

# Übersicht gkg ... pharm. Prüf.

Einführung

1 Allgemeines

2 Mechanik

3 Wärmelehre

**4 Elektrizität und Magnetismus**

5 Optik

6 Schwingungen und Wellen

7 Atomistische Struktur der Materie

(8 Grundlagen der Arzneiformenlehre)

# Experimente

(häufiges Problem: Luftfeuchtigkeit zu hoch! Dann schnelle Entladung)

- Elektroskop
- Kräfte zwischen elektrisch geladenen Körpern
- Coulombsches Gesetz
- Feldlinienbilder
- Spitzenentladung (Spitzenrad auf van-de-Graaf-Generator)
- Sitz der Ladung (bei metallischen Körpern, Faradayische Käfige)
- Influenz (Plattentrennung im Plattenkondensator)
- Piezo-Effekt/Elektrostriktion
- Kondensator ( $C=Q/U$ ),
- Plattenkondensator mit Veränderung des Plattenabstands
- Wirkungen des Stroms: Wärme, Licht, Chemie, Magnetfeld
- Ohmsches Gesetz
- Voltasche Spannungsreihe
- Kirchhoffsche Regeln
- Reihenschaltung, Parallelschaltung von ohmschen Widerständen

# Elektrizität und Magnetismus

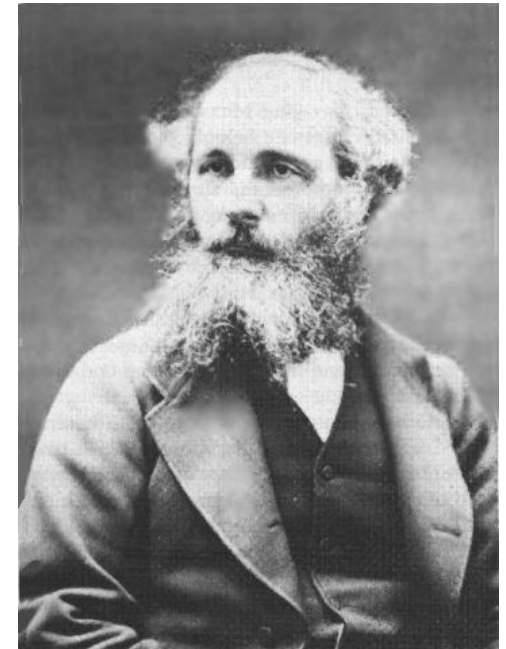
- Elektrische Felder
- Stromfluß (Gleichstrom)
- Magnetische Felder
- Elektromagnetische Induktion
- Wechselströme
- Elektrodynamik
- Ladungsträgertransport



Charles Augustine  
de Coulomb  
1736-1806



Michael Faraday  
1791-1867



James Clerk Maxwell  
1831-1879

# 4.1a aus gkg ... pharm. Prüf.

## 4 Elektrizität und Magnetismus

### 4.1 Elektrische Ladungen und Felder

**4.1.1 Ladungen:** Elektrische Ladungen; Begriff der Elementarladung, Zusammenhang mit Faraday- und Avogadro-Konstante (s.a. 4.5.1, 7.1.1)

**4.1.2 Coulomb'sches Gesetz:** Kräfte zwischen Punktladungen (auch Einfluss der Dielektrizitätszahl des umgebenden Mediums)

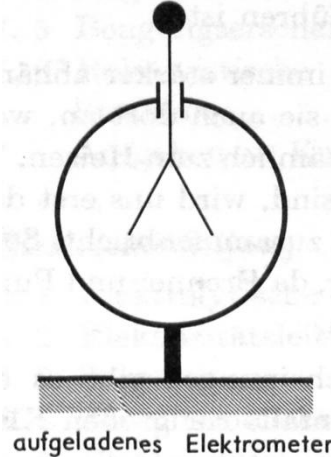
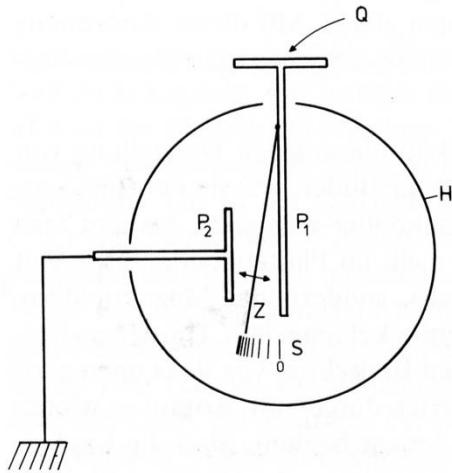
**4.1.3 Elektrische Feldstärke:** Kraft auf eine Ladung im elektrischen Feld; Arbeit im elektrischen Feld (s.a. 2.3.1); Zusammenhang mit der Spannung (s.a. 4.2.1)

**4.1.4 Elektrische Felder:** Elektrisches Feld in der Umgebung einer Ladung und eines Dipols; Feldlinienanordnung für Kugel- und Plattenkondensator; qualitativer Zusammenhang zwischen Feldlinienbild und Feldstärke; Feld an der Oberfläche eines metallischen Leiters, Oberflächenladungen

## 4.1b aus gkg ... pharm. Prüf.

- 4.1.5 Kapazität, Kondensatorschaltungen:** Zusammenhang von Kapazität, Ladung und Spannung; Beziehungen für Parallel- und Serienschaltung von Kondensatoren
- 4.1.6 Plattenkondensator:** Kapazität eines Plattenkondensators, Zusammenhang mit Plattenfläche und -abstand sowie Einfluss des Dielektrikums zwischen den Platten; Dielektrizitätszahl, elektrische Feldkonstante; Zusammenhang der Energie des geladenen Kondensators mit Kapazität, Spannung und Ladung
- 4.1.7 Elektrischer Dipol:** Definition des Dipolmoments, Wirkungen eines homogenen sowie auch eines inhomogenen elektrischen Feldes auf einen elektrischen Dipol (Grundzüge)
- 4.1.8 Faraday-Käfig:** Wirkungsweise

# Elektrische Ladung



Ladung ist Eigenschaft der Elementarteilchen

positive und negative Ladungen  
(vgl. Masse, nur positiv!)

Einheit definiert über den Strom:  
**Coulomb  $C = A \cdot s$**

Elementarladung (z.B. Elektronen negativ  
Protonen positiv):  $e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

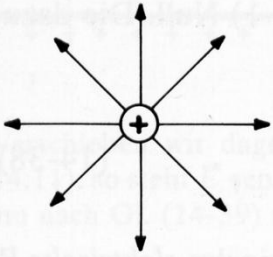
**Makroskopisch:** negative Ladung = Elektronenüberschuss (Gummi)  
positive Ladung = Elektronenmangel (Glas)

Ladungserhaltung:  $\sum q_- + q_+ = 0$  aber: Ladungstrennung möglich  
z.B. „Reibungselektrizität“

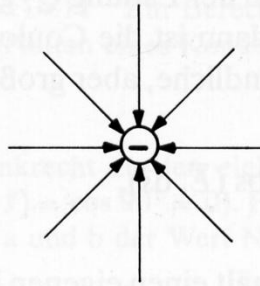
**Leiter:** guter Ladungsträgertransport

**Isolator:** schlechter Ladungsträgertransport

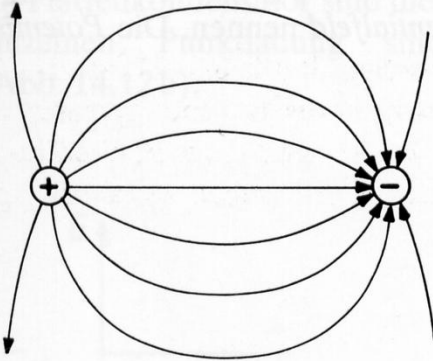
# Elektrische Felder



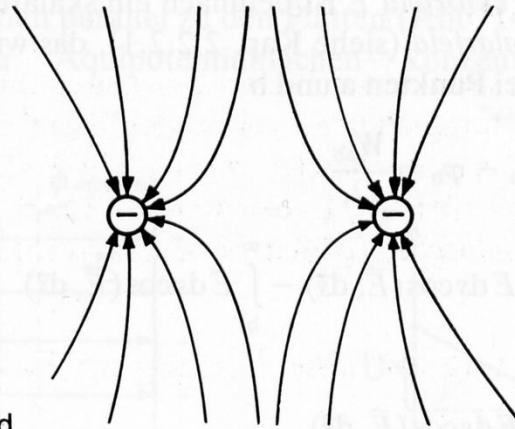
a



b



c



d

Coulombsches Gesetz:  
Die Kraft zwischen zwei  
Ladungen  $q_1$  und  $q_2$  im  
Abstand  $r$  ist:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}}{\text{Vm}}$$

Elektrische Feldkonstante  
(hat exakten Wert!)

**Elektrisches Feld  $E$** : definiert über die Kraft,  
die auf eine Testladung  $q_1$  ausgeübt wird

$$F = q_1 \cdot E \quad \text{also für} \quad E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2}{r^2}$$

Punktladung

vektoriell:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$$

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

# Elektrisches Potential

In Analogie zur potentiellen Energie in der Mechanik (Gravitationspotential, Potential einer Feder, ...):

**Elektrisches Potential:** Arbeit, die notwendig ist, eine positive Einheitsladung von einem Bezugspunkt  $P_0$  (z.B. Erdoberfläche) an den betrachteten Punkt  $P$  zu transportieren

$$\phi(P) = \int_{P_0}^P \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

Potentialdifferenz:  $U = \phi(P_1) - \phi(P_2)$

**Spannung  $U$ :**  
Einheit (Volt):  
 $[U] = V = J/C$

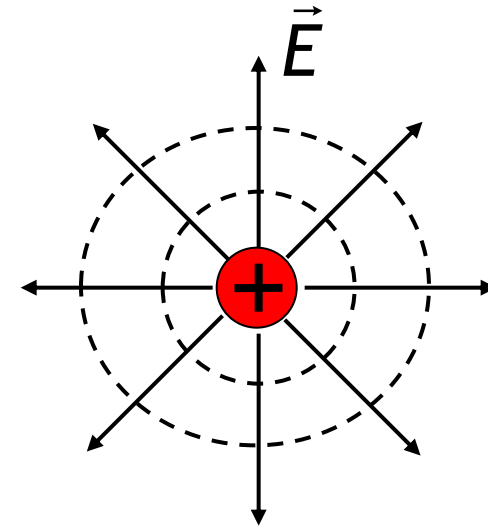
$\phi$  konstant: Äquipotentialflächen



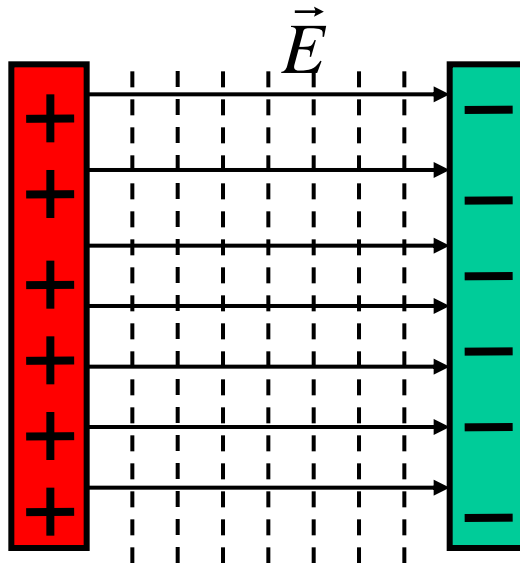
# Äquipotentialflächen

$\Phi$  konstant: Äquipotentialflächen

Beispiel **Punktladung**:  
Äquipotentialflächen sind  
Kugelflächen



Beispiel **Plattenkondensator**:  
Äquipotentialflächen sind  
Ebene Flächen



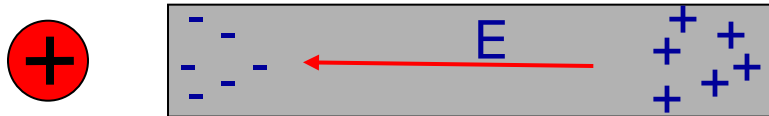
Die Feldlinien stehen senkrecht  
auf den Äquipotentialflächen.

Metalloberflächen (ideale Leiter)  
sind Äquipotentialflächen!

Hohe Krümmung (kleiner Radius)  
⇒ große Liniendichte  
⇒ große Feldstärke  
(Spitzenentladung, „Elmsfeuer“)

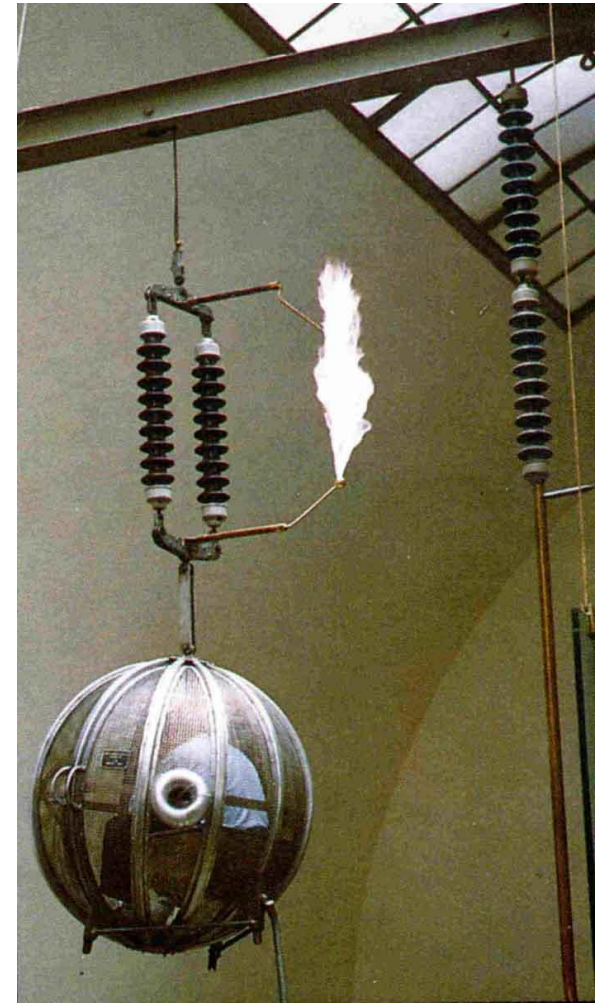
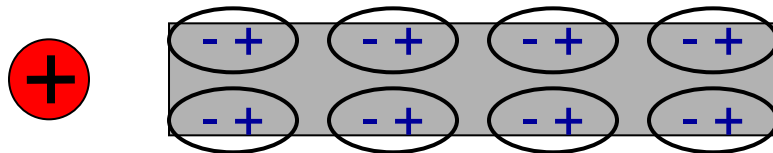
# Influenz, Polarisation

**Influenz:** Ladung in der Nähe eines *Leiters* bewirkt Ladungsträgerverschiebung. Das influenziertes elektr. Feld ist entgegen dem äußeren Feld gerichtet)



Das Innere eines Leiters ist feldfrei: „Faraday-Käfig“

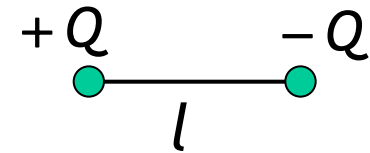
**Polarisation:** Ladung in der Nähe eines *Isolators* bewirkt Verschiebungspolarisation (Atome werden polarisiert) und/oder Orientierungspolarisation (Dipole werden ausgerichtet). Es entsteht eine Oberflächenladung.



# Elektrische Dipole im Feld

**Definition:** System aus zwei ungleichnamigen Ladungen  $+Q$  und  $-Q$  (gleicher Größe) im Abstand  $l$  :

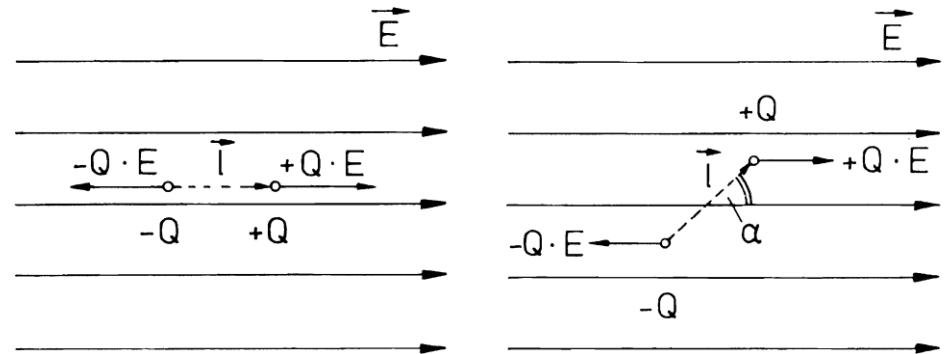
$$\vec{p} = Q \cdot \vec{l}$$



## Dipol im elektrischen Feld:

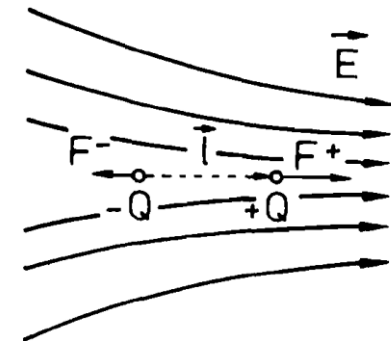
Im **homogenen Feld** erfolgt eine Ausrichtung entlang der Feldlinien aufgrund des Drehmoments

$$\vec{M} = Q \cdot \vec{l} \times \vec{E} = \vec{p} \times \vec{E}$$



Im **inhomogenen Feld** ergibt sich zusätzlich aufgrund des Feldgradienten eine Gesamtkraft

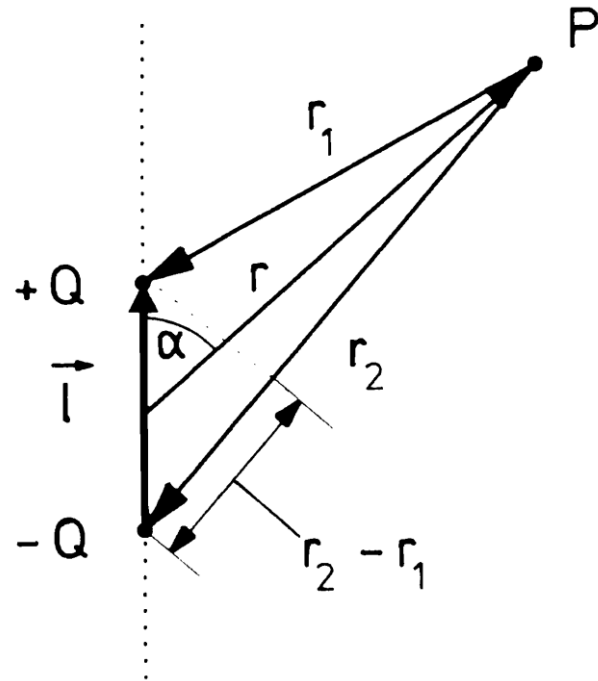
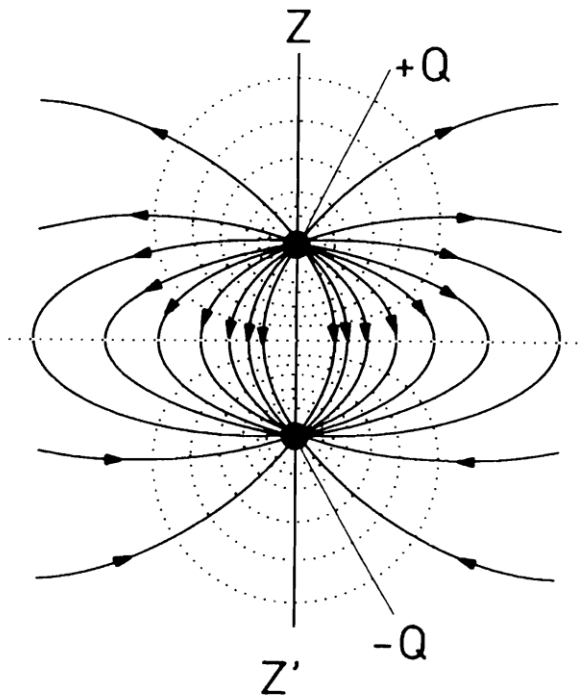
$$\vec{F} = Q \cdot (\vec{E}_+ - \vec{E}_-) = Q \cdot \vec{l} \times \frac{d\vec{E}}{d\vec{r}} = \vec{p} \times \frac{d\vec{E}}{d\vec{r}}$$



# Feld und Potential elektrischer Dipole

## Summe

der Felder bzw. der Potentiale  
der beiden Punktladungen.



