \frac{Q}{t}$$

- falls sich Stromstärke ändert ist Momentanwert:  $I = dQ/dt$
- Stromleitung nicht nur in Metallen; auch in **Halbleitern, Lösungen, Gasen**; nicht im absoluten Vakuum (im Gegensatz zu elektromagnetischer Strahlung !)
- Stromfluss durch galvanisches Element führt zur **Abscheidung des elektronegativeren Elementes** auf der anderen Elektrode (Zn-Schicht auf Cu-Elektrode)
- Zn-Becher der **Trockenbatterie** löst sich auf; hat daher begrenzte Kapazität
- **Alkalizellen** haben KOH,  $ZnCl_2$  und  $NH_4Cl$  als Elektrolyten; bessere Kapselung erforderlich, aber etwa doppelte Energiedichte; ca. 2,5 Ah Kapazität als AA- (Mignon-) Zelle; zum Vergleich: Zn-Kohle-Zelle ca. 1,2 Ah
- sehr hohe Energiedichten und geringe **Selbstentladung** bei Li-Batterie (Li-Thionylchlorid)
- EMK = 3 V; wird als Stützbatterie (Knopfzellen) für Speicher in Rechnern und in Uhren verwendet (aber geringe Kapazität bei solch kleinem Volumen)
- z.B. Li-Knopfzelle CR1616: 16 x 1,6 mm hat Kapazität von 50 mAh
- evtl. durch umgekehrten Strom Abscheidung rückgängig zu machen z.B. im Ni-Cd-Element oder Ni-MH (MH=Metallhydrid); ist Akku(mulator)
- z.B. bei Pb-PbO<sub>2</sub> (Autobatterie)

### Versuch E 151

Bleiakkumulator





## 14.5 Widerstand

### Leiter und Nichtleiter

- Stoffe mit **frei beweglichen** Ladungsträgern (Elektronen, Ionen): **Leiter**
- wenn Ladungsträger unbeweglich sind: **Nichtleiter** oder **Isolator**
- wie gut Leitfähigkeit: Zahl der Ladungsträger und ihre Beweglichkeit
- Bewegung wird durch „Reibung“ behindert: **elektrischer Widerstand R**
- Reibung in Leitern: Elektronen erhöhen ihre *Geschwindigkeit* kontinuierlich bis zum nächsten **Stossprozess**, geben ihre kinetische Energie wieder ab, usw. (mittlere freie Weglänge ist einige nm)
- Elektronen haben so mittlere *Geschwindigkeit*
- in metallischen Leitern: **Widerstand sinkt mit abnehmender Temperatur**, da weniger Stöße mit Atomen
- Zahl der transportierten Ladungsträger (Strom) proportional zur Spannung:

Versuch E 76 Spannungsabfall entlang eines Leiters

$$U = I \cdot R \quad (\text{Ohmsches Gesetz})$$

- Proportionalitätskonstante: R ist **elektrischer Widerstand** mit Einheit  $V/A = \Omega$  (**Ohm**)
- Kehrwert von R ist **Leitwert**; Einheit  $A/V = S$  (**Siemens**)
- alternative Interpretation: fließt Strom durch Leiter, fällt über bestimmtes Leiterstück (Widerstand) die Spannung  $U = I \cdot R$  ab



## spezifischer Widerstand und spezifische Leitfähigkeit

- Widerstand hängt von Geometrie ab; zwei parallel geschaltete Leiter haben nur halben Widerstand, wegen doppeltem Querschnitt; doppelt so langer Draht hat auch doppelten Widerstand

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

A ... Querschnittsfläche des Leiters  
l ... Länge des Leiters

- Konstante  $\rho$  ist **spezifischer Widerstand** (Resistivität); hängt nicht von Geometrie, sondern nur vom Material ab; Einheit:  $\Omega\text{m} = \text{VmA}^{-1}$
- um Energieverluste zu vermeiden  $\rho$  möglichst klein, in Heizgerät relativ groß wählen
- Cu** für **Leiter** am besten geeignet; aber Freileitungen aus Al, da zwar 160% der Resistivität, aber nur 1/3 der Masse
- Leitungsverluste** hängen nur vom **Strom** nicht von Spannung ab  $\Rightarrow$  Transport per Hochspannung
- Resistivität ist temperaturabhängig
- $\alpha$  ist **Temperaturkoeffizient**; ist positiv für Metalle (s. rechts); ist negativ für Elektrolyten und Halbleiter (Kap. 15.2)

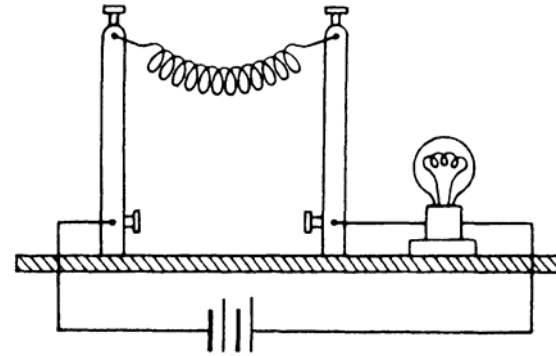
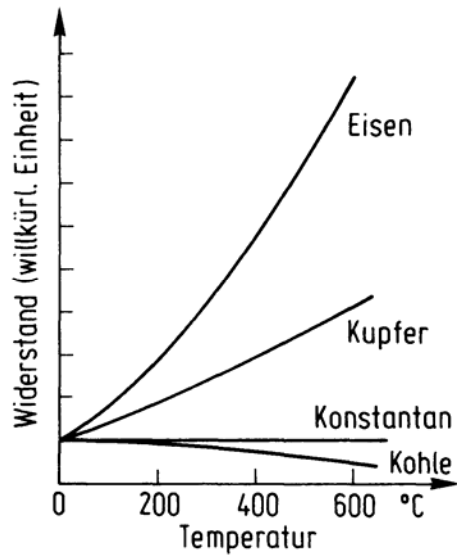
Spezifischer Widerstand  $\rho$  und Temperaturkoeffizient  $\alpha$

Material	$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ ) bei 20°C	$\alpha$ ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )
Ag	$1,6 \cdot 10^{-8}$	+ 0,004
Cu	$1,7 \cdot 10^{-8}$	+ 0,004
Au	$2,3 \cdot 10^{-8}$	+ 0,004
Al	$2,7 \cdot 10^{-8}$	+ 0,0047
Fe	$9-15 \cdot 10^{-8}$	+ 0,0045
Pt	$10,8 \cdot 10^{-8}$	+ 0,0035
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (15%ig)	$184 \cdot 10^{-8}$	< 0
KOH (15%ig)	$185 \cdot 10^{-8}$	< 0
H <sub>2</sub> O (mehrfach destilliert)	$\approx 2 \cdot 10^5$	-
Glas, Porzellan	$> 10^{12}$	-
Kunststoffe	$> 10^{13}$	-

$$\rho = \rho_{20^{\circ}\text{C}} [1 + \alpha(t - 20^{\circ}\text{C})]$$

Versuch E 121

spezifische elektrische Widerstände

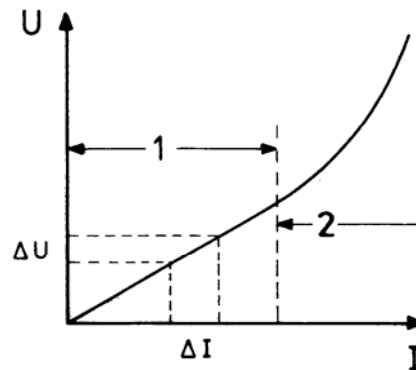
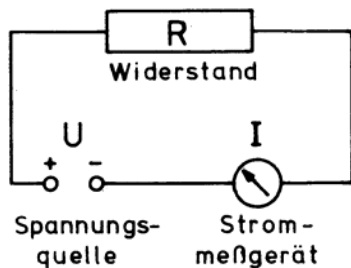


Wird der Platindraht erhitzt (Bunsenbrenner), dann leuchtet die Glühlampe kaum; wird er abgekühlt (durch flüssigen Stickstoff), dann leuchtet die Glühlampe hell

- reziproker Wert des spezifischen Widerstandes  $\sigma = 1/\rho$  ist groß für gute Leiter  $\Rightarrow$  **spezifische elektrische Leitfähigkeit**; Einheit ist  $S\ m^{-1} = A\ V^{-1}\ m^{-1}$

### Strom-Spannungs-Kennlinie von Leitern

- bei Änderung der Spannung, ändert sich Strom



Strom-Spannungs-Kennlinie eines Leiters mit Widerstand  $R$ , welcher an eine Gleichspannungsquelle  $U$  angeschlossen ist und vom Strom  $I$  durchflossen wird. Bereich 1 ist der *Ohmsche Bereich* mit  $R = \text{konstant}$ ; im Bereich 2 ist  $R$  nicht konstant.

- nur wenn **Proportionalität** gilt, d.h. Widerstand ist konstant, gilt das **Ohmsche Gesetz**

$$U = I \cdot R$$

## Zusammenhang zwischen Stromdichte und elektrischer Feldstärke

- setzt man in Ohmsches Gesetz die Formel für den spezifischen Widerstand ein folgt:

$$I = \frac{1}{\rho} \frac{A}{l} U \quad \text{mit Stromdichte} \quad j = \frac{I}{A} \Rightarrow j = \frac{U}{\rho l} \quad \text{und} \quad \sigma = \frac{1}{\rho}$$

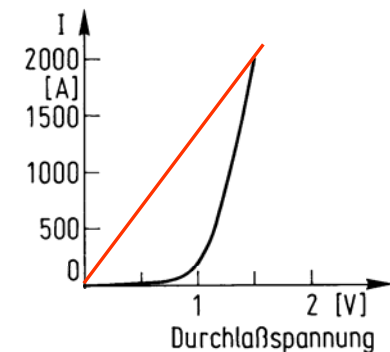
- Definition: **elektrische Feldstärke**  $E = \frac{U}{l}$  d.h.  $j = \sigma E$   $\sigma$  ... spez. Leitfähigkeit
- ist äquivalente Formulierung des Ohmschen Gesetzes: **Stromdichte und Feldstärke sind proportional** (falls spezifischer Widerstand/Leitfähigkeit konstant)
- es gibt **nichtlineare Widerstände**, d.h. Abweichungen vom Ohmschen Gesetz, z.B. bei Halbleitern

## 14.6 Netzwerke

### Schaltbilder

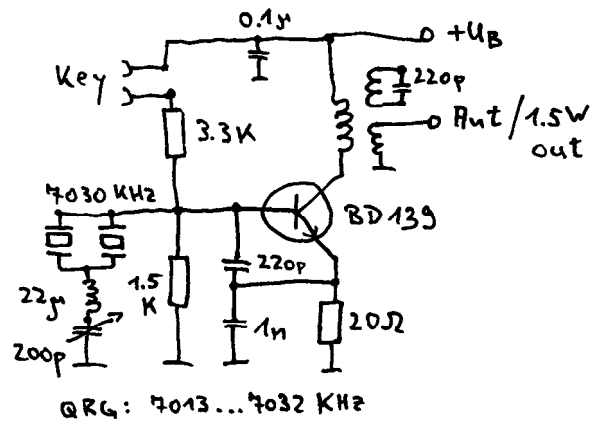
- komplexe Aufbauten und Schaltungen werden durch Schaltbilder (Schaltpläne) angegeben

—	Leiter	+ — — — — — -	Spannungsquelle
— □ —	Widerstand	—     —	galvan. Element
—    —	Kondensator	— (A) —	Strommesser
— mm —	Spule	— / —	Schalter

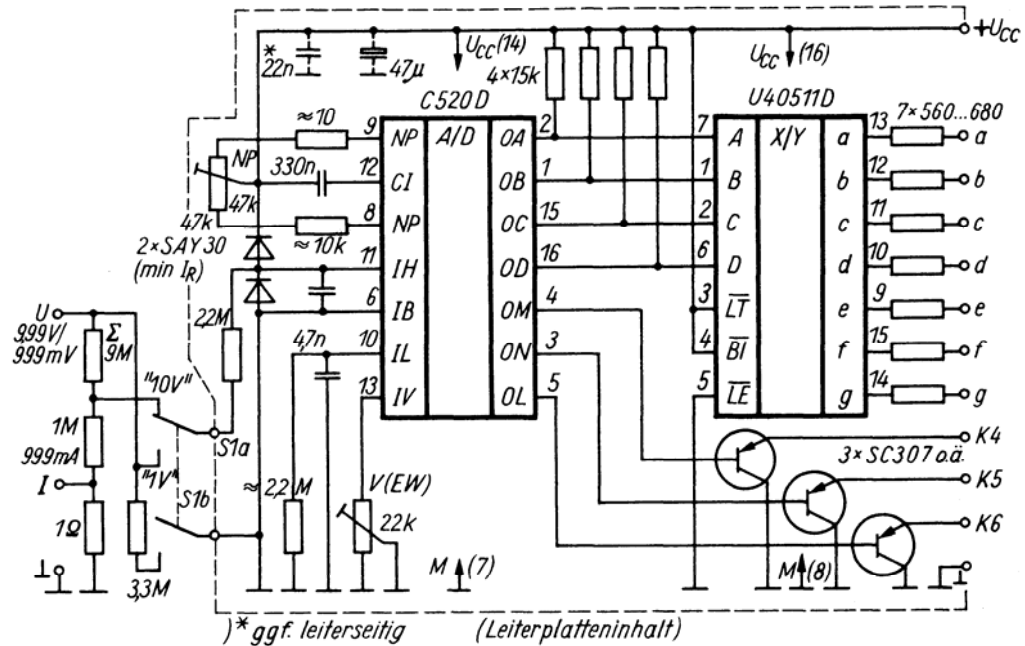


Strom-Spannungskennlinie einer Hochleistungsdiode aus Silicium.

- **Beispiel 1: einfacher Kurzwellensender für Amateurfunk (7 MHz-Band)**

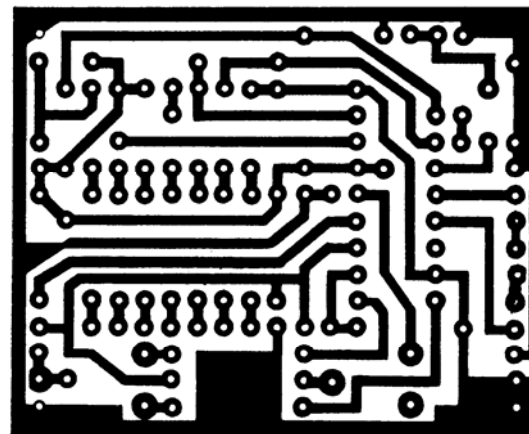


- **Beispiel 2: Digitalvoltmeter**

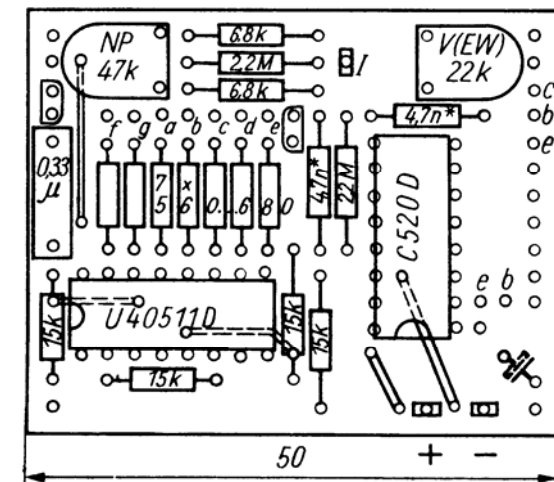


Modul für ein Digitalvoltmeter

- Leiterbild wird auf Leiterplatte geätzt (Layout)
- **SMD-Technik** (surface mounted devices) erlaubt sehr hohe Packungsdichte der Bauelemente, ist heute Standard



