

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)

Elektrizität und Magnetismus

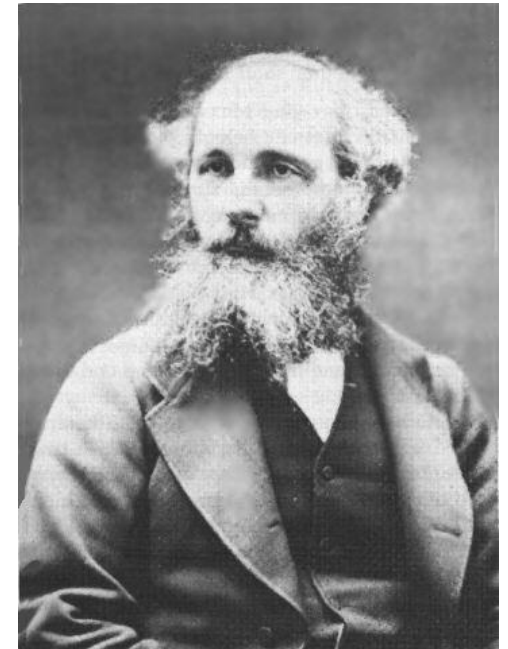
- Elektrische Felder
- Stromfluß (Gleichstrom)
- Magnetische Felder
- Elektromagnetische Induktion
- Wechselströme
- Elektrodynamik
- Ladungsträgertransport



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)

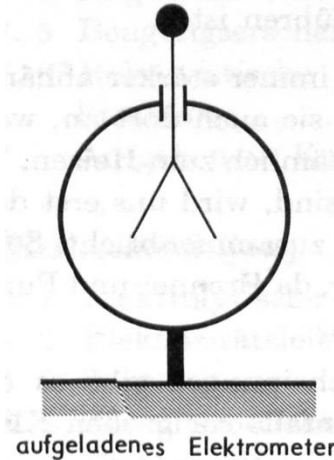
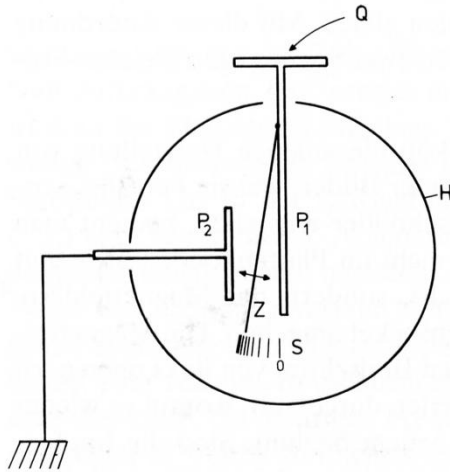
4.1.4 Elektrische Felder: Elektrisches Feld in der Umgebung einer Ladung und eines Dipols; Feldlinienanordnung für Kugel- und Plattenkondensator; qualitativer Zusammenhang zwischen Feldlinienbild und Feldstärke; Feld an der Oberfläche eines metallischen Leiters, Oberflächenladungen

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

Versuche: Reibungselektrizität, Kräfte zwischen elektrisch geladenen Körpern, Elektroskop



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)

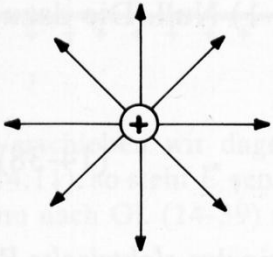
Ladungserhaltung: $\sum q_- + q_+ = 0$ aber: Ladungstrennung möglich
z.B. „Reibungselektrizität“

Leiter: guter Ladungsträgertransport

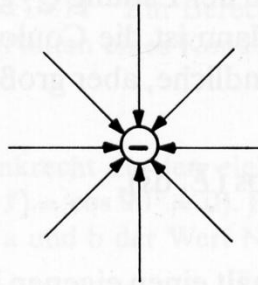
Isolator: schlechter Ladungsträgertransport

Elektrische Felder

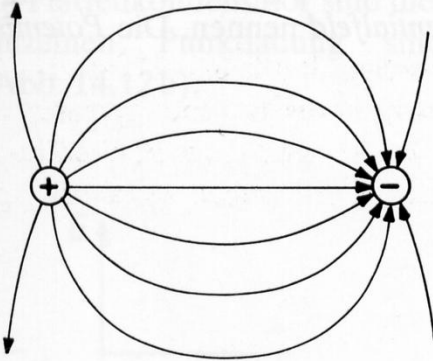
Versuche:
Coulombsches Gesetz, Feldlinienbilder



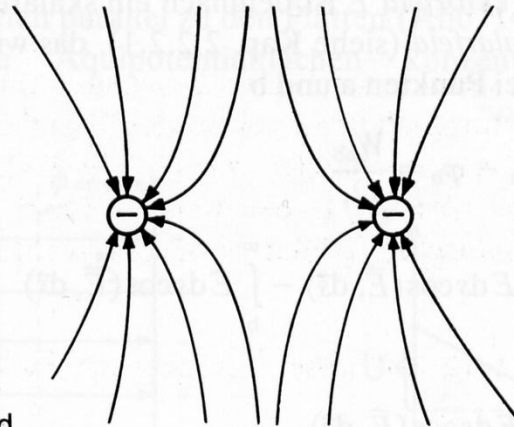
a



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

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

vektoriell:

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

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

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

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

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

Spannung U :

Einheit (Volt):

$$[U] = \text{V} = \text{J/C}$$

ϕ konstant: Äquipotentialflächen

Potentielle elektrische Energie am Punkt P_i :

$$E_{pot} = q\phi(P_i)$$

Äquipotentialflächen

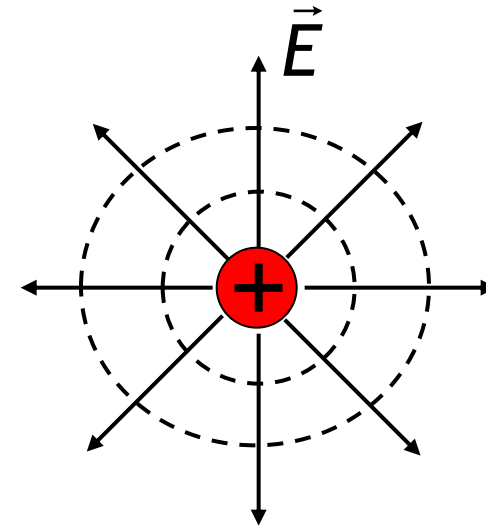
Versuche: Spitzenentladung
an Van-de-Graaff-Generator

Φ konstant: Äquipotentialflächen

Beispiel **Punktladung**:

Äquipotentialflächen sind
Kugelflächen

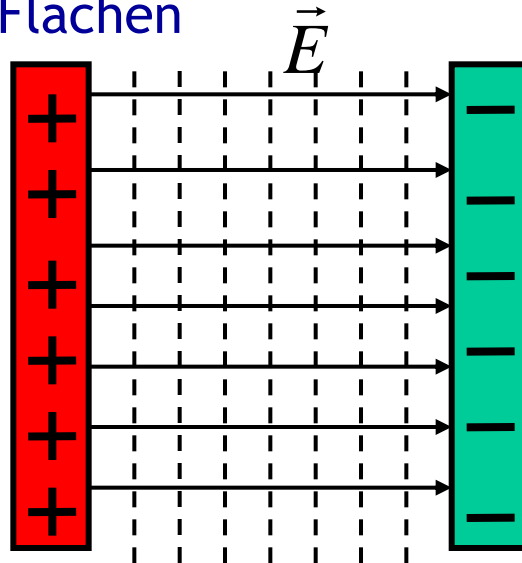
(Potential um homogen geladene
Kugeln so wie bei Punktladung)



Die Feldlinien stehen senkrecht
auf den Äquipotentialflächen.

Beispiel **Plattenkondensator**:

Äquipotentialflächen sind
Ebene Flächen



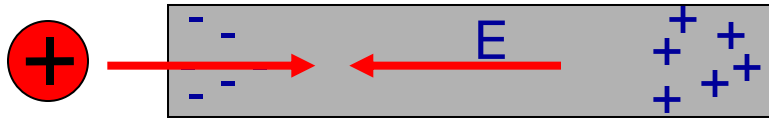
Metalloberflächen (ideale Leiter)
sind Äquipotentialflächen!

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

Influenz, Polarisation

Versuche: Sitz der Ladung (Faradayischer Käfig)
Influenz (Ladungstrennung im Plattenkondensator)

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



Polarisation:

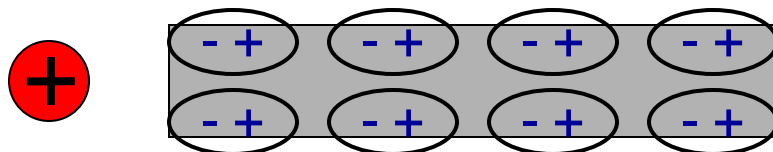
Ladung in der Nähe eines *Isolators* bewirkt Verschiebungspolarisation

(Atome werden polarisiert)

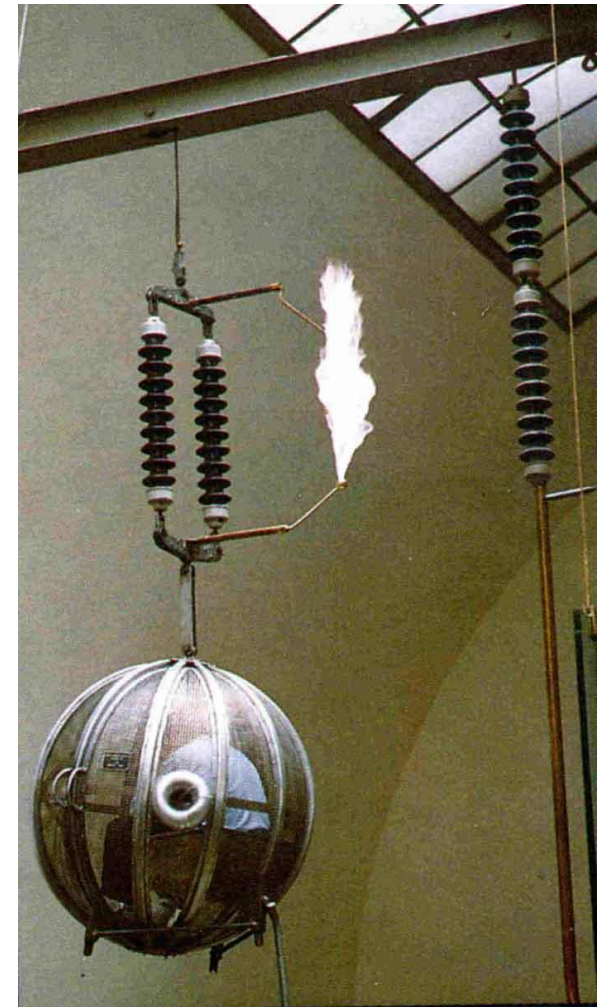
und/oder Orientierungspolarisation

(Dipole werden ausgerichtet).

Es entsteht eine Oberflächenladung.



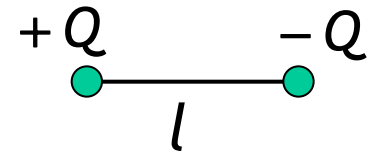
=> Das Innere eines Leiters ist feldfrei: „Faraday-Käfig“



=> In der Summe :Schwächung des Feldes im Innern.

Elektrische Dipole im Feld

Definition: System aus zwei ungleichnamigen Ladungen $+Q$ und $-Q$ (gleicher Größe) im Abstand l :
 Idealisierung mit l gegen null und Q gegen unendlich bei konstantem Produkt

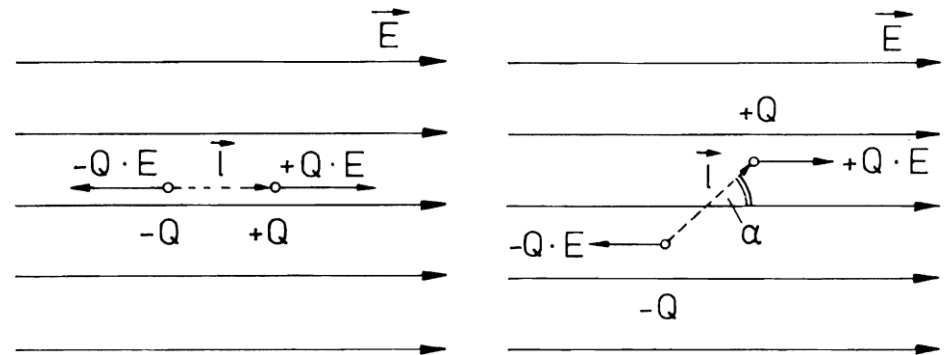


$$\vec{p} = Q \cdot \vec{l}$$

Dipol im elektrischen Feld:

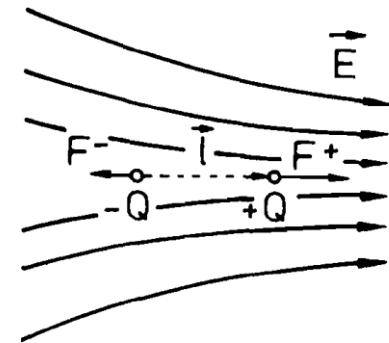
Im **homogenen Feld** erfolgt eine Ausrichtung entlang der Feldlinien aufgrund des Drehmoments

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



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

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

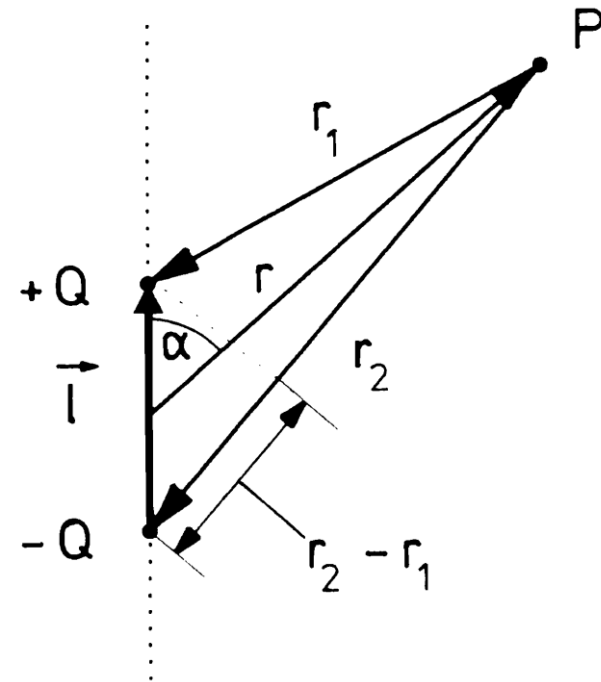
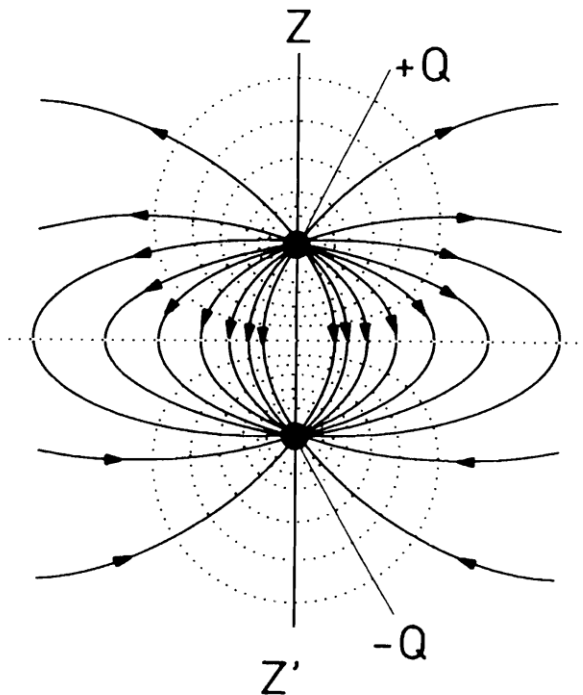


Feld und Potential elektrischer Dipole

Versuche (schon gezeigt):
Feldlinienbilder

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

Versuche: Plattenkondensator, (Pingpongball im Plattenkondensator)
Veränderung des Plattenabstands, Parallelschaltung, Reihenschaltung

Kapazität: Vermögen, Ladungen zu speichern
genauer: Verhältnis von gespeicherter Ladung
zu angelegter Spannung