## Idealisierung:

Lasse  $l$  gegen 0 und  
gleichzeitig  $Q$  gegen  
unendlich gehen bei  
konstantem Produkt  $p$ .

# Kapazität

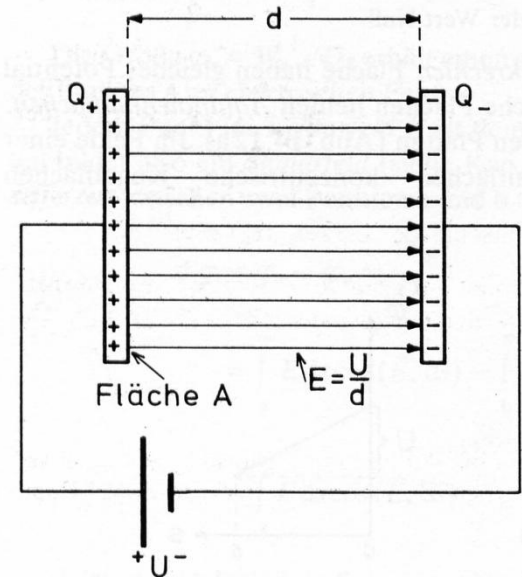
**Kapazität:** Vermögen, Ladungen zu speichern

Verhältnis von gespeicherter Ladung zu angelegter Spannung

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

Einheit: Farad  $F = C / V$

Für Plattenkondensator:  $C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$

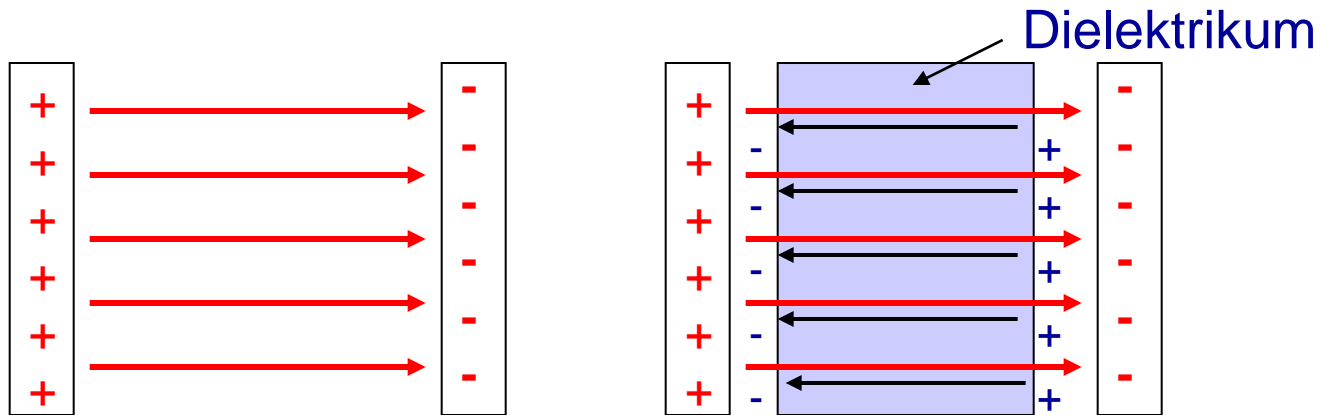


Parallelschaltung mehrerer Kondensatoren:  $C_{\text{ges}} = \sum C_i$

Serienschaltung mehrerer Kondensatoren:  $1/C_{\text{ges}} = \sum 1/C_i$

# Dielektrikum

**Dielektrikum:** Schwächung des elektrischen Feldes im Innern des Dielektrikums (=Isolators) durch Polarisierung



Elektrisches Feld mit Dielektrikum

bei gegeb. Ladung:  $\vec{E}_d = \frac{1}{\epsilon} \vec{E}_0$

(Bem.: Bei gegeb. äußerer Spannung nimmt die Ladung entsprechend zu.)

Kapazität mit Dielektrikum:  $C_d = \epsilon C_0$

$\epsilon \geq 1$  Permittivitäts- oder Dielektrizitätszahl (-Konstante)  $\epsilon$  auch  $\epsilon_{\text{rel}}$

$F_d = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} < F_0$  Kraft zwischen Punktladungen mit Dielektrikum

# Energieinhalt, Verschiebungsdichte

**Energiegehalt:** Arbeit zum Aufladen eines Kondensators wird als elektrische Feldenergie  $W_{el}$  gespeichert:

$$\frac{W_{el}}{V} = \frac{1}{2} \epsilon \epsilon_0 \vec{E}^2 = \frac{1}{2} \vec{D} \cdot \vec{E} \quad \text{mit} \quad \vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}$$

$D$ : dielektrische Verschiebungsdichte  $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$

Vakuumbbeitrag

Polarisation des Dielektrikums  
(Dipolmoment pro Volumen)

**Elektrostriktion:** elastische Verformung im E-Feld

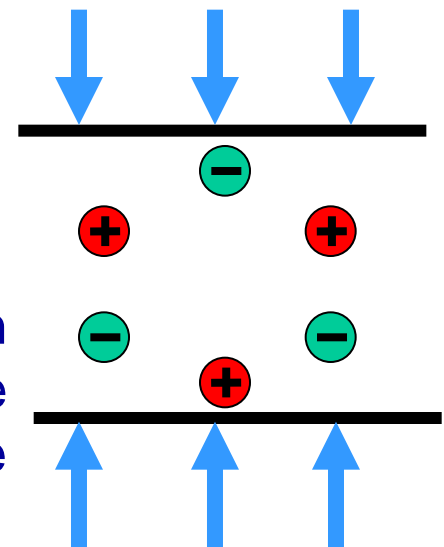
**Pyroelektrizität:** Ladungstrennung durch Erwärmen

**Piezoeffekt:** Ladungstrennung durch Kraft

(z.B. zur Erzeugung hoher Spannungen im Feuerzeug)

Inhomogenitäten  
bzw. Anisotropie

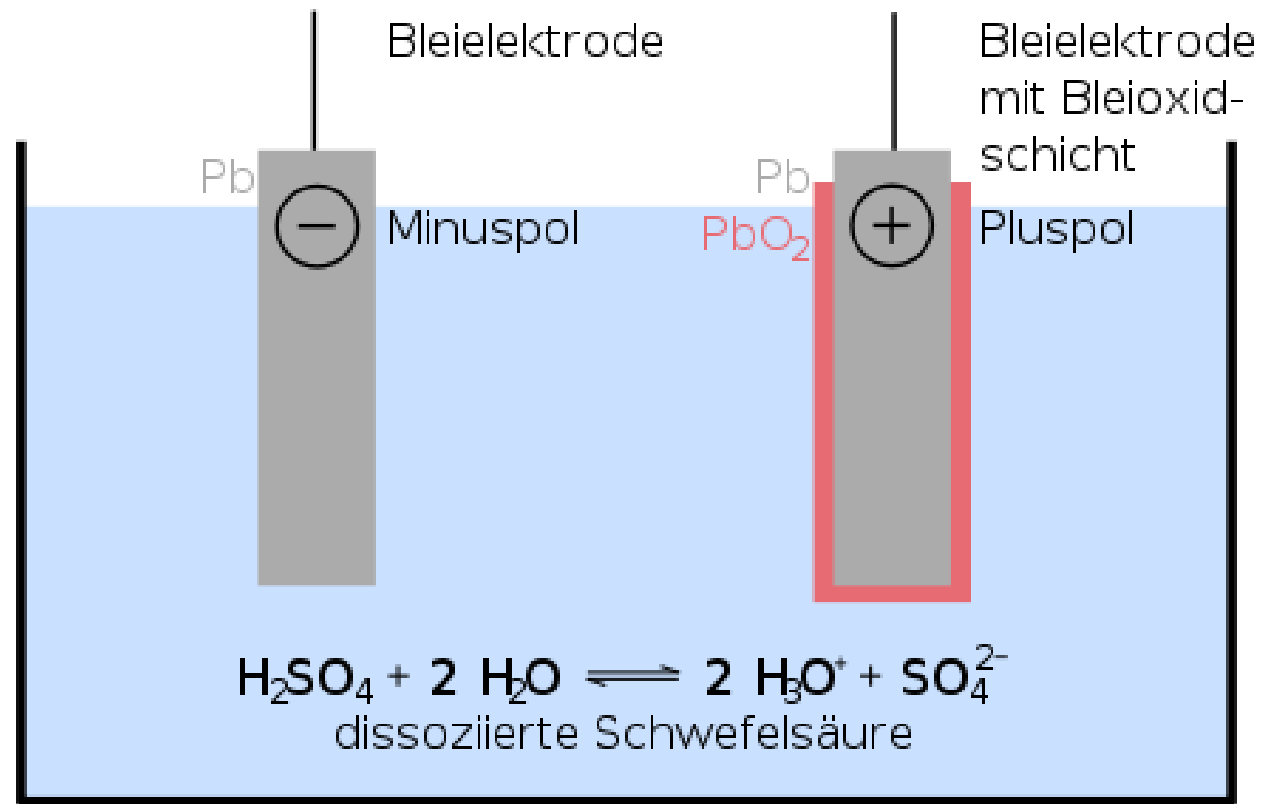
=> Verschiebung der Ladungsschwerpunkte







# Bleiakkumulator



Bei der **Entladung:**  
**Negativer Pol:**



**Positiver Pol:**  $\text{PbO}_2 + \text{SO}_4^{2-} + 4 \text{H}_3\text{O}^+ + 2 \text{e}^- \longrightarrow \text{PbSO}_4 + 6 \text{H}_2\text{O}$

Bei der **Aufladung** umgekehrt

# (Gleich-)Strom

Der **elektrische Strom** ist die transportierte Ladungsmenge pro Zeiteinheit

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

Einheit: Ampère A

Gleichstrom:  $I = \text{const.}$

Voraussetzung für Stromfluß:

- Potentialdifferenz:  $\Delta\Phi = U \neq 0$
- geschlossener Stromkreis



Ampère 1775-1836

# Widerstand, Ohmsches Gesetz

Der **elektrische Widerstand** ist definiert als mit der Einheit Ohm

$$R = \frac{U}{I}$$

$$[R] = \Omega = \frac{V}{A}$$

Der Kehrwert heißt Leitwert  $G = \frac{1}{R}$  mit der Einheit Siemens  $[G] = S = \frac{1}{\Omega} = \frac{A}{V}$

**Ohmsches Gesetz:** Oft (nicht immer) ist der Strom proportional der Spannung, d.h. der (ohmsche) Widerstand  $R$  ist konstant und

es gilt  $U = R \cdot I$  bzw.  $I = \frac{U}{R}$



Ohm 1787-1854

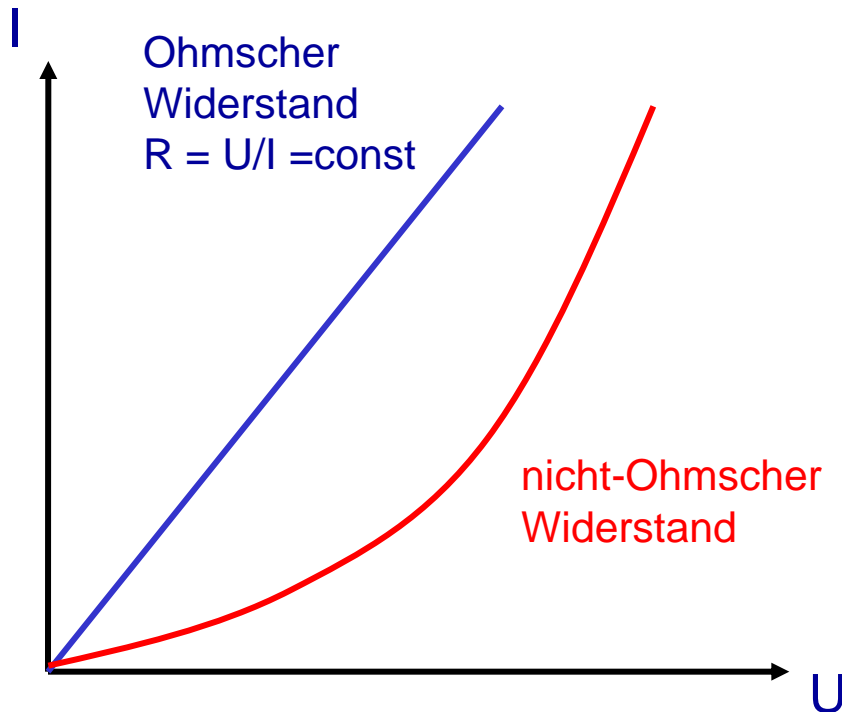
# Ohmsches Gesetz



Für Drahtwiderstände:

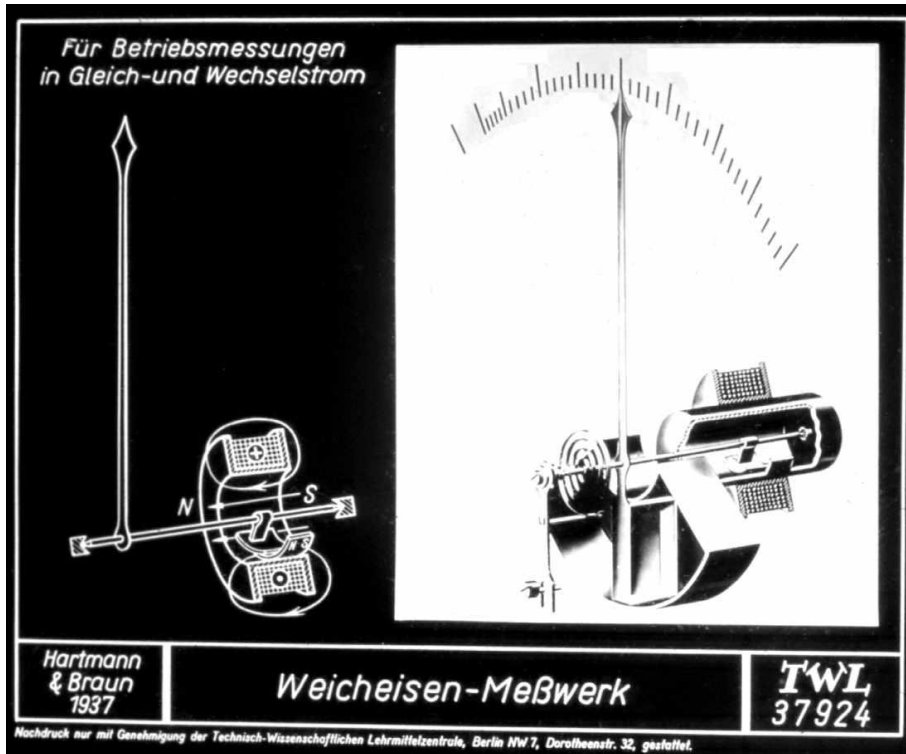
$$R = \rho(T) \frac{l}{A}$$

$A, l$ : Querschnitt, Länge des Leiters  
 $\rho(T)$ : spezifischer Widerstand

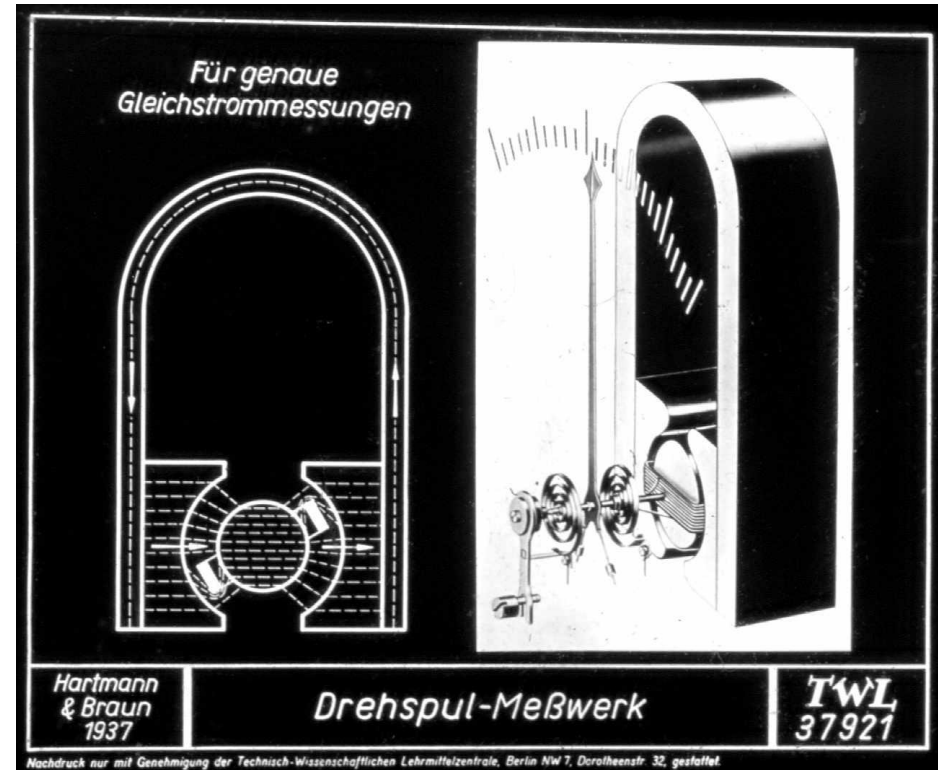


Klassifikation	$\rho / \Omega\text{m}$
Supraleiter	0
Leiter	$10^{-7} - 10^{-6}$
Halbleiter	stark T-abhängig
Isolator	$10 - 10^{14}$

# Strommessung

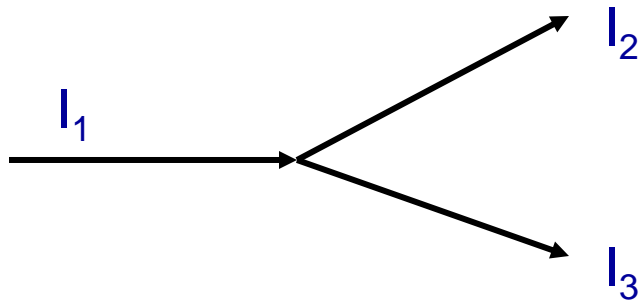


Mittels Amperemeter,  
oft über die vom Strom  
erzeugten magnetischen  
Wirkungen:



„Stromzange“

# Kirchhoffsche Knotenregel



$$I_1 = I_2 + I_3$$

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0 \quad \text{allg.} \quad \sum_i I_i = 0$$

Beachte die Vorzeichen!