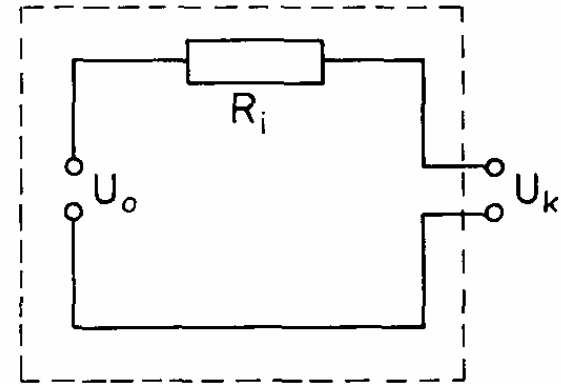
Leiterbild



Bestückungsplan

## Innenwiderstand einer Spannungsquelle

- im unbelasteten Zustand (ohne Stromfluss) misst man an der Spannungsquelle die **Leerlaufspannung** oder **Urspannung**  $U_0$
- wenn Verbraucher (Last) angeschlossen  $\Rightarrow$  Frage: Wie schnell können Ladungsträger nachgeliefert werden; ist Generation zu langsam, sinkt Spannung (ist **Klemmspannung**  $U_k$ )
- d.h., zum Messen der Urspannung: hochohmiges Messgerät (es fließt fast kein Strom)
- Vorgehen zum Messen des **Innenwiderstandes**  $R_i$ :
  1. Messen der Urspannung
  2. Lastwiderstand  $R_L$  anschließen und soweit verringern, dass  $U_k = \frac{1}{2} U_0$  ist
  3.  $R_i = R_L$



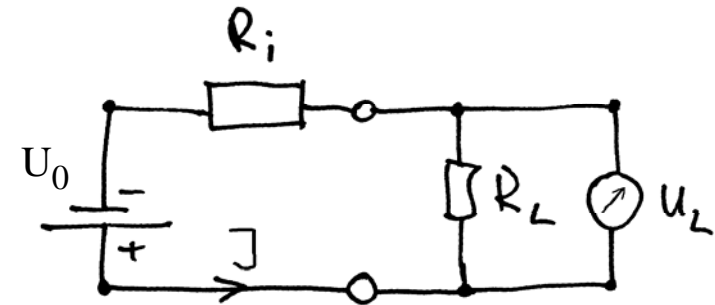
- **Beispiele:**
  - **Knopfzelle** liefert nur wenig Strom, d.h. Innenwiderstand **einige hundert Ohm**
  - Thermoelement wenige Ohm bis einige hundert Ohm
  - **Taschenlampenbatterie:** ca. 0.01 bis 1 Ohm
  - **Autobatterie:**  $< 0,01$  Ohm (d.h. wenn 100 A fließen, fällt die Klemmspannung um 1V)
  - **biologische Quellen:** oft ca. 100  $M\Omega$  (Messung nur mit sehr hochohmigen Spannungsmessern, d.h. speziellen Verstärkern mit noch höherem Innenwiderstand  $R_i > 1G\Omega$ )

## elektrische Leistung im Gleichspannungsstromkreis

- elektrische Leistung:  $P = U \cdot I$  Einheit: 1 VA = 1 W (Watt)
- **Leerlauf:**  $R_L \gg R_i$       **Kurzschluss:**  $R_L \ll R_i$
- entnommene elektrische Leistung ist in beiden Fällen nahe Null
- Aufgabe: Bei welchem Lastwiderstand gibt eine Gleichspannungsquelle die maximale Leistung ab?

$$P_L = U_L \cdot I \quad \text{mit} \quad U_L = I \cdot R_L \quad \text{und} \quad I = \frac{U_0}{R_i + R_L}$$

$$P_L = R_L \cdot I^2 = R_L \left( \frac{U_0}{R_i + R_L} \right)^2 = \frac{R_L \cdot U_0^2}{R_i^2 + R_i R_L + R_L^2}$$



maximale Leistung, wenn  $\frac{dP_L}{dR_L} = 0$  Anwendung der Quotientenregel:  $y = \frac{u}{v}$      $y' = \frac{u'v - uv'}{v^2}$

Ableitung = Null, wenn Zähler = 0, also:  $u'v - uv' = 0$

$$U_0^2(R_i^2 + R_i R_L + R_L^2) - R_L U_0^2(R_i + 2R_L) = 0$$

$$R_i^2 + R_i R_L + R_L^2 = R_L R_i + 2R_L^2$$

$$R_i^2 = R_L^2$$

$$R_i = R_L \quad \text{dann gilt} \quad U_L = \frac{1}{2} U_0$$

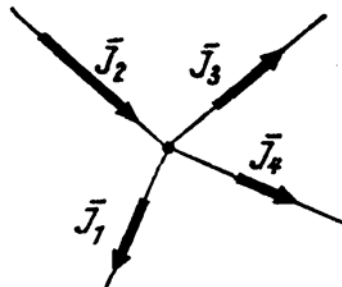
**Aufgabe:** Wie muss eine Waschmaschine mit einer Leistung von 2300W abgesichert werden („Einheit“ von Sicherungen ist A)?

$$I = P/U = 2300\text{W} / 230\text{V} = 10\text{A}$$

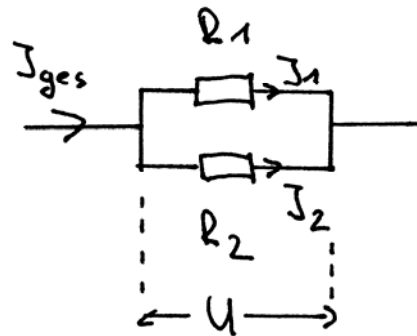
## Kirchoff'sche Gesetze des elektrischen Stromes

- es gelten zwei Regeln:
- **Knotenregel:** An jedem Verzweigungspunkt (Knoten) ist die Summe der zufließenden = Summe der abfließenden Ströme

$$\sum_n \bar{I}_n = 0$$



Zur 1. KIRCHHOFFSchen Regel

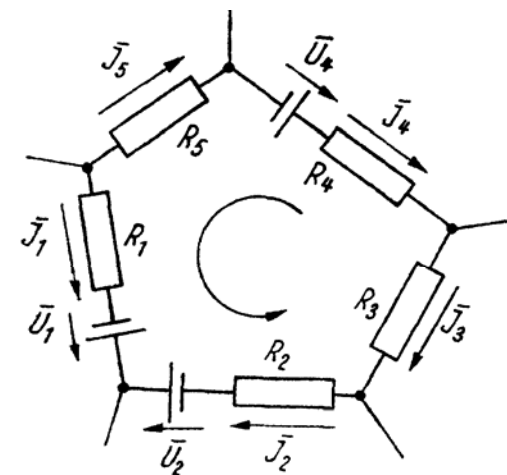


$$I_{ges} = I_1 + I_2 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$$

- **Maschenregel:** In jedem Stromkreis (Masche) ist die Summe aller Spannungsquellen gleich der Summe der Spannungsabfälle an allen Bauelementen (Vorzeichen der Spannungsquellen beachten).

$$\sum_m \bar{I}_m R_m = \sum_n \bar{U}_n$$

- Man legt Richtung willkürlich fest, mit der alle Spannungen in einer Masche bestimmt werden; damit ergeben sich die Vorzeichen richtig



Zur 2. KIRCHHOFFSchen Regel



- **Beispiel 1:** Parallelschaltung von 2 Widerständen:

für beide Knoten (a und b) gilt:

$$I_0 = I_1 + I_2 \quad \text{außerdem für 3 Maschen:}$$

$$U_0 = I_0 R_i + I_1 R_1 \quad \text{und} \quad U_0 = I_0 R_i + I_2 R_2 \quad \text{und für Gesamtwiderstand } R$$

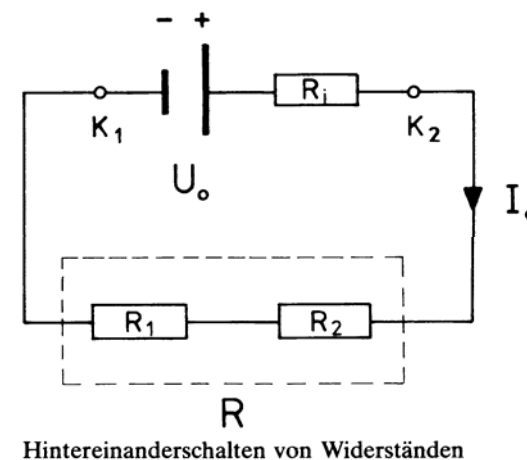
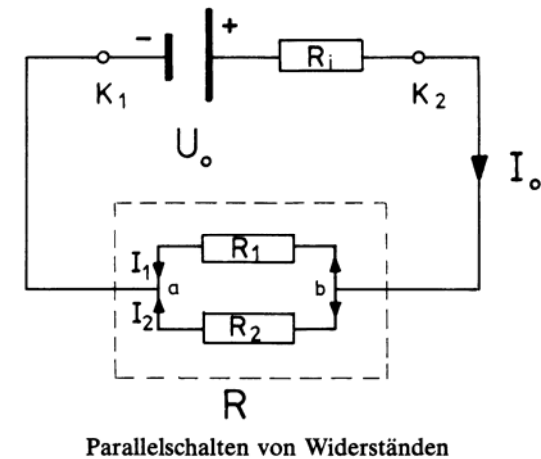
$$U_0 = I_0 R_i + I_0 R \quad \text{sind unabhängige Gleichungen zur Problemlösung;}$$

aus  $I_1 = \frac{I_0 R}{R_1}$  und  $I_2 = \frac{I_0 R}{R_2}$  folgt

$$I_0 = \frac{I_0 R}{R_1} + \frac{I_0 R}{R_2} \quad (\text{Knotenregel}), \text{ also:}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad \text{auch:} \quad R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

- **Beispiel 2:** Reihenschaltung ergibt  $R = R_1 + R_2$



- **Beispiel 3: Potentiometerschaltung**

Klemmspannung  $U_K$  :

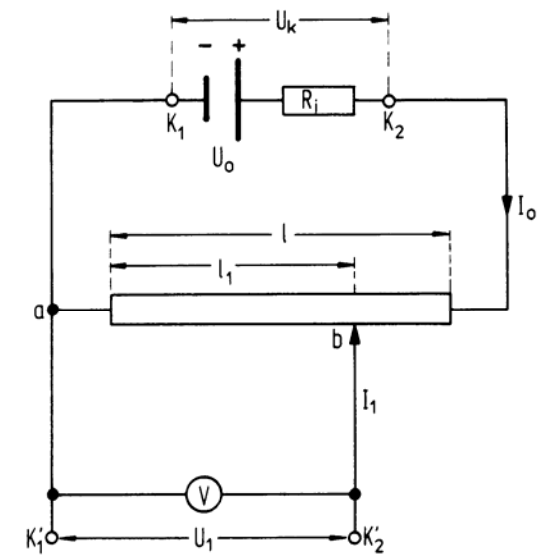
$$U_K = U_0 - I_0 R_i$$

aus Ohmschen Gesetz:  $U_K = I_0 R_a = I_0 \rho \frac{l}{A}$

für  $U_1$  an Länge  $l_1$

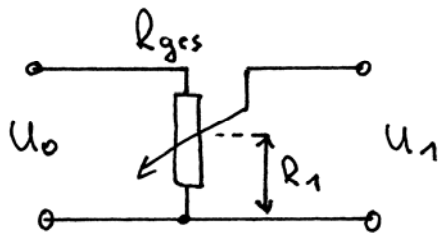
$U_1 = I_0 \rho \frac{l_1}{A}$  bildet man  $U_1 / U_K$

$$\frac{U_1}{U_K} = \frac{l_1}{l} \quad \text{oder} \quad \frac{U}{U_{\text{ges}}} = \frac{R}{R_{\text{ges}}}$$

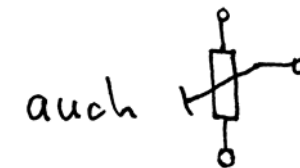


Potentiometerschaltung

- Schaltbild:



$$U_1 = U_0 \frac{R_1}{R_{\text{ges}}}$$

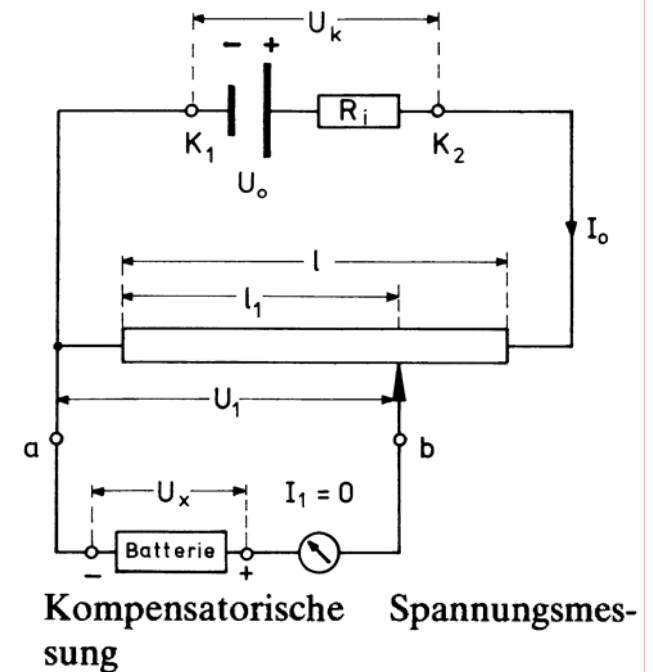


Trimpotentiometer

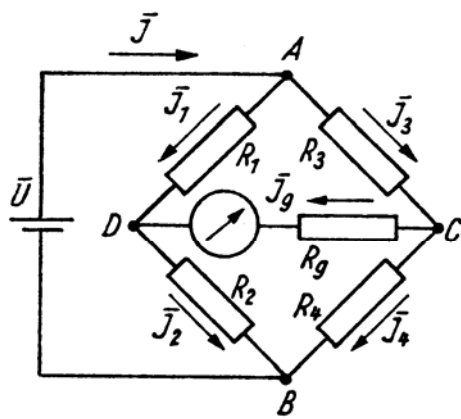
- Anwendung: z.B. Lautstärkeregelung im Radio

- **Beispiel 4:** Kompensatorische Spannungsmessung
- ist Anwendung der Potentiometerschaltung zur stromlosen Messung der Ursprungspannung der Batterie  $U_x$
- Strom durch Batterie wird zu Null gemacht, indem Spannung  $U_x$  durch gleich große Gegenspannung  $U_1$  kompensiert wird
- $U_1$  wird durch  $l_1$  eingestellt
- wird gemessen als

$$U_x = U_1 = I_0 \rho \frac{l_1}{A} = I_0 R_1$$



- **Beispiel 5:** Wheatstonsche Brückenschaltung zur Bestimmung des unbekannten Widerstands  $R_3$  durch geeignete Wahl  $R_1/R_2$  (Abgleichen:  $I_g = 0$ )



WHEATSTONE-Brücke

(Knoten A)	$\bar{I}_1$	+	$\bar{I}_3$	=	$\bar{I}$	
(Knoten D)	$\bar{I}_1$	-	$\bar{I}_2$	+	$\bar{I}_g$ = 0	
(Knoten C)			$\bar{I}_3$	-	$\bar{I}_4$ - $\bar{I}_g$ = 0	
(Masche ADC)	$R_1 \bar{I}_1$		-	$R_3 \bar{I}_3$	-	$R_g \bar{I}_g$ = 0
(Masche BCD)			$R_2 \bar{I}_2$		-	$R_4 \bar{I}_4$ + $R_g \bar{I}_g$ = 0

wenn  $\bar{I}_g = 0$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

(vgl. Kap 16)

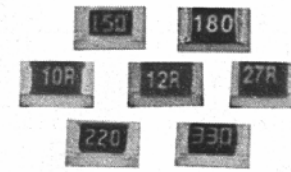
- praktische Bauformen von Widerständen: mit Drahtanschlüssen oder als SMD-Bauelemente



	1. Ring	2. Ring	3. Ring	4. Ring
	-	-	$10^{-2}$	$\pm 10\%$
	-	-	$10^{-1}$	$\pm 5\%$
	-	0	$10^0$	-
	1	1	$10^1$	$\pm 1\%$
	2	2	$10^2$	$\pm 2\%$
	3	3	$10^3$	-
	4	4	$10^4$	-
	5	5	$10^5$	-
	6	6	$10^6$	-
	7	7	$10^7$	-
	8	8	$10^8$	-
	9	9	$10^9$	-

Beispiel: braun-schwarz-schwarz  $R=1,0 \times 10^0 = 1 \text{ Ohm}$

**SMD-Widerstände in  
Chippausführung 1206**  
Bauform 0805 ·  
Belastbarkeit T 70: 0,1 W ·  
Toleranz 5% · TK  $\leq \pm 200 \text{ ppm}$ .