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

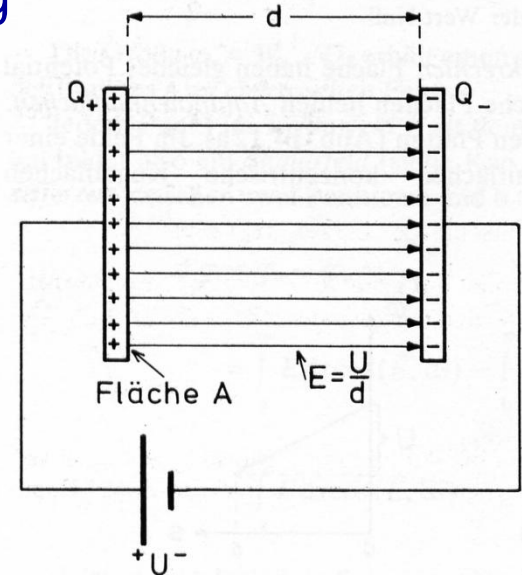
Einheit: Farad $F = C / V$

$Q = C U$ merke: sprich „ku gleich ku“

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

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

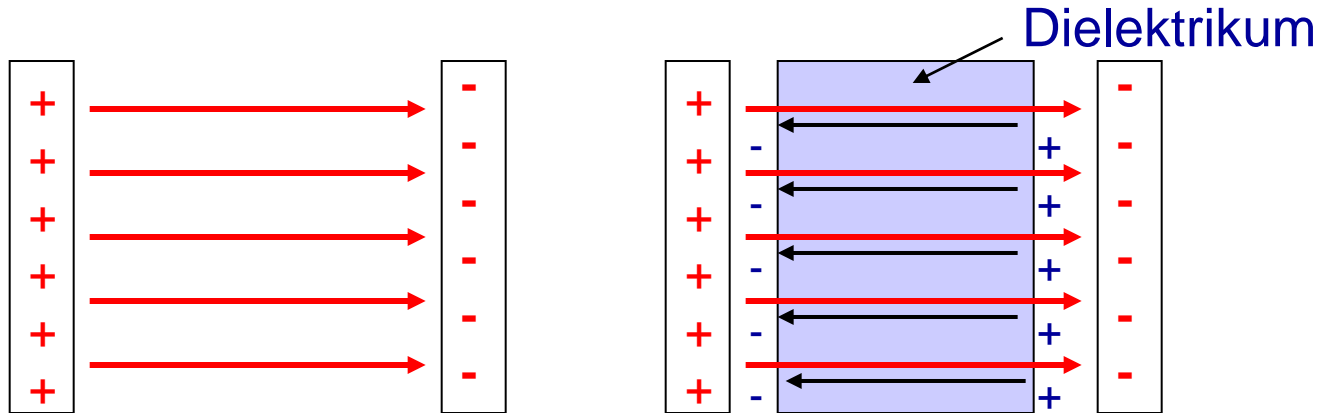
Serienschaltung mehrerer Kondensatoren: $1/C_{\text{ges}} = \sum 1/C_i$



Dielektrikum

Versuche: Dielektrikum im Plattenkondensator, zerlegbare Leidener Flasche, große Influenzmaschine

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) ϵ auch ϵ_{rel}

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

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 $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$

Vakuumbeitrag

Polarisation des Dielektrikums (Dipolmoment pro Volumen)

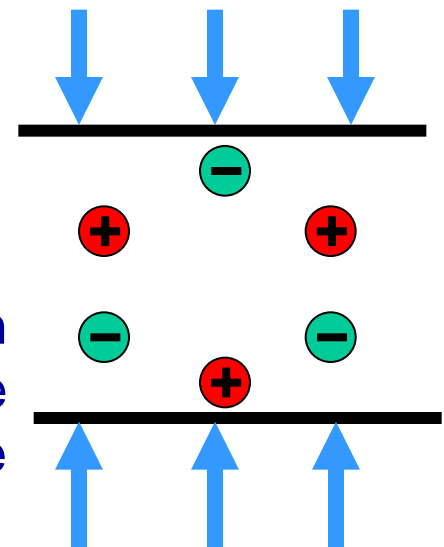
Elektrostriktion: elastische Verformung im E-Feld

Pyroelektrizität: Ladungstrennung durch Erwärmen

Piezoeffekt: Ladungstrennung durch Kraft

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

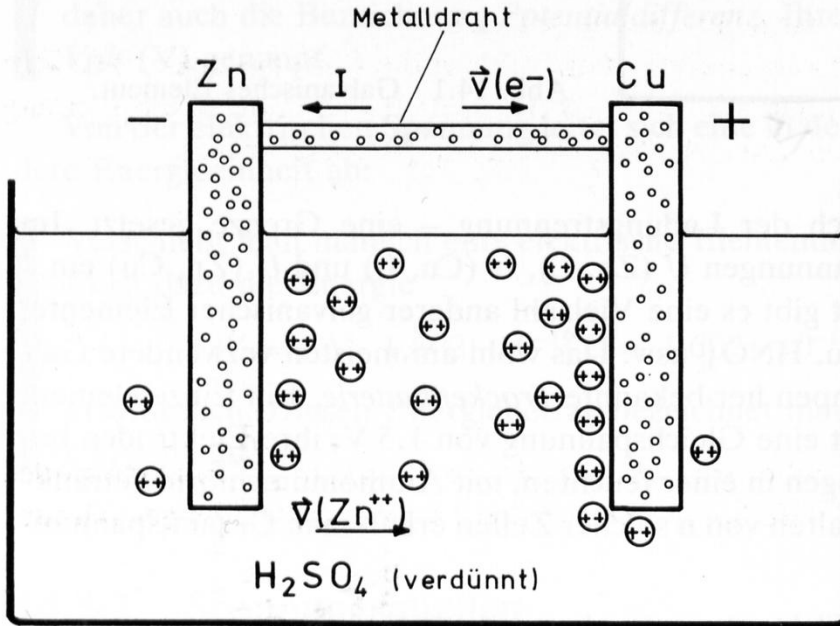
Inhomogenitäten bzw. Anisotropie
=> Verschiebung der Ladungsschwerpunkte



Galvanische Elemente

Galvanisches Element
(Akkumulatoren)

„Batterie“: Besteht im Wortsinne
eigentlich aus mehreren Zellen.



GPS GmbH Nr. 200 028



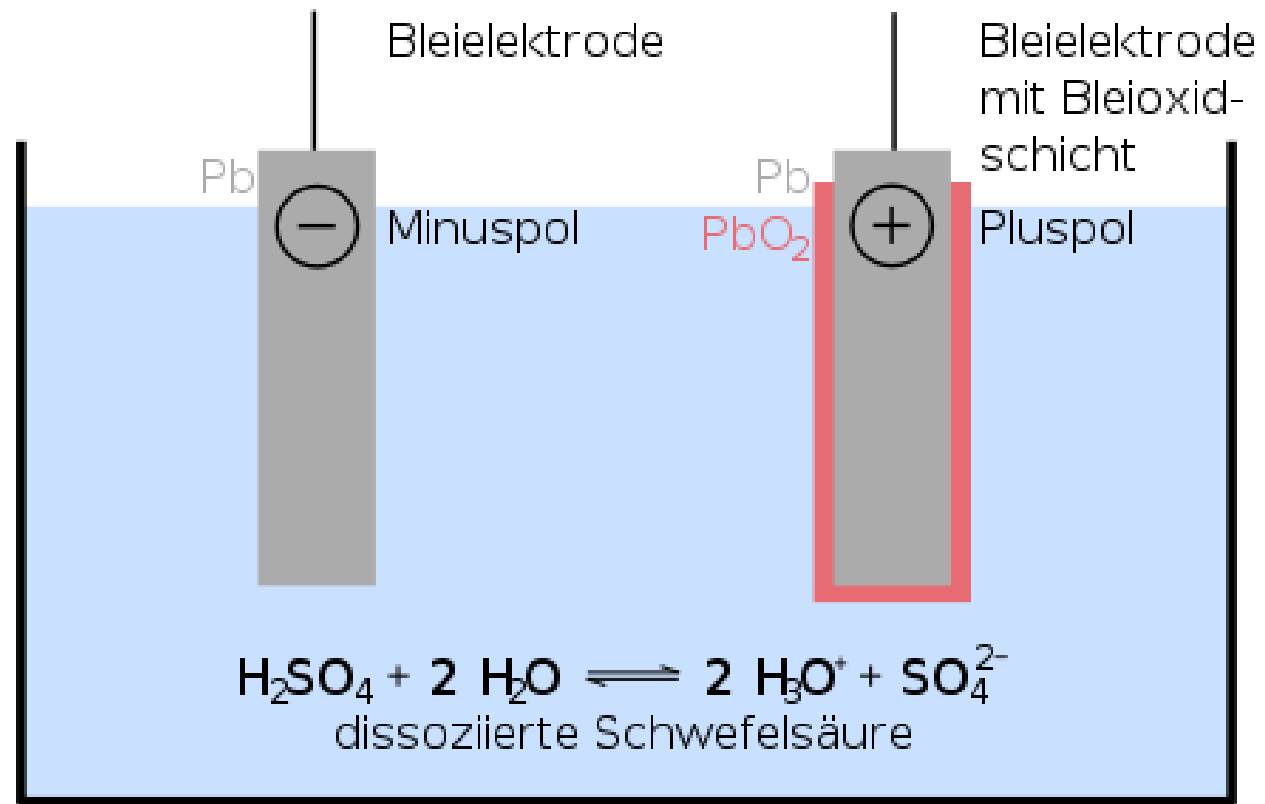
Unterschiedliches Lösungsbestreben
positiver Metallionen („Lösungstension“) verschiedener
Metalle in einem Elektrolyten führt zu Potentialdifferenz,

$$\text{z.B.: } U(\text{Zn,Cu}) = U(\text{Zn,L}) - U(\text{Cu,L})$$

Voltasche Spannungsreihe:

\leftarrow Al Zn Fe Cd Ni Pb H Cu Ag Hg Au Pt \rightarrow
 leichter löslich schwerer löslich \rightarrow

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: $\Delta\Phi = U \neq 0$ zwischen den zwei Punkten, zwischen denen der Strom fließt, z.B. Batteriepole
- Andererseits aber geschlossener Stromkreis, d.h. auch innerhalb der Batterie Strom (keine „Erzeugung“ oder „Vernichtung“ von Ladungsträgern)



Ampère 1775-1836

Widerstand, Ohmsches Gesetz

Versuche: Ohmsches Gesetz,
Temperaturabhängigkeit von R

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

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

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

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

Die Definition des **Widerstand s** gilt immer!
Davon zu unterscheiden ist das

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

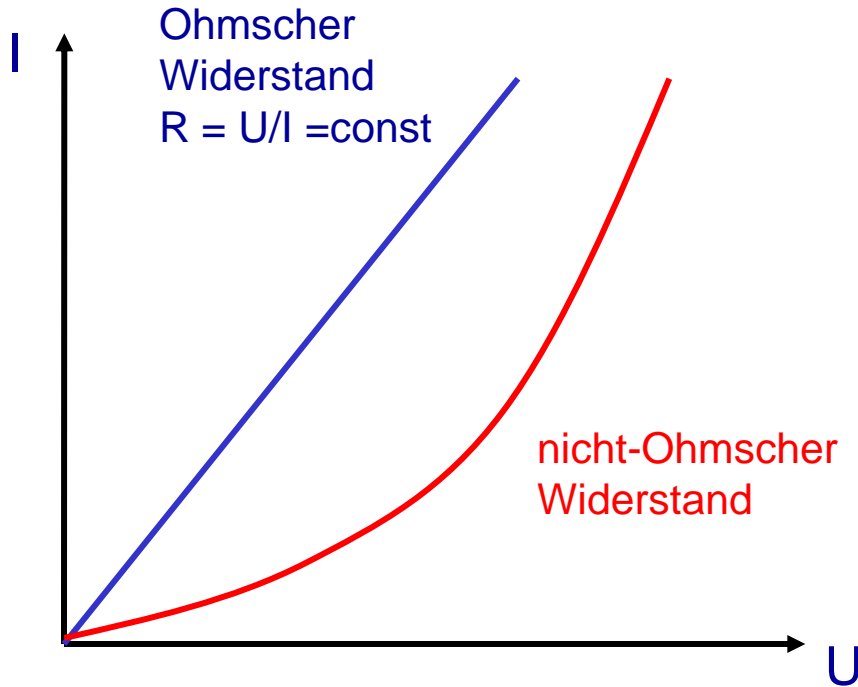
es gilt $U = R \cdot I$ bzw. $I = \frac{U}{R}$



Ohm 1787-1854

Entscheidend für einen Ohmschen Widerstand:
Er ist konstanter Proportionalitätsfaktor, d.h. sein Wert ist nicht abhängig
von I oder U (aber evtl. von anderen Größen wie z.B. der Temperatur!)

Ohmsches Gesetz



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

Für Drahtwiderstände:

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

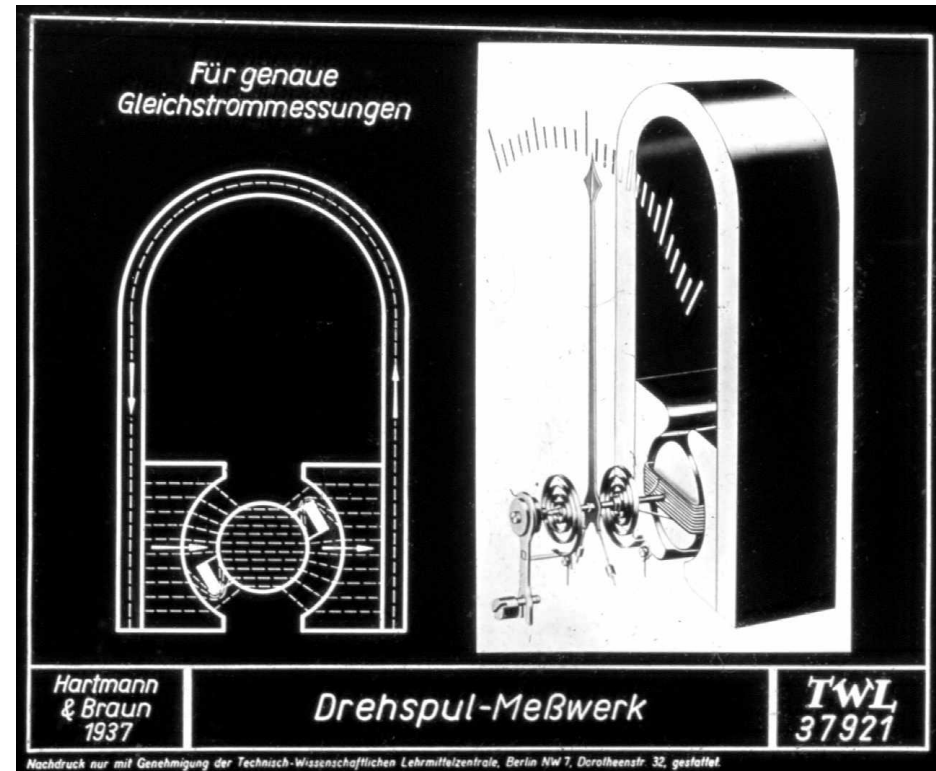
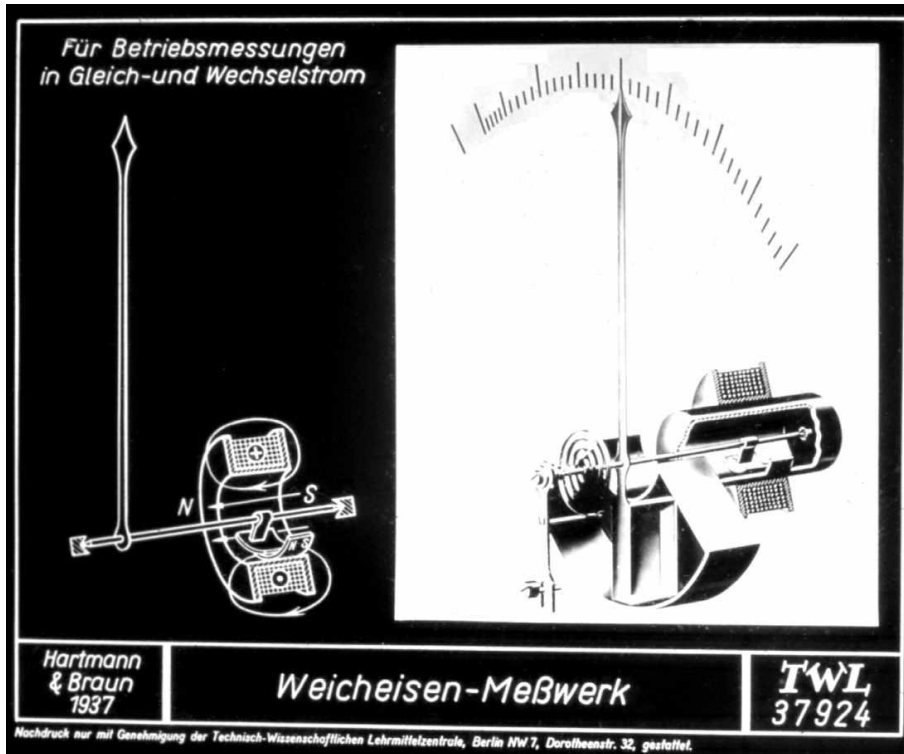


A, l : Querschnitt, Länge des Leiters
 $\rho(T)$: spezifischer Widerstand

Strommessung

Versuche: erst im Zusammenhang mit Magnetfeldern sinnvoll

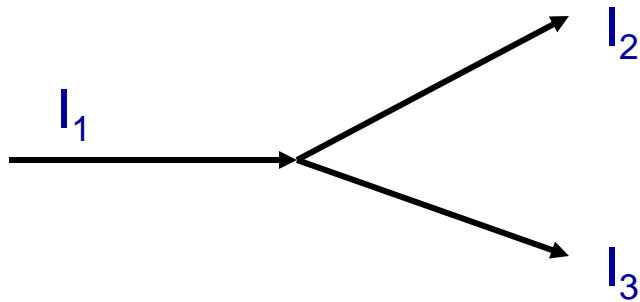
Mittels Amperemeter, oft über die vom Strom erzeugten magnetischen Wirkungen:



„Stromzange“

Kirchhoffsche Knotenregel

Versuche: Kirchhoffsche Regeln,
Parallelschaltung von ohmschen Widerständen



$$I_1 = I_2 + I_3$$

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

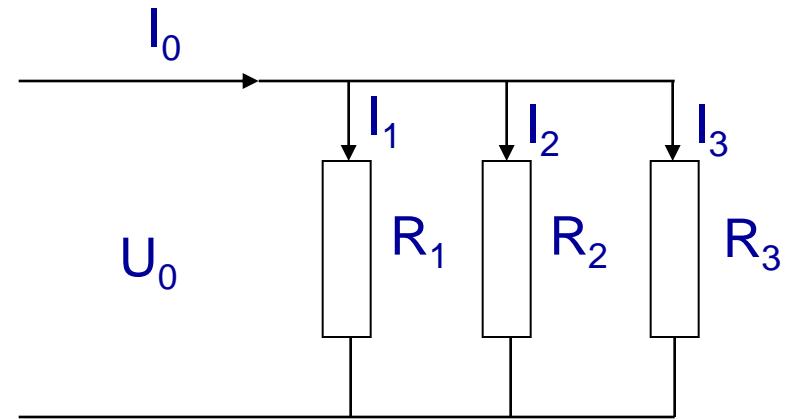
Beachte die Vorzeichen!