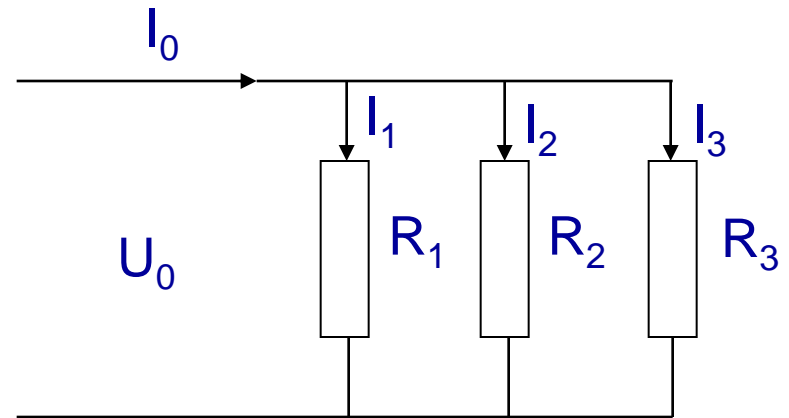
→ **Parallelschaltung** von Widerständen

Knotenregel  $I_0 = I_1 + I_2 + I_3$

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

damit  $\frac{U_0}{R_{ges}} = \frac{U_0}{R_1} + \dots + \frac{U_0}{R_n} = \sum_{i=1}^n \frac{U_0}{R_i}$

d.h.  $\frac{1}{R_{ges}} = \frac{1}{R_1} + \dots + \frac{1}{R_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$



Gesamtwiderstand

# Kirchhoffsche Maschenregel

Statisches elektrisches Feld ist „konservativ“, d.h. die Arbeit ist wegunabhängig. Anders ausgedrückt: Die Potentialwerte sind eindeutig.  
=> In einer Masche (geschlossene Kurve) ist die Summe der Spannungen über den Bauelementen gleich Null.

$$U_0 = U_1 + U_2 \quad \text{bzw.} \quad U_0 - U_1 - U_2 = 0$$

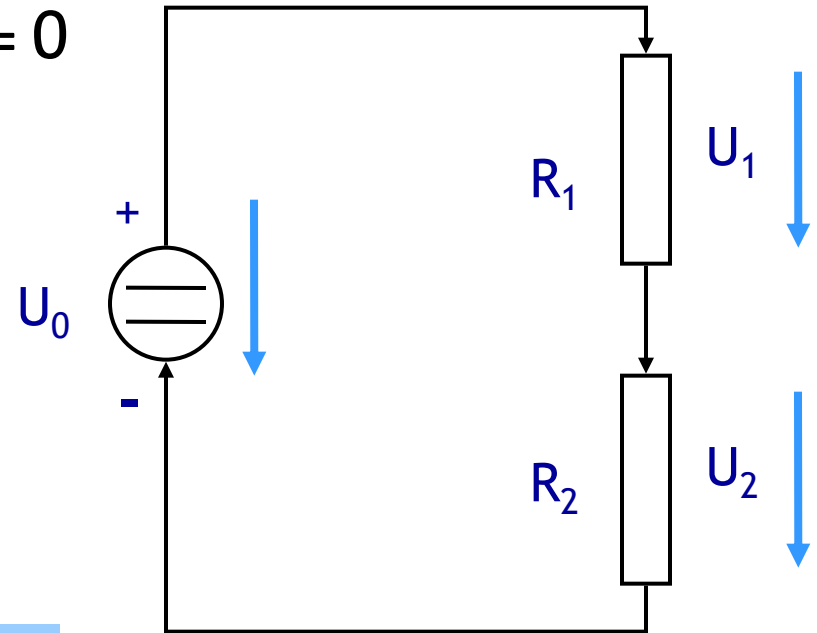
$$\text{allg.} \quad \sum_i U_i = 0$$

→ **Serienschaltung**  
von Widerständen:

$$U_0 = U_1 + U_2 = I \cdot R_1 + I \cdot R_2$$

Gesamtwiderstand

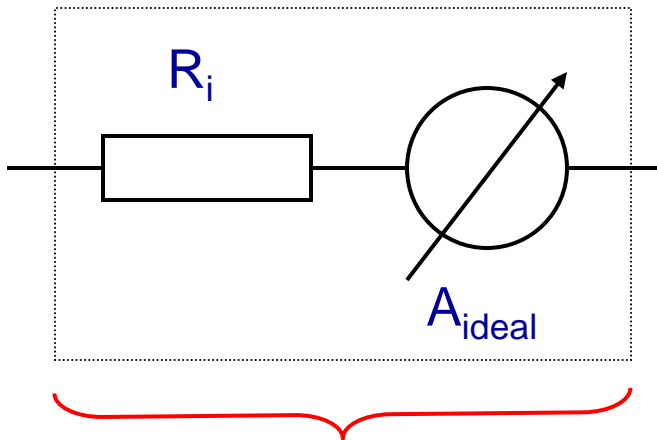
$$\frac{U_0}{I} = R_{\text{ges}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{i=1}^n R_i$$



Alternative „Ableitung“: Addiere Längen bei

$$R_i = \rho(T) \frac{l_i}{A}$$

# Innenwiderstände bei elektr. Meßgeräten

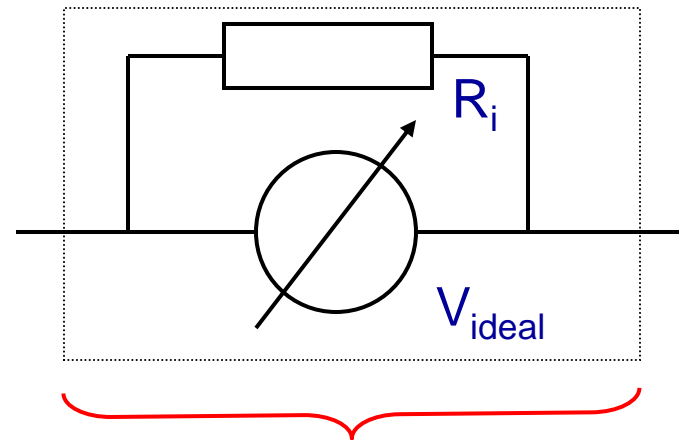


reales Ampèremeter

für Strommessungen  
gewünscht

$$R_i \ll R_m$$

$$R_i \rightarrow 0$$



reales Voltmeter

für Spannungsmessungen  
gewünscht

$$R_i \gg R_m$$

$$R_i \rightarrow \infty$$

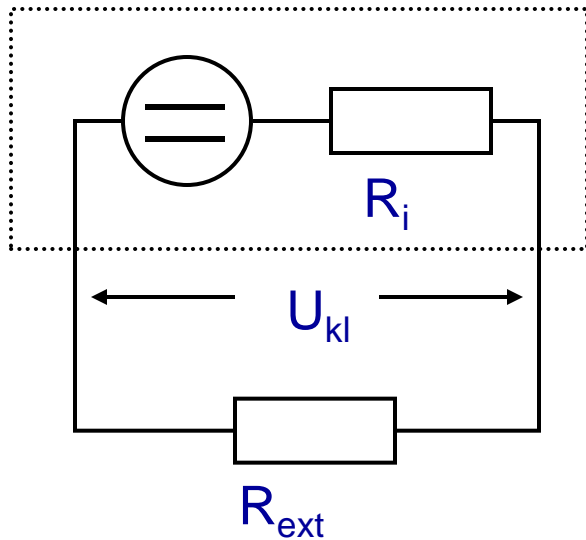
Beachte: Für Strommessungen muss der Schaltkreis im Allgemeinen geöffnet und das Amperemeter eingefügt werden.

Bei Spannungsmessungen wird ein „Bypass gelegt“. Aber beide Verfahren stellen Eingriffe in die Funktion des Schaltkreises dar.



# Innenwiderstände bei Spannungsquellen

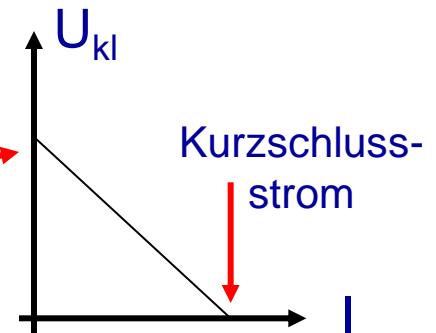
Auch Spannungsquellen (Netzgeräte, Batterien) haben Innenwiderstände.



Klemmenspannung:

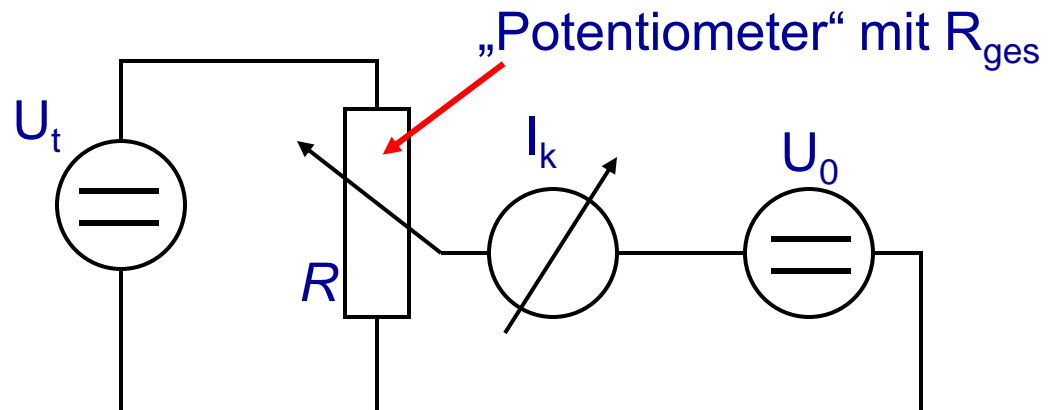
$$U_{kl} = U_0 - R_i \cdot I$$

„Leerlaufspannung“  
„Urspannung“



**Poggendorfsche Kompensationsmethode**  
zur belastungsfreien Spannungsbestimmung

Bei bekannter Spannung  $U_t$  wird  $R$  so eingestellt, dass  $I_k$  verschwindet!  
Aus der Stellung von  $R$  kann  $U_0$  bestimmt werden.

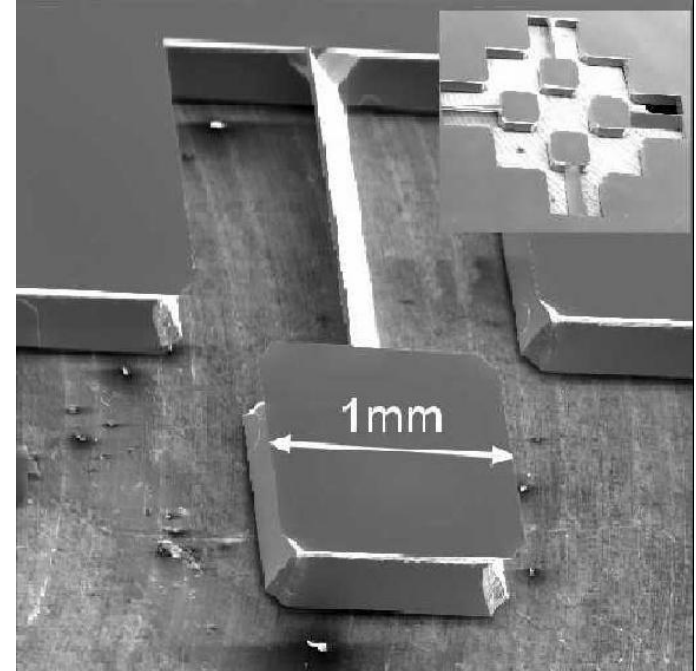
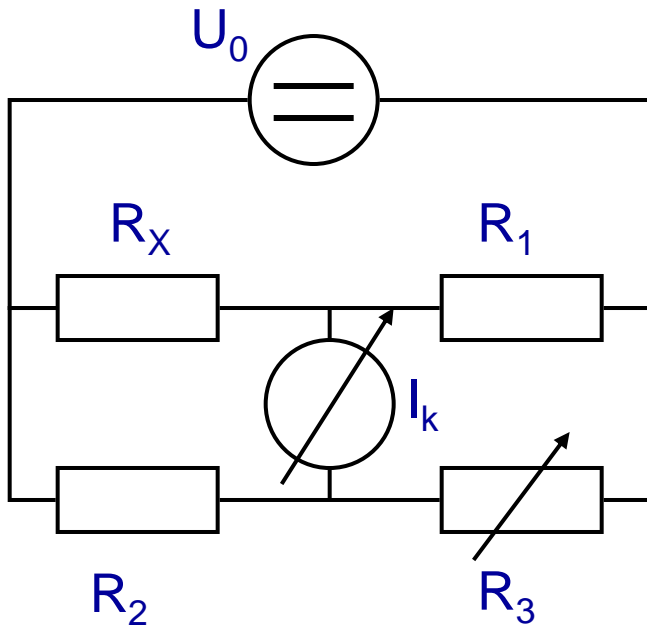


# Wheatstonesche Brücke

Analog: Methode zur Bestimmung eines elektrischen Widerstandes ohne Strom durch ein Messgerät (bei unbekanntem Innenwiderstand):

$R_3$  (und  $R_2$ ) werden so variiert, dass  $I_k=0$ , also auch  $U_k=0$ :

$$R_x = \frac{R_2}{R_3} \cdot R_1$$



Beschleunigungssensor

# Experimente

- Oerstedt-Versuch (Kompass an Stromdurchflossenem Draht)
- magnetische Feldlinienbilder (gerader Leiter, Drahtschleife, Spule)
- Lorentzkraft (Braunsche Röhre, Rotationsversuch nach Faraday mit Plasmafaden, Plasmasprialwellen)
- Kraft auf einen Strom-durchflossenen Leiter im Magnetfeld (Schaukel)
- Kräfte zwischen zwei Strom-durchflossenen Leitern
- Faradaysche Induktionsversuche (qualitativ)
- Induktion/Lenzsche Regel: Kupferring beim Spuleneinschalten

# Magnetfelder

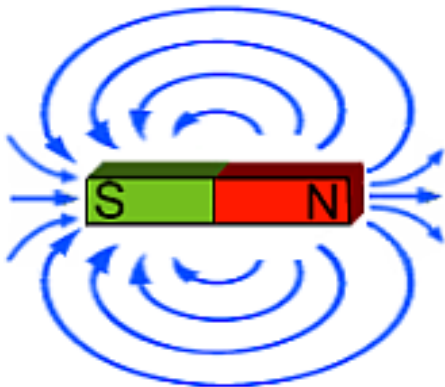
Stabmagnet: S  N

Beobachtungen:

- Es gibt magnetische Materialien
  - Diese reagieren auf elektrische Ströme.
- ⇒ Mit elektrischen Strömen sind Magnetfelder verbunden.

Aber: Es gibt keinen magnetischen Monopol.

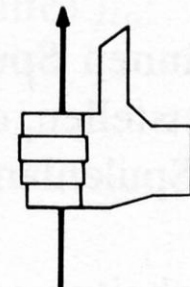
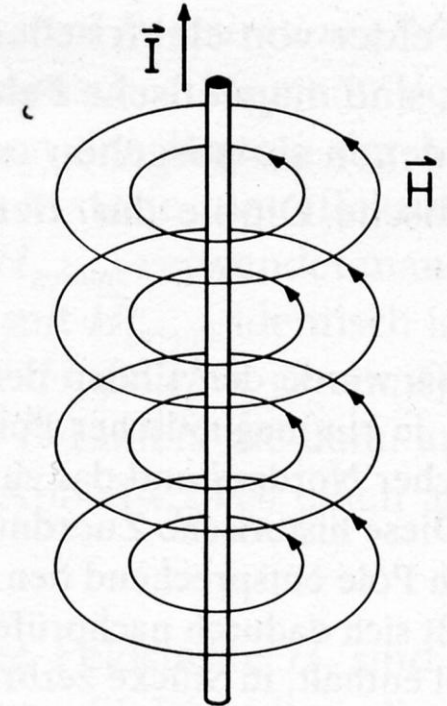
Magnetfeld eines Stabmagneten:



Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters:

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

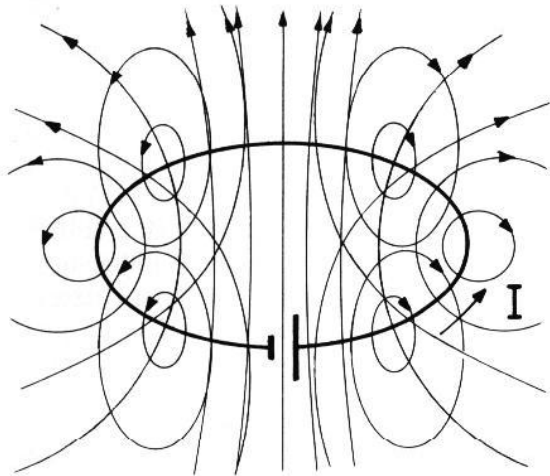
SI-Einheit:  $[H]=1 \text{ A/m}$   
früher Oersted mit  
 $1 \text{ Oe} = 1000/(4\pi) \text{ A/m}$



„Rechte-Hand-Regel“

# Magnetfeld einer Spule

Magnetfeldlinien  
einer Drahtschleife:  
(sehr ortsabhängig!)