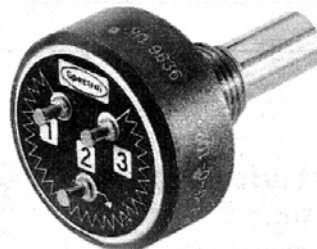
- Widerstände als Kohleschicht auf keramischem Träger sind preiswert, aber Temperaturkoeffizient TK relativ hoch (ca.  $10^{-4}$ )
- besser bei Metallschichtwiderständen:  $TK=2,5 \times 10^{-5} = 25 \text{ ppm}$  (parts per million)

Potentiometer

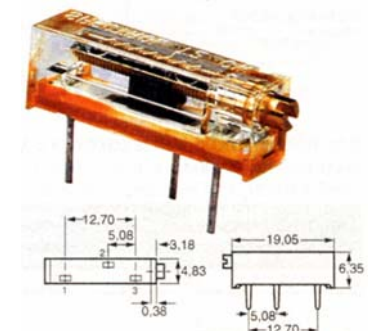
**Leitplastik-Potentiometer,  
1 W, 360°**

Typ 357. Widerstandselement  
aus Leitplastik.

**Technische Daten:** Ausführung linear ·  
Widerstandstoleranz  $\pm 20\%$  · Nennbelastbarkeit 1 Watt bei 70°C



Trimpotentiometer



## Übungsaufgaben zu Kap. 14.1 –14.6 : Elektrizitätslehre

**961.** Welche Spannung besteht zwischen zwei um 50 cm voneinander entfernten Punkten eines 1 mm dicken Kupferdrahtes ( $\rho = 0,0178 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$ ), durch den ein Strom von 6 A fließt?

**962.** Zwischen zwei um 6 m voneinander entfernten Punkten einer Starkstromleitung (Kupfer,  $\rho = 0,0178 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$ ) von  $70 \text{ mm}^2$  Querschnitt wird die Spannung 0,23 V gemessen. Welcher Strom fließt durch die Leitung?

**963.** Welcher Strom fließt bei vollständigem Kurzschluß durch einen Akkumulator von 2 V und  $0,05 \Omega$  Innenwiderstand?

**967.** Wickelt man von einer Spule 10 m Draht ab, so erhöht sich bei derselben Spannung der Strom von 1,52 A auf 1,54 A. Wieviel Meter Draht enthält die volle Spule?

**968.** Auf das Wievielfache nimmt der Widerstand eines Drahtes zu, wenn dieser bei unveränderter Masse auf die 10fache Länge gestreckt wird?

**975.** An einer Sammlerbatterie, deren Ursprungung 6,2 V beträgt, wird bei Entnahme eines Stromes von  $I_1 = 5 \text{ A}$  die Klemmenspannung  $U_k = 6,1 \text{ V}$  gemessen. Wie groß sind Klemmenspannung und innerer Widerstand bei Entnahme von  $I_2 = 20 \text{ A}$ ?

**976.** Wie groß sind der innere Widerstand und die Ursprungung einer Spannungsquelle, wenn die Klemmenspannung bei Entnahme von  $I_1 = 12 \text{ A}$  bzw.  $I_2 = 25 \text{ A}$  die Werte  $U_{k1} = 24,6 \text{ V}$  bzw.  $U_{k2} = 24,3 \text{ V}$  annimmt?

**981.** Jedes der auf Bild 221 angegebenen Elemente hat die Ursprungung  $E$ , von den Widerständen haben drei den Wert  $R$ , einer den Wert  $2R$ . Wie groß ist die Spannung zwischen den Punkten  $A$  und  $B$ ?

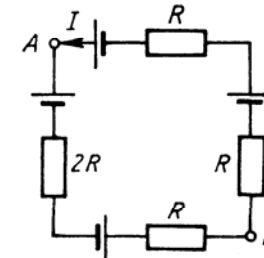


Bild 221

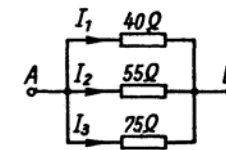


Bild 222

**982.** (Bild 222) Wie groß sind die Ströme  $I_1 \dots I_3$ , wenn an den Klemmen  $A$  und  $B$  die Spannung 65 V liegt?

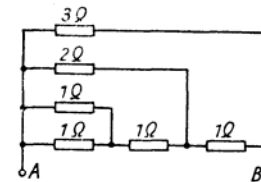


Bild 227

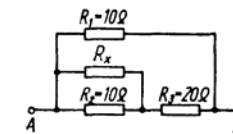


Bild 228

**989.** (Bild 227) Berechne den Gesamtwiderstand zwischen den Punkten  $A$  und  $B$ .

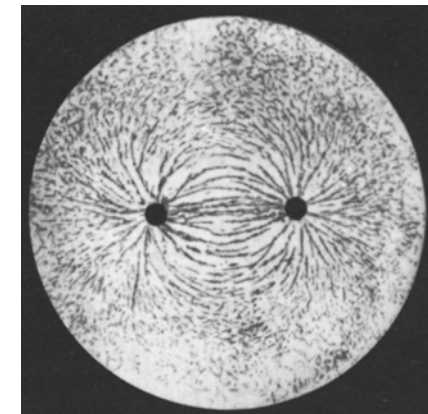
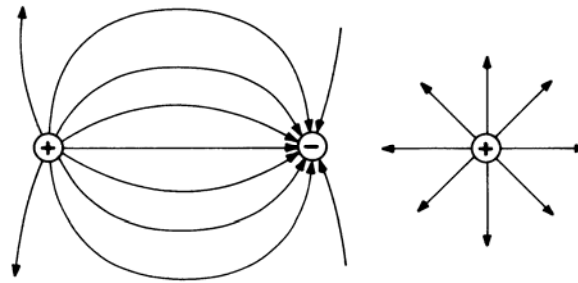
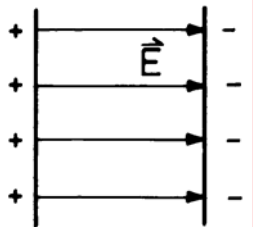
**990.** Wie groß muß der Widerstand  $R_x$  auf Bild 228 gewählt werden, damit der Gesamtwiderstand zwischen den Klemmen  $A$  und  $B$  den Betrag  $R_{AB} = 7 \Omega$  hat?

**991.** Innerhalb welcher Grenzen läßt sich der Gesamtwiderstand in der letzten Aufgabe bei beliebiger Wahl von  $R_x$  ändern?

## 14.7 Das elektrostatische Feld

### Kraftwirkung auf Ladung im Feld

- **Coulombsches Gesetz** beschreibt Größe der **Kraft** im elektrischen Feld; wird durch elektrisches Feld vermittelt; breitet sich im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit aus
- **elektrisches Feld** um Ladung  $Q$  definiert man auch durch Kraftwirkung von Ladungen aufeinander (Coulombkraft)
- ist Kraft  $F$ , die auf Probeladung  $q$  ausgeübt wird:  $\vec{E} = \vec{F} / q$
- mit Coulombkraft ergibt sich für den **Betrag** der elektrischen Feldstärke:  $E = \gamma \frac{Q}{r^2}$
- Elektrisches Feld ist (wie Gravitationsfeld) ein **Vektorfeld**
- wird durch elektrische **Feldlinien** veranschaulicht (Vereinbarung: Feldlinien beginnen an positiver Ladung)
- Feldlinien können durch **Probeladungen** ausgemessen werden
- Feld heißt **homogen**, wenn Feldlinien in einem Raumgebiet nach Betrag und Richtung gleich sind (z.B. in einem Plattenkondensator)





## Arbeit und Energie im elektrischen Feld

- **Verschiebung einer Probeladung  $Q_1$  im elektrischen Feld:**

$$dW = \vec{F} d\vec{s} = Q_1 \vec{E} d\vec{s} = Q_1 |\vec{E}| |d\vec{s}| \cos(\vec{E}, d\vec{s}) \quad \text{d.h. Arbeit um Ladung von a nach b zu bringen:}$$

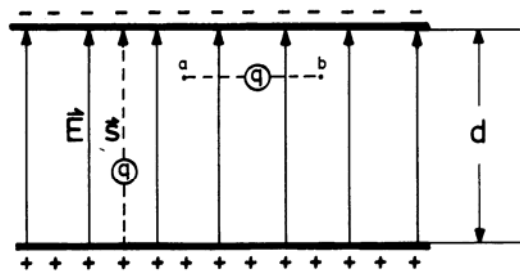
$$W_{ab} = Q_1 \int_a^b E ds \cos(\vec{E}, d\vec{s}) \quad \text{für Entfernung nach unendlich:}$$

$$\varphi = \frac{W_{a\infty}}{Q_1} = \int_a^\infty E ds \cos(\vec{E}, d\vec{s}) \quad \text{heißt **elektrisches Potential** des Punktes a im elektrischen Feld}$$

- damit ist jedem Punkt im elektrischen Vektorfeld ein Potential  $\varphi$  zugeordnet; dieses Potential bildet ein Skalarfeld: heißt **Potentialfeld**
- **Potentialdifferenz** zwischen zwei Punkten ist gleich der Spannung, die zwischen a und b liegt

$$\Delta\varphi = \varphi_a - \varphi_b = \frac{W_{ab}}{Q_1} = U \quad \text{also} \quad U = \int_a^b \vec{E} d\vec{s}$$

- **Beispiel: Bewegung einer Punktladung im Kondensator**



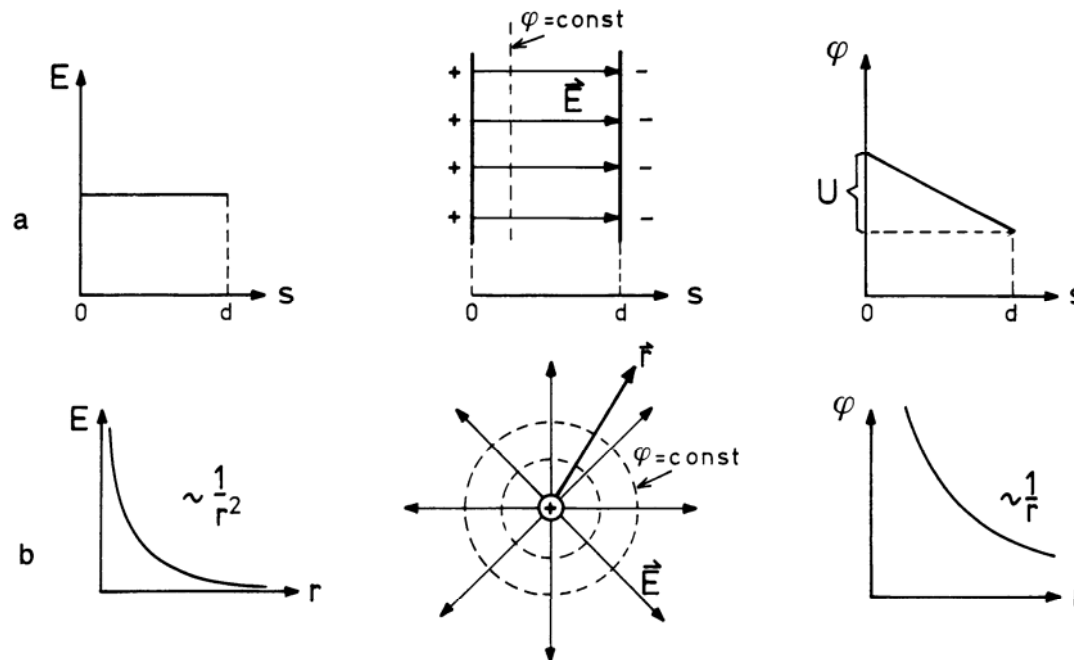
Zur Berechnung der Spannung  $U$  zwischen den Platten eines Kondensators.

1. Fall: entlang der Feldlinien  $U = \int_0^d \vec{E} d\vec{s} \quad U = Ed$

2. Fall: senkrecht zu Feldlinien  $\vec{E} \perp \vec{s}$ , daher  $U = 0$



- alle Punkte einer zu den Feldlinien senkrechten Flächen haben das gleiche Potential  $\varphi = \text{const.}$ ; diese Fläche heißt **Äquipotentialfläche**
- im **Plattenkondensator**: Flächen senkrecht zu Platten; für **Punktladung**: Kugelflächen



Feldlinien- und Äquipotentialflächenverlauf ( $\varphi = \text{const.}$ ) (a) in einem Plattenkondensator und (b) um eine Punktladung.

- in einem metallischen Leiter verschieben sich alle Ladungen so, dass überall gleiche Ladung existiert: verbundene **elektrische Leiter haben überall dasselbe elektrische Potential**, d.h. keine Spannungsdifferenz (gilt nur in Elektrostatik, nicht wenn Ströme fließen!); Oberfläche ist Äquipotentialfläche
- Erdoberfläche ist ebenfalls leitend: häufig Erdpotential = 0 gesetzt („geerdet“)

## Kondensator und Kapazität

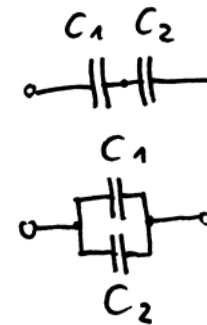
- Ladungstrennung  $Q$  durch anliegende Spannung  $U$

$$Q = \epsilon_0 \frac{A}{d} U \quad \text{zur Abkürzung: } C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad \text{ist Kapazität eines Plattenkondensators}$$

- $\epsilon_0$  ist elektrische Feldkonstante  $\epsilon_0 = 8,855 \times 10^{-12} \text{ CV}^{-1}\text{m}^{-1}$
- Einheit der **Kapazität**:  $1 \text{ CV}^{-1} = 1 \text{ As/V} = 1 \text{ F}$  (sprich „Farad“)
- Beispiel: Plattenkondensator  $d = 10 \text{ mm}$  und  $A = 100 \text{ cm}^2$

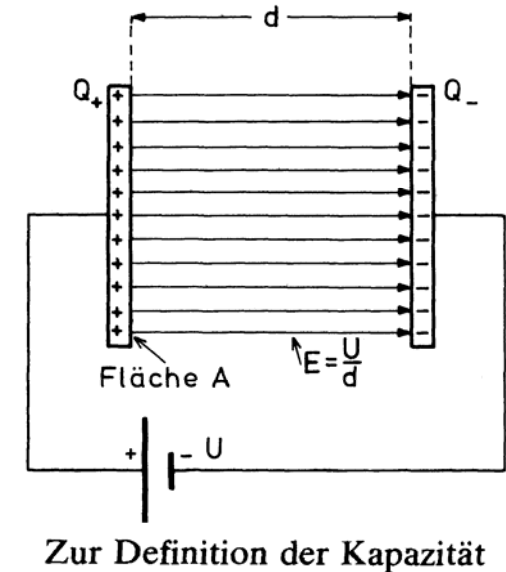
$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} = 8,9 \cdot 10^{-12} \text{ F} = 8,9 \text{ pF}$$

- **Reihenschaltung:**  $\frac{1}{C_{\text{ges}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$  oder  $C_{\text{ges}} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$
- **Parallelschaltung:**  $C_{\text{ges}} = C_1 + C_2$



$$C = \frac{Q}{U}$$

$C$  in Farad



Versuch E31 Plattenkondensator

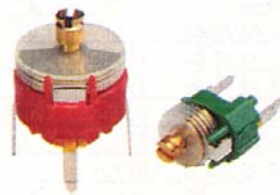
- praktische Bauformen



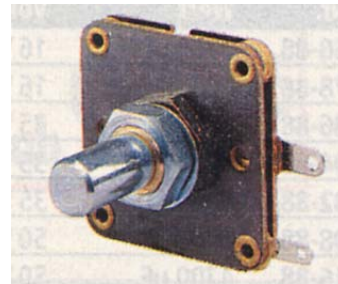
Tropfenform



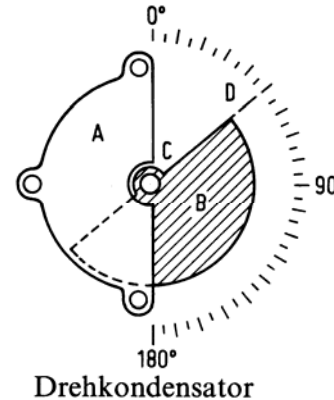
Elektrolyt-Kondensator



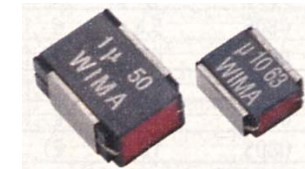
Trimm-Kondensator



Drehkondensator



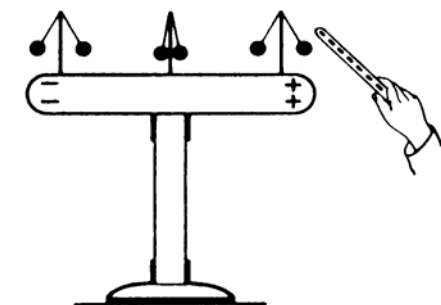
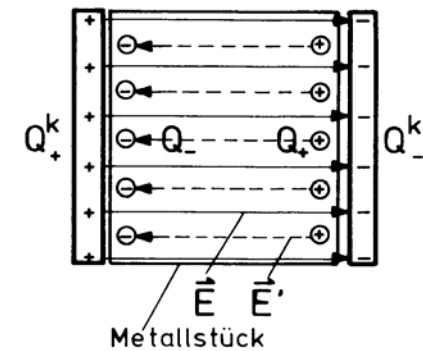
Drehkondensator



