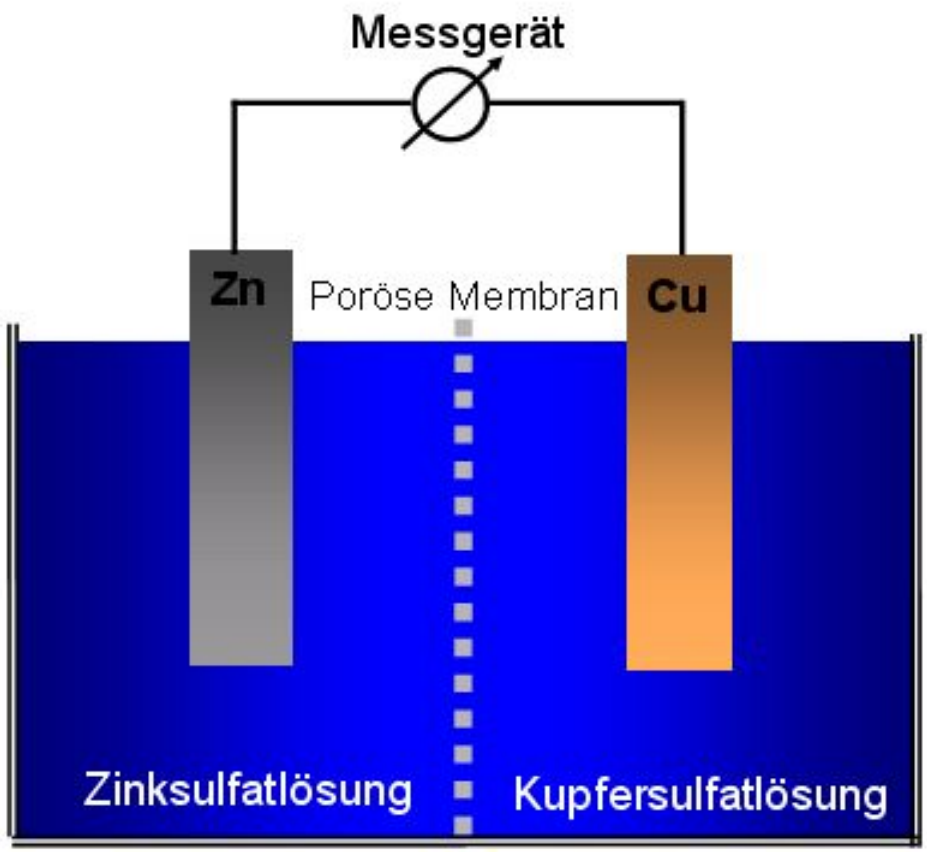
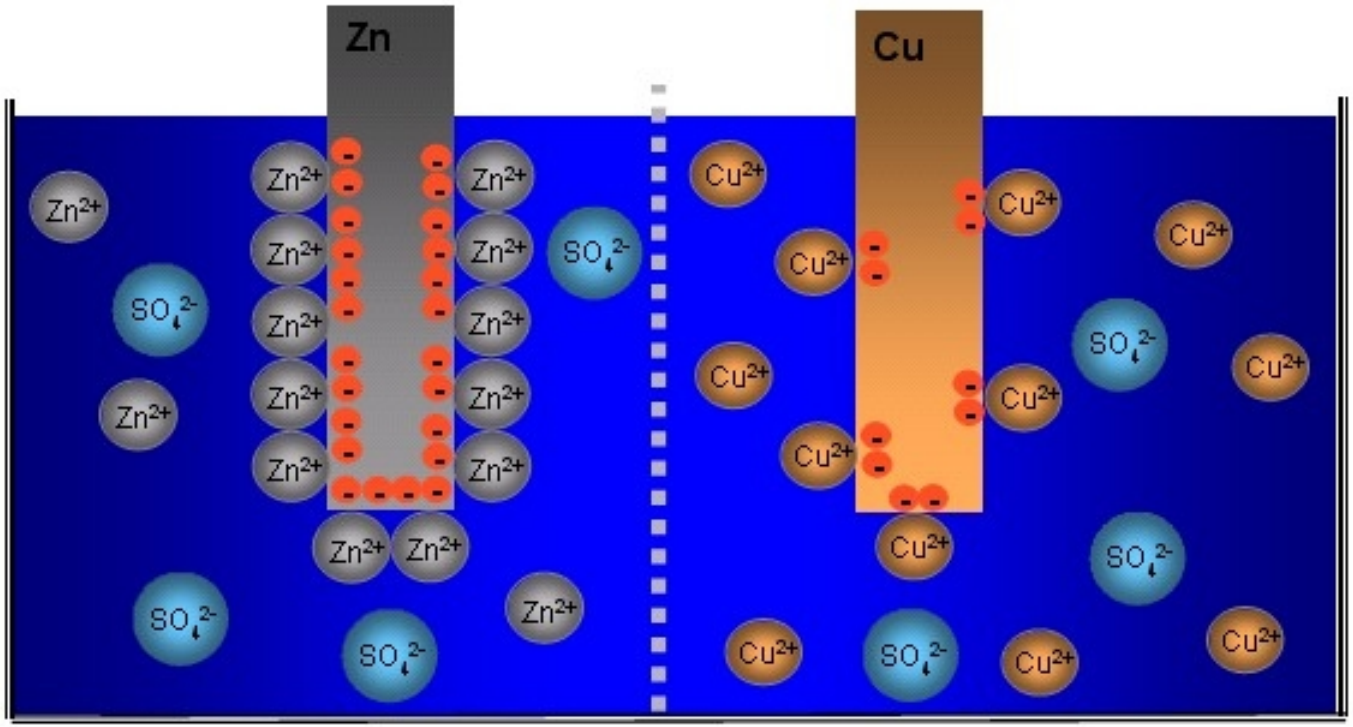
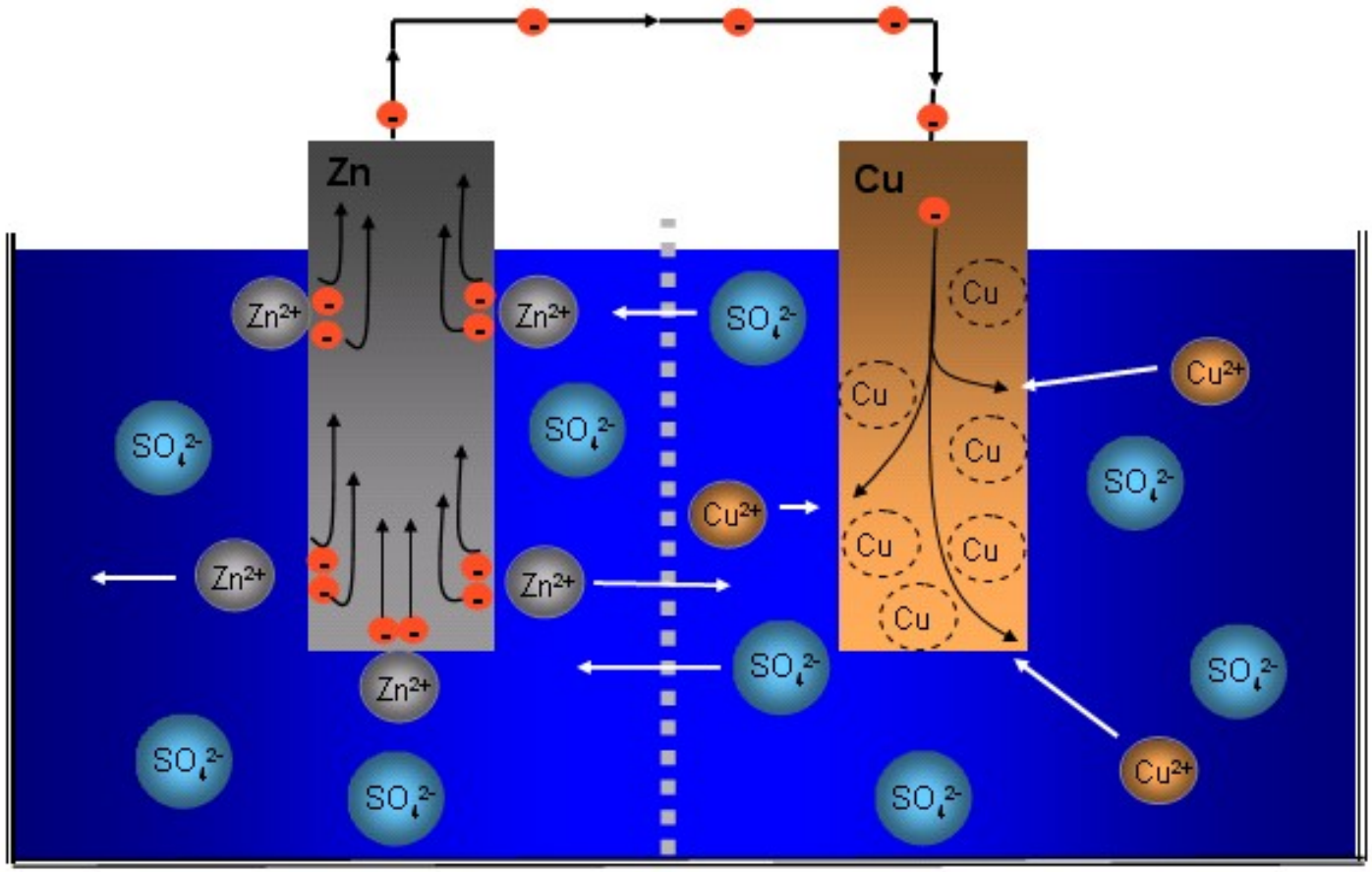
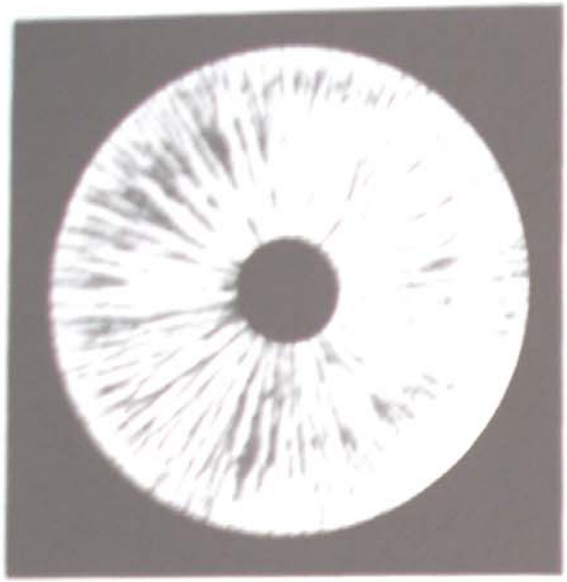

Messgerät
Zn
Poröse Membran
Cu
Zinksulfatlösung
Kupfersulfatlösung


Zn
Cu
Zn2+
SO4 2-
Cu2+


Zn
Cu
Zn2+
SO4 2-
Cu2+
Cu



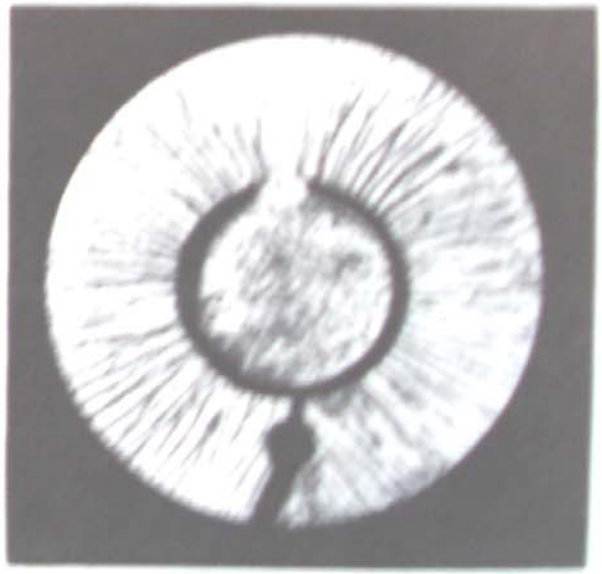


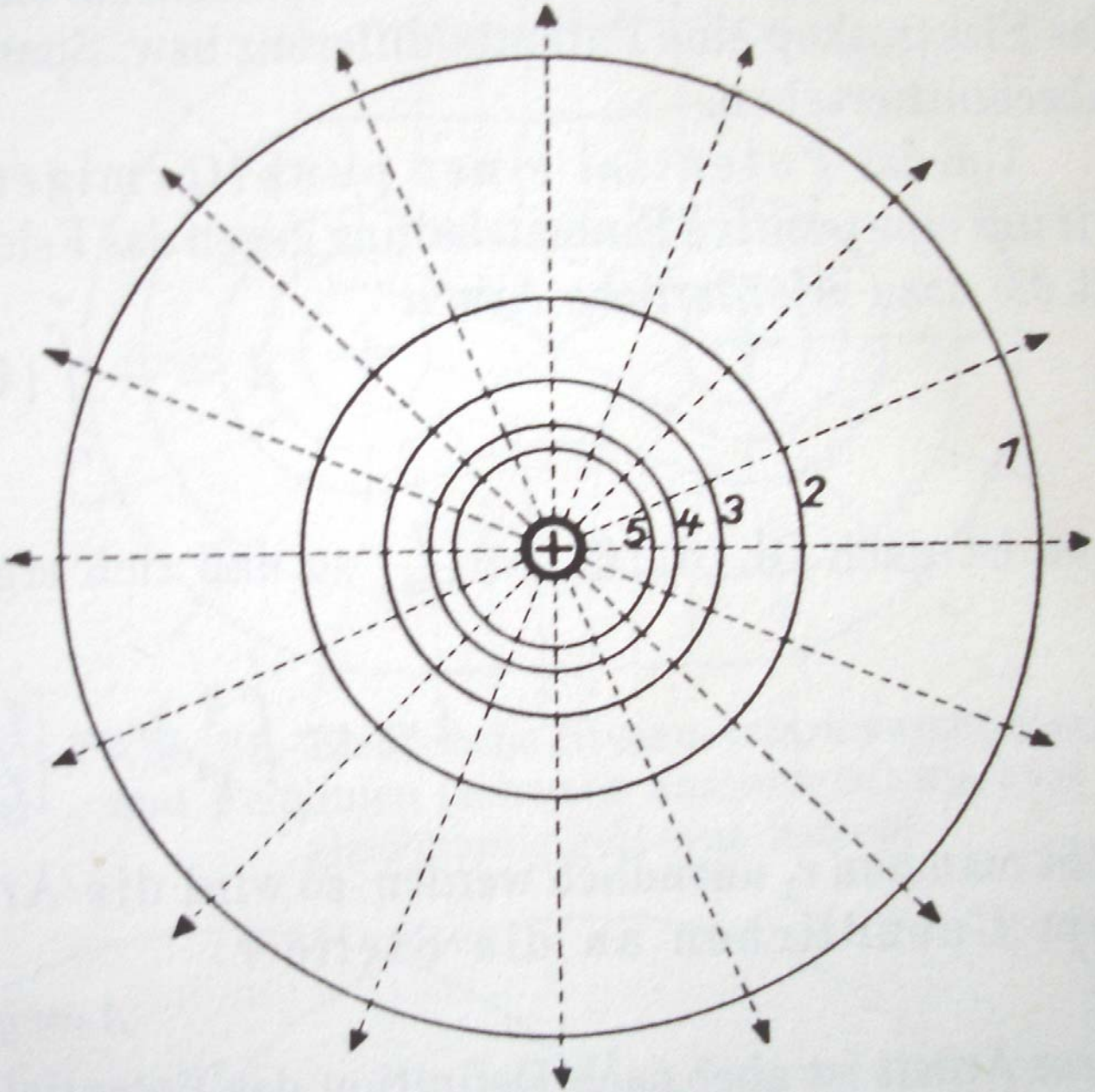
Abb. 22

Abb. 23

Abb. 24

Abb. 19—24. Elektrische Kraftlinienbilder

Abb. 19. Einzelner geladener Rd.— Abb. 20. Zwei entgegengesetzt geladene Leiter— Abb. 21. [illegible]


1
2
3
4
5

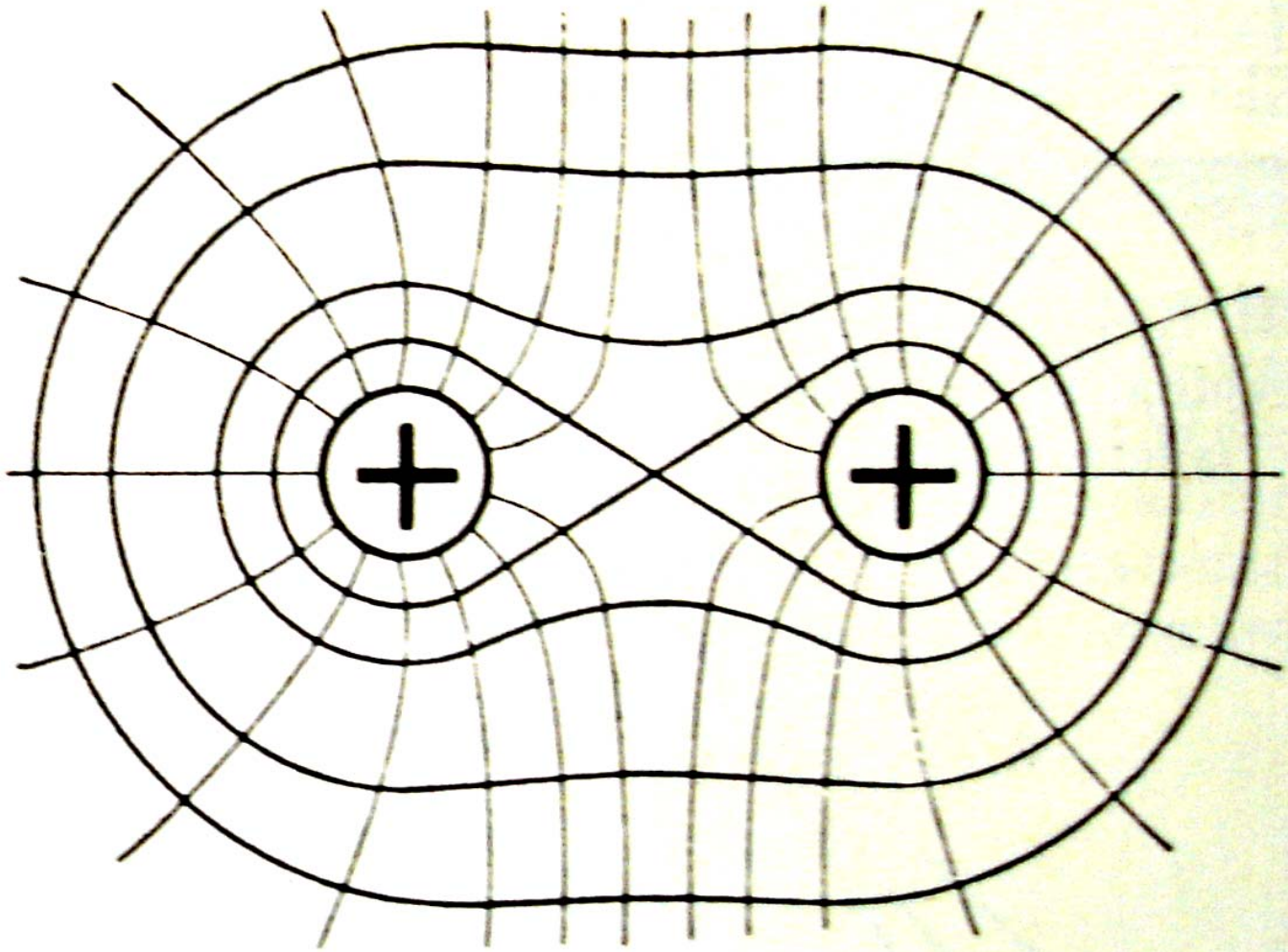


Abb. 31. Elektrische Niveau- (stark ausgezogen) und Feldlinien (schwach ausgezogen) um zwei gleichnamig geladene Kugeln

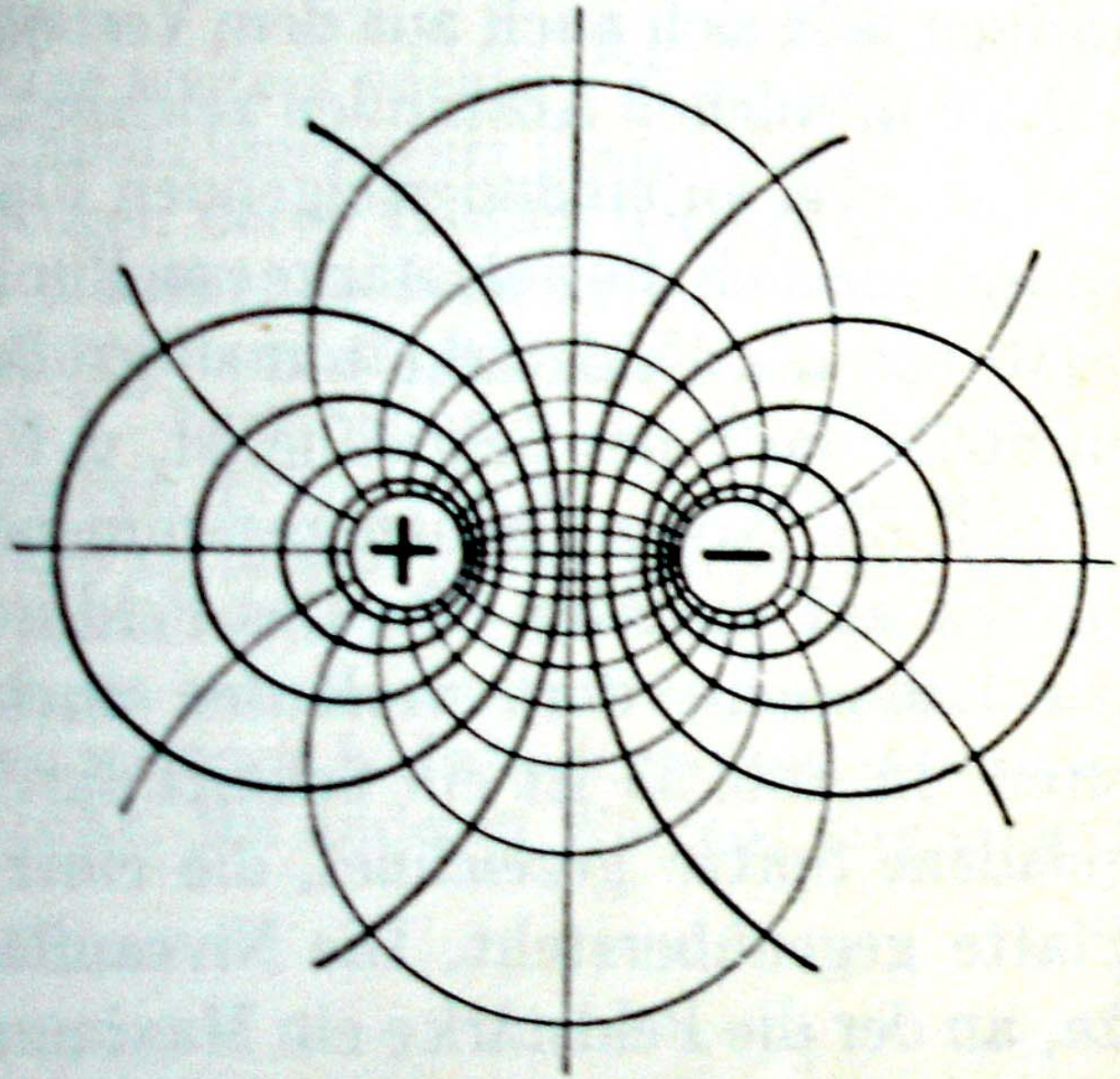


Abb. 30. Elektrische Niveau-(stark ausgezogen) und Feldlinien (schwach ausgezogen) um zwei entgegengesetzt geladene Kugeln

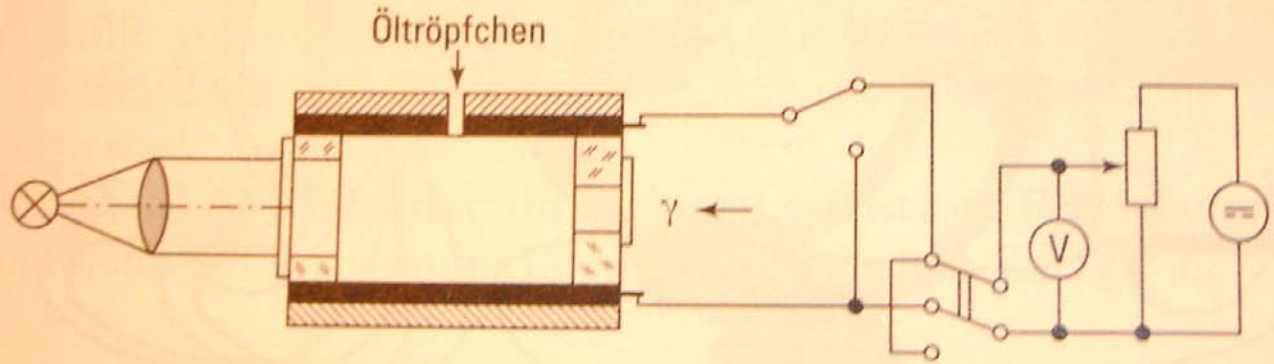


Abb. 7.2 Anordnung zur Bestimmung der Elementarladung nach R. A. Millikan (schematisch). Die Beobachtung der Öltröpfchen mit dem Mikroskop erfolgt senkrecht zur Zeichenebene.

Millikanscher Öltropfenversuch (1910)

- Düse ➔Öltröpfchen

Ionisieren mit Strahlung oder Flamme

Clerk Maxwell, James (1831–1879). Ab

Holz Töpler Wimshurst (1860-1880)

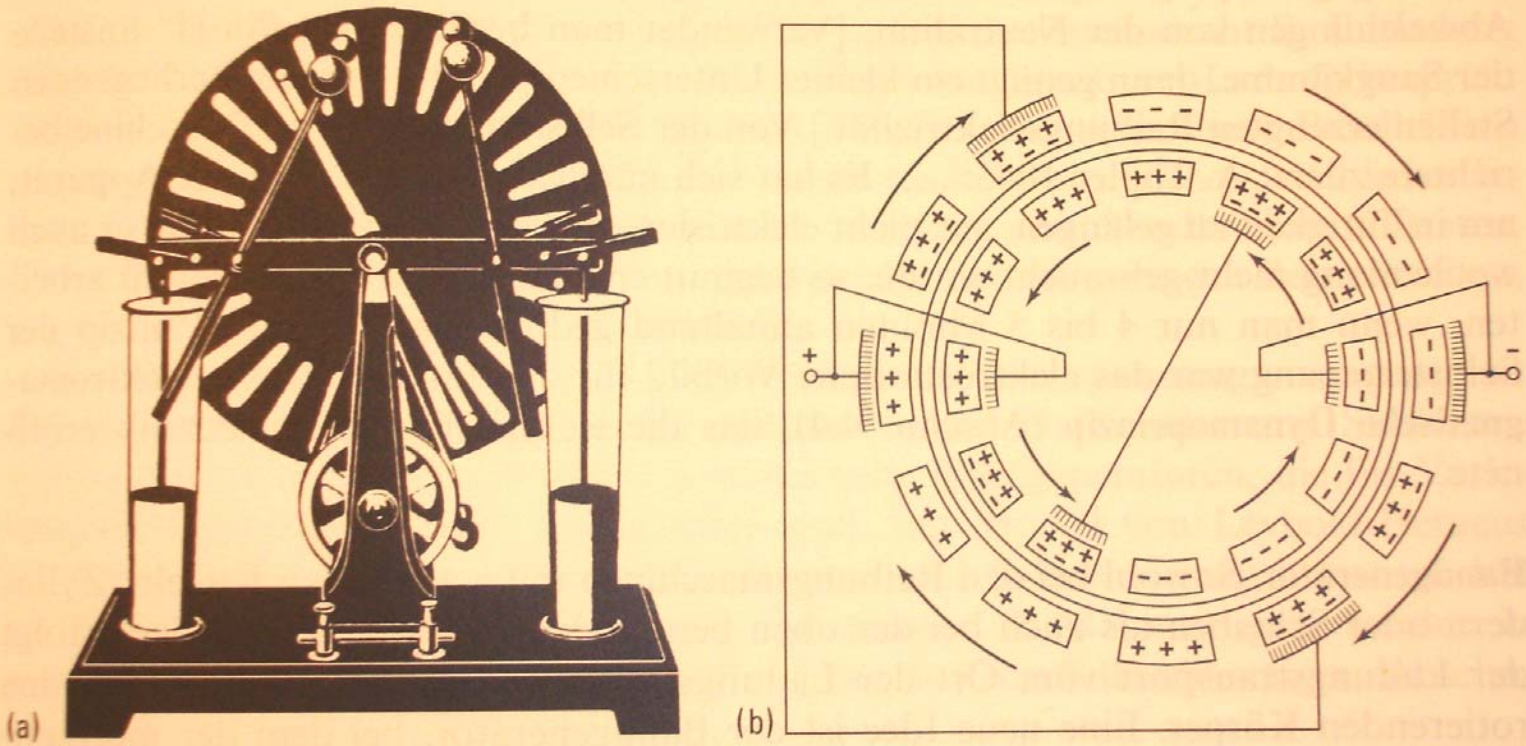
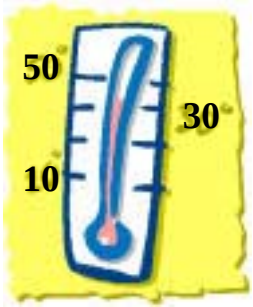
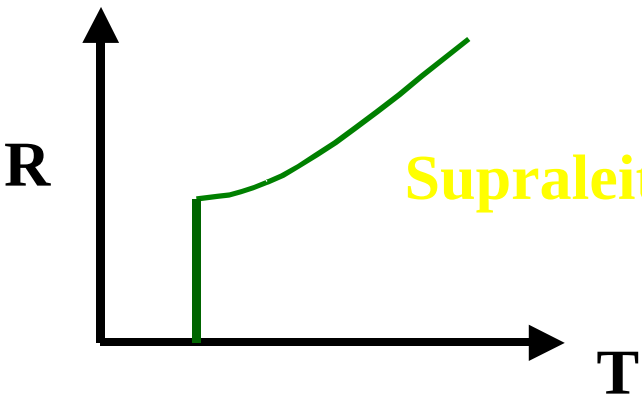


Abb. 2.16 (a) Influenzmaschine mit zwei Leidener Flaschen. (b) In der Zeichnung sind statt der gegensinnig rotierenden Scheiben zwei koaxiale Zylinder dargestellt (Kästchen = Aluminiumbelegung).

Supraleitung : Basis-Wissen

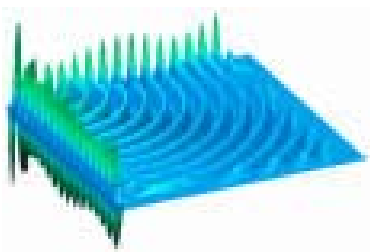


Supraleitung tritt bei tiefen Temperaturen auf



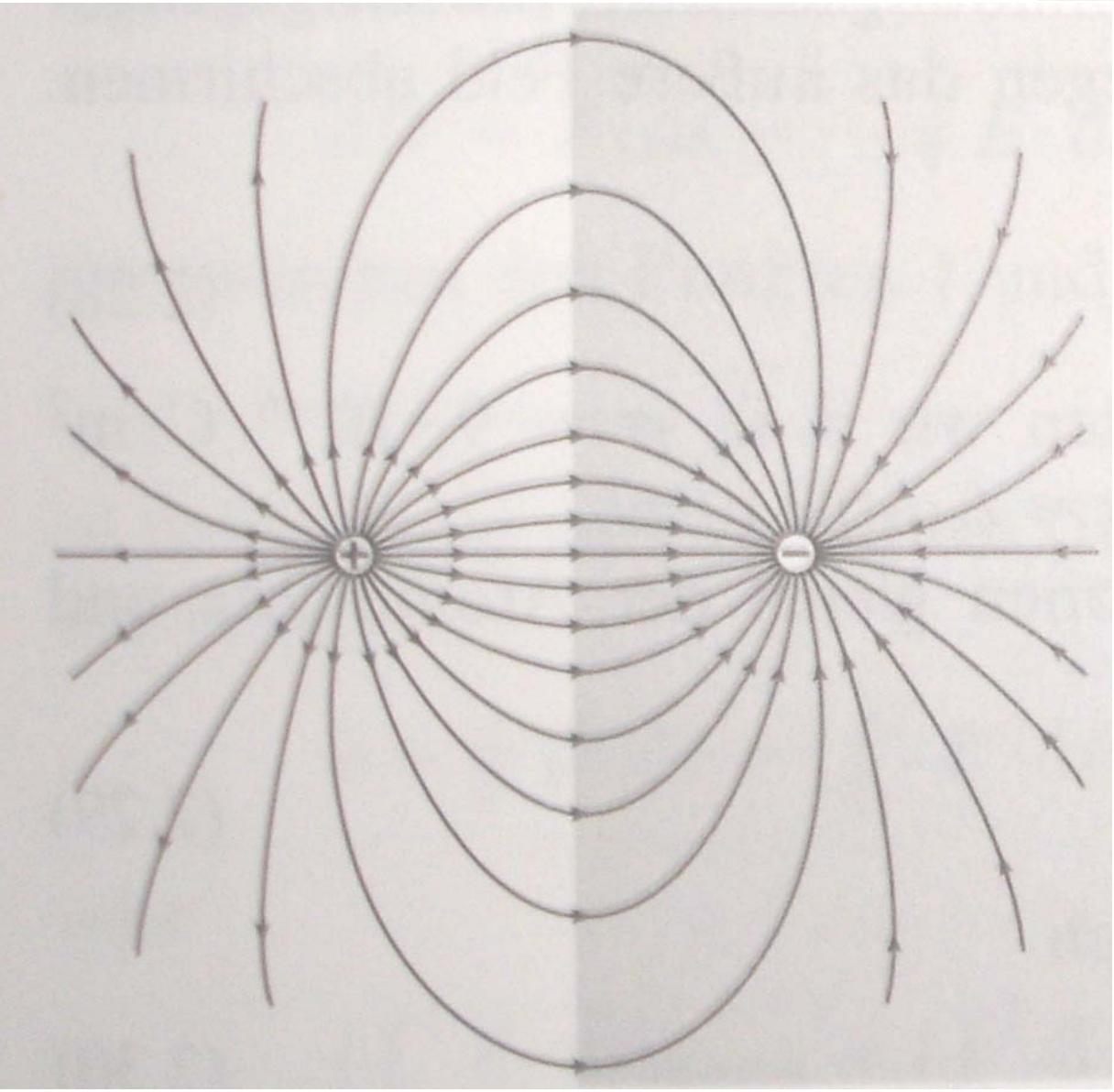
Supraleiter haben keinen elektrischen Widerstand

Supraleiter stoßen das magnetische Feld aus



zwei Elektronen bilden ein Cooper-Paar

Abb. 2.30 Links: Feld zwischen einer positiv geladenen Kugel und einer geerdeten Platte. Rechts: Die virtuelle „Bildladung", eine Hilfsvorstellung zur Beschreibung des elektrischen Feldes auf der linken Seite.



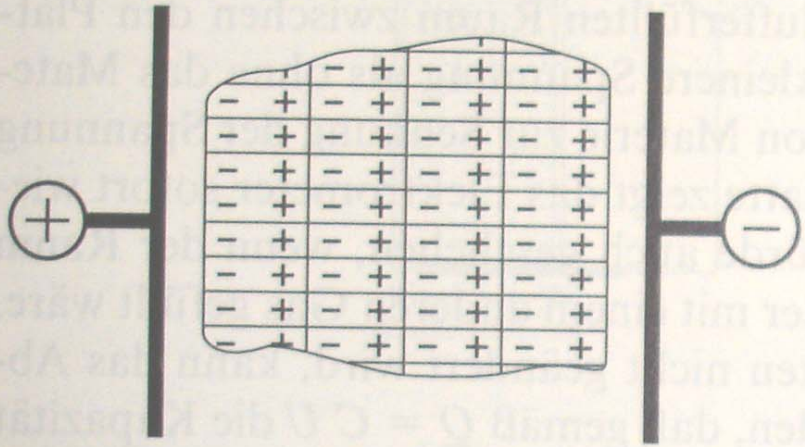


Abb. 13.3 Verschiebung der Ladungen in neutralen Atomen, bewirkt durch ein elektrisches Feld, ergibt induzierte Dipole in Feldrichtung und Polarisationsladungen auf den Stirnflächen.

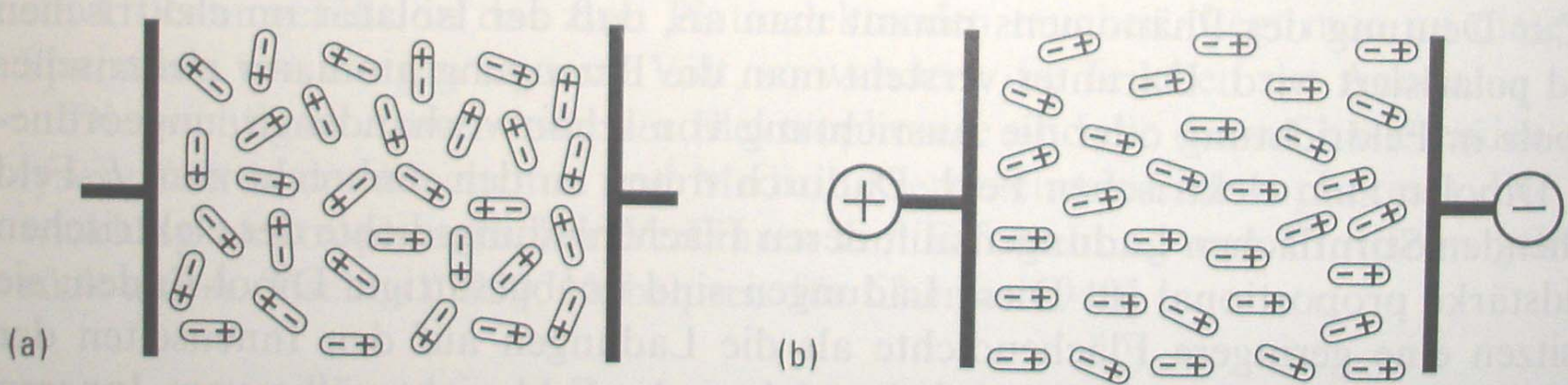
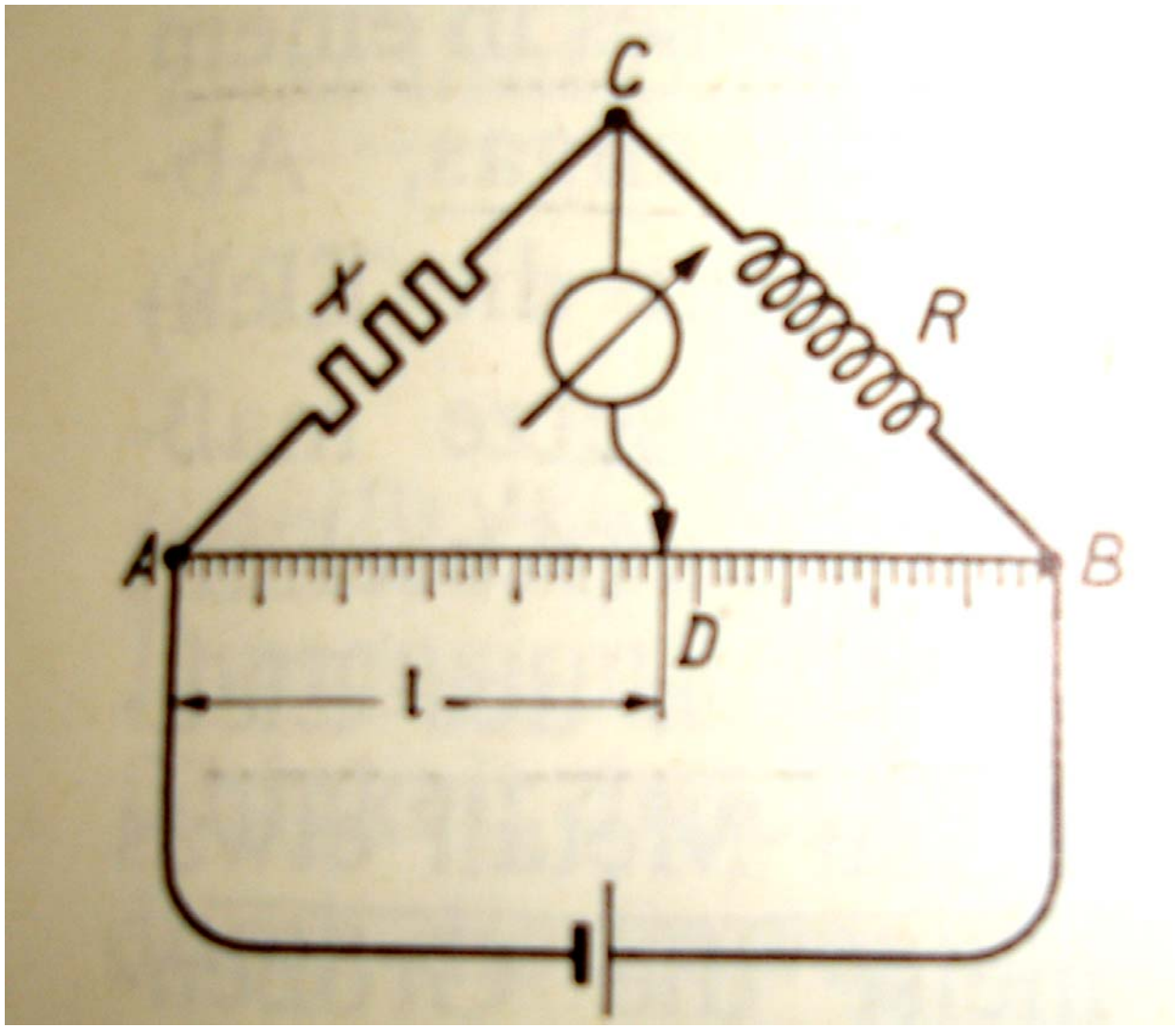


Abb. 13.4 Schematische Darstellung polarer Moleküle (a) im feldfreien Raum, (b) im elektrischen Feld. Nach Abschalten des Feldes wird die Ausrichtung durch die thermische Bewegung wieder zerstört.

Wheatstonesche Brücke



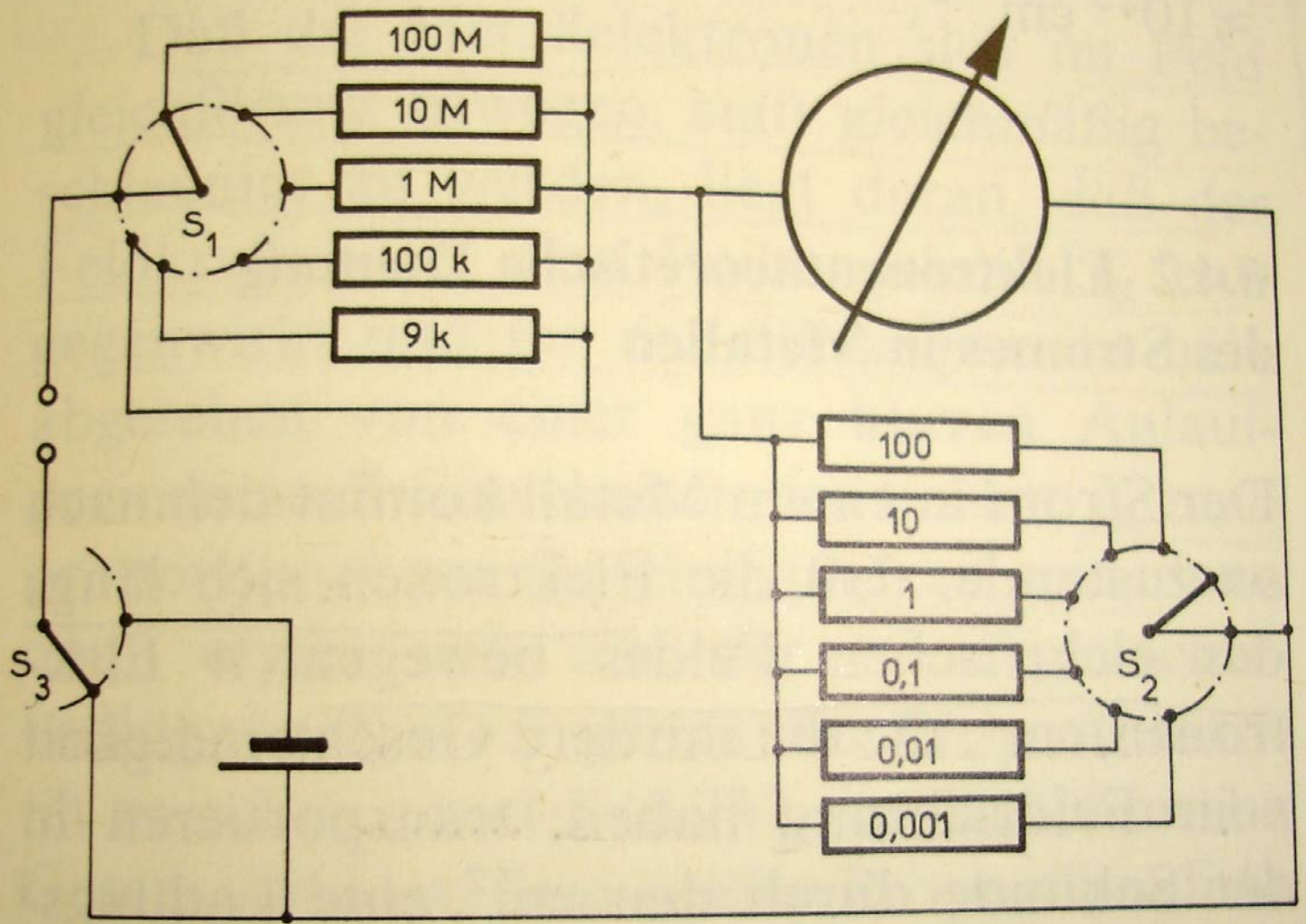
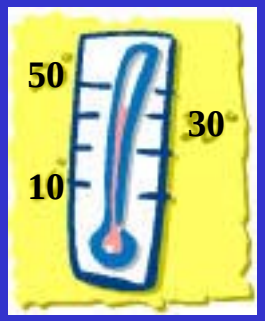


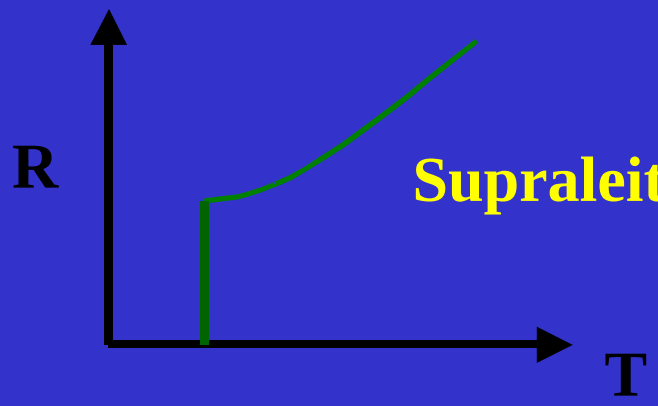
Abb. 6.49. Vielfachmesser für Strom, Spannung, Widerstand (schematisch)

Supraleitung : Basis-Wissen



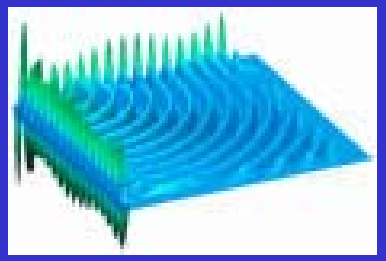
Supraleitung tritt bei tiefen Temperaturen auf

Strom + Widerstand ➔ Verlust



Supraleiter haben keinen elektrischen Widerstand

Supraleiter stoßen das magnetische Feld aus

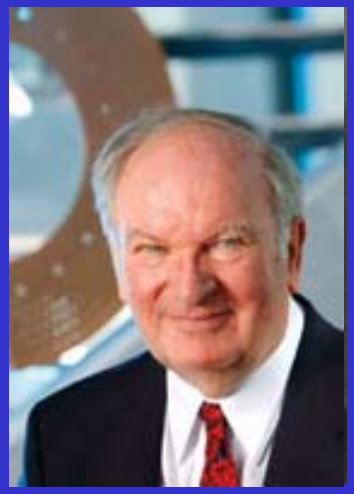


zwei Elektronen bilden ein Cooper-Paar

T_c [K] : Hg 4.15 Pb 7.2 Nb 9.2
Nb_3Sn 18 Nb_3Ge 23.2

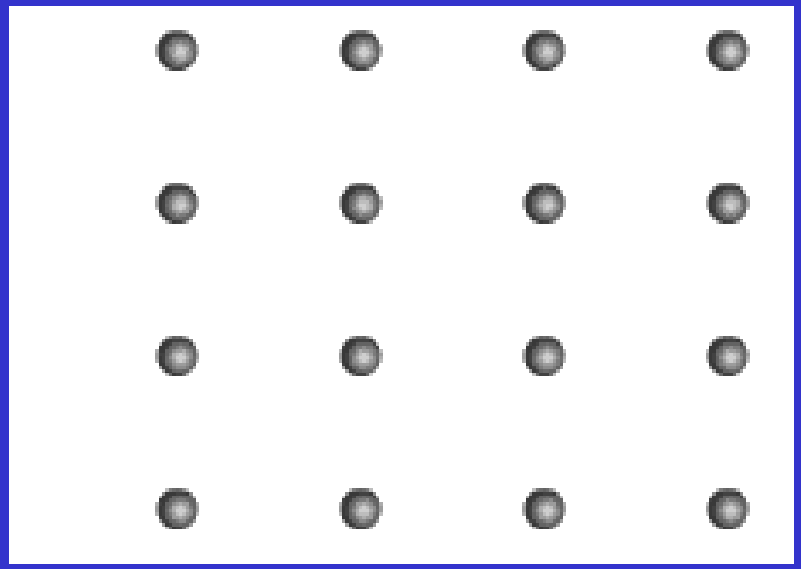
John Bardeen

Leon Cooper



Bob Schrieffer

Konventionelle Supraleitung



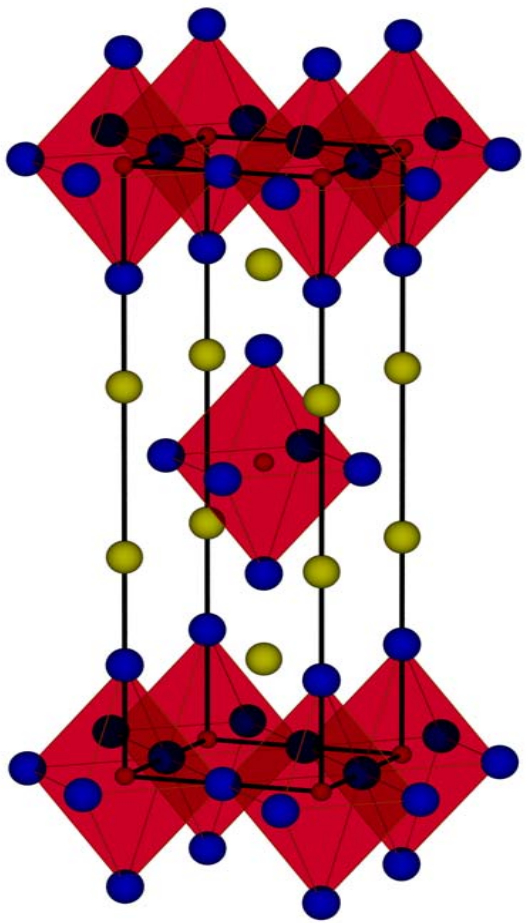
- BCS Theorie
- *metallischer*
- *Zustand wird instabil*

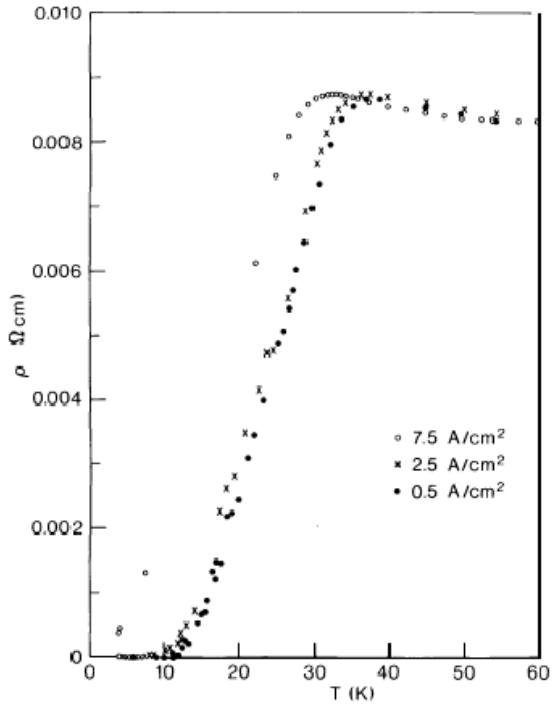
www.superconductors.org

Oxidische Supraleiter

ohne Kuprate !!! :	T_c	
- $SrTi_{1-x}Nb_xO_3$	<0.5 K	(1964 ...)
- W-Bronzen	7 K	(1964 ...)
- NbO	~1.5 K	(70er)
- TiO	~1.0K	(70er)
- Spinel $LiTi_2O_4$	13 K	(1973)
- $BaPb_{1-x}Bi_xO_3$	13 K	(1975)
- $Ba_{1-x}K_xBiO_3$	35 K	(1988)
- Sr_2RuO_4	1.45 K	(1994)
- $Cd_2Re_2O_7$	1.5 K	(2001)
- $Na_xCoO_2.H_2O$	3-4 K	(2003)
- KOs_2O_6	10 K	(2004)
$RbOs_2O_6$	6.3 K	(2004)

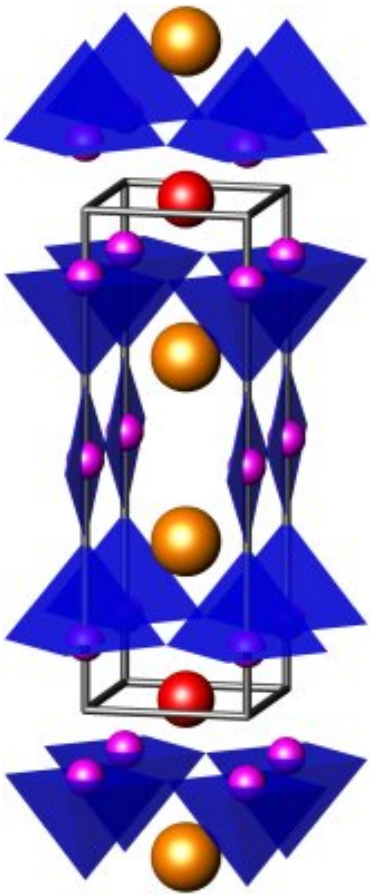
Bednorz und Müller 1986

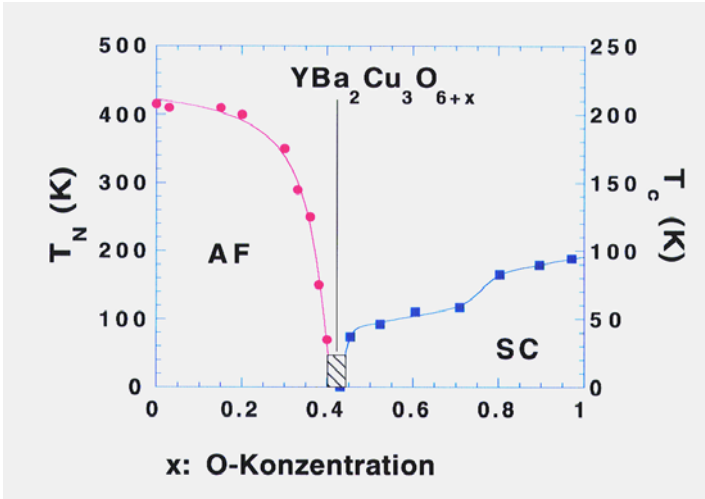




1986 30K $La_{1.85}Ba_{0.15}CuO_4$ J. G. Bednorz, K. A. Müller
Zeitschrift für Physik B. Vol. 64: 189-193.