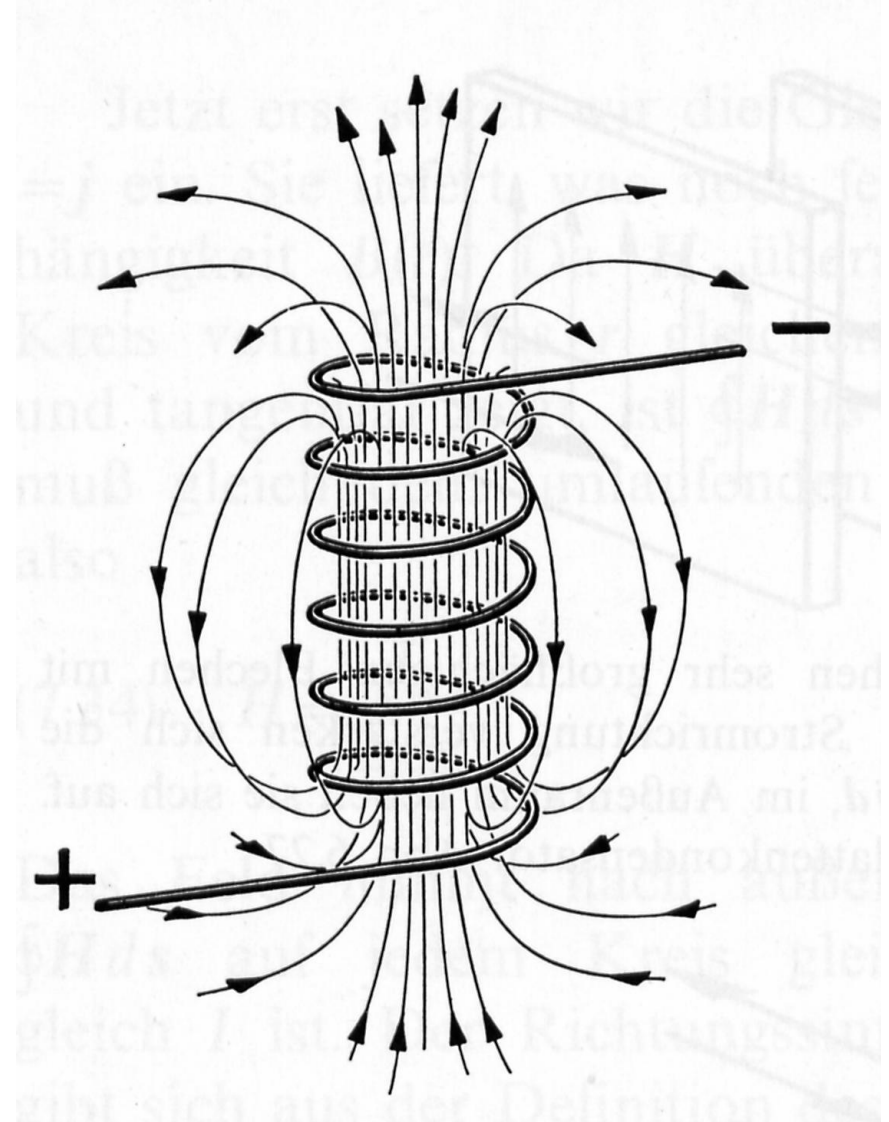
Magnetfeld im Inneren  
einer (langen) Spule:

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

$I$ : Strom durch Spule

$n$ : Anzahl der Windungen

$l$ : Länge der Spule



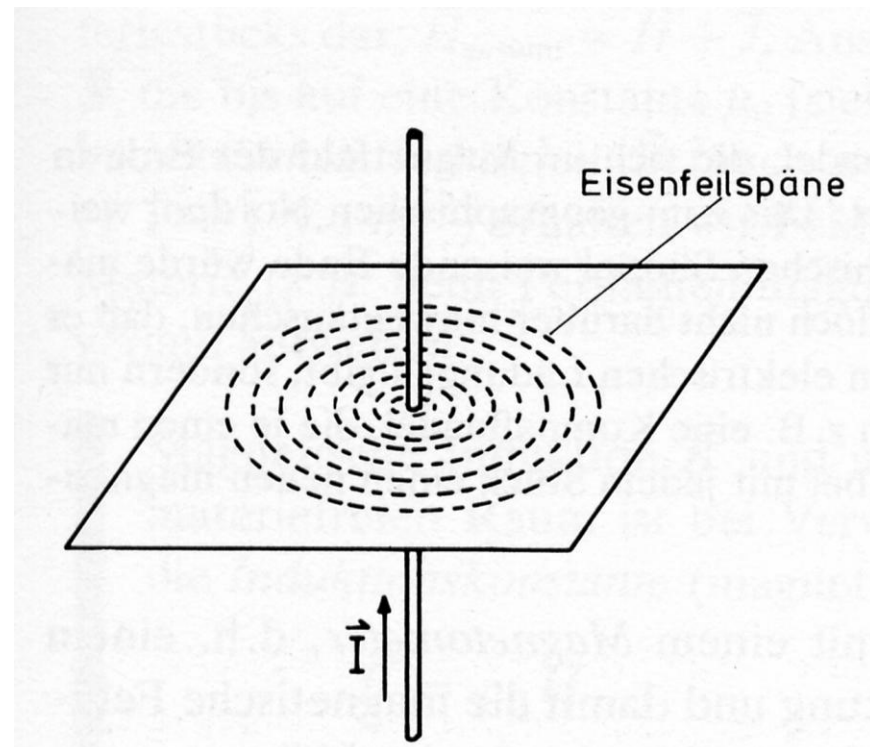
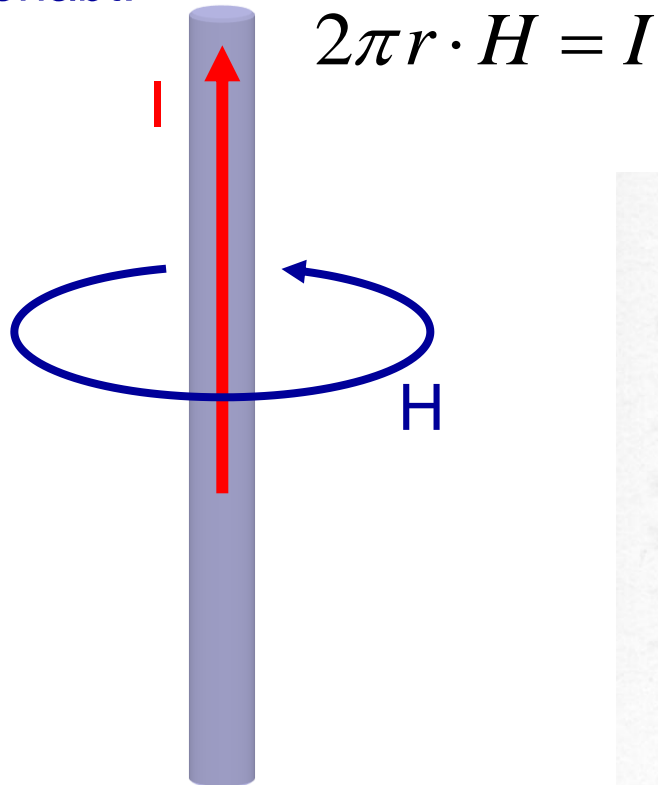
# Durchflutungsgesetz

Allgemein gilt das:

**Ampère-Maxwellsches  
Durchflutungsgesetz:**

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = I_{ges}$$

Für den geraden Draht ergibt sich  
wie gehabt:



# Magnetfelder und Materie

Magnetfelder beeinflussen (bewegte) Ladungsträger.

Analog zur elektrischen Polarisation gibt es eine **Magnetisierung**.

Daher führt man die „**magnetische Induktion**“

(„**magnetische Flussdichte**“)  $B$  ein und schreibt  $\vec{B} = \mu_0 \cdot \mu \cdot \vec{H}$

mit der **magnetischen  
Feldkonstanten**

$$\mu_0 \equiv 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \approx 1.256 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$$

und der SI-Einheit **Tesla**:  $[B] = 1 \text{ T} = 1 \text{ Vs/m}^2$

früher Gauß:  $1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$

**Permeabilitätszahl** des Vakuums  $\mu = 1$

Man unterscheidet je nach

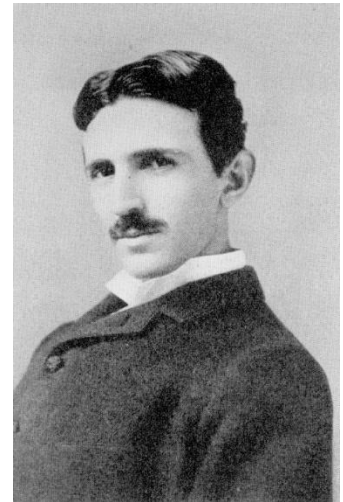
**relativer Permeabilität:**

$\mu < 1$ : Diamagnetismus (induz. magn. Dipolmomente)

$\mu > 1$ : Paramagnetismus (perm. magn. Dipolmomente)

$\mu \gg 1$ : Ferromagnetismus („spontanes“ magn. Moment, durch Ausrichtung der perm. Dipole aufgrund des Kristallgitters)

Nicola Tesla  
1856-1943



# Magnetisierung

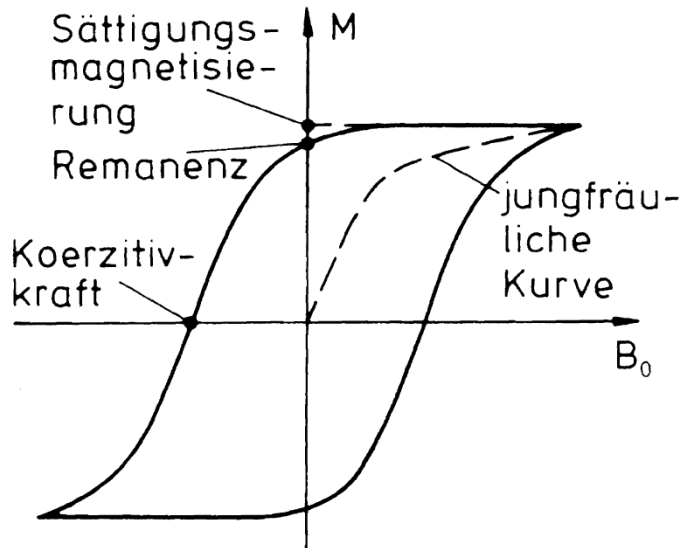
Analog zu  $\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$

schreibt man  $\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H} = \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{M}$

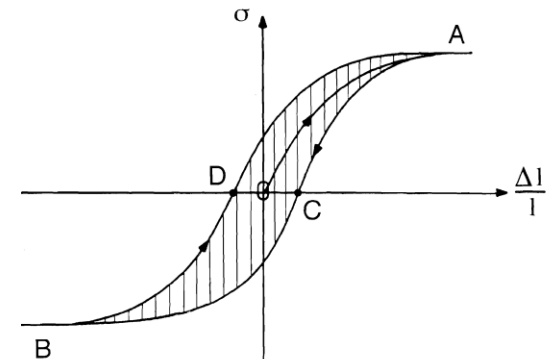
mit der **Magnetisierung**  $\vec{M} = \chi \vec{H}$  (und  $\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}$ )

↖ magn. **Suszeptibilität**

**Hysterese** der Magnetisierung:



vgl. Mechanik  
(elastische Hysterese):



„Entmagnetisierung“ mit  
abnehmendem Wechselfeld

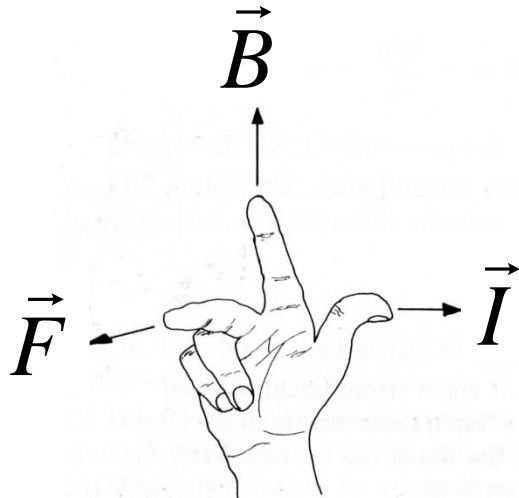


# Lorentz-Kraft (auf Leiter)

## Lorentz-Kraft

auf stromdurchflossenen Leiter:

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



$l$ : Länge des Leiters

$I$ : Strom

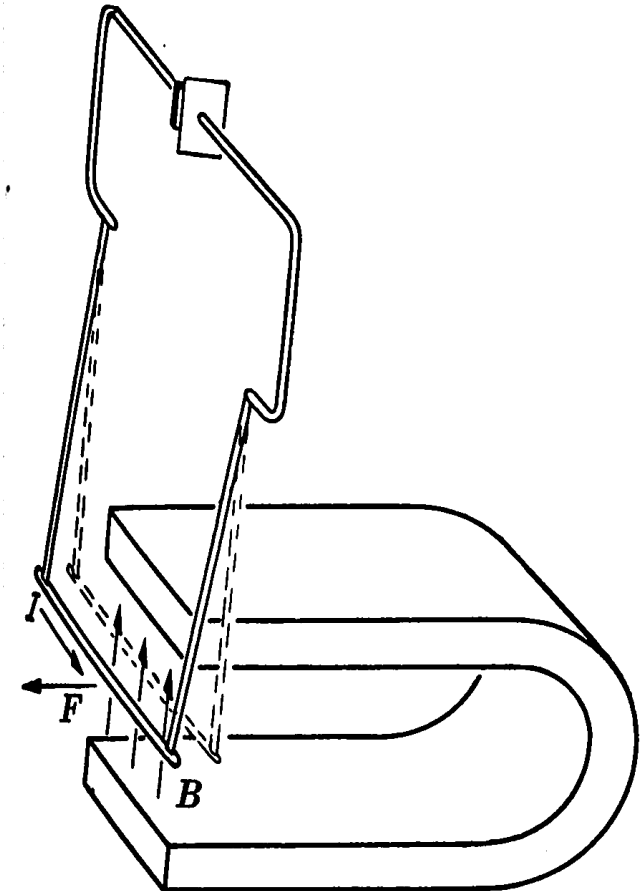
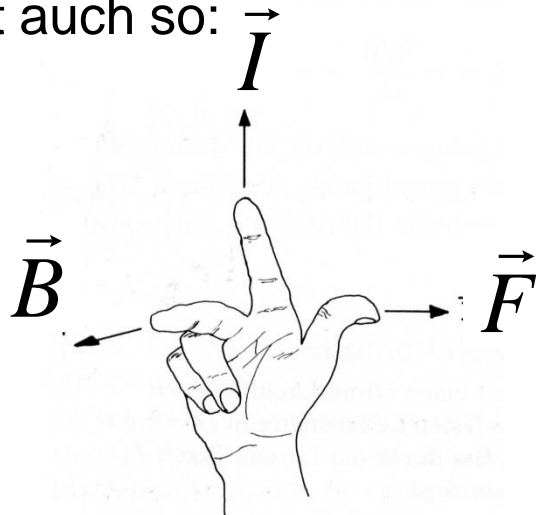
$B$ : Magnetische Induktion

Drei-Finger-Regel

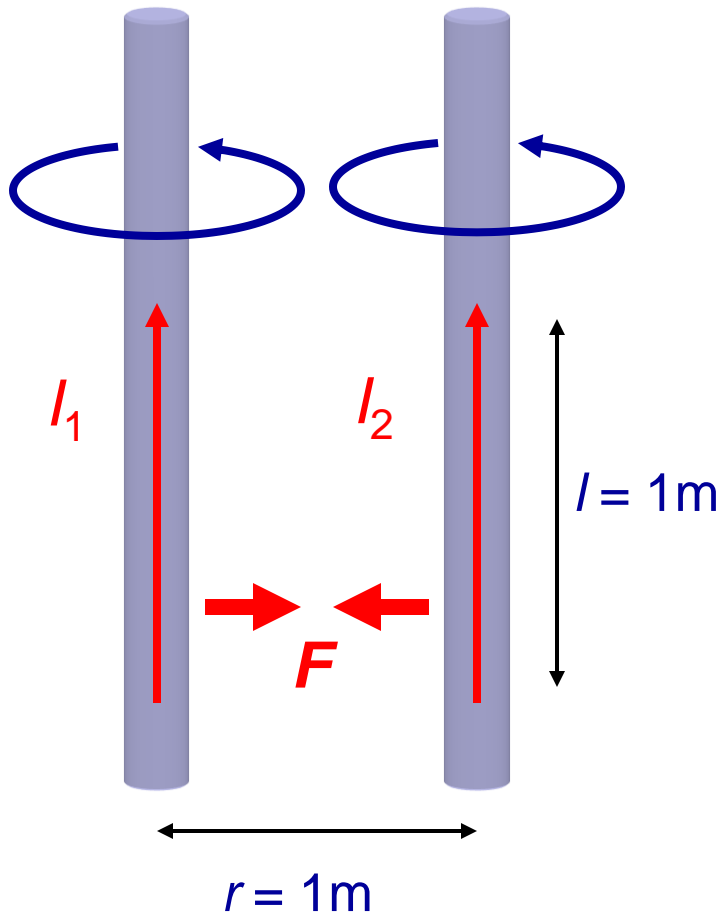
bzw.