SMD-Kondensatoren

## Materie im elektrischen Feld

- **Leiter und Nichtleiter** verhalten sich im el. Feld unterschiedlich
- **Leiter im Feld:** auf freie Ladungsträger wirkt äußeres Feld  $F = -eE$ , d.h. freie Elektronen im Metall werden an Oberfläche gezogen (Nähe positive Platte); bis **Coulombkraft** der ladungstrennenden Kraft entgegengesetzt **gleich groß** ist
- dann ist „influenzierte“ Ladung gleich Ladung auf Kondensatorplatte
- Vorgang der Aufladung von Oberflächen von Leitern ist **Influenz**
- Da  $Q^k = -Q$  wird äußeres Feld komplett abgeschirmt, d.h. das Innere eines Leiters ist feldfrei: **Faradayscher Käfig**
- Bei **metallischem Leiter** sitzt Ladung nur auf **Oberfläche**

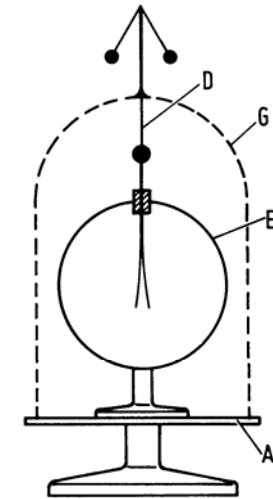
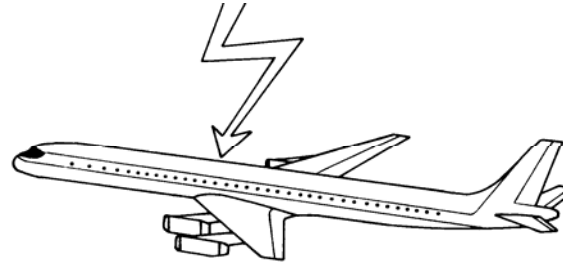
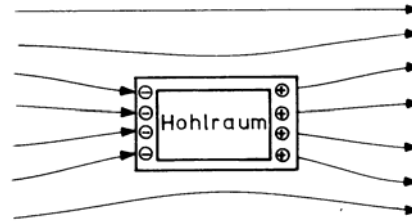


Nachweis der elektrischen Influenz

## Versuch E40

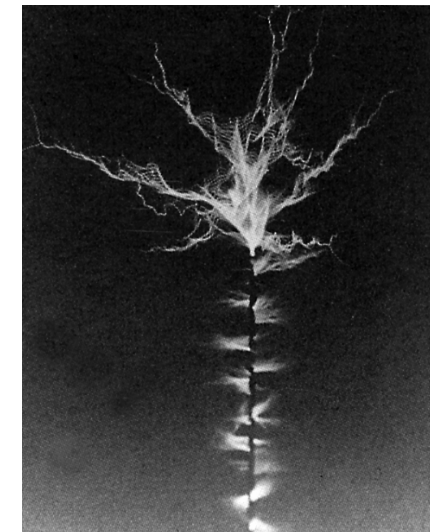
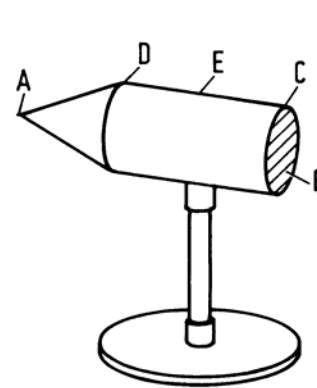
### Elektroskop im Faraday-Käfig

- Effekt kann benutzt werden, um einen **Raum feldfrei** zu machen: Raum wird mit metallischen Wänden umgeben
- Passagiere im Flugzeug oder Auto gegen Blitze geschützt, da Faraday'scher Käfig



Wirkung des Faraday-Käfigs

- **Ladungsdichte** auf leitender Kugel ist überall gleich
- an Spitze ist **Ladungsdichte** aber größer (aber trotzdem Äquipotentialfläche)
- ist groß, wenn Krümmungsradius klein ist
- Elektronen können an Spitzen austreten: Feldemission
- **Entladung** zuerst an Ecken und Spitzen



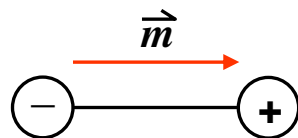
- kann am „elektrischen Flugrad“ beobachtet werden: Nach negativer Aufladung dreht sich das Rad, bis Ladung abgegeben



Elektrisches Flugrad

### Kräfte auf elektrischen Dipol im elektrischen Feld

- **elektrischer Dipol:** Zwei Punktladungen  $Q_+$  und  $Q_-$  mit festem Abstand  $l$



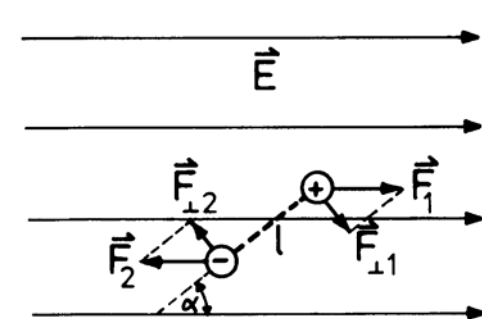
- der Betrag des Dipolmoments bei  $Q_+ = -Q_-$  :

$$m = Ql$$

- Kraft auf Dipol führt zu dem **Drehmoment  $M$**  und damit zu einer Drehung, bis  $\alpha = 0$  (parallel zum äußeren Feld)

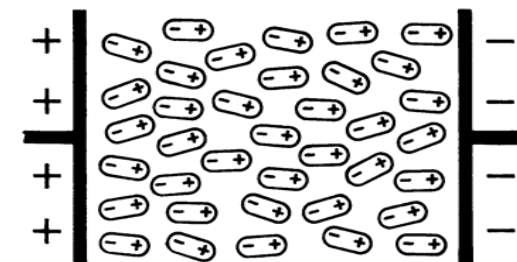
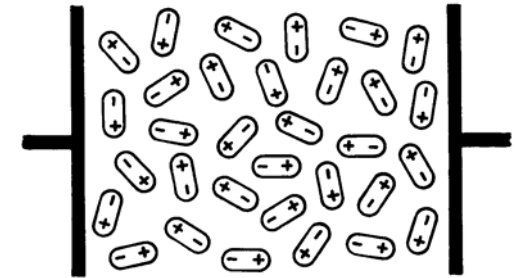
$$M = F_{\perp} l = QE l \sin \alpha = m E \sin \alpha$$

Versuch Dipol



Kräfte auf einen elektrischen Dipol im homogenen elektrischen Feld.

- **Nichtleiter (Dielektrikum) im Feld:** Dielektrikum enthält **keine freien Ladungsträger**; sind fixiert und örtlich gebunden
- im Feld erfolgt Ausrichtung als kleine Auslenkung aus Gleichgewichtslage; einzelne Teilchen (Atome, Moleküle) werden **polarisiert**
- Teilchen werden zu **elektrischen Dipolen**; heben sich im Inneren auf, resultierender Dipol nur an Oberflächen
- kann **äußeres Feld** im Inneren nur **vermindern**, aber nicht kompensieren

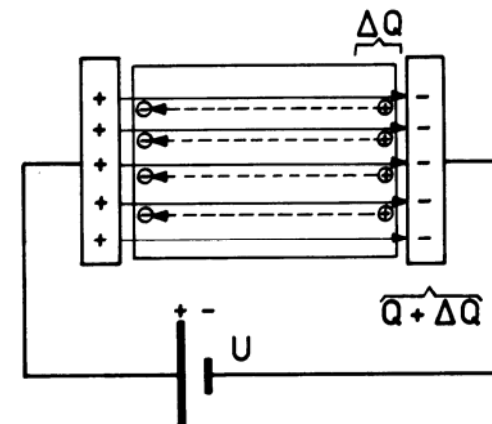


Dielektrikum im Feld

- die Kapazität eines Kondensators erhöht sich um einen Faktor, der **Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_r$**  heißt
- Ursache, teilweise wird Ladung auf Platten kompensiert, d.h. es fließt zusätzliche Ladung  $\Delta Q$  auf Kondensator (Kapazität erhöht sich;  $C=Q/U$ )
- $\epsilon_r = 1 \dots >1000$

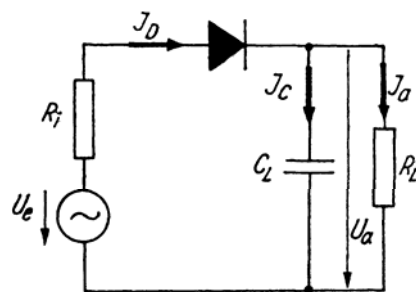
$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$$

$\epsilon_0$  ... elektrische Feldkonstante ( $8,855 \times 10^{-12} \text{ CV}^{-1}$ )



Kondensator mit Dielektrikum

- die Erhöhung der Kapazität eines Kondensators durch **Dielektrikum** wird für technische Kondensatoren ausgenutzt
- **Kapazität/Volumen** soll möglichst groß sein
- weitere Funktion des Dielektrikums: **Isolation**
- **Elektrolyt-Kondensator**: dünne Oxidhaut wird auf Al-Folie gebildet; andere Elektrode ist Elektrolyt; bei Durchschlag (zu hohe Spannung) bildet sich Oxidschicht erneut
- ist dann **polarisiert** (+ / - nicht vertauschbar), d.h. immer Gleichspannungsanteil > Wechselspannungsanteil nötig
- **hohe Kapazität** möglich, da Oxidschicht sehr dünn ist; benutzt man bspw. bei Gleichrichtung



Einweggleichrichter  
mit Ladekondensator

	$\epsilon_r$
Glas	6
Rutil ( $\text{TiO}_2$ )    zur opt. Achse	170
Eis (bei $-20^\circ\text{C}$ )	16
Bariumtitanat ( $\text{BaTiO}_3$ )	etwa 1000
Benzol	2,3
Glycerin	41
Wasser (bei $0^\circ\text{C}$ )	88
Luft	1,00059
Helium	1,00006

$$C_{\text{Plattenkondensator}} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d}$$

$$C_{\text{Kugelkondensator}} = 4\pi \epsilon_r \epsilon_0 \cdot \frac{r_a \cdot r_i}{r_a - r_i}$$

$$C_{\text{Zylinderkondensator}} = \frac{2\pi \epsilon_r \epsilon_0 h}{\ln(r_a/r_i)}$$

$$C_{\text{Paralleldrahtsystem}} = \frac{\pi \epsilon_r \epsilon_0 l}{\ln(d/r)}$$



## Energieinhalt des elektrischen Feldes im Kondensator

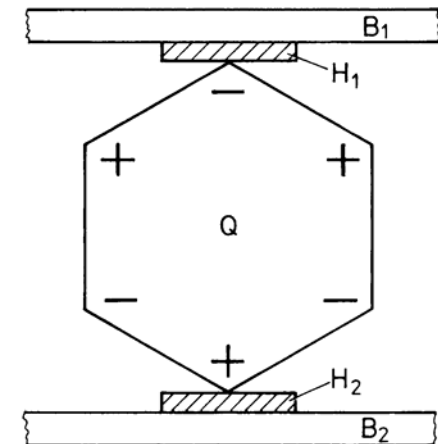
- elektrische Feldenergie eines geladenen Kondensators: Verschieben Ladung  $Q$  zwischen Platten über Strecke  $d$

$$W = \int_0^d F ds = \int_0^d QE ds = \int_0^{U_{\max}} Q dU = \int_0^{Q_{\max}} \frac{Q}{C} dQ = \frac{1}{2} \frac{Q_{\max}^2}{C} = \boxed{\frac{1}{2} CU_{\max}^2}$$

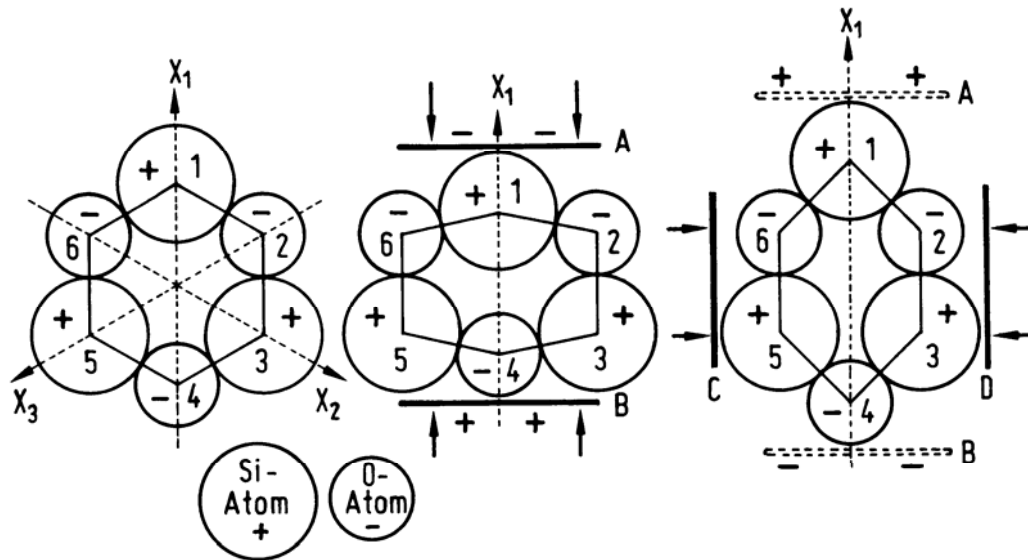
## Piezo- und Pyroelektrizität

- ein Kristall mit **ionischer Bindung** wird durch elektr. Feld **polarisiert**; ist auch durch **mechanische Spannung** möglich: es entstehen elektrische Dipole; Material wird polarisiert
- z.B. Quarzkristalle: bei äußerem Druck lässt sich Spannung nachweisen
- Anwendung:** Messung von Druck, Gasanzünder, Feuerzeug

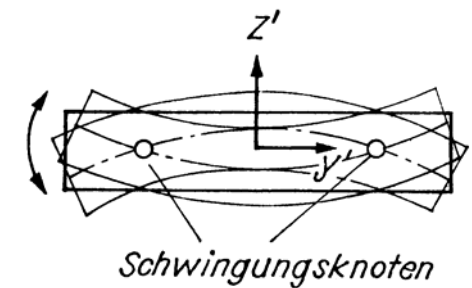
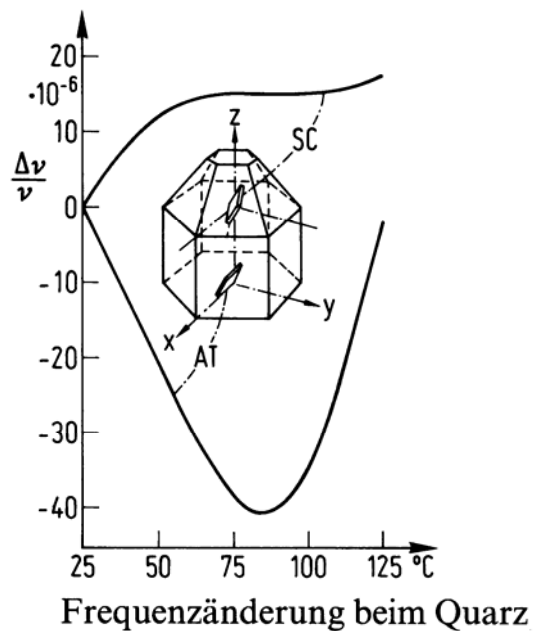
Versuch E 58 Piezoelektrizität