Modifizierte Phase : $YBa_2Cu_3O_{6+x}$





1987 90K $YBa_2Cu_3O_7$ (liquid nitrogen barrier broken) Wu et al., *Physical Review Letters*. 58 (1987): 908-910.

Hoch-T_c-Kuprat-Supraleiter

year T_c [K]

1986 30 $La_{1.85}Ba_{0.15}CuO_4$ J. G. Bednorz, K. A. Müller
Zeitschrift für Physik B. Vol. 64: 189-193.

1987 90 $YBa_2Cu_3O_7$ (liquid nitrogen barrier broken) Wu et al.,
Physical Review Letters. 58 (1987): 908-910.

1988 115 $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ H. Maeda et al
Jap. J. of Appl. Physics. Vol. 27 (1988): 209.

1988 125 $Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$ Z. Z. Sheng, A. M. Hermann
Nature. Vol. 332 (1988): 138.

1993 133 $HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$ A. Schilling et al.
Nature. Vol. 363 (1993): 56-58.

1995 **138** $Hg_{0.8}Tl_{0.2}Ba_2Ca_2Cu_3O_{8.33}$ P. Dai et al.,
(highest critical temperature of any material)
Physica C. 243 No. 3&4 (1995): 201-206.

1994 164 $HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$ (under 30 GPa pressure) Gao et al.,
Physical Review B. Vol. 50 (1994): 4260-4263.

Hoch-T_c-Kuprat-Supraleiter

$(La,M)_2CuO_4$	1986
La_2CuO_{4+x}	1988
$La_2CuO_4F_x$	1988
$(Nd,Sr,Ce)_2CuO_4$	1989
$(Nd,Ce)_2CuO_4$	1989
$Nd_2CuO_{4-x}F_x$	1989
Sr_2CuO_{3+x}	1993
$Sr_2CuO_2F_{2+x}$	1994
$(Ca,Na)_2CuO_2Cl_2$	1994
$(Ca,Na)_3Cu_2O_4Cl_2$	1995
(Sr,K) versions of previous two also are superconducting	
$(La,Sr)_2CaCu_2O_6$	1990
$(Sr,Ca)_2(Sr,Ca)_{n-1}Cu_nO_x$ (n = 2, 3, 4)	1993
$PbBaSr(Y,Ca)Cu_3O_x$	1990
$Sr_{1-x}Nd_xCuO_2$	1991
$YBa_2Cu_3O_7$	1987
$YBa_2Cu_4O_8$	1988
$Y_2Ba_4Cu_7O_{15}$	1988
$(Cu,M)Sr_2(Y,Ca)Cu_2O_7$ M stabilized Sr 123 M = Pb, Ga, Fe, B, SO_4, CO_3, Al, (Bi + Cd)	1988
$Pb_2Sr_2(Y,Ca)Cu_3O_8$	1988
$Pb_2(Sr,La)_2Cu_2O_6$	1988
"$Bi_2Sr_2CuO_6$"	1987
$Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$	1988
$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$	1988
$Bi_2Sr_2(Ln,Ce)_2Cu_2O_{10}$	1990
$Tl_2Ba_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+4}$ n = 1, 2, 3, 4	1988
$TlBa_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+3}$ n = 1, 2, 3	1988
$TlBa_2(Eu,Ce)_2Cu_2O_9$	1992
(Tl,Pb)SrCaCu variants of Tl, Ba, Ca compounds	1988
$GaSr_2(Y,Ca)Cu_2O_7$	1991
$GaSr_2Ca_{n-1}Cu_nO_x$ n = 3, 4	1994
$AuSr_2CaCu_2O_7$	1997
$NbSr_2(Nd,Ce)_2Cu_2O_{10}$	1992
$RuSr_2(Nd,Ce)_2Cu_2O_{10}$ and others in "1222" type with a mix of Cu and M on first Cu site (e.g., Ti, V, Cr) also known	1996
$Cu(Eu,Ce)_2(Eu,Sr)_2Cu_2O_9$ and others in this type with a mix of Cu and M on first Cu site (e.g., Pb, Ga) also known	1989
$HgBa_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+2}$ n = 1, 2, 3, 4, 5, 6	1993
$Hg_2Ba_2(Y,Ca)Cu_2O_8$	1994
$(Hg_{0.5}Cr_{0.5})Sr_2CuO_5$	1995
$(Hg_{0.5}Cr_{0.5})Sr_4Cu_2O_7CO_3$	1995
$(Ba,Sr)_2Cu_{1+x}(CO_2)_{1-x}O_y$	1992
$(Cu_{1-x}(CO_2)_x)_m(Ba,Sr)_2Ca_{n-1}Cu_nO_y$ m = 1; n = 2, 3, 4, 5; $x \neq 0$ or $x = 0$ m = 2; n = 3, 4, 5; $x \neq 0$	1994
$Bi_2Sr_4Cu_2O_8CO_3$	1993
$Bi_2Sr_5Cu_3O_{10}(CO_3)_2$	1994
$(Tl,Pb)Sr_4Cu_2O_7CO_3$	1993
$Ca_{13.5}Sr_{.5}Cu_{24}O_{41}$ (60 kbar (6 MPa) applied pressure only)	1996

Robert Cava 1996

Einige Kristallstrukturen

$YBa_2Cu_3O_7$

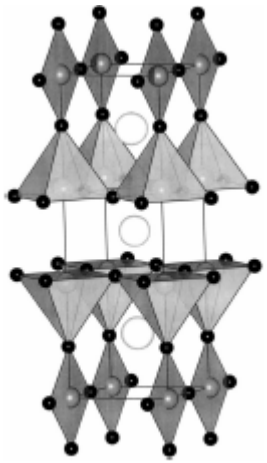


Fig. 13. Crystal structure of $YBa_2Cu_3O_7$ (see Fig. 9 for legend).[23]

$Pb_2Sr_2YCu_3O_8$

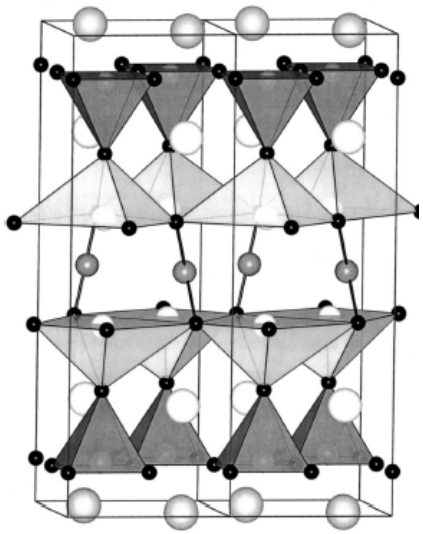


Fig. 16. Crystal structure of $Pb_2Sr_2YCu_3O_8$ (see Fig. 9 for legend).

$Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$

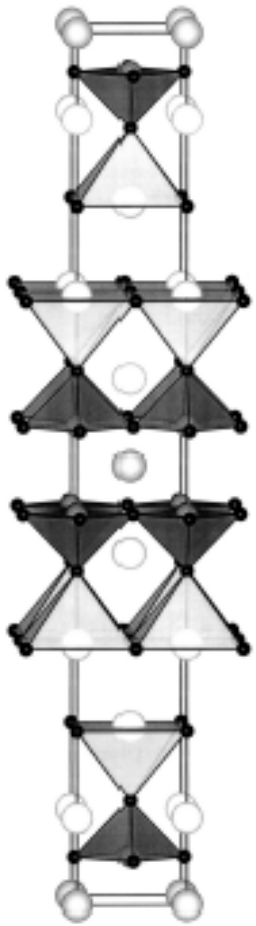


Fig. 14. Crystal structure of $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ (see Fig. 9 for legend).[23]

$Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$

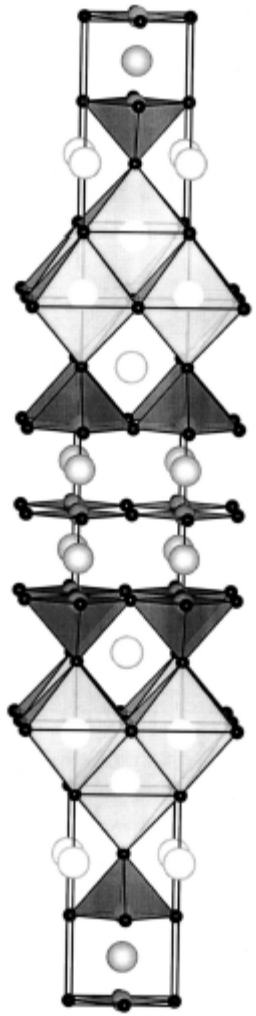
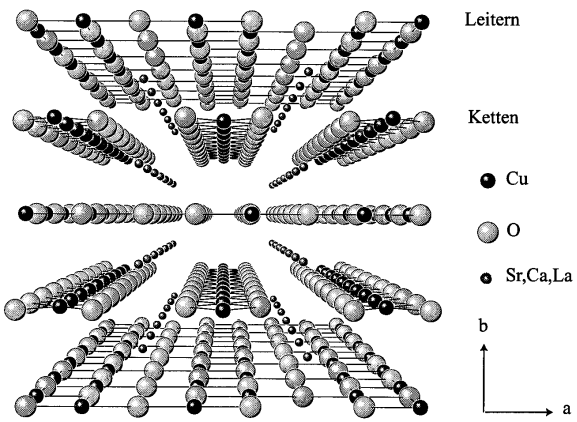


Fig. 15. Crystal structure of $Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$ (see Fig. 9 for legend).[24]

$(Sr/Ca)_{14}Cu_{24}O_{41}$



Schema der Kristallstrukturen:
ein wenig Chemie

Hoch-Temperatur-Supraleiter Formeln

$HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$

$Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$

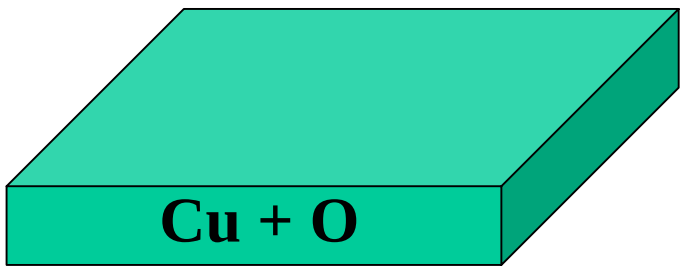
$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$

$La_{1.8}Sr_{0.2}CuO_4$

Cu = Copper

O = Oxygen

CuO = CopperOxide



Schema der Kristallstrukturen:
ein wenig Chemie

Hoch-Temperatur-Supraleiter Formeln

$HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$

$Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$

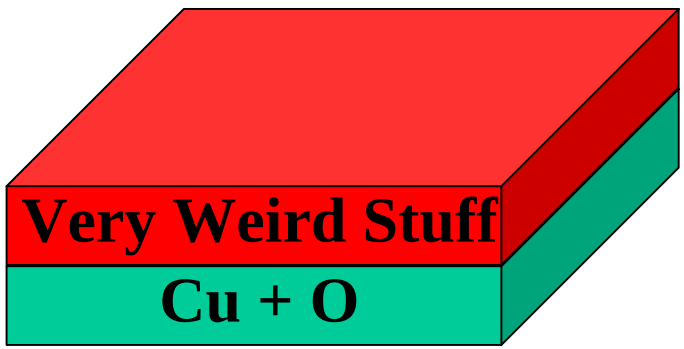
$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$

$La_{1.8}Sr_{0.2}CuO_4$

Cu = Copper

O = Oxygen

CuO = CopperOxide



Schema der Kristallstrukturen:
ein wenig Chemie

Hoch-Temperatur-Supraleiter Formeln

$HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$

$Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$

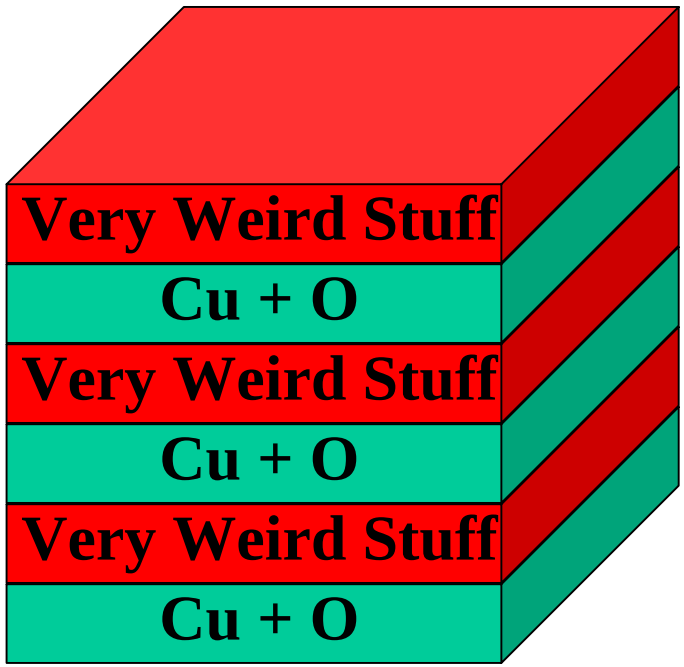
$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$

$La_{1.8}Sr_{0.2}CuO_4$

Cu = Copper

O = Oxygen

CuO = CopperOxide



Schema der Kristallstrukturen:
ein wenig Chemie

Hoch-Temperatur-Supraleiter Formeln

$HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$

$Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$

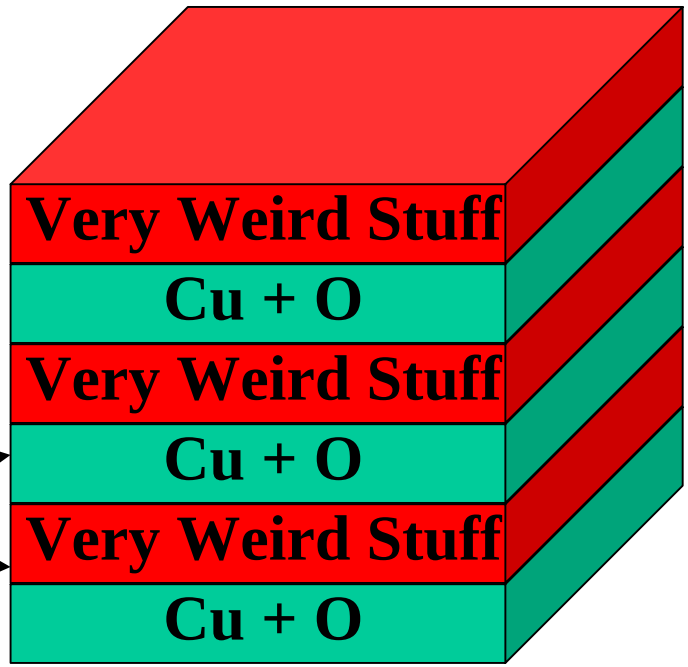
$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$

$La_{1.8}Sr_{0.2}CuO_4$

Cu = Copper

O = Oxygen

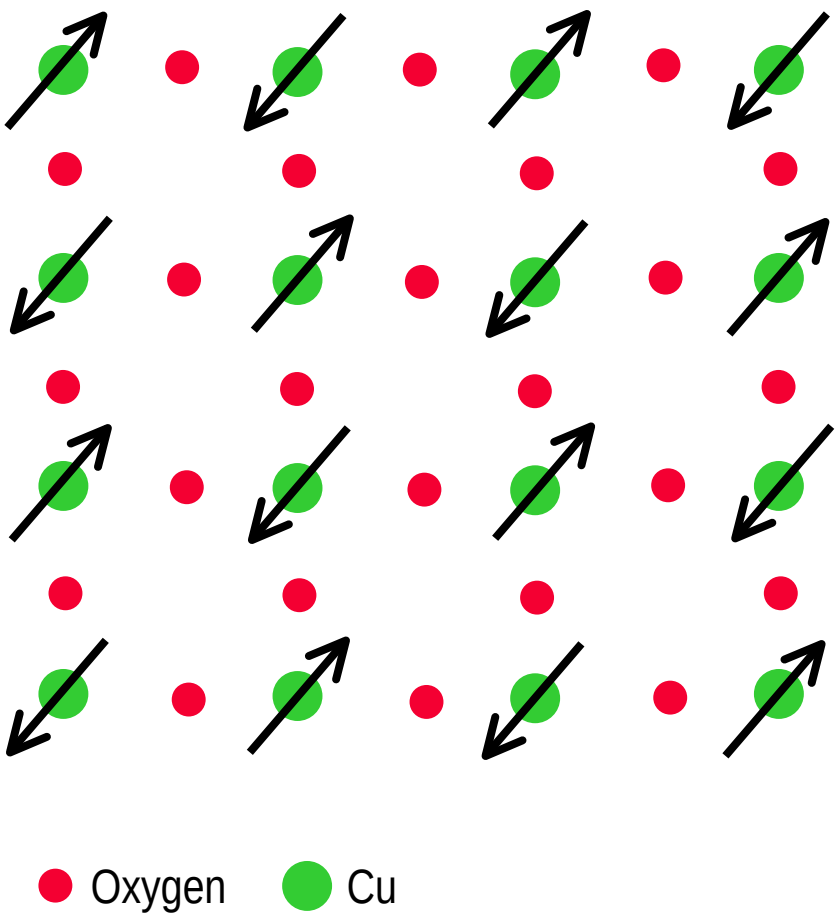
CuO = CopperOxide



Supraleitung ist hier !!!

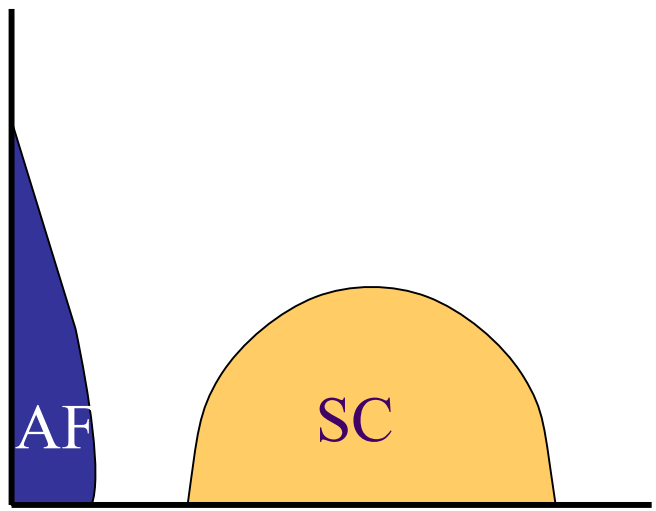
auch wichtig!

Eine CuO_2-Ebene

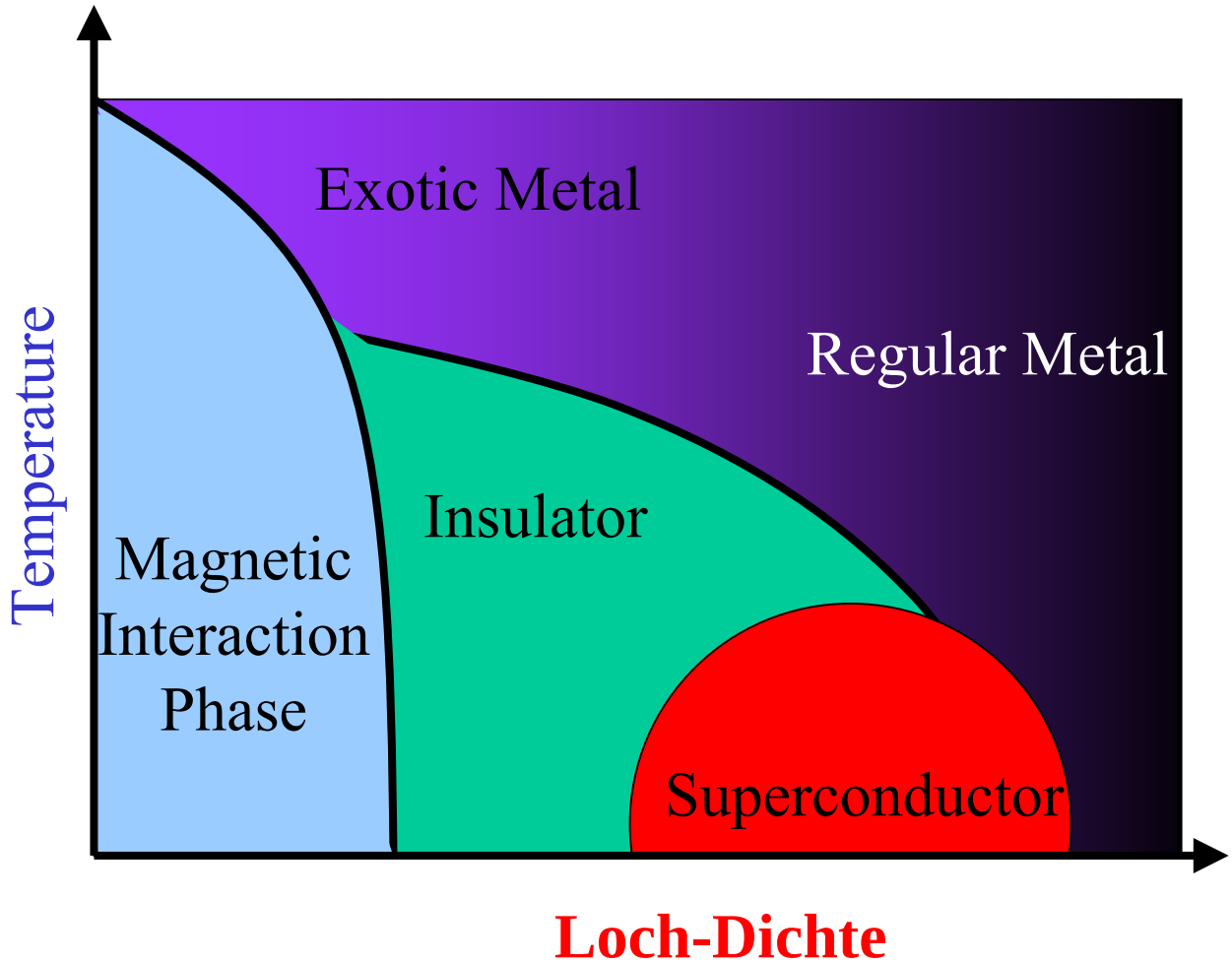


Dotierung mit Löchern

Supraleitung bei spezieller Dotierung



Generelles Phasendiagramm?



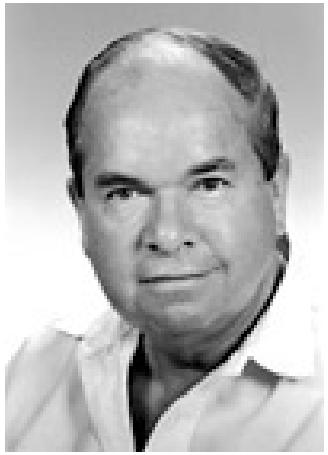
Mechanismus I ?

Superconductivity in High T_c Cuprates: The Cause is No Longer A Mystery

Philip W. Anderson
Joseph Henry Laboratories of Physics
Princeton University, Princeton, NJ 08544

(2001)

I discuss various direct calculations of the properties of the one-band Hubbard model on a square lattice and conclude that these properties sufficiently resemble those of the cuprate superconductors that no more complicated interactions are necessary to cause high Tc superconductivity. In particular, I discuss phonon effects and conclude that these may be effective in reducing Tc and the gap in electron-doped materials.



Mechanismus II ?

Theory of High-Tc Superconducting Cuprates Based on Experimental Evidence

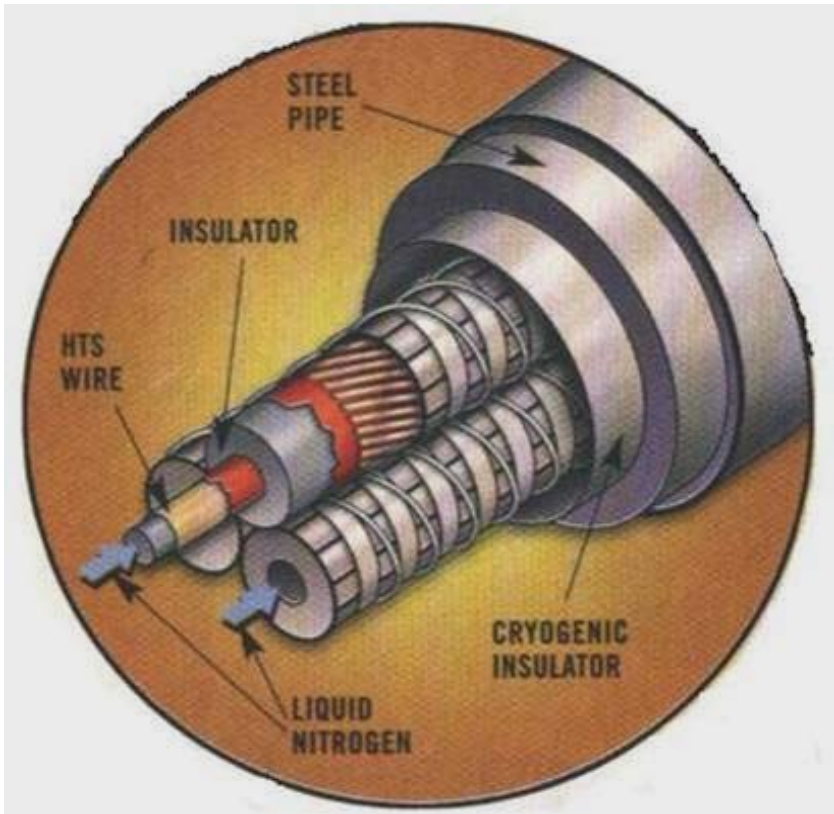
A.A. Abrikosov
Materials Science Division, Argonne National Laboratory
9700 South Cass Avenue, Argonne, Illinois 60439, USA
(January 8, 2004)

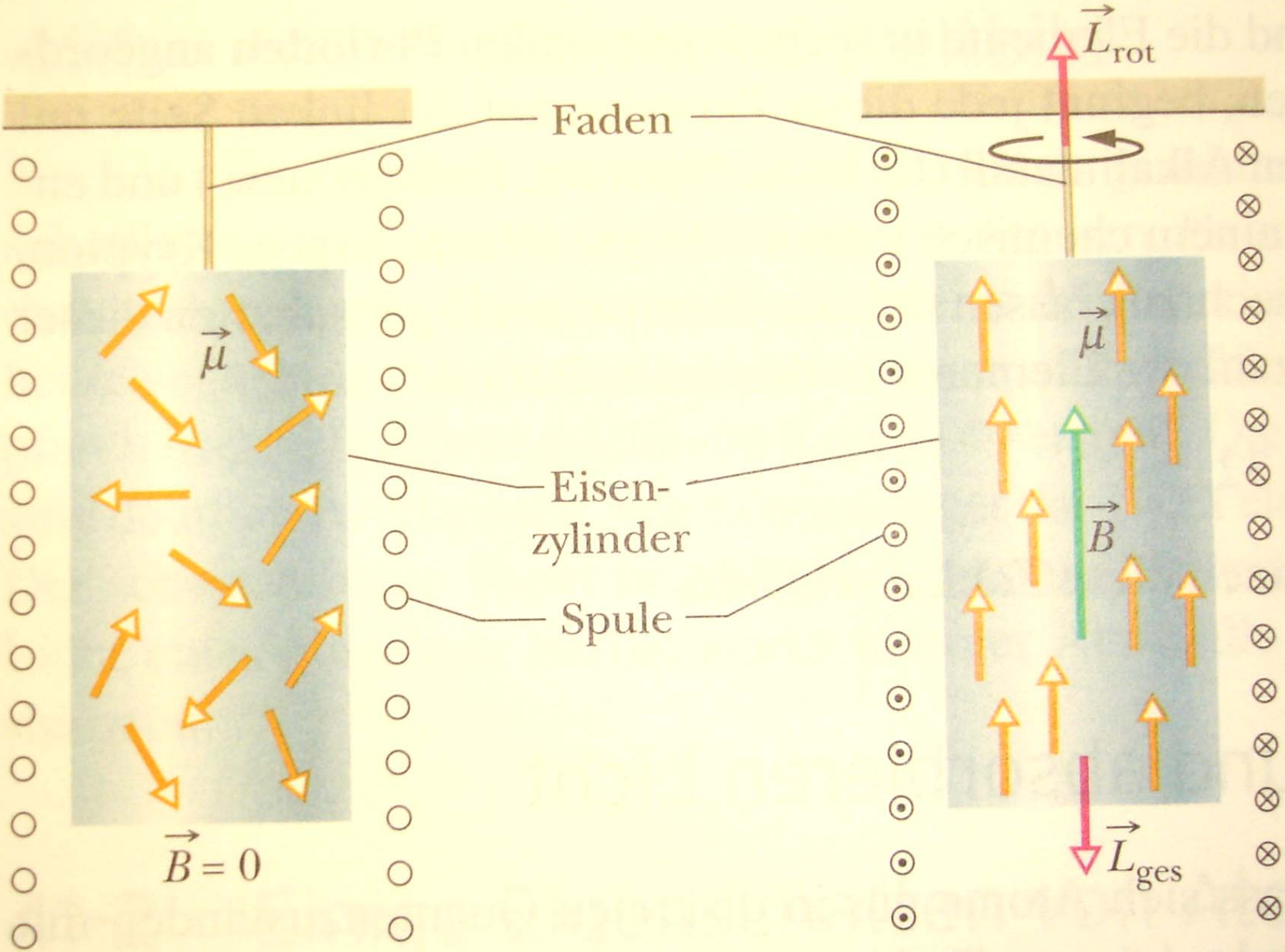
A model of superconductivity in layered high-temperature superconducting cuprates is proposed, based on the extended saddle point singularities in the electron spectrum, weak screening of the Coulomb interaction and phonon-mediated interaction between electrons plus a small short -range repulsion of Hund's, or spin-fluctuation, origin. This permits to explain the large values of Tc ….

Es geht auch ohne Theo-rie / retiker

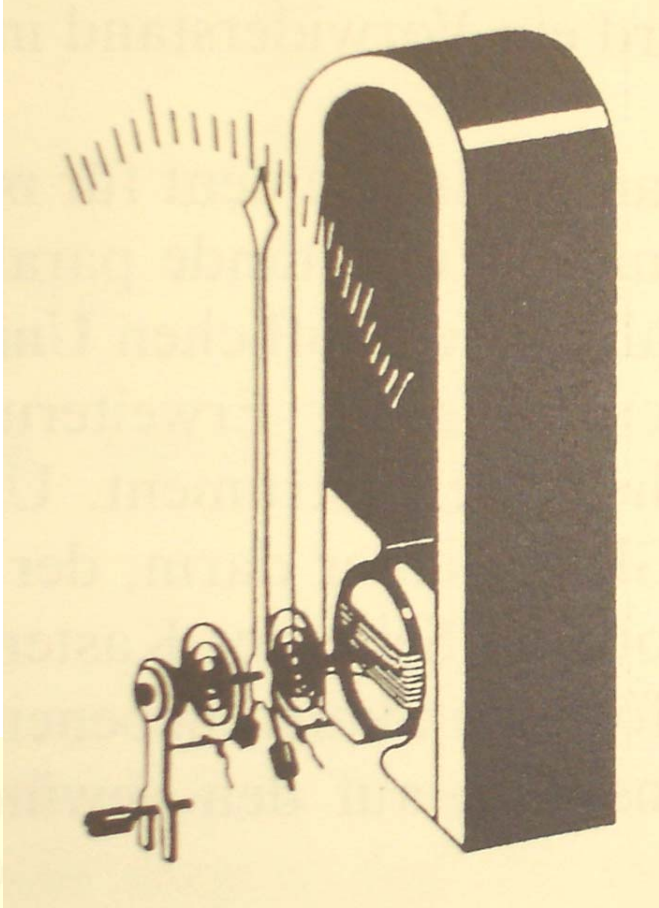
HTS Kabel

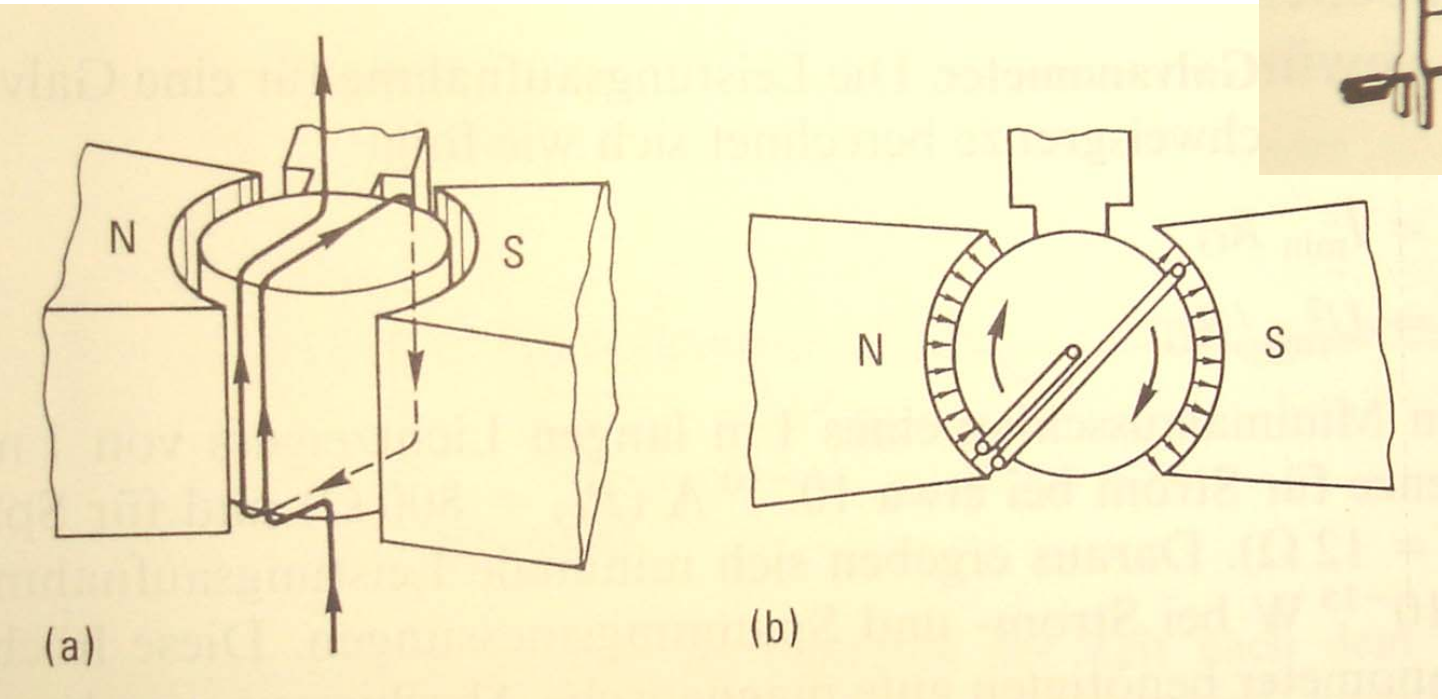
Fig. 2-10: A HTSC cable from Sumitomo HTS, 50 m long, 23 mm diameter. It can carry 2.900 A dc at 77K and 2.200 A ac in current transmission.




$\vec{L}_{rot}$
Faden
$\vec{\mu}$
$\vec{\mu}$
Eisen-
zylinder
$\vec{B}$
Spule
$\vec{B} = 0$
$\vec{L}_{ges}$

Drehspulgalvanometer
(heute elektronische Meßinstrumente)





Transrapid

technisches Prinzip
Regelung 30000Hz

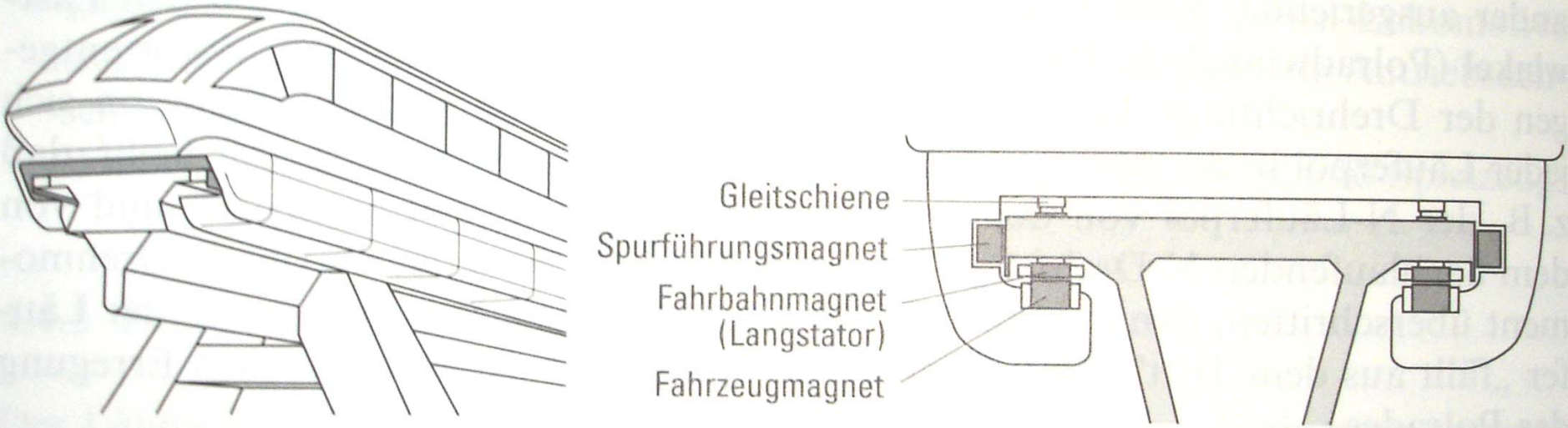


Abb. 4.65 Transrapid: Am Fahrzeug befinden sich die Fahrzeugmagnete, die als Tragemagnete den Zug von der Gleitschiene abheben und als Pole des Linearmotors vom Wanderfeld im Langstator gezogen werden.

Barlow‘sches Rad

Erster Motor mittels Elektromagnetismus

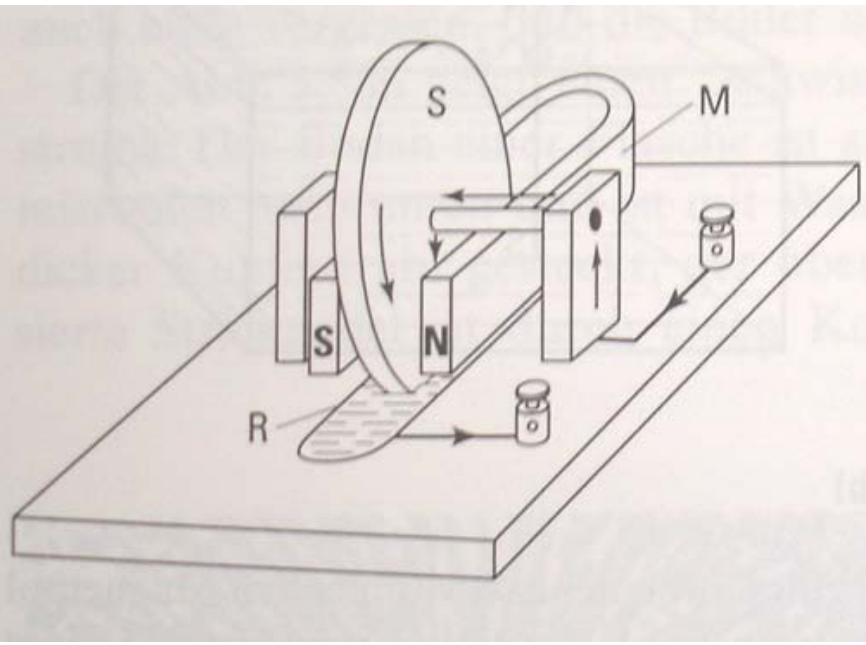
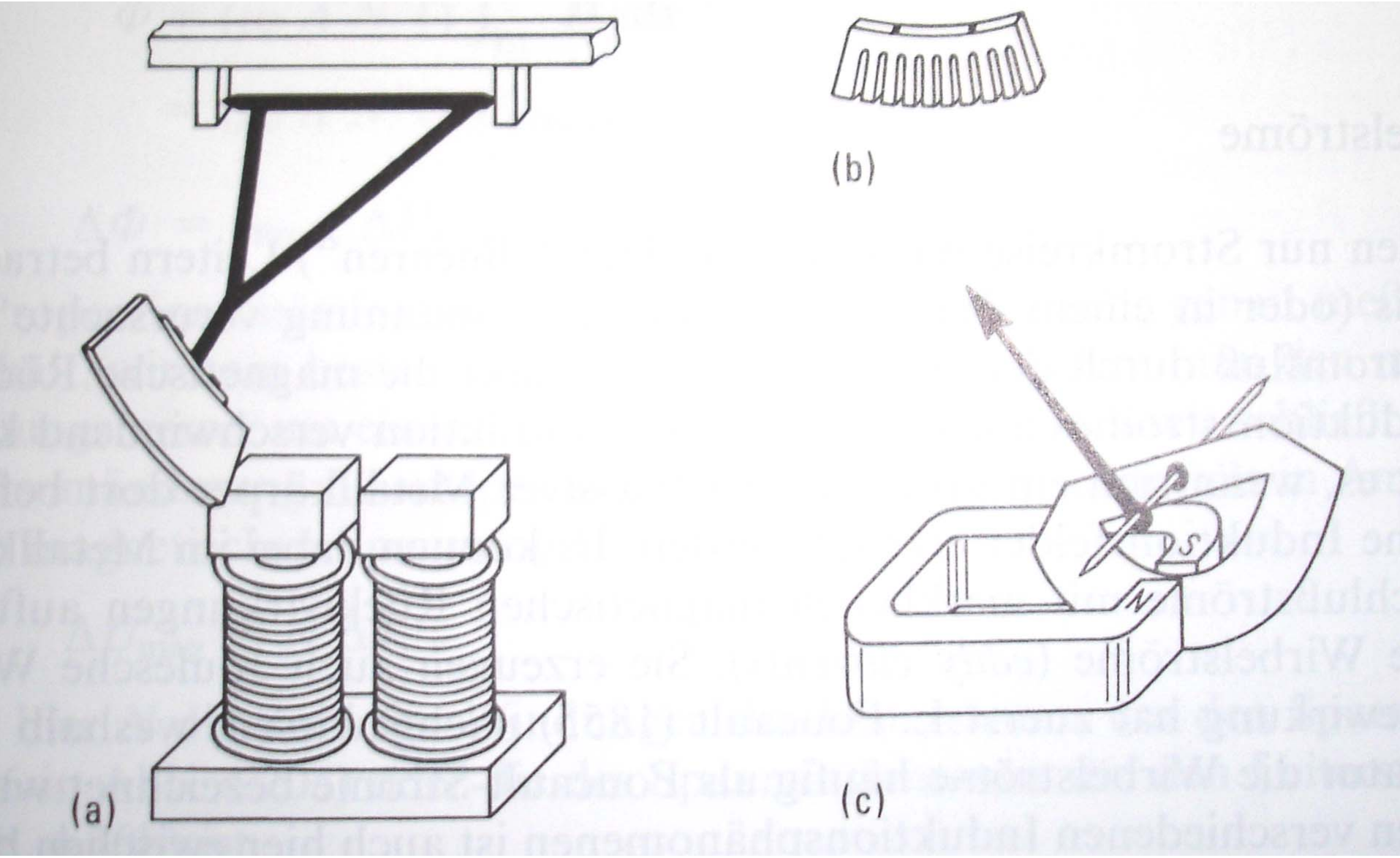


Abb. 3.40 Barlowsches Rad, die erste Maschine, in der ein Rad mit Hilfe des Elektromagnetismus in Drehbewegung versetzt wurde (Peter Barlow 1822).

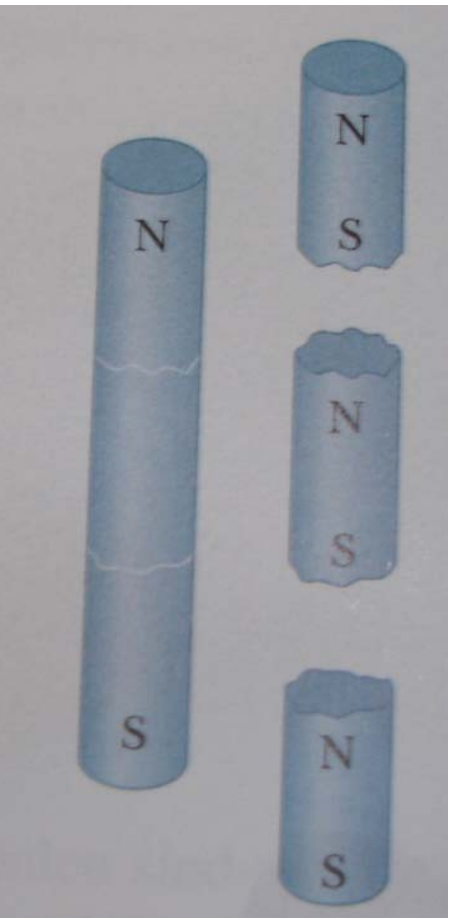
- Erklärung Lorentz-Kraft und Elektronen-Gitter Stöße

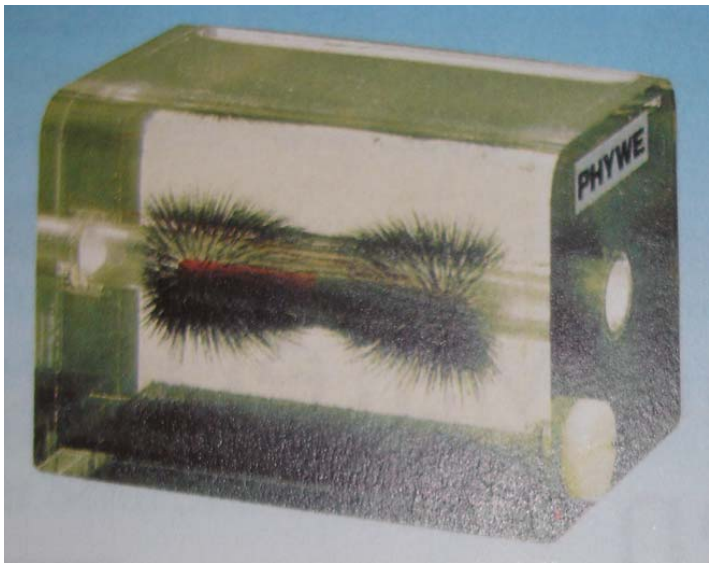
Wirbelstrom-Pendel

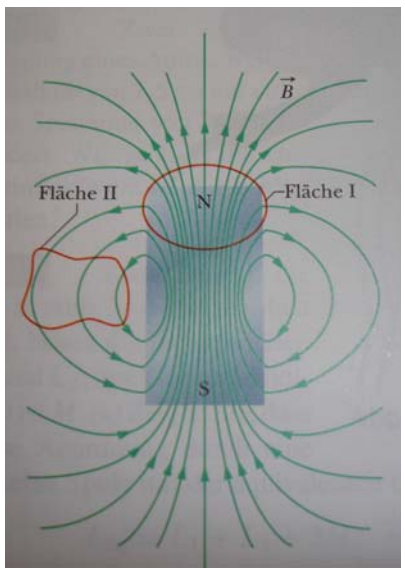


12. Doppelstunde

Magnetische Materie







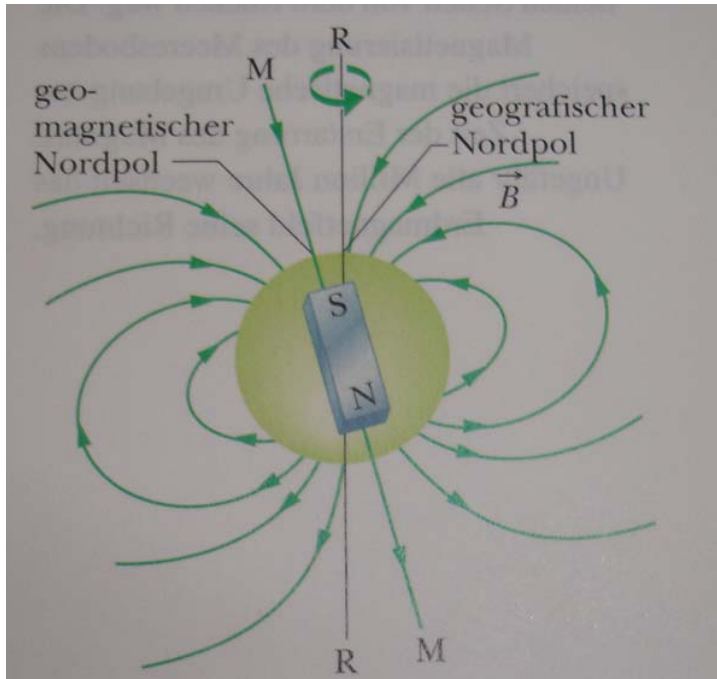
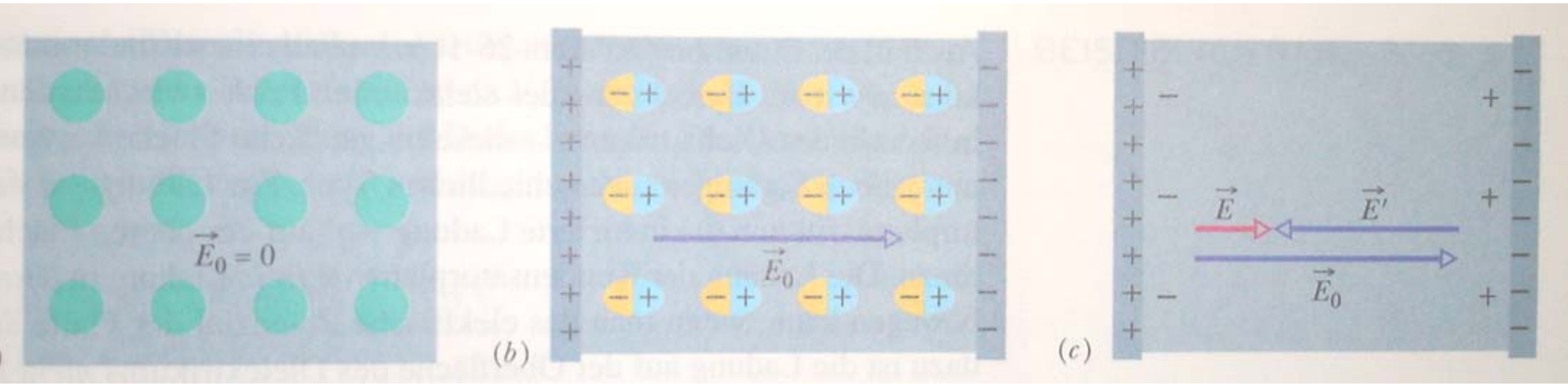
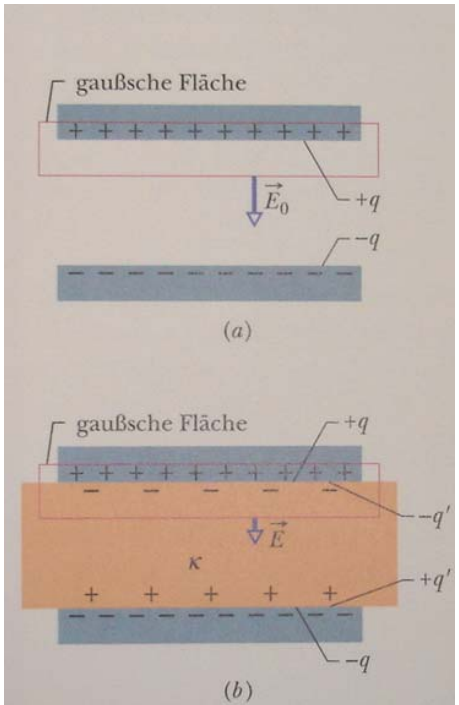
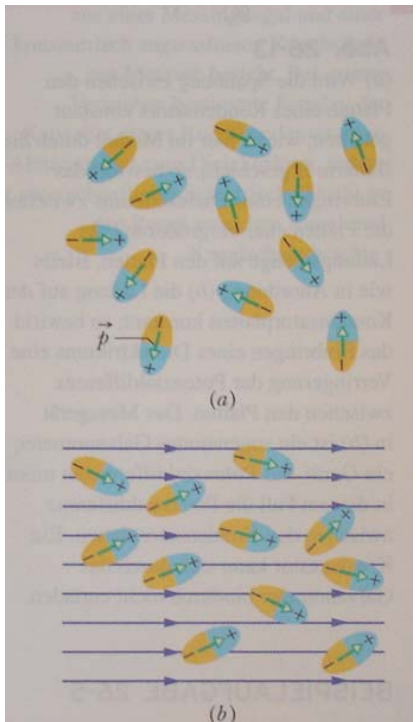


Abb. 32-4
Das Magnetfeld der Erde als Dipolfeld. Die Dipolachse MM steht in einem Winkel von 11,5° zur Rotationsachse RR der Erde. Der Südpol des Dipols liegt auf der Nordhalbkugel der Erde.