Rechte-Hand-Regel

geht auch so:



# Definition der Stromstärke



1 Ampère ist die Stärke eines zeitlich unveränderlichen Stroms, der, durch zwei im Vakuum im Abstand von 1m voneinander angeordnete geradlinige, unendlich lange Leiter von vernachlässigbarem Querschnitt fließend, zwischen diesen Leitern für jeden Abschnitt der Länge 1m eine Kraft von  $F=2 \cdot 10^{-7}\text{ N}$  hervorrufen würde.

$$\vec{F} = l \cdot \vec{I}_1 \times \vec{B}$$

Kraft auf Leiter 1

$$B = \mu_0 \cdot \frac{I_2}{2\pi r}$$

Magnetfeld d. Leiters 2

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{l}{r} I_1 \cdot I_2$$

Kraft zwischen den Leitern

# Lorentz-Kraft (auf Teilchen), Hall-Effekt

$$\vec{I} = A \cdot \rho_Q \cdot \vec{v} \quad \text{Strom} = \text{bewegte Ladungen}$$

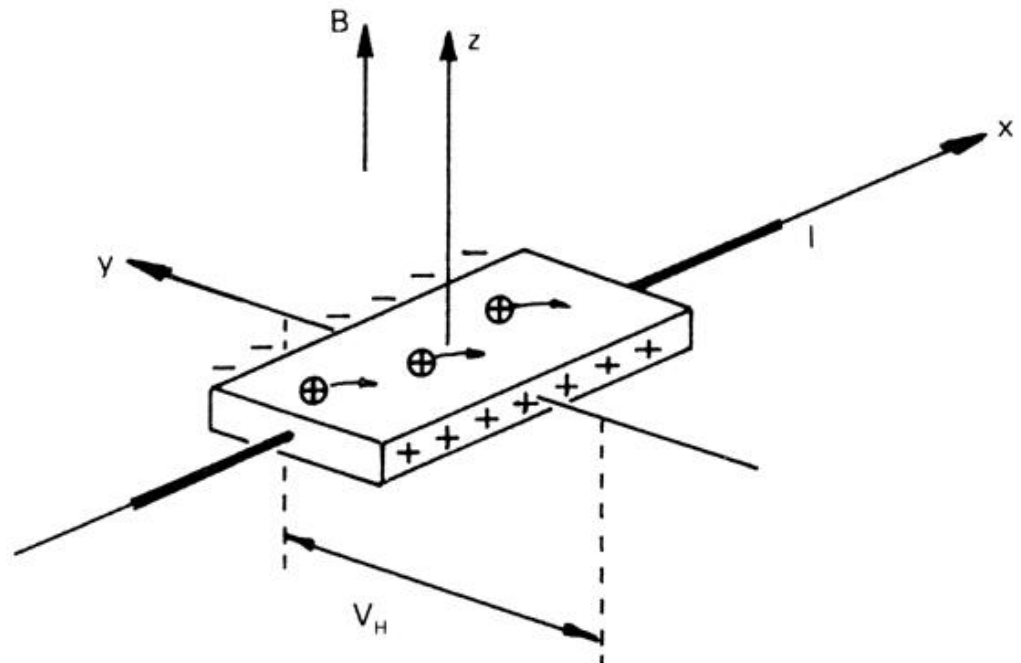
Ladungsdichte  $\rho_Q = Q/V = \text{Ladung pro Volumen}$   $V = A \cdot l$

Daraus ergibt sich für die **Lorentzkraft** auf ein Teilchen der Ladung  $Q$

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

## Hall-Effekt:

Strom durch Metall führt im Magnetfeld so lange zur Ablenkung der Ladungsträger bis sich im Gleichgewicht der Kräfte eine Querspannung  $V_H$  (Hall-Spannung) aufgebaut hat.



# Elektromagnetische Induktion

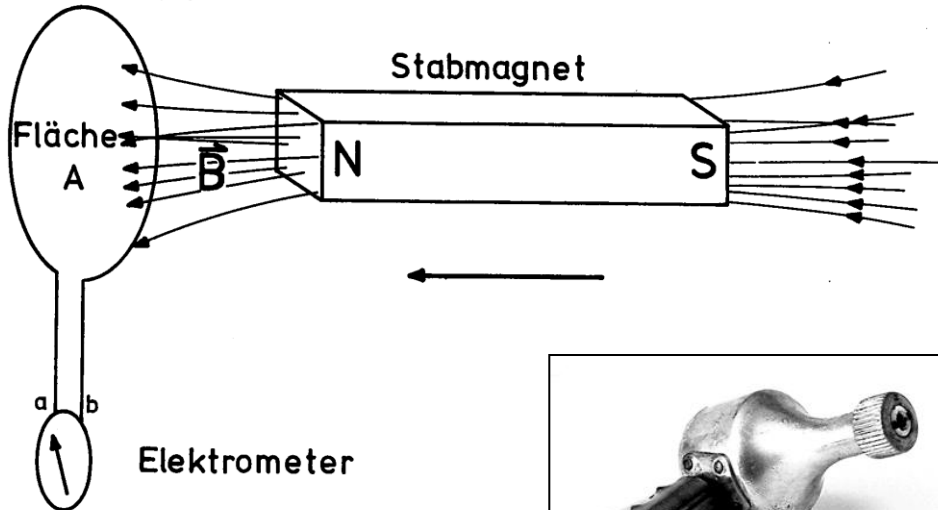
Magnetischer Fluß:  $\Phi = \vec{B} \cdot \vec{A}$

SI-Einheit Weber:  $[\Phi] = 1 \text{ W} = 1 \text{ V} \cdot \text{s}$

Induktionsgesetz:  
(Faraday-Henry-Gesetz)

$$U_{ind} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \frac{d\Phi}{dt}$$

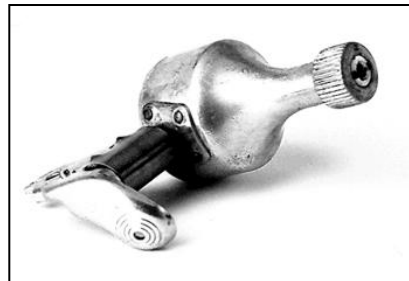
Leiterschleife



Induzierte Spannung  
durch zeitliche Änderung  
des magnetischen Flusses !

z.B.  $U_{ind} = -\vec{A} \cdot \frac{d\vec{B}}{dt}$

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



Dynamo

# Transformator

Spannung in Spule 1  
erzeugt Strom  
=> Magnetfeld:

$$U_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

Magnetfeld induziert  
Spannung in Spule 2:

$$U_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

Spannungsverhältnis  
Ausgang : Eingang

$$\frac{U_2}{U_1} = -\frac{N_2}{N_1}$$

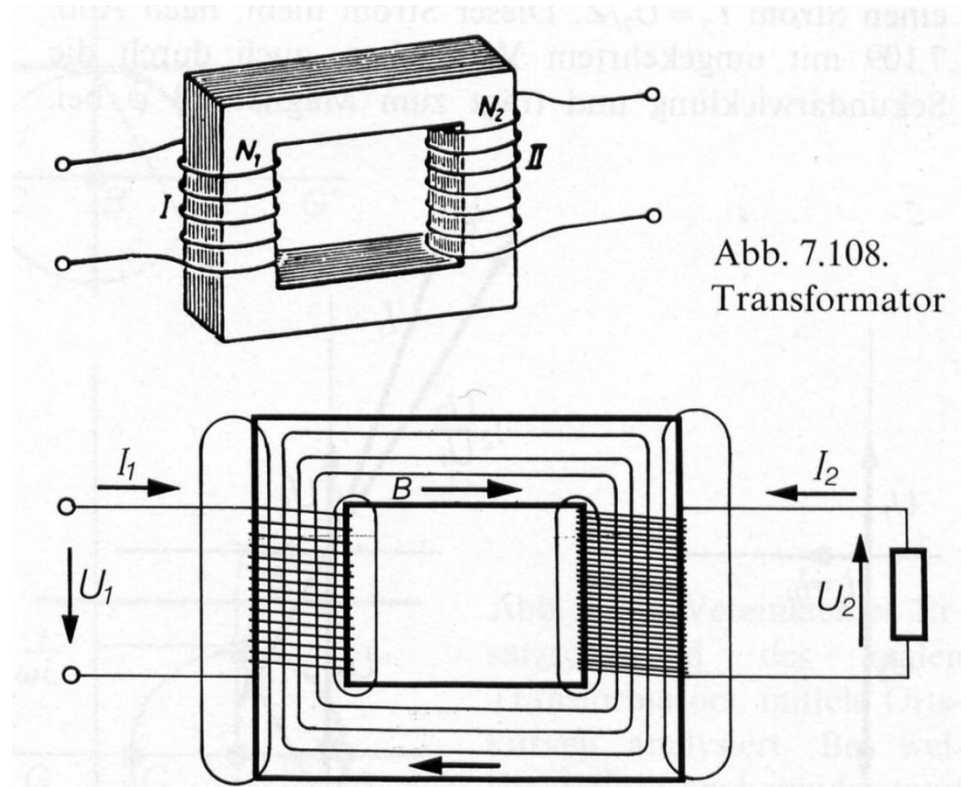
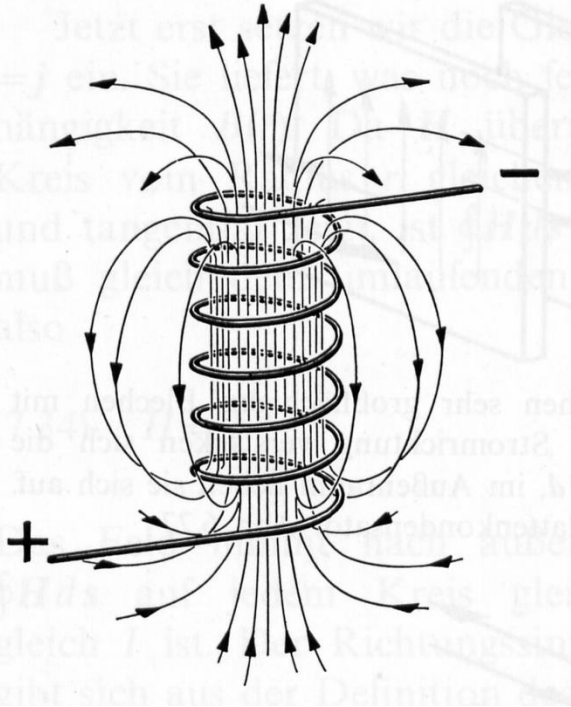


Abb. 7.108.  
Transformator

Beachte: Leistung wird dadurch nicht vergrößert!

Mit  $P = IU$  folgt daher  $\frac{I_2}{I_1} = -\frac{N_1}{N_2}$

# Lenzsche Regel



zeitlich veränderlicher Strom  
durch Spule erzeugt Magnetfeld:

$$H = l \frac{N_1}{l} \quad B = \mu\mu_0 l \frac{N_1}{l}$$

zeitlich veränderliches Magnetfeld  
führt zur (Selbst-)Induktion

$$U_{ind} = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}, \quad N_1 = N_2 = N$$
$$= \underbrace{-N^2 \mu\mu_0 \frac{A}{l}}_L \frac{dl}{dt} = -L \frac{dl}{dt}$$

**Lenzsche Regel:**  
Die vom Induktionsstrom ausgehende Kraft wirkt  
der Ursache des Induktionsstroms entgegen.

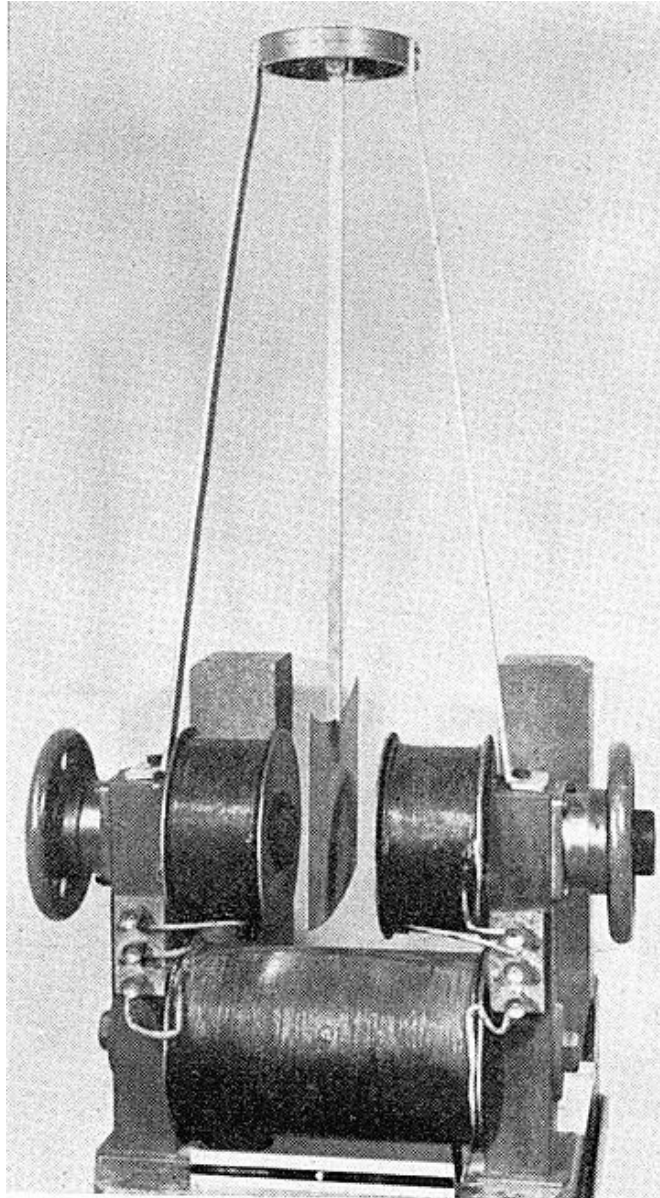
$L$ : Induktivität  
Einheit Henry:  
 $[L] = 1 \text{ H} = \text{Vs/A}$

# Experimente

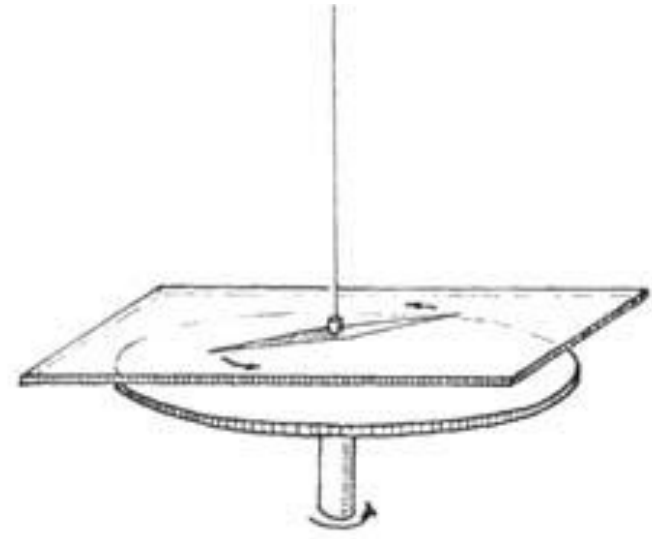
- Transformation auf hohe Spannung bzw. auf hohen Strom
- Wirbelströme (Waltenhofen-Pendel, Arago, Magnet fällt durch Metallrohr)
- Wechselstromkreis:
  - Auf- und Entladevorgänge am RC- und RL-Glied
  - kapazitiver und induktiver Widerstand
  - Phasenbeziehungen zwischen  $U(t)$  und  $I(t)$  an R, C und L
  - Verhalten eines Reihen- und Parallelschwingkreises bei Resonanz
  - Skin-Effekt
- Elektromagnetische Wellen: Hertz'sche Versuche
- Verkupfern von Graphitplatten (zusätzlich auch Wasserzersetzung)

# Wirbelströme

Waltenhofen-  
Pendel



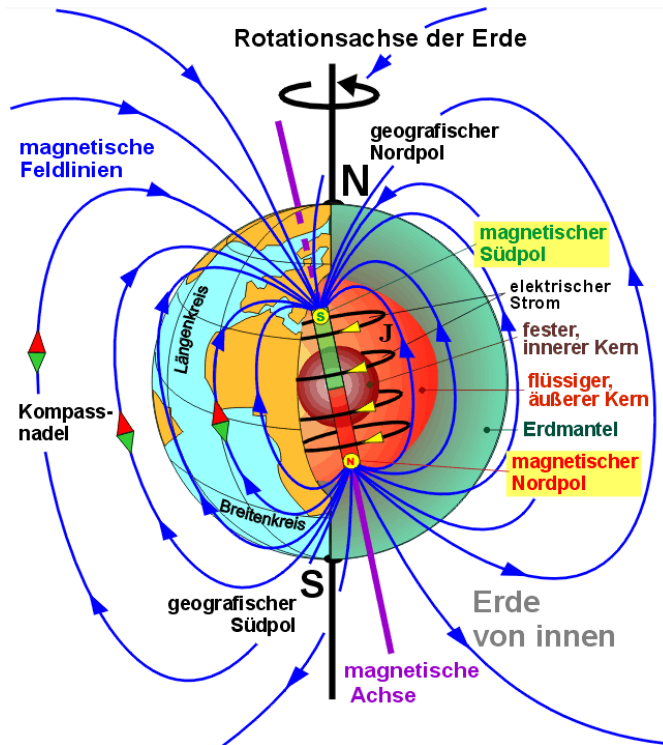
Experiment von Arago



von Waltenhofen  
1828 - 1914



# Natürliche Magnetfelder



Elektromagnet (auch supraleitend)	$B$ bis 100 T
Permanentmagnet	$B = 0.1 - 2$ T
Erdmagnetfeld	$B$ ca. $10^{-4}$ T
Mensch	$B = 10^{-9} - 10^{-14}$ T

## Magnetometer:

**Hall-Sonde:** mittlere Magnetfeldstärken

**NMR-Sonde:** dito, extrem genau (Analytik)  
(nuclear magnetic resonance)

**SQUIDs:**

(superconductive quantum interference device)

extrem kleine Magnetfelder

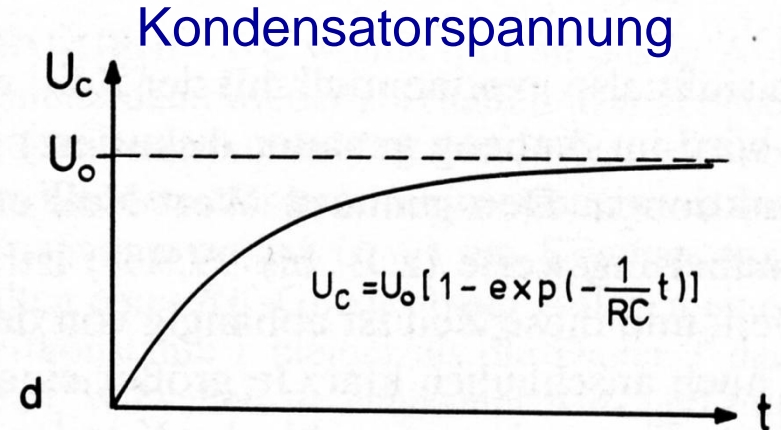
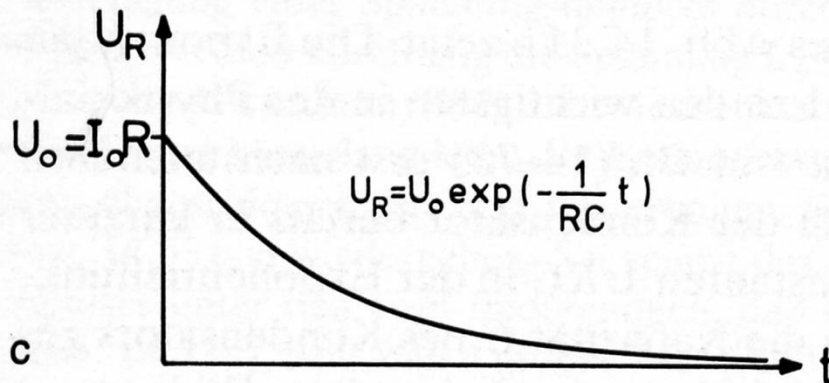
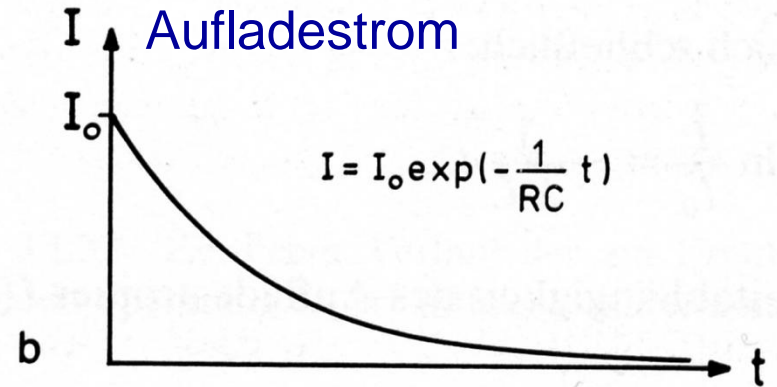
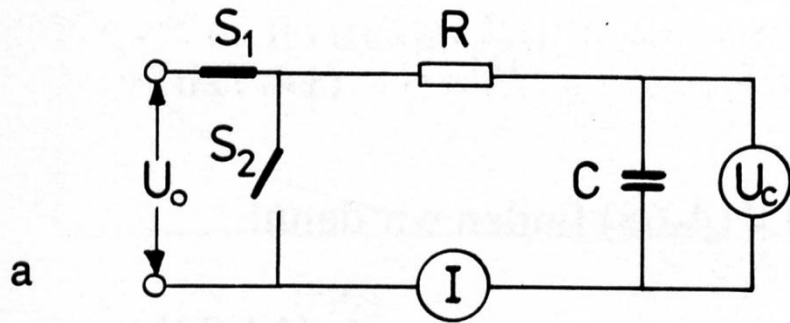
von Hirn-, Nerven-, Muskelströmen