Piezoelektrizität beim Quarz durch Druck



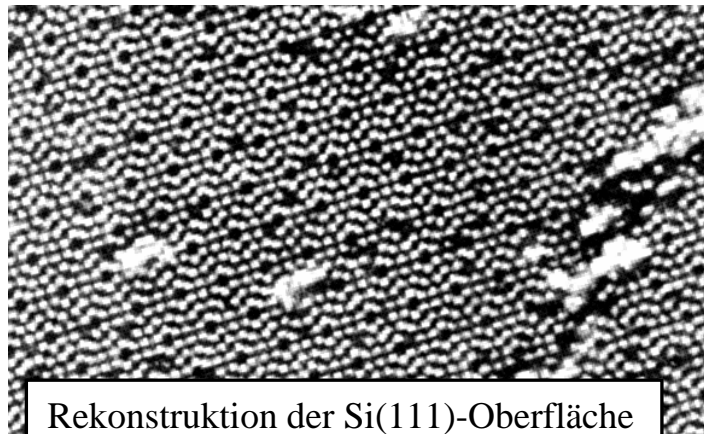
Zur Entstehung der Piezoelektrizität



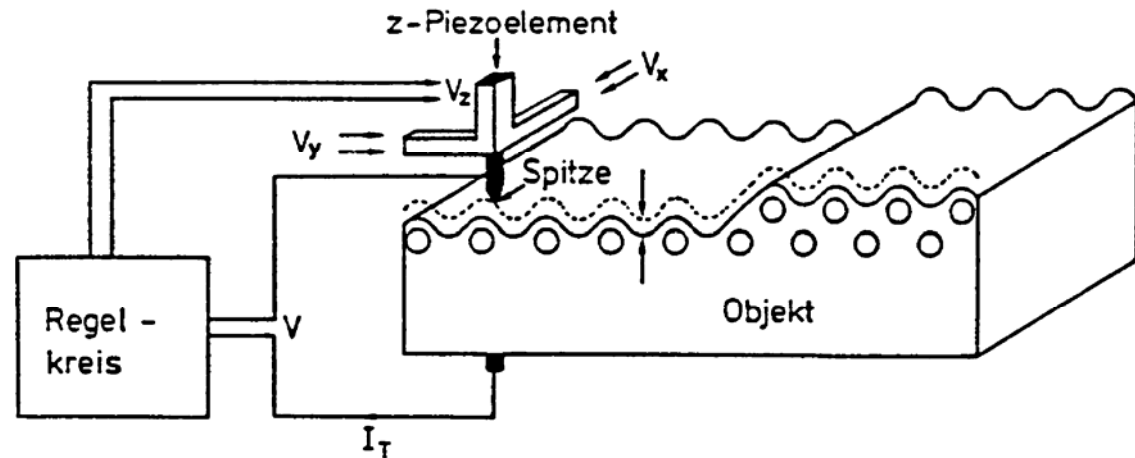
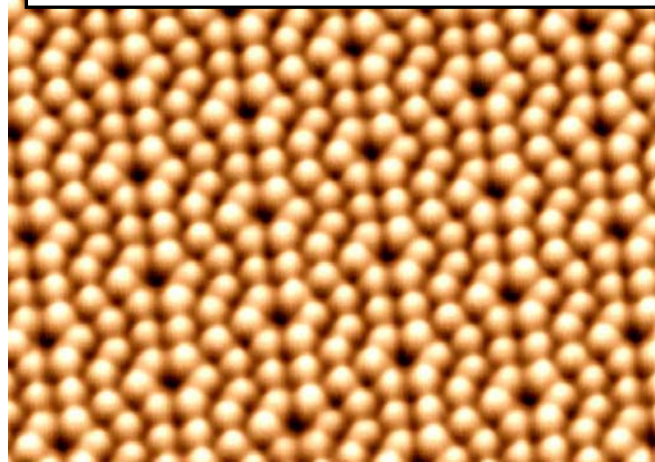
- weitere Anwendung als **Schwingquarz**; Erzeugung Frequenz-stabiler elektrischer Schwingungen; Anregung von mechanischen Schwingungen über aufgedampfte Elektroden; wird sehr häufig als **Zeitnormal** verwendet (Quarz-Uhren, Computer usw.)

- bei Verformung durch Erwärmung: ähnlicher Effekt - **Pyroelektrizität**

- Anlegen einer Spannung an Piezoelement führt zur mechanischen Deformation; dadurch geringste Längenänderungen möglich ( $\ll 1\text{nm}$ ); Anwendung: Rastertunnelmikroskop (STM: scanning tunneling microscope)
- Binnig und Rohrer: Physiknobelpreis 1986
- dreidimensionale Abbildung von Oberflächen mit atomarer Auflösung



Rekonstruktion der Si(111)-Oberfläche  
( $a = 0,54\text{ nm}$ )



Grundprinzip der Rastertunnelmikroskopie (STM). Eine Spannung  $V_z$  wird an das z-Piezoelement gelegt, um mit Hilfe des Regelkreises den Tunnelstrom konstant zu halten, während die Spitze über das Objekt durch Variationen von  $V_x$  und  $V_y$  zeilenförmig gerastert wird.

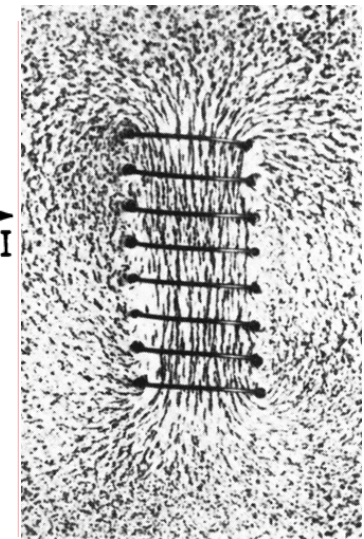
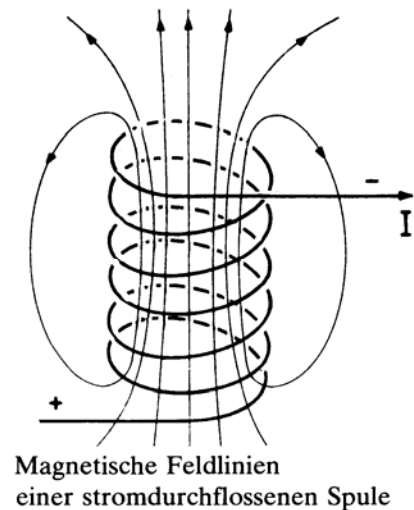
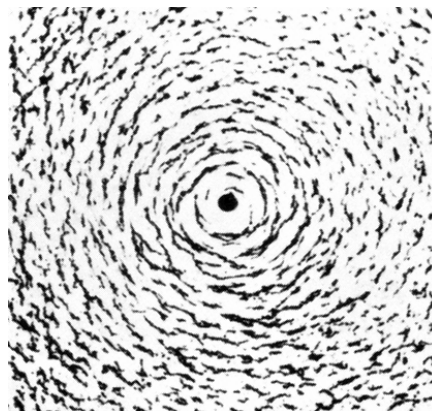
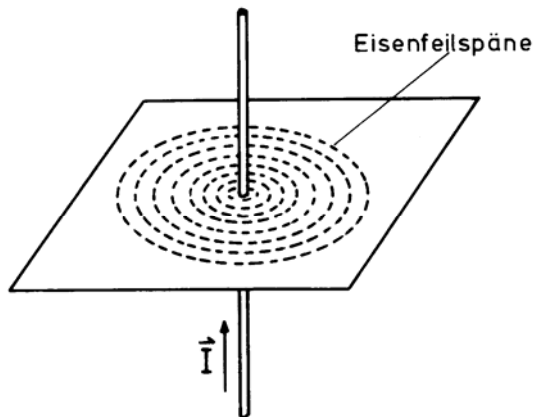
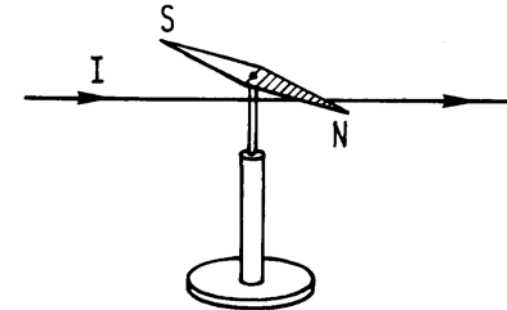
- Spitze kann mit einer Genauigkeit von  $< 0,01\text{ nm}$  positioniert werden (Bruchteil eines Atomabstandes)
- Problem: Spitze oft nicht ideal - hat evtl. mehrere Atome, die Tunnelstrom erzeugen
- STM ist heute Standardinstrument in der Oberflächenphysik

## 14.8 Das Magnetfeld

- schon seit Altertum bekannt: magnetische Kräfte z.B. am  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (Magnetisenstein)
- Magnetfeld wird durch **Dauermagnete** (Permanentmagnete) oder durch **Stromfluss** erzeugt

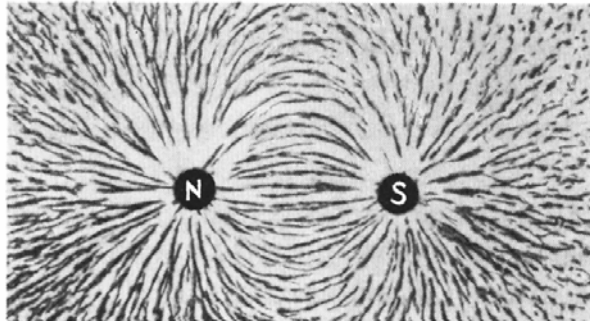
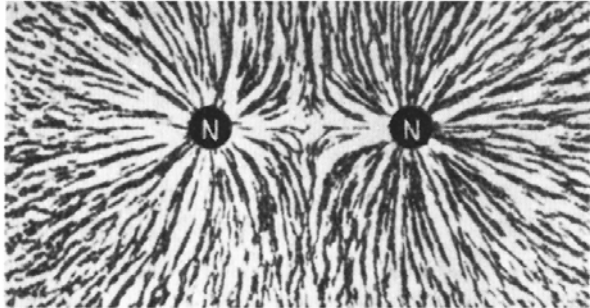
### magnetische Feldstärke und magnetische Induktion

- magn. keine magnetische „Punktquellen“, sondern nur **magnetische Dipole** (Nordpol und Südpol)
- ist wesentlicher Unterschied zu elektrischen Feldern
- Feldlinien von **Nord-** zum **Südpol**

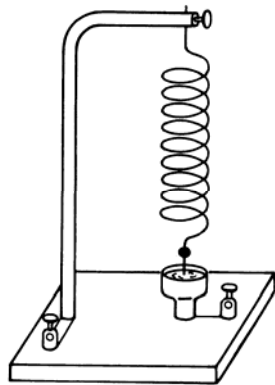




Feldlinienbild zweier gleichnamiger Magnetpole



Feldlinienbild zweier ungleichnamiger Magnetpole

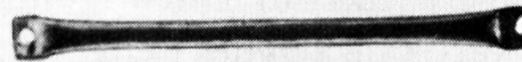


- Ende der Spule in leitfähiger Flüssigkeit (Salzlösung, Hg)
- bei Stromfluss hebt und senkt sich die Spule periodisch (ähnlich Klingel)

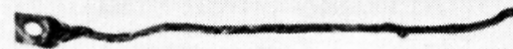
- große Ströme aus Kondensatorbatterie
- Leiterstrukturen ziehen sich zusammen



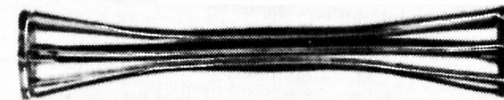
Kupferblech  $300 \cdot 75 \cdot 0,2 \text{ mm}^3$



Kupferrohr 300 mm lang  
Wandstärke 0,3 mm



Reuse mit 8 Drähten von 4 mm Durchmesser

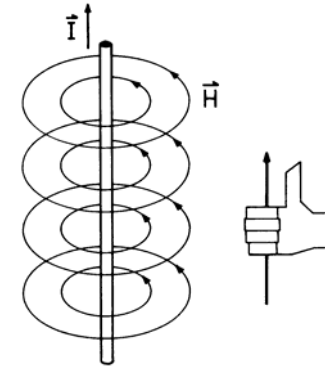


Elektrodynamische Wirkungen von Stoßströmen  
200 000 A, Entladungsdauer 30  $\mu\text{s}$

- **Richtung** der magnetischen Feldlinien durch „**rechte Hand-Regel**“
- im Inneren einer langen stromdurchflossenen Spule gilt:

$$H = I \frac{n}{l}$$

H ... Magnetische Feldstärke  
 I ... Stromstärke  
 n ... Windungszahl (für  $l > r$ , d.h. lange Spule)  
 l ... Länge der Spule



Magnetische Feldlinien  $\vec{H}$   
 um einen stromdurchflossenen Leiter  
 (Rechte-Hand-Regel)

- SI-Einheit der **magn. Feldstärke** ist  $A \cdot m^{-1}$
- die **magnetische Induktion B** (auch **magnetische Flussdichte**) ist:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$$

$\mu_0$  ... **magnetische Feldkonstante im Vakuum (Induktionskonstante)**  
 $\mu_0 = 1,256 \times 10^{-6} \text{ Vs/Am}$

- SI-Einheit von B: Tesla  $1T = 1 \text{ Vs/m}^2$  ( $1T = 10000 \text{ Gauss}$  (veraltet)); im Materie-erfüllten Raum gilt:

$$\vec{B} = \mu_{\text{rel}} \mu_0 \vec{H}$$

$\mu_{\text{rel}}$  ... **relative Permeabilität** (dimensionslos)

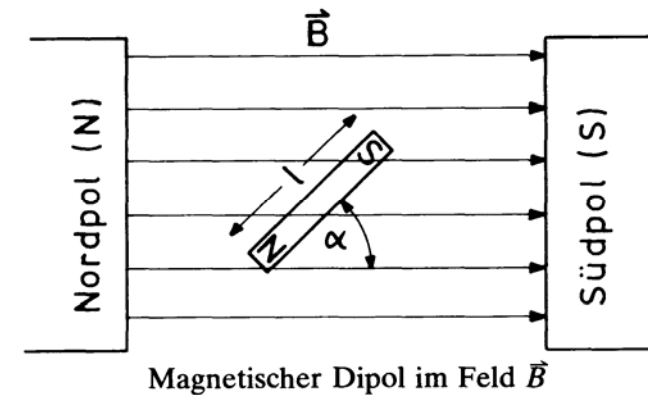
- $\mu_{\text{rel}}$  beschreibt Eigenschaften der Materie im magnetischen Feld (ähnlich der Dielektrizitätskonstanten  $\epsilon_{\text{rel}}$ )
- Stoff heißt:
  - diamagnetisch** wenn  $\mu_{\text{rel}} < 1$  (z.B. Wasser)
  - paramagnetisch** wenn  $\mu_{\text{rel}} > 1$  (hängt nicht von Feldstärke ab, z.B. Luft)
  - ferromagnetisch** wenn  $\mu_{\text{rel}} \gg 1$  (z.B.  $10^6$ ), es gilt  $\mu_{\text{rel}} = \mu_{\text{rel}}(H)$
- Ferromagnete sind bspw. Eisen, Kobalt, Nickel und Verbindungen, die solche Elemente enthalten; können permanent magnetisiert sein

## Kräfte auf einen magnetischen Dipol

- magnetischer Dipol dreht sich im äußeren Magnetfeld (Kompassnadel), d.h. mechanisches **Drehmoment** tritt auf

$$M = mB \sin \alpha$$

m ... magnetisches Dipolmoment  
M ... mechanisches Drehmoment



## Induktionsvorgänge

- nicht nur Feld entsteht durch Stromfluss, auch umgekehrt  $\Rightarrow$  Erregung elektromagnetischer Felder durch zeitlich veränderliche Magnetfelder ist: **elektromagnetische Induktion** (nicht zu verwechseln mit der magnetischen Induktion B)
- Definition des **magnetischen Flusses**  $\Phi$  (SI-Einheit: Vs)

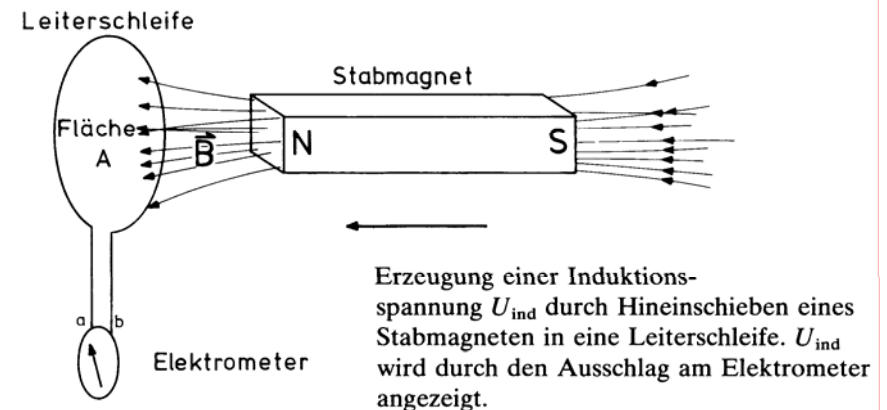
$$\Phi = \vec{B} \vec{A} = BA \cos \alpha$$

A ... Fläche

Versuch E201 elektromagn. Induktion

- in Leiterschleife induzierte Spannung ist gleich der zeitlichen Änderung des magnetischen Flusses: **Induktionsgesetz**
- induzierter Strom baut Magnetfeld auf, das äußerem entgegengesetzt ist, daher **Minuszeichen (Lenzsche Regel)**

$$U_{\text{ind}} = - \frac{d\Phi}{dt}$$



- Lenzsche Regel:** induzierter Strom ist immer Ursache entgegengesetzt

Versuch E205 Lenzsche Regel



- wenn die Änderung von  $\Phi$  durch Änderung der „effektiven“ Fläche:  
z.B. **Drehen einer Leiterschleife** im Magnetfeld mit konstanter Drehgeschwindigkeit, d.h. Winkel  $\alpha = \omega t$

$$U_{\text{ind}} = -\vec{B} \frac{d\vec{A}}{dt}$$

$$\Phi = \vec{B}\vec{A} = BA \cos \omega t, \text{ d.h.}$$

$$U_{\text{ind}} = -\frac{d\Phi}{dt} = \omega BA \sin \omega t = U_0 \sin \omega t$$

Es entsteht eine sinusförmige Wechselspannung (**Dynamomaschine**, vgl. Kap 16).