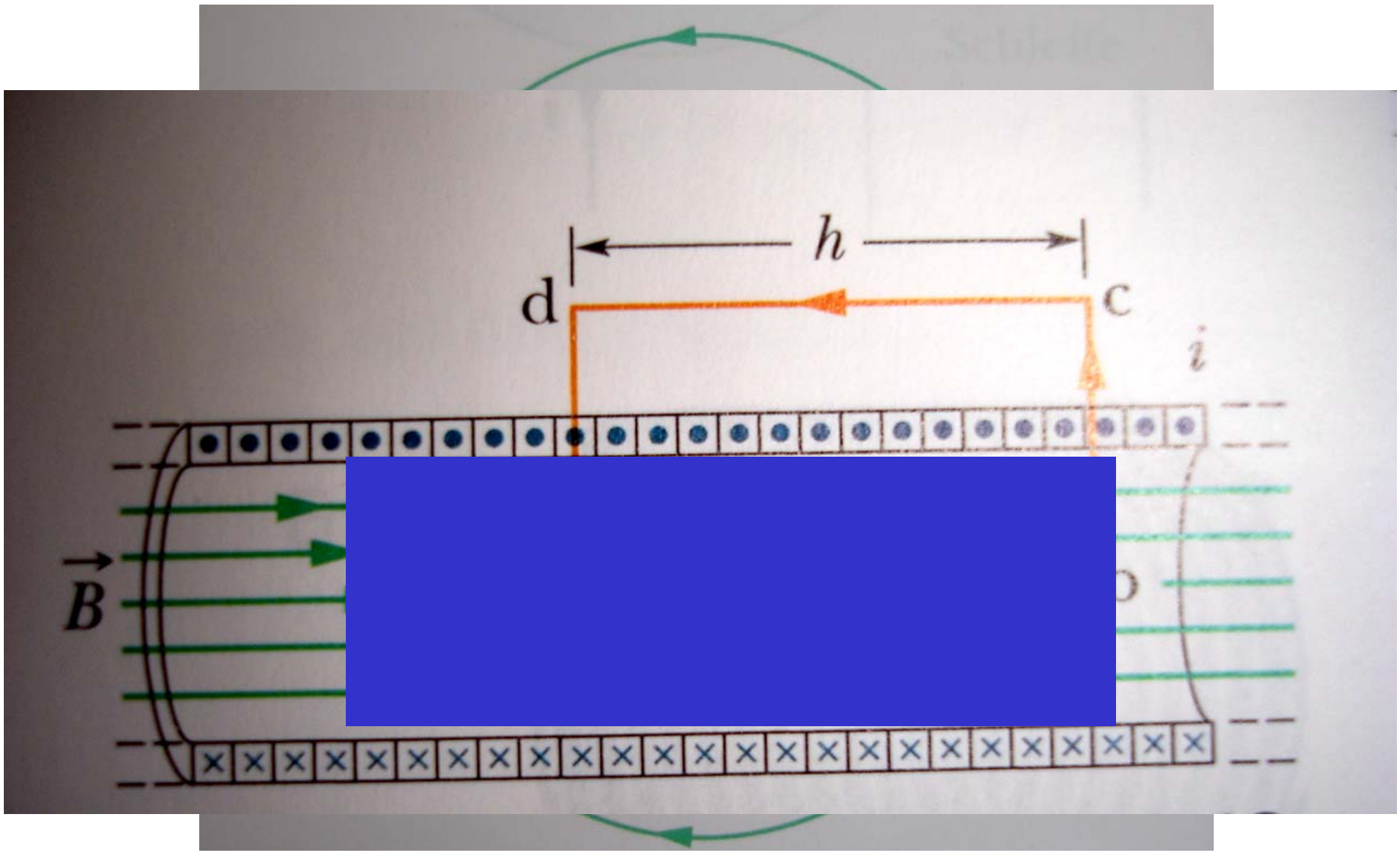
Materie im elektrischen Feld

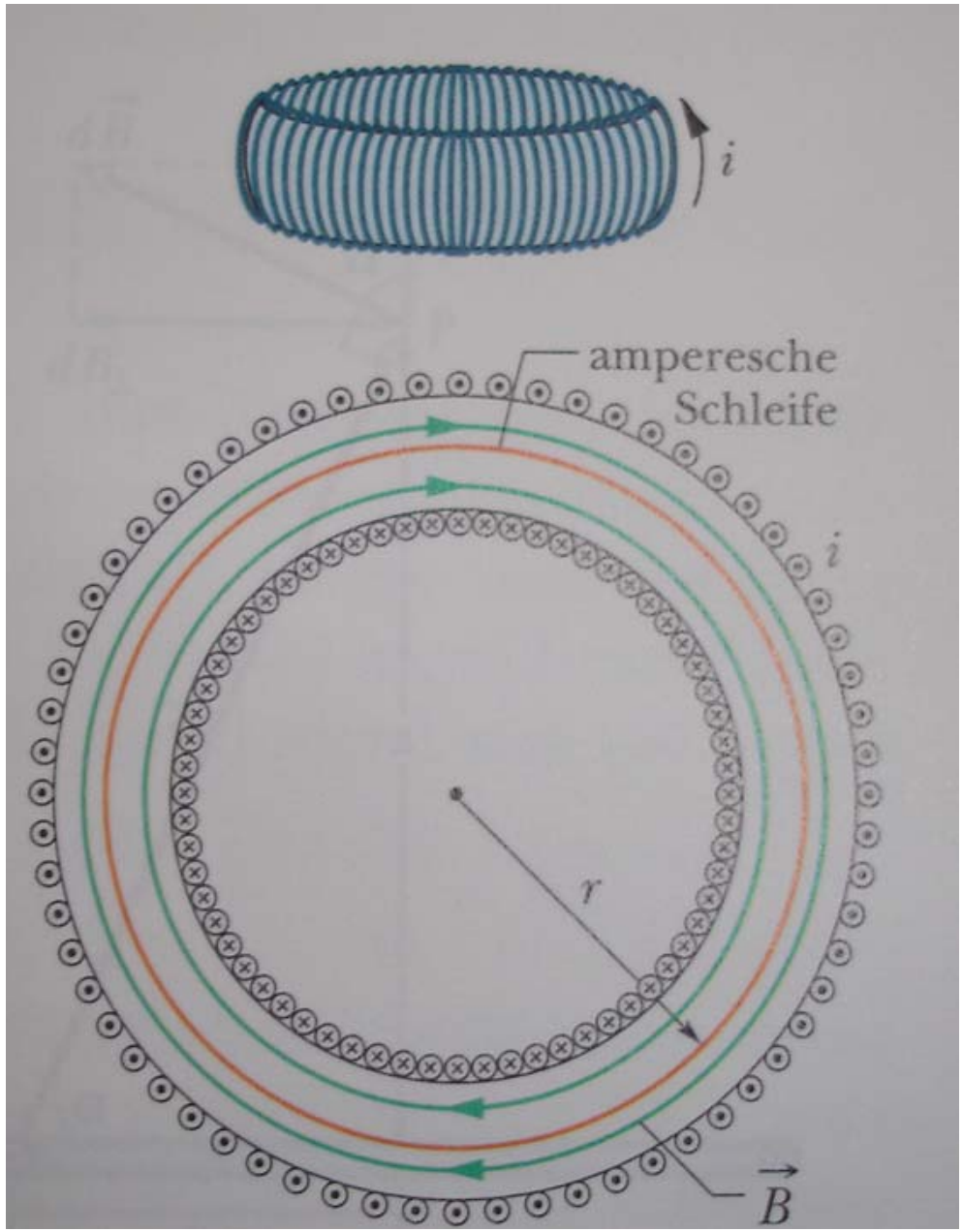






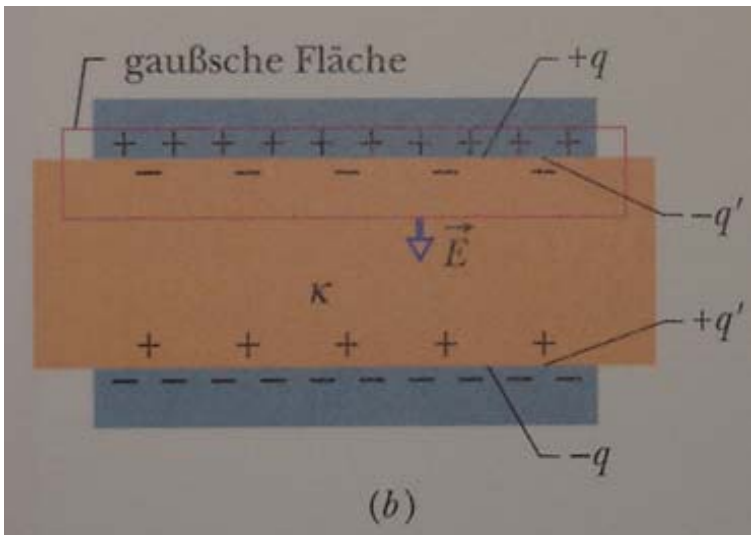
Magnetismus ←→ Spule

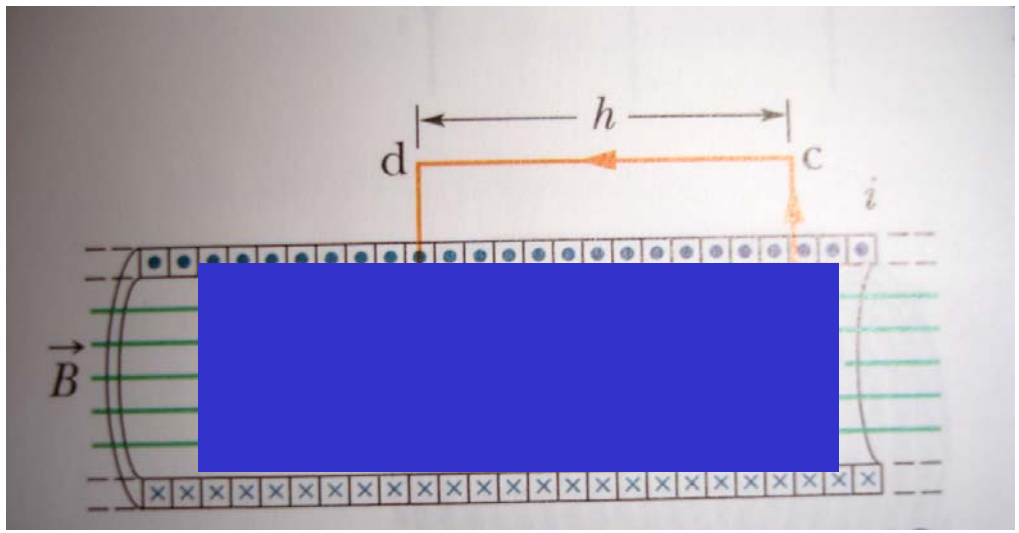




Keine Entmagnetisierugns-
Effekte !!!

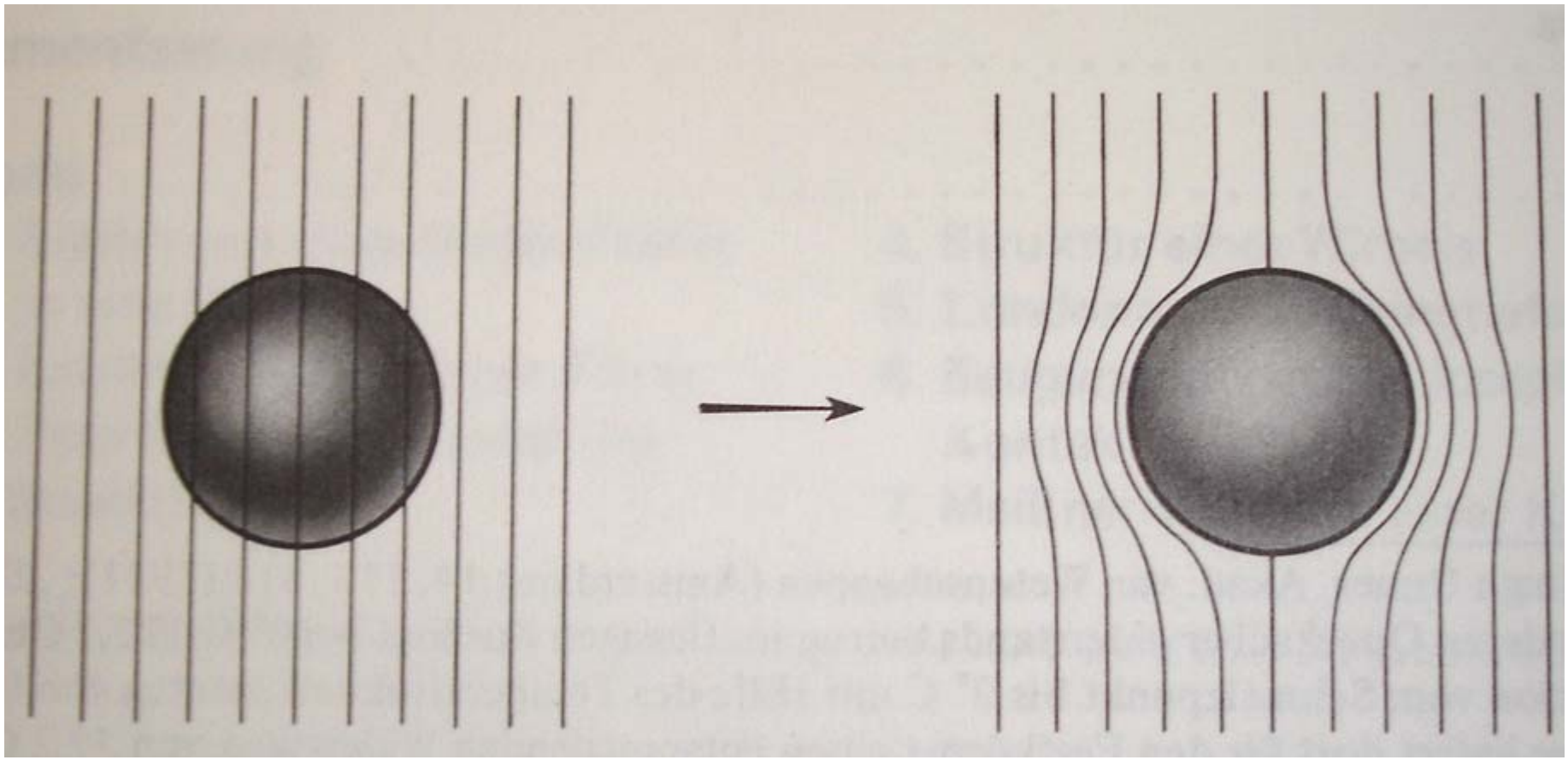
Vergleich : elektrische ←→ magnetische Polarisation





Supraleiter

Meissner-Effekt : magnetischer Fluß wird verdrängt !



13. Doppelstunde

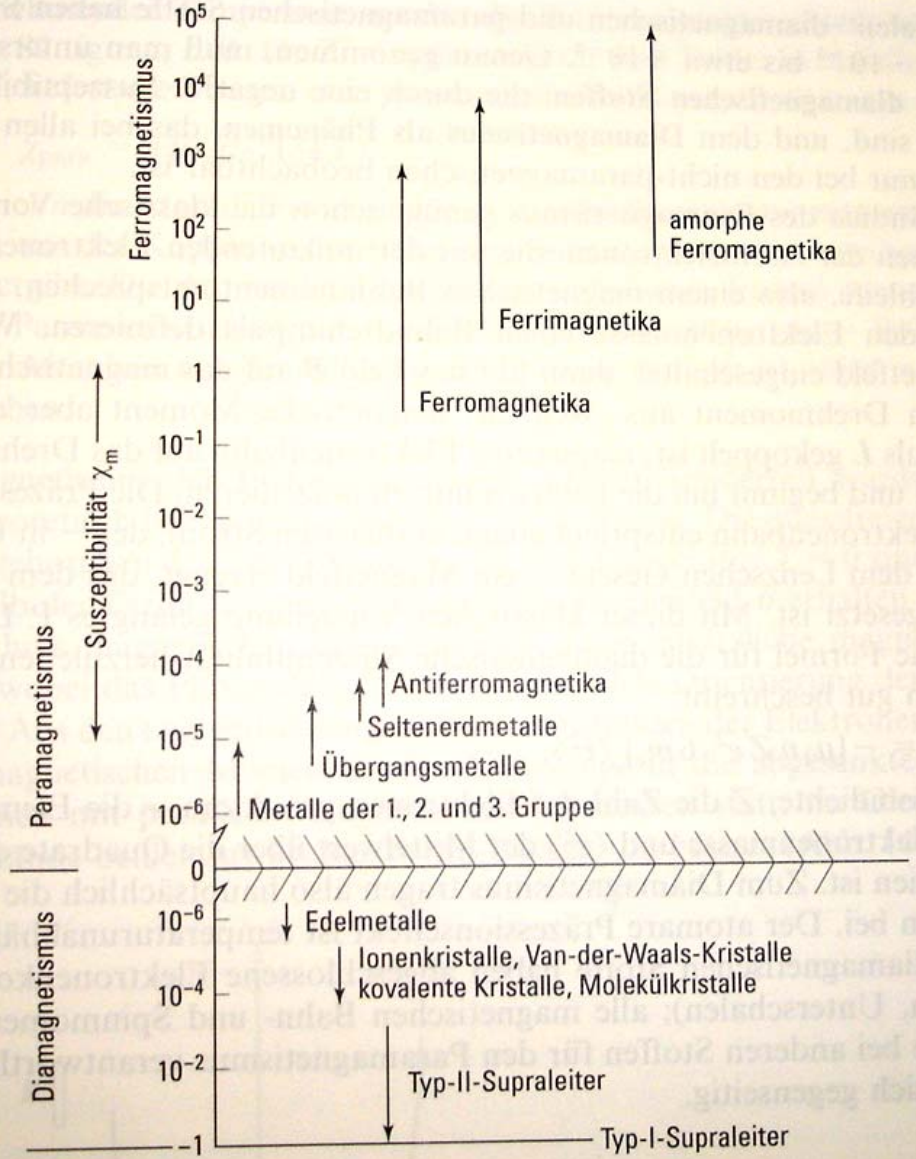
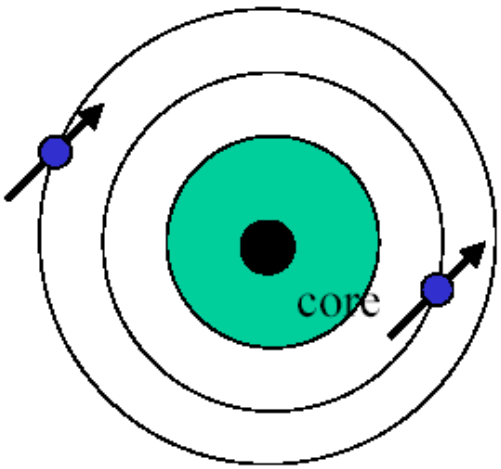


Abb. 14.5 Übersicht der magnetischen Suszeptibilitäten verschiedener Stoffklassen. Die Pfeilspitzen liegen ungefähr bei den Maximalwerten (aus Bd. 6, Kap. 8).

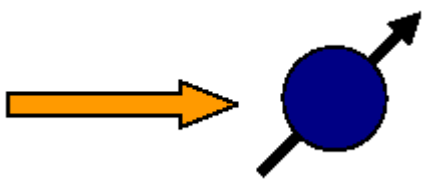
Bergmann-Schäfer

Was braucht man für eine Magnetstruktur?

(kristallinen) Festkörper mit Atomen, die permanente magnetische Momente besitzen:



Ni^{2+}



3d: Übergangsmetalle:
Cr, Mn, Fe, Co, Ni

4f: Seltene Erden:
Ce, Nd, Pr, . . . Tb, Dy, Ho, Er, Tm

5f: Aktinide: U, Np

Magnetisches Moment m (Vektor)

$\mathbf{m} = g_s\,\mathbf{S}$ (Übergangsmetall)

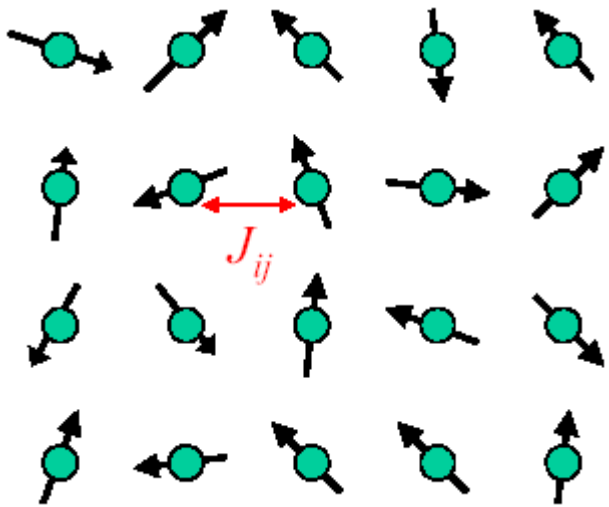
$\mathbf{m} = g_J\,\mathbf{J}$ (Selten-Erd Atom)

Was ist eine Magnetstruktur?

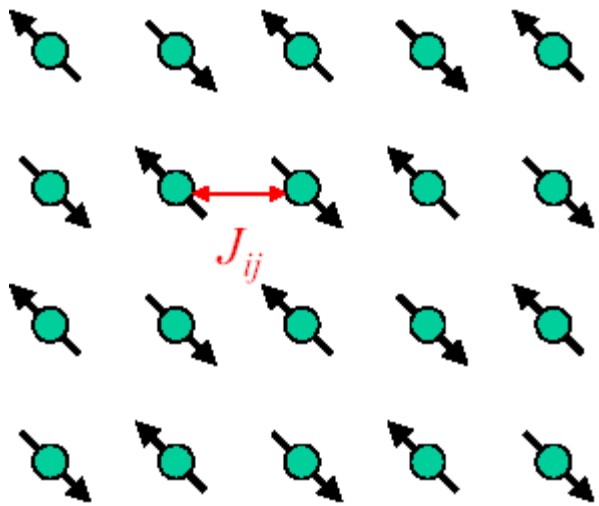
Dreidimensionale Ordnung von magnetischen Momenten unterhalb einer Ordnungstemperatur (T_o):

⇨ *magnetische Wechselwirkung J_{ij}:* $E = - J_{ij} S_i S_j$

⇨ *Phasenübergang (vgl. Kondensation)*



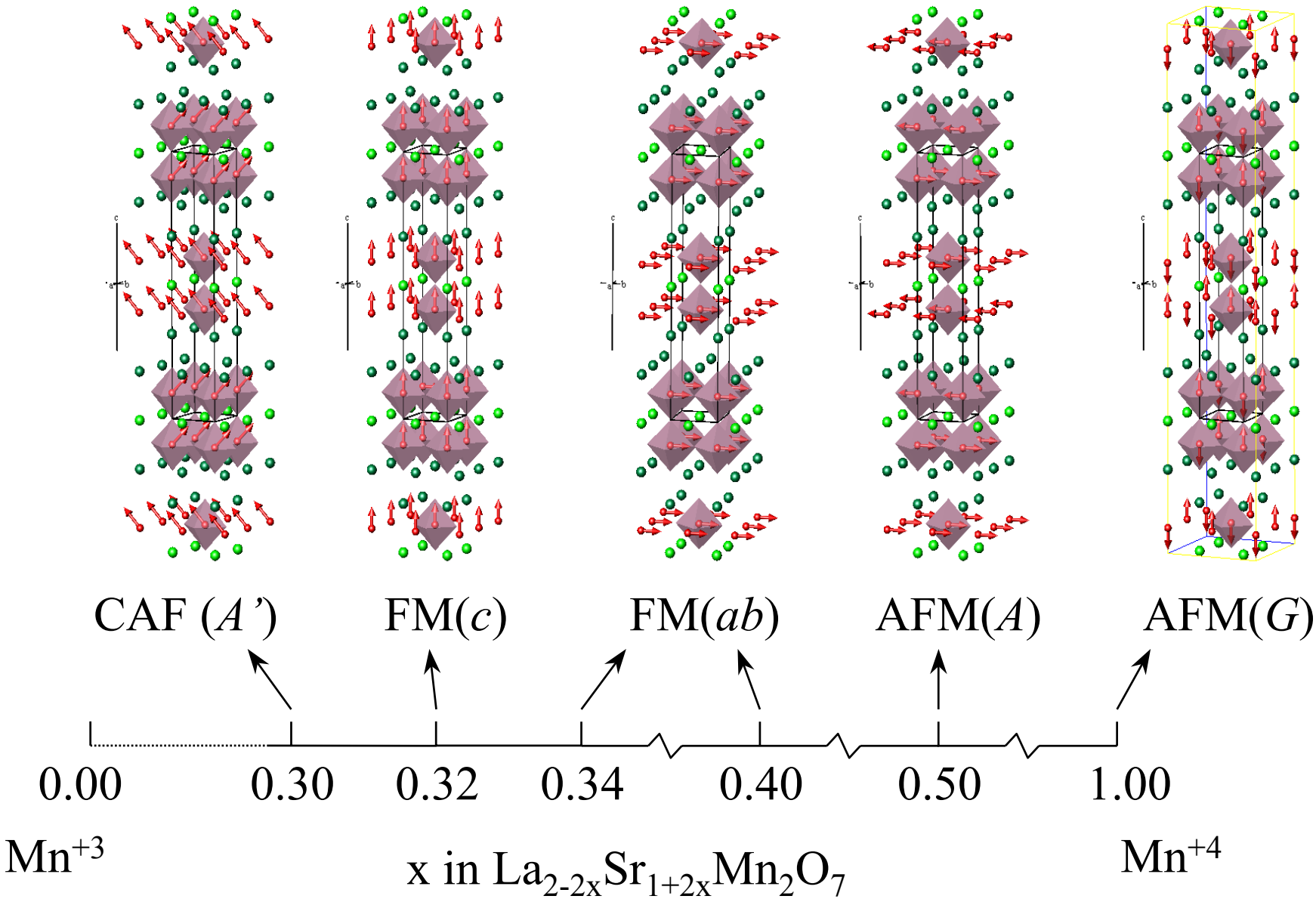
Paramagnet: $< S_i > = 0$ *für* $T > T_0$:



Antiferromagnet: $< S_i > \neq 0$ *für* $T < T_0$:

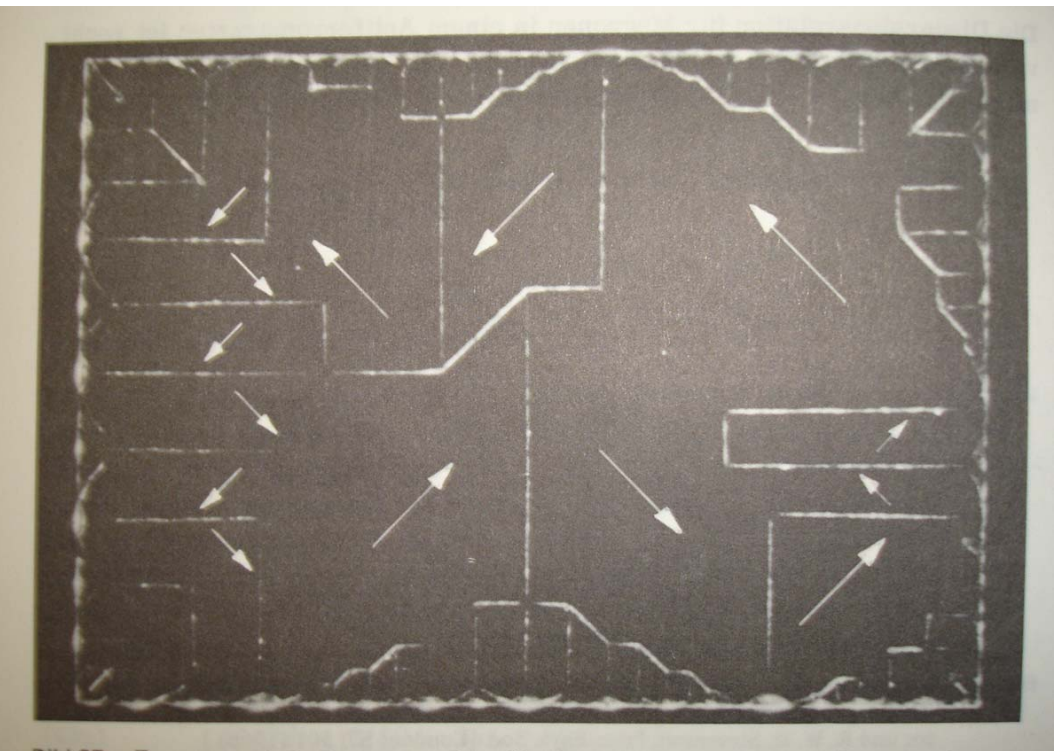
Beispiel: 3-dimensionale Magnetstrukturen

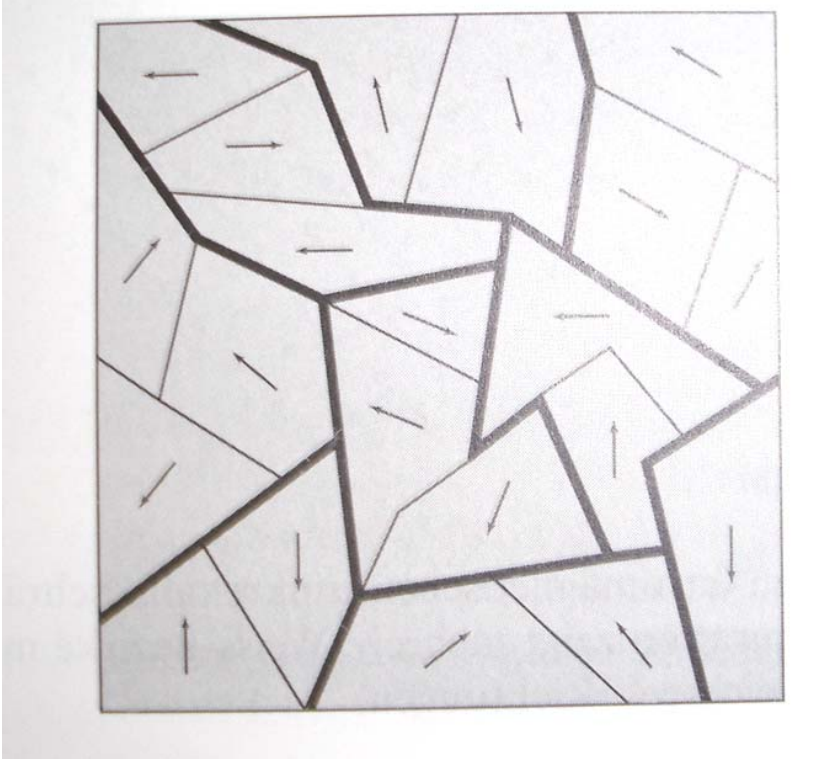
$La_{2-2x}Sr_{1+2x}Mn_2O_7$ (P. Radelli, ISIS)

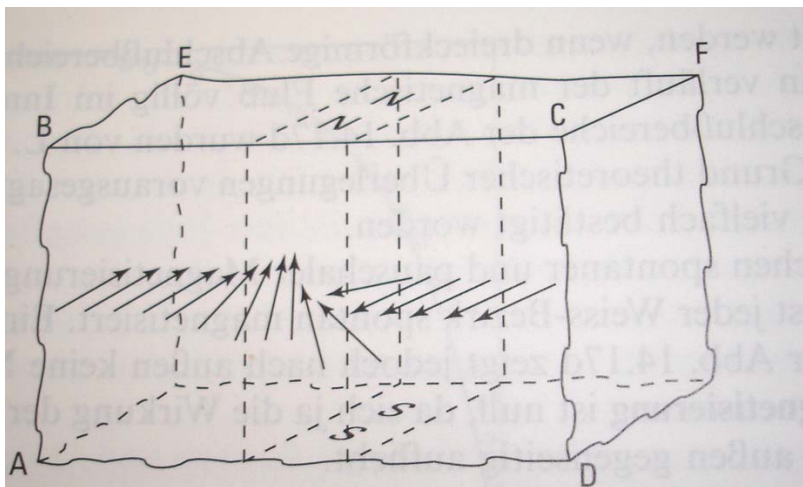


Ferromagnetische Domänen

Wände : Bloch-Wände







3 Drehung der Spinmomente in einer 180°-Wand.

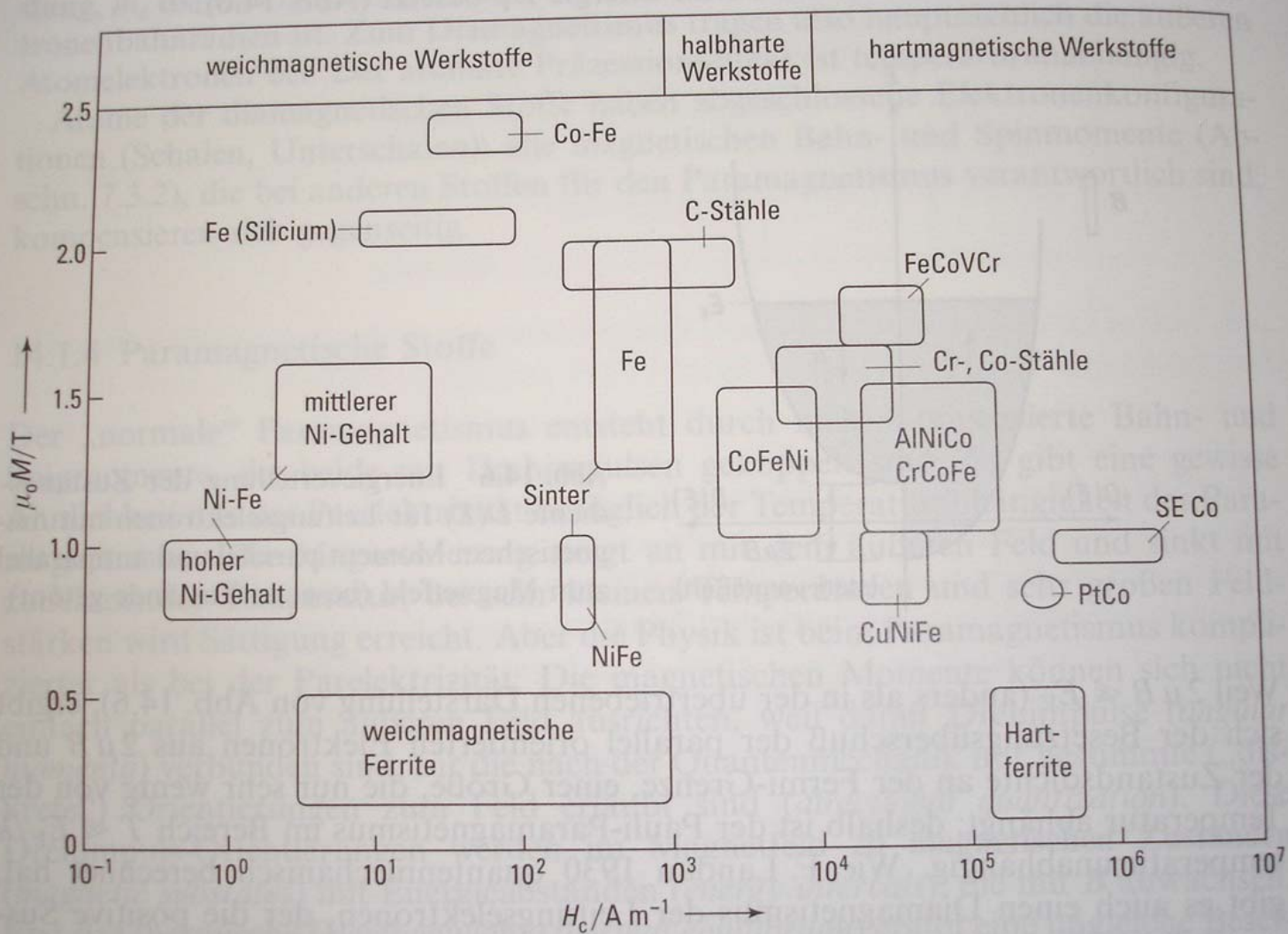


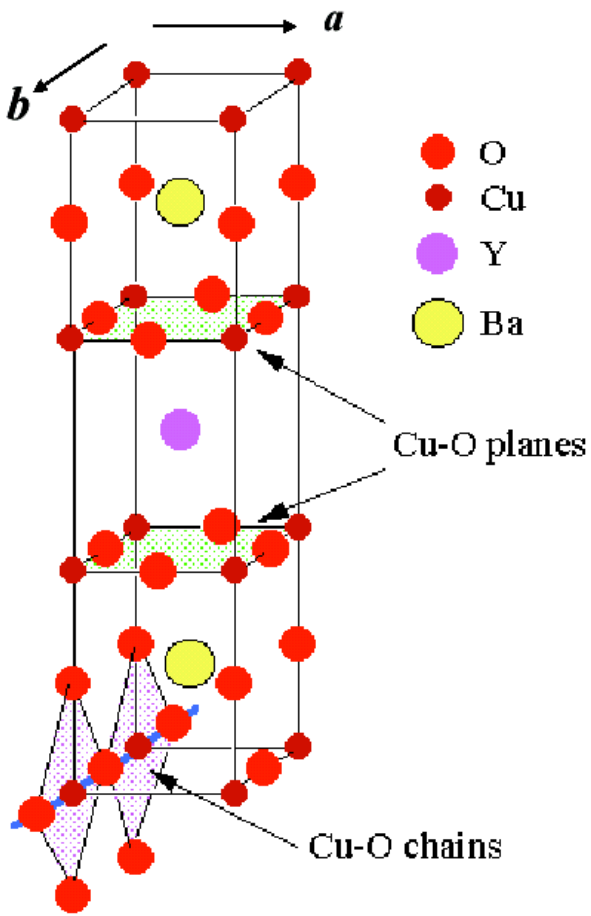
Abb. 14.7 Magnetwerkstoffe, schematisch dargestellt nach magnetischer Sättigungspolarisation und Koerzitivfeldstärke. Ebenfalls eingetragen sind die in Abschn. 14.2.7 behandelten Ferrite.

Bergmann-Schäfer

14. Doppelstunde

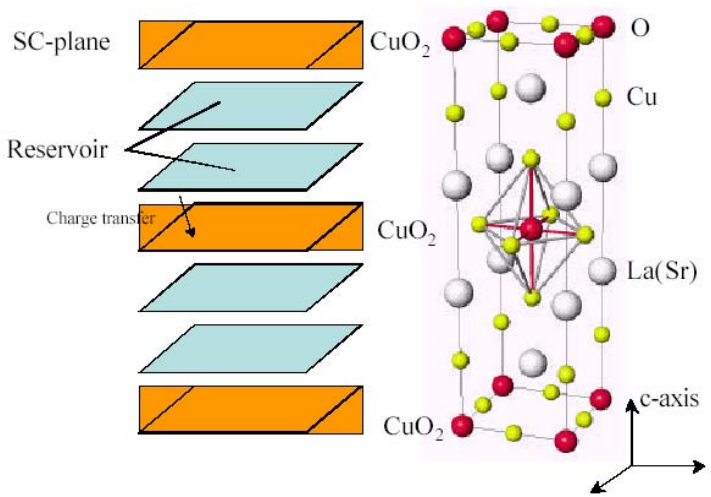
Einschub: Aktuelle Forschung I
Magnetismus in Kuprat-Supraleitern

$YBa_2Cu_3O_{6+x}$

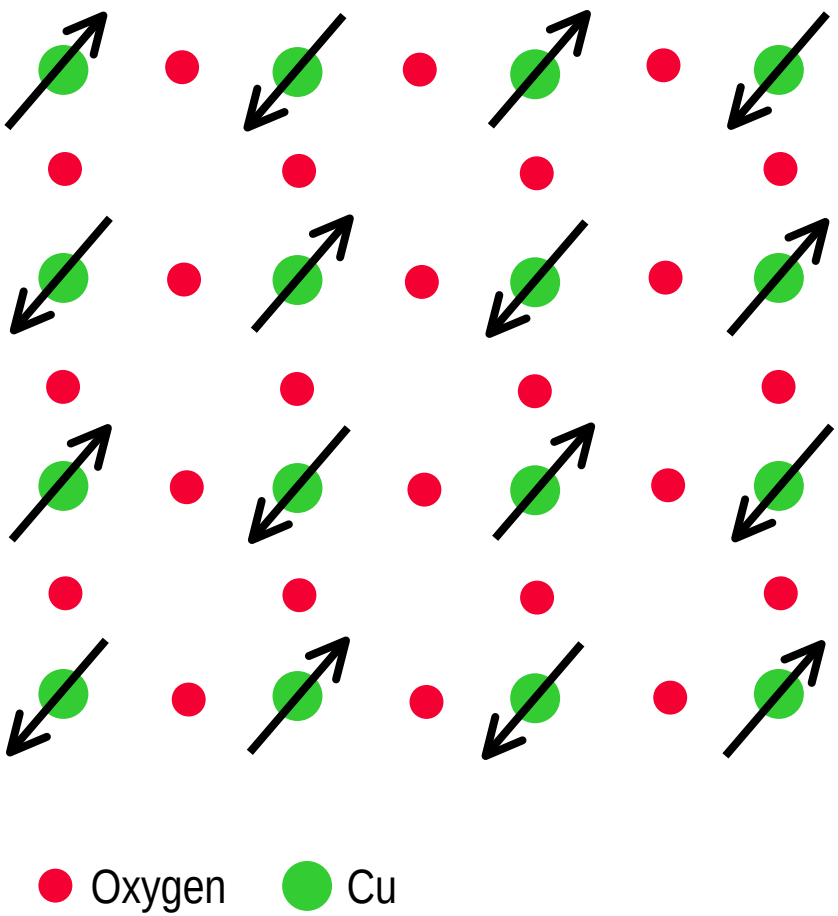


- **Quasi-2D Materialien**
- **Gestapelte CuO_2-Ebenen**
- **Getrennt durch Ladungsreservoire (kontrollieren Ladungstransfer-Mechanismus)**
- **CuO_2 – Ebenen tragen anomale physik. Eigenschaften**

$La_{2-x}Sr_xCuO_4$

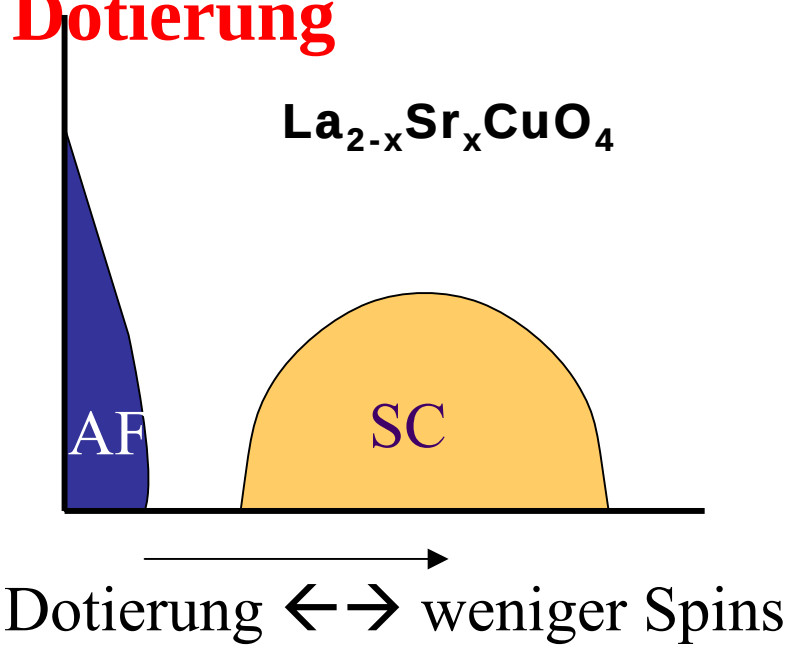


Eine CuO_2-Ebene : Antiferromagnetismus

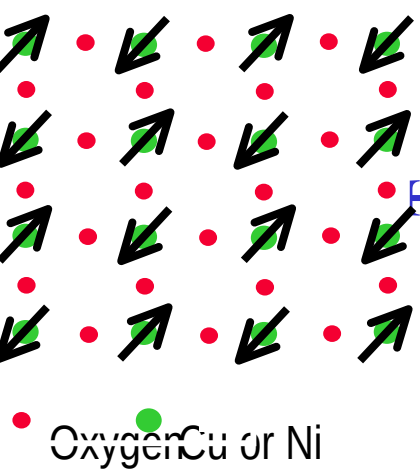


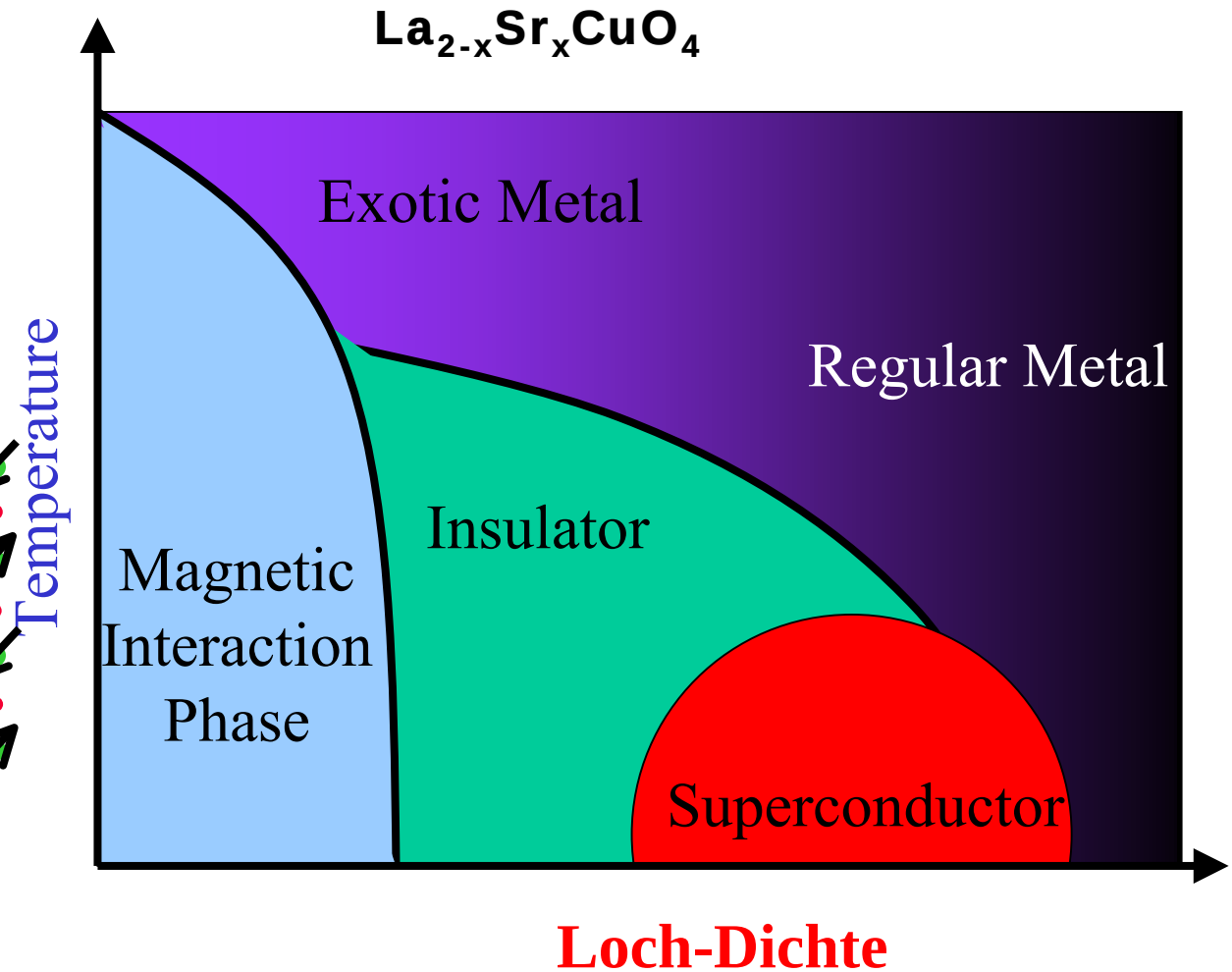
Dotierung mit Löchern
← → Entnahme von Spins

Supraleitung bei spezieller Dotierung



Generelles Phasendiagramm?





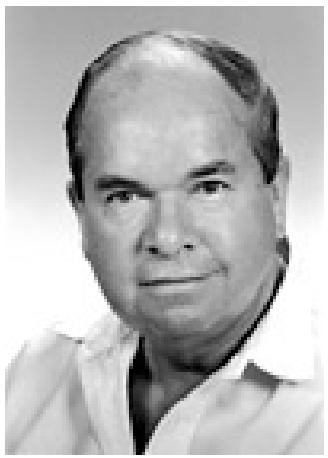
Mechanismus I ?

- magnetism !

Superconductivity in High T_c Cuprates: The Cause is No Longer A Mystery

Philip W. Anderson
Joseph Henry Laboratories of Physics
Princeton University, Princeton, NJ 08544

(2001)



Mechanismus II ?

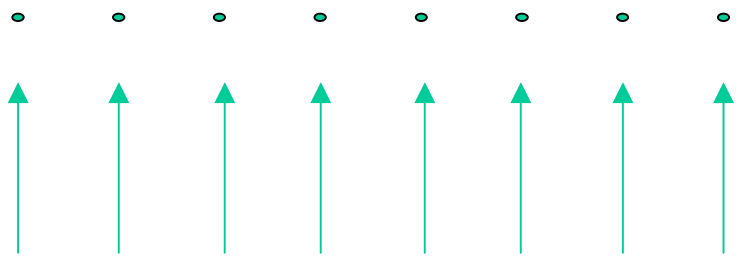
- phonons !