→ **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

Versuche: Kirchhoffsche Regeln,
Reihenschaltung von ohmschen Widerständen

Statisches elektrisches Feld ist „konservativ“, d.h. die Arbeit ist wegunabhängig. Anders ausgedrückt: Die Potentialwerte sind eindeutig.
⇒ Durchläuft man **eine Masche** zum Ausgangspunkt (**geschlossene Kurve**) Landet man also wieder beim Anfangspotential, d.h. die Summe der Spannungen über den Bauelementen ist gleich Null.

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

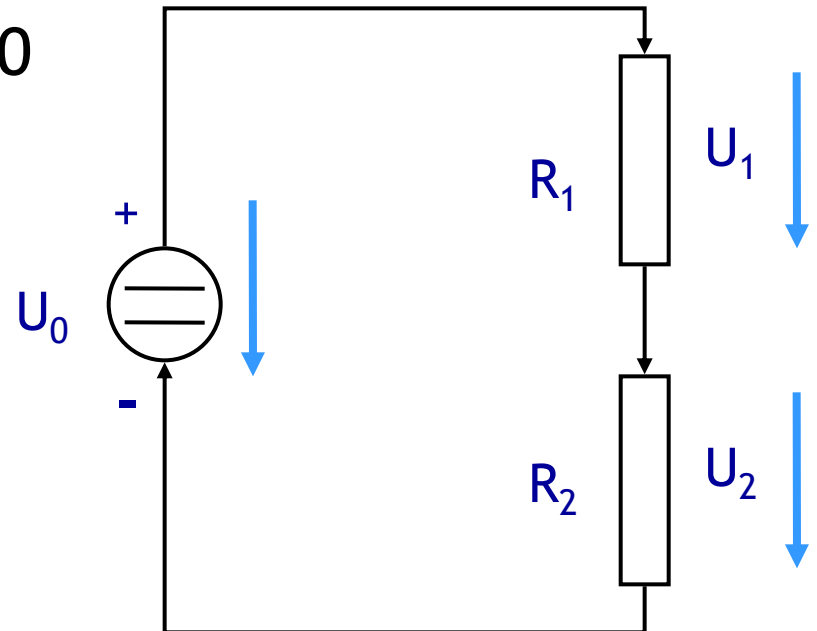
$$\text{allg.} \quad \sum_i U_i = 0$$

→ **Serienschaltung**
von Widerständen:

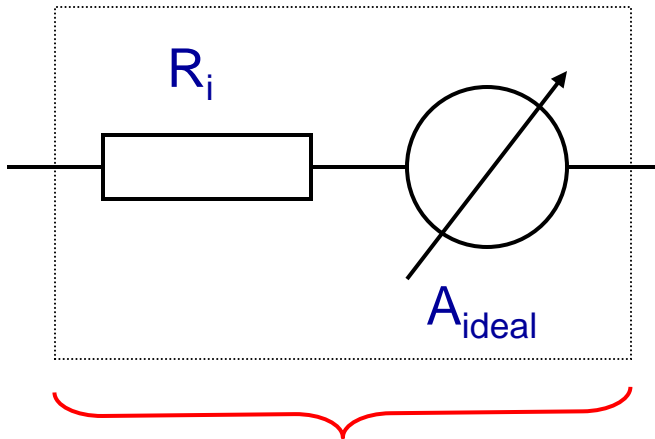
$$U_0 = U_1 + U_2 = I \cdot R_1 + I \cdot R_2$$

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

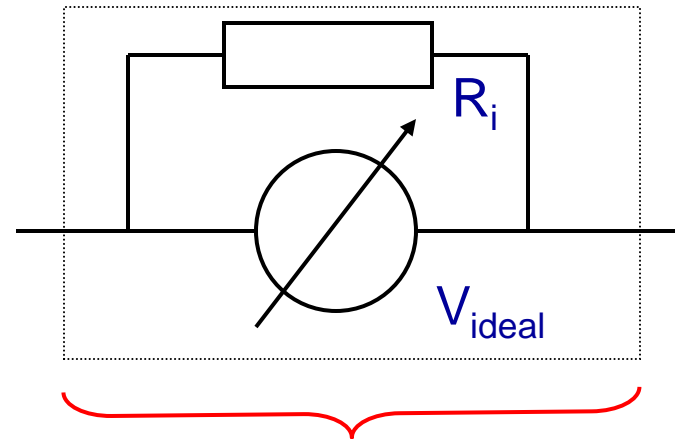


reales Ampèremeter

für Strommessungen
gewünscht

$$R_i \ll R_m$$

$$R_i \rightarrow 0$$



reales Voltmeter

für Spannungsmessungen
gewünscht

$$R_i \gg R_m$$

$$R_i \rightarrow \infty$$

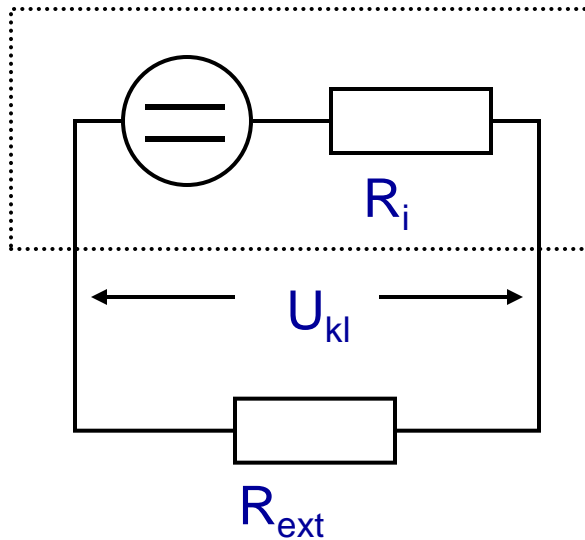
Beachte: Für Strommessungen muss der Schaltkreis im Allgemeinen geöffnet und das Amperemeter eingefügt werden.

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

Innenwiderstände bei Spannungsquellen

Versuche: Innenwiderstände von Spannungsquellen

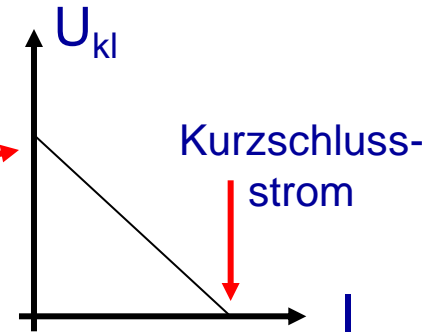
Auch Spannungsquellen (Netzgeräte, Batterien) haben Innenwiderstände.



Klemmenspannung:

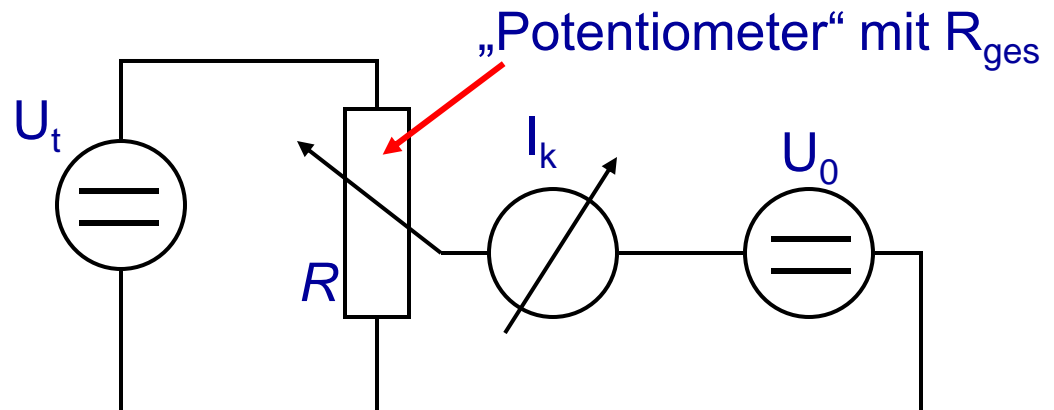
$$U_{kl} = U_0 - R_i \cdot I$$

„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.

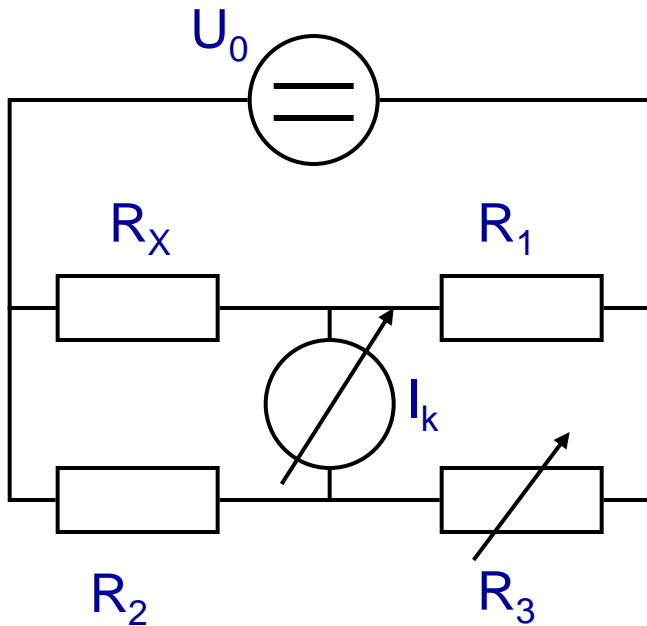


Wheatstonesche Brücke

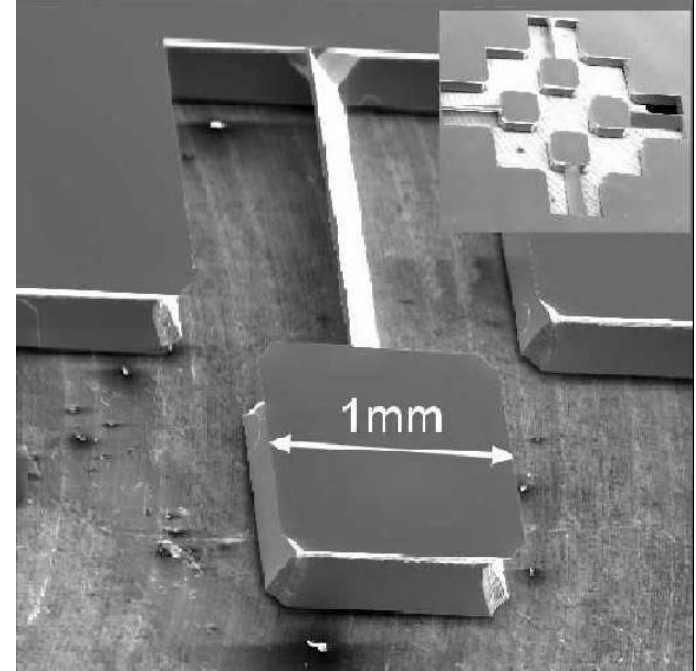
Analog: Methode zur Bestimmung eines elektrischen Widerstandes ohne Strom durch ein Messgerät (bei unbekanntem Innenwiderstand):

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
mit piezoresistiven Widerständen
entsprechend der Biegung
(MEMS mikro-elektro-mechanische Systeme)



Magnetfelder

Versuche: Oerstedt-Versuch
(Kompass an stromdurchflossenenem Draht)

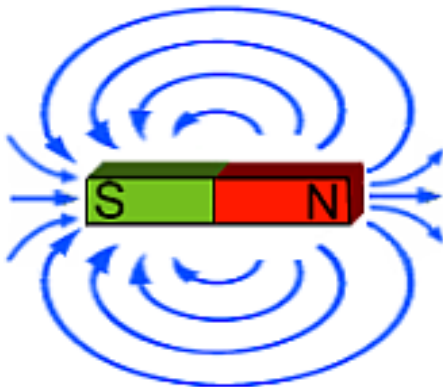
Stabmagnet: S  N

Beobachtungen:

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

Aber: Es gibt keinen magnetischen Monopol.

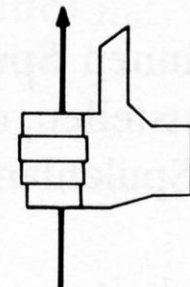
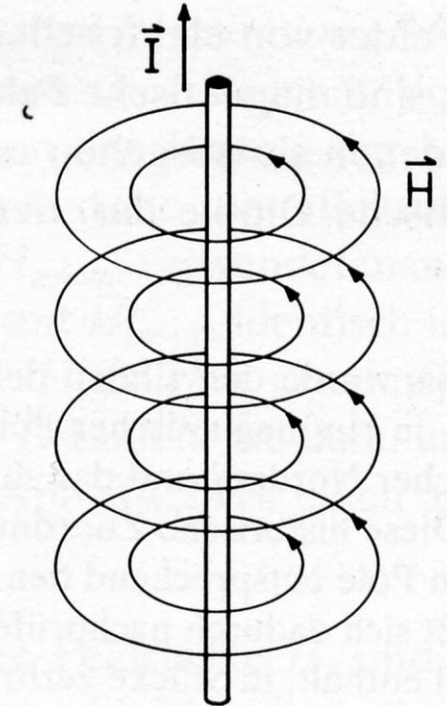
Magnetfeld eines Stabmagneten:



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“

Durchflutungsgesetz

Versuche: magnetische Feldlinien
von geradem Leiter

Allgemein gilt das:

**Ampère-Maxwellsches
Durchflutungsgesetz:**

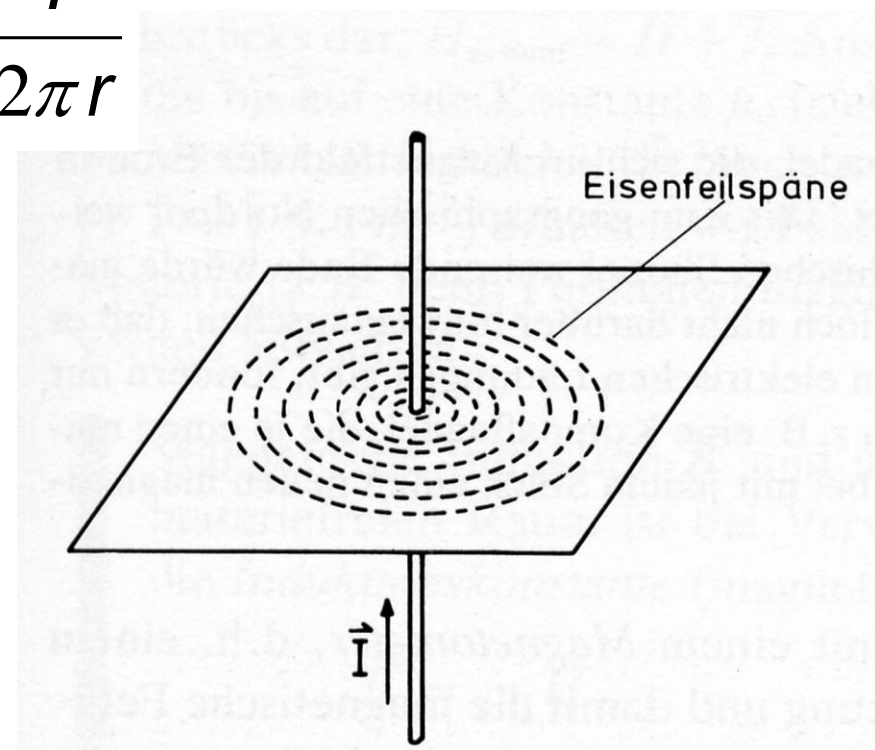
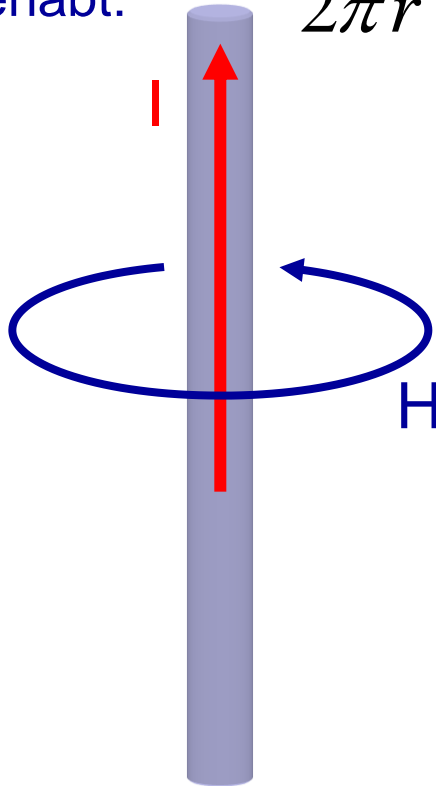
$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = I_{ges}$$

Spezialfall:

Für den geraden Draht ergibt sich
wie gehabt:

$$2\pi r \cdot H = I$$

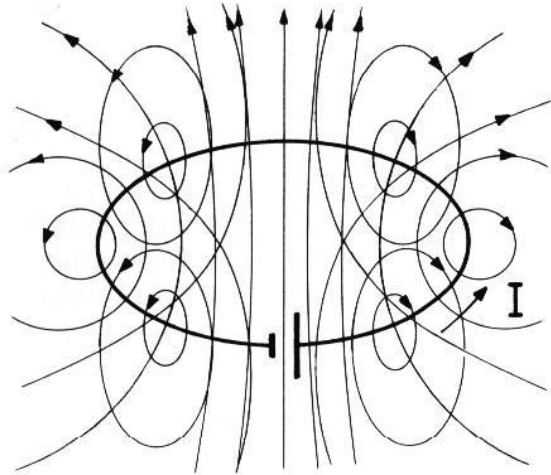
$$H = \frac{I}{2\pi r}$$



Magnetfeld einer Spule

Versuche: magnetische
Feldlinienbilder von Drahtschleife, Spule

Magnetfeldlinien
einer Drahtschleife:
(sehr ortsabhängig!)



Magnetfeld im Inneren
einer (langen) Spule:

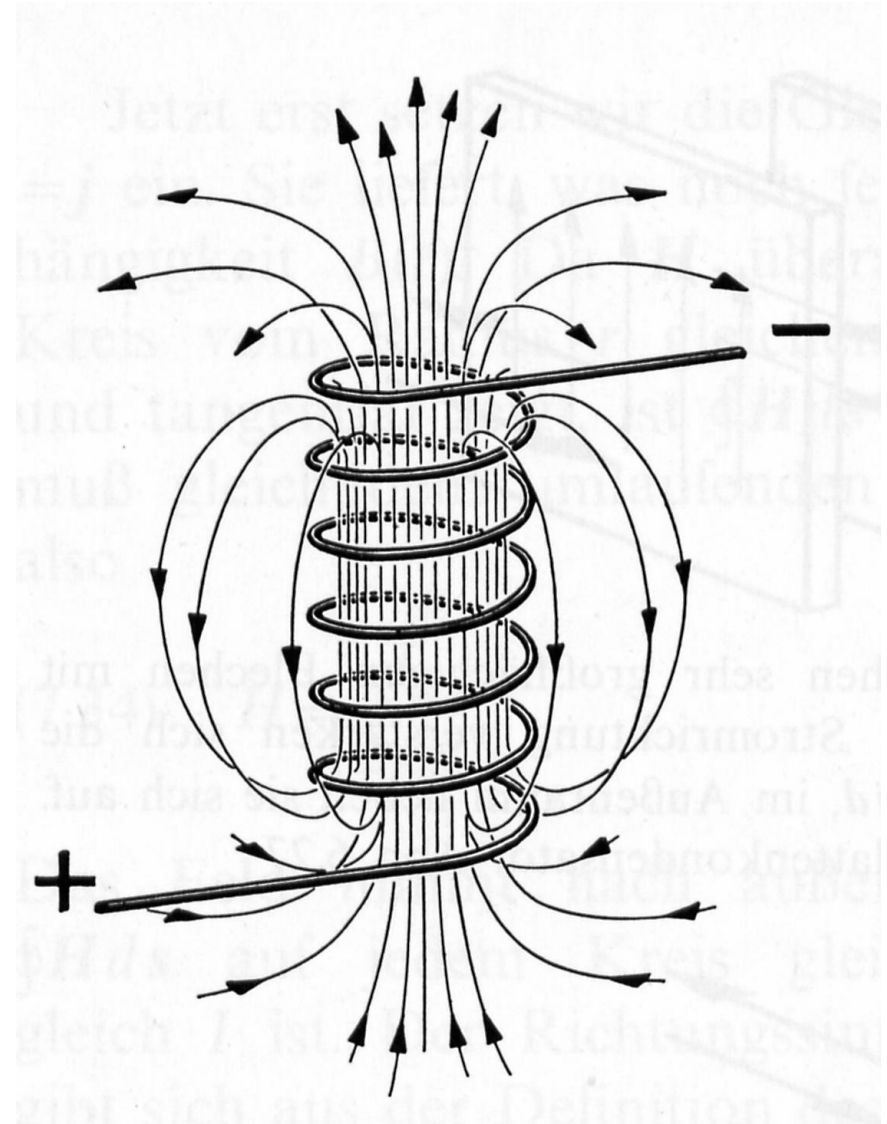
$$H = I \cdot \frac{n}{l}$$

I : Strom durch Spule

n : Anzahl der Windungen

l : Länge der Spule

bzw. n/l : Windungen pro Länge



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

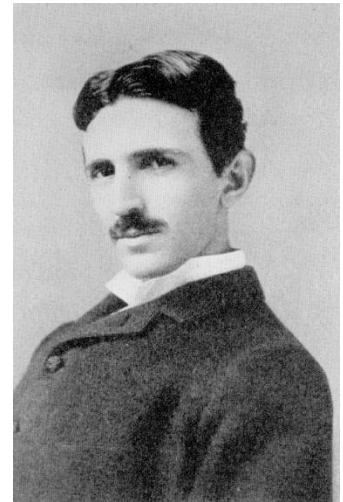
relativer Permeabilität:

$\mu < 1$: 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

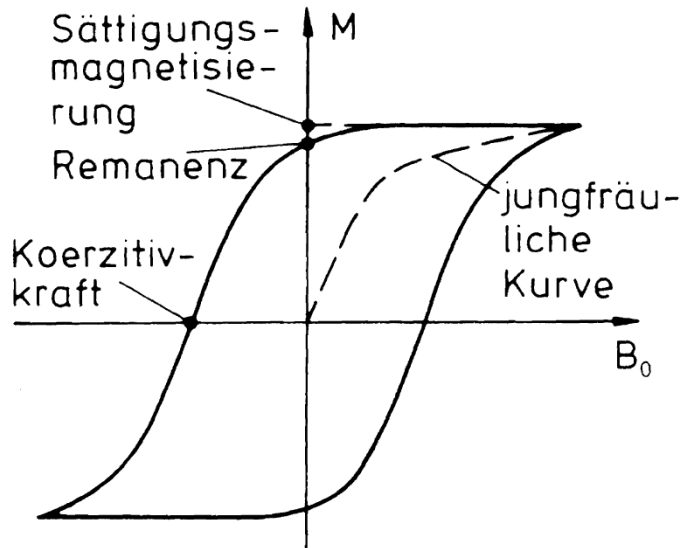
Analog zu $\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$

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

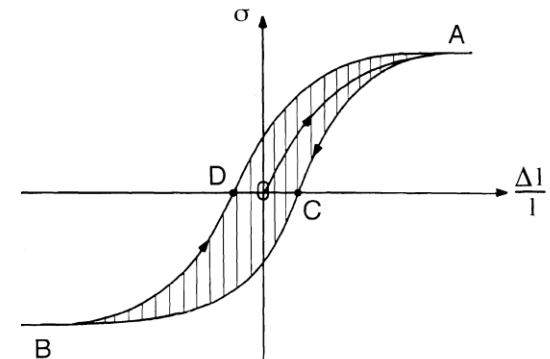
mit der **Magnetisierung** $\vec{M} = \chi \vec{H}$ (und $\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}$)

↖ magn. **Suszeptibilität**

Hysterese der Magnetisierung:



vgl. Mechanik
(elastische Hysterese):



„Entmagnetisierung“ mit
abnehmendem Wechselfeld

Lorentz-Kraft (auf Leiter)

Versuche Lorentzkraft auf einen Stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld (Schaukel), Braunsche Röhre, Rotationsversuch nach Faraday mit Plasmafaden, Plasmaspiralwellen

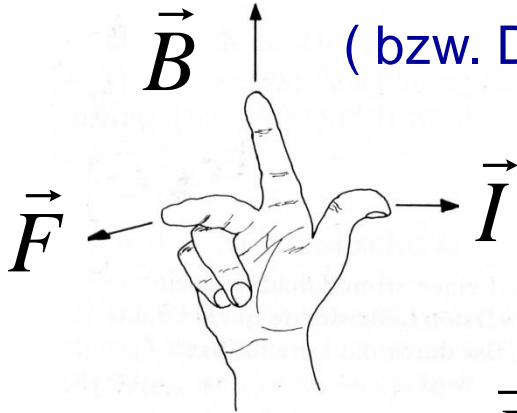
Lorentz-Kraft

auf stromdurchflossenen Leiter:

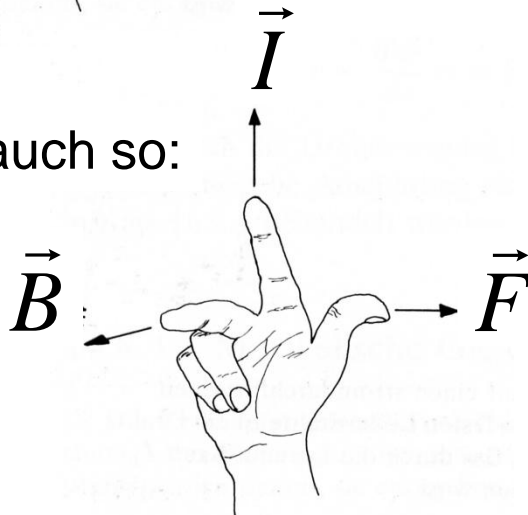
$$\vec{F} = l \cdot \vec{I} \times \vec{B}$$

Rechte-Hand-Regel

(bzw. Drei-Finger-Regel)



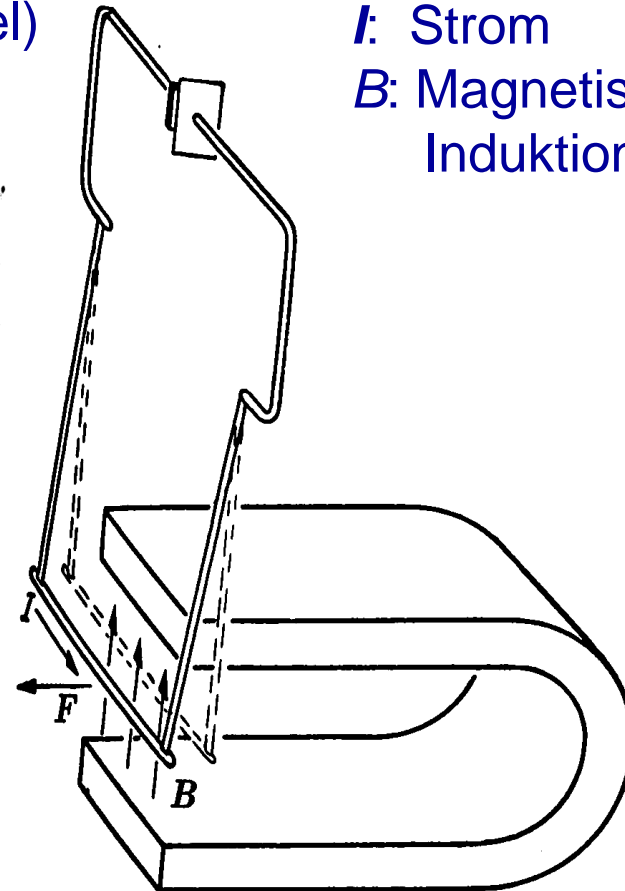
geht auch so:



l : Länge des Leiters

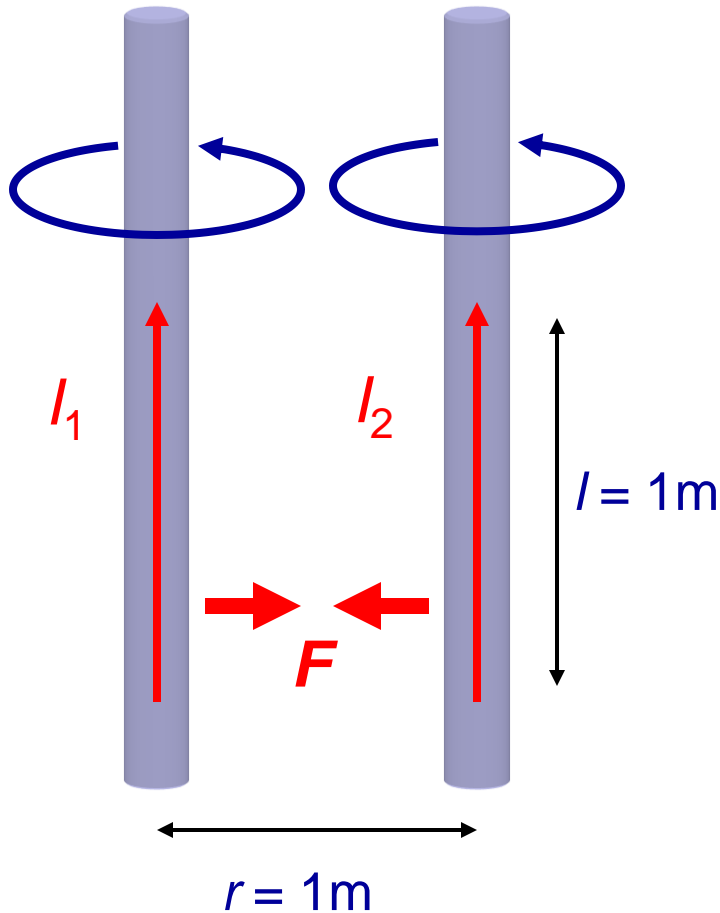
I : Strom

B : Magnetische Induktion



Definition der Stromstärke

Versuche: Kräfte zwischen zwei Stromdurchflossenen Leitern (parallel und antiparallel)



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 $F=2 \cdot 10^{-7}$ 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