Medizinische Anwendungen: MKG (Magnetkardiogramm)

MEG (Magnetoenzephalogramm)

# Einschalten beim RC-Glied

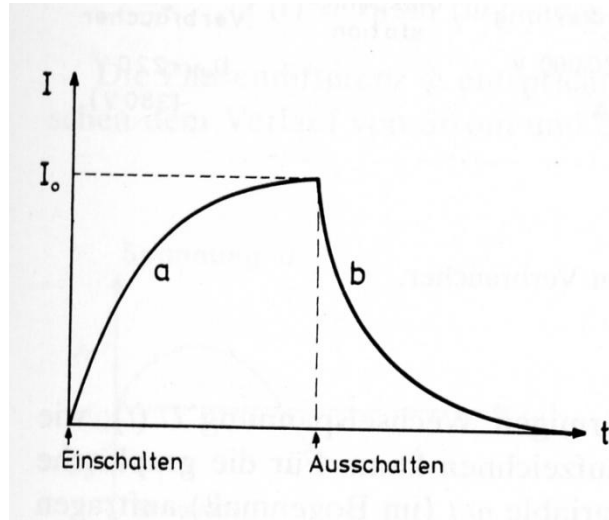
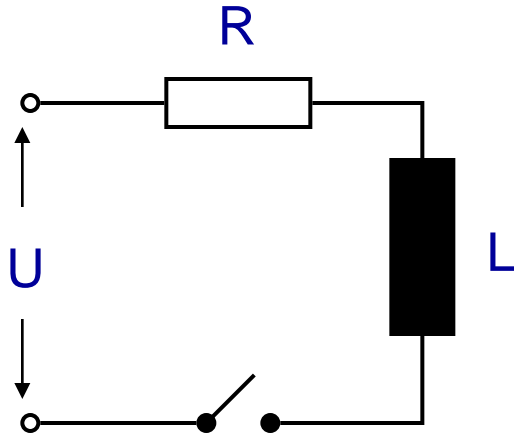
## Kondensatoren



Zeitkonstante der R-C-Kombination:  $\tau = R \cdot C$

# Schalten bei Spule

## Induktivitäten

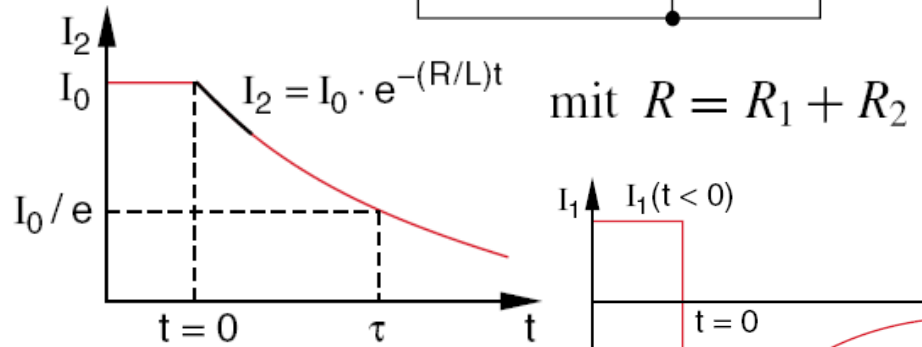
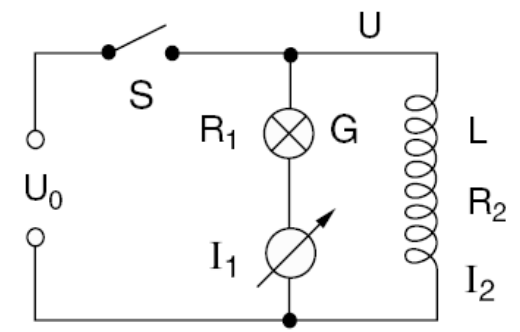
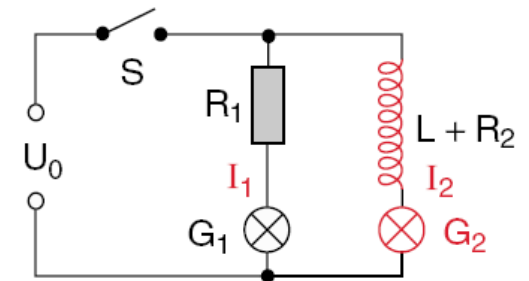


$$I = \frac{U}{R} (1 - e^{-tR/L}) \quad \text{Einschaltstrom}$$

$$I = \frac{U}{R} e^{-tR/L} \quad \text{Ausschaltstrom}$$

Zeitkonstante der RL-Kombination:  $\tau = L/R$

## Demonstration der Verzögerung Vergleich ohne/mit Spule



mit  $R = R_1 + R_2$

# Wechselspannungen und ströme

$$U = U_0 \sin(\omega t) \quad \text{Wechselspannung}$$

$$I = I_0 \sin(\omega t + \phi) \quad \text{Wechselstrom}$$

$\phi$ : Phase zwischen Strom und Spannung

<b>Elektrische Leistung:</b> $P = U \cdot I$ Einheit Watt: $1\text{W} = 1\text{ V} \cdot \text{A} = 1\text{ J/s}$
---

(Gleichstrom)

Wechselstrom:

**Wirkleistung**, die sich dem Stromkreis tatsächlich entziehen lässt

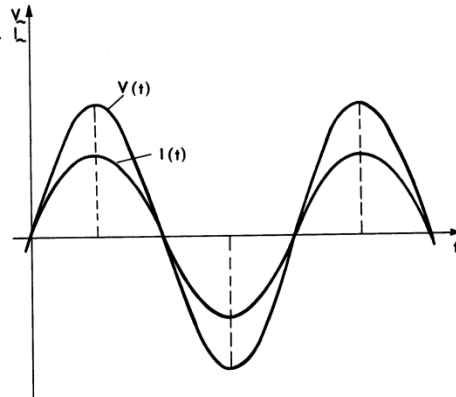
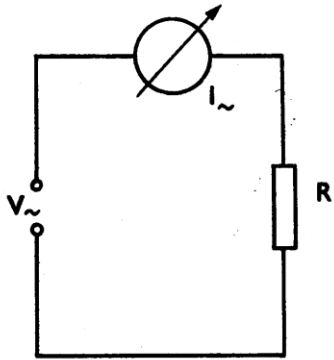
$$P_W = I_{eff} \cdot U_{eff} \cdot \cos\phi$$

$$I_{eff} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \quad U_{eff} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$$

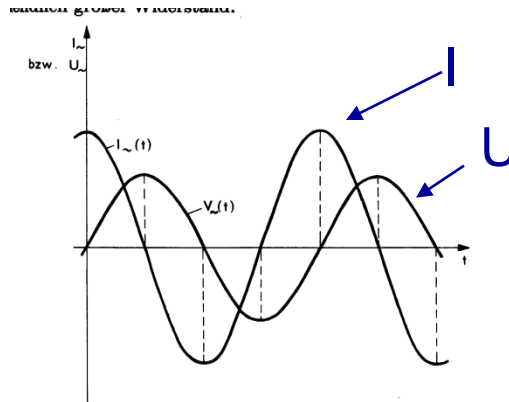
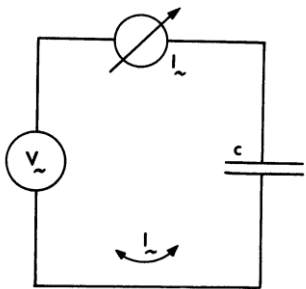
**Blindleistung**, die zum Aufbau des elektrischen und magnetischen Feldes des Kondensators oder der Spule erforderlich ist

$$P_{Bl} = I_{eff} \cdot U_{eff} \cdot \sin\phi$$

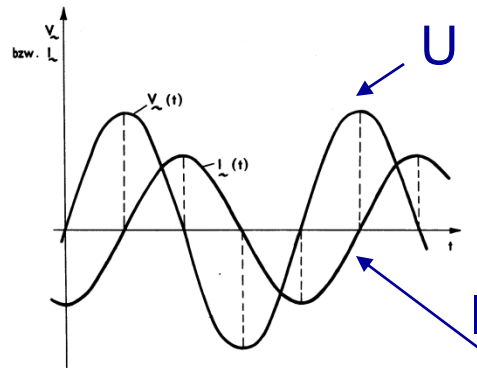
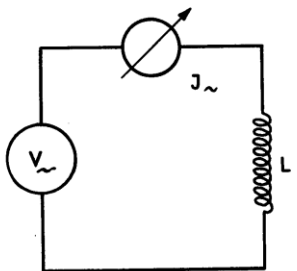
# Phasenbeziehung bei Wechselstromwiderständen



**Ohmscher Widerstand R:**  
Strom und Spannung in Phase  
 $\phi = 0$

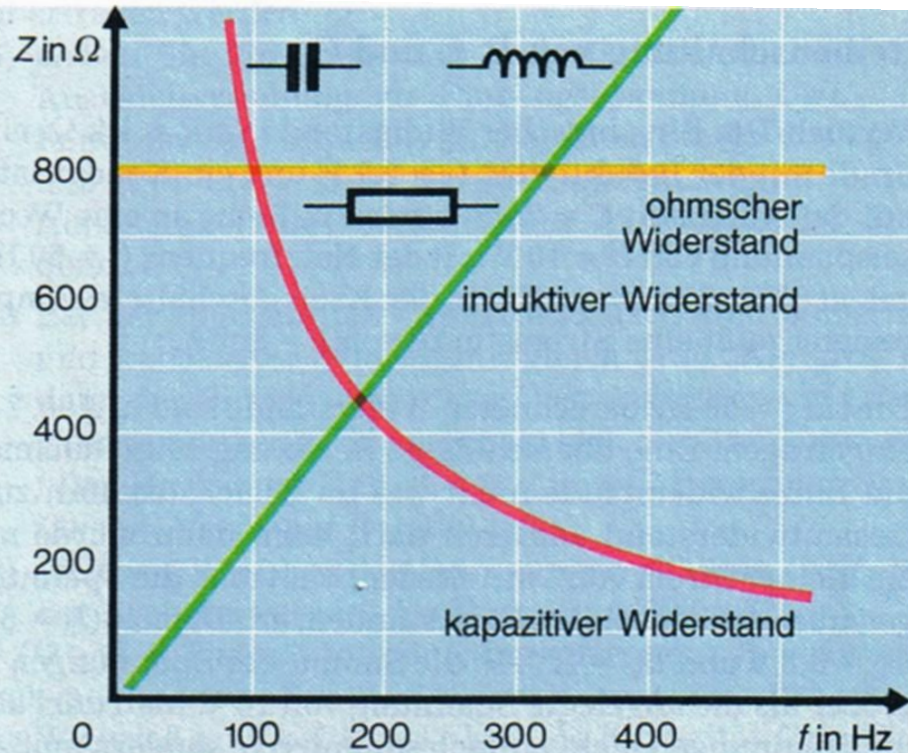


**Kondensator C:**  
Strom eilt Spannung voraus  
 $\phi = +\pi/2$   
 $R_C = 1/(\omega \cdot C)$



**Induktivität/Spule L:**  
Strom folgt Spannung  
 $\phi = -\pi/2$   
 $R_L = \omega \cdot L$

# Phasenbeziehung bei Wechselstromwiderständen



## Ohmscher Widerstand R:

Strom und Spannung in Phase

$$\phi = 0$$

## Kondensator C:

Strom eilt Spannung voraus

$$\phi = +\pi/2$$

$$R_C = 1/(\omega \cdot C)$$

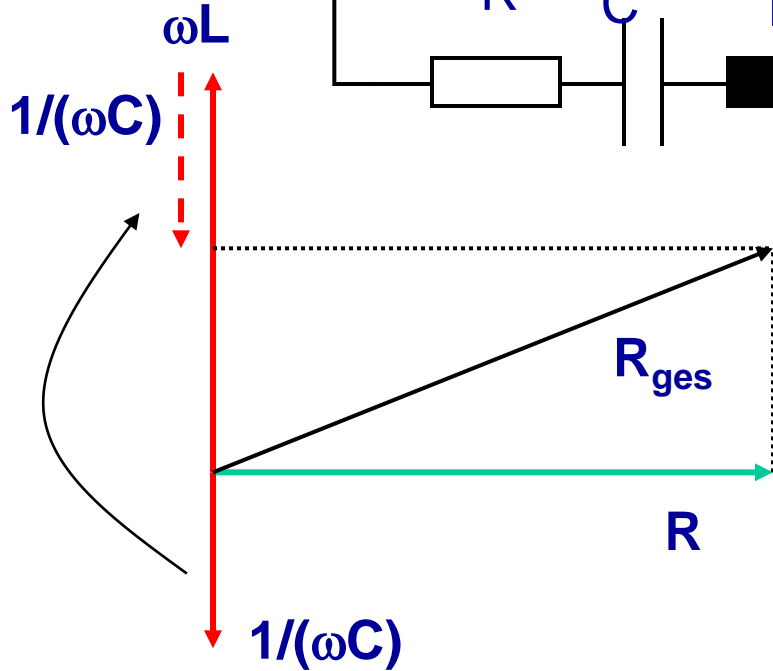
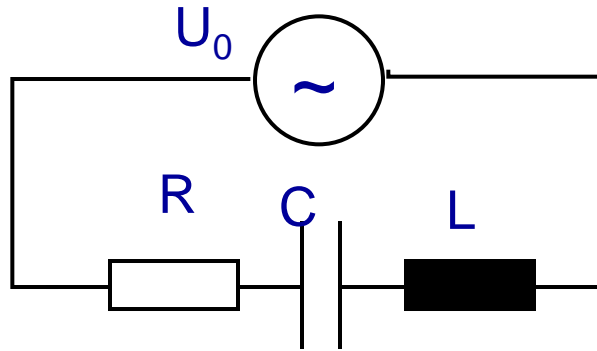
## Induktivität/Spule L:

Strom folgt Spannung

$$\phi = -\pi/2$$

$$R_L = \omega \cdot L$$

# Wechselstromwiderstand



Impedanz

= Gesamtwechselstromwiderstand  
= Scheinwiderstand, oft  $R_{ges} = Z$

$$R_{ges} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

Wirkwiderstand

Blindwiderstand

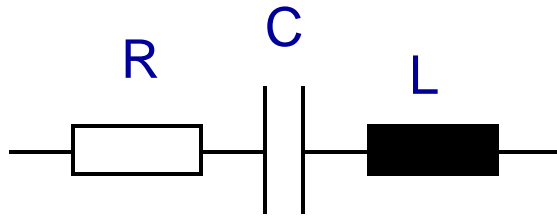
$$X_L + X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}$$

Bemerkung 1: Wieder 'mal Phythagoras!

Bemerkung 2: Darstellung „vereinfacht“ sich bei Betrachtung mit komplexen Zahlen:  $Z = R + i(X_L + X_C)$

(Bei Parallelschaltungen addieren sich die Leitwerte  $1/R$ .)