Theory of High-Tc Superconducting Cuprates Based on Experimental Evidence

A.A. Abrikosov
Materials Science Division, Argonne National Laboratory
9700 South Cass Avenue, Argonne, Illinois 60439, USA
(January 8, 2004)

magnetische Spinwellen ←→ Gitterschwingungen

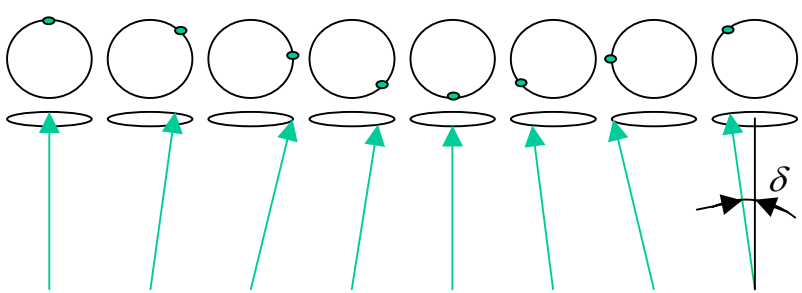
T = 0: Ausrichtung der Spins entlang der Quantisierungsachse (bzw. Nullpunktsbewegung)



N Ionen in linearer Kette
Richtungsquantelung:
Gesamtspin in einer Richtung N/2, N/2-1, ..., -N/2

$$U_{\min} = -N2JS^2$$

T > 0: Abweichungen der Spins von der Quantisierungsachse, propagierende Spinwelle



diskrete Werte für Winkel δ: $SN\cos\delta = SN - n$

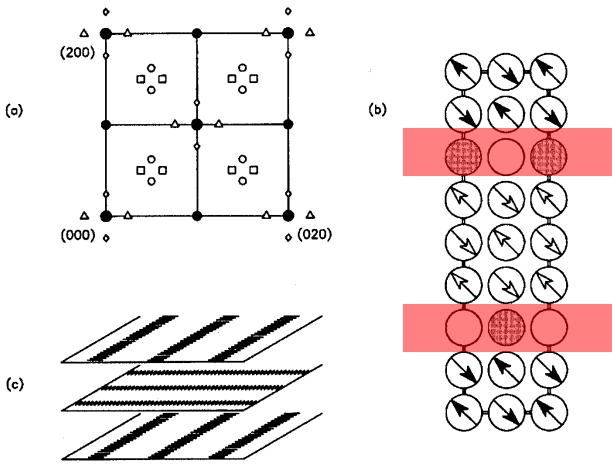
$n = 1,2,...$

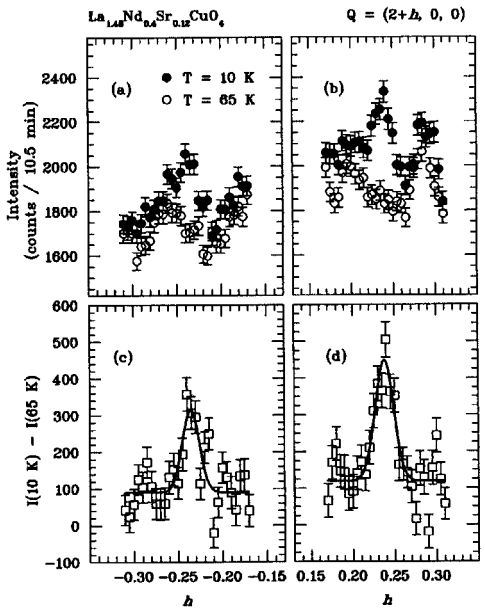
$$\frac{\delta^2}{2} = \frac{n}{SN}$$

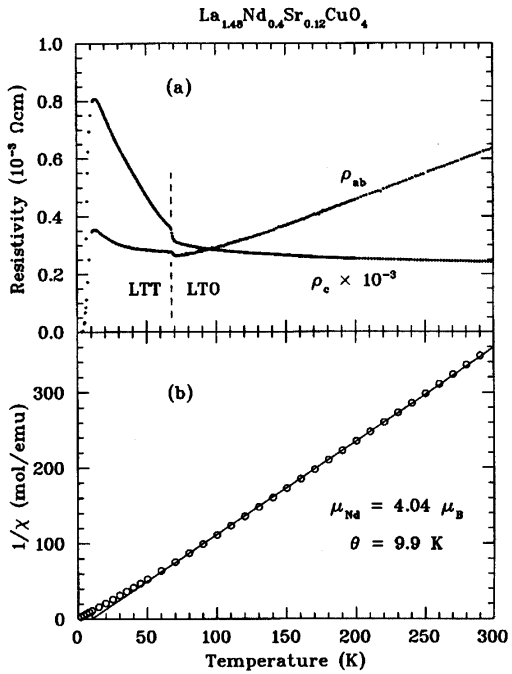
Streifen-Phasen

Streifenordnung in $La_{1.48}Nd_{0.4}Sr_{0.12}CuO_4$

J. Tranquada et al., nature (1995).







Widerstand :
Halbleitende Charakteristik

Streifenordnung : mikroskopische Ordnung

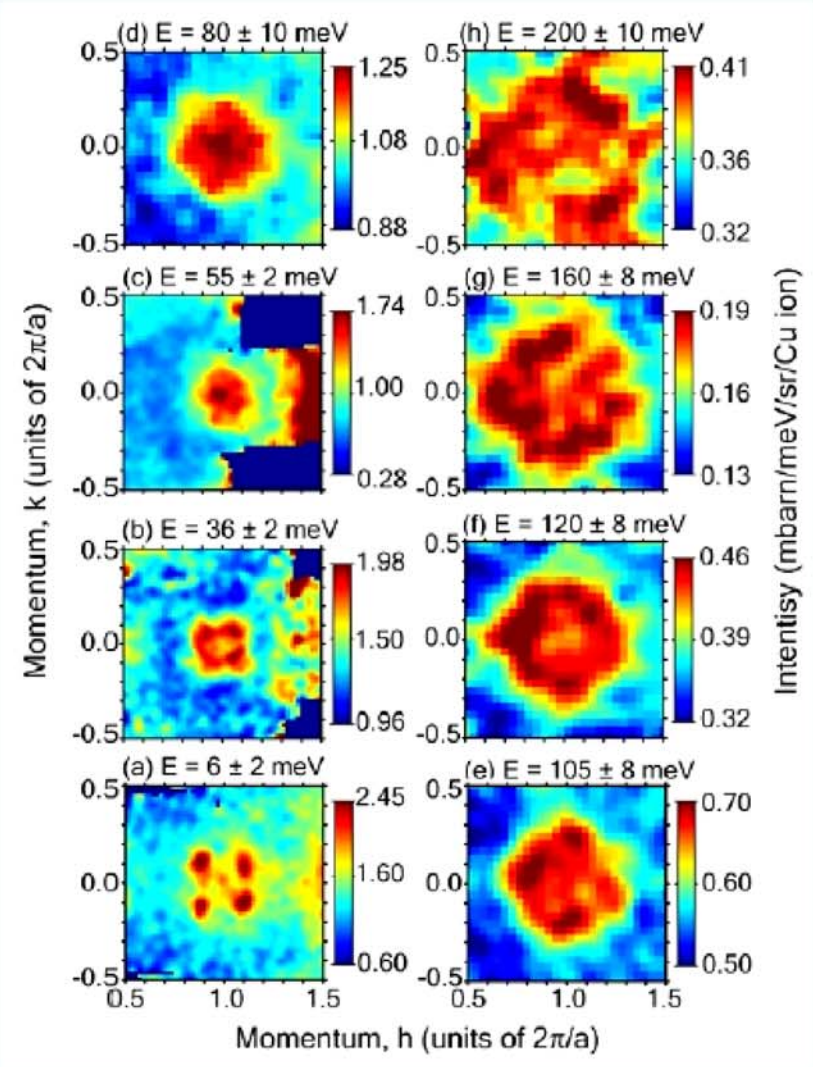
Ladungen ordnen sich in Streifen Cu^{2+} / Cu^{3+}

➔AF-Ordnung dazwischen wiederhergestellt

Relevanz für die Supraleitung ? ? ?

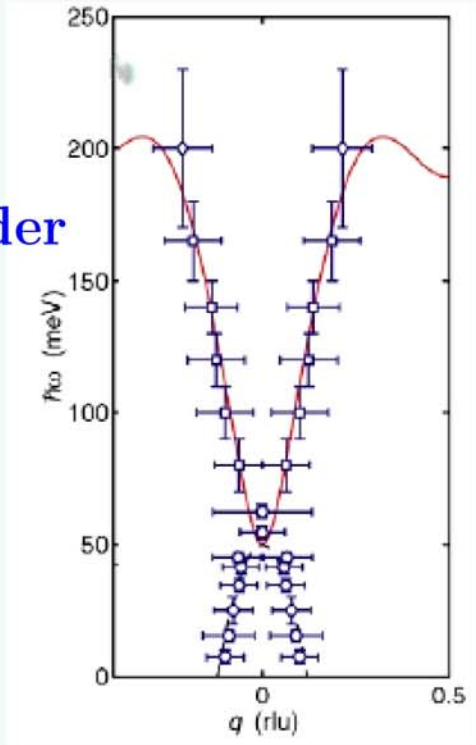
Magnetische Anregungen erklärbar im Streifen-Bild

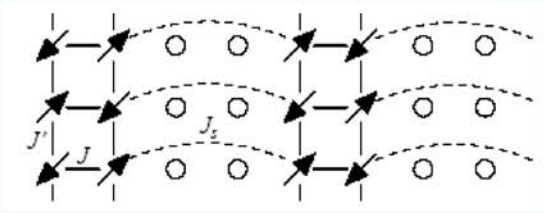
Non-superconducting



Tranquada et al, Nature, 429 534 (2004).

Two-leg spin ladder



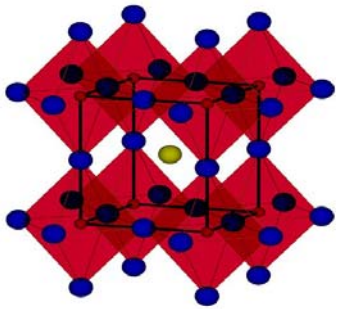


Bond-centered stripes

Vojta et al, Uhrig et al, Seibold et al

PRL 2004-2005

Einschub: Aktuelle Forschung II
Kolossaler Magnetwiderstand in Manganaten



$La_{1-x}Ca_xMnO_3$

$La_{1-x}Sr_xMnO_3$

$La_{1-x}Ba_xMnO_3$

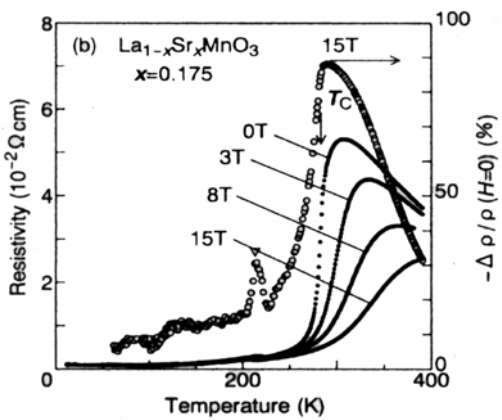
$La_{1-x}Pb_xMnO_3$

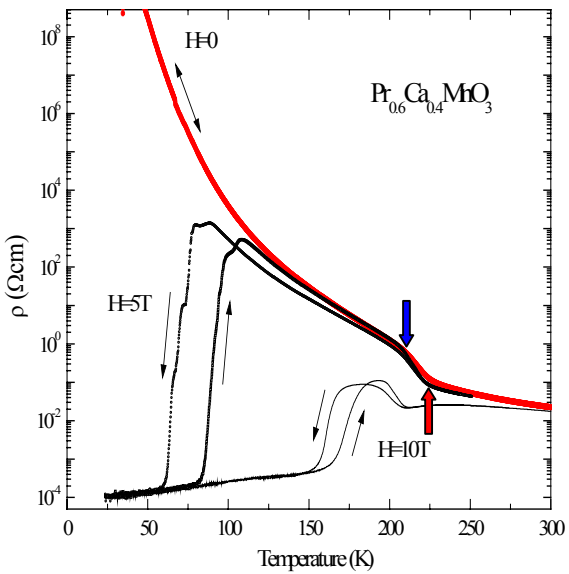
$Nd_{1-x}Sr_xMnO_3$

$Pr_{1-x}Sr_xMnO_3$

$Pr_{1-x}Ca_xMnO_3$

$La_{1-x}Sr_{1+x}MnO_4$





$$MR = -\frac{R(H) - R(0)}{R(H)} = -\frac{\Delta R}{R(H)}$$

Collossal Magneto Resistivity – CMR Was ist das?

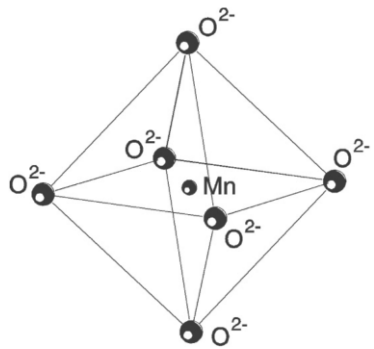
- Messung des elektrischen Widerstandes am Kristall für verschiedene äußere Magnetfelder und Temperaturen
- CMR: Starke Abnahme des elektrischen Widerstandes bei Erhöhung des äußeren Magnetfeldes
- Entdeckt in den 50er Jahren von Jonker und van Santen, aber Tragweite nicht erkannt.
- Starke Forschungsaktivität erst seit den Arbeiten von Kusters (1989) und von Helmholt (1993)

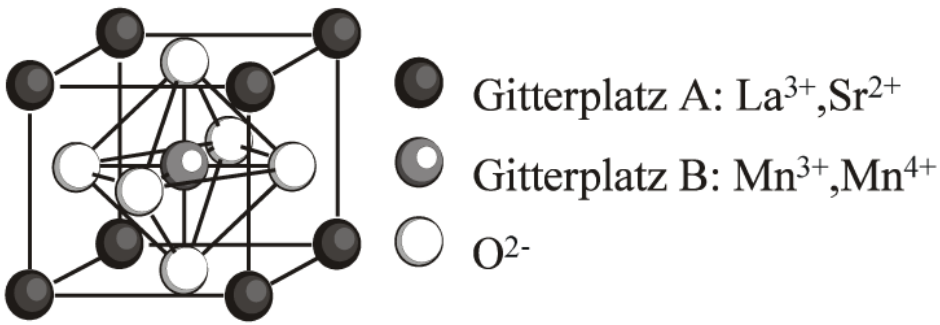
CMR – Wofür ist das gut?

- Anwendung: Magnetfeldsonden, Lesen von Daten-Speichern (Festplatten)
- Probleme bei technischer Umsetzung: Effekt tritt nur in einem kleinen Intervall nahe der Curietemperatur auf, außerdem werden große Magnetfelder benötigt.

Perowskit-Struktur

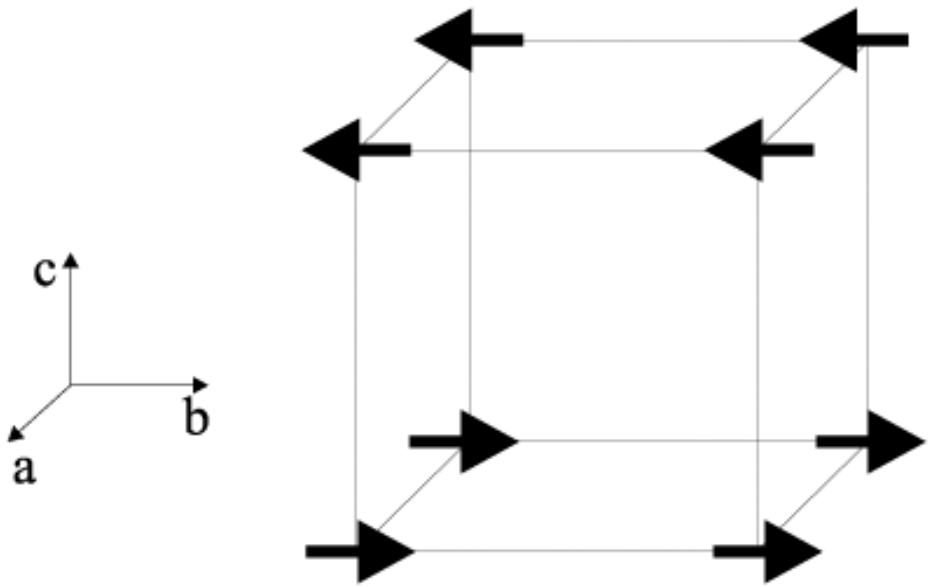
Manganate kristallisieren in der Perowskit-Struktur:





Magnetische Struktur von $LaMnO_3$

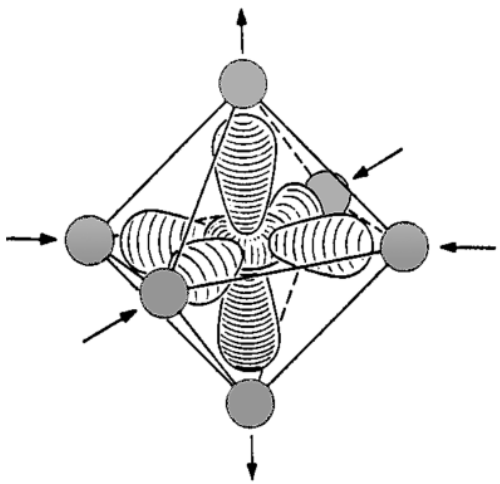
$LaMnO_3$ ist ein Antiferromagnet und Isolator

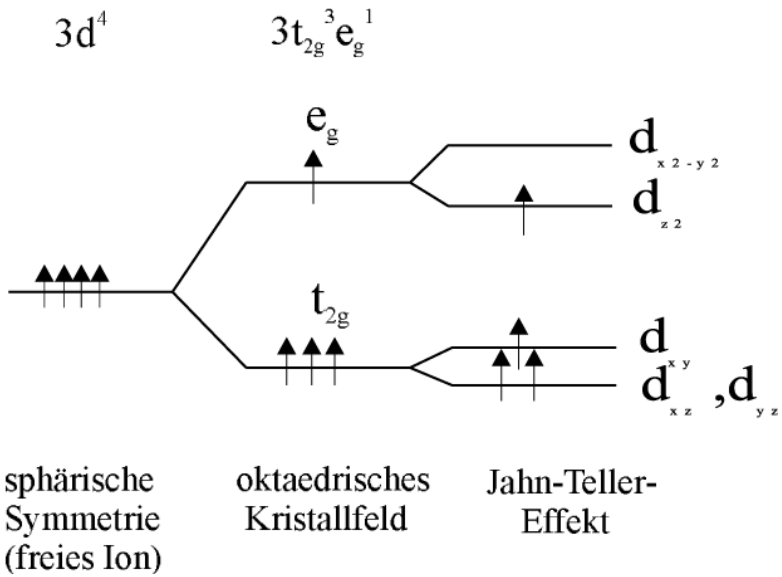


Wollan et. al. 1955

Elektronische Struktur

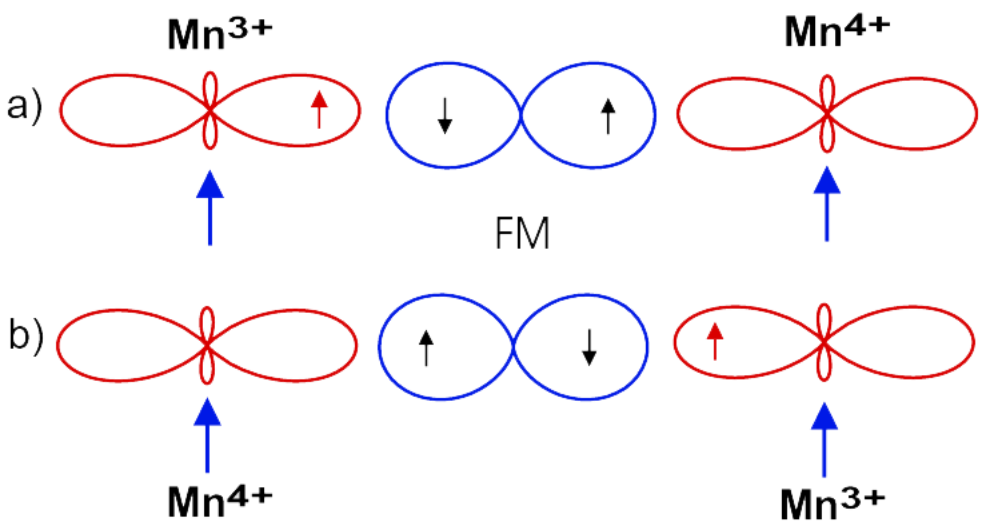
Elektronen in Manganaten besetzen bestimmte Orbitale





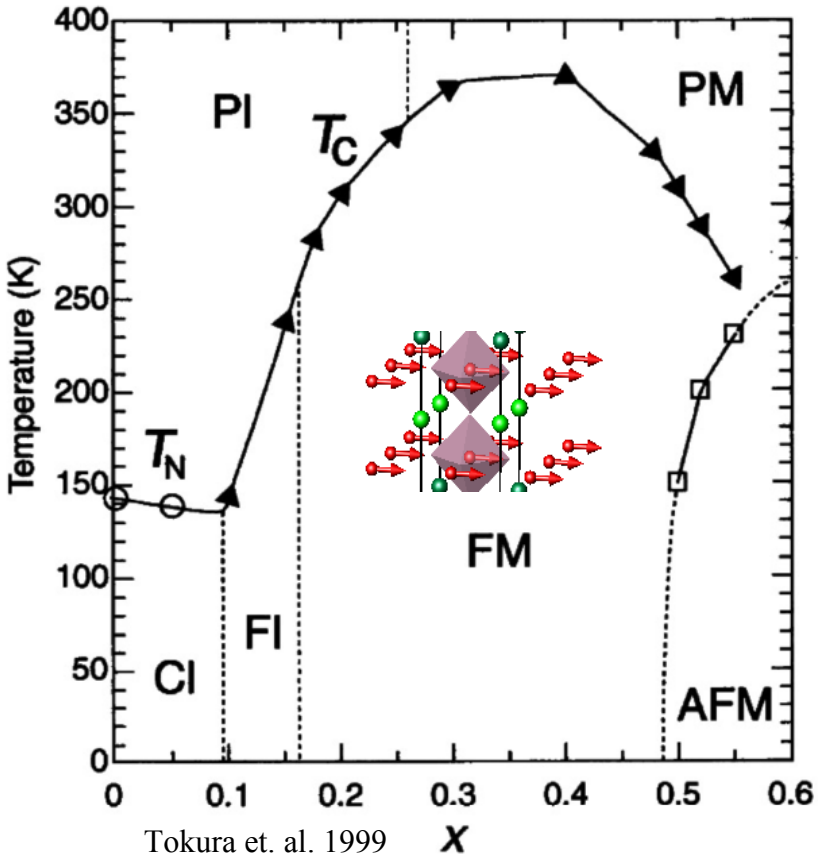
Atomphysik : elektronische Struktur

Doppelaustausch



Gute elektrische Leitfähigkeit geht einher mit ferromagnetischer Spinordnung ! ! !

Phasendiagramm für $La_{1-x}Sr_xMnO_3$



Tokura et. al. 1999

Mit der Dotierung kommen Ladungsträger (Löcher) in das Gitter.

Tendenz zum ➔ Ferromagneten

➔Geringer Widerstand

➔Magnetfeld stabilisiert ferromagnetische Ordnung

➔Aber unzureichend ! ! !

Halb-Dotierte Manganate (x=0.5)

Ladungs-Ordnung

Commensurable ratio Mn^{3+}:Mn^{4+} = 1:1 ⇒ **Schachbrettordnung**

Orbitale Ordnung

Mn^{3+}-occupation coupled to orbital degree of freedom

⇒ **Orbitale Ordnung von e_g-Elektronen**

Magnetische Ordnung

Orbital occupation closely connected to magnetism

⇒ **CE-Typ Magnetismus**

CE-type Ordnung tritt in allen Manganaten auf

Perovskite-Manganites:

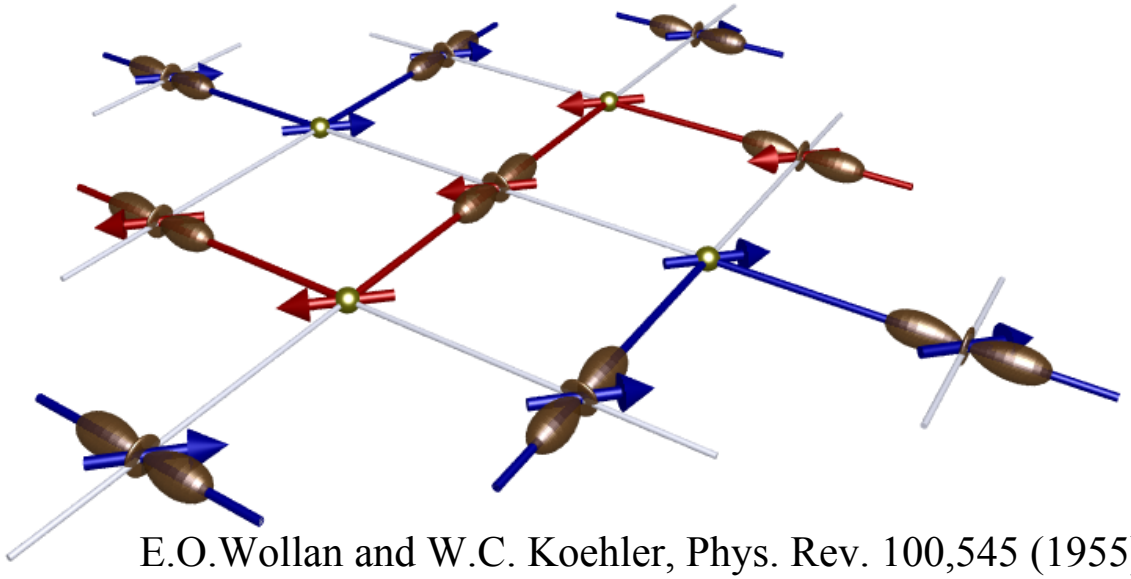
$La_{1/2}Ca_{1/2}MnO_3$,
$Nd_{1/2}Sr_{1/2}MnO_3$,
$Pr_{1/2}Ca_{1/2}MnO_3$,...

Single-Layered :

$La_{1/2}Sr_{3/2}MnO_4$

Double-Layere :

$LaSr_2Mn_2O_7$?



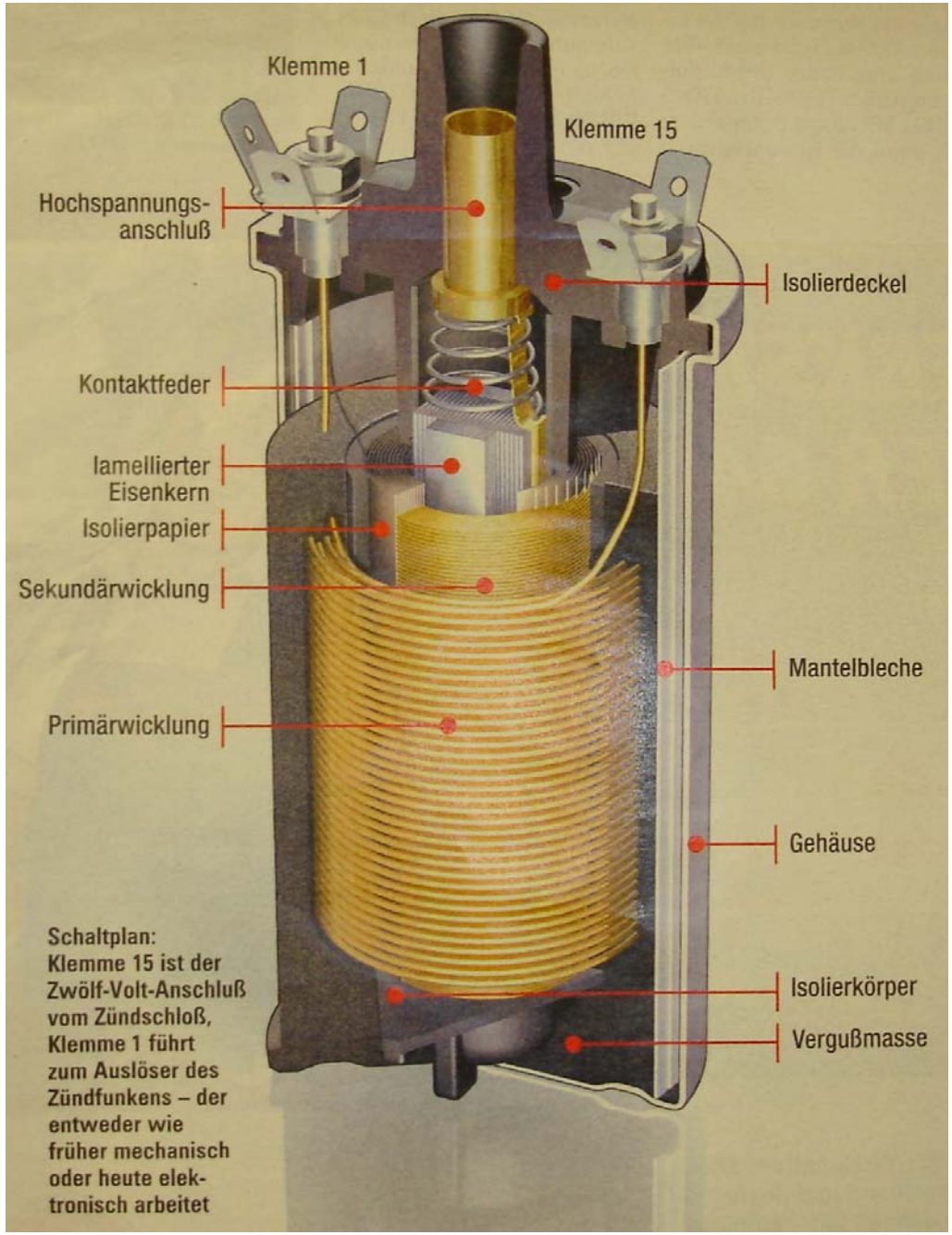
E.O.Wollan and W.C. Koehler, Phys. Rev. 100,545 (1955).
J.B. Goodenough, Phys. Rev. 100, 564 (1955)

Clerk Maxwell, James (1831–1879). Ab

15. Doppelstunde

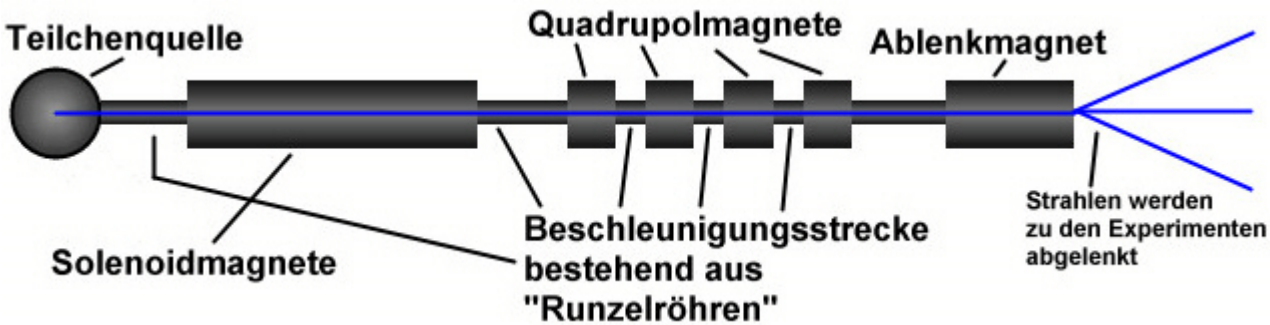
Beschleuniger
Spannungserzeugung durch Induktion

Zündspule

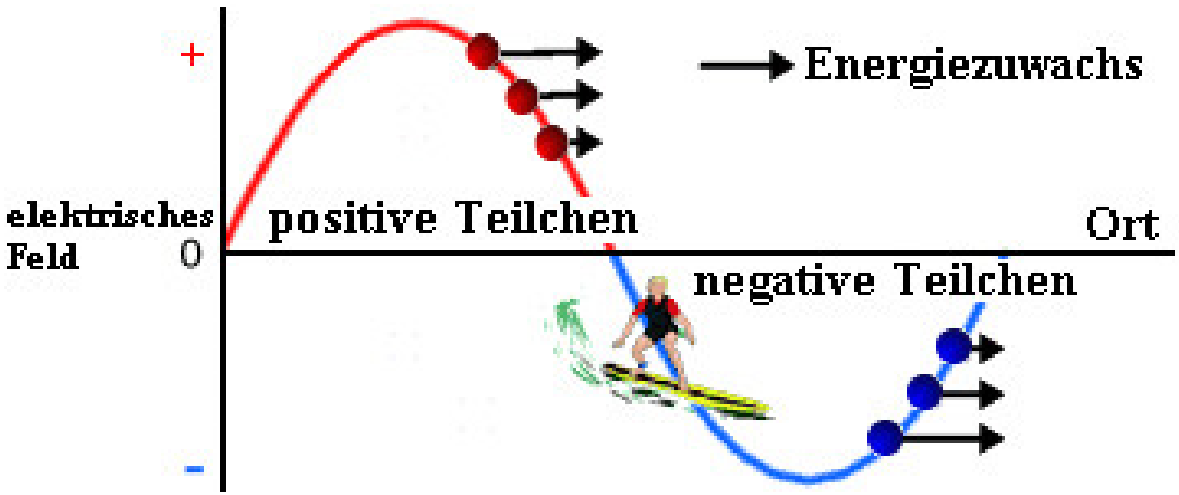


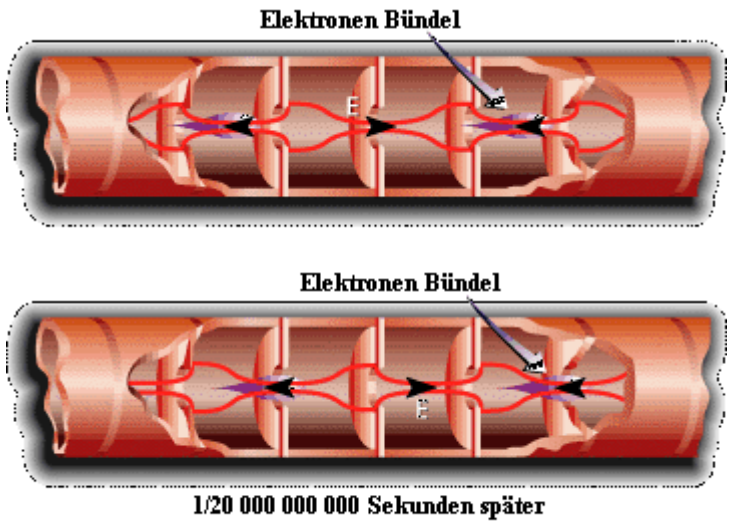
Schaltplan:
Klemme 15 ist der Zwölf-Volt-Anschluß vom Zündschloß, Klemme 1 führt zum Auslöser des Zündfunkens – der entweder wie früher mechanisch oder heute elektronisch arbeitet

Linearbeschleuniger LINAC



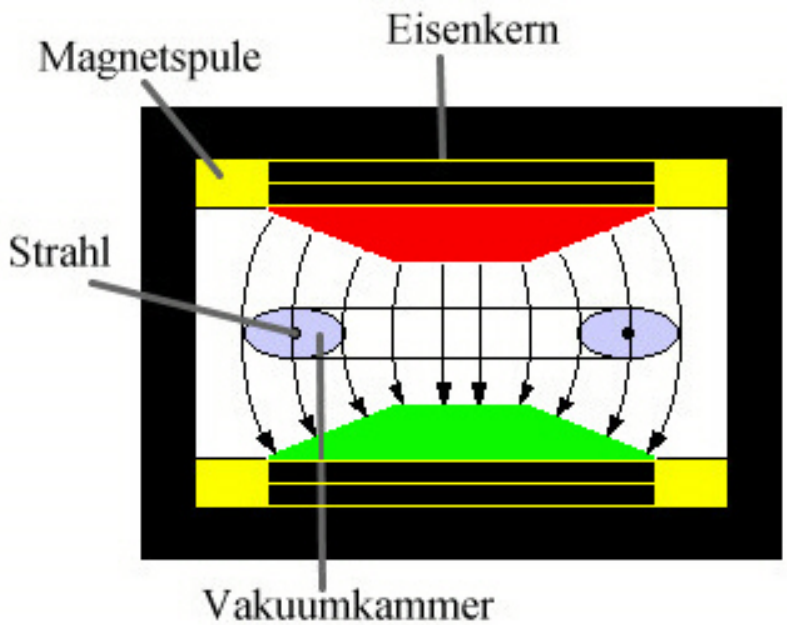
Beschleunigung mit elektromagnetischen Wellen





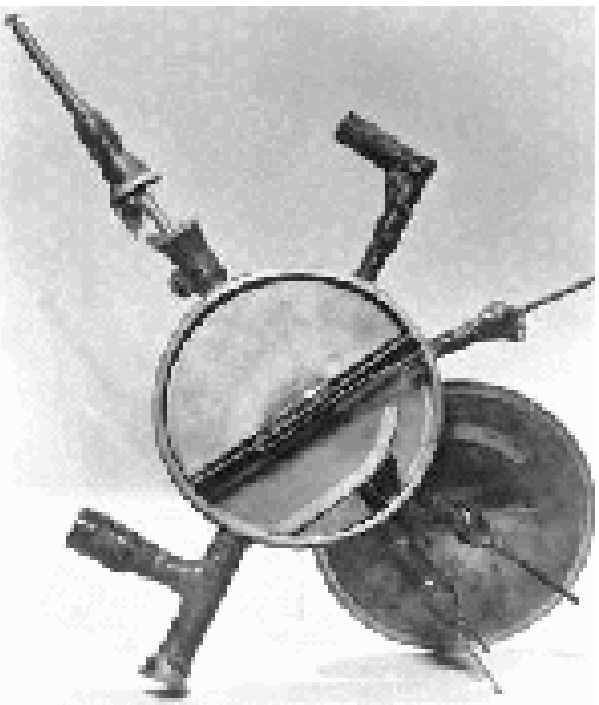
Runzelröhre

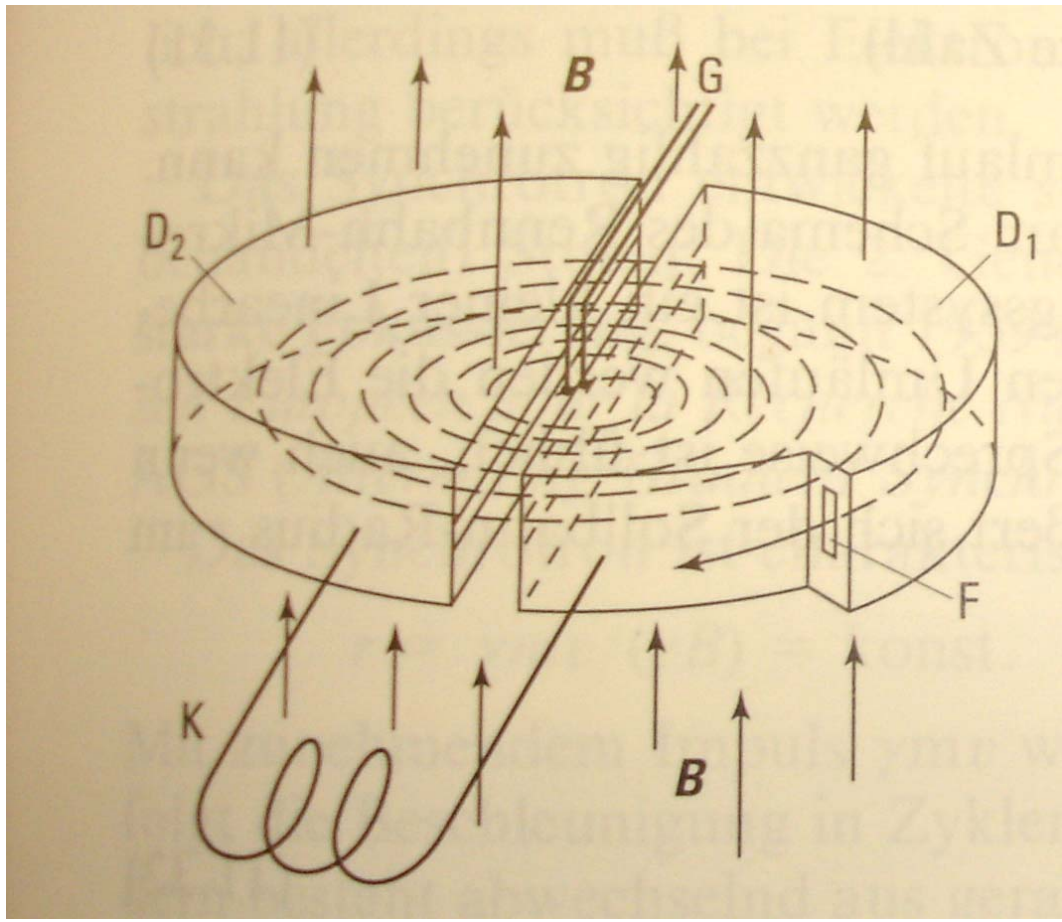
Kreisbeschleuniger : Betatron



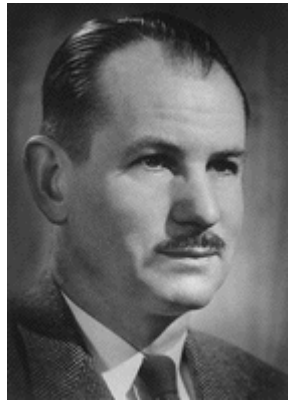
Kreisbeschleuniger Zyklotron

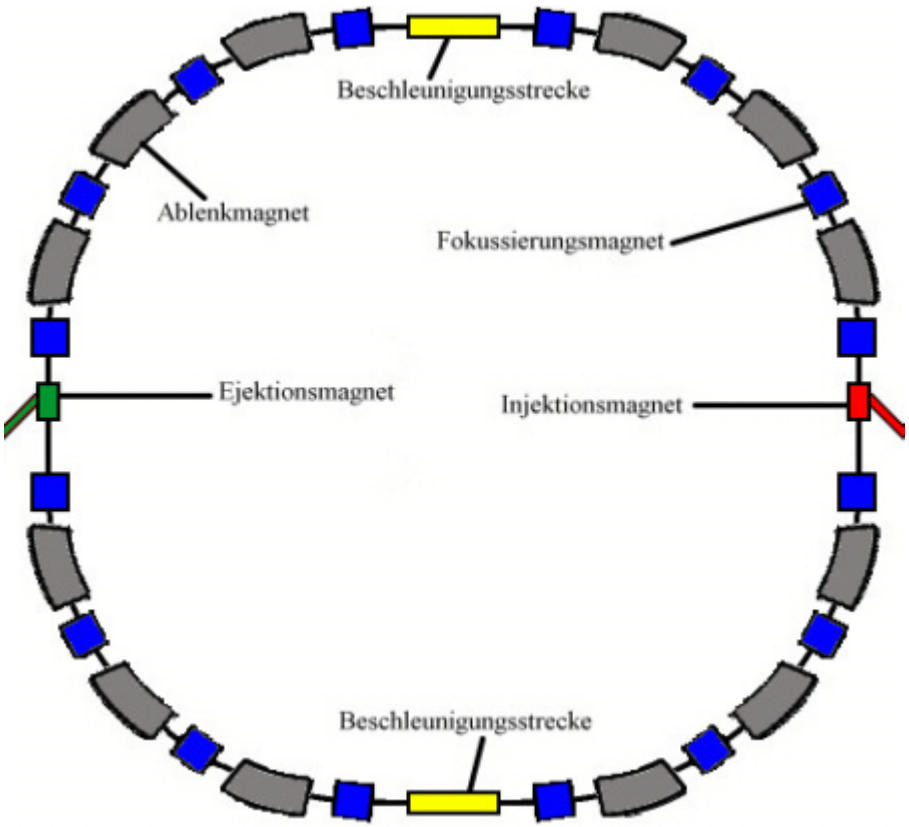
Lawrence ~1930





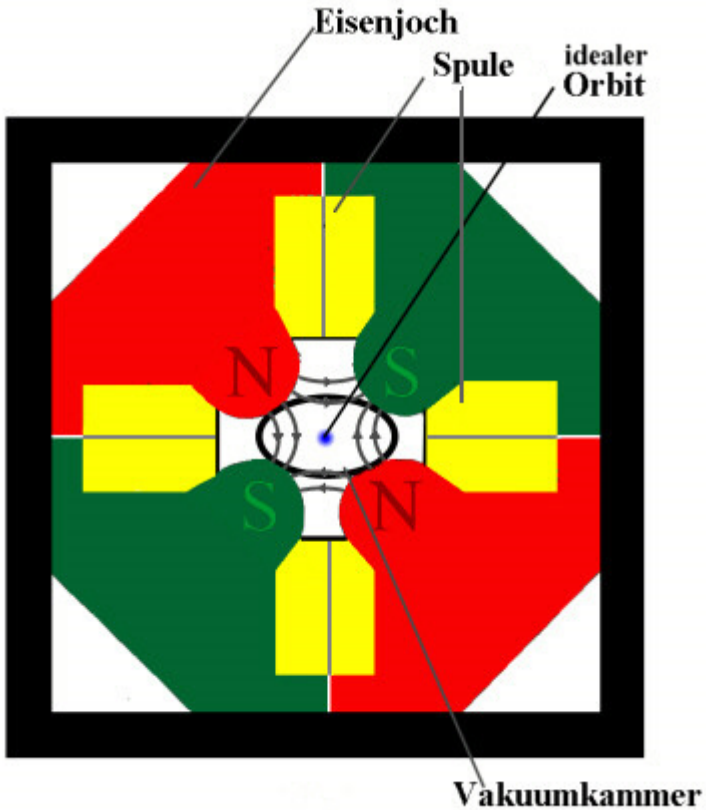
Kreisbeschleuniger : Synchrotron

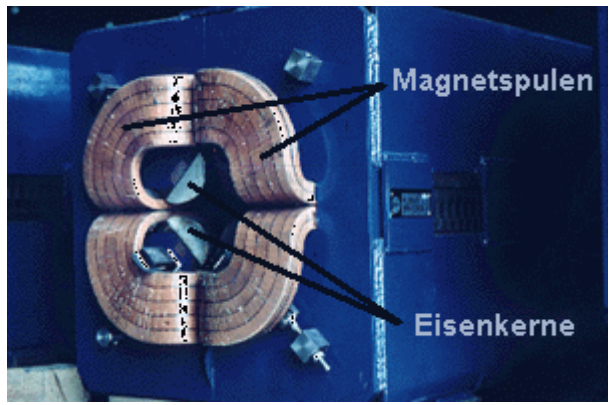




McMillan baute 1945 das erste 320-MeV-Elektronen-Synchrotron an der Universität von Kalifornien. Ab dem Ende der 50er Jahre wurden eine ganze Reihe von Synchrotrons weltweit errichtet.

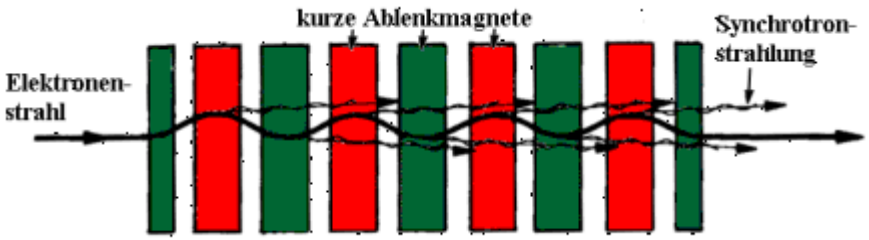
Quadrupol-Magnete zur Fokussierung des Strahls



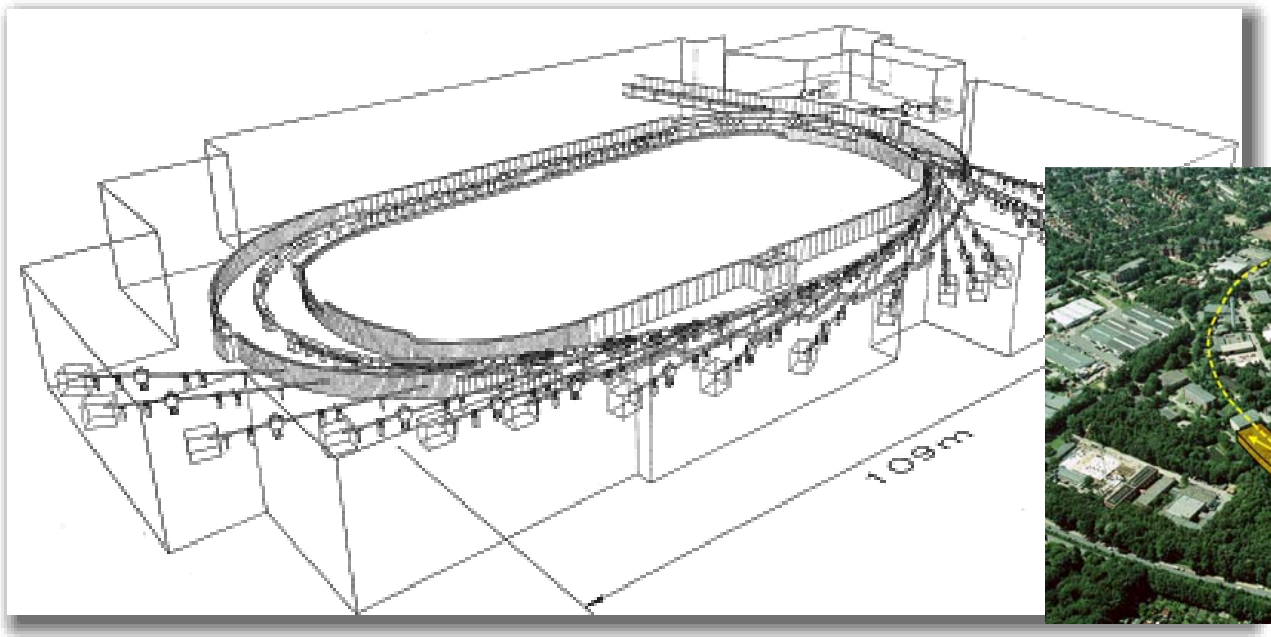


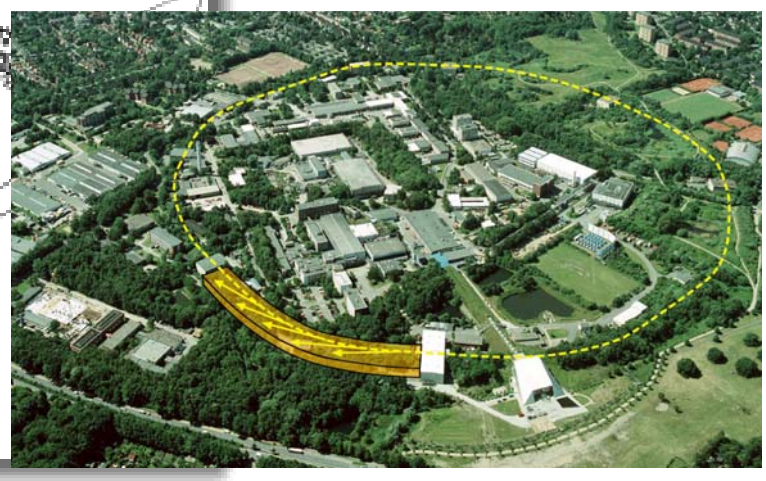
Synchrotron-Strahlung bei Ablenkung

Wiggler-Magnet

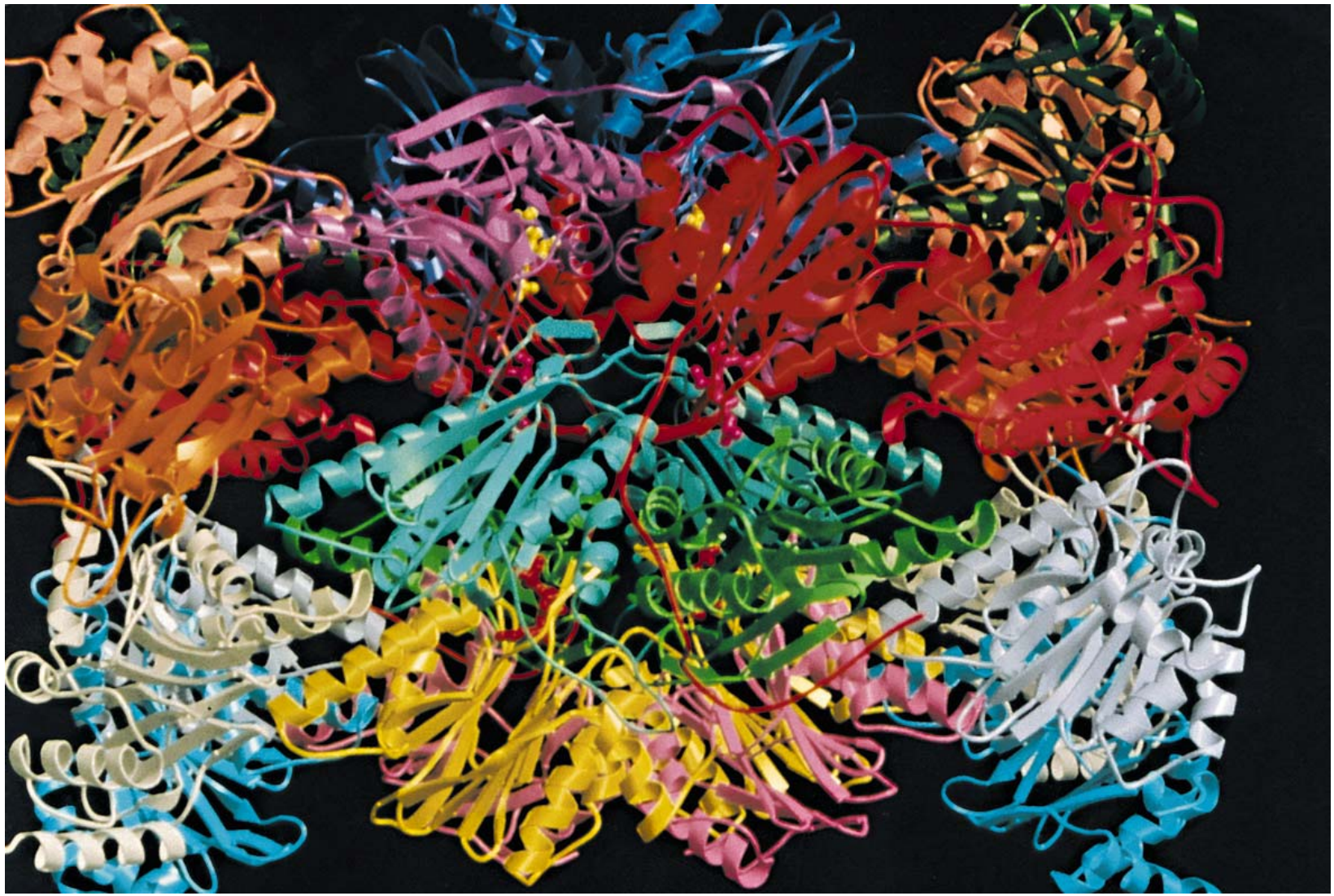


HASYLAB Hamburg

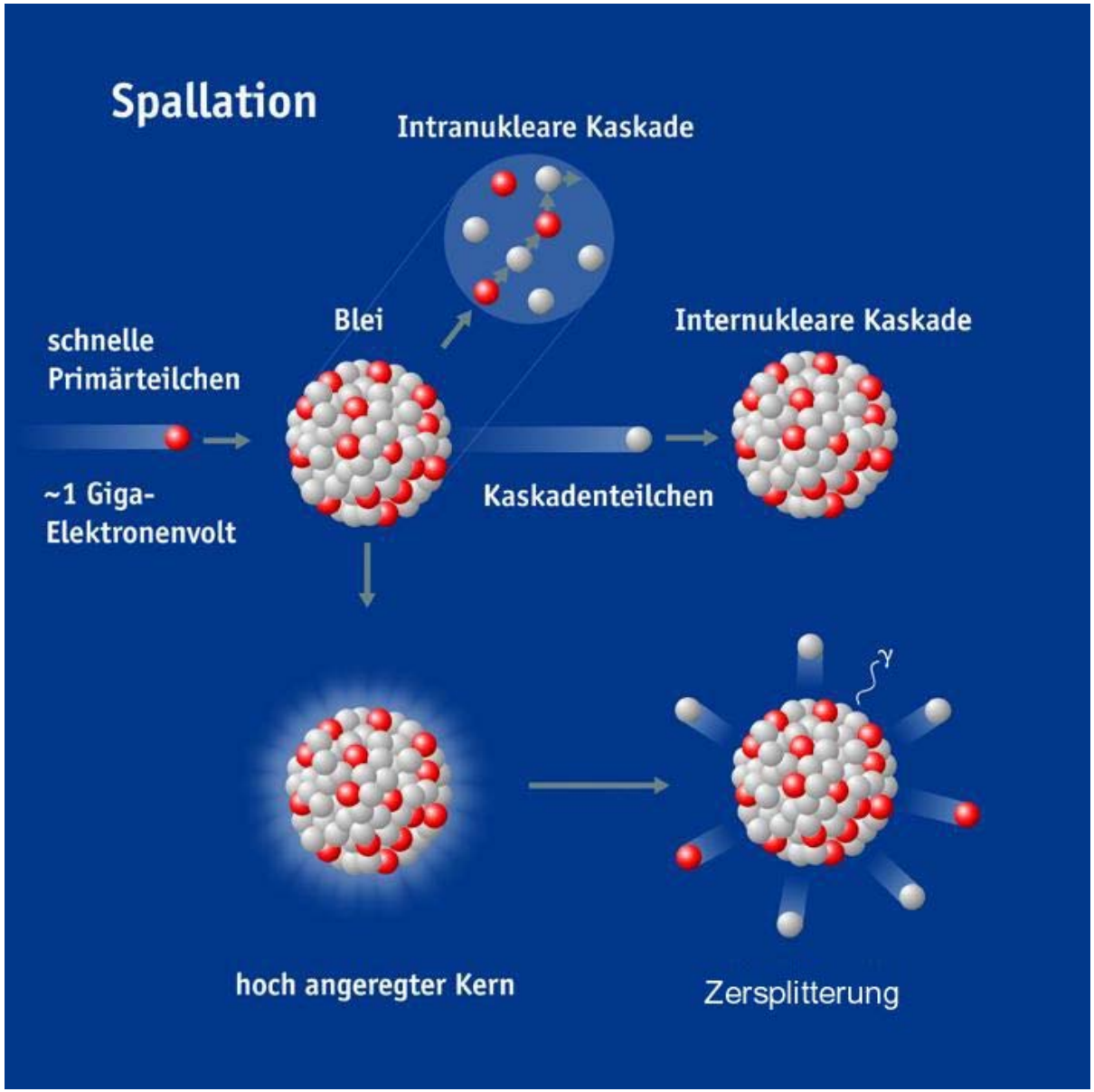




Eiweiß-Molekül



Spallation



pro freigesetztem Neutron entsteht bei der Spallation weniger Wärme als bei der Kettenreaktion .... daher sind höhere Flüsse möglich: spitzenwerte thermische Neutronen $2x10^{17}n/cm^2s$ (geplant bei der ESS)

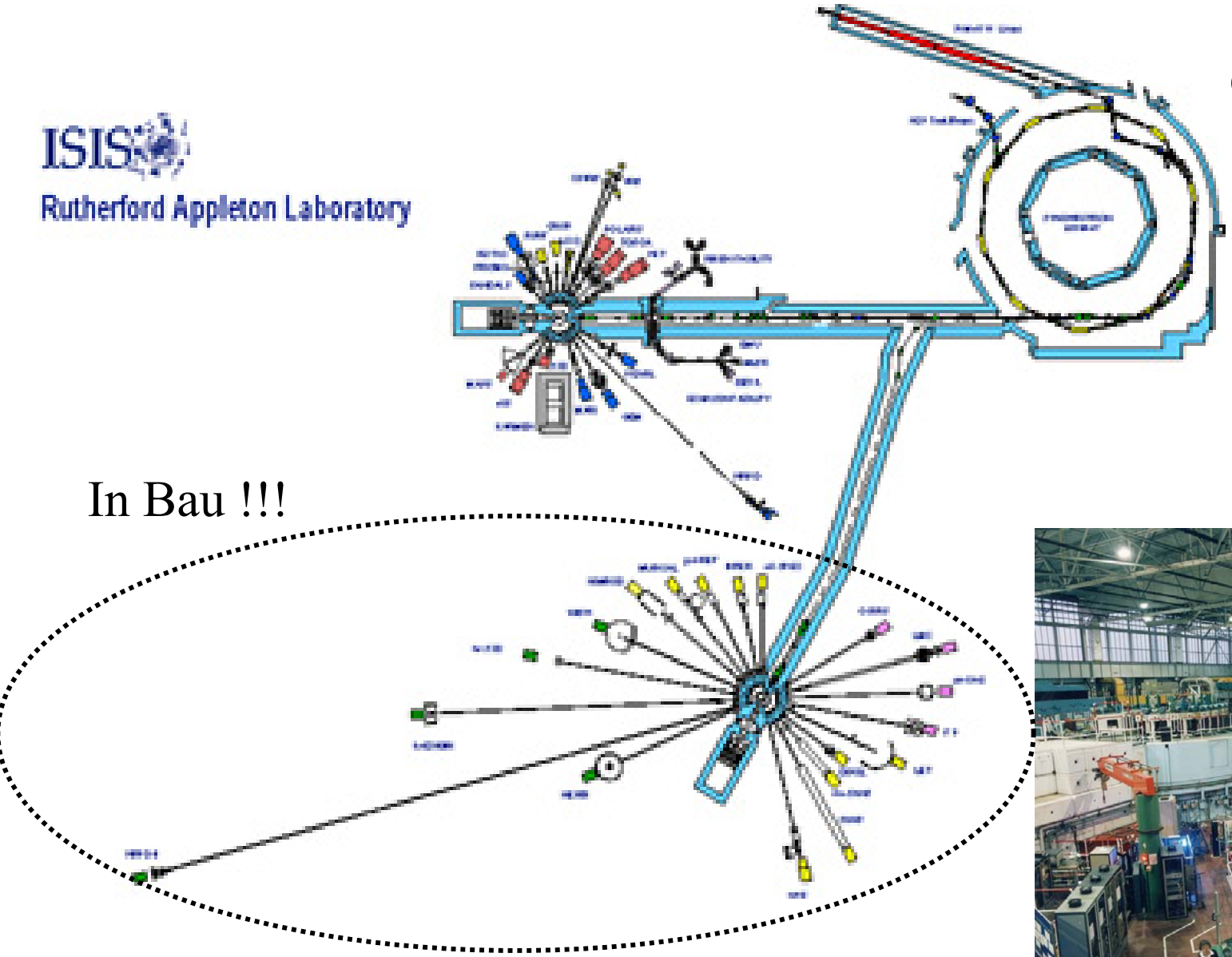
Pb: 20n/p +23MeV
^{238}U: 40n/p +50MeV
(vgl ^{235}U:1n/spaltung
+ 200MeV)

Aber : Pulse – mittlerer Fluss sehr gering!