## Die Lorentz-Kraft

### Versuch E87 Lorentz-Kraft

- bewegte Ladungen erzeugen Magnetfeld: im äußeren Feld ergibt sich Kraftwirkung beider Felder: **Lorentzkraft**

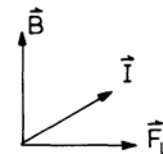
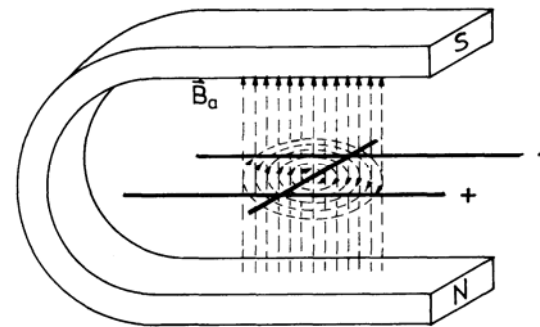
$$\vec{F} = Q(\vec{v} \times \vec{B})$$

wenn durch Leiterstück l Strom I fließt:

$$F_L = nevB \quad \text{mit} \quad nevB = QvB = QB \frac{l}{t} = IBl$$

$F_L = IBl$  falls Magnetfeld nicht senkrecht:

$$F_L = IBl \sin \alpha$$



Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter. Auf die beiden festen Leiterdrähte ist ein Drahtstück quer aufgelegt, das durch die Lorentz-Kraft  $\vec{F}_L$  nach rechts verschoben wird.

- für Bestimmung der **Richtung** der Lorentz-Kraft gilt **Dreifingerregel**

## Die Selbstinduktion

- Leiterschleife, durch die ein Strom fließt, baut Magnetfeld um sich auf, das in ihr selbst eine Spannung induziert: **Selbstinduktion**

$$U_{\text{ind}} \propto \frac{dI}{dt}$$

- Proportionalitätskonstante heißt **Induktivität L**

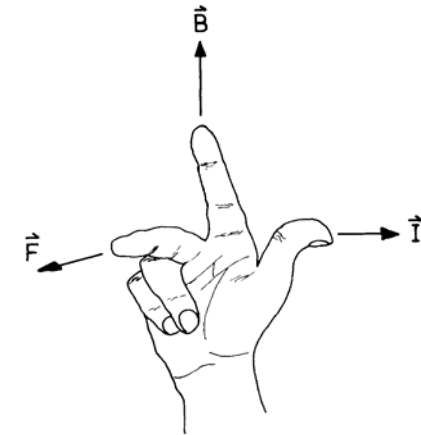
$$U_{\text{ind}} = -L \frac{dI}{dt}$$

- Minuszeichen, da induzierte Spannung der äußeren entgegengesetzt

- ist **Induktionsgesetz** für Spule

- Induktivität hängt vom Bau der Spule ab; Kernmaterial mit hoher Permeabilität  $\mu_{\text{rel}}$  erhöht Induktivität
- SI-Einheit für L: Vs/A = H (Henry)

$$L = \mu_0 \mu_{\text{rel}} \frac{n^2 A}{l}$$



Dreifinger-Regel der rechten Hand zur Festlegung der Richtung von  $\vec{F}$ ,  $\vec{I}$  und  $\vec{B}$  bei der Lorentz-Kraft.

## Magnetfelder des menschlichen Körpers

- Erdmagnetfeld:  $10^{-4}$  T; im Körper:  $10^{-9}$  ...  $10^{-14}$  T; können in speziellen Labors gemessen werden; entstehen durch Bioströme oder statisch durch Aufnahme durch z.B.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$
- MRT (magnetische Resonanztomographie): 1-3T
- Löschen von Magnetkarten: 1 mT
- Störung des Herzschrittmachers: 0.5 mT

# 14.9 Zeitabhängige Spannungen und Ströme

## Ein- und Ausschaltvorgänge beim Kondensator

- Spannung  $U_0$  wird über  $R$  an  $C$  angelegt; Spannung liegt nicht sofort an, sondern erhöht sich langsam
- Ursache: Spannungsabfall an  $R$  infolge des fließenden Stromes

$$U_0 = IR + \frac{Q}{C} \quad (\text{nach Maschensatz})$$

bilden zeitl. Ableitung:  $\frac{dU_0}{dt} = \frac{dI}{dt} R + \frac{dQ}{dt} \frac{1}{C}$

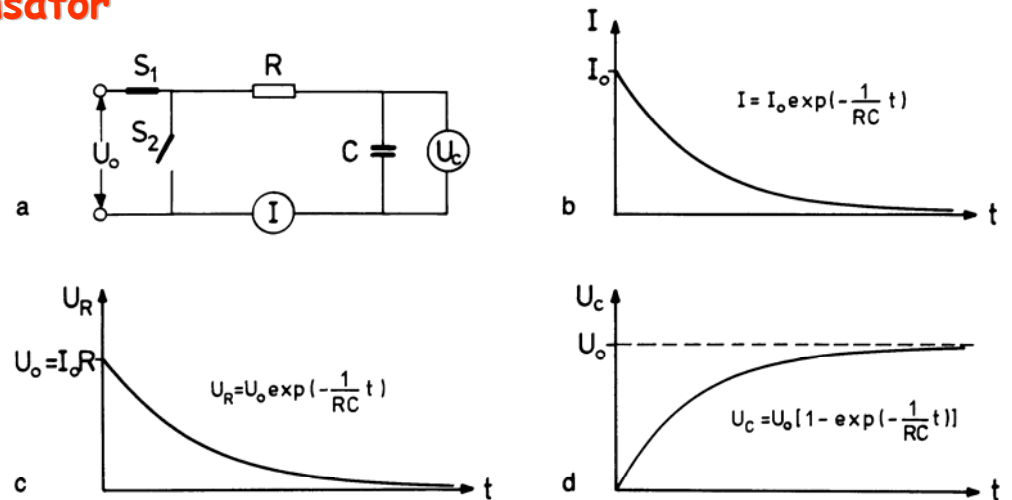
$U_0$  ist zeitl. konstant, mit  $dQ = I dt$

daher:  $\frac{dI}{I} = -\frac{1}{RC} dt$  nach Integration:

$\ln I = -\frac{1}{RC} t + K$  aus Anfangsbedingung  $I(t=0) = I_0$  folgt  $\ln I_0 = K$

$\ln \frac{I}{I_0} = -\frac{1}{RC} t$  oder  $I = I_0 e^{-\frac{t}{RC}}$

- $\tau = RC$  heißt **Zeitkonstante** des Kondensators
- gilt im Prinzip auch für Entladekurve



Aufladen eines Kondensators über einen Widerstand  $R$ : (a) Schaltkreis, (b) Aufladestrom  $I(t)$ , (c) Spannungsabfall  $U_R(t)$  an  $R$ , (d) Kondensatorspannung  $U_C(t)$ .

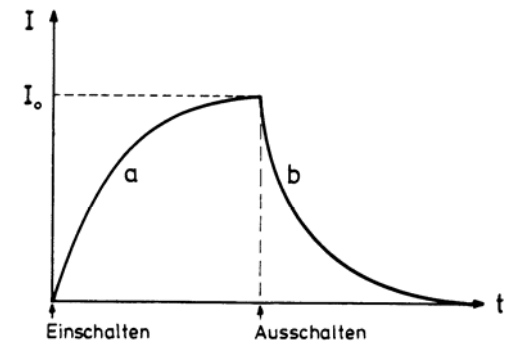
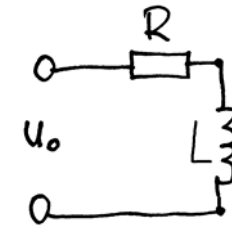
## Ein- und Ausschaltvorgänge bei einer Spule

- auch bei Anlegen einer Spannung an Spule: **Zeitverhalten**

$$U_0 - L \frac{dI}{dt} = IR \quad \text{analog zu Kondensator:}$$

$$I = \frac{U_0}{R} (1 - e^{-t \frac{R}{L}})$$

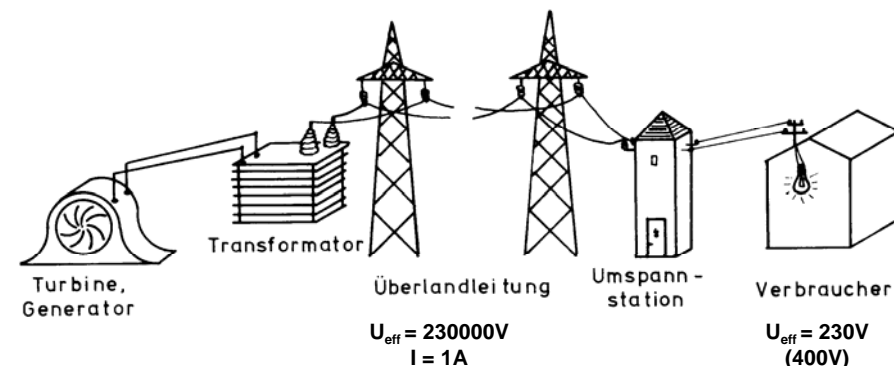
Versuch E233 Selbstinduktion

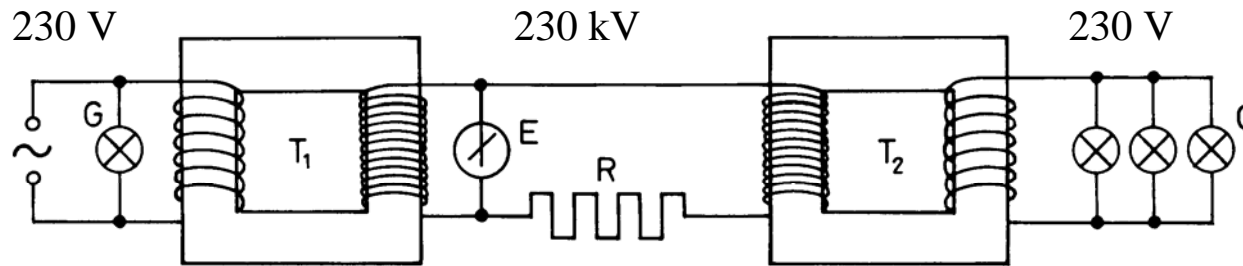


(a) Ein- und (b) Ausschaltverhalten des Stromes  $I(t)$  in einer Spule

## Wechselstrom und Drehstrom

- **Netzspannung** ist Wechselspannung mit nominal: 230V und 50 Hz; im Haushalt ist Innenwiderstand  $R_i < 1\Omega$
- ist leicht in jede nötige Spannung zu transformieren
- Transport als **Hochspannung** z.B. 230 kV; Umspannstationen im Wohngebiet liefern Drehstrom
- Drehstrom wird durch **Generator** erzeugt, der 3 Spulen mit  $120^\circ$  Versatz enthält
- Spannungen sind je  $120^\circ$  ( $2\pi/3$ ) phasenverschoben
- Spannungen gegeneinander ca. 400V, gegen Erde 230V; einige Verbraucher im Haushalt verwenden direkt **3 Phasen des Drehstroms** (z.B. Elektroherd mit speziellem Anschluss)





Versuch zur elektrischen Energieübertragung

- bei 230V und einer entnommenen Leistung von 5 kW (ein Haushalt) beträgt Strom:  $I = P/U = 5000\text{VA}/230\text{V} = 21,7 \text{ A}$  (wegen  $P = U I$ )
- Widerstand einer Stromversorgungsleitung (Versorgungskabel aus Cu mit ca. 100m Länge und Drahtdurchmesser von 1mm) :

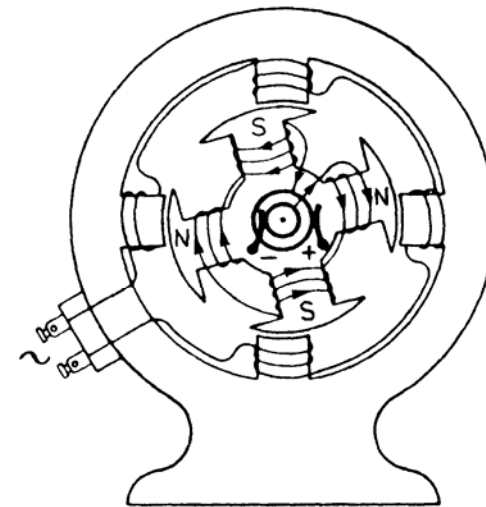
$$R = \rho \frac{l}{\pi D^2} = 1,6 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m} \cdot \frac{2 \cdot 100\text{m}}{\pi \cdot 0,001^2 \text{m}^2} = 1,0 \Omega$$

- damit wird Spannungsabfall  $U_{\text{Verlust}} = I R = 21,7 \text{ V}$  (evtl. gerade noch akzeptabel)  
Verlustleistung ist  $P_{\text{Verlust}} = U_{\text{Verlust}} I = 470,9 \text{ W}$  (9,4%)
- Betrieb eines Mehrfamilienhauses mit  $P = 30 \text{ kW}$  an solch einer Leitung unmöglich
- nach Transformation auf 230 kV: Strom  $I = 21,7 \text{ mA}$ ;  $P_{\text{Verlust}} = 0,472 \text{ mW}$  ( $9,4 \times 10^{-6} \%$ )
- daher: **elektrische Energie** wird über **größere Strecken** mit **Hochspannung** transportiert

## Dynamomaschine

- Hauptanteil unserer Energie wird mit **Dynamomaschinen** gewonnen (Kraftwerke, Windenergie, Lichtmaschine)
- Ausnahmen: Solarenergie, Brennstoffzelle
- Prinzip: in Magnetfeld bewegte Leiterschleife erzeugt Wechselspannung (vgl. Kap. 14.8)
- für große Leistungen (>100 kW) muss man Schleifkontakte für erzeugte Spannung (Lastspulen) vermeiden
- **Spulen** daher **stationär**, Magnetfeld im Inneren wird gedreht; nur Gleichstrom für Magnetfeld wird über Schleifkontakte übertragen
- **Elektromotor**: Umkehrung der Dynamomaschine