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

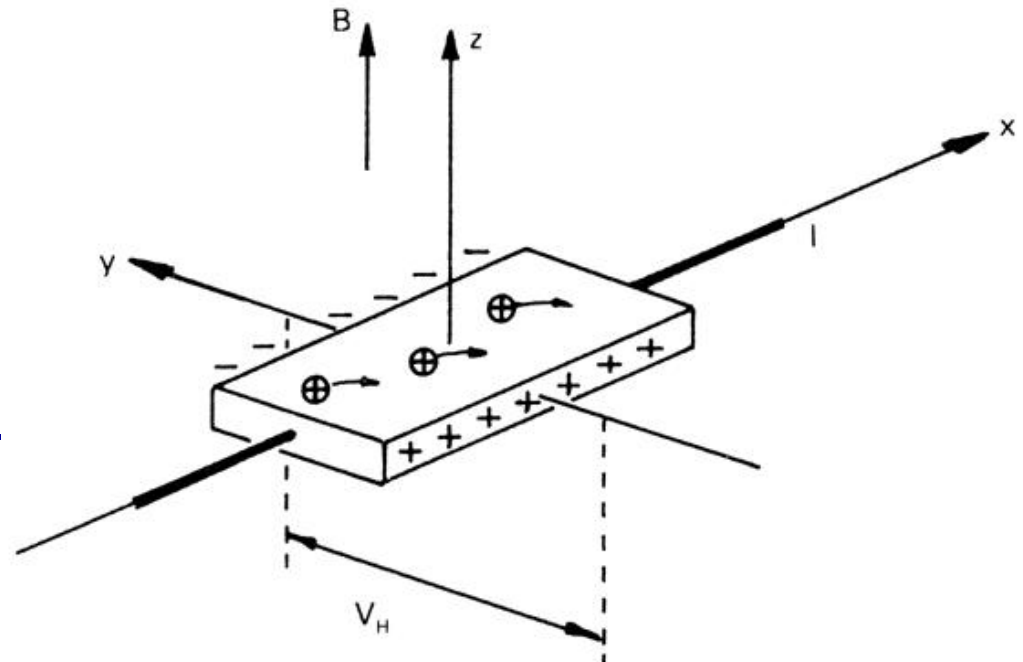
Ladungsdichte $\rho_Q = Q/V = \text{Ladung pro Volumen}$ $V = A \cdot l$

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

Versuche:
Faradaysche Induktionsversuche

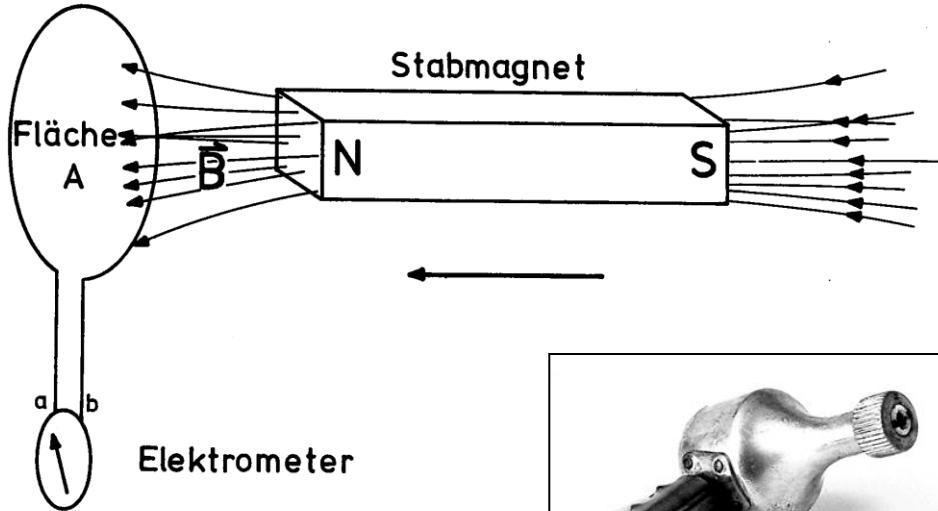
Magnetischer Fluß: $\Phi = \vec{B} \cdot \vec{A}$

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

Induktionsgesetz:
(Faraday-Henry-Gesetz)

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

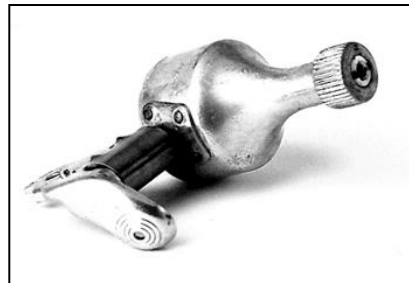
Leiterschleife



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

Versuche: Transformation auf hohe Spannung bzw. auf hohen Strom

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

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

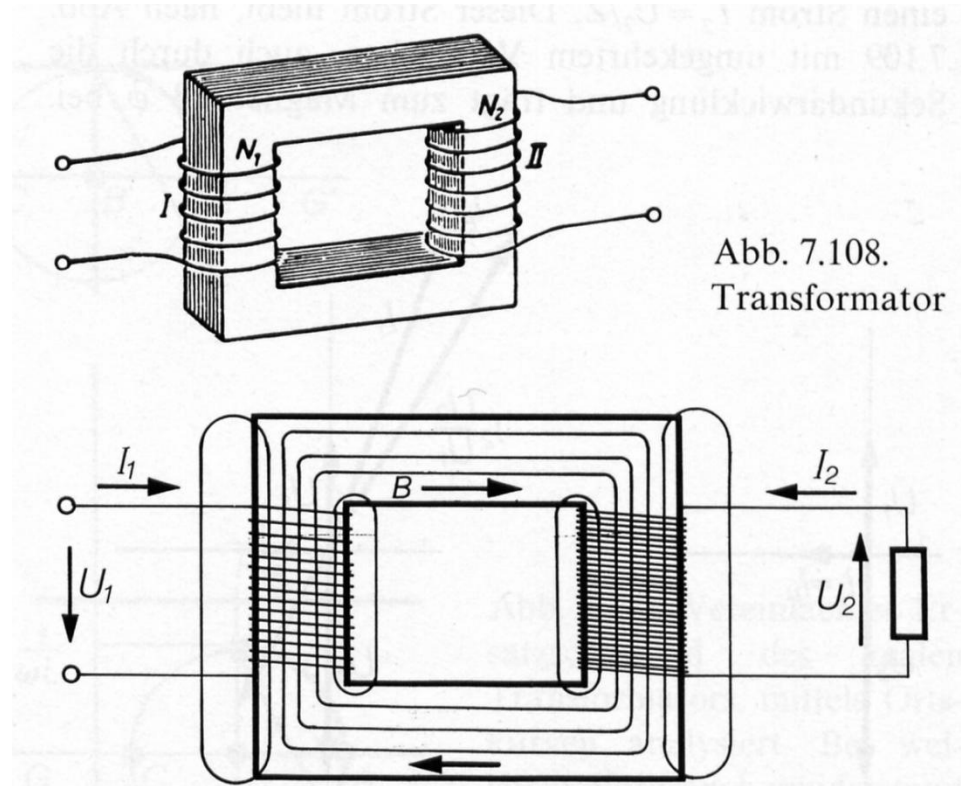


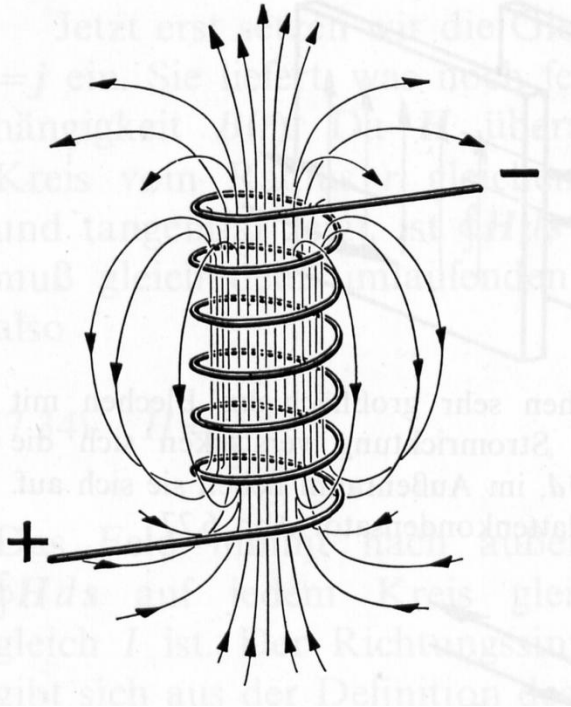
Abb. 7.108.
Transformator

Beachte: Leistung wird dadurch nicht vergrößert!

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

Lenzsche Regel

Versuche zu Induktion/Lenzsche Regel:
Kupferring springt beim Spuleneinschalten



zeitlich veränderlicher Strom
durch Spule erzeugt Magnetfeld:

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

zeitlich veränderliches Magnetfeld
führt zur (Selbst-)Induktion

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

Lenzsche Regel:

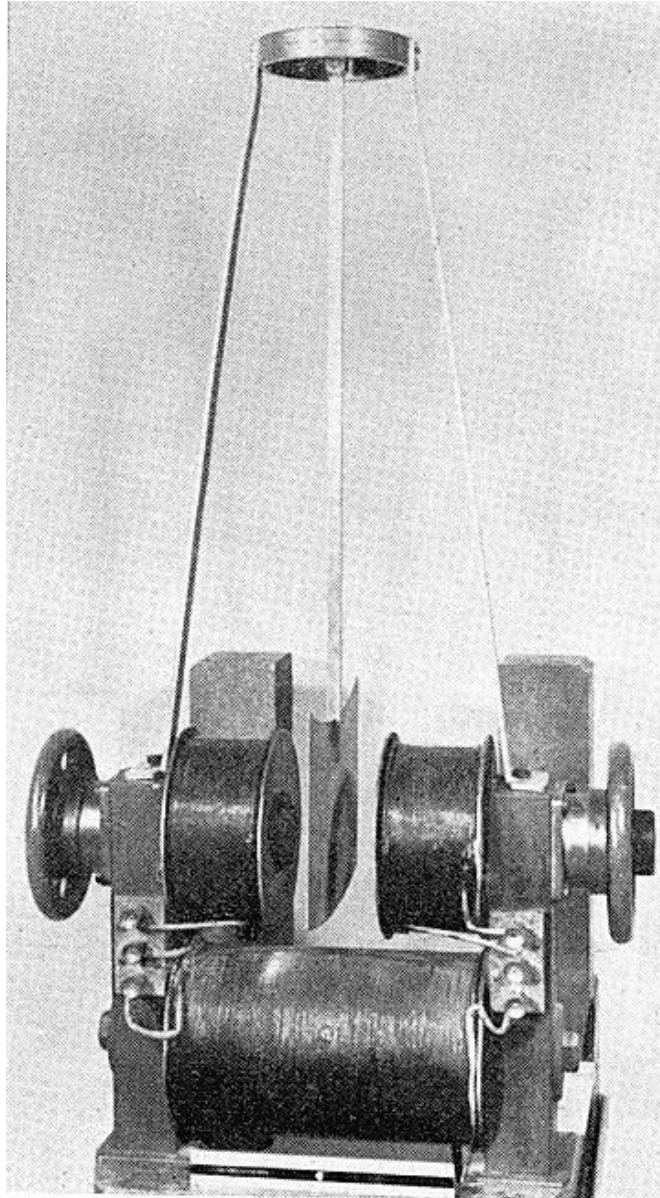
Die vom Induktionsstrom ausgehende Kraft wirkt
der Ursache des Induktionsstroms entgegen.

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

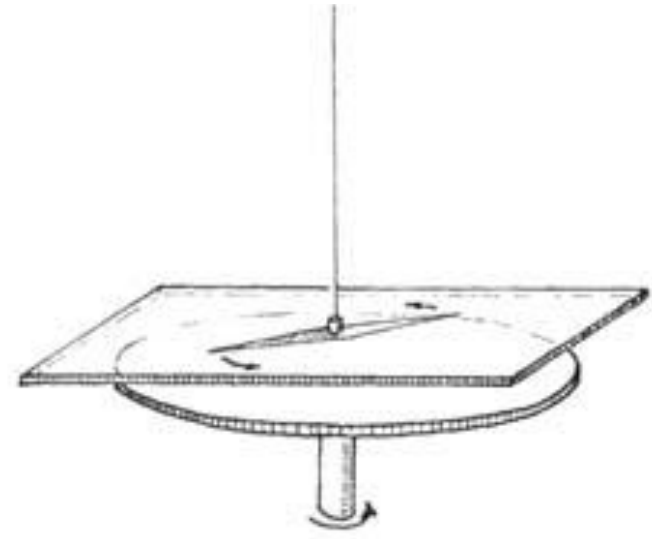
Wirbelströme

Versuche: Waltenhofen-Pendel, Arago-Versuch und Umkehrung, durch verschiedene Rohre fallender Magnet

Waltenhofen-Pendel

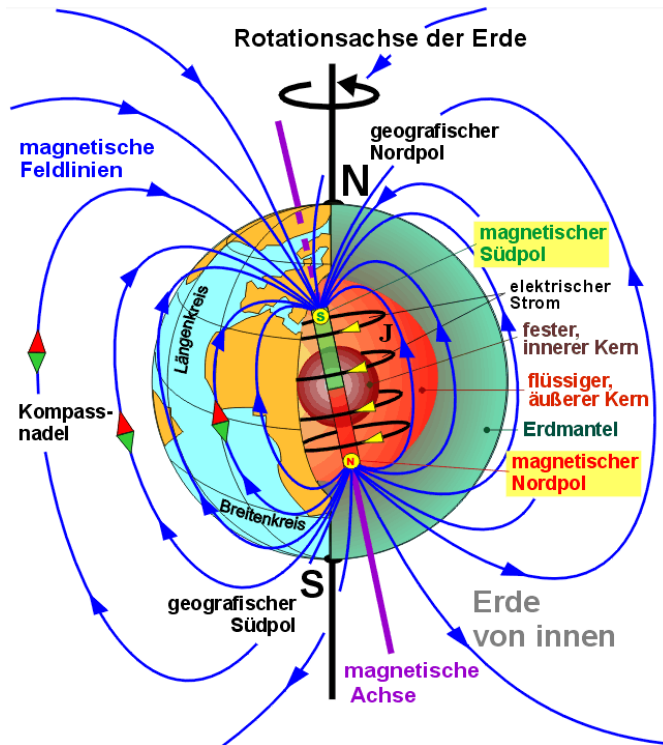


Experiment von Arago



von Waltenhofen
1828 - 1914

Natürliche Magnetfelder



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

Magnetometer:

Hall-Sonde: mittlere Magnetfeldstärken

NMR-Sonde: (nuclear magnetic resonance)

Hohe Feldstärken, extrem genau (Analytik)

SQUIDs:

(superconductive quantum interference device)

extrem kleine Magnetfelder

von Hirn-, Nerven-, Muskelströmen

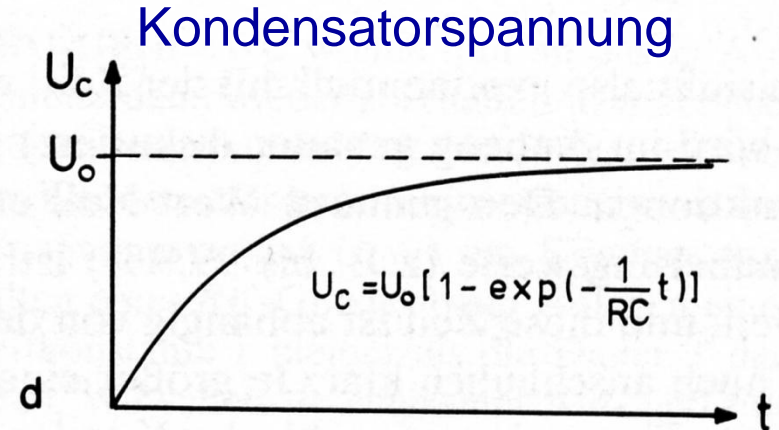
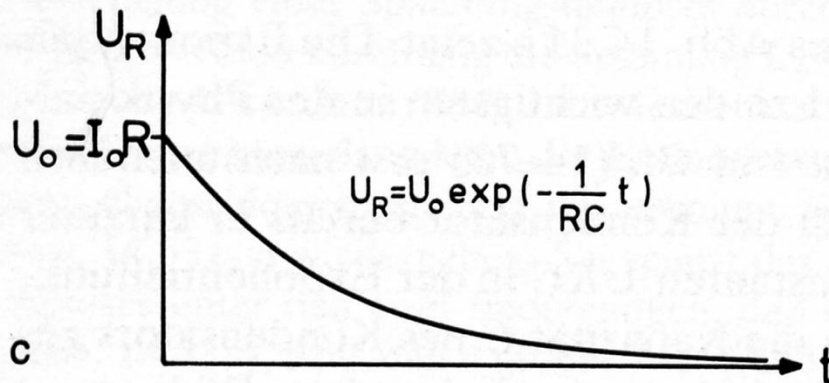
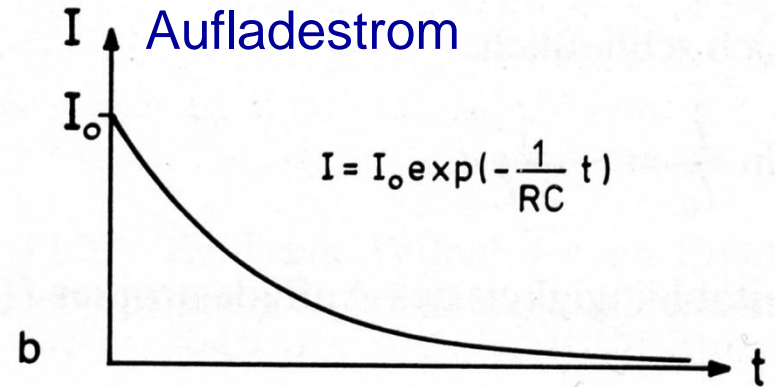
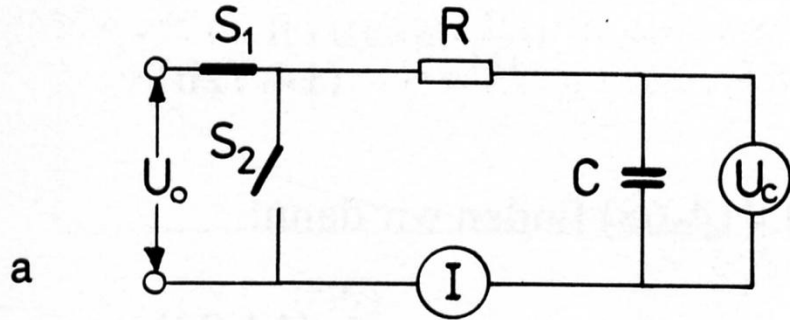
Medizinische Anwendungen: MKG (Magnetkardiogramm)