Spallations-Neutronenquellen

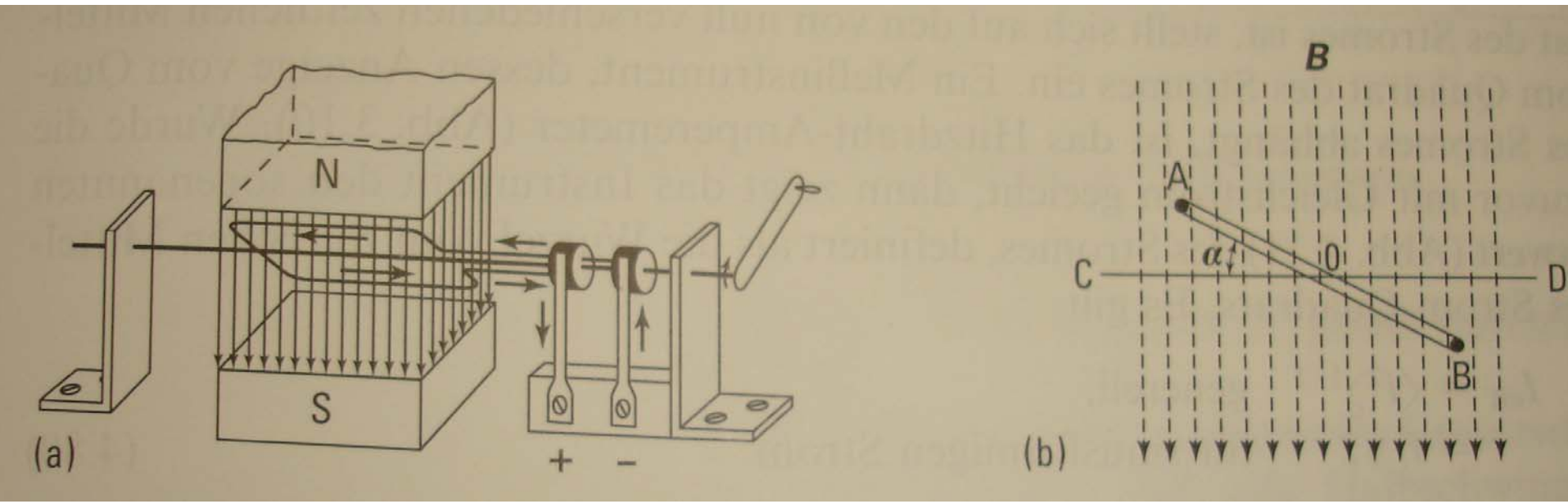
Oxford, UK

ISIS
Rutherford Appleton Laboratory



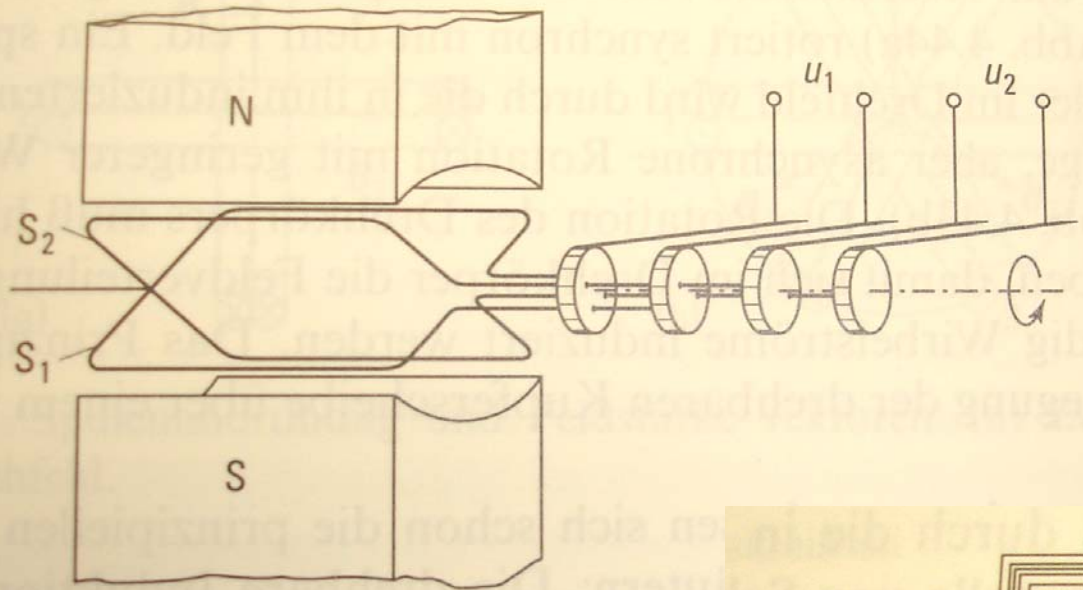
In Bau !!!

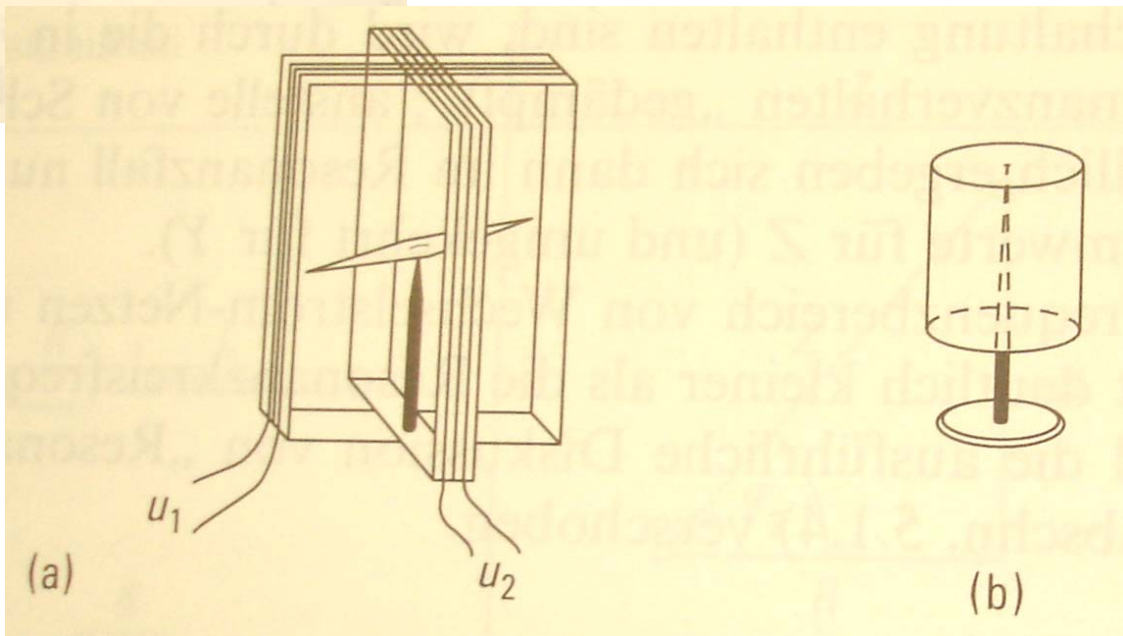
Spannungserzeugung durch Induktion



$$u_1 = \hat{u} \cos \omega t$$

$$u_2 = \hat{u} \sin \omega t.$$





16. Doppelstunde

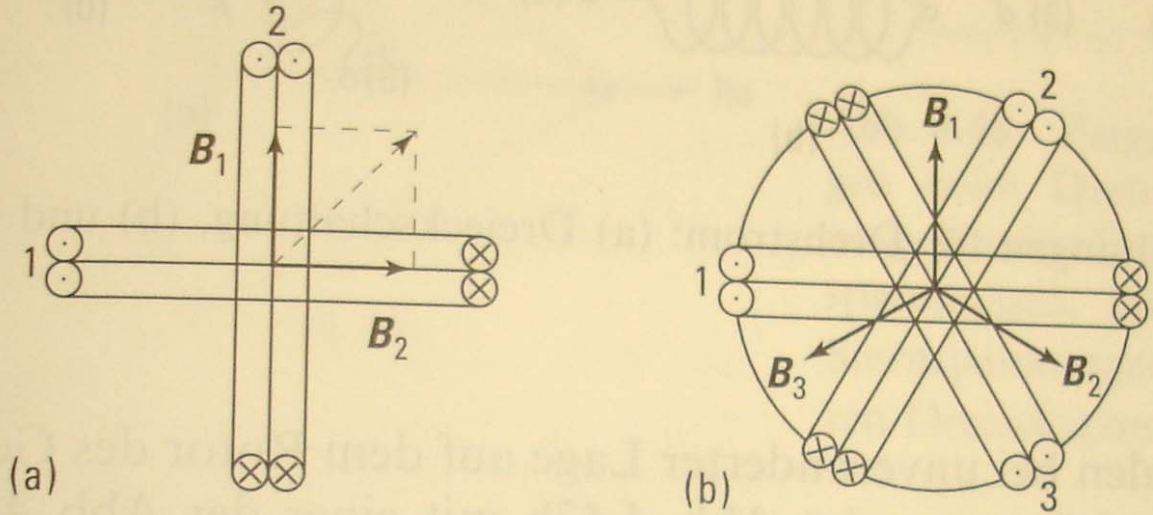


Abb. 4.45 Spulenanordnung und Feldstärke-Vektoren: (a) Zweiphasendrehfeld, (b) Dreiphasendrehfeld.

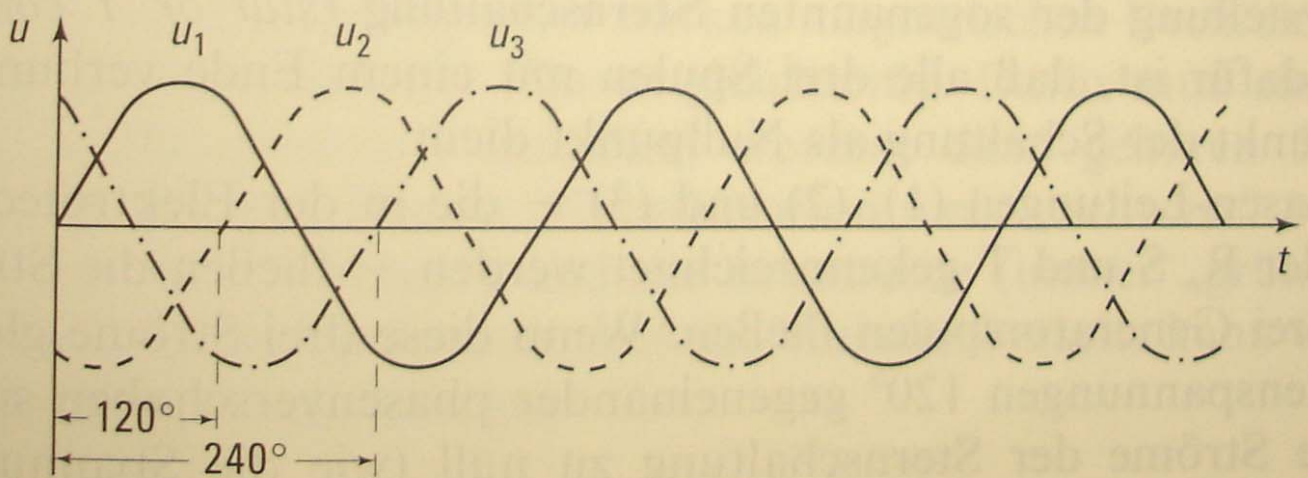


Abb. 4.46 Dreiphasen-Spannungen für Drehstrom.

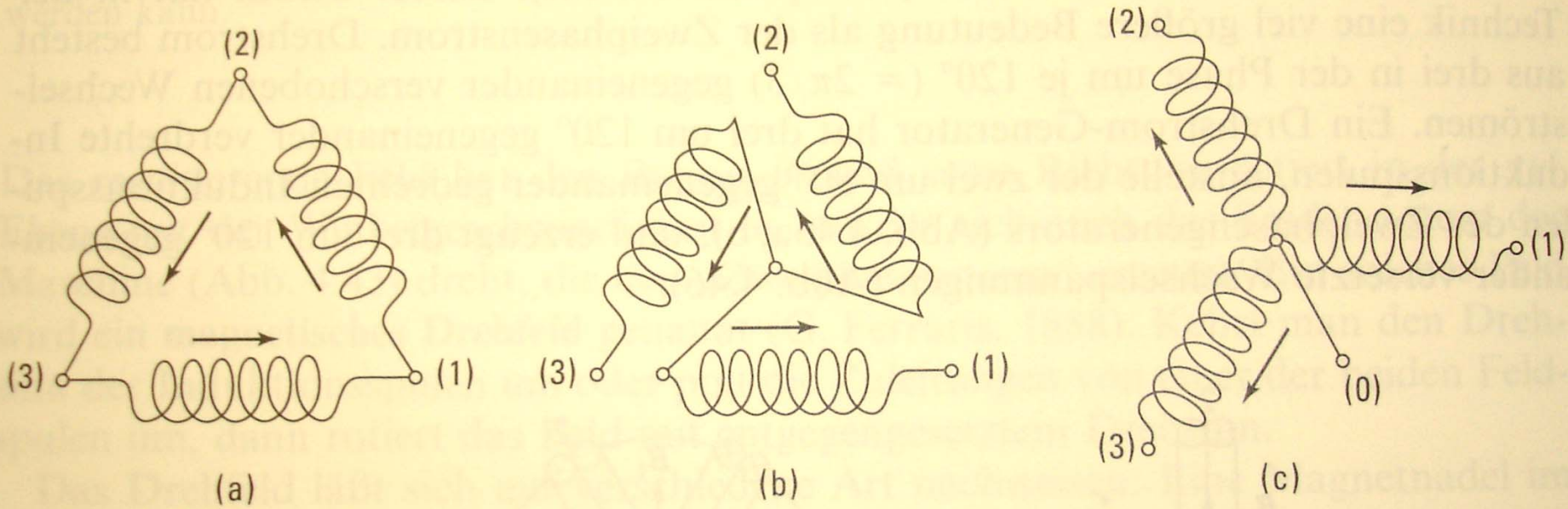


Abb. 4.47 Generator-Schaltungen für Drehstrom: (a) Dreieckschaltung, (b) und (c) Sternschaltung mit Nulleiter.

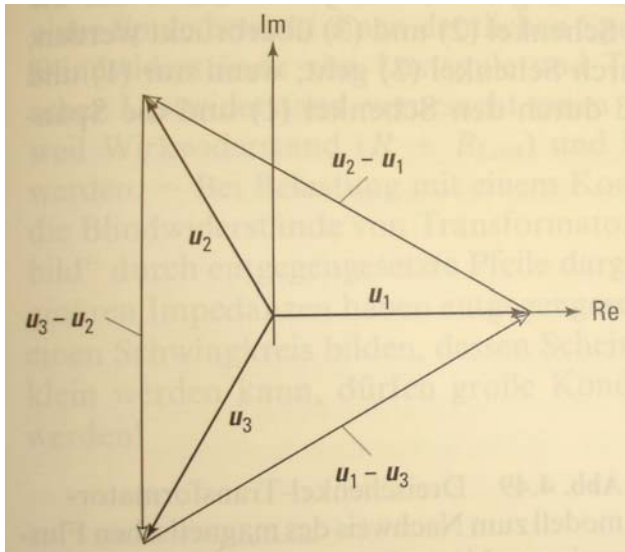
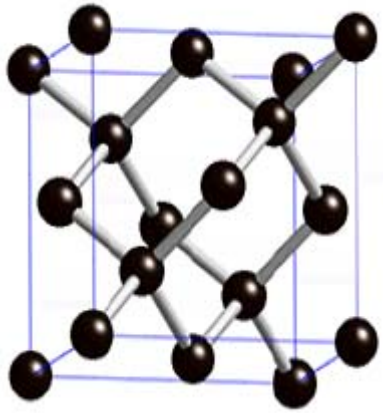


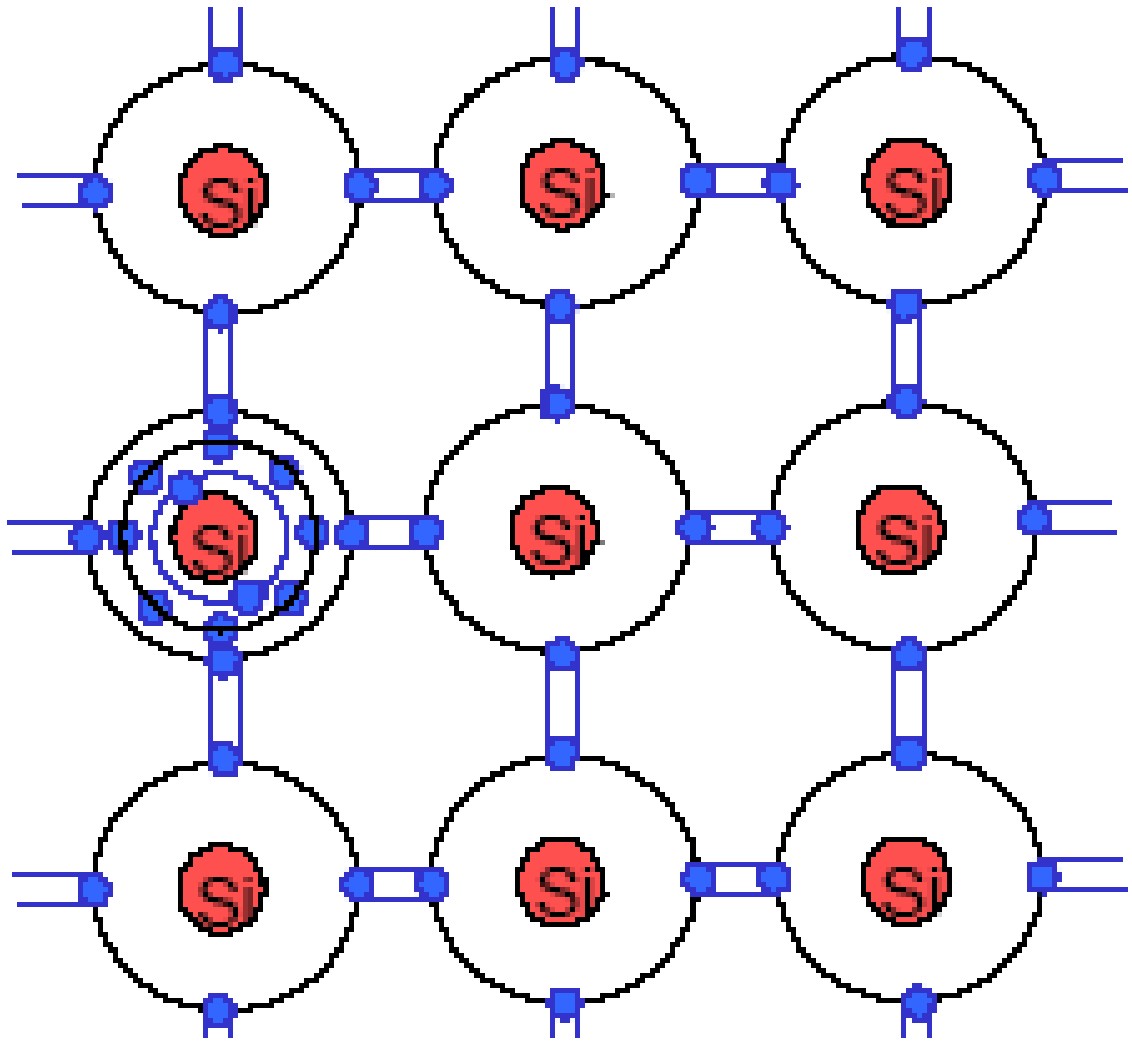
Abb. 4.48 Zeigerdiagramm der Spannungen beim Drehstrom. Die vom Ursprung ausgehenden Spannungspfeile sind die Sternspannungen, die Differenzen von je zwei Sternspannungen ergeben die um $\sqrt{3}$ größeren Dreieckspannungen.

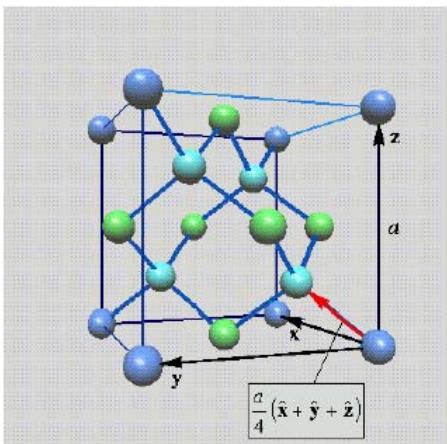
19. Doppelstunde



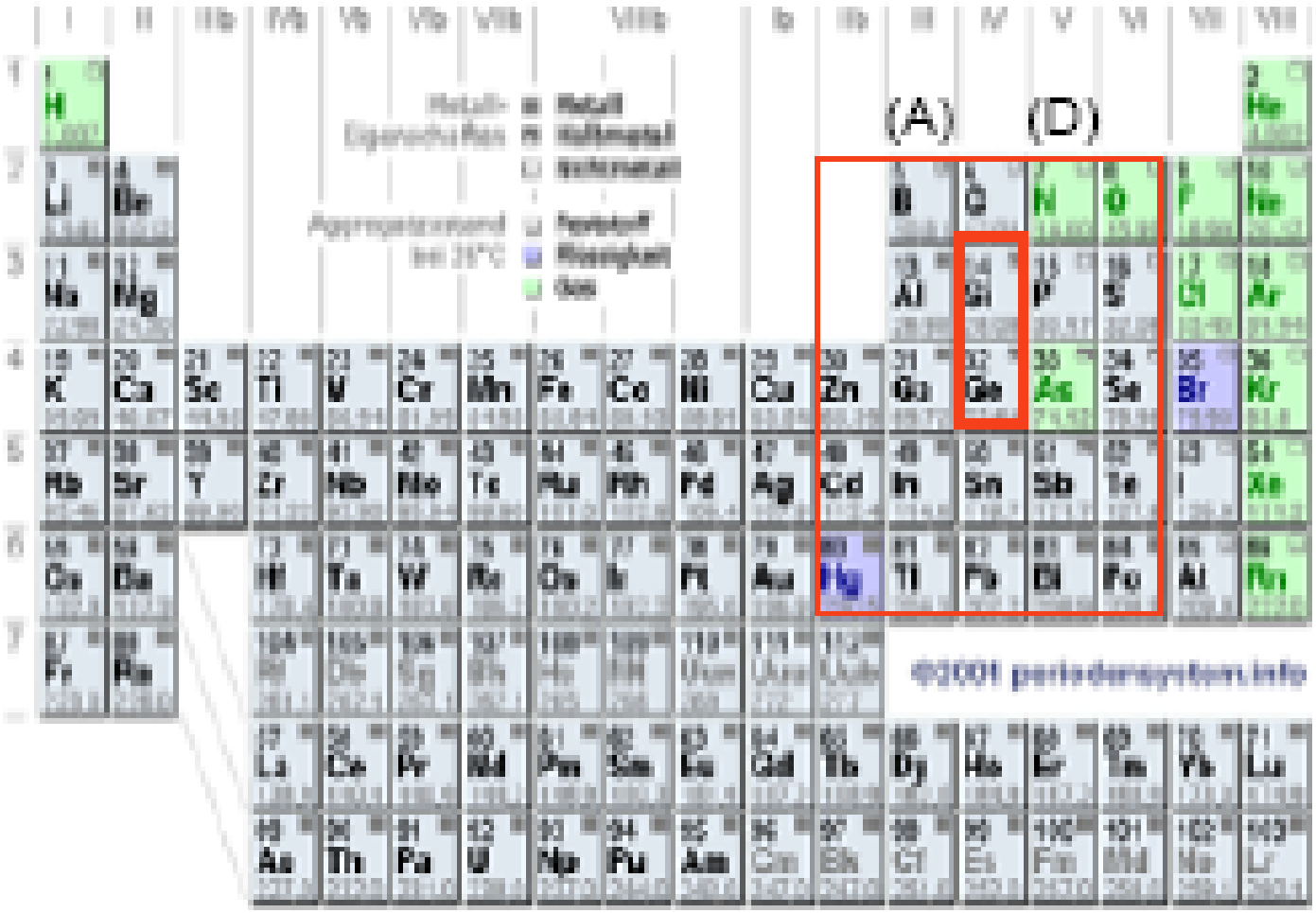
Siliziumkristall

Silizium-Kristall mit kovalenten Elektronen-bindungen.





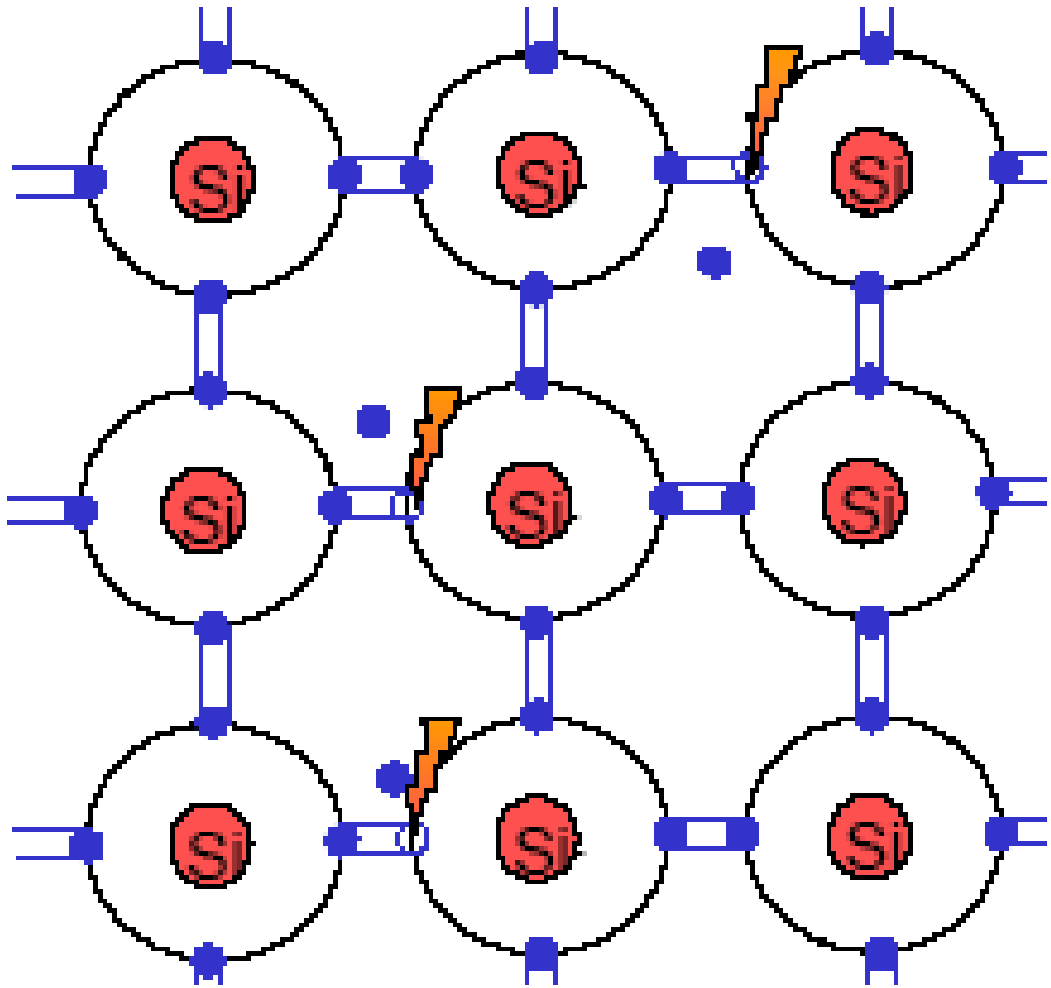
Halbleiter-Materialien



Bei Halbleitern ist die äußerste Schale halb gefüllt:
d.h sie haben 4 Elektronen außen:
4. Hauptgruppe oder 3./5. HG oder 2./6. HG

Wärme erzeugt Ladungsträger

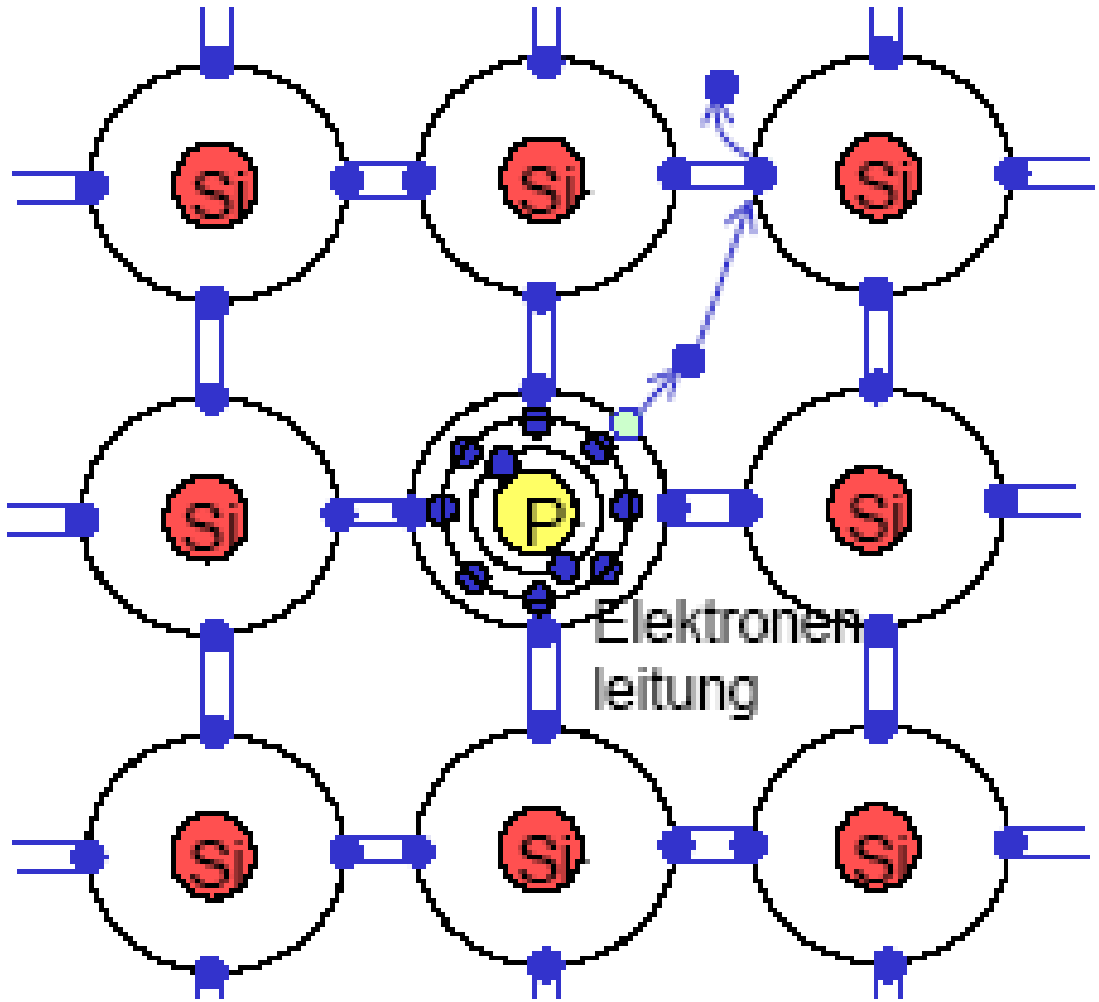
Siliziumkristall mit durch Wärmebewegung aufgerissenen Bindungen.



n-Dotierung: Elektronenüberschuss

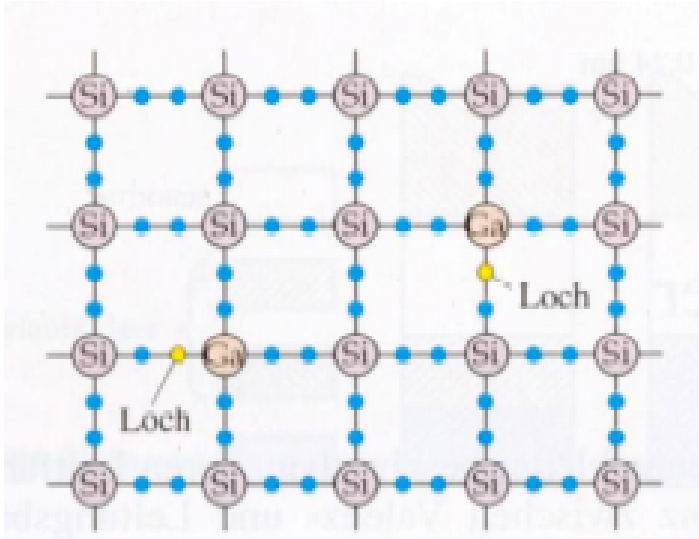
Siliziumkristall mit eingebautem Phosphoratom als Donator.

negative Ladung durch Elektronen-überschuss: n-Leitfähigkeit

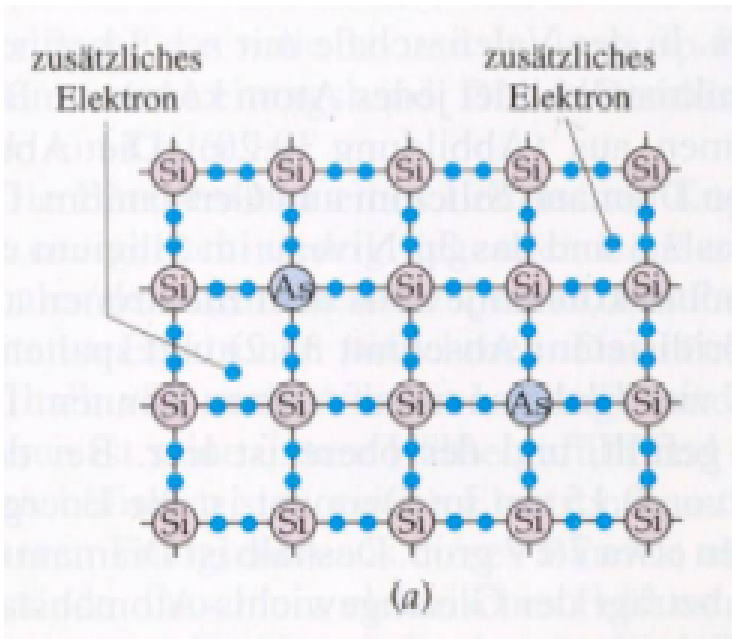


Erhöhung der Leitfähigkeit durch Dotieren mit Fremdatomen

- P-Dotierung: Boratome/Galliumatome werden ins Kristallgitter eingebaut
  -> Elektronenfehlstellen, wie positve Ladungsträger



- N-Dotierung: Phosphor oder Arsen
  -> wie negative Ladungsträger



Dotieren:

Einbringung von Fremdatomen in Si-Kristall um elektr. Eigenschaften zu verändern

N-Dotieren: Phosphor oder Arsen

P-Dotieren: Bor

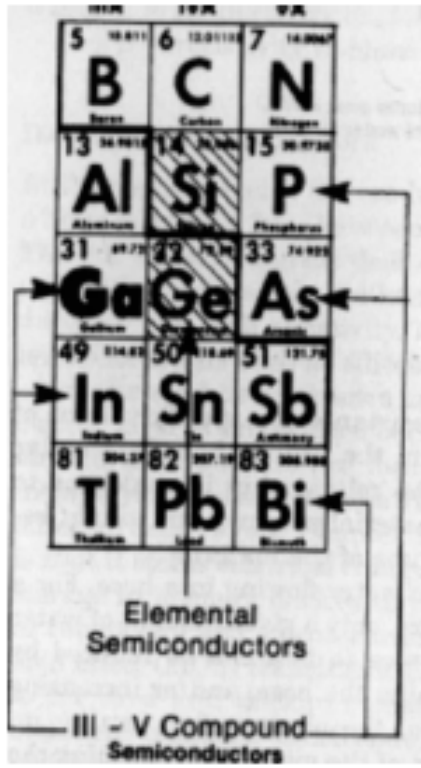
Ziel: Bestimmte Konzentration und räumliche Verteilung der Dotierstoffe

Dotieren durch **Diffusion**:

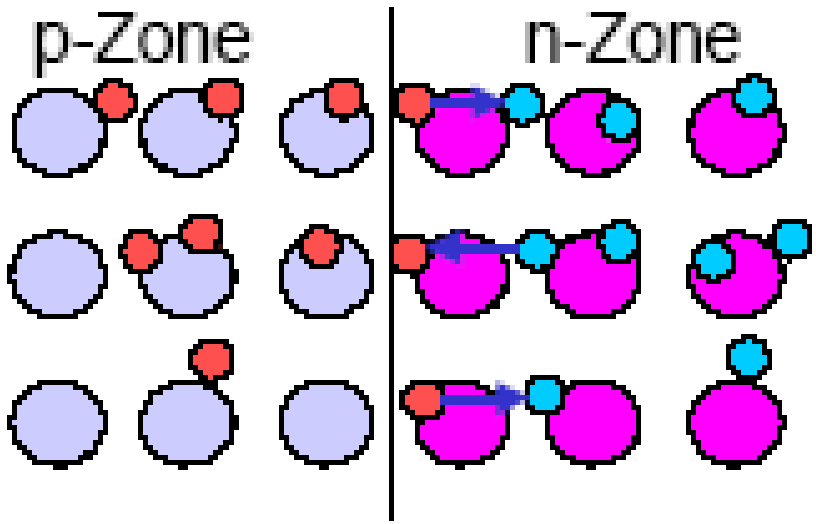
Energie + hohe Konzentration

2 Schritte: Deposition

Drive-in-Oxidation

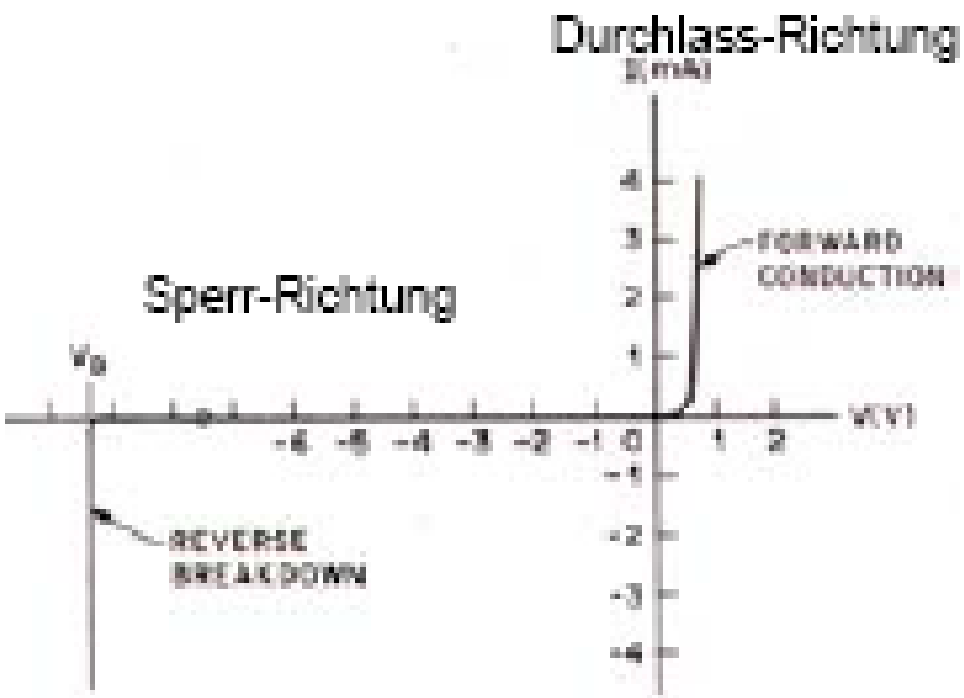


Ladungsträger-Diffusion



Auf Grund ihrer thermischen Bewegung dringen Elektronen aus dem n-Leiter in den p-Leiter und umgekehrt Löcher aus dem p-Leiter in den n-Leiter ein. Diesen Vorgang bezeichnet man als **Diffusion**.

Strom-Spannungs-Kennlinie der Diode



<u>Durchlass-Richtung</u>
Positive Spannung an Anode (p)
Negative Spannung an Kathode (n)

Elektronen und Löcher werden in die Sperrschicht gedrückt:
hohe Leitfähigkeit

<u>Sperr-Richtung</u>
Positive Spannung an Kathode (n)
Negative Spannung an Anode (p)

Elektronen und Löcher werden von der Sperrschicht weggezogen:
niedrige Leitfähigkeit

Transistor:

Modell als Schalter für elektr. Ströme

Zwei Zustände: - Strom fließt: Schalter an

- Kein Strom: Schalter aus

-> Durch Kombination lassen sich alle logischen Operationen ausführen

Feld-Effekt-Transistor (**FET**):

Über das Gate kann der Strom zwischen Source und Drain gesteuert werden

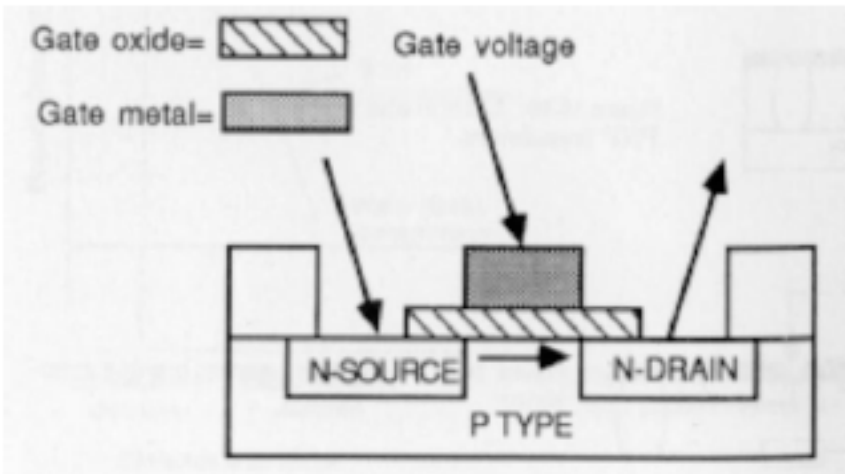
Grundaufbau: p-Substrat mit zwei n-dotierten Bereichen (Source+Drain)

Isolator (SiO_2) zwischen Substrat und Gateanschluss

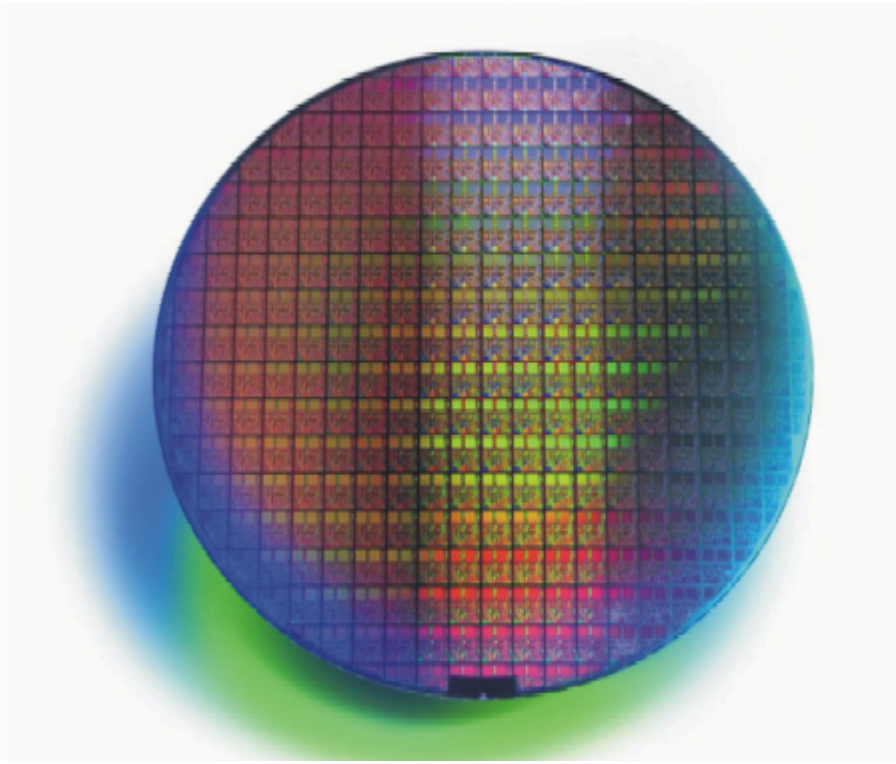
Ohne Gate-Spannung ist p-Substrat nicht leitend

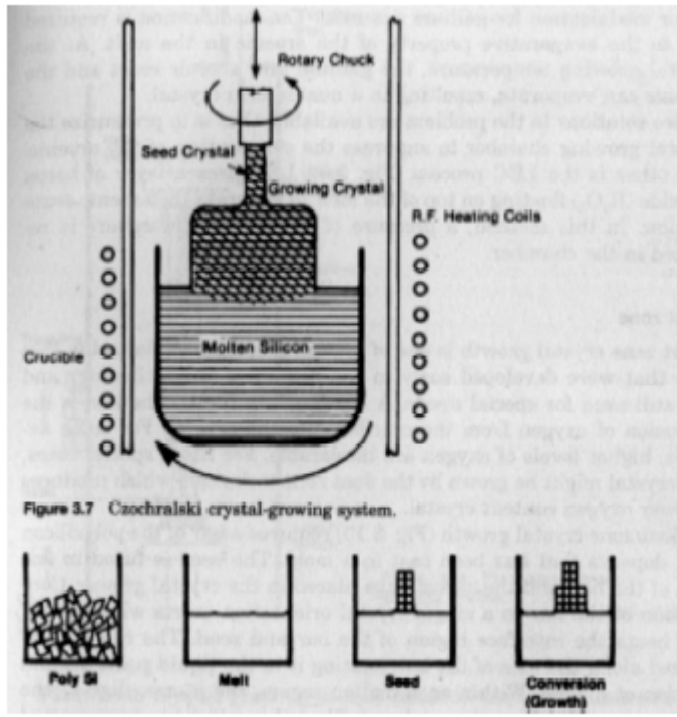
Positive Gate-Spannung induziert negative Ladungen in p-Substrat

-> n-leitender Kanal -> Strom zwischen Source und Drain

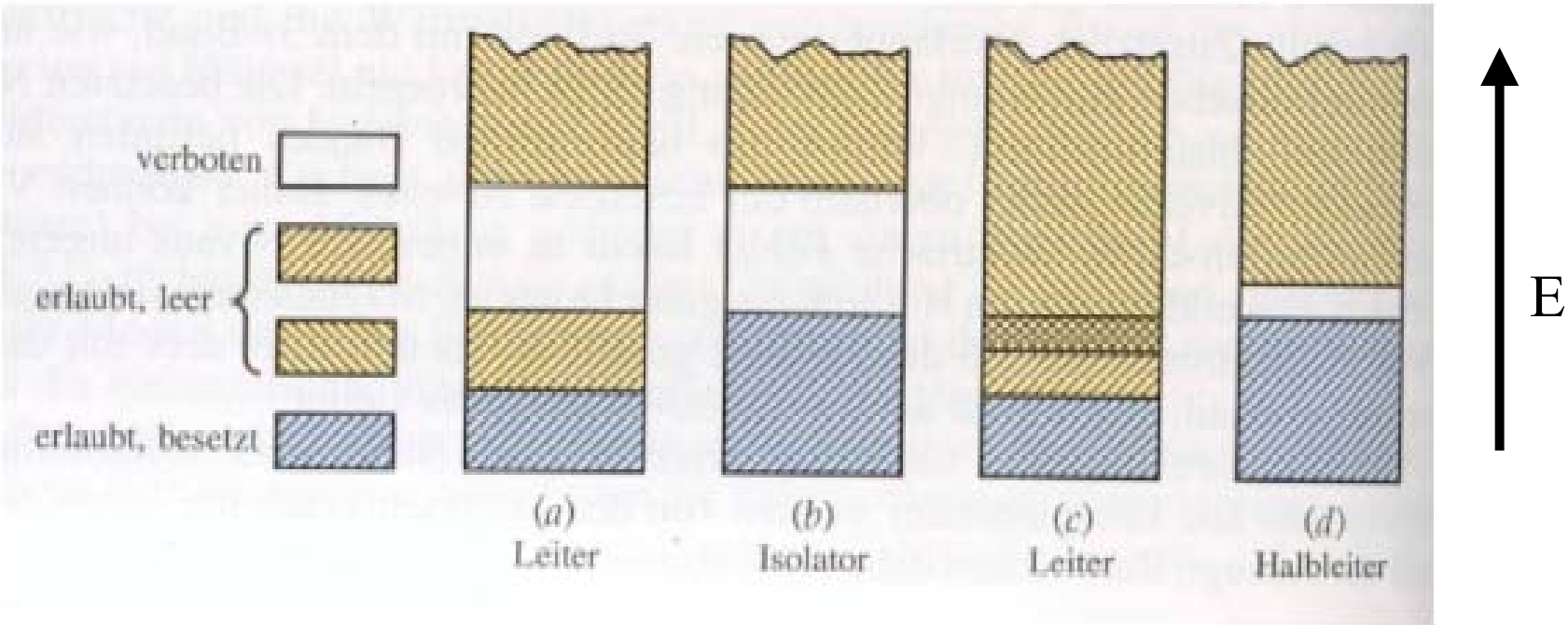


Microchip Fabrication

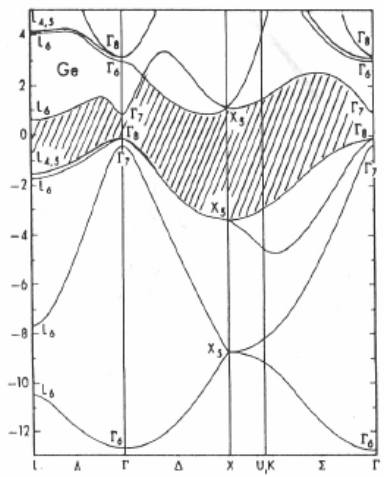




Czochralski method

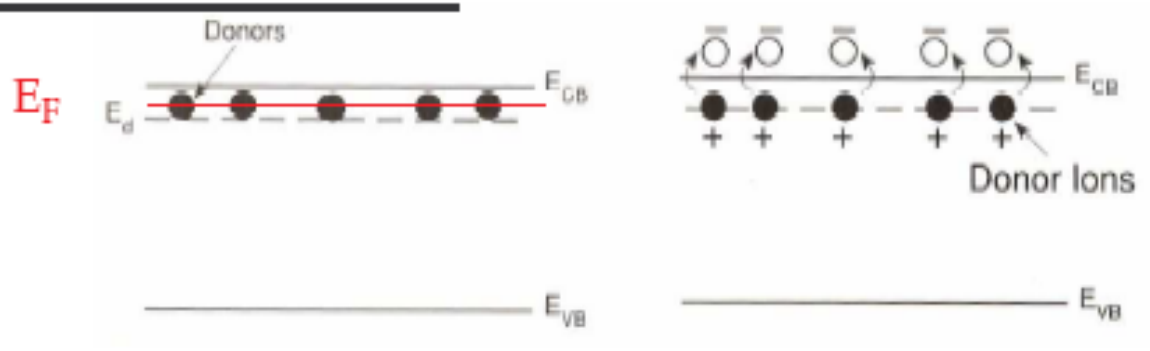


Reale Bandstruktur von Ge (HL)