Versuch E215 Dynamomaschine



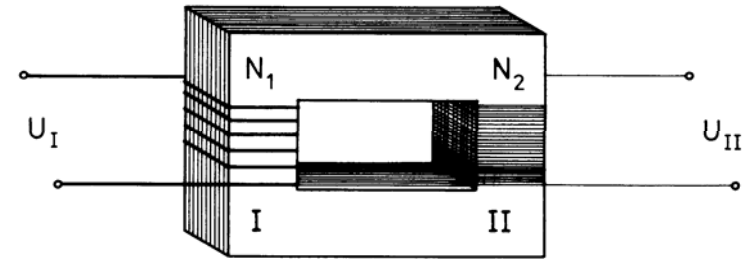
Wechselstromgenerator

## Transformator

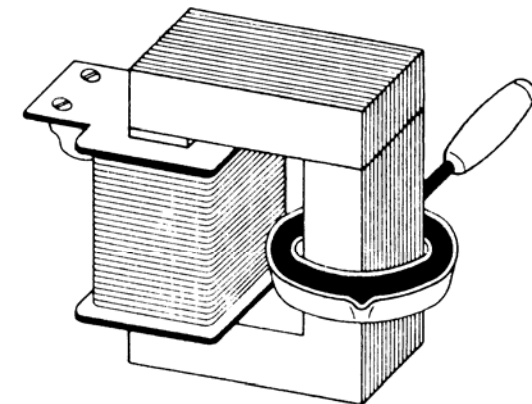
- Energieübertragung mit Hochspannung; in der Nähe des Verbrauchers: Transformation zu niedrigen Spannungen
- es werden im Haushalt unterschiedliche Spannungen benötigt: Hochspannung für Bildschirme; Niederspannung, z.B. Klingel
- nach **Induktionsgesetz** entsteht in Wicklung 2 eine Spannung, wenn durch Wicklung 1 ein **Wechselstrom** fließt
- Spannungen  $U_I$  und  $U_{II}$  verhalten sich, wie die Windungszahlen  $N_1$  und  $N_2$

$$\frac{U_I}{U_{II}} = - \frac{N_1}{N_2}$$

- negatives Vorzeichen wegen Phasenverschiebung zwischen  $U_I$  und  $U_{II}$
- wird  $N_2$  sehr klein gewählt, ist Spannung ebenfalls sehr klein, aber Strom ist sehr hoch (geringer Widerstand von  $N_2$  und geringer Innenwiderstand von  $U_{II}$ ): **Induktionsofen**



Transformator



Modellversuch zum elektrischen Induktionsofen

### Versuch E244

Modell zum Induktionsschmelzen

### Versuch E239

Hochstromtrafo



## Wechselstromkreis: kapazitiver Widerstand

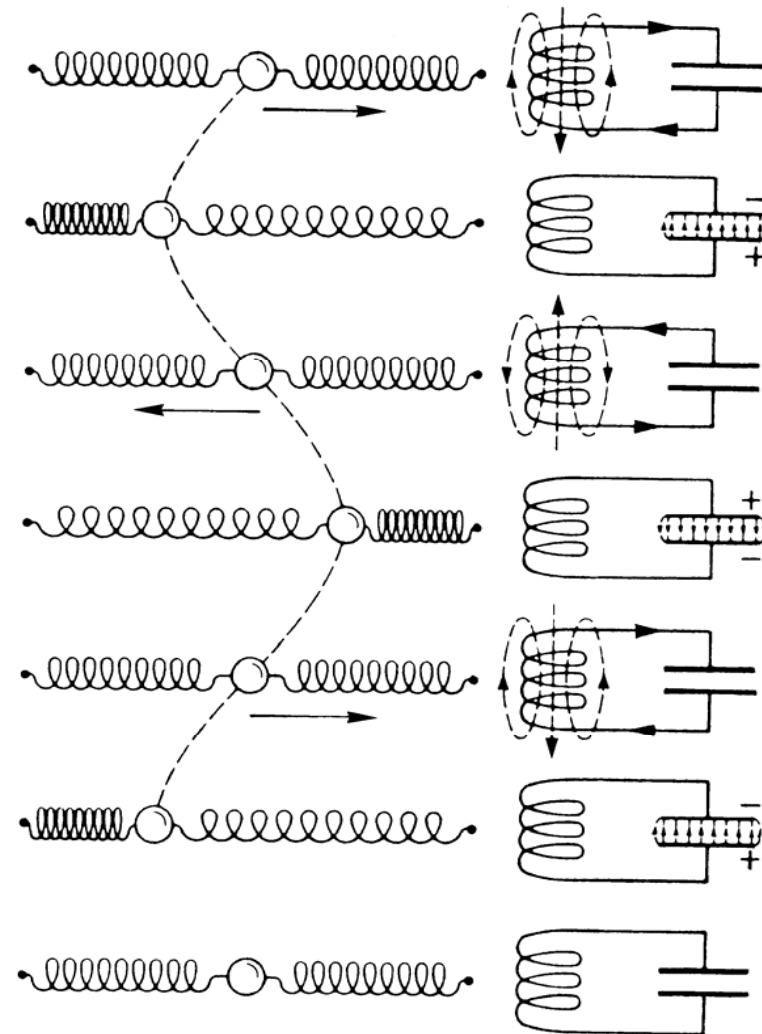
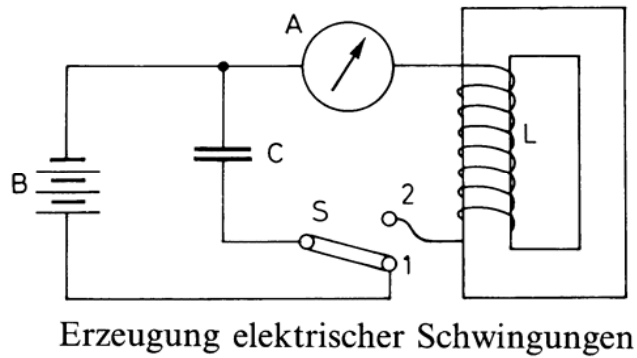
- im **Gleichspannungskreis** fließt nur kurze Zeit Strom durch Kondensator
- im **Wechselstromkreis** wird Ladung und Entladung ständig wiederholt: ständiger Stromfluss
- Wechselstromwiderstand des **Kondensators** (ohne vorgeschalteten R):  $R_{\text{kap}} = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$
- d.h. geringer Widerstand für große Kapazität
- Besonderheit: bei diesem Stromfluss wird **keine** elektrische Energie verbraucht!
- Energie, die in Kondensator hineinfließt, wird bei nächster Halbwelle komplett wieder entnommen, daher ist Kondensator ein **Blindwiderstand** oder **Scheinwiderstand**
- **Spannung** folgt aber **Strom** mit einer **Phasenkonstanten** von **90°** ( $\pi/2$ ) **nach**
- Spannung ist maximal, wenn Ladung am größten ist, d.h. wenn Strom auf Null abgefallen ist

## Wechselstromkreis: induktiver Widerstand

- für Spule im Wechselstromkreis
- **Spannung** eilt hier **Strom** um **90°** **voraus**
- während  $R_{\text{kap}}$  mit größerer Frequenz kleiner wird, nimmt  $R_{\text{ind}}$  mit Frequenz zu

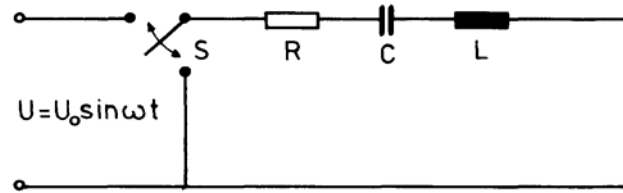
$$R_{\text{ind}} = \omega L = 2\pi fL$$

# Der Schwingkreis



Entstehung mechanischer und elektrischer Schwingungen

- Serienschwingkreis:



ohne Dämpfung (R=0):

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad \text{d.h.} \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{bzw.}$$

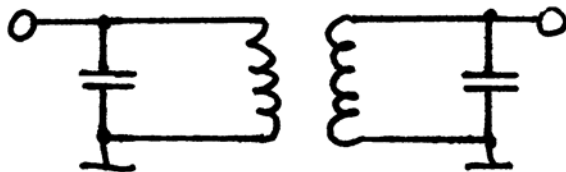
$$f_{\text{res}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

- Resonanzfrequenz im gedämpften Schwingkreis (R ≠ 0):

$$f_{\text{res}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$$

ist **Thomsonsche Schwingungsgleichung**  
(Serienschwingkreis)

- beim Schwingkreis werden **periodisch die magnetische Feldenergie** der Spule in die **elektrische Feldenergie** des Kondensators umgewandelt
- **gekoppelte Schwingkreise**: erzwungene Schwingung im Sekundärkreis



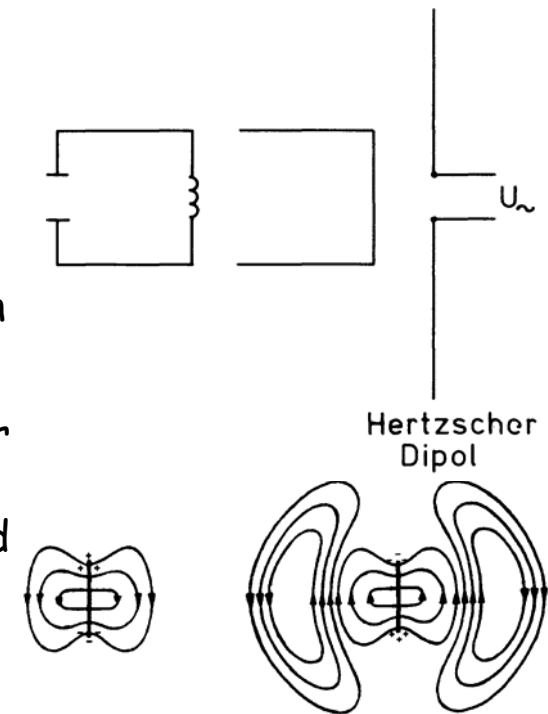
- Kopplung kann **induktiv** (wie im Beispiel) oder **kapazitiv** erfolgen
- wenn beide Schwingkreise die gleiche Eigenfrequenz: Analogon zu mechanisch gekoppelten Schwingungen (vgl. Kap. 6.6)

## Elektromagnetische Wellen

- Schwingkreis für sehr hohe Frequenzen kann einfach aus einem Draht bestehen, der auch noch auseinander gezogen wird: der **Hertz'sche Dipol**
- von einem solchen Dipol lösen sich die Feldlinien ab und breiten sich als elektromagnetische Wellen frei im Raum aus
- Dipol wird so zur **Sendeantenne**; am Empfangsort dient solcher Dipol zur Umwandlung der elektromagnetischen Strahlung in elektrische Spannung; diese elektrische Wechselspannung wird Schwingkreis zugeführt zur Frequenztrennung
- Wellenlänge  $\lambda$  der Strahlung:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

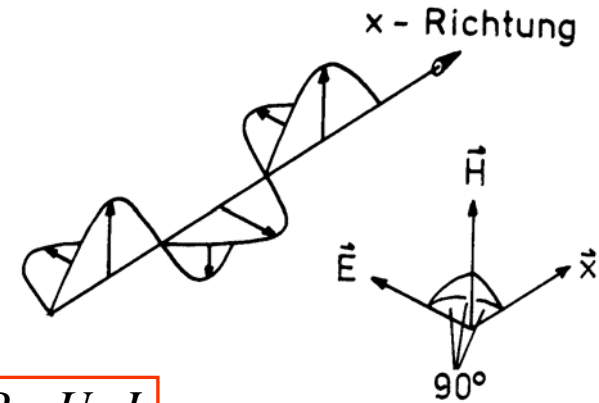
c ... Lichtgeschwindigkeit im Vakuum



	Wellenlänge in m	Frequenz in Hz	
Rundfunk Wellen	$10^4$	$3 \cdot 10^4$	
	Langwellen $10^3 = 1 \text{ km}$	$3 \cdot 10^5$	Langwelle: 150 ... 300 kHz
	Mittelwellen $10^2$	$3 \cdot 10^6$	Mittelwelle: 500 ... 1650 kHz
	Kurzwellen $10^1$	$3 \cdot 10^7$	Kurzwellen: 1,8 ... 30 MHz
	UHF → Radar → $10^0 = 1 \text{ m}$	$3 \cdot 10^8$	UKW-Rundfunk: 87 ... 108 MHz
	$10^{-1}$	$3 \cdot 10^9$	Radar, Handys, Satelliten: 0,5 ... 5 GHz
optische Wellen	Ultrakurzwellen $10^{-2} = 1 \text{ cm}$	$3 \cdot 10^{10}$	
	$10^{-3} = 1 \text{ mm}$	$3 \cdot 10^{11}$	
	Oberfläche des menschlichen Körpers → Wärme (IR) Strahlen $10^{-4}$	$3 \cdot 10^{12}$	Wärme
	$10^{-5}$	$3 \cdot 10^{13}$	
	Oberfläche der Sonne → sichtbares Licht $10^{-6} = 1 \mu\text{m}$	$3 \cdot 10^{14}$	Licht
	$10^{-7}$	$3 \cdot 10^{15}$	
Röntgenstrahlen	ultraviolette Strahlen $10^{-8}$	$3 \cdot 10^{16}$	
	$10^{-9} = 1 \text{ nm}$	$3 \cdot 10^{17}$	
	weiche Röntgenstrahlen $10^{-10} = 1 \text{ \AA}$	$3 \cdot 10^{18}$	
	harte Röntgenstrahlen ultraharte Röntgenstrahlen $10^{-11}$	$3 \cdot 10^{19}$	aus Röntgenröhren
	$10^{-12} = 1 \text{ pm}$	$3 \cdot 10^{20}$	
Gammastrahlen $10^{-13}$	$3 \cdot 10^{21}$	aus Kernzerfall instabiler Isotope	
	$10^{-14}$	$3 \cdot 10^{22}$	

Spektrum elektromagnetischer Wellen

- elektromagnetische Welle ist **Transversalwelle**
- **Lichtgeschwindigkeit** im Vakuum:  $c_0 = 299\,792\,458\text{ m/s}$  ist **Obergrenze** aller Geschwindigkeiten für Energie- oder Materieausbreitung



## elektrische Leistung und Arbeit

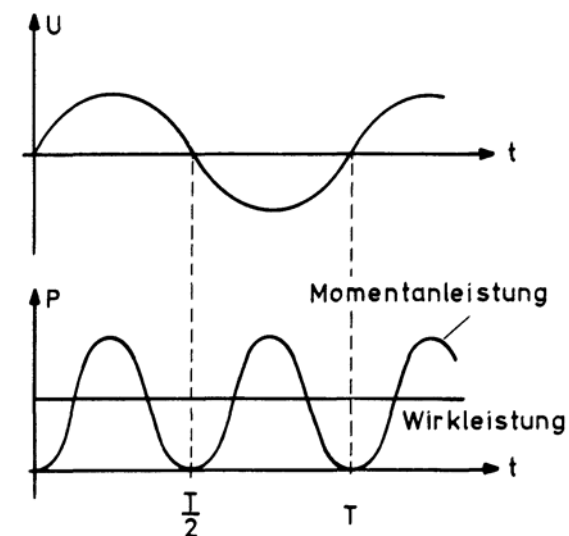
- Produkt aus Spannung und Strom ist **elektrische Leistung**  $P = U \cdot I$
- verrichtete **elektrische Arbeit**:  $W = U \cdot I \cdot t = P \cdot t$
- Einheiten f. Leistung: **Watt**  $1\text{ W} = 1\text{ VA}$  bzw. Arbeit: **1 Joule**  $= 1\text{ Ws}$ ,  $1\text{ kWh} = 3,6 \times 10^6\text{ Ws}$
- an einem Ohmschen Verbraucher R gilt:

$$P = \frac{U^2}{R} = I^2 R \quad \text{wegen } R = \frac{U}{I} \text{ und } P = U \cdot I$$

- **Ohmscher Widerstand**: keine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung
- ist reine Wirkleistung **Versuch E117** Stromwärme
- im Fall von sinusförmigen Wechselspannungen: Gleichungen gelten für **Effektivwerte** von Strom und Spannung (werden als Nominalspannung angegeben)

$$U_{\text{Spitze}} = \sqrt{2} U_{\text{eff}}$$

- Lichtnetz:  $U_{\text{eff}} = 230\text{ V}$ , d.h.  $U_{\text{Spitze}} = 325\text{ V}$



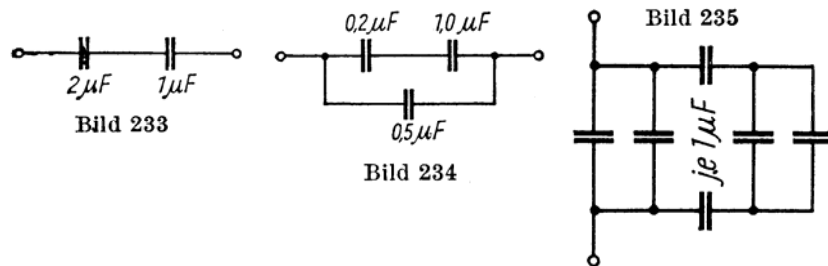
- bei Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung (i.A. bei Auftreten von Induktivitäten und Kapazitäten) ist zeitlicher Mittelwert der **Wirkleistung**:
- $\cos \varphi$  ist **Leistungsfaktor**; gleich 1 für Ohmsche Widerstände
- wird Null, wenn nur kapazitiver oder induktiver Anteil: **Scheinleistung**

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2} U_0 I_0 \cos \varphi$$

## Übungsaufgaben zu Kap. 14.7 –14.9: Elektrizitätslehre

**1028.** Welcher Strom fließt aus einem Elektrometer von der Kapazität 25 pF ab, wenn es anfänglich eine Spannung von 60 V anzeigt, die innerhalb 24 s auf 42 V zurückgeht?