MEG (Magnetoenzephalogramm)

Einschalten beim RC-Glied

Versuche: Auf- und Entladungsvorgänge am RC-Glied

Kondensatoren

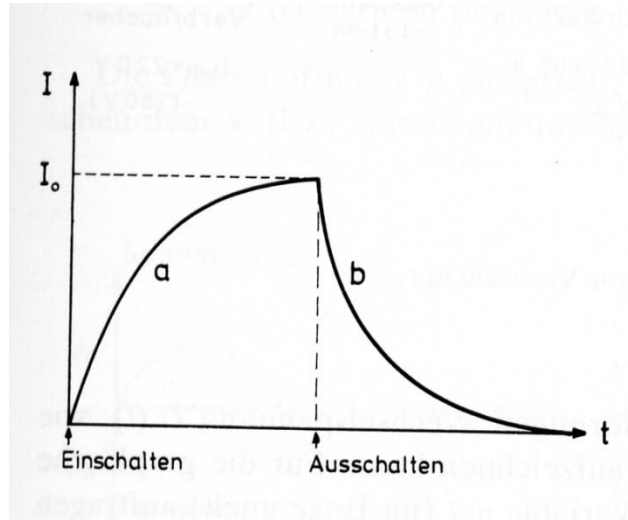
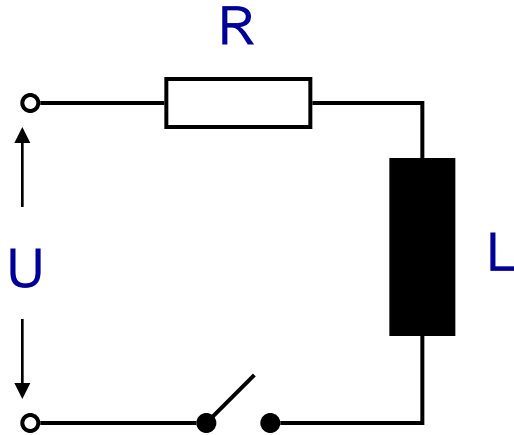


Zeitkonstante der R-C-Kombination: $\tau = R \cdot C$

Schalten bei Spule

Versuche: (Selbstinduktion)
verzögerte Glühlampe

Induktivitäten

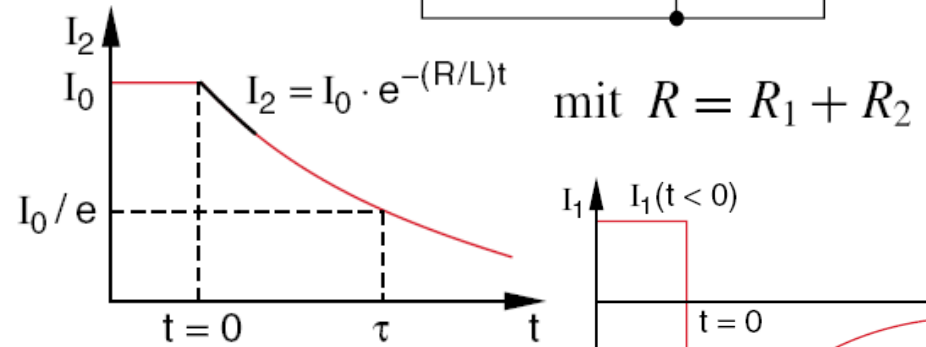
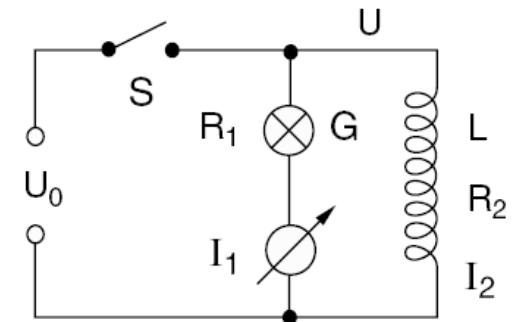
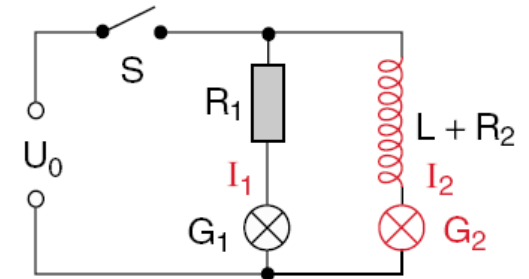


$$I = \frac{U}{R} (1 - e^{-tR/L}) \quad \text{Einschaltstrom}$$

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

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

Demonstration der Verzögerung Vergleich ohne/mit Spule



Wechselspannungen und ströme

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

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

ϕ : Phase zwischen Strom und Spannung

Elektrische Leistung: $P = U \cdot I$ 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

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

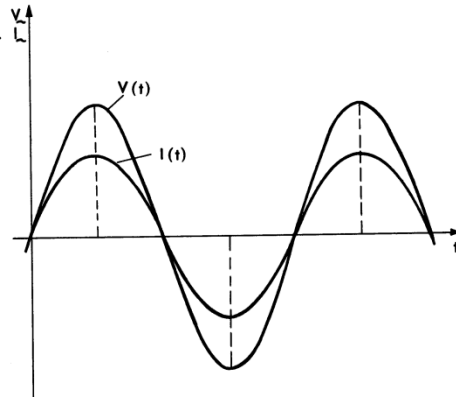
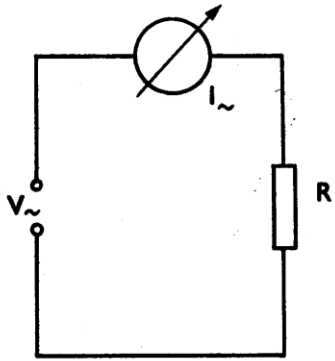
$$I_{eff} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \quad U_{eff} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$$

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

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

Phasenbeziehungen

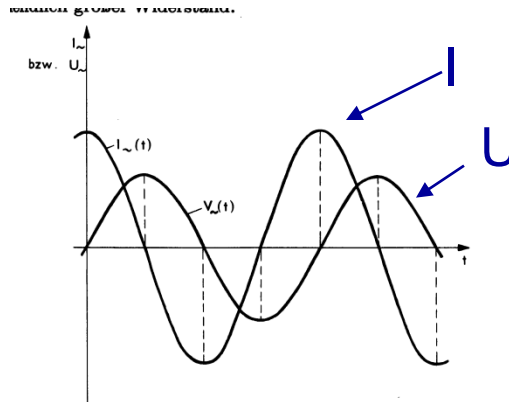
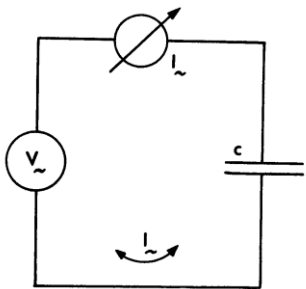
Versuche: Phasenbeziehungen
zwischen $U(t)$ und $I(t)$ an R, C und L



Ohmscher Widerstand R:
Strom und Spannung in Phase

$$\phi = 0$$

R unabh. von ω

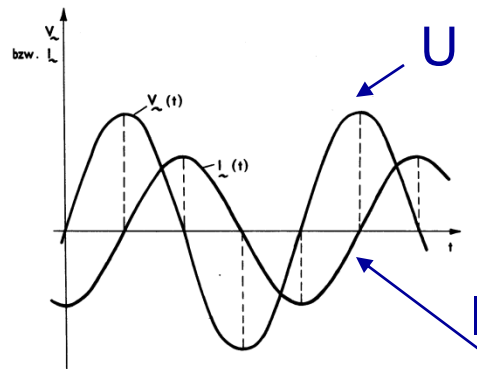
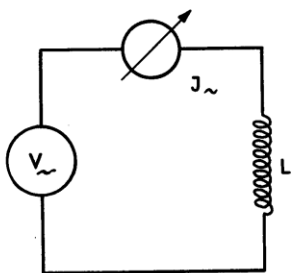


Kondensator C:

Strom eilt Spannung voraus

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

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

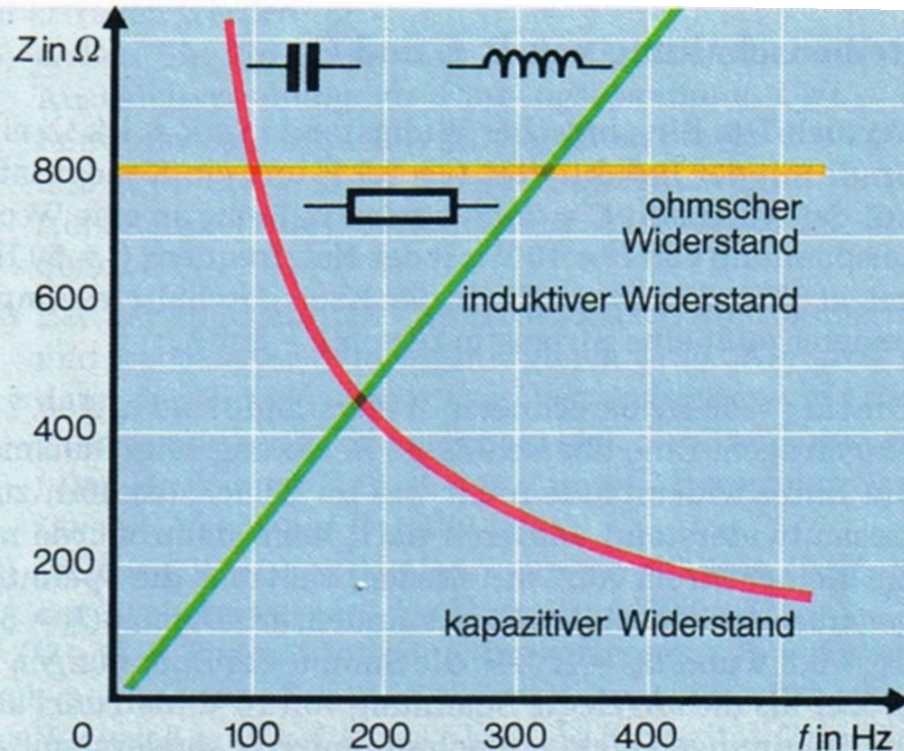


Induktivität/Spule L:

Strom folgt Spannung

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

$$R_L = \omega \cdot L$$



Ohmscher Widerstand R:

Strom und Spannung in Phase

$$\phi = 0$$

R unabh. von ω

Kondensator C:

Strom eilt Spannung voraus

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

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

Induktivität/Spule L:

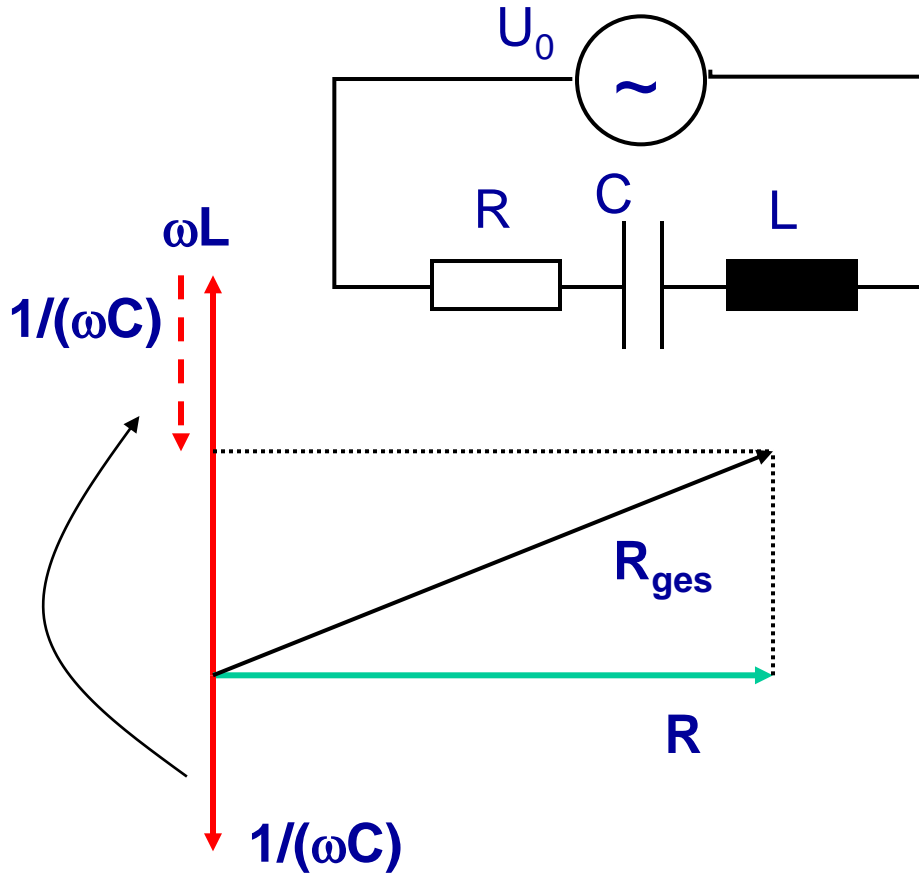
Strom folgt Spannung

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

$$R_L = \omega \cdot L$$

Serienschaltung von R, C und L

Versuche: Summe der Teilspannungen größer als angelegte Spannung



Impedanz

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

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

Wirkwiderstand

Blindwiderstand

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

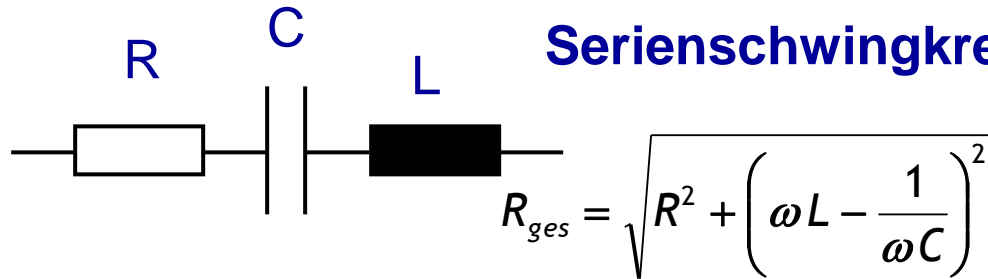
Bemerkung 1: Wieder 'mal Phythagoras!

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

Bemerkung 3: Bei Parallelschaltungen addieren sich die Leitwerte, $1/Z$.)