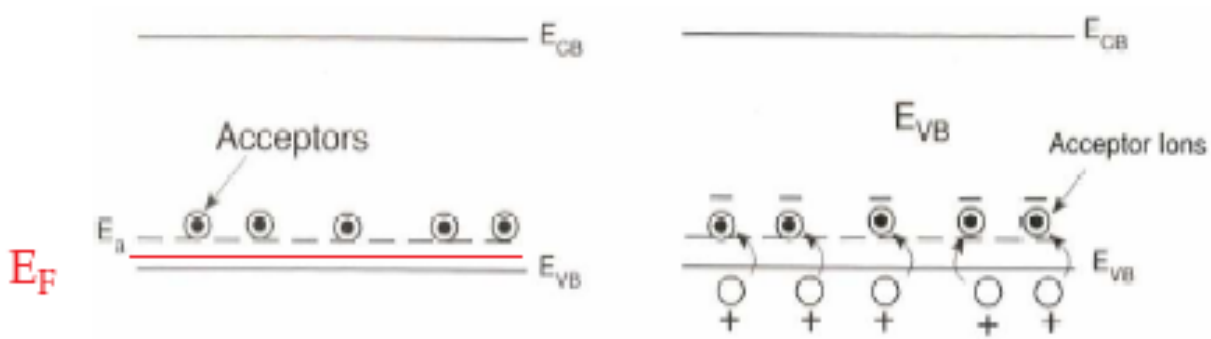


Darstellung im Standardbänderschema:

n-dotiert

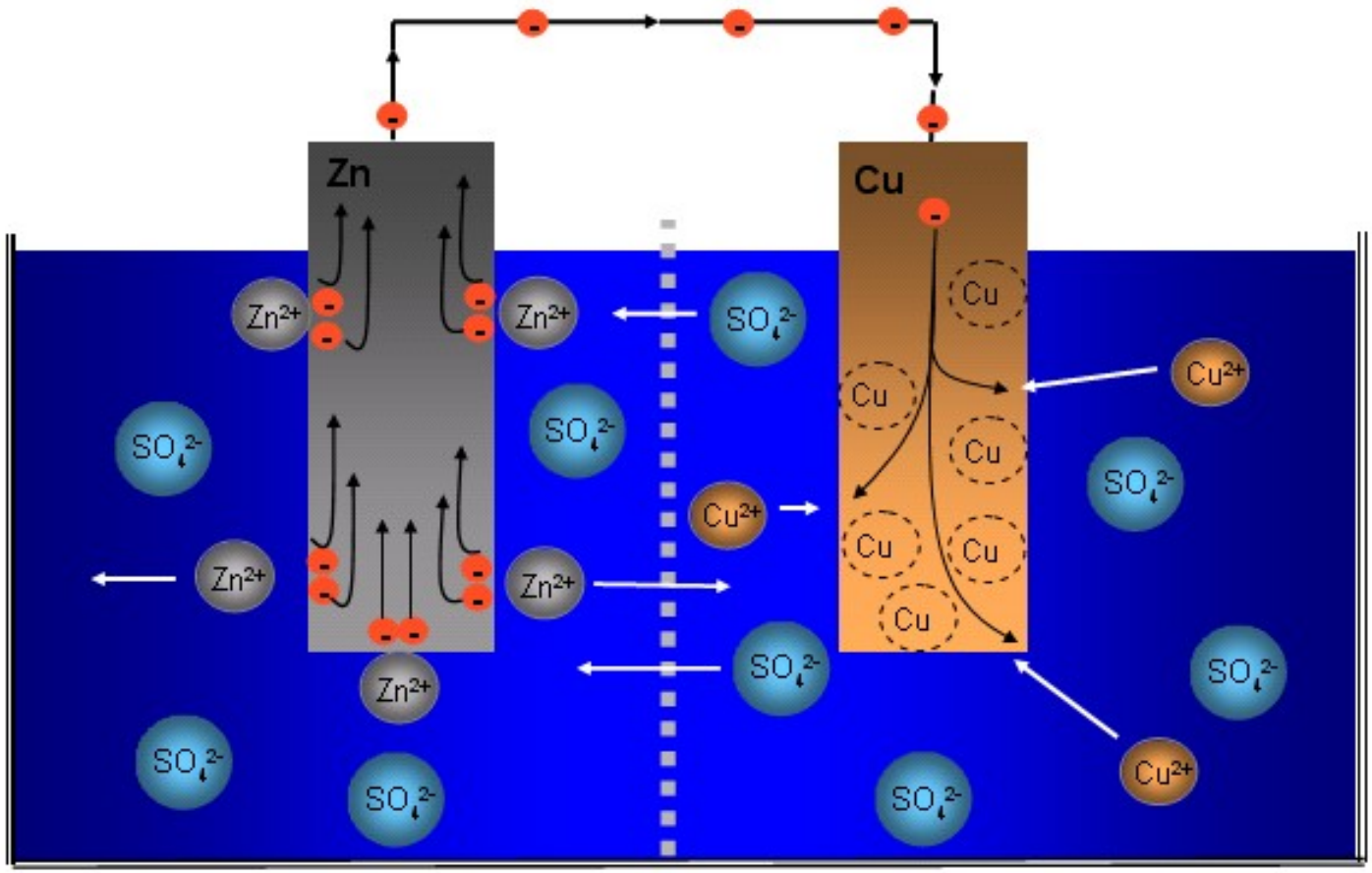


p-dotiert

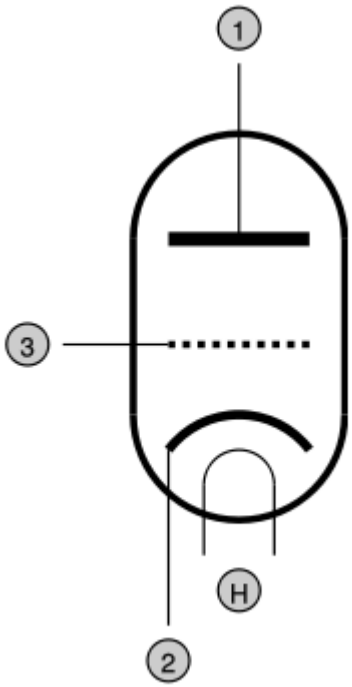


20. Doppelstunde

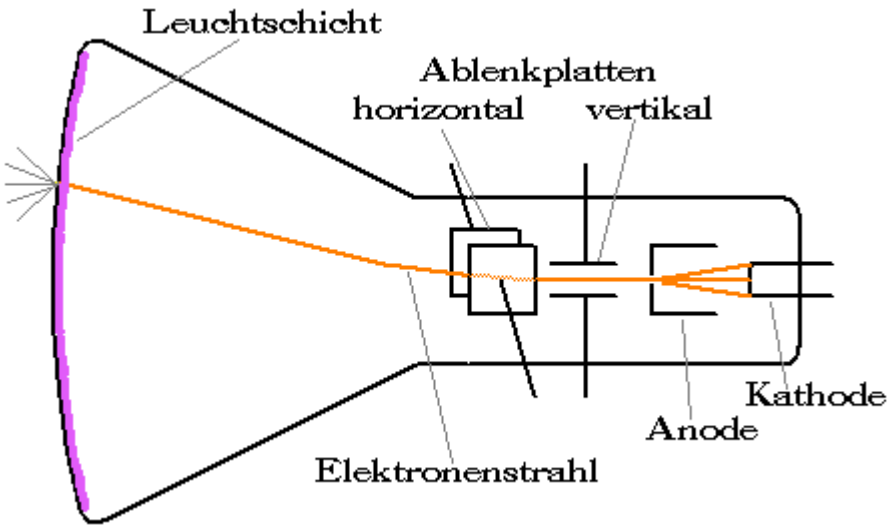
Elektrolyt - Batterien

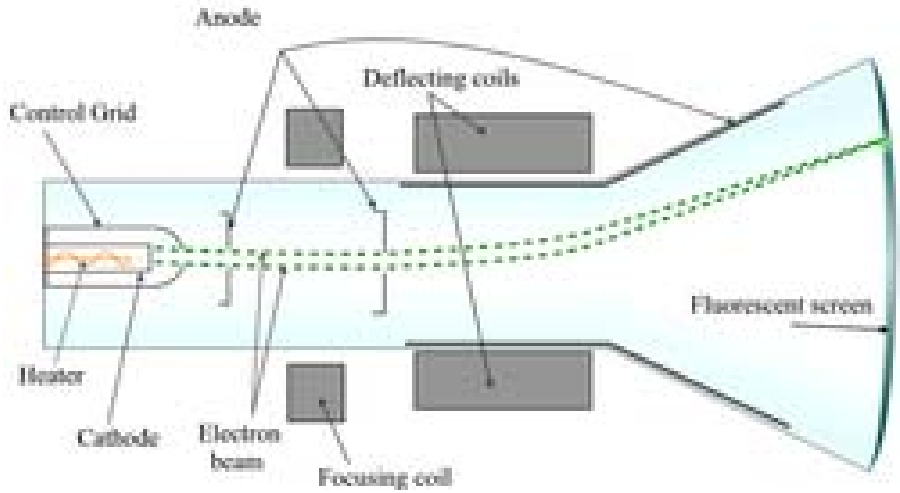


Elektronenröhren

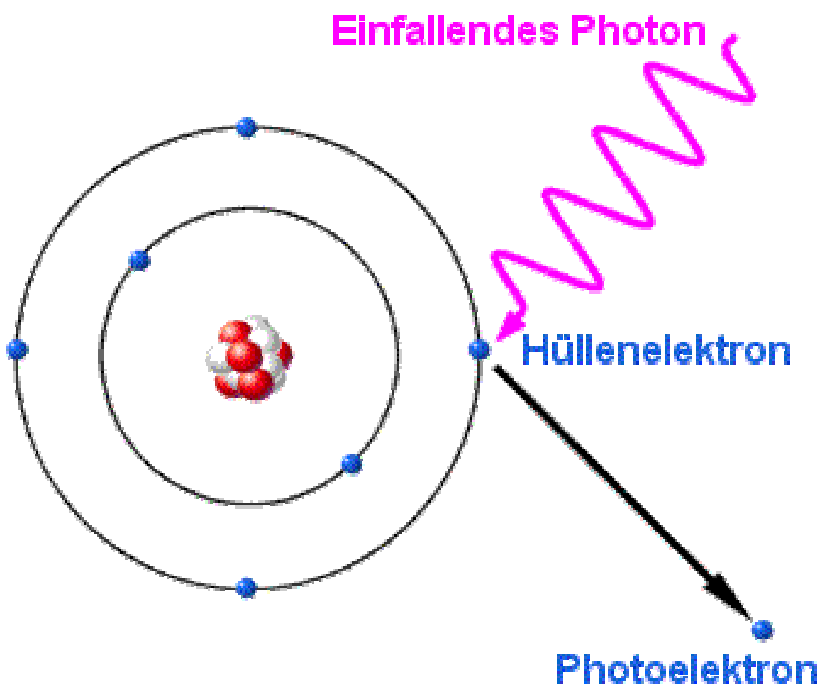


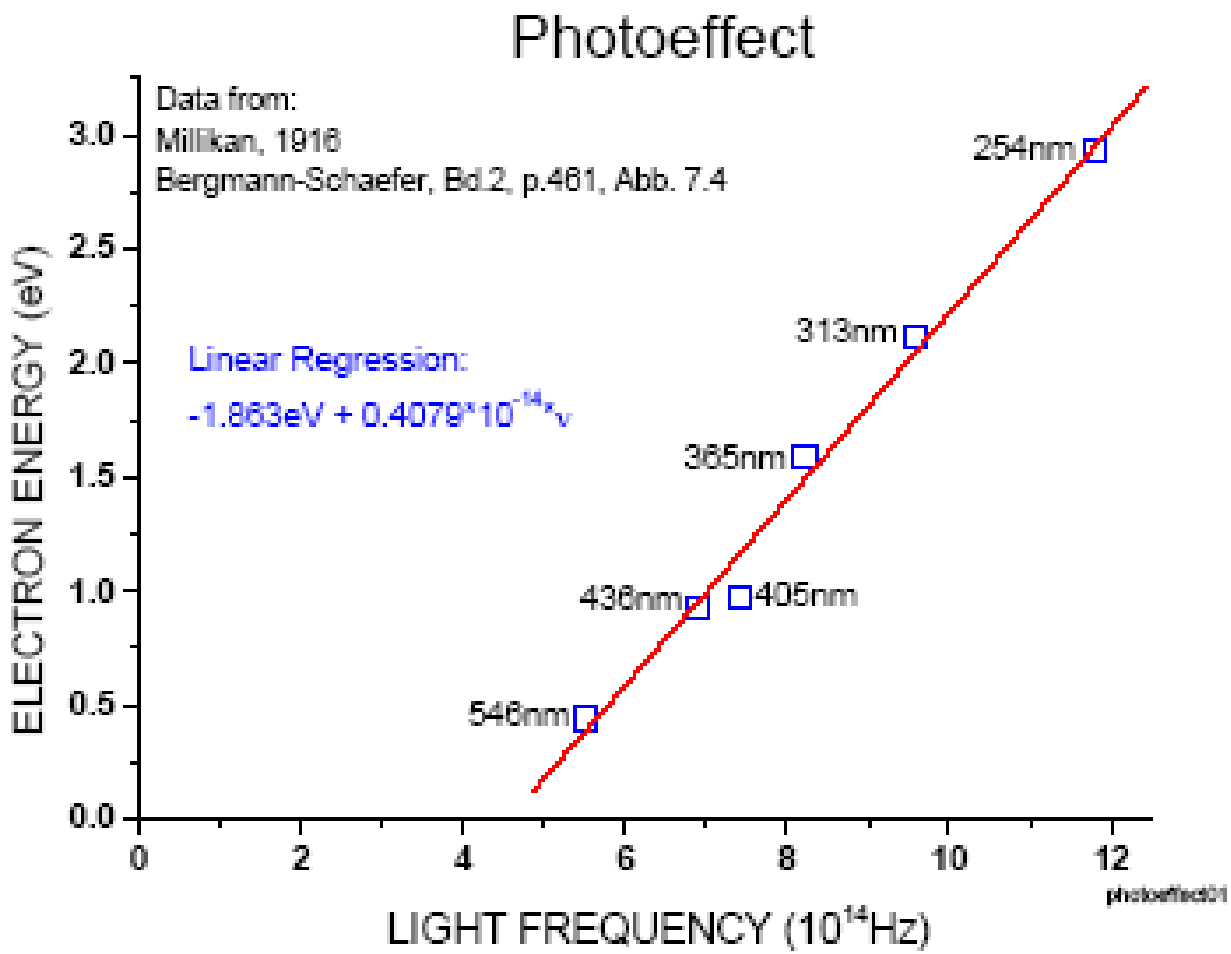
Elektronenstrahlröhren





Photoeffekt -- Phototemission




Photoeffect
Data from:
Millikan, 1916
Bergmann-Schaefer, Bd.2, p.461, Abb. 7.4
Linear Regression:
-1.863eV + 0.4079*10^-14*ν
254nm
313nm
365nm
436nm
405nm
546nm
ELECTRON ENERGY (eV)
LIGHT FREQUENCY (10^14 Hz)
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
0
2
4
6
8
10
12
photoeffect01

1905: - Einstein erklärt den Photoeffekt

Doppelnatur des Lichtes

Welle **Teilchen**

Photon

= Wellen-Teilchen-Dualismus

→ Begründer der Quantenphysik

1921: Einstein erhält den Nobelpreis für Physik für seine Arbeit zum Photoeffekt

21. Doppelstunde

Gasentladungslampe

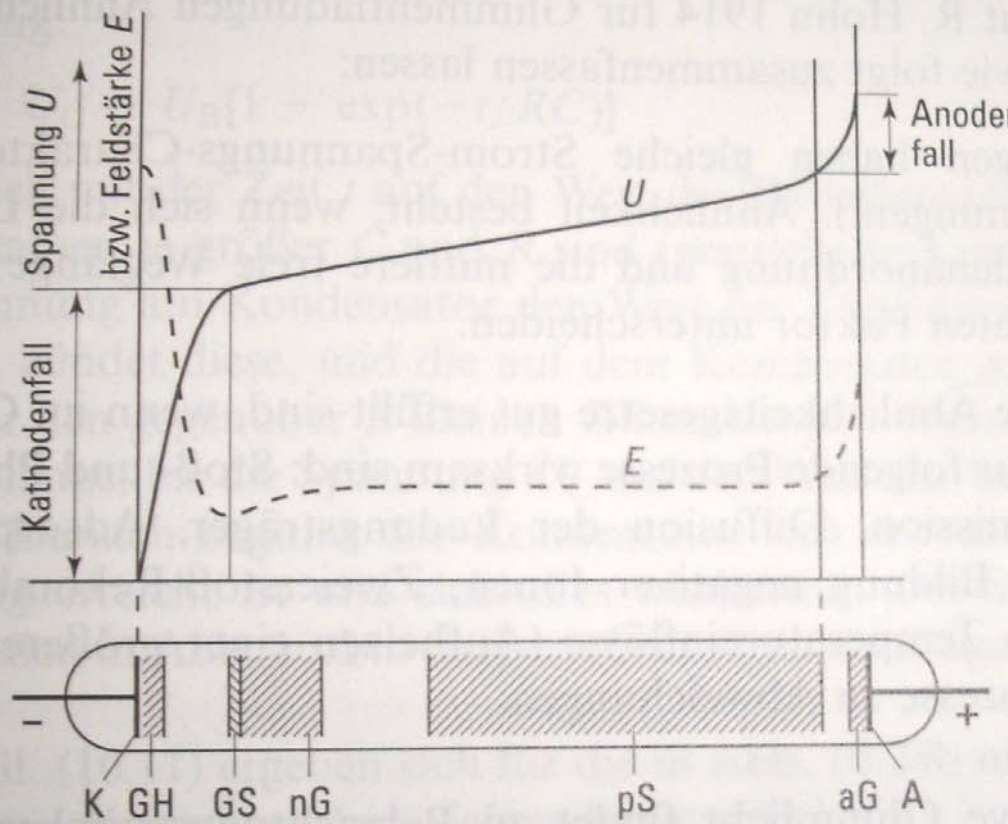


Abb. 10.23 Spannung und Feldstärke in einer Glimmentladung. Schraffierte Leuchtzonen: GH = Glimmhaut, GS = Glimmsaum, nG = negatives Glimmlicht, pS = positive Säule, aG = anodisches Glimmlicht.

Strahlungsdetektor

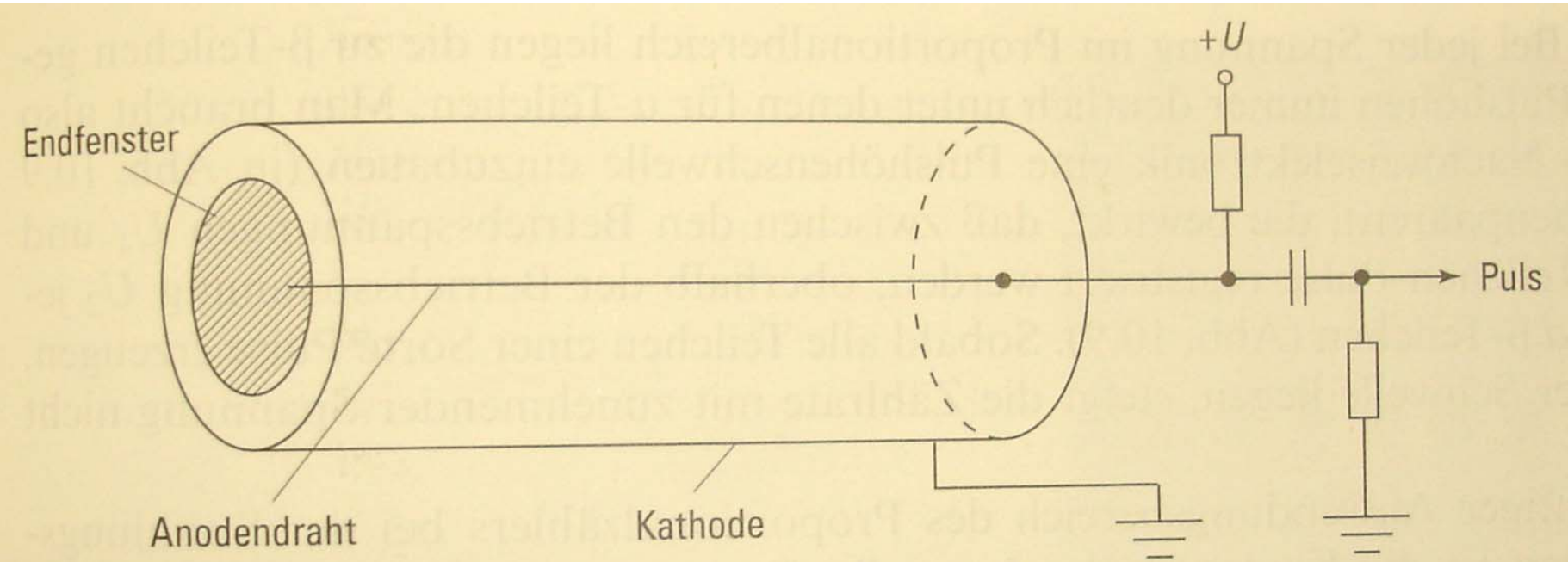


Abb. 10.8 Prinzipieller Aufbau eines einfachen Proportionalzählers.

Zählrohr zur Überprüfung einer Tagesdosisleistung in Überwachungsbereichen

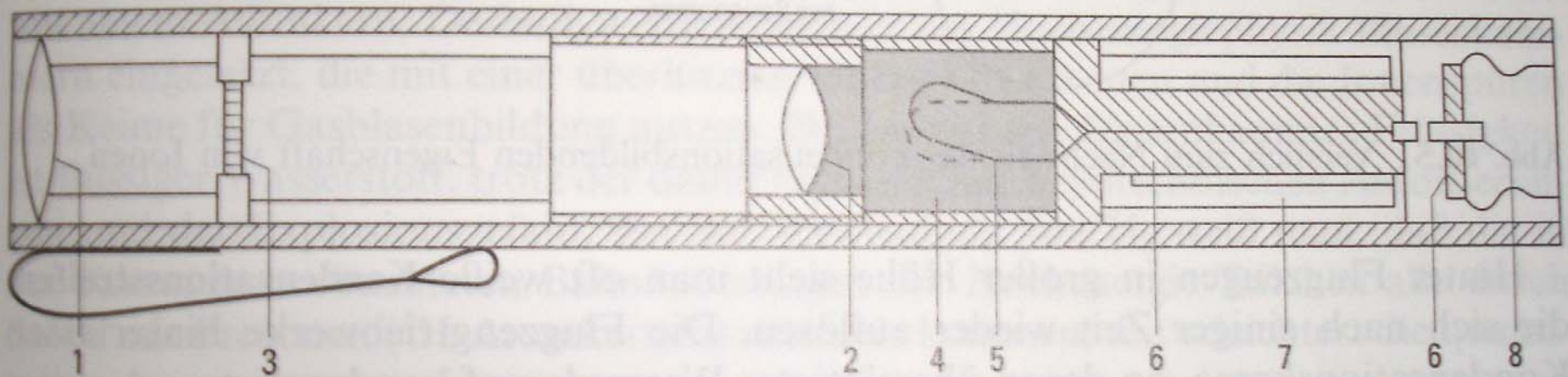
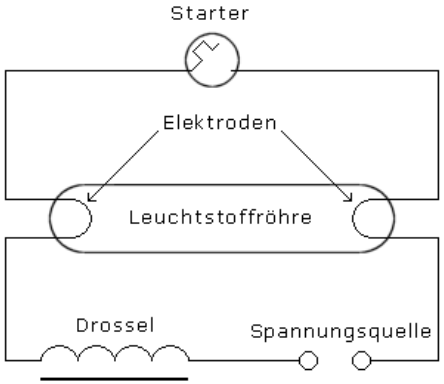
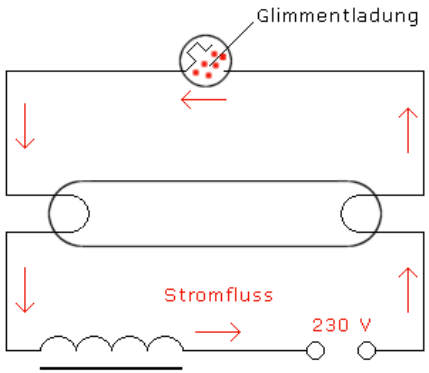


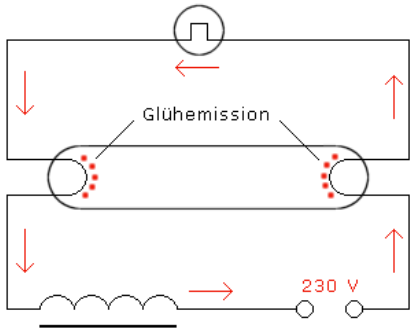
Abb. 10.4 Querschnitt durch ein selbstablesbares Taschendosimeter (vereinfacht). Blickrichtung zur Ablesung von links nach rechts, Lichteinfall von rechts (Bendix Corp.).

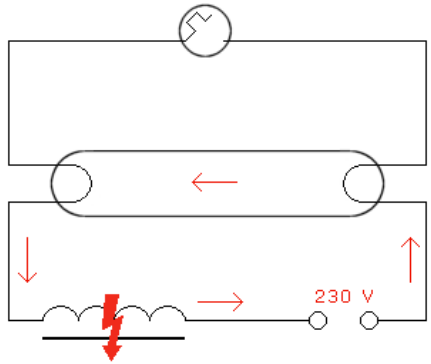
Leuchtstoffröhren

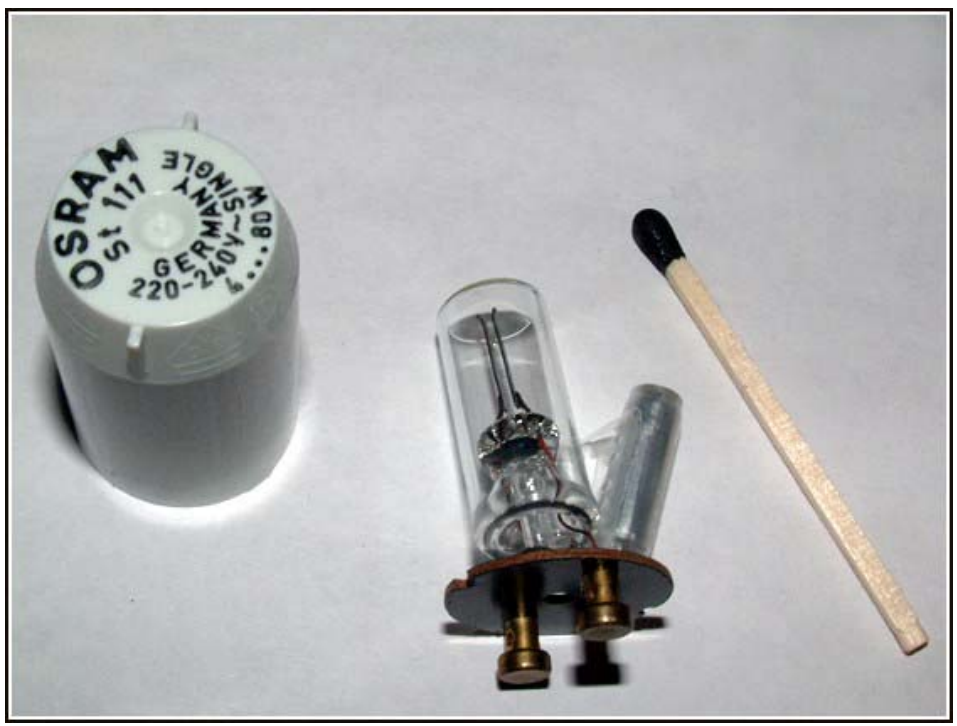
Leuchtstoffröhren : Starter



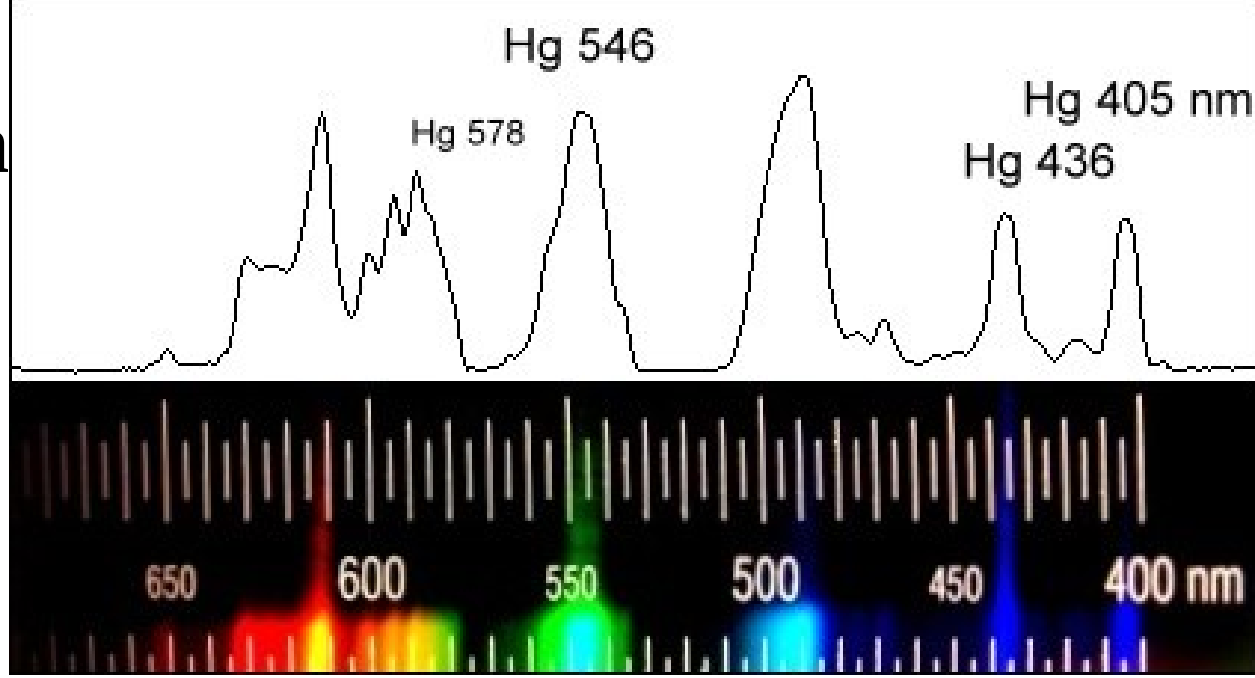








Leuchtstoffröhren



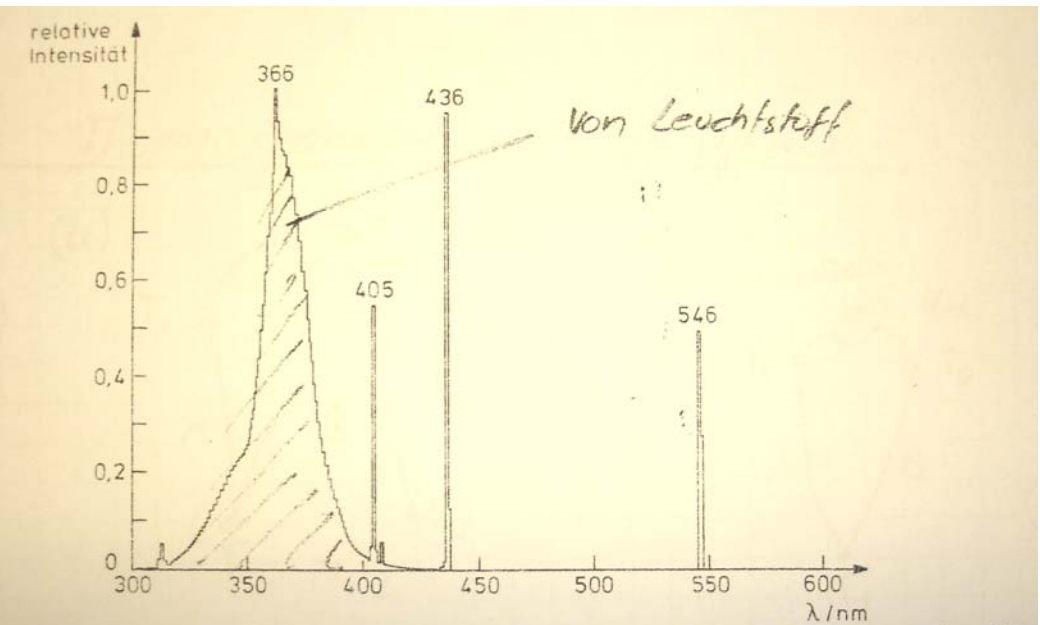


Fig. 9.74 Lichtstrahlungsspektrum einer Leuchtstofflampe, die in Solarien und zur Behandlung der Psoriasis verwendet wird. Entladungsgas Quecksilberdampf, Verstärkung der Intensität bei der UV-Wellenlänge $\lambda = 366$ nm durch einen Leuchtstoff

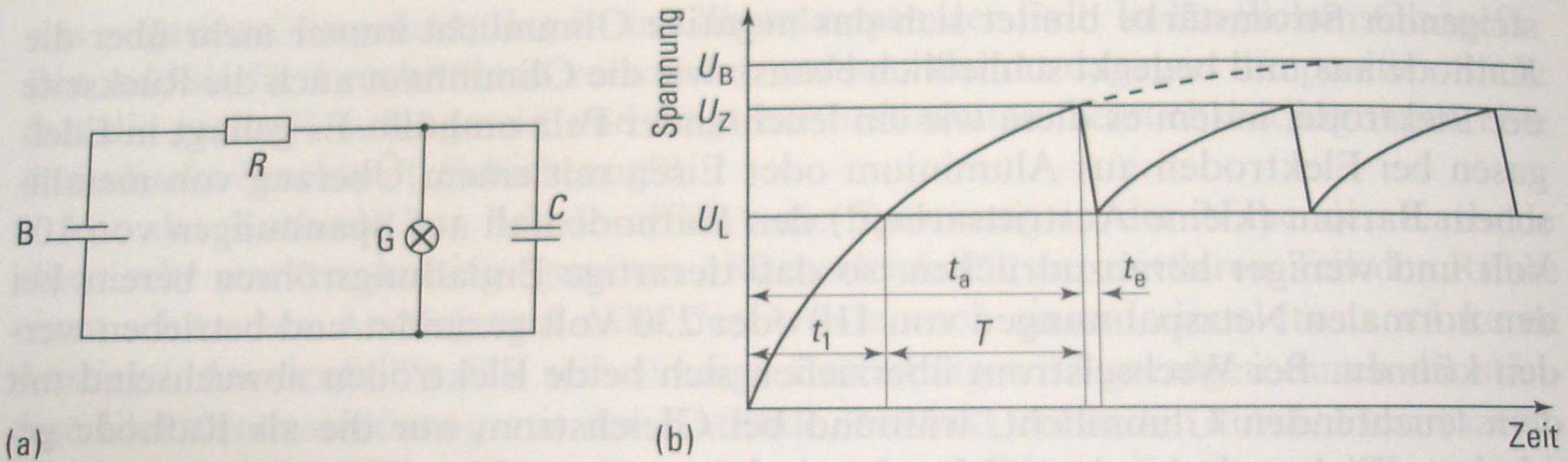
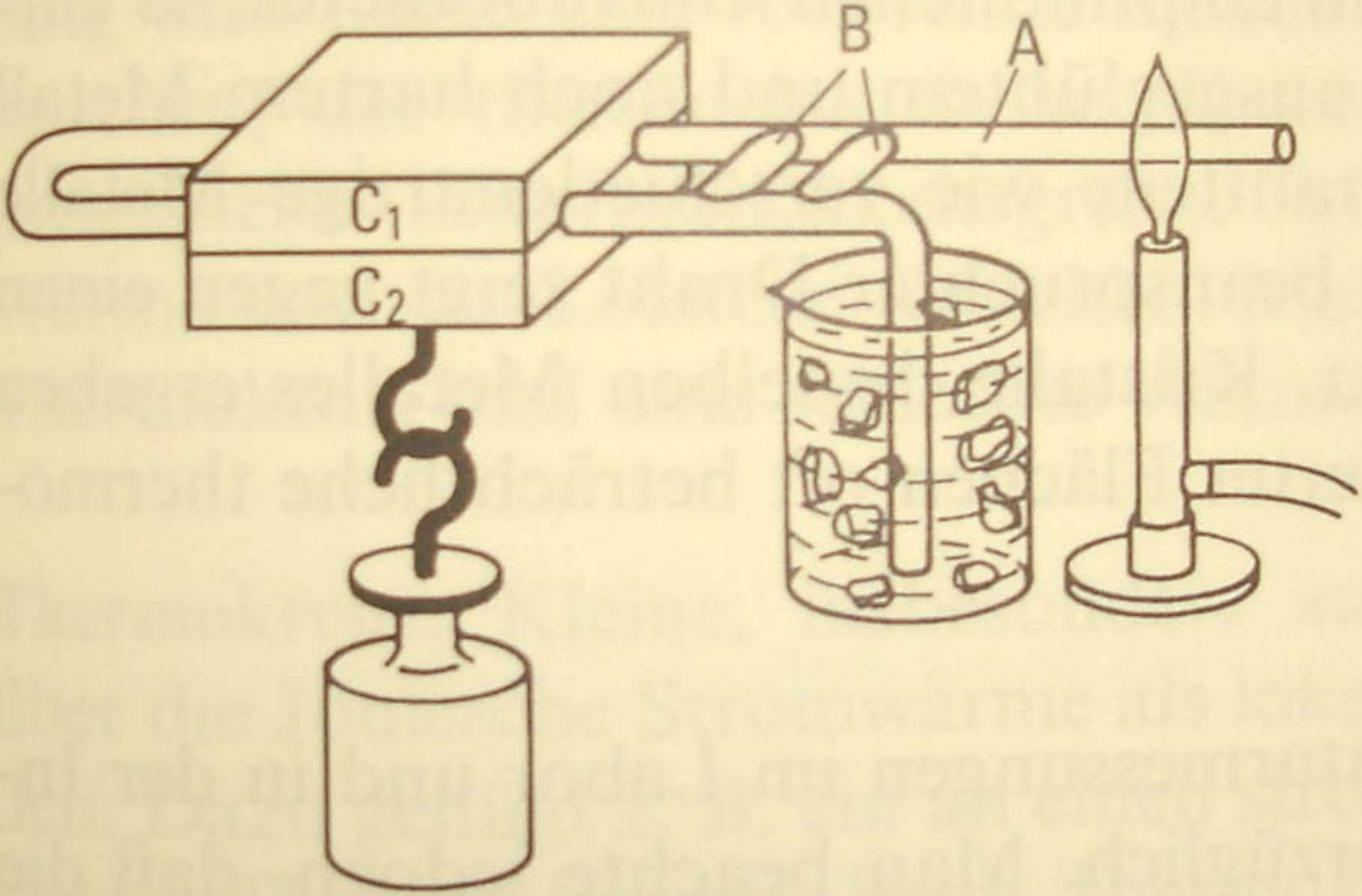


Abb. 10.24 (a) Schaltung zur Erzeugung von Kippschwingungen mittels einer Glimmlampe. (b) Spannungsverlauf einer mittels einer Glimmlampe erzeugten Kippschwingung.


B
A
C_1
C_2

22. Doppelstunde

Elektrochemische Spannungsreihe

(Standardpotenziale bei 20 °C und 101,3 kPa)

Element im Redox-Paar, dessen Oxidationsstufe sich ändert	Ox	+ z e⁻	↔ Red	Standardpotenzial *E*
Fluor (F)	F_2	$+ 2e^-$	$\leftrightarrow 2\ F^-$	+2,87 V
Schwefel (S)	$S_2O_8^{2-}$	$+ 2e^-$	$\leftrightarrow 2\ SO_4^{2-}$	+2,00 V
Sauerstoff (O)	$H_2O_2 + 2\ H_3O^+$	$+ 2e^-$	$\leftrightarrow 4\ H_2O$	+1,78 V
Gold (Au)	Au^+	$+ e^-$	$\leftrightarrow Au$	+1,69 V
Gold (Au)	Au^{3+}	$+ 3e^-$	$\leftrightarrow Au$	+1,42 V
Gold (Au)	Au^{3+}	$+ 2e^-$	$\leftrightarrow Au^+$	+1,40 V
Chlor (Cl)	Cl_2	$+ 2e^-$	$\leftrightarrow 2Cl^-$	+1,36 V
Platin (Pt)	Pt^{2+}	$+ 2e^-$	$\leftrightarrow Pt$	+1,20 V
Brom (Br)	Br_2	$+ 2e^-$	$\leftrightarrow 2Br^-$	+1,07 V
Quecksilber (Hg)	Hg^{2+}	$+ 2e^-$	$\leftrightarrow Hg$	+0,85 V
Silber (Ag)	Ag+	$+ e^-$	$\leftrightarrow Ag$	+0,80 V
Eisen (Fe)	Fe^{3+}	$+ e^-$	$\leftrightarrow Fe^{2+}$	+0,77 V
Iod (I)	I_2	$+ 2e^-$	$\leftrightarrow 2I^-$	+0,53 V
Kupfer (Cu)	Cu^+	$+ e^-$	$\leftrightarrow Cu$	+0,52 V
Schwefel (S)	S	$+ 2e^-$	$\leftrightarrow S^{2-}$	+0,48 V
Eisen (Fe)	$[Fe(CN)_6]^{3-}$	$+ e^-$	$\leftrightarrow [Fe(CN)_6]^{4-}$	+0,361 V
Kupfer (Cu)	Cu^{2+}	$+ 2e^-$	$\leftrightarrow Cu$	+0,34 V
Kupfer (Cu)	Cu^{2+}	$+ e^-$	$\leftrightarrow Cu^+$	+0,16 V
Zinn (Sn)	Sn^{4+}	$+ 2e^-$	$\leftrightarrow Sn^{2+}$	+0,15 V
Wasserstoff (H_2)	**$2H^+$**	**$+ 2e^-$**	**$\leftrightarrow H_2$**	**0**
Eisen (Fe)	Fe^{3+}	$+ 3e^-$	$\leftrightarrow Fe$	-0,04 V
Blei (Pb)	Pb^{2+}	$+ 2e^-$	$\leftrightarrow Pb$	-0,13 V
Zinn (Sn)	Sn^{2+}	$+ 2e^-$	$\leftrightarrow Sn$	-0,14 V
Nickel (Ni)	Ni^{2+}	$+ 2e^-$	$\leftrightarrow Ni$	-0,23 V
Cadmium (Cd)	Cd^{2+}	$+ 2e^-$	$\leftrightarrow Cd$	-0,40 V
Eisen (Fe)	Fe^{2+}	$+ 2e^-$	$\leftrightarrow Fe$	-0,41 V
Nickel (Ni)	$NiO_2 + 2\ H_2O$	$+ 2e^-$	$\leftrightarrow Ni(OH)_2 + 2\ OH^-$	-0,49 V
Zink (Zn)	Zn^{2+}	$+ 2e^-$	$\leftrightarrow Zn$	-0,76 V
Wasserstoff	$2\ H_2O$	$+ 2e^-$	$\leftrightarrow H_2 + 2\ OH^-$	-0,83 V
Chrom (Cr)	Cr^{2+}	$+ 2e^-$	$\leftrightarrow Cr$	-0,91 V
Niob (Nb)	Nb^{3+}	$+ 3e^-$	$\leftrightarrow Nb$	-1,099 V
Vanadium (V)	V^{2+}	$+ 2e^-$	$\leftrightarrow V$	-1,17 V
Mangan (Mn)	Mn^{2+}	$+ 2e^-$	$\leftrightarrow Mn$	-1,18 V
Titan (Ti)	Ti^{3+}	$+ 3e^-$	$\leftrightarrow Ti$	-1,21 V
Aluminium (Al)	Al^{3+}	$+ 3e^-$	$\leftrightarrow Al$	-1,66 V
Titan (Ti)	Ti^{2+}	$+ 2e^-$	$\leftrightarrow Ti$	-1,77 V
Beryllium (Be)	Be^{2+}	$+ 2e^-$	$\leftrightarrow Be$	-1,85 V
Magnesium (Mg)	Mg^{2+}	$+ 2e^-$	$\leftrightarrow Mg$	-2,38 V
Natrium (Na)	Na^+	$+ e^-$	$\leftrightarrow Na$	-2,71 V
Calcium (Ca)	Ca^{2+}	$+ 2e^-$	$\leftrightarrow Ca$	-2,76 V
Barium (Ba)	Ba^{2+}	$+ 2e^-$	$\leftrightarrow Ba$	-2,90 V
Kalium (K)	K^+	$+ e^-$	$\leftrightarrow K$	-2,92 V

Dotieren:

Einbringung von Fremdatomen in Si-Kristall um elektr. Eigenschaften zu verändern

N-Dotieren: Phosphor oder Arsen

P-Dotieren: Bor

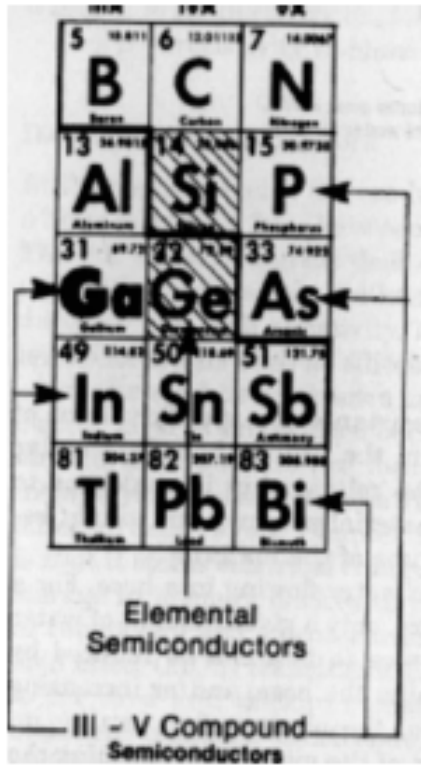
Ziel: Bestimmte Konzentration und räumliche Verteilung der Dotierstoffe

Dotieren durch **Diffusion**:

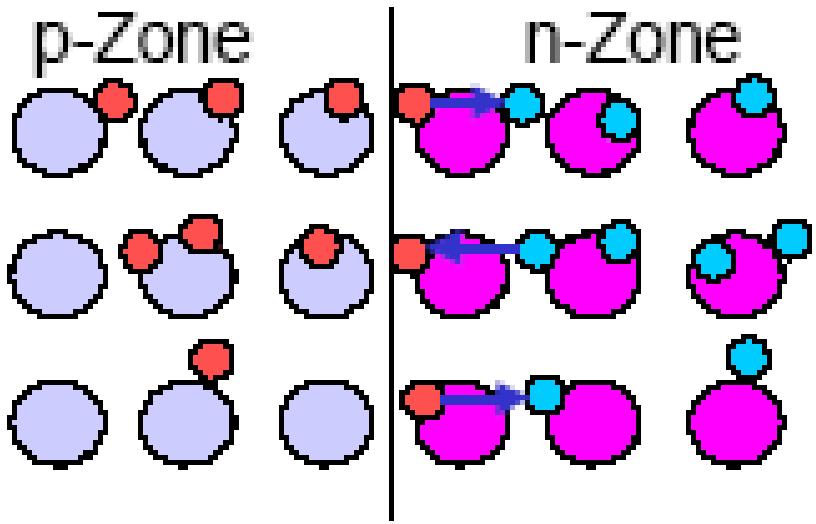
Energie + hohe Konzentration

2 Schritte: Deposition

Drive-in-Oxidation

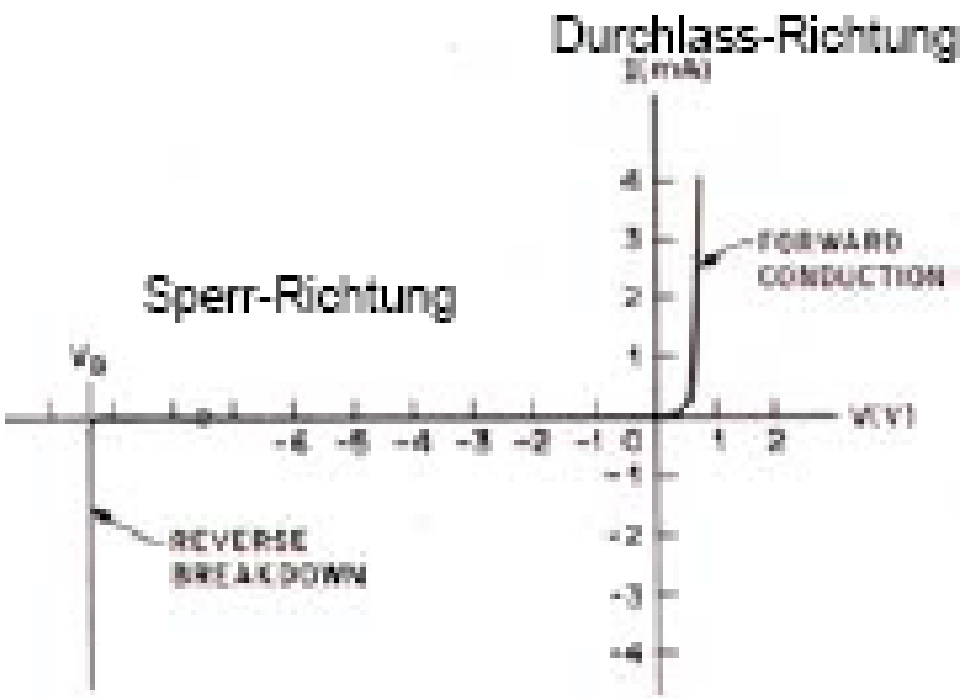


Ladungsträger-Diffusion



Auf Grund ihrer thermischen Bewegung dringen Elektronen aus dem n-Leiter in den p-Leiter und umgekehrt Löcher aus dem p-Leiter in den n-Leiter ein. Diesen Vorgang bezeichnet man als **Diffusion**.