**1029. 1030. 1031.** Es ist die Gesamtkapazität der auf den Bildern 233, 234, 235 angegebenen Schaltungen zu berechnen.

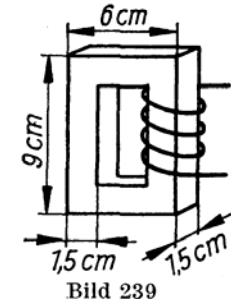


**1048.** Das elektrische Feld in einem Zweiplattenkondensator soll einem darin befindlichen Elektron die gleiche Beschleunigung erteilen, wie das Schwerefeld der Erde einem fallenden Stein. Welche Spannung muß zwischen den in 1 cm Abstand befindlichen Platten bestehen?

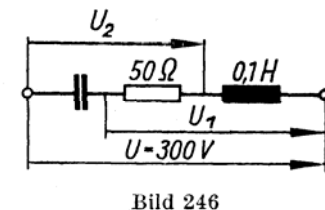
**1049.** Mit welcher Kraft stoßen sich 2 Metallkugeln von je 1 mm Radius im Mittelpunktsabstand 3 cm ab, wenn sie beide auf die Spannung 220 V gegen Erde aufgeladen werden?

**1057.** An den Enden einer 15 cm langen eisenfreien Zylinder-spule von 850 Windungen (mittlere Windungslänge 6 cm) aus 0,3 mm dickem Kupferdraht ( $\rho = 0,0175 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$ ) liegt eine Spannung von 20 V. Welche Induktion herrscht im Spuleninnern?

**1058.** In dem auf Bild 239 angegebenen Eisenkern herrscht eine Induktion von  $1,5 \text{ Vs}/\text{m}^2$ , wenn die aus 500 Windungen bestehende Spule von 1,2 A durchflossen wird. Wie groß ist die relative Permeabilität des Eisens?



**1094.** Welche Kapazität muß der Kondensator in der auf Bild 246 angegebenen Schaltung haben, wenn sich die Spannungen  $U_1$  und  $U_2$  wie 1 : 2 zueinander verhalten sollen, und welcher Strom fließt in diesem Fall? ( $f = 50 \text{ Hz}$ )





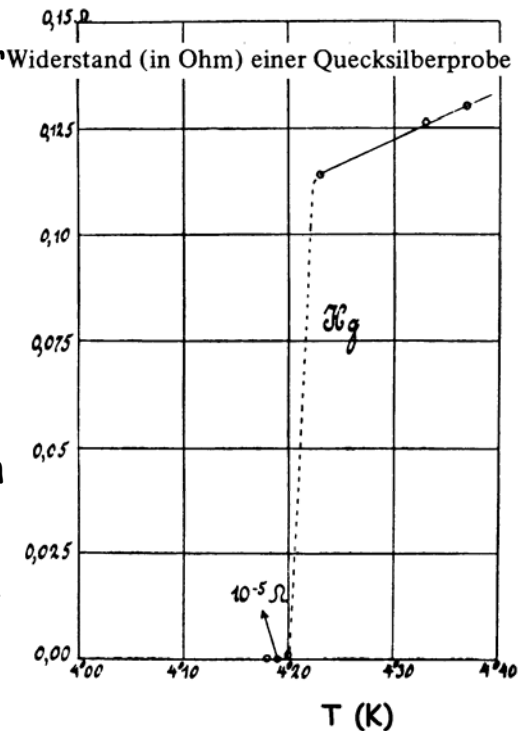
## Stromleitung in Festkörpern

- sehr unterschiedliche Leitfähigkeit (ca. 40 Größenordnungen)

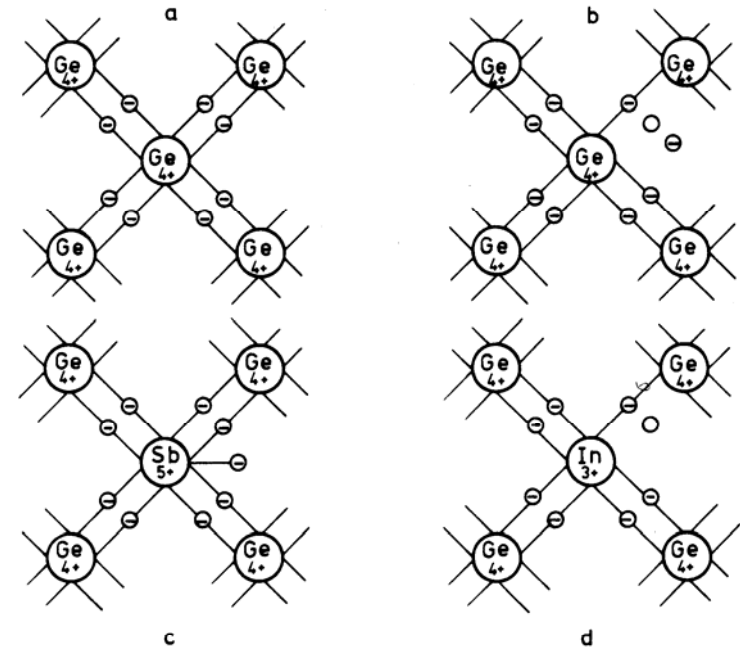
spezifische Leitfähigkeit  $\sigma$  einiger Materialien

Kategorie	Material	$\sigma$ ( $\Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$ )
Nichtleiter (Isolatoren)	Bernstein	$10^{-26}$
	PVC	$10^{-16}$
	Glas	$10^{-14}$
	Marmor	$10^{-10}$
Halbleiter	Ge (reinst, 300 K)	1
	Ge (dotiert, 300 K)	$10^3$
Leiter	Fe	$10^7$
	Cu	$10^8$
	Pb (T $\approx$ 10 K)	$10^7$
Supraleiter	Pb (bei $< 5$ K)	$> 10^{20}$

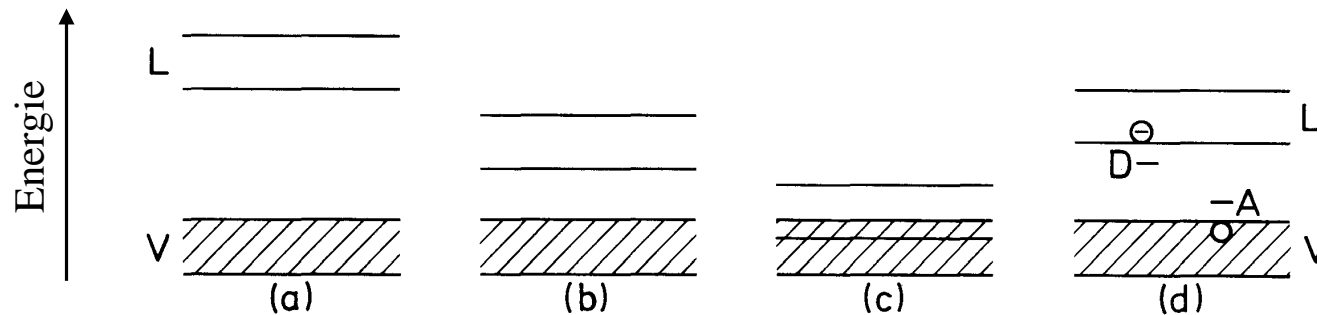
- **Supraleiter:** spezifischer Widerstand wird sprunghaft unmessbar klein unterhalb kritischer Temperatur  $T_C$
- Entdeckung durch Kamerlingh Onnes 1911 in Leiden
- Strom in einem Ringleiter fließt über Jahre mit konstanter Stromstärke
- festkörperphysikalische Erklärung bisher nicht vollständig
- **Metalle:** einige Elektronen jedes Atoms können sich frei zwischen Atomrümpfen bewegen (freie Leitungselektronen)
- Driftbewegung durch elektrisches Feld sehr gering: **ca.  $1 \text{ cm s}^{-1}$**
- es erfolgt Streuung der Elektronen infolge der Wärmeschwingungen des Kristallgitters (Phononen)
- daher: Widerstand nimmt mit Temperatur zu
- **hohe Ausbreitungsgeschwindigkeit** der elektrischen Information auf einem Draht nicht durch Transport der Elektronen, sondern durch **Ausbreitung des elektrischen Feldes**
- Widerstand gering, weil große Zahl von Ladungsträgern und relativ hohe Beweglichkeit
- **Halbleiter:** haben bei tiefen Temperaturen keine freien Ladungsträger
- alle Elektronen an Atome gebunden; bei hoher Temperatur werden einzelne Elektronen von Atomen abgelöst, können sich frei bewegen (intrinsische bzw. Eigenleitung)
- dabei entsteht je ein freies Elektron und ein frei bewegliches „Loch“ (Defektelektron)
- Einbau geeigneter Fremdatome: zusätzliche freie Ladungsträger entstehen



- Effekt heißt **Dotierung**; es kann **Elektronenleitung** (n-Leitung) oder **Löcherleitung** (p-Leitung) erreicht werden
- **Isolatoren**: auch bei hoher Temperatur kann kein Valenzelektron die Atome verlassen, daher sehr hoher Widerstand, da freie Ladungsträger völlig fehlen
- vereinfachte Erklärung durch **Bändermodell**
- Halbleiter und Isolatoren: **Valenzband** ist voll besetzt, **Leitungsband** ist leer; **Bandlücke** bei Halbleitern kann durch Elektronen durch thermische Anregung überwunden werden (bei hohen Temperaturen), bei Isolatoren nicht



Germanium als Halbleiter:  
 (a) natürliches Germanium bei sehr niedriger Temperatur (b) bei Zimmertemperatur (c) n-Germanium (d) p-Germanium

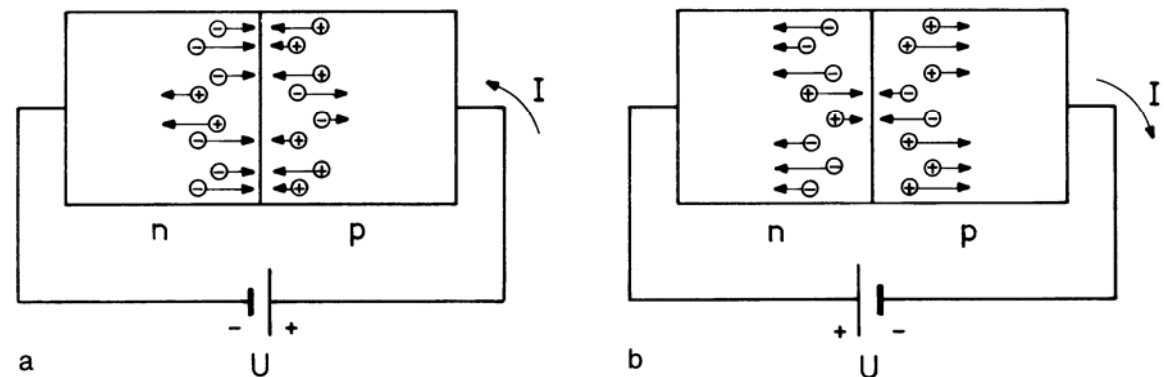


Bändermodell (V = Valenzband, L = Leitungsband); (a) eines isolierenden Kristalls (großer Bandabstand); (b) eines Halbleiters ohne Störstellen mit Eigenleitung (kleiner Bandabstand); (c) eines Erdalkalimetalls (überlappende Bänder); (d) eines Halbleiters mit zwei verschiedenen Störstellen (A = Akzeptor, D = Donator).

## 15.3 Halbleiterelektronik

### Halbleiterdiode

- **Diode** bestehen aus zwei unterschiedlich dotierten Halbleitern, d.h. haben **p-** und **n-Gebiet**
- Diode ist undurchlässig in **Sperrrichtung** (plus an n-Gebiet), ist leitfähig in **Durchlassrichtung** (plus an p-Gebiet)
- kann zur Gleichrichtung von Wechselspannung genutzt werden

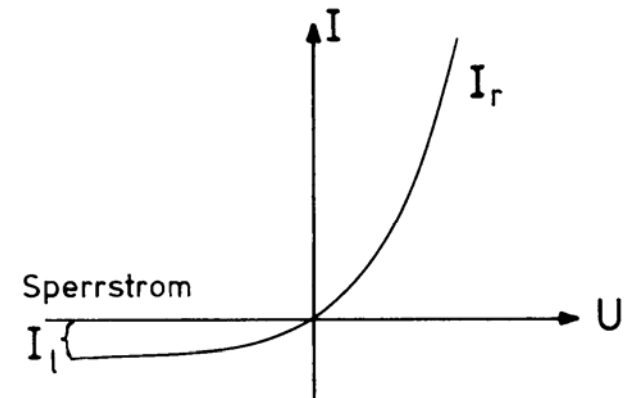


Wirkungsweise einer Diode (der Pfeil rechts außen gibt die Richtung des positiven Stromes an): (a) Vorspannung in Durchlassrichtung, (b) Vorspannung in Sperrrichtung.

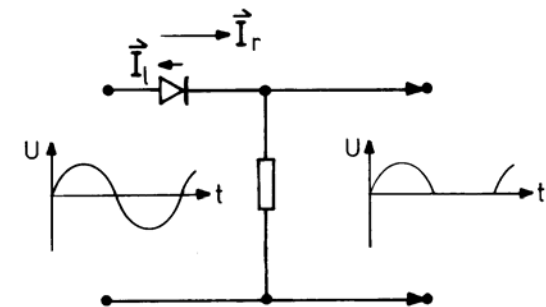
- Kennlinie ist **nicht-linear**, geringer Widerstand in Durchlass-, hoher Widerstand in Sperrrichtung
- Durchlassstrom / Sperrstrom
- **Gleichrichterschaltung** erzeugt pulsierende Gleichspannung aus Wechselspannung
- diese kann mit **Kondensator geglättet** werden

### Transistor

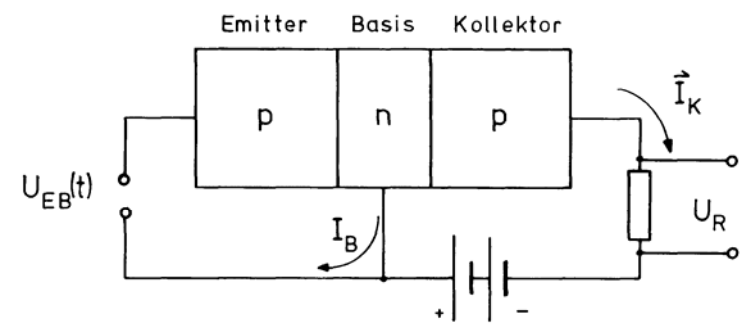
- bipolare Transistoren bestehen aus **3 unterschiedlich dotierten Halbleiterschichten**: npn oder pnp
- **pnp-Transistor**: Löcher werden vom Emitter in Basis emittiert (Durchlassrichtung)
- bei höherem Potenzial zwischen Kollektor und Emitter vgl. zum Potenzial Basis-Emitter: Mehrzahl der Löcher fließt über Kollektor ab (Kollektor „sammelt“ Löcher aus Basisschicht ab)
- Basisschicht ist sehr dünn, d.h.  $I_B \ll I_K$
- durch Variation von  $U_{EB}$  werden weniger Löcher injiziert: Steuerung des großen  $I_K$  durch kleinen  $I_B$ : Verstärkung des Signals an der Basis
- Stromverstärkung eines Transistors  $> 100$



Kennlinie einer Gleichrichterdiode



Gleichrichterschaltung



Aufbau eines pnp-Transistors