Schwingkreise

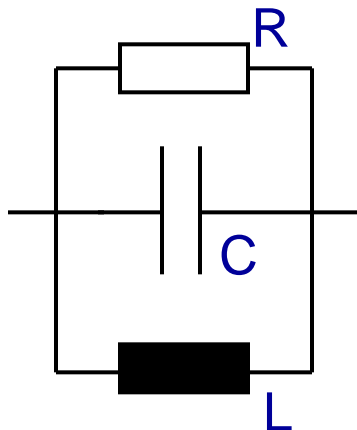
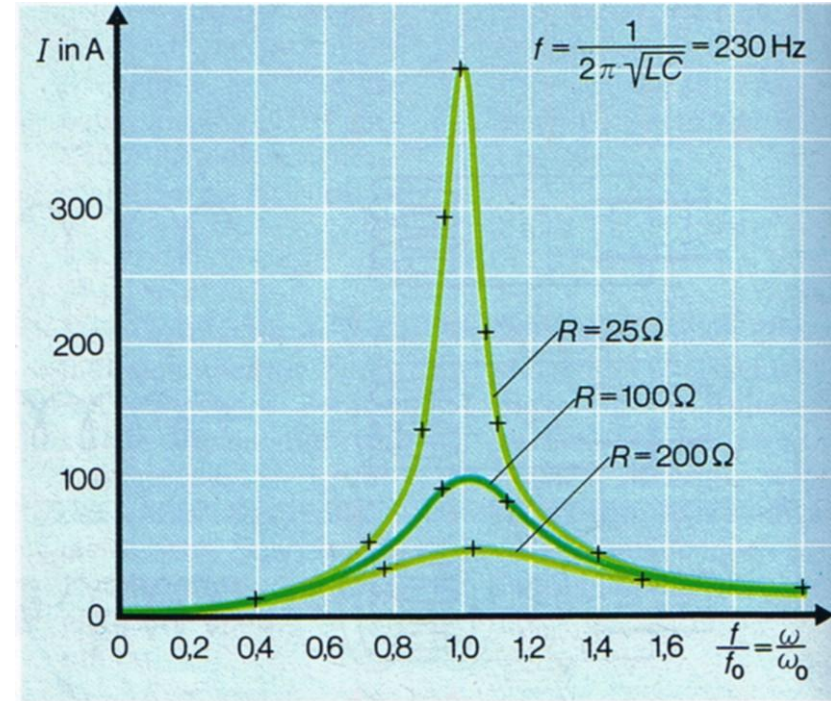
Versuche: Reihen- und Parallelschwingkreise, Resonanzen



Scheinwiderstand minimal,
d.h. Strom maximal, wenn

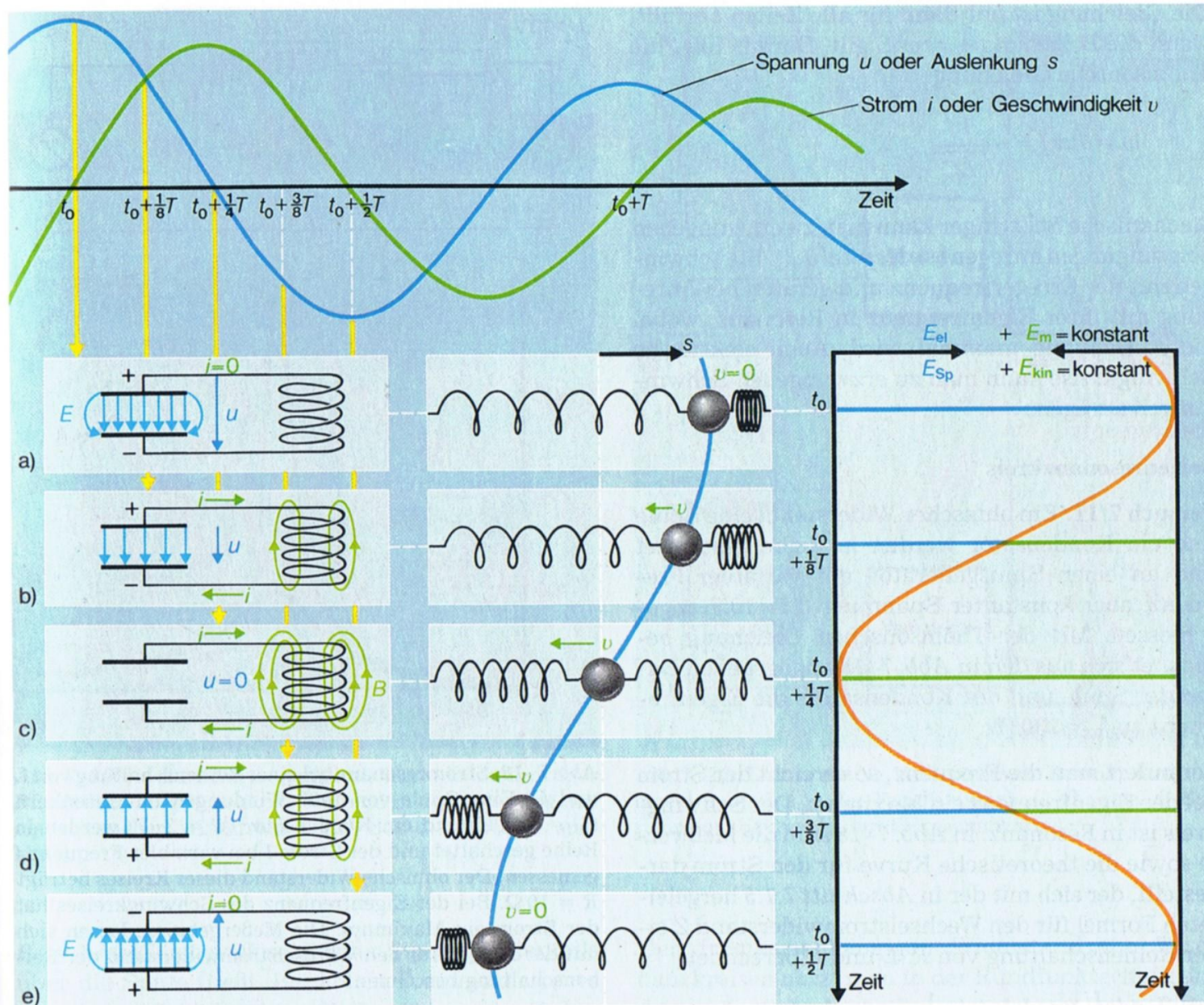
$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \longrightarrow \omega_{res} = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

Thomsonsche Formel



Aber jetzt bei Resonanz Widerstand maximal
und Strom minimal

Schwingkreis (Analogie zw. elektr. und mech.)

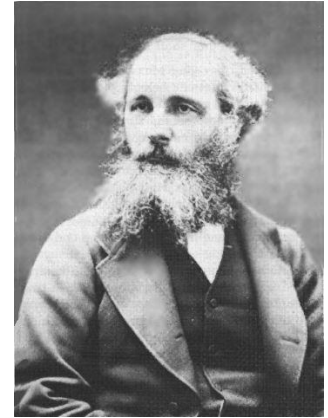


Grundzüge der Elektrodynamik

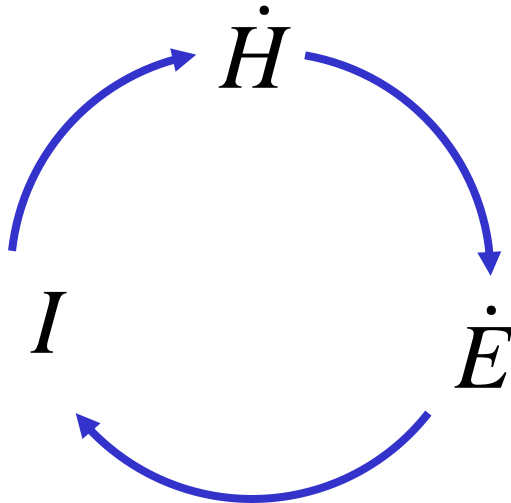
Maxwellsche Gleichungen (2 von 4):

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



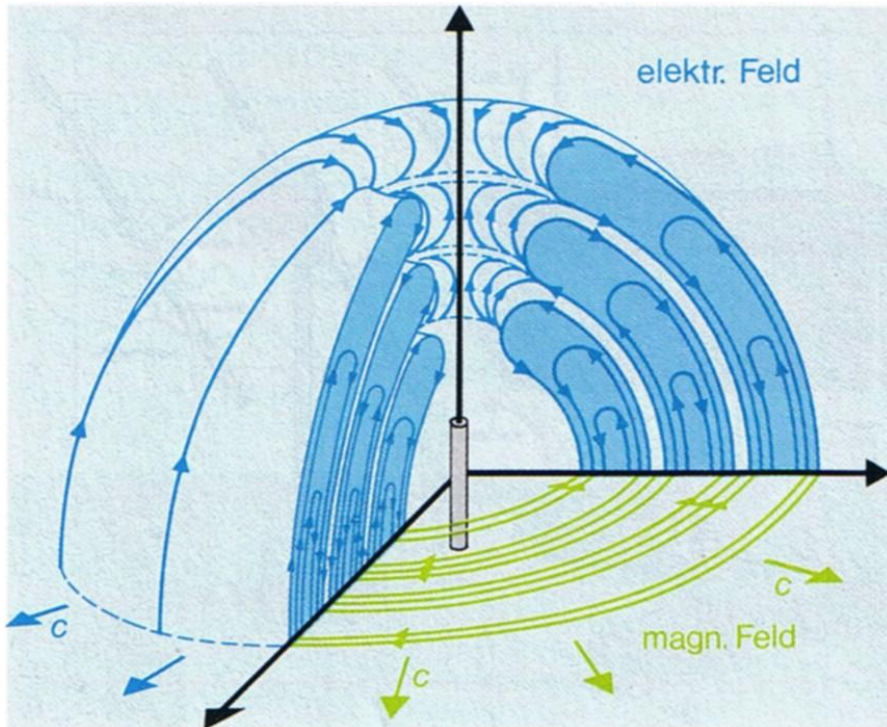
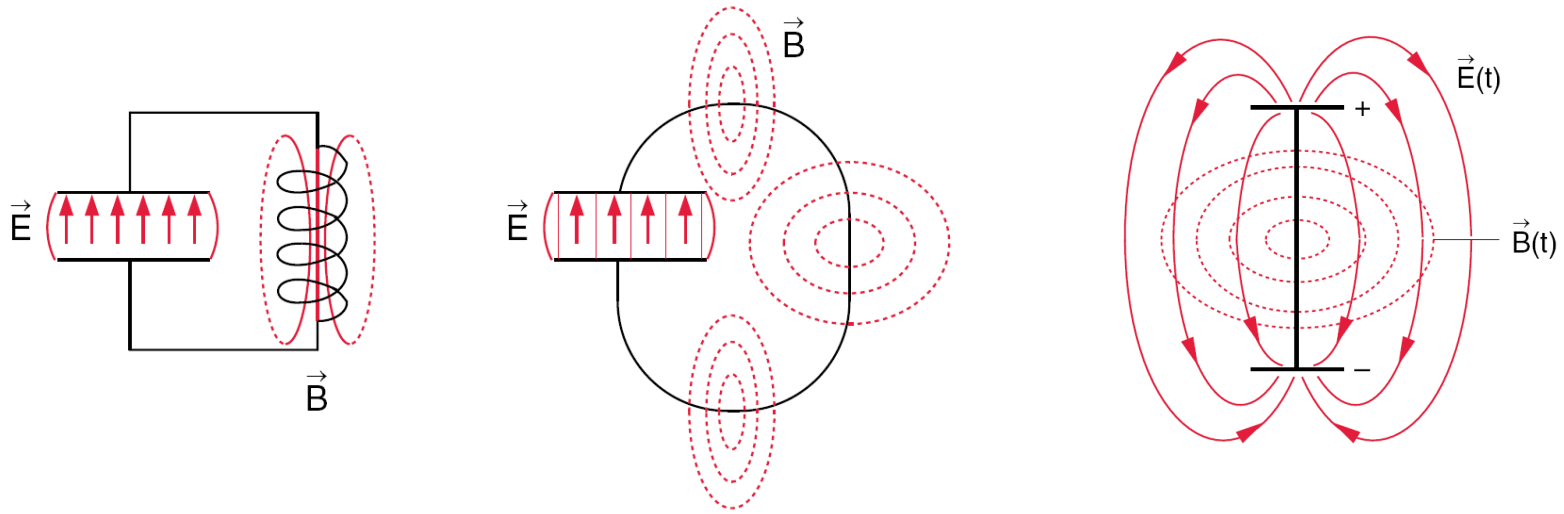
Vereinigung elektrischer
und magnetischer Beschreibungen



Elektromagnetische Gleichungen

vom Schwingkreis zur Dipolantenne

Versuche: Hertzscher Dipol und Mikrowellenstrahlung

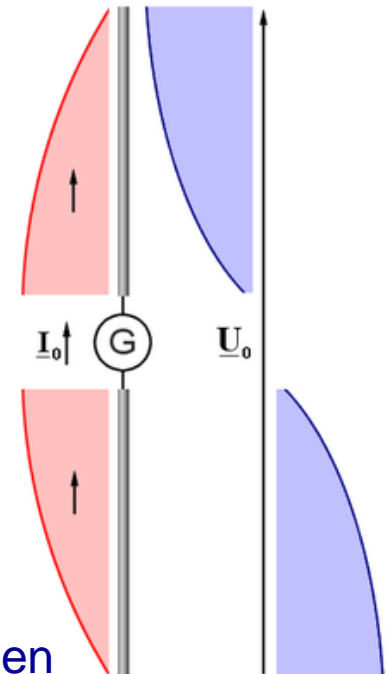


resonante
Anregung:

Wellenlänge passt
zur Antennenlänge l

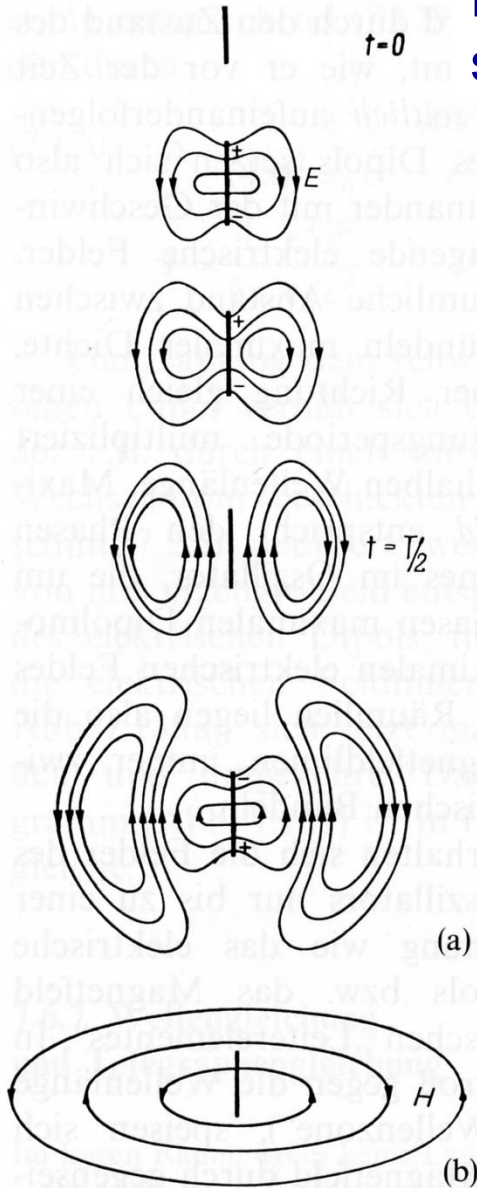
$$\frac{\lambda}{2} = l$$

Bem.:
Das ist nur eine
von verschiedenen
Längenmöglichkeiten.