Strom-Spannungs-Kennlinie der Diode



<u>Durchlass-Richtung</u>
Positive Spannung an Anode (p)
Negative Spannung an Kathode (n)

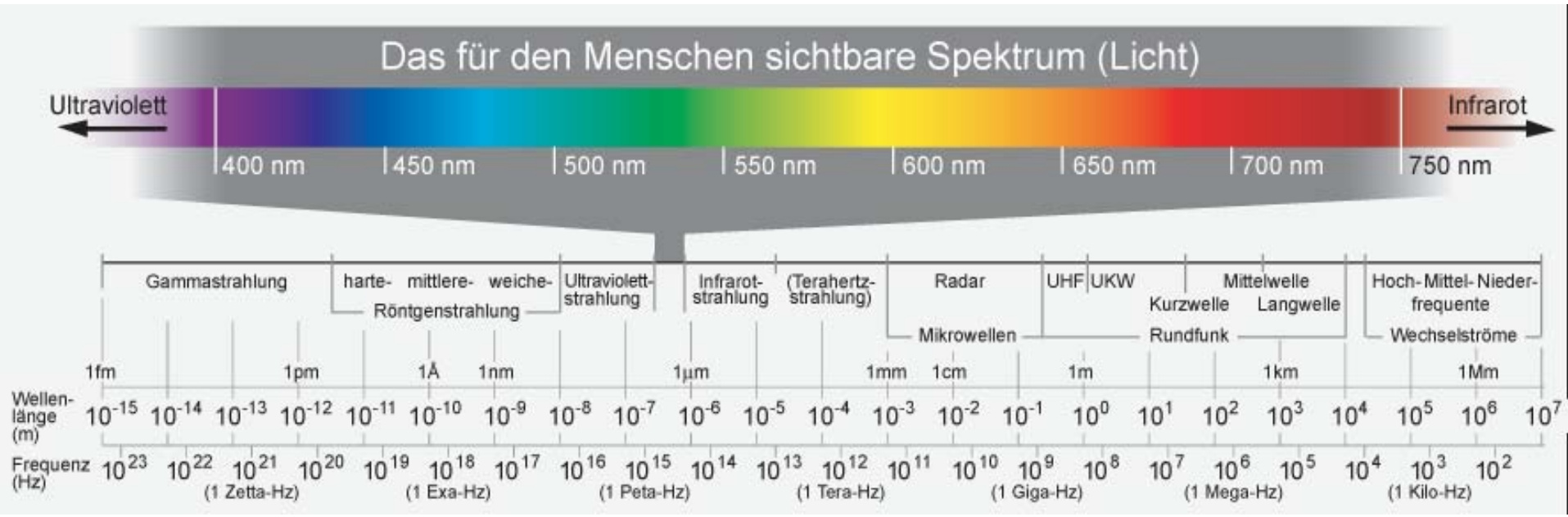
Elektronen und Löcher werden in die Sperrschicht gedrückt:
hohe Leitfähigkeit

<u>Sperr-Richtung</u>
Positive Spannung an Kathode (n)
Negative Spannung an Anode (p)

Elektronen und Löcher werden von der Sperrschicht weggezogen:
niedrige Leitfähigkeit

23. Doppelstunde

Spektrum elektromagnetischer Wellen



Gedämpfte freie Schwingung

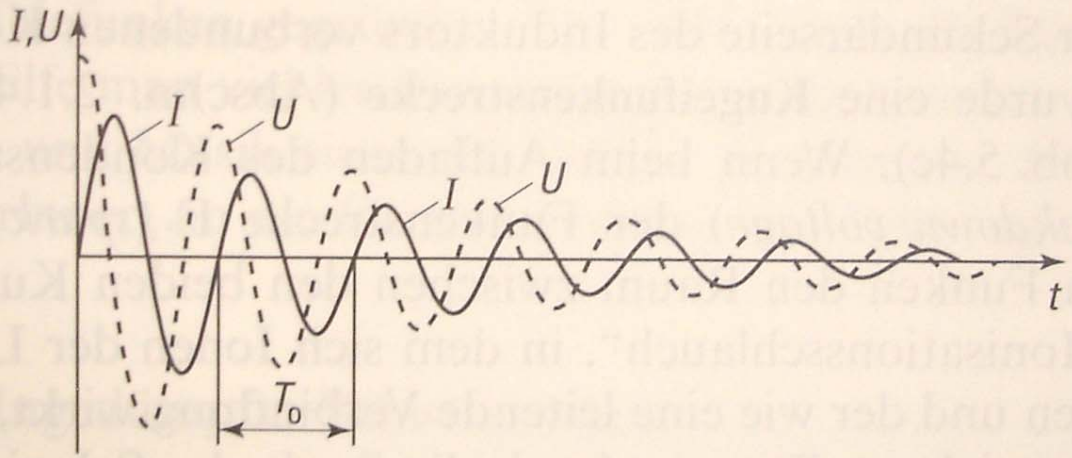


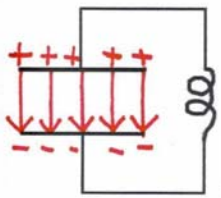
Abb. 5.3 Freie gedämpfte elektrische Schwingung: Die *U*-Kurve entspricht der Kondensatorspannung, die *I*-Kurve dem vom Kondensator abfließenden Strom.

Schwingkreis

1

$$E = max$$

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

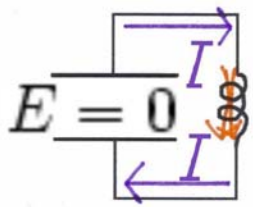


$$I = 0$$
$$H = 0$$
$$U = max$$

2

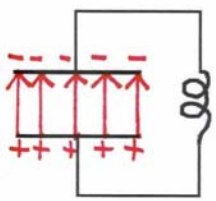
$$H = max$$

$$W_m = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

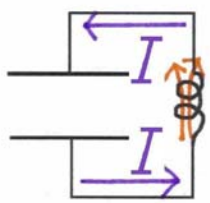


$$E = 0$$
$$I = max$$
$$U = 0$$

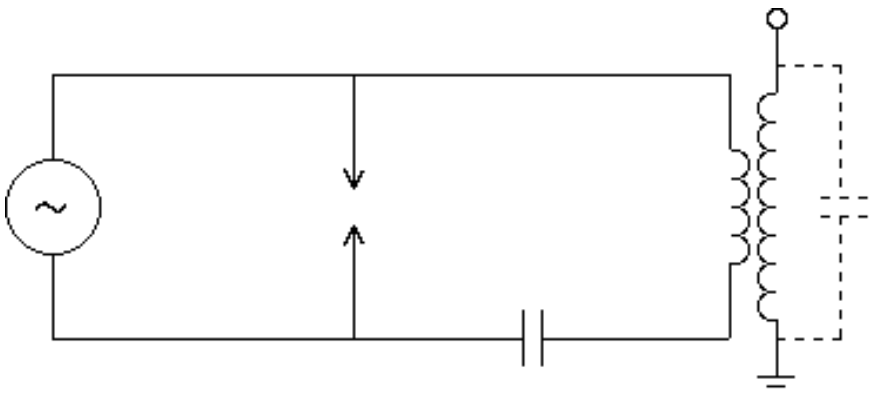
3



4



Tesla-Transformator



Erzwungene Schwingungen

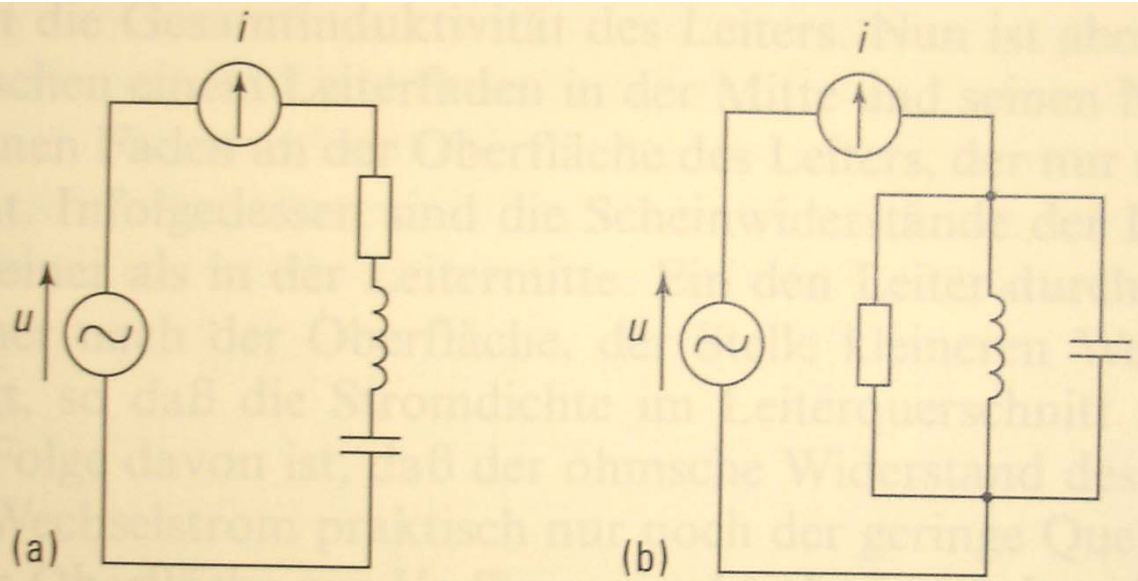


Abb. 5.12 *RLC*-Schwingkreise, angeschlossen an einen Hochfrequenzgenerator variabler Frequenz: (a) Reihenschwingkreis, (b) Parallelschwingkreis.

Resonanzkurven

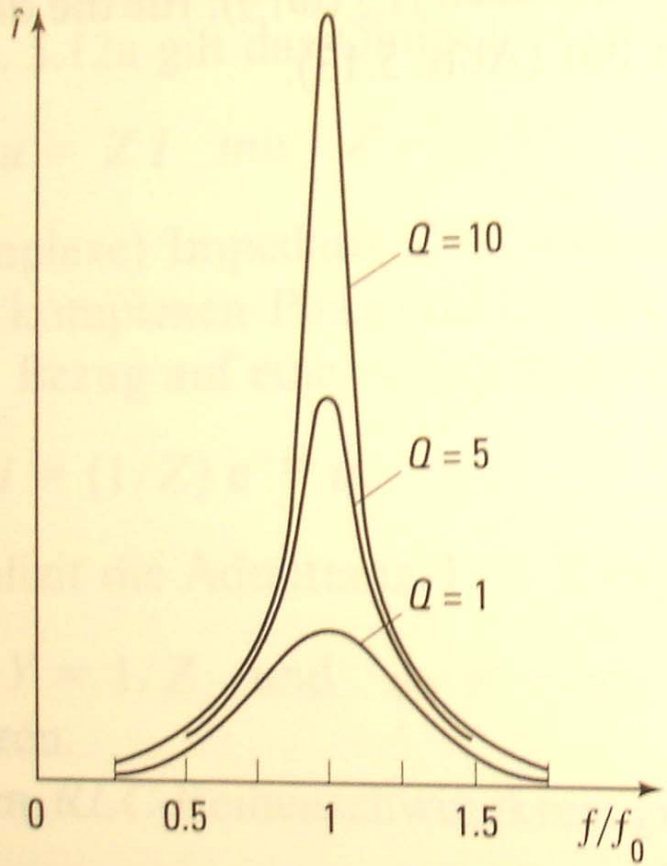


Abb. 5.14 Resonanzkurven verschiedener Güte Q.

Bandpässe

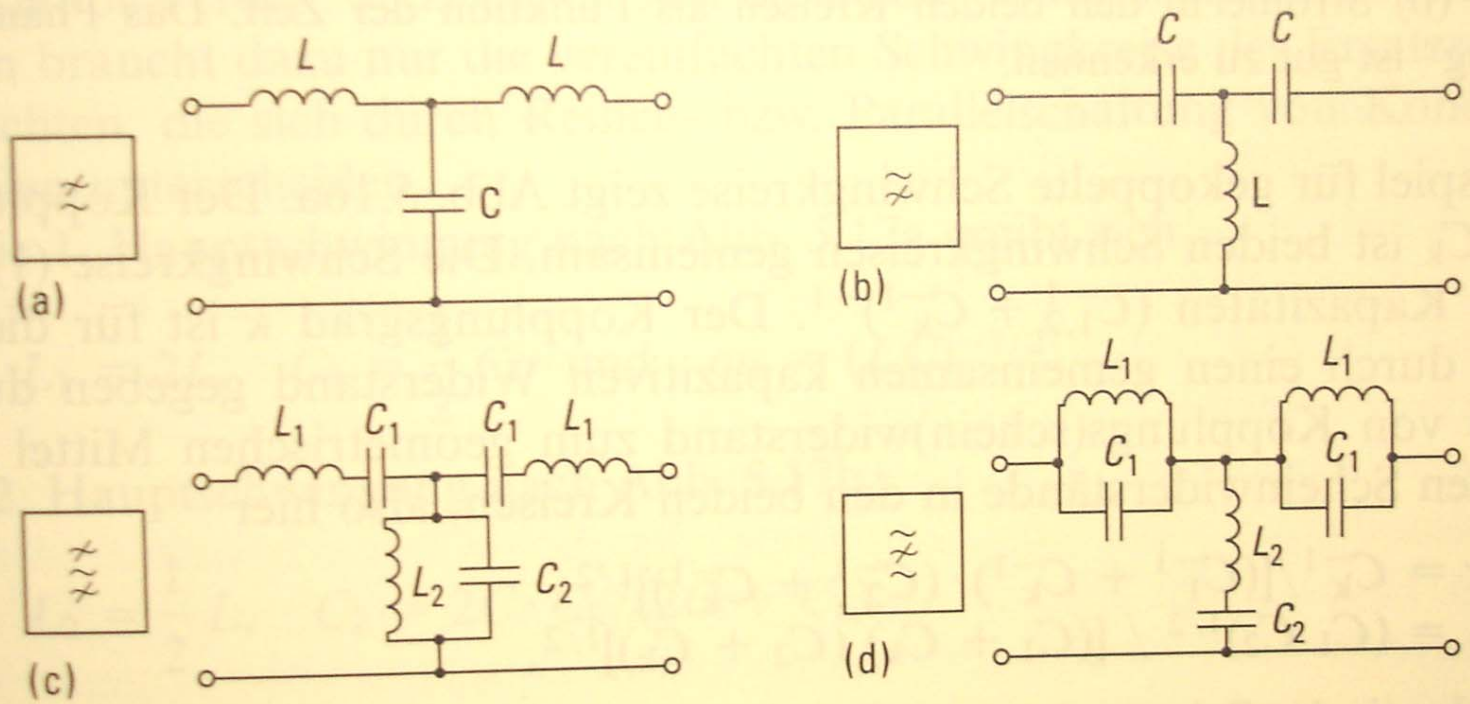
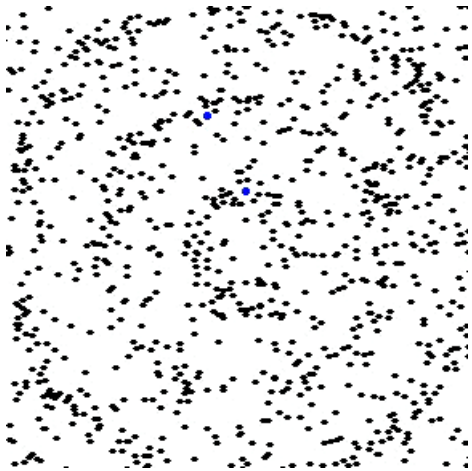
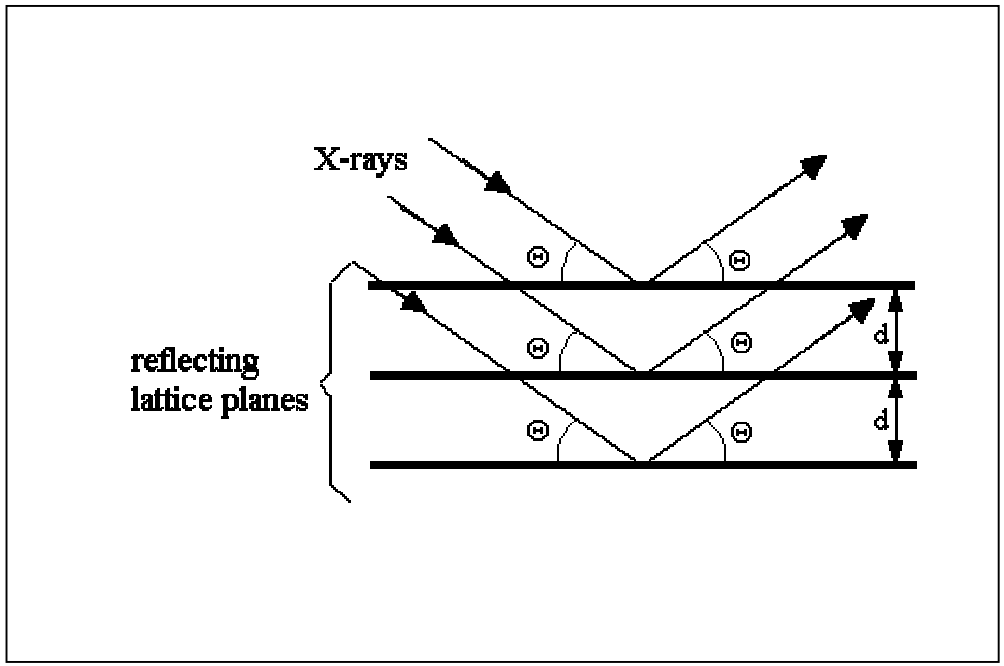
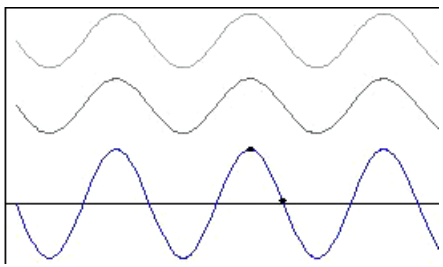


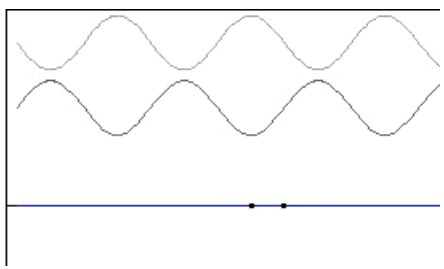
Abb. 5.15 *LC*-Kombinationen für Frequenzfilter und Block-Schaltzeichen: (a) Tiefpaß, (b) Hochpaß, (c) Bandpaß, (d) Sperrbandpaß.

Wellen machen es einfacher !







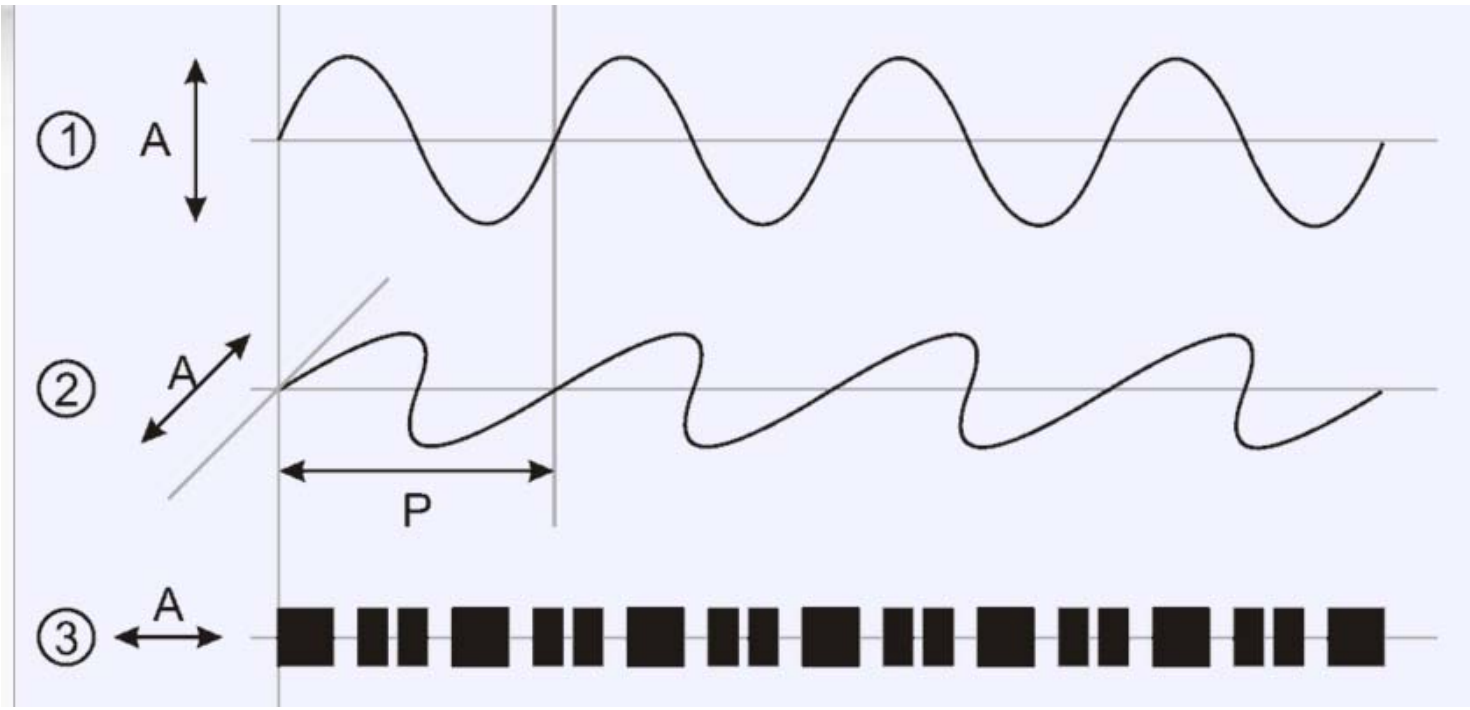


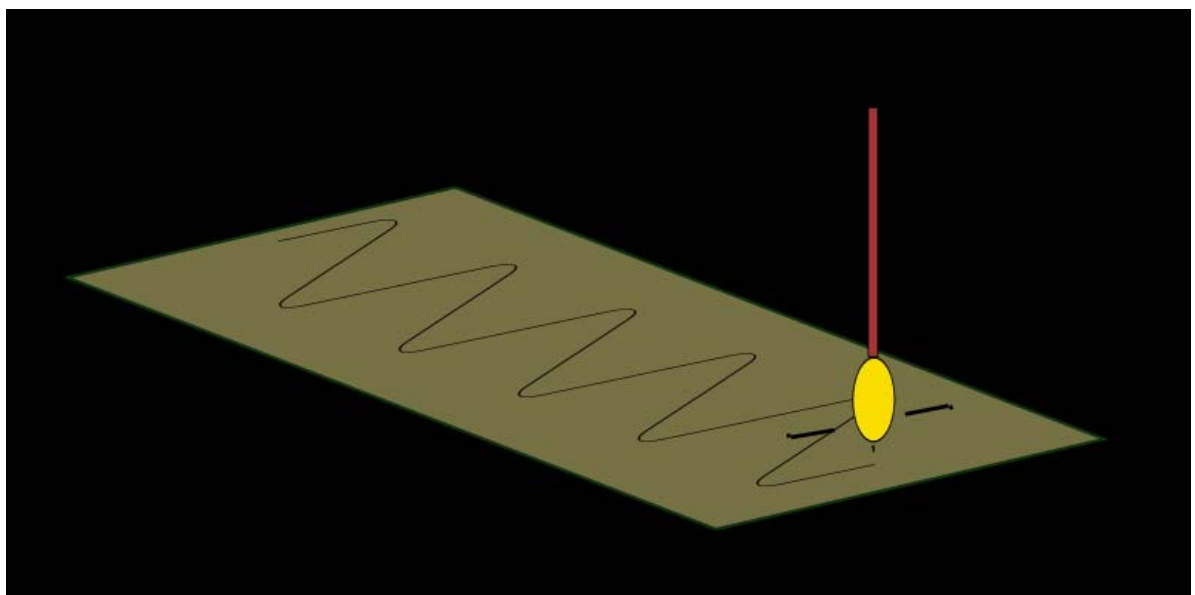
Licht ist eine elektromagnetische Welle

- Gitterschwingungen sind Wellen (Phononen)

- auch Elektronen verhalten sich wie Wellen

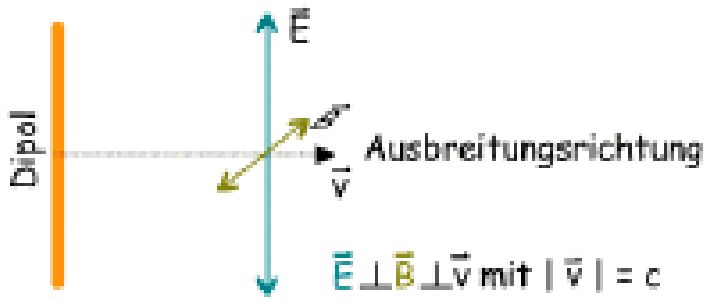
Wellen



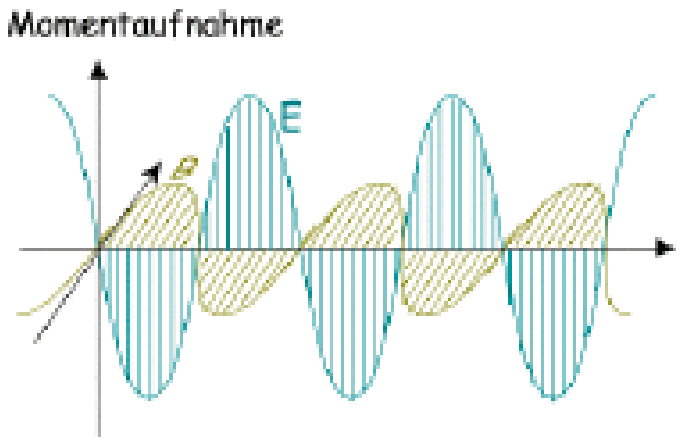


24. Doppelstunde

Elektromagnetische Wellen



Abgestrahlte Welle ist eine transversale elektromagnetische Welle



E und B sind gleichphasig und orthogonal zueinander sowie orthogonal zur Ausbreitungsrichtung

Überlagerung zweier linear polarisierter Wellen:

Fall 1. Beide Wellen sind in Phase, d.h. $\Delta\varphi = 0$

$$\vec{E}_1 = \hat{x} E_0 \exp i\left(\omega t - \vec{k}\vec{r}\right) \qquad \vec{E}_2 = \hat{z} E_0 \exp i\left(\omega t - \vec{k}\vec{r}\right)$$

Es ergibt sich wieder eine *linear polarisierte Welle*, aber mit gedrehter Polarisationsebene.

Fall 2. Die zweite Welle ist in der Phase um $\Delta\varphi \neq 0$ gegen die erste verschoben

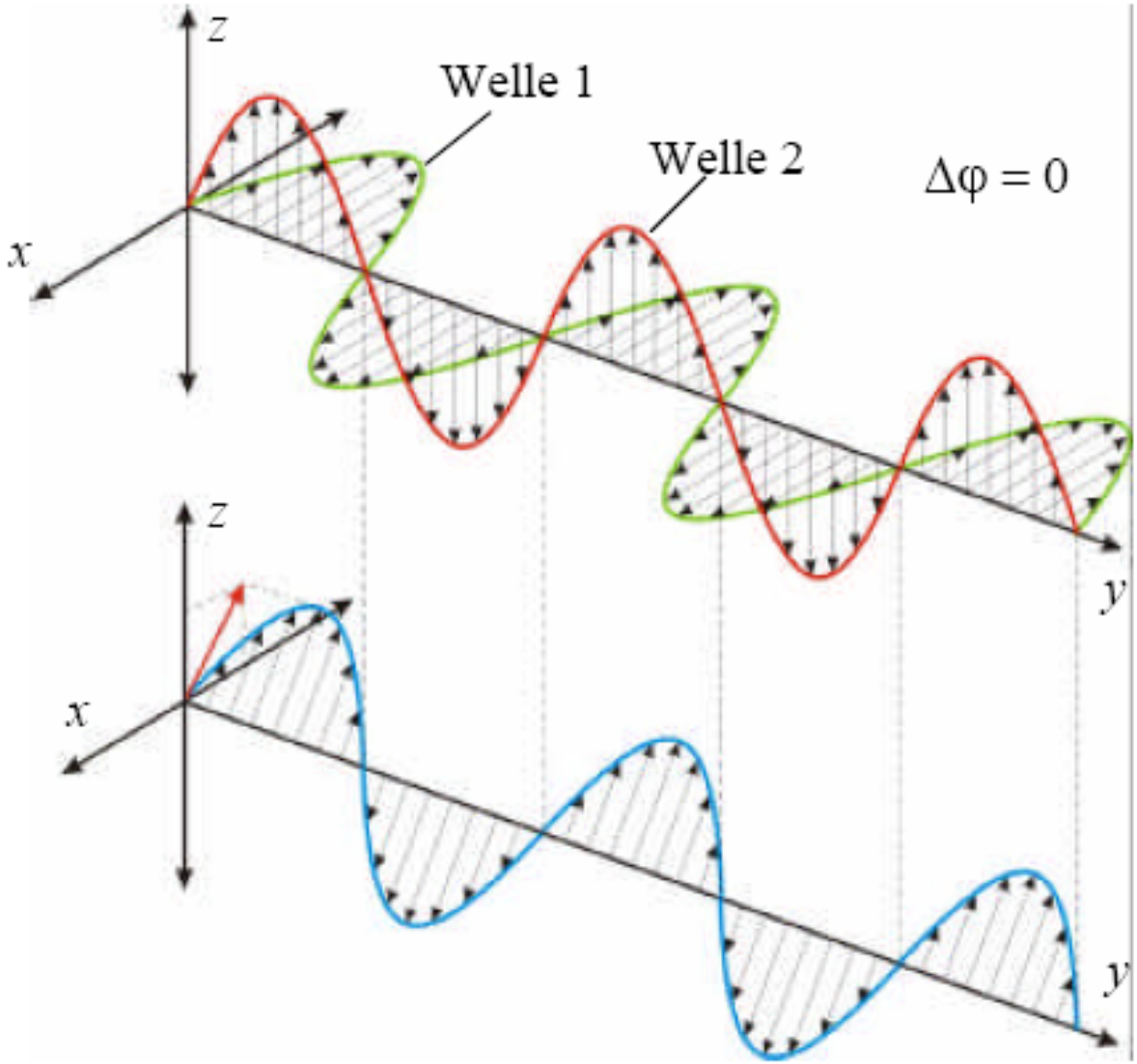
$$\vec{E}_1 = \hat{x} E_0 \exp i\left(\omega t - \vec{k}\vec{r}\right) \qquad \vec{E}_2 = \hat{z} E_0 \exp i\left(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \Delta\varphi\right)$$

mit

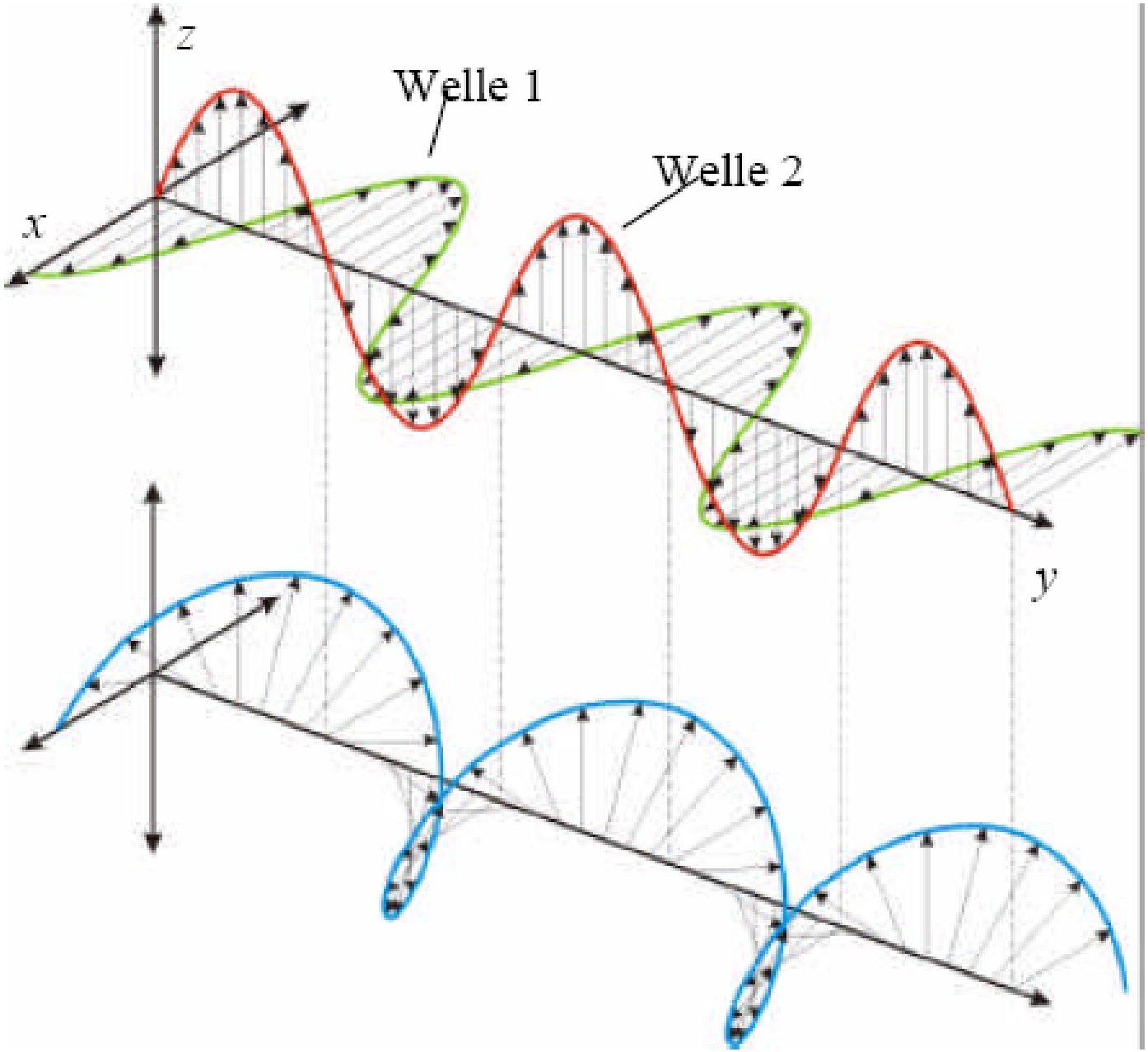
$$\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}$$

Es ergibt sich eine *zirkular polarisierte Welle*

Fall 1

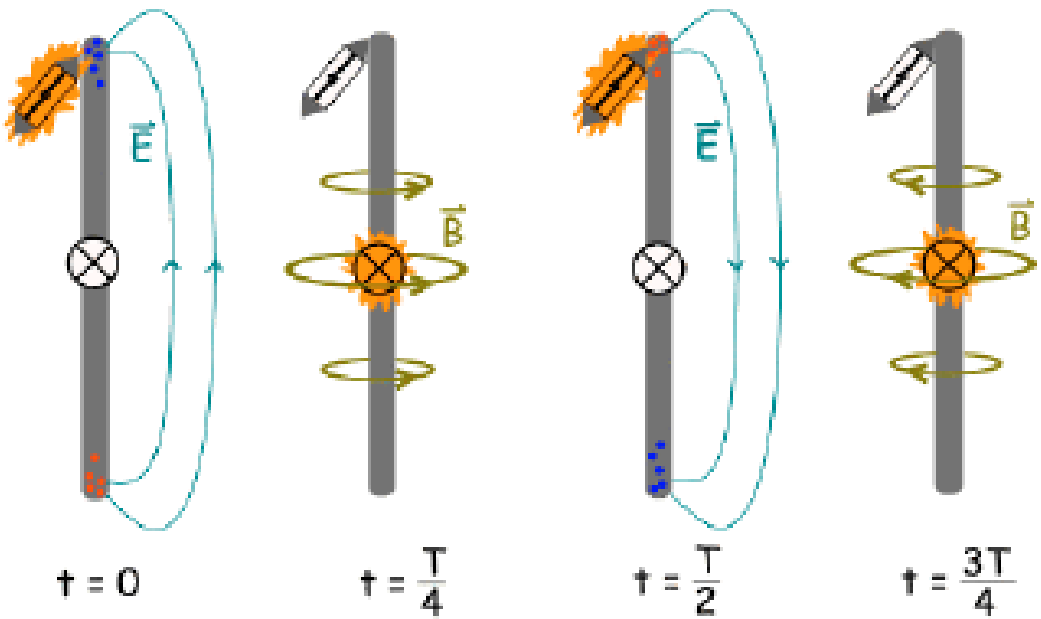


Fall 2

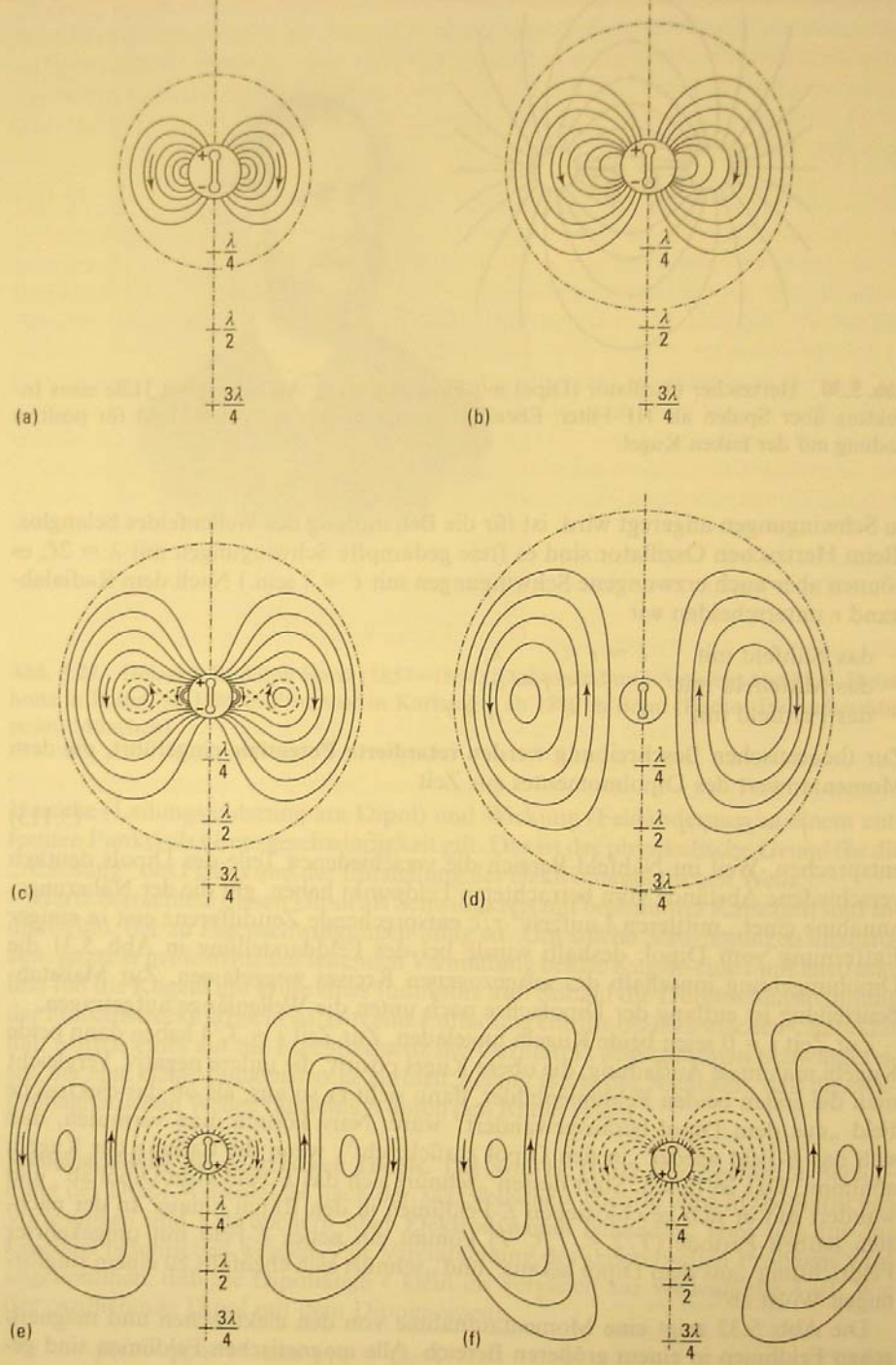


Zeitabhängige Verhältnisse am Dipol

Stabdipol: Felder in den einzelnen Schwingungsphasen



Dipol ist Schwingkreis:
Elektrische Feldenergie wird in magnetische umgewandelt und umgekehrt



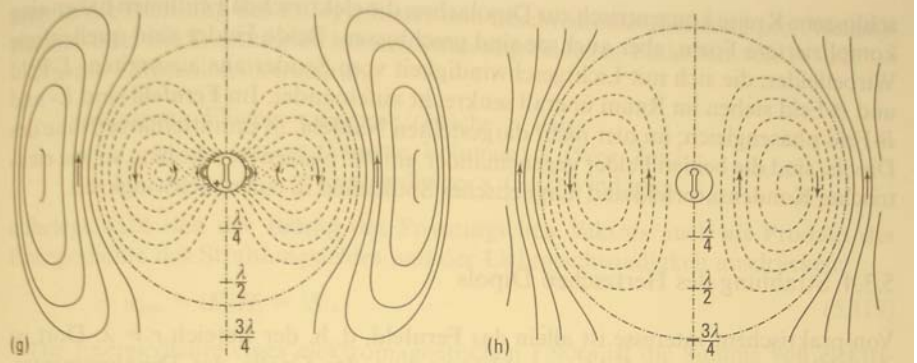
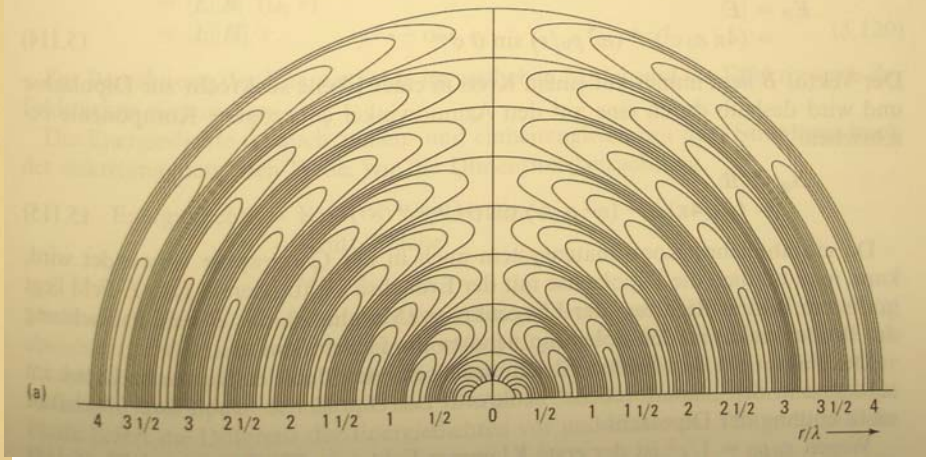


Abb. 5.31 Elektrisches Feld um einen Hertzschen Dipol: Bilder (a) – (h) entsprechen $t = T/8, T/4, 3T/8, T/2, 5T/8, 3T/4, 7T/8$ und T.



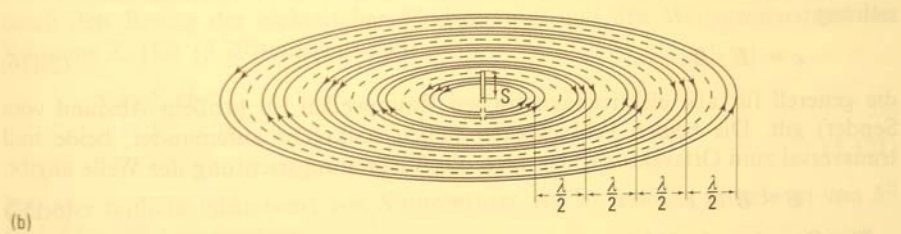
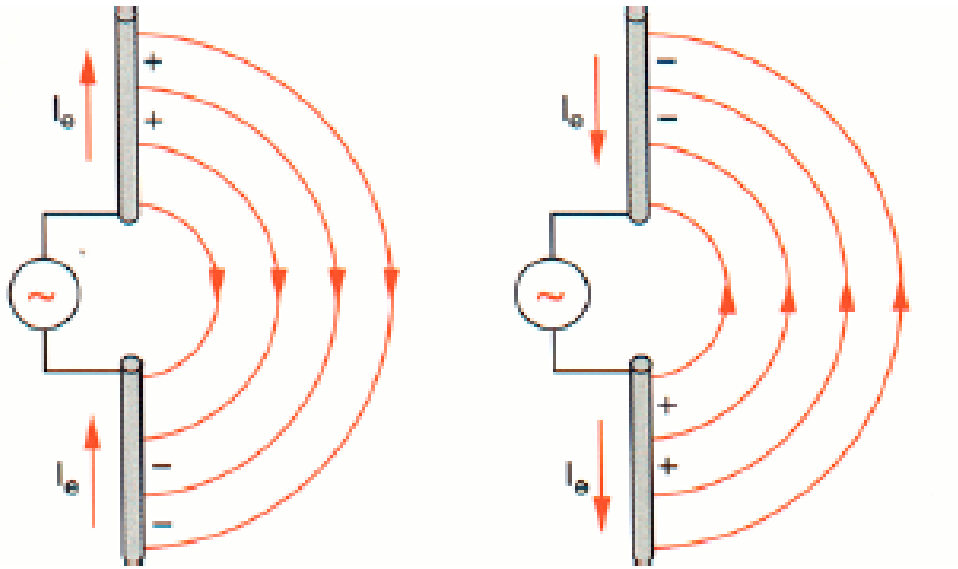


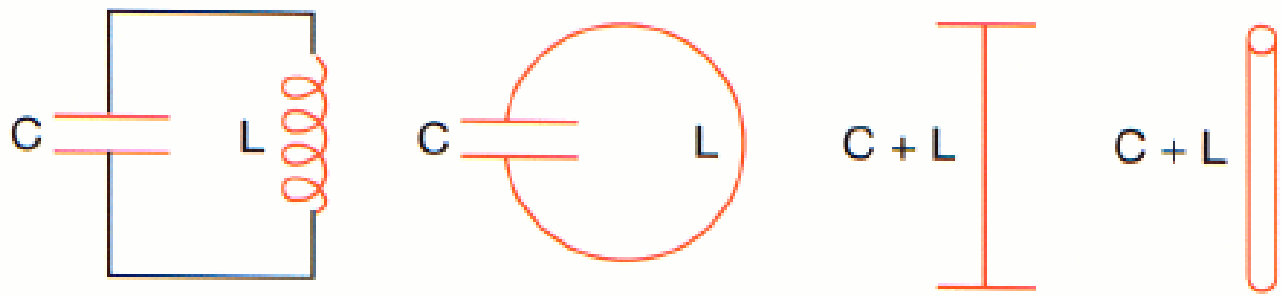
Abb. 5.32 Feldlinien um einen Hertzschen Dipol: (a) Elektrische Feldlinien in der Dipolebene oberhalb der Äquatorebene, (b) perspektivische Sicht auf die magnetischen Feldlinien in der Äquatorebene.

Erzwungene Schwingung



Ohmsche Verluste in Leiter und abgestrahlte Energie dämpfen Schwingkreis
Aufrechterhaltung durch Wechselspannugsquelle

Hertz'scher Dipol



C und L werden immer kleiner gemacht, damit erhöht sich die Resonanzfrequenz!

Extremfall: Ein Stück Leiter mit Länge l, wie groß wird die Resonanzfrequenz?

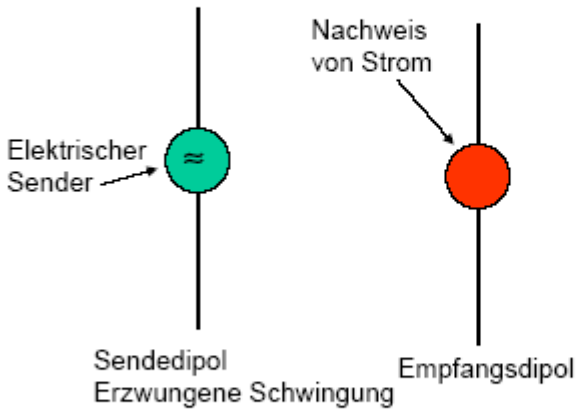
Leiter: $L = l\,L'$ Induktivität = Länge x Induktivität/Länge

$C = l\,\varepsilon\,C'$ Kapazität = Länge x Dielektrizitätskonstante der Umgebung x Kapazität/Länge

$$\omega_{res} = \frac{1}{l}\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}}\frac{1}{\sqrt{L'C'}}$$

ω_{res} steigt mit Verkürzung des Dipols und hängt von Umgebung ab

Hertzscher Dipol



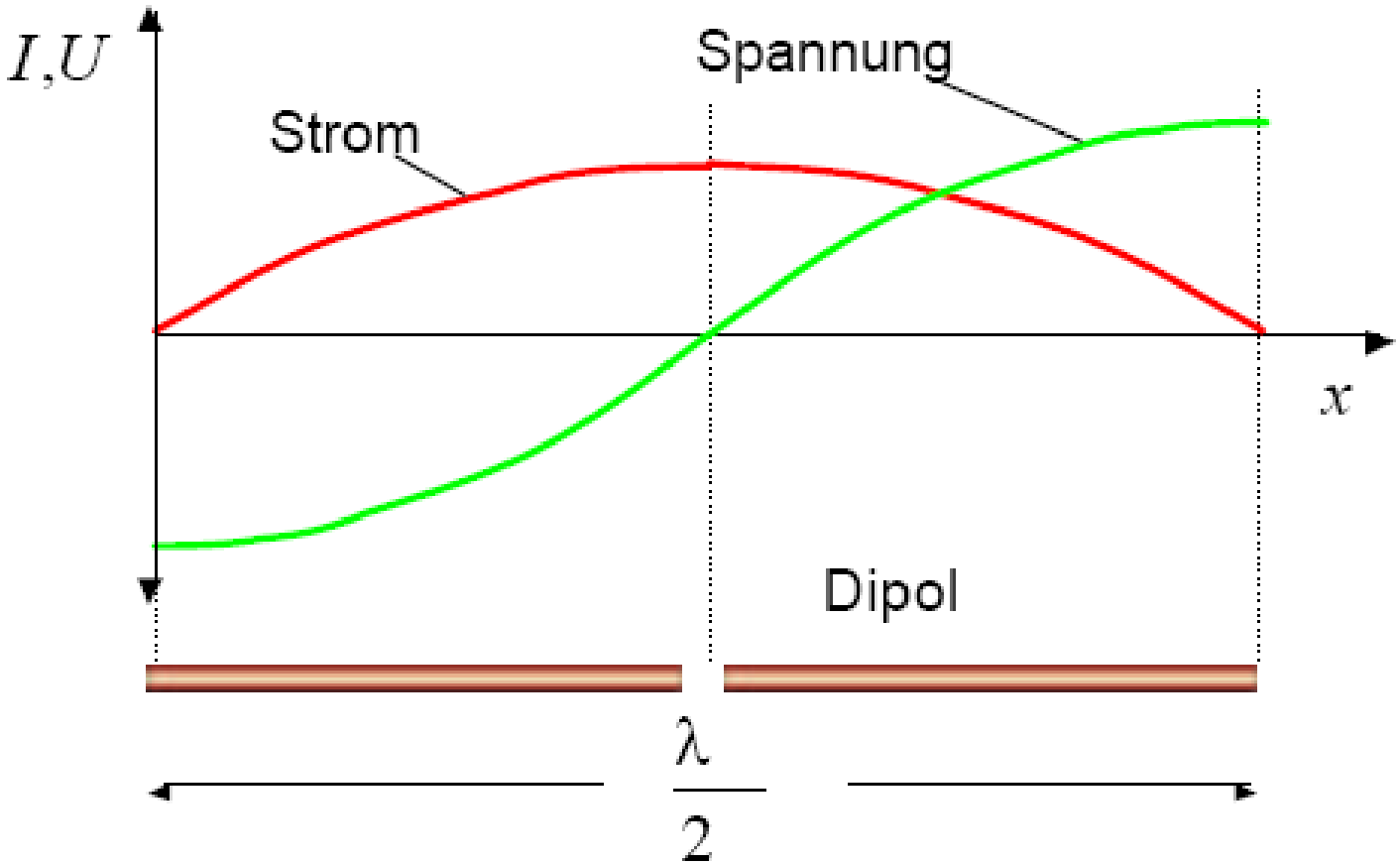
Optimaler Empfang, wenn Empfänger und Sender in Resonanz

$$\omega_{res} = \frac{1}{l}\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}}\frac{1}{\sqrt{L'C'}}$$

Abstimmung über Länge
Empfänger = Sender
oder
Dielektrizitätskonstante

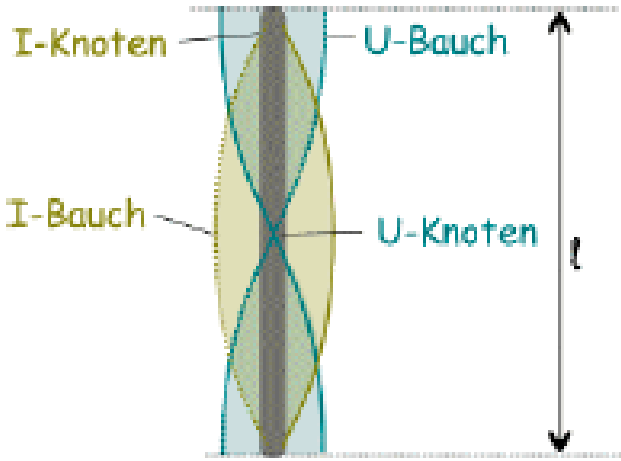
Sendedipol f = 125MHz
$\lambda = c/f = 2.4$m Wellenlänge

Strom- und Spannungsverteilung am Dipol



Ein optimal abgestimmter Dipol ist gleichermaßen gut zum Senden wie zum Empfangen von EM-Wellen.

Resonanz



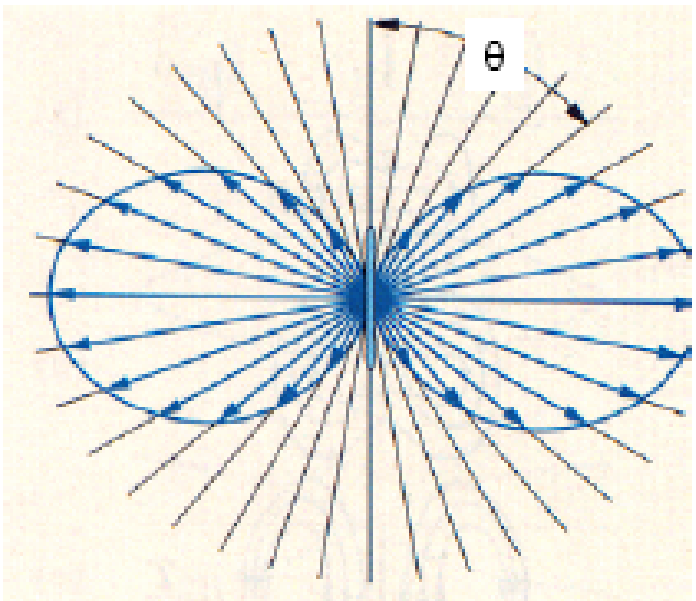
Damit vom Sender effektiv Energie abgestrahlt werden kann, muss er in Resonanz mit dem Dipol sein.