# Schwingkreise

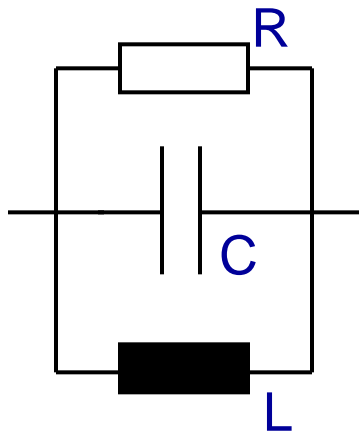
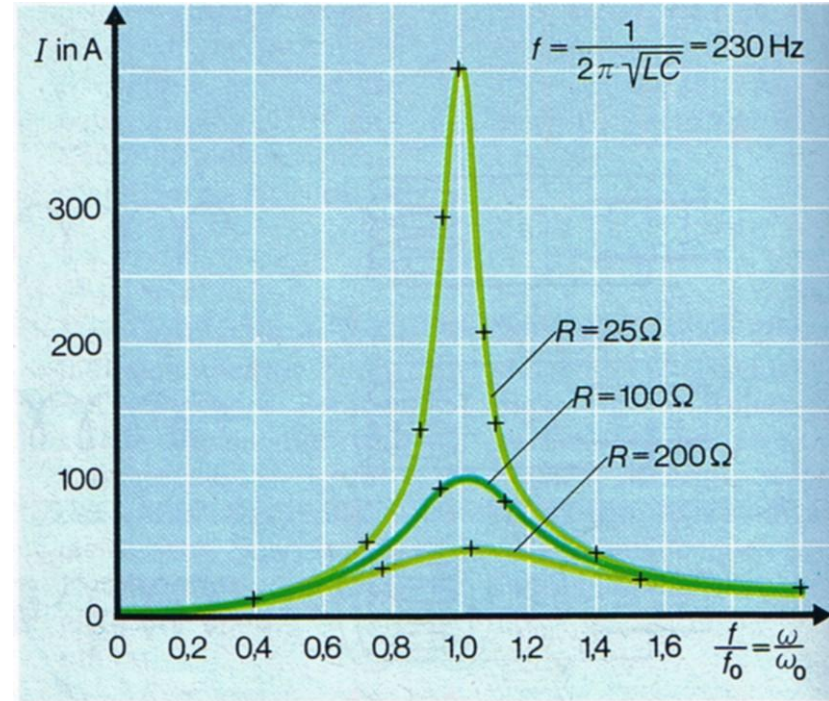


**Serienschwingkreis** → Resonanz

Scheinwiderstand minimal,  
d.h. Strom maximal, wenn

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \longrightarrow \omega_{res} = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

Thomsonsche Formel

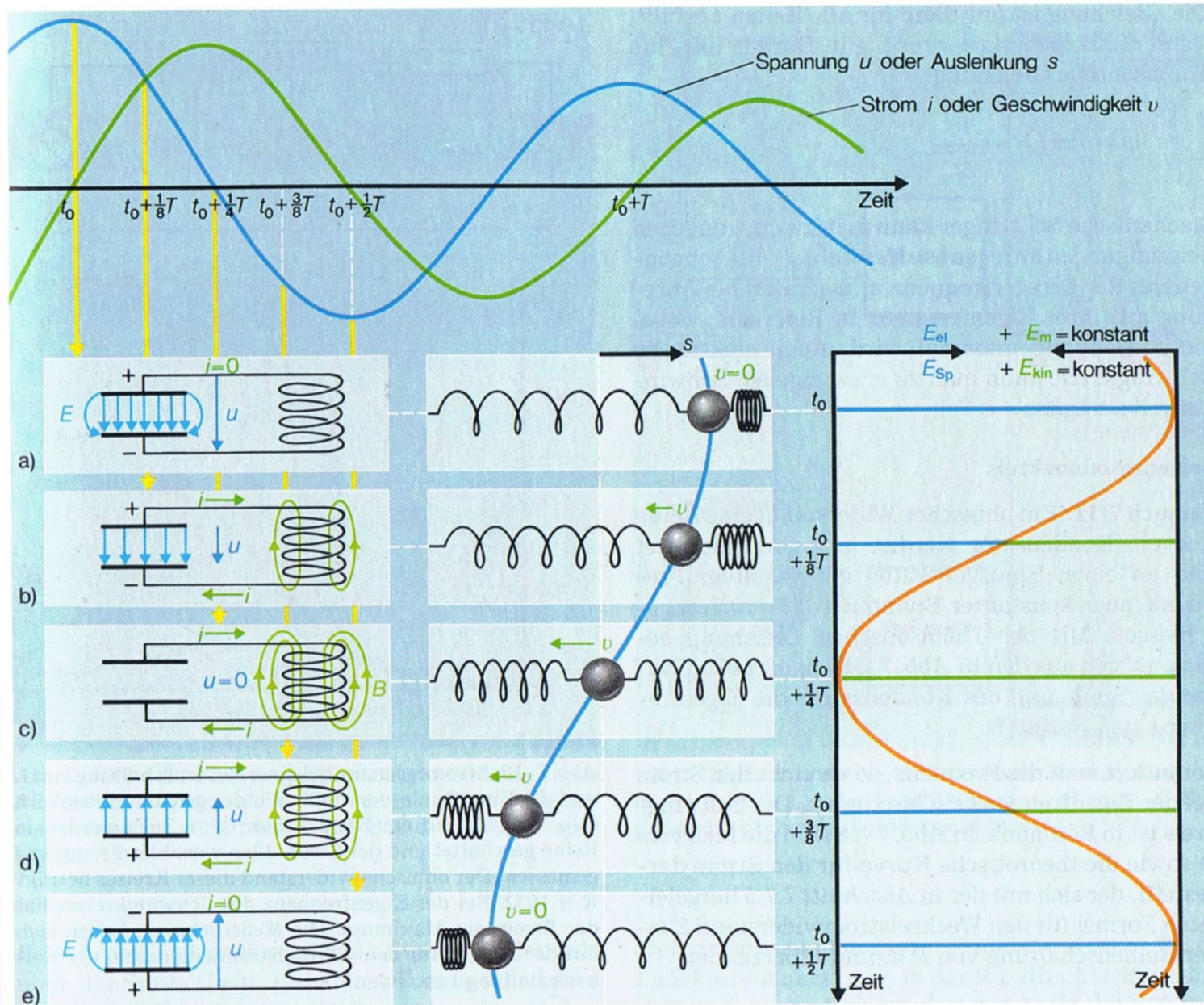


**Parallelschwingkreis** → Resonanz

Bei Resonanz Widerstand maximal  
und Strom minimal



# Schwingkreis (Analogie zw. elektr. und mech.)

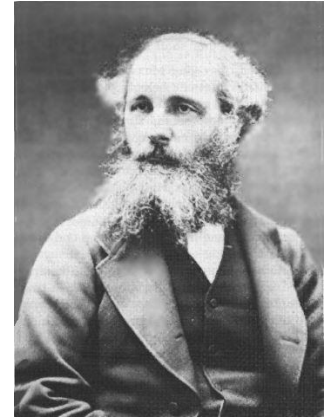


# Grundzüge der Elektrodynamik

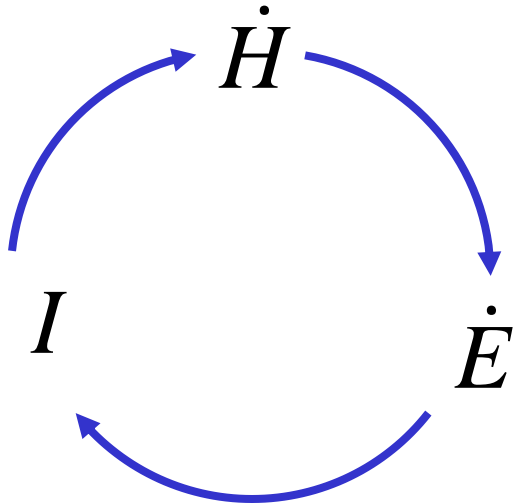
## Maxwellsche Gleichungen (2 von 4):

Faraday-Henry-Gesetz:  $\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\mu\mu_0 A \frac{d\vec{H}}{dt}$

Ampère-Maxwell-Gesetz:  $\oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = \varepsilon\varepsilon_0 A \frac{d\vec{E}}{dt} + \vec{I}$



James Clerk Maxwell  
1831-1879

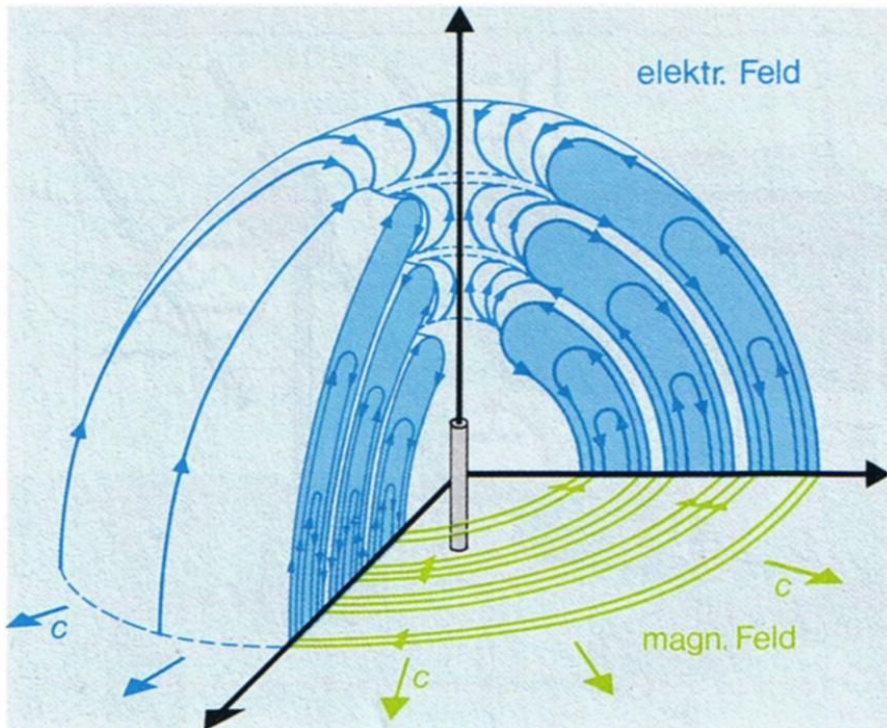
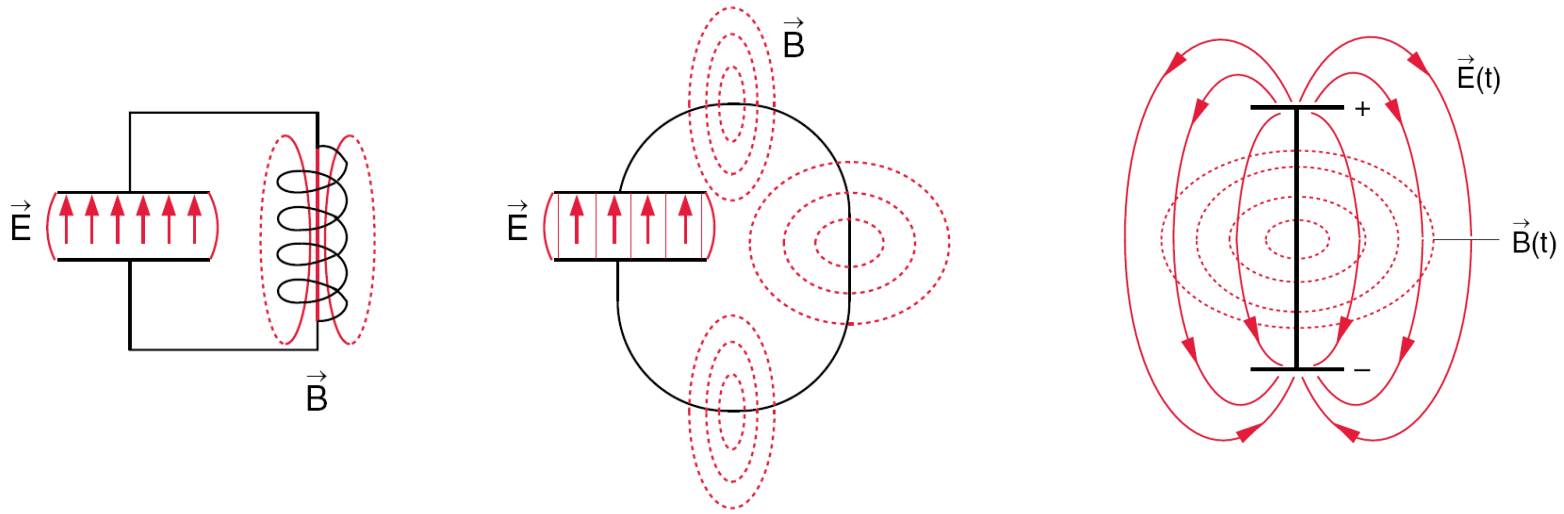


Vereinigung elektrischer  
und magnetischer Beschreibungen



Elektromagnetische Gleichungen

# vom Schwingkreis zur Dipolantenne

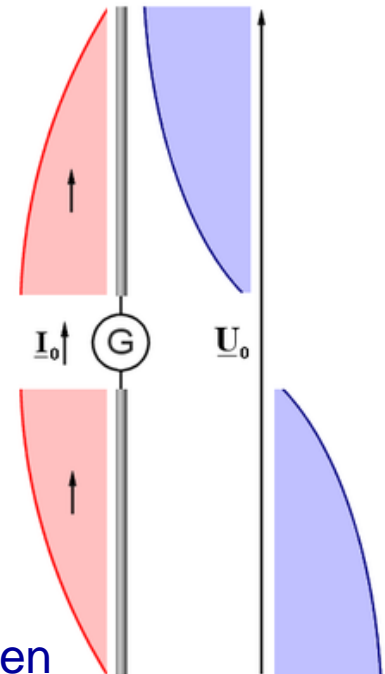


resonante  
Anregung:

Wellenlänge passt  
zur Antennenlänge  $l$

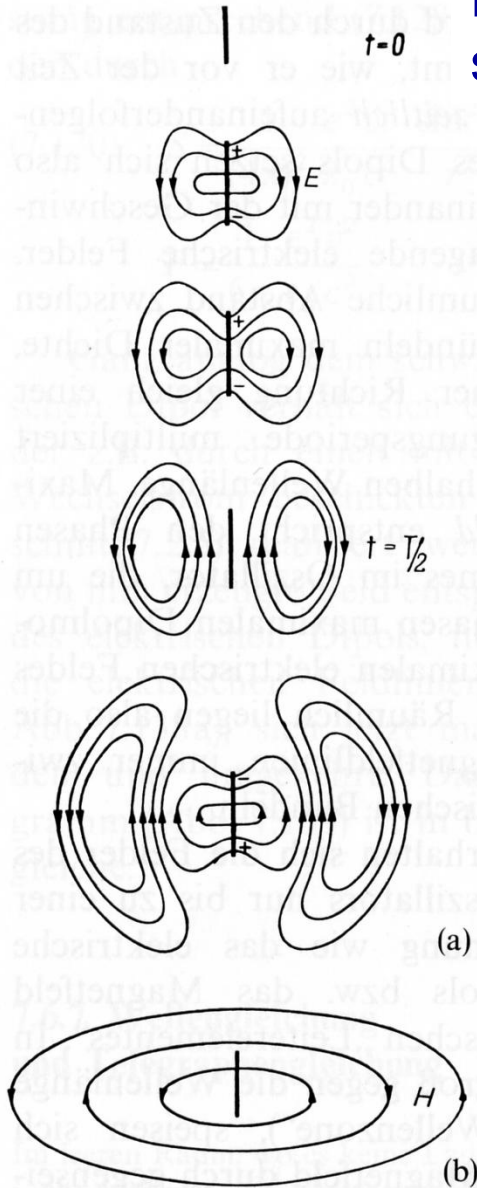
$$\frac{\lambda}{2} = l$$

Bem.:  
Das ist nur eine  
von verschiedenen  
Längenmöglichkeiten.



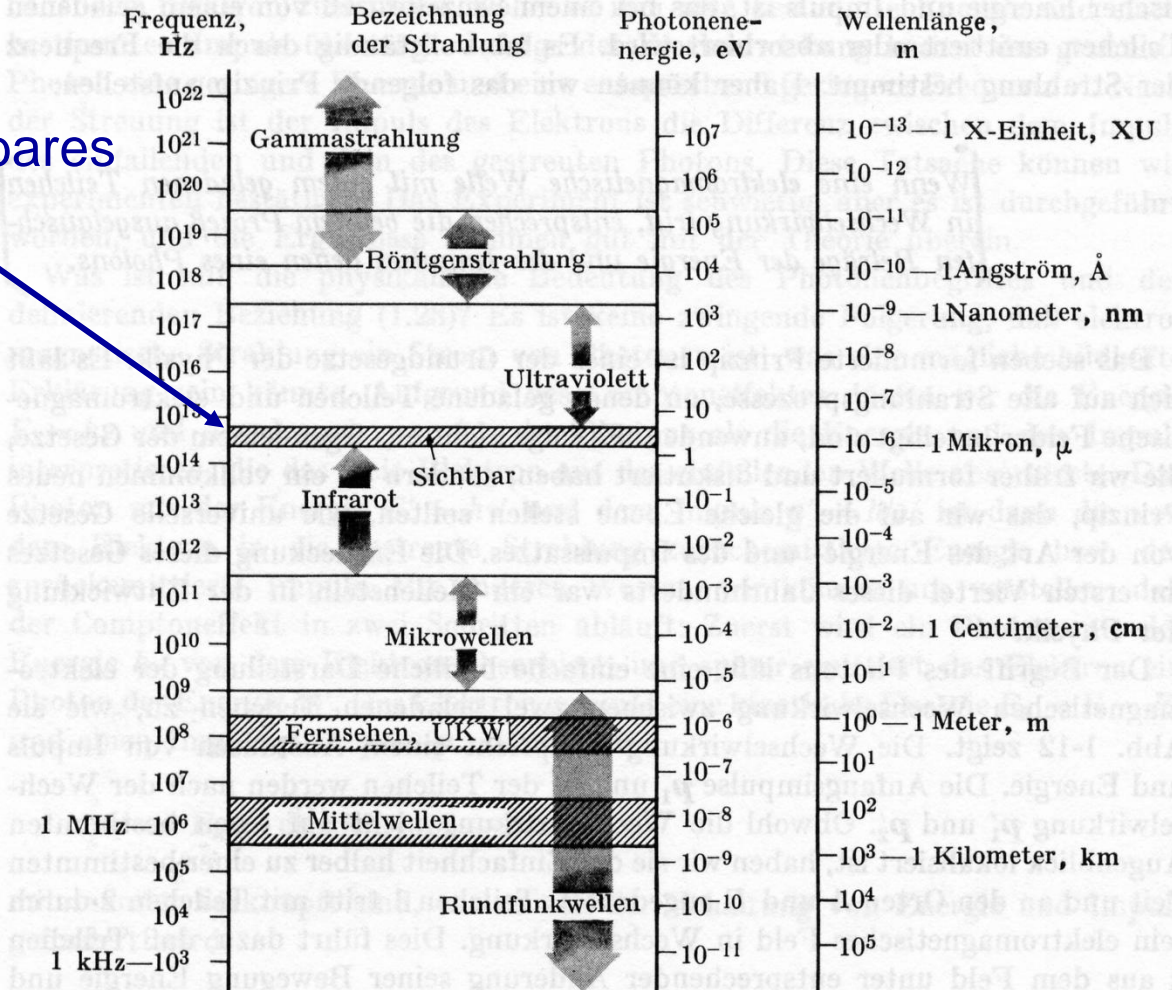
# elektromagnetische Schwingungen

## Dipol- schwingungen

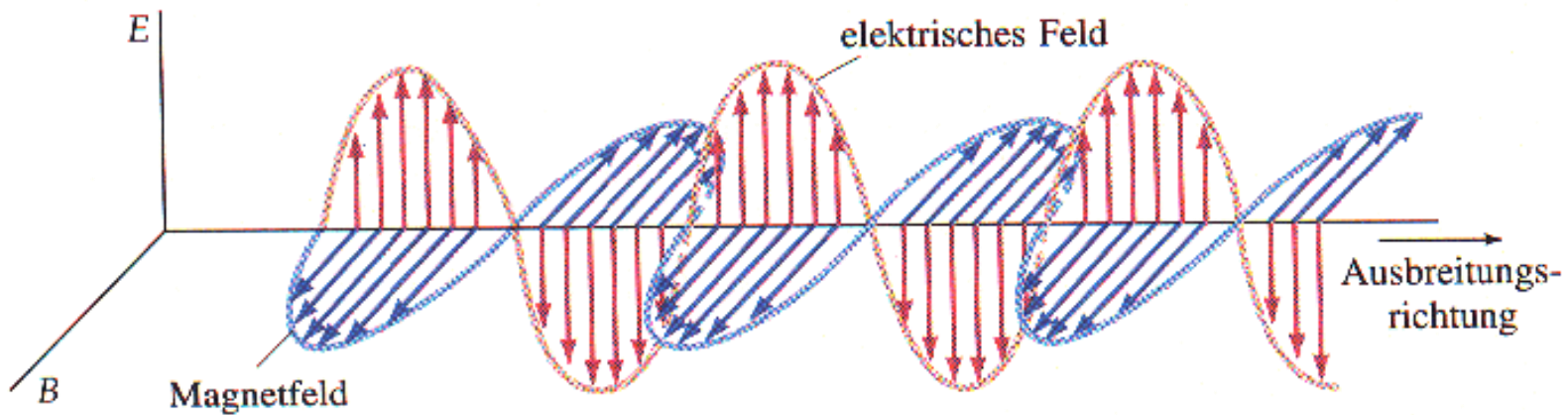


sichtbares  
Licht

## elektromagnetisches Spektrum



# Elektromagnetische Wellen



$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\omega t + \vec{k} \cdot \vec{r})$$
$$\vec{H} = \vec{H}_0 \cos(\omega t + \vec{k} \cdot \vec{r})$$

E und H schwingen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung: **Transversalwelle**

Lichtgeschwindigkeit in Materie:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \epsilon_0 \mu \mu_0}}$$

im Vakuum:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \stackrel{\text{def}}{=} 2.99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

# Ladungstransport im Vakuum, im Plasma

$$I = \frac{dQ}{dt} \longrightarrow \text{Transport von Ladungsträgern}$$

**im Vakuum**  
**im Plasma (ionisierten Gasen)**  
in Elektrolyten  
in Halbleitern  
in Metallen

**Vakuum:** freie Ausbreitung der Ladungsträger

- Freisetzung von Elektronen durch
1. Photoemission
  2. Thermische Emission
  3. Feldemission
  4. Sekundäremission

**Plasma:** ionisierte Gase,

freie Elektronen und Ionen in etwa gleicher Anzahl  
sehr guter elektrischer Leiter

- ✗ Glimmentladungen (Neonröhre)
- ✗ Bogenentladungen (Bogenschweißen, Blitze)
- ✗ HF- und Mikrowellenentladungen (Ätzen von Computerchips)
- ✗ Fusionsplasmen

# Ladungstransport in Elektrolyten

Aufgrund der elektrolytischen Dissoziation von Molekülen in Lösungsmitteln bilden sich positive (Kationen) und negative Ionen (Anionen),

z.B. bei Kochsalz in Wasser:  $\text{NaCl} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$ .