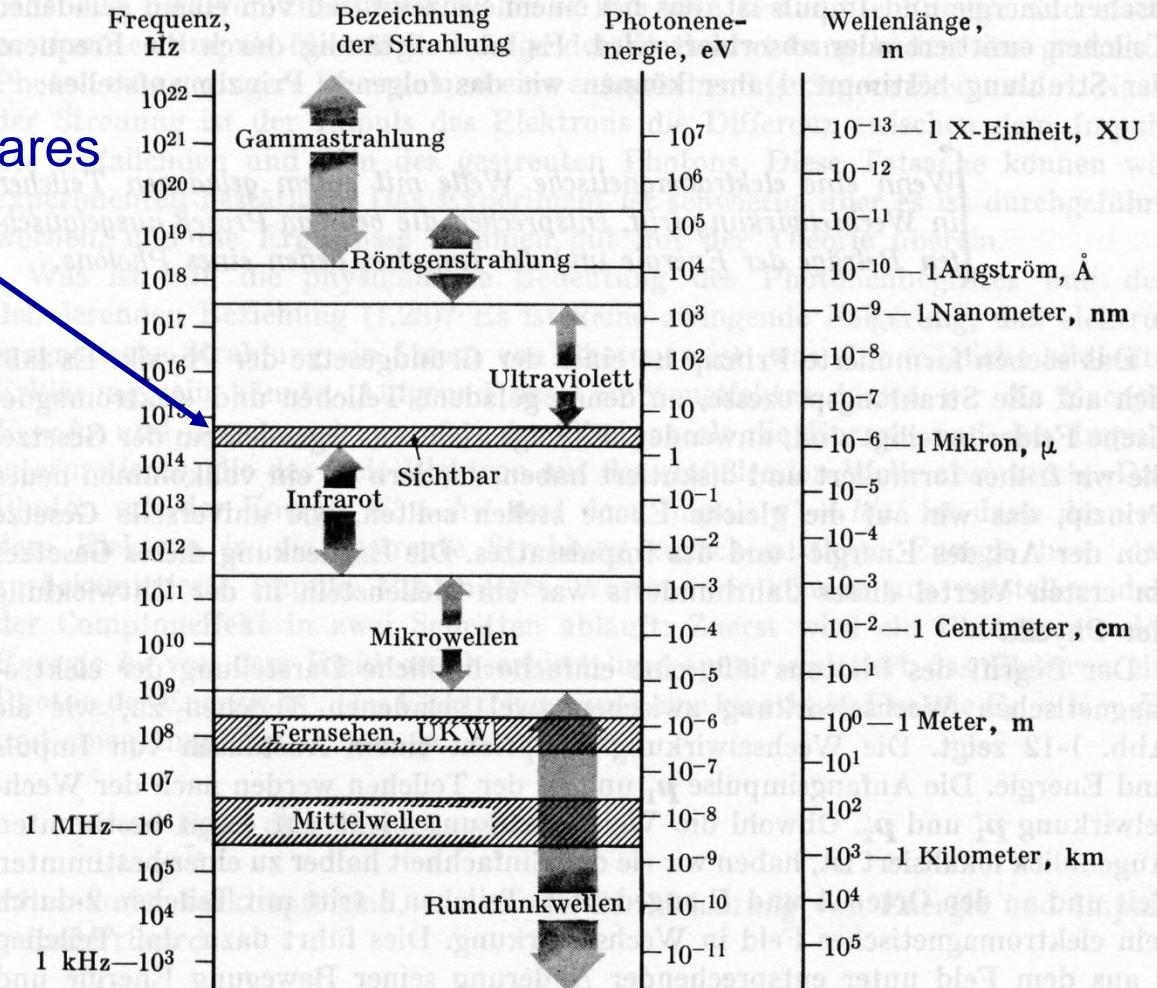
elektromagnetische Schwingungen

Dipol- schwingungen



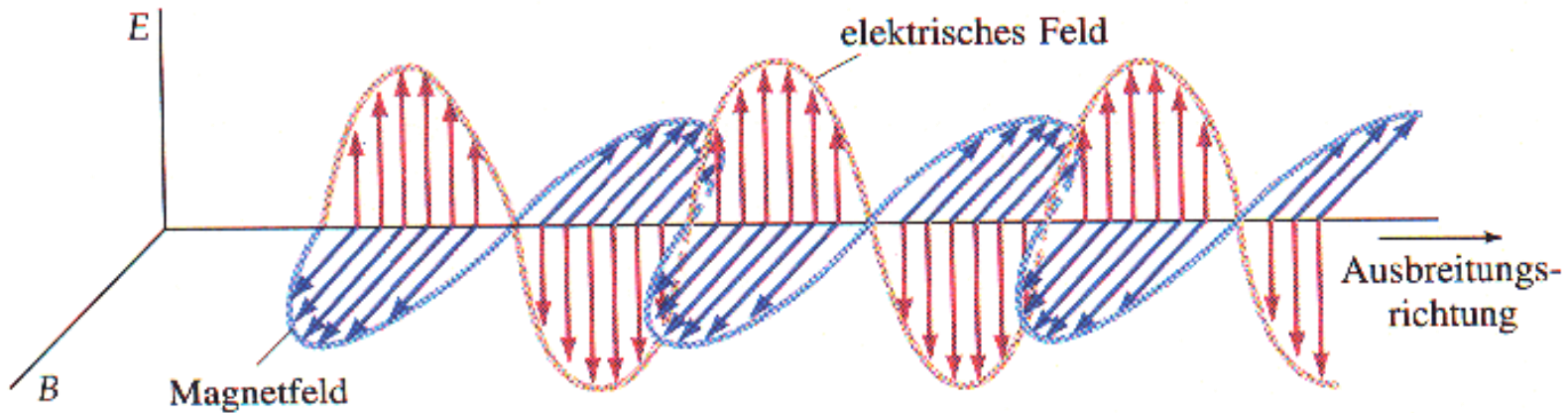
elektromagnetisches Spektrum

sichtbares
Licht



Elektromagnetische Wellen

Versuche: Ausbreitung (Reflexion, Brechung) und Polarisation bei Mikrowellenstrahlung



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

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

Lichtgeschwindigkeit in Materie:

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

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

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

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

Versuche: Strom durch
NaCl-Lösung

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

Versuche: Verkupfern von Graphitplatten (Galvanisierung)

$$Q = znN_A e = znF$$

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

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

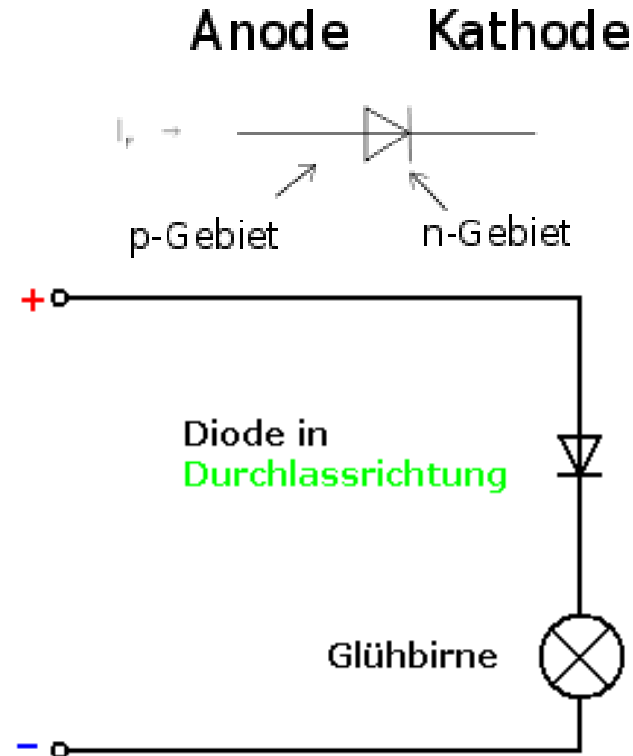
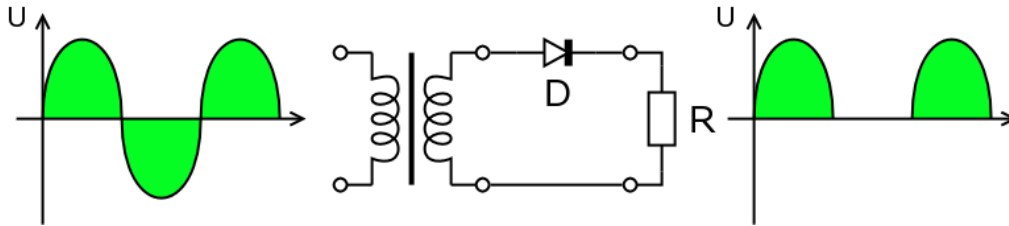
im Plasma (ionisierten Gasen)
in Elektrolyten
in Halbleitern
in Metallen

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

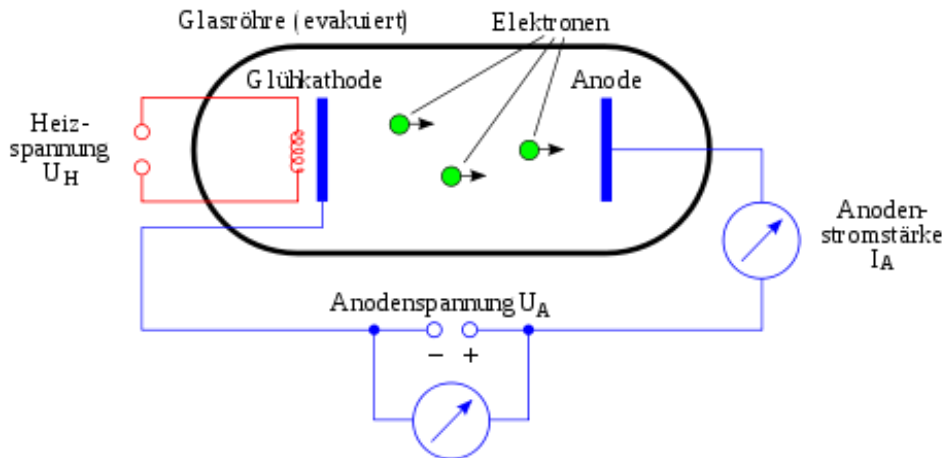
Halbleiter: Leitungselektronen müssen erst erzeugt werden
- durch Temperatureffekte
(Widerstand verringert sich bei Erwärmung.)
Heißleiter
- oder gezielte Verunreinigungen (Donatoren)

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

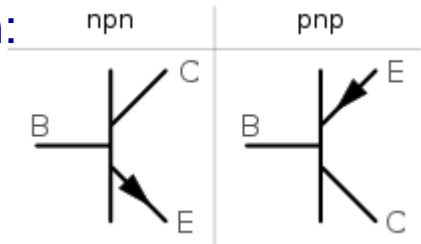
=> Gleichrichtung von Wechselspannung (analog Rückschlagventil bei Wasserleitung)



Früher mit „Vakuumdiode“:

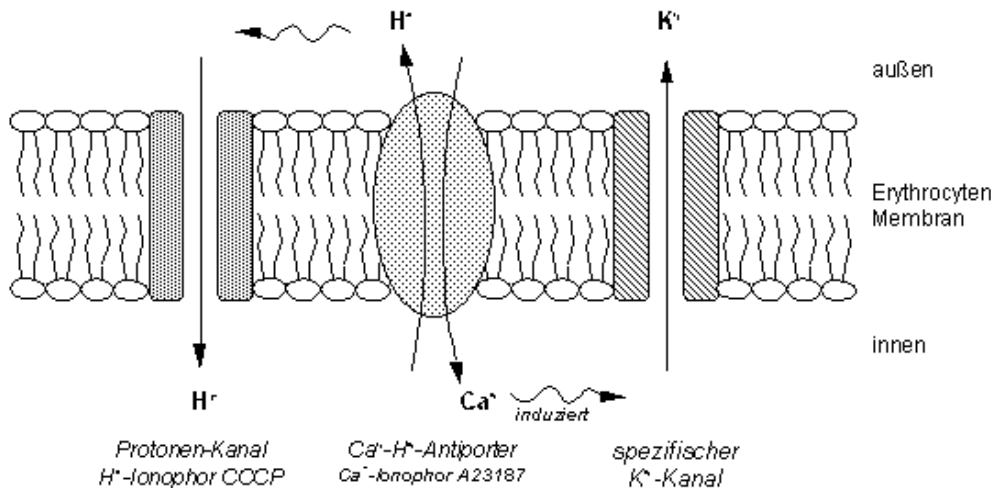


Transistoren:



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

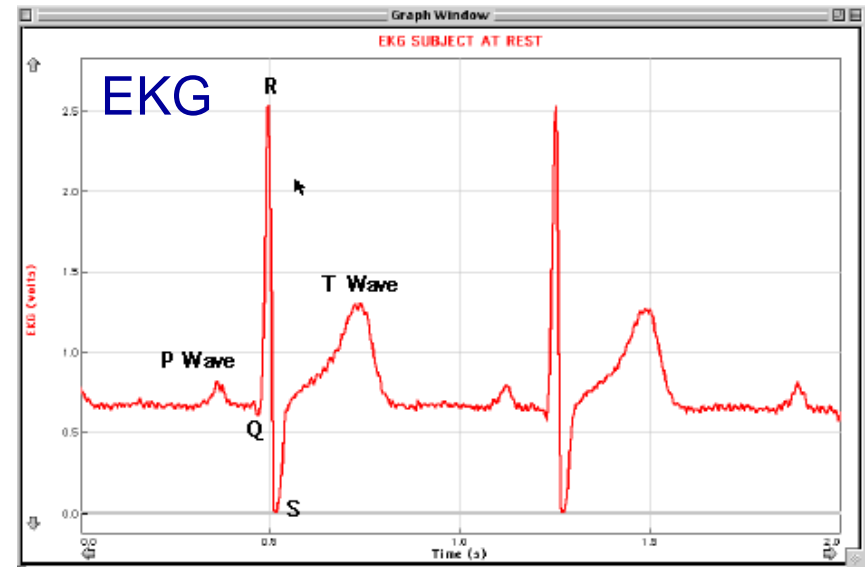
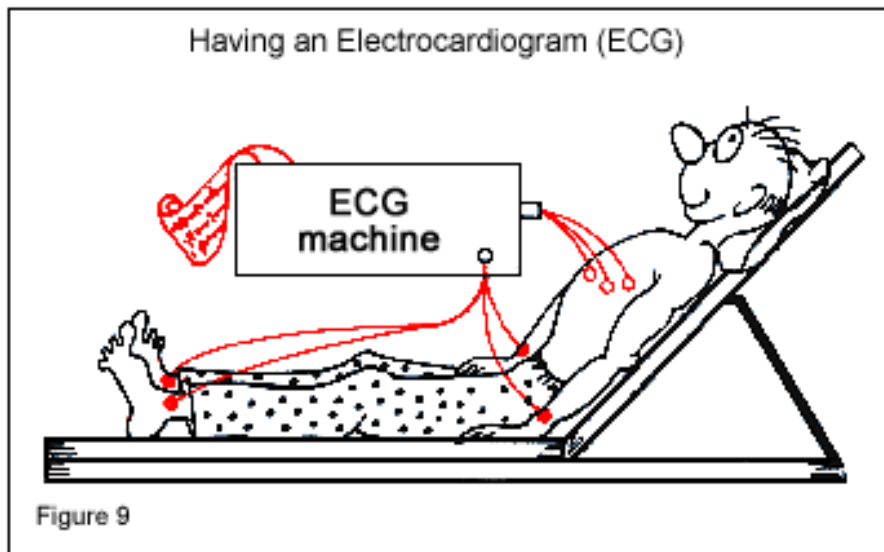
$R = N_A k$: allg. Gaskonstante

$F = N_A e$: Faradaykonstante

EEG und EKG

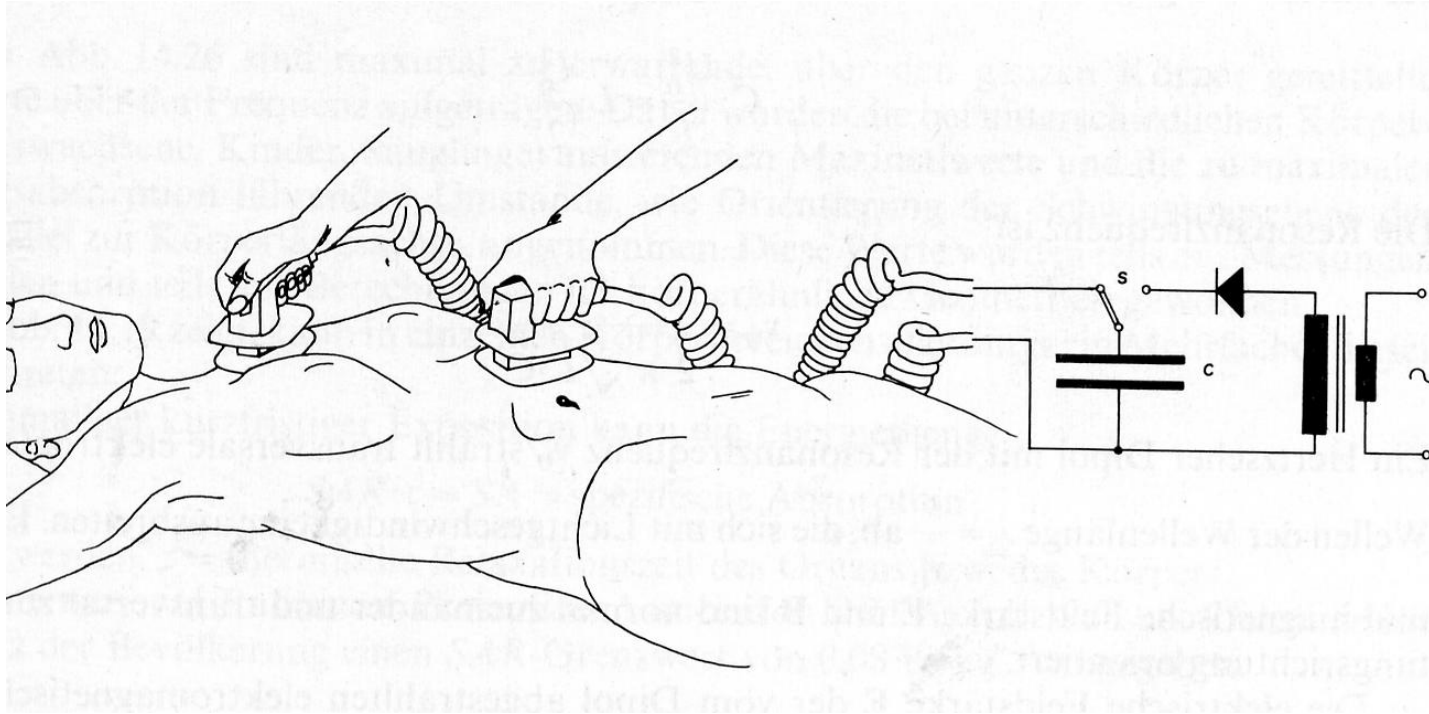


EEG



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.