Dissoziationsgrad = Zahl der gespaltenen / Zahl der gelösten Moleküle

Äußere Spannung führt zur Ionenbewegung, d.h. elektrischen Strom und auch Materienstrom. Die Ionen können sich an den Elektroden abscheiden (Kationen an der Kathode, Anionen an der Anode). Dabei gilt das

1. Faradaysches Gesetz: Die Masse der an den Elektroden infolge Stromfluß umgewandelten Stoffe ist proportional der transportierten Ladung:

$$m = k \cdot Q \quad k: \text{ elektrochemisches Äquivalent}$$

Alternative Formulierung:

Für die Abscheidung benötigt man die Ladung

$$Q = z n N_A e = z n F$$

Faraday-Konstante

Wertigkeit

Stoffmenge

Avogadro-Konstante

Elementarladung

## 2. Faradaysches Gesetz

$$Q = znN_A e = znF$$

Faradaykonstante

$$F = N_A e = 96485 \text{ C / mol}$$

⇒ Abgeschiedene  
Masse

$$M = \frac{Q}{zF} m_{mol}$$

Beim Vergleich verschiedener Elektrolyte gilt das

2. Faradaysches Gesetz: Durch gleiche Ladungsmengen werden Äquivalentmengen bzw. Äquivalentmassen abgeschieden. Dabei ist Äquivalentmenge = Stoffmenge mal Wertigkeit (manchmal in Einheiten  $1 \text{ val} = (1/z) \text{ mol}$ )

Alternativ:

Mit der Ladungsmenge  $Q = 96485 \text{ C}$  werden  $N_A$  einwertige Ionen, also die „Molmasse“  $N_A m_I$  transportiert ( $m_I = \text{Ionenmasse}$ ),

Allgemein bei Wertigkeit  $z$  die Äquivalentmasse (alt: Grammäquivalent)

$$\frac{N_A m_I}{z}$$



# Ladungstransport in Metallen und Halbleitern

$$I = \frac{dQ}{dt} \longrightarrow \text{Transport von Ladungsträgern im Vakuum}$$

im Plasma (ionisierten Gasen)  
in Elektrolyten  
**in Halbleitern**  
**in Metallen**

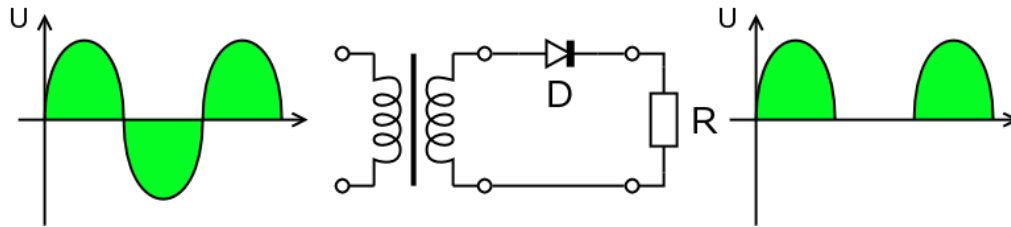
**Metalle:** frei bewegliche Elektronen im Metallgitter (Elektronengas)  
(Widerstand erhöht sich bei Erwärmung, da die Elektronen auf Ihrem Weg öfter mit den Atomen stoßen.)

**Halbleiter:** Leitungselektronen müssen erst erzeugt werden  
- durch Temperatureffekte  
(Widerstand verringert sich bei Erwärmung.)  
**Heißleiter**  
- oder gezielte Verunreinigungen (Donatoren)

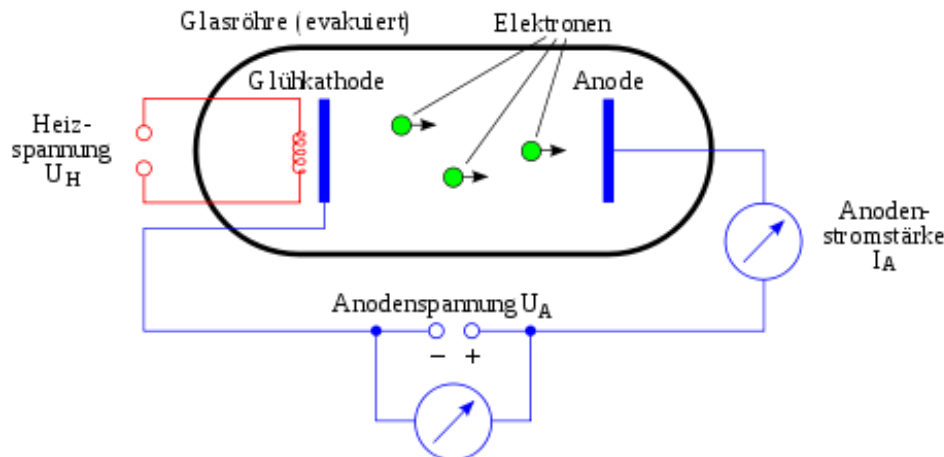
# Halbleiteranwendungen in nichtlinearen Bauelementen

**Diode:** elektrisches Bauelement, das Strom nur in einer Richtung passieren lässt und in der anderen Richtung wie ein Isolator wirkt.

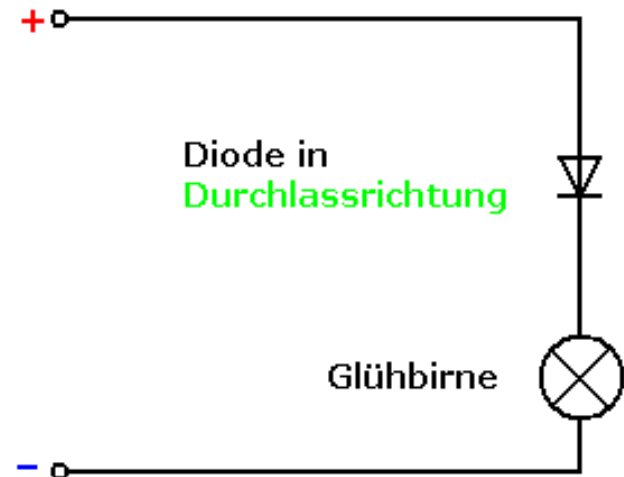
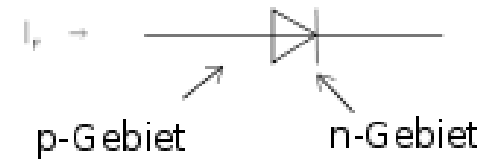
=> Gleichrichtung von Wechselspannung (analog Rückschlagventil bei Wasserleitung)



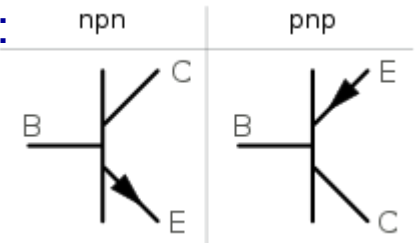
Früher mit „Vakuumdiode“:



Anode Kathode

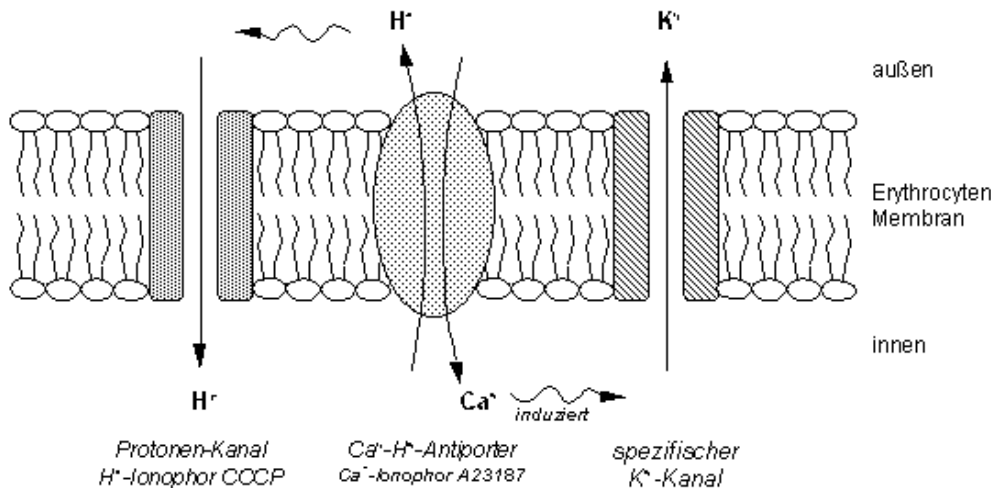


**Transistoren:**



Verstärken/Regeln  
Großer Signale durch kleine

# Membranpotentiale



Über einer Membran  
kann eine Konzentrations-  
spannung  $U$  entstehen

## Nernstsche Gleichung

$$U = \frac{kT}{z \cdot e} \ln \frac{c_i}{c_a}$$

$$= \frac{RT}{zF} \ln \frac{c_i}{c_a}$$

$k$ : Boltzmannkonstante

$T$ : Temperatur

$z$ : Ladungszustand der Ionen

(Wertigkeit; einfach, zweifach..)

$e$ : Elementarladung

$c_{i,a}$ : Konzentration des Elektrolyten auf der  
Innen- bzw. Außenseite der Membran

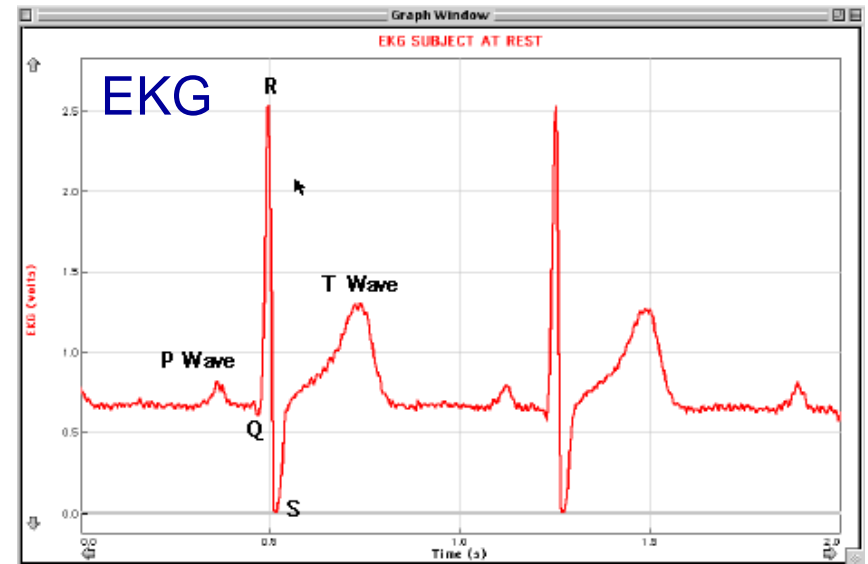
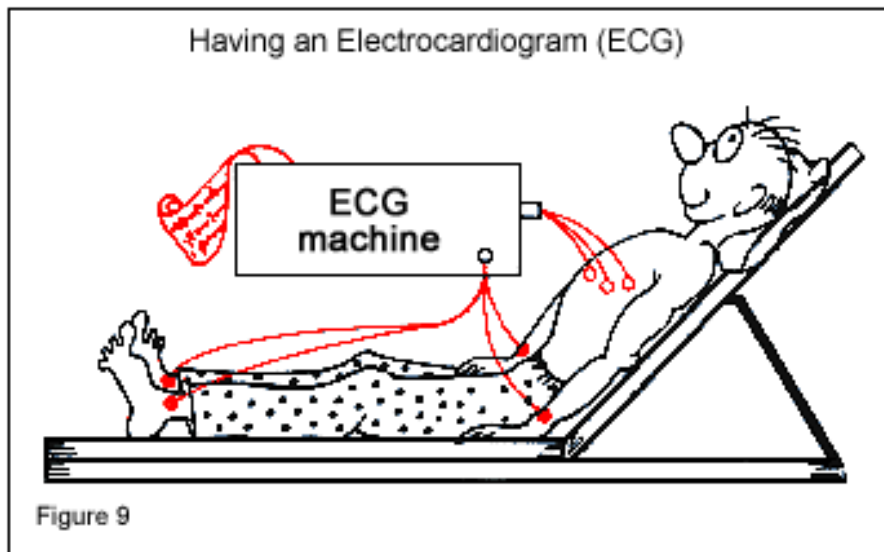
$R = N_A k$ : allg. Gaskonstante

$F = N_A e$ : Faradaykonstante

# EEG und EKG

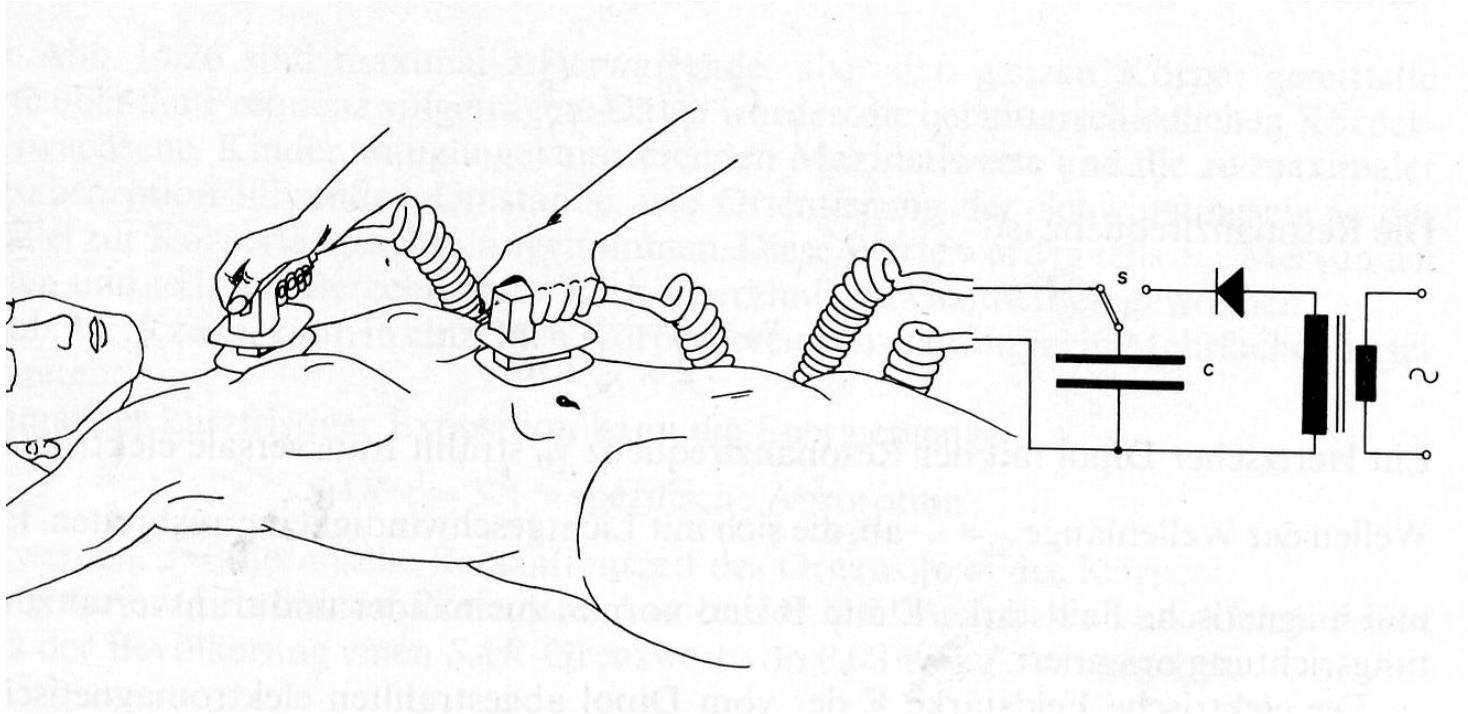


EEG



# Defibrillation

Angewendet bei Herzflimmern,  
z.B. im Zusammenhang mit Herzinfarkten



Defibrillator aus Transformator, Diode, Kondensator und Schalter  
und großflächige Elektroden.

Nach Aufladen des Kondensators wird ein kurzer (wenige ms), hoher  
(ca. 20 A) Strom durch das Herz geleitet, das nach der Erholung seinen  
gewohnten Rhythmus wieder aufnehmen kann.