Resonanzbedingung: Wellenlänge muss gleich 2 l sein
Stationäre Strom und Spannungsverteilung

Experiment: Wellenlänge λ = 2,4 m $\Rightarrow$ Dipollänge =1,2m

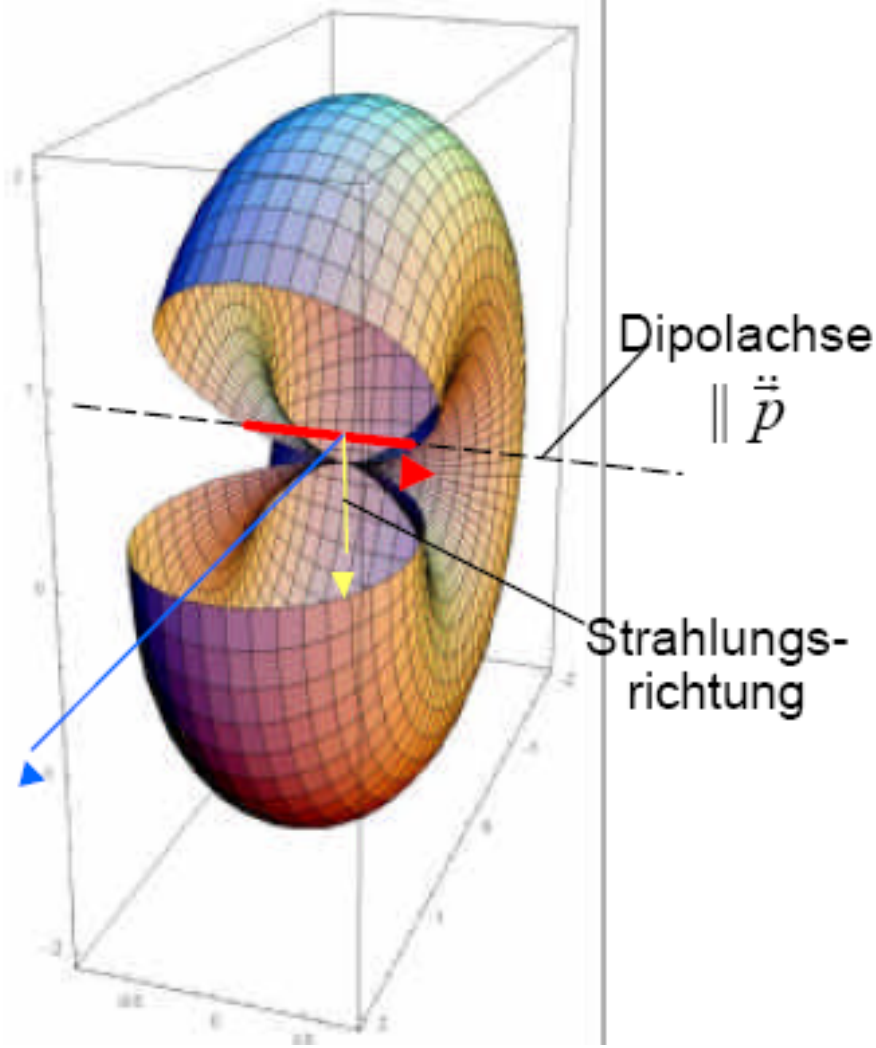
Abstrahlcharakteristik eines Dipols

In welche Richtung strahlt ein Dipol ab?



Die maximale Abstrahlung erfolgt normal zur Dipolachse
Keine Abstrahlung in Richtung der Dipolachse
$P(\theta)$ prop $\sin(\theta)^2$

Strahlungscharakteristik eines Hertz'schen Dipols



In Richtung der Dipolachse wird keine Strahlung emittiert, also

$$\frac{dP_{\text{str}}}{d\Omega} = 0$$

wenn $\vec{n} \parallel \ddot{\vec{p}}$

Die maximale Strahlungsleistung wird senkrecht zur Dipolachse abgestrahlt, d.h. wenn

$$\vec{n} \perp \ddot{\vec{p}}$$

Erste Funkverbindung zwischen Cornwall und Neufundland

G. Marconi (1901)

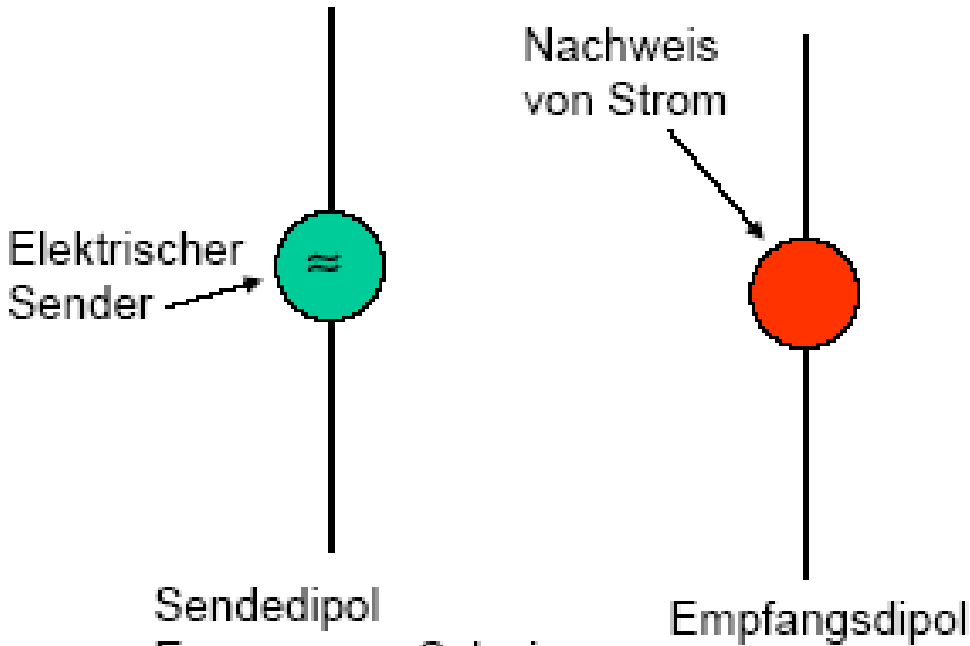
Morse Code: • • • = „S“ (success)

Sendeantenne an 4 Masten von 61 m
Empfangsantenne 122 m am Drachen

Marconis Empfangsstation in Neufundland ⇒

25. Doppelstunde

Hertzscher Dipol

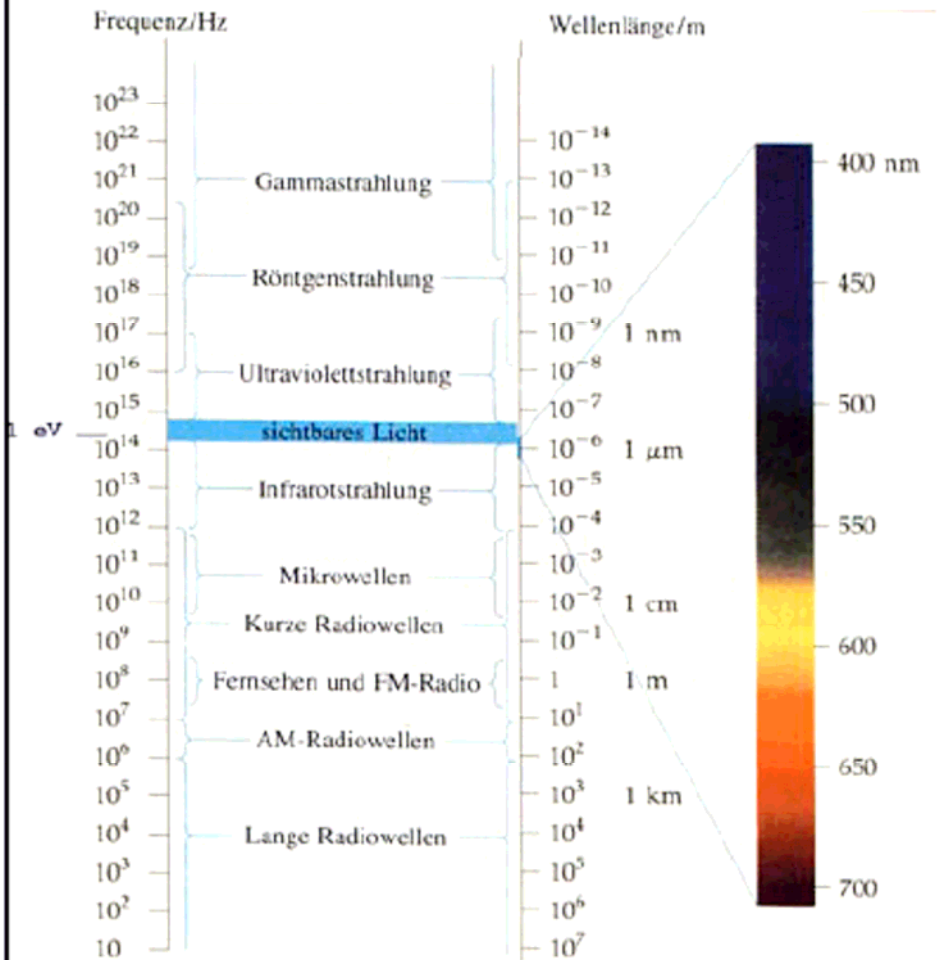


Optimaler Empfang, wenn Empfänger und Sender in Resonanz

$$\omega_{res} = \frac{1}{l}\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}}\frac{1}{\sqrt{L'C'}}$$

Sendedipol f = 125MHz
$\lambda = c/f = 2.4m$ Wellenlänge

Abstimmung über Länge
Empfänger = Sender
oder
Dielektrizitätskonstante



Elektro-magnetisches Spektrum

Transversale EM Wellen

Wellenlänge λ
Frequenz f
Lichtgeschwindigkeit c
($2.998\ 10^8$ m/s)

$$\lambda = \frac{c}{f} \qquad \text{Vakuum}$$

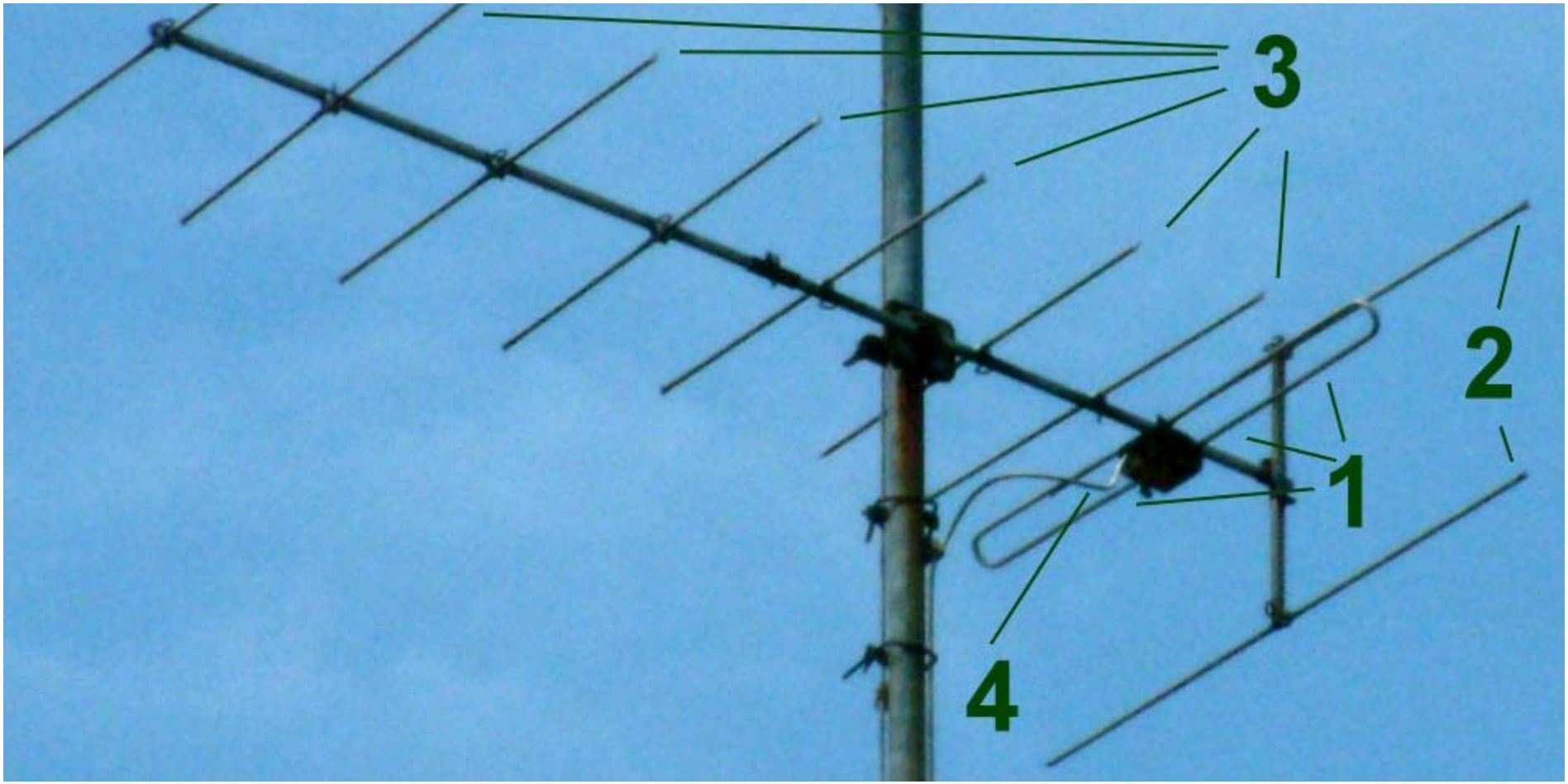
$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} \frac{c}{f}$$

Medium mit Dielektrizitätskonstante ε_r und Permeabilität μ_r

Fernsehantenne

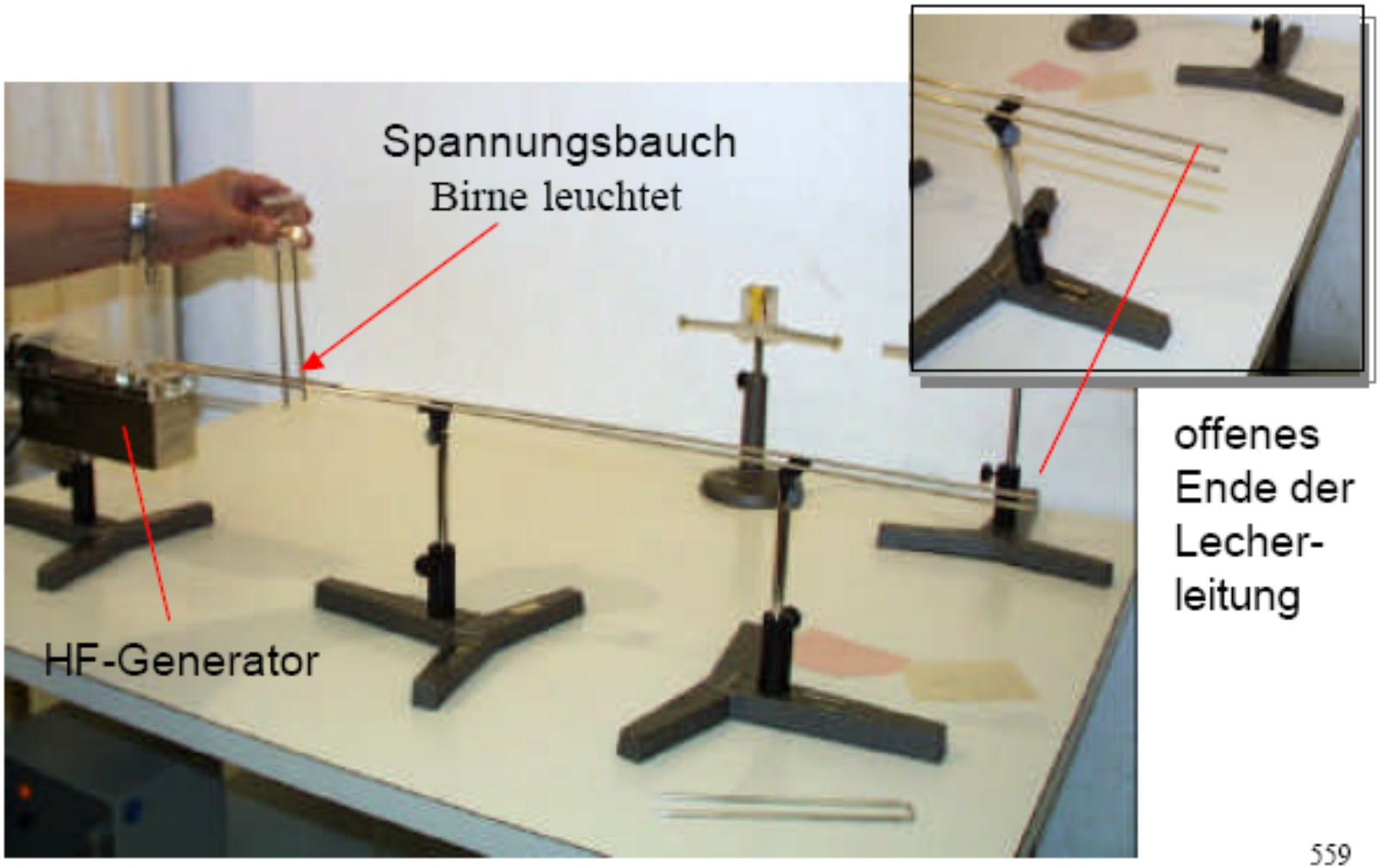
70cm-Antenne (Amateurfunk)

Yagi (Uda)-Antenne 1926

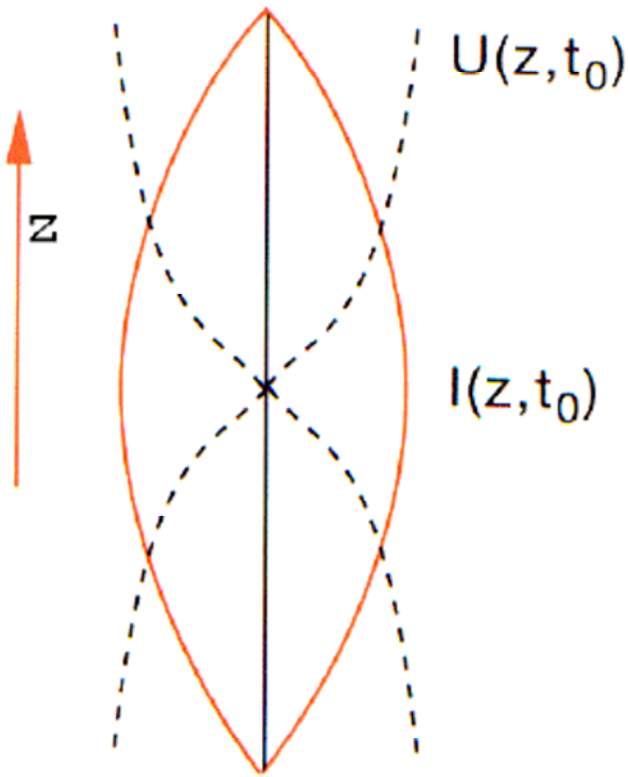


1 Faltdipol mit Einspeiseleitung (4)
2 Reflektoren
3 Direktoren

Versuch: stehende Welle auf der Lecherleitung (1)



Nachweis der Verteilung

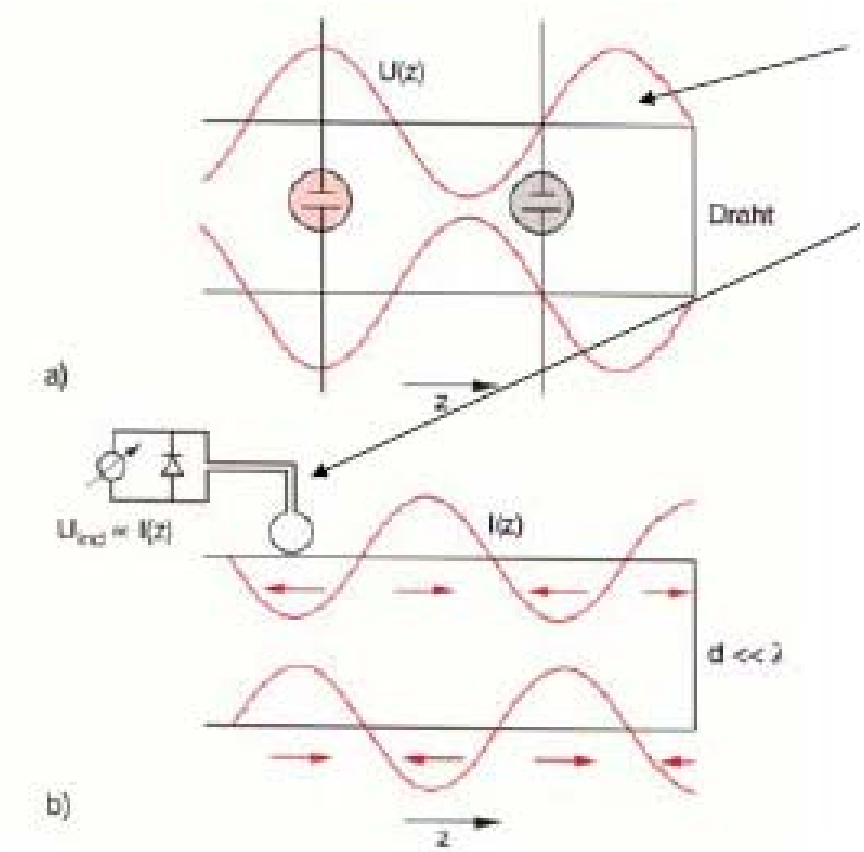


Schleife mit Glimmlampe
Nachweis von B bzw I

Entladungslampe
Nachweis von E bzw U

Spannung auf Leiter hängt vom Ort ab!!! Stehende Welle

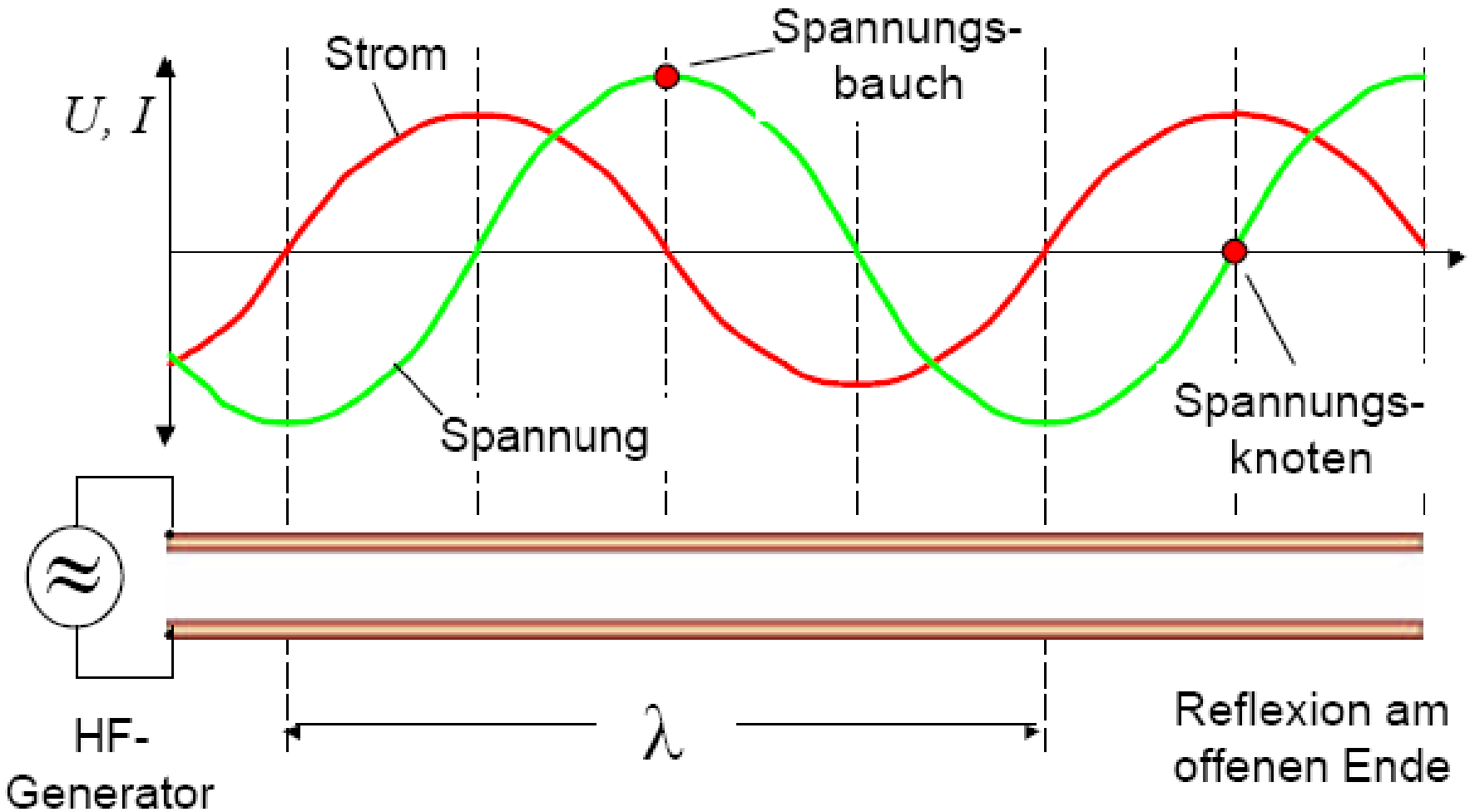
Lecherleitung



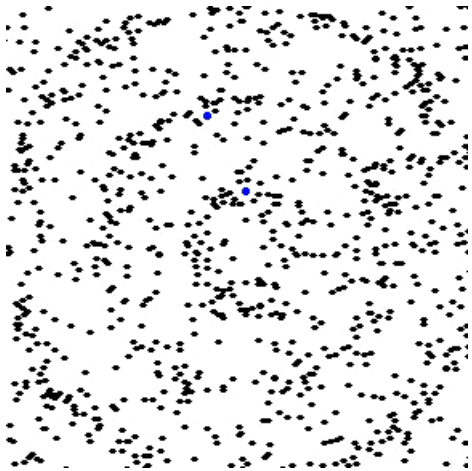
Nachweis von Spannung

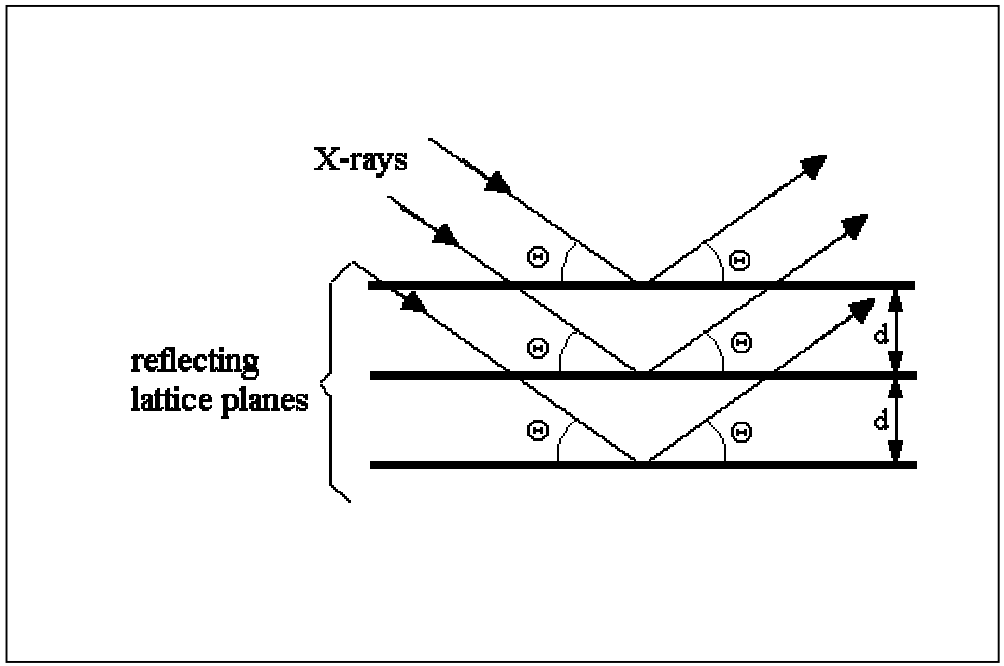
Nachweis von Strom

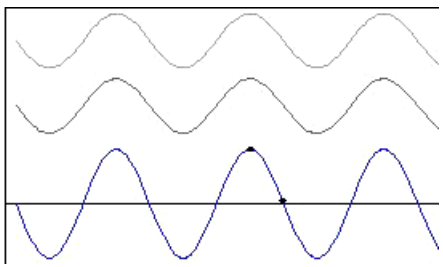
Strom und Spannung auf der Lecherleitung („stehende Welle)

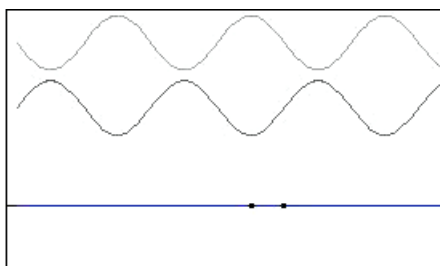


Wellen machen es einfacher !







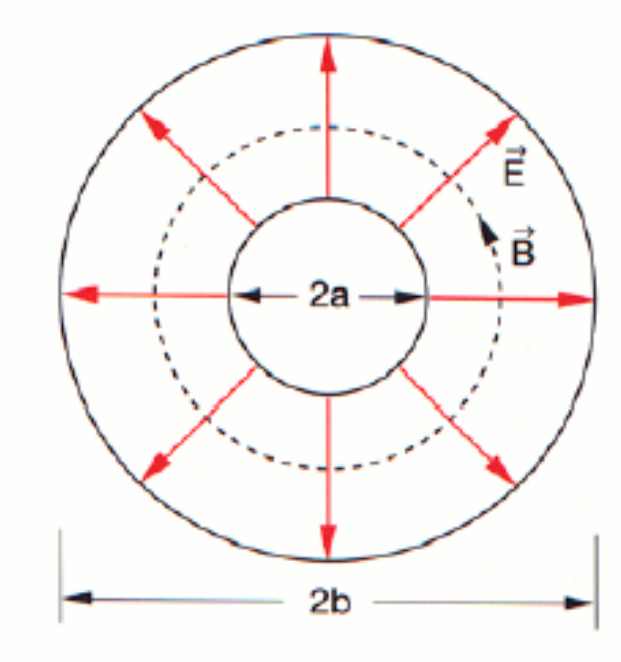


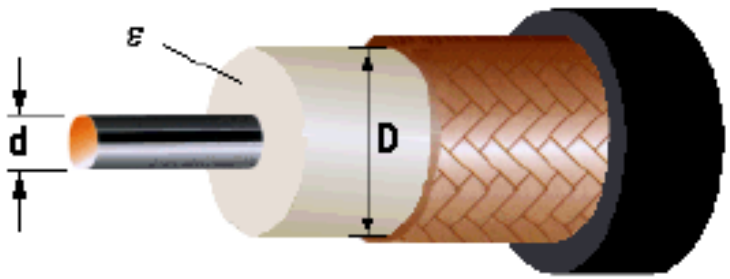
Licht ist eine elektromagnetische Welle

- Gitterschwingungen sind Wellen (Phononen)

- auch Elektronen verhalten sich wie Wellen

Koaxialkabel

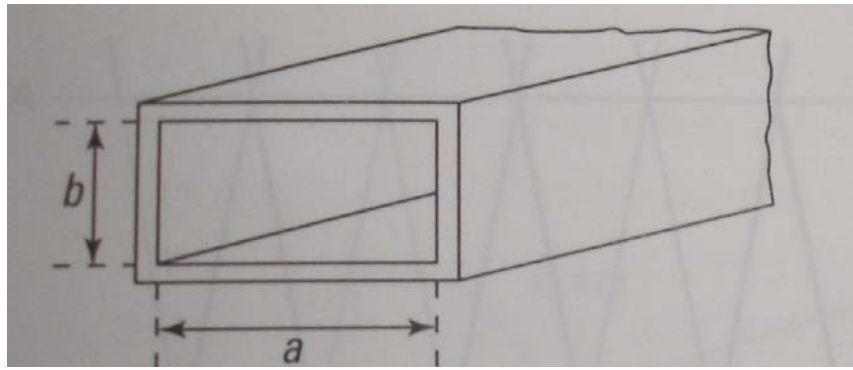




Hier dient der äußere (geerdete) Mantel als Abschirmung. Die elektromagnetischen Wellen können nicht nach außen entweichen. Der Innenraum ist meist mit einem Dielektrikum ausgefüllt.

Hohlleiter für Mikrowellen in einem Flugzeugradar (Sowjetunion)

Rechteckhohlleiter



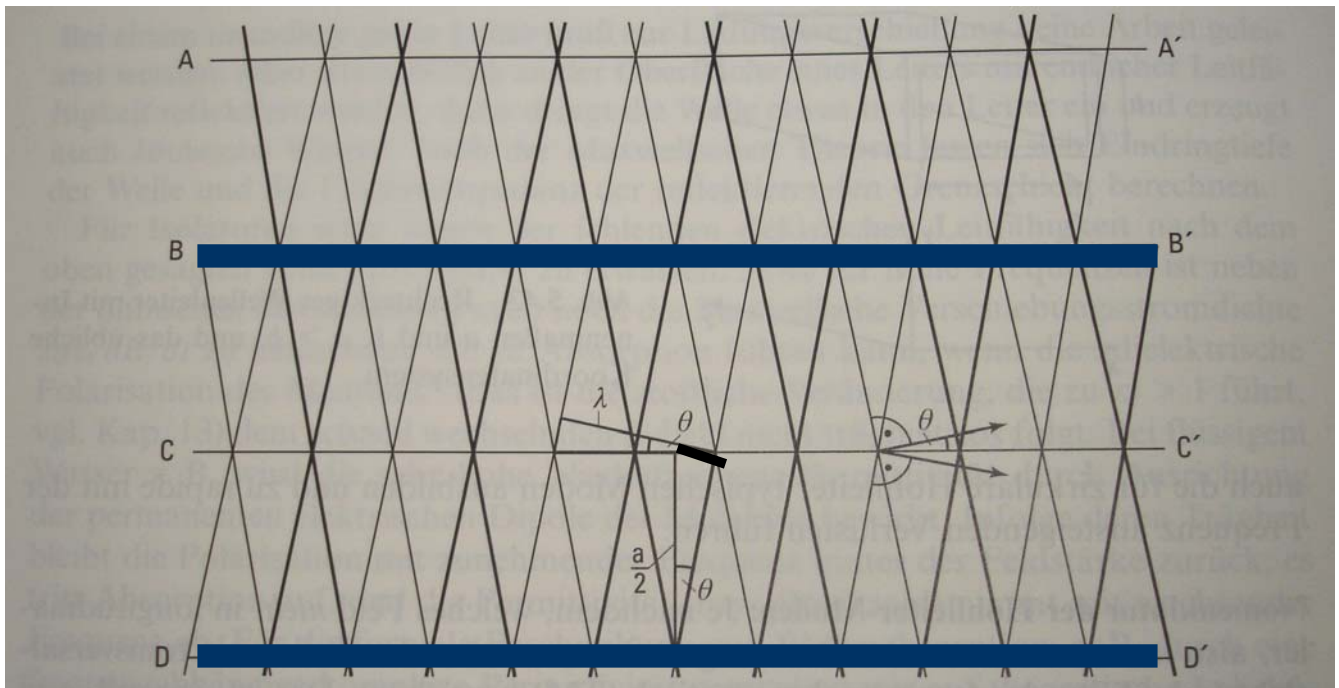


Abb. 5.44 Überlagerung von zwei schräg zueinander laufenden ebenen Wellen gleicher Frequenz und Amplitude. Die Linien BB′ und DD′ markieren Knotenebenen der Wellenüberlagerung.

Linie B-B‘ und
D-D‘ E-Feld 0 !

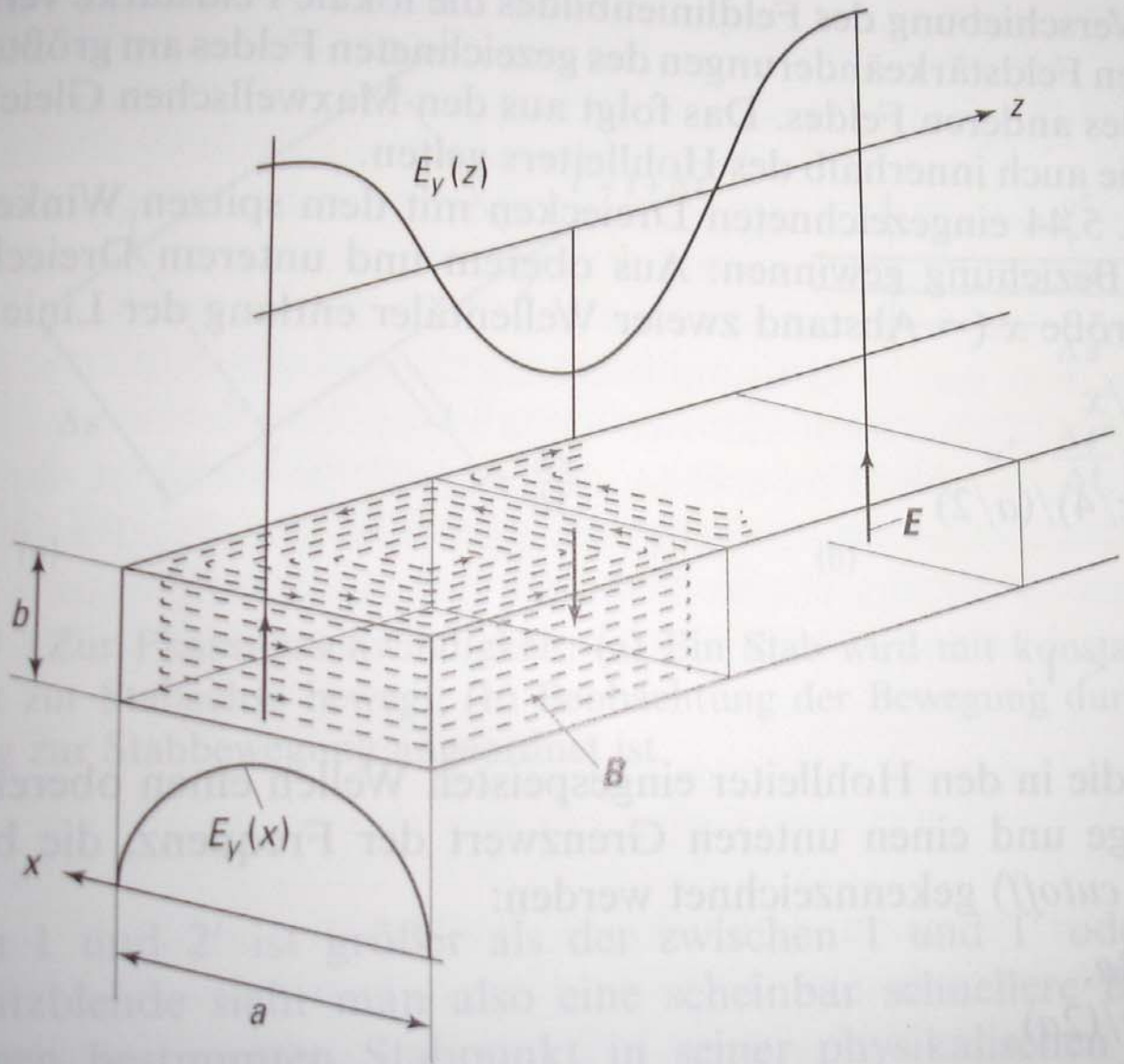
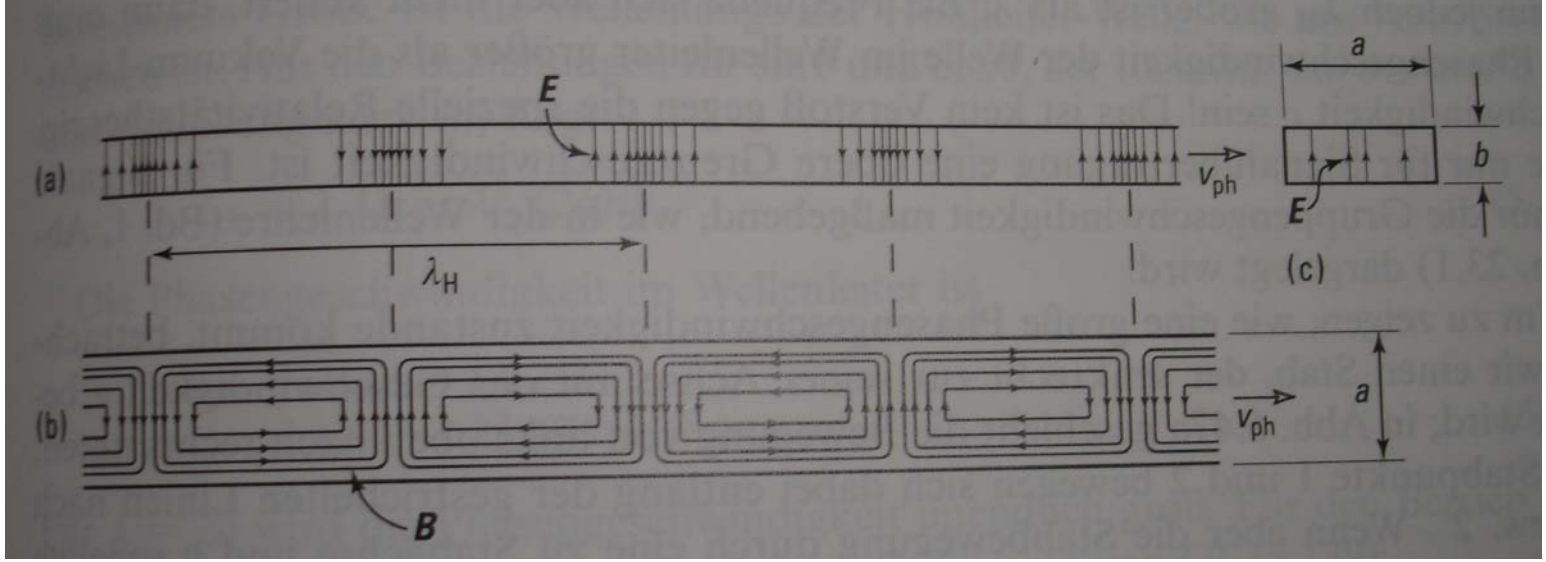


Abb. 5.45 TE_{10}-Welle: Die örtliche Veränderung der Feldkomponente E_y ist durch Kurven dargestellt. Gestrichelte Linien zeigen das B-Feld.



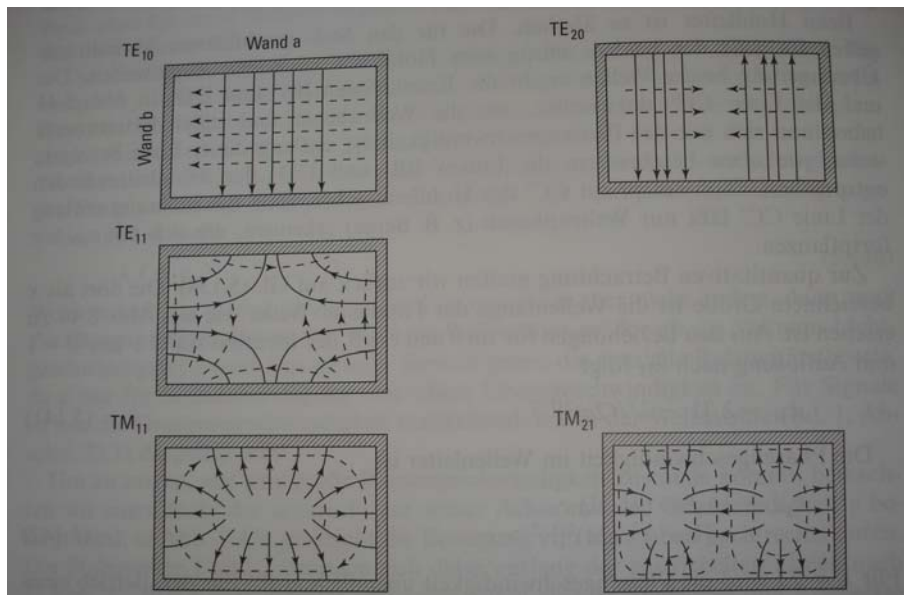


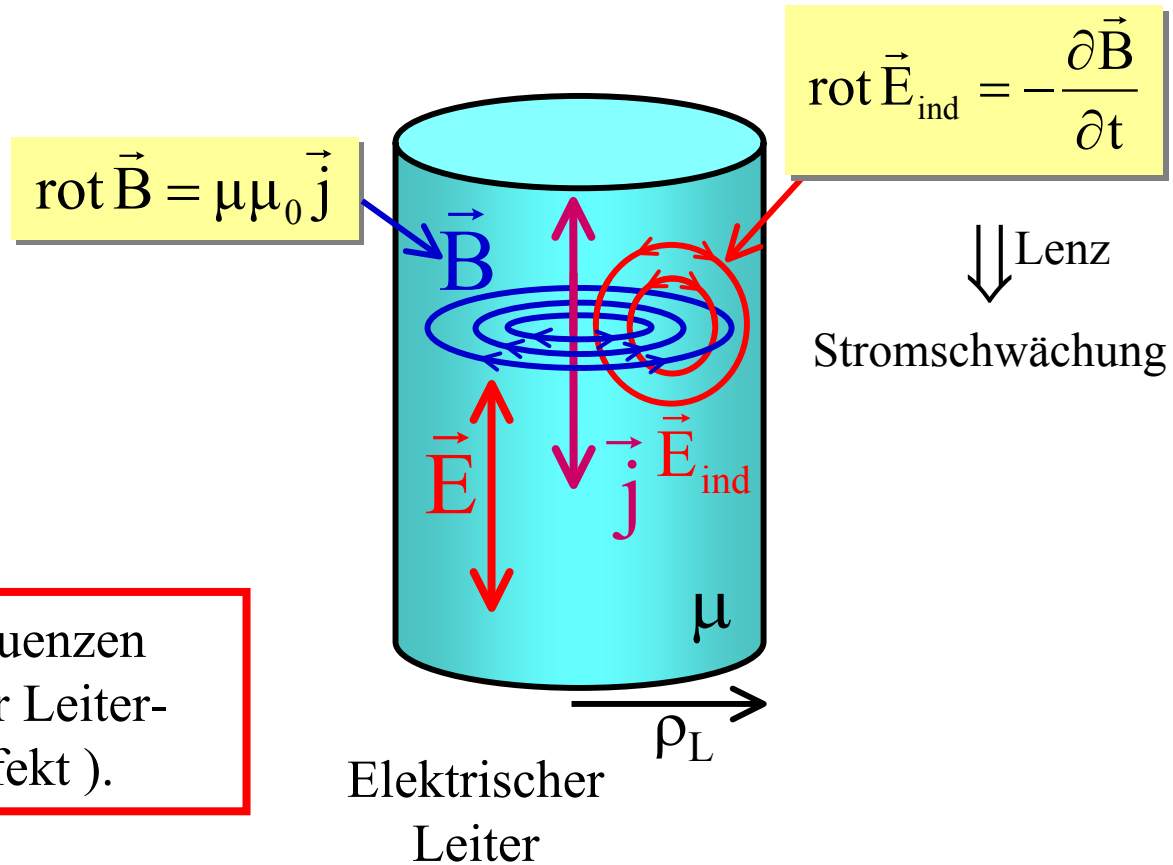
Abb. 5.48 Querschnitte mit *E*-Feldern (ausgezogen) und *B*-Feldern (gestrichelt) für verschiedene Moden von TE- und TM-Wellen.

26. Doppelstunde

Hochfrequenzleitung: Der Skineffekt

Elektrischer Leiter → ohmscher Widerstand und Induktivität: $Z = R + i\omega L$

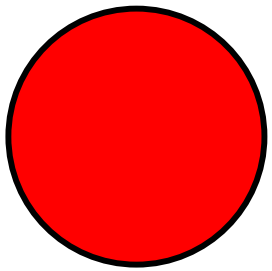
$\Rightarrow$ induktive Effekte dominieren für $\omega > R/L$ (typisch $\nu \gtrsim O(\mathrm{MHz})$)



Folgerung: Bei hohen Frequenzen können Ströme nur nahe der Leiter-Oberfläche fließen (Skineffekt).

$$d = \sqrt{\frac{2}{\mu\mu_0\sigma_{el}\omega}}$$

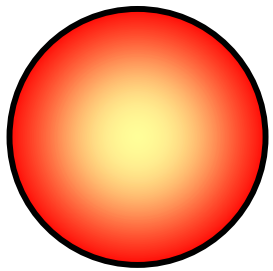
$\omega \to 0$



$$R \propto \frac{1}{\pi\rho_L^2}$$

$\propto 1/\text{Volumen}$

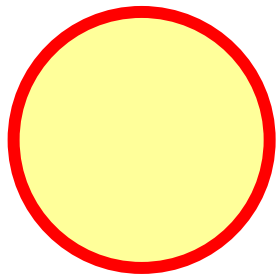
Übergangsbereich



$$R \propto \frac{1}{2\pi\rho_L d} \propto \sqrt{\omega}$$

$\propto$ (effektives) durchströmtes Volumen

$\omega \to \infty$



$$R \propto \frac{1}{2\pi\rho_L}$$

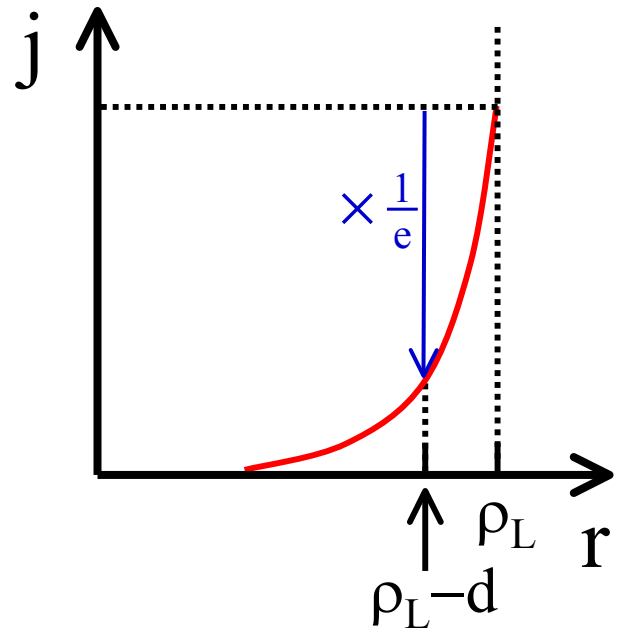
$\propto 1/\text{Oberfläche}$

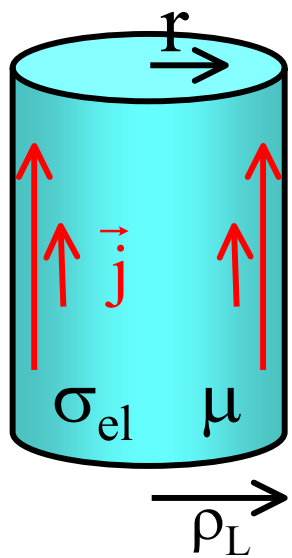
- HF-Spannungen sind relativ ungefährlich
- Eisendrähte (großes μ) sind schlechte HF-Leiter
- Gute HF-Leitung bei großer Oberfläche ($\to$ Hohlrohre, Litzen, ...)

Quantitative Untersuchung ($\rightarrow$ Theorie) $\Rightarrow$ Eindringtiefe des Stroms

$$d = \sqrt{\frac{2}{\mu\mu_0\sigma_{el}\omega}}$$

$$j \propto \exp\left(\frac{r-\rho_L}{d}\right)$$

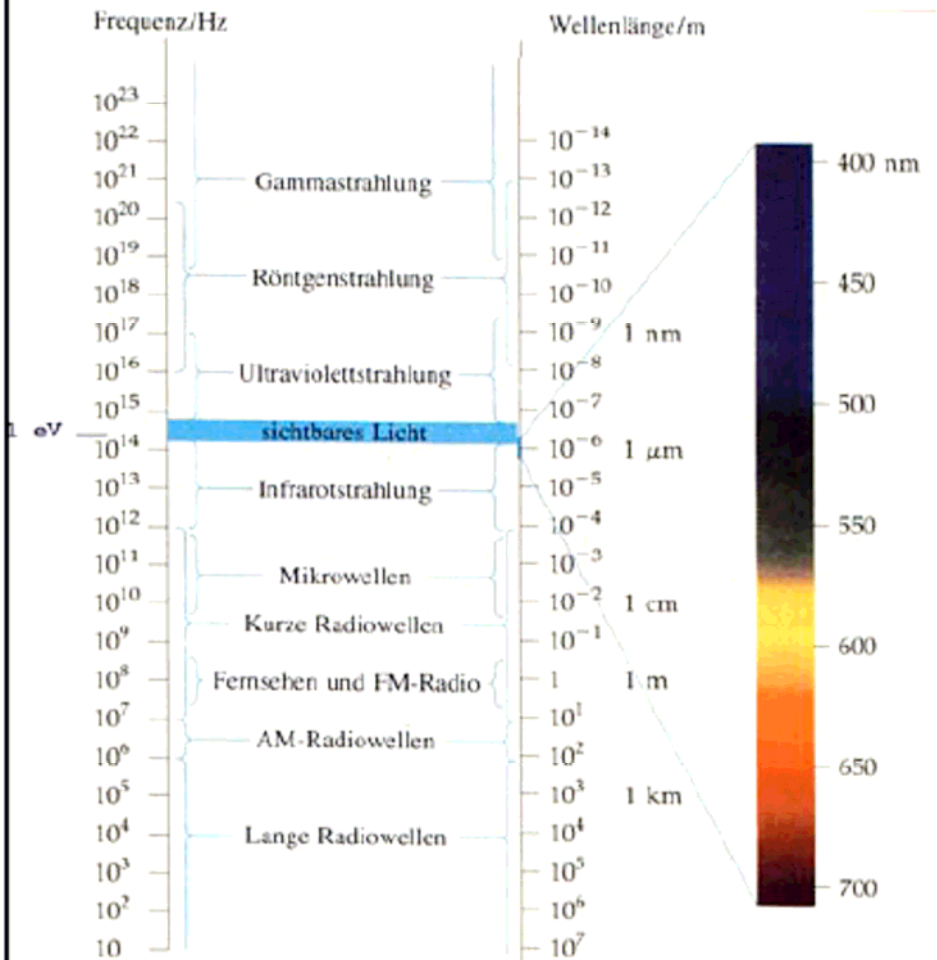




<u>Beispiel:</u> Kupferleiter

ν [Hz]	d [mm]
50	94
10^3	2
10^6	0,07

27. Doppelstunde



Elektro-magnetisches Spektrum

Transversale EM Wellen

Wellenlänge λ
Frequenz f
Lichtgeschwindigkeit c
($2.998\ 10^8$ m/s)

$$\lambda = \frac{c}{f} \qquad \text{Vakuum}$$

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} \frac{c}{f}$$

Medium mit Dielektrizitätskonstante ε_r und Permeabilität μ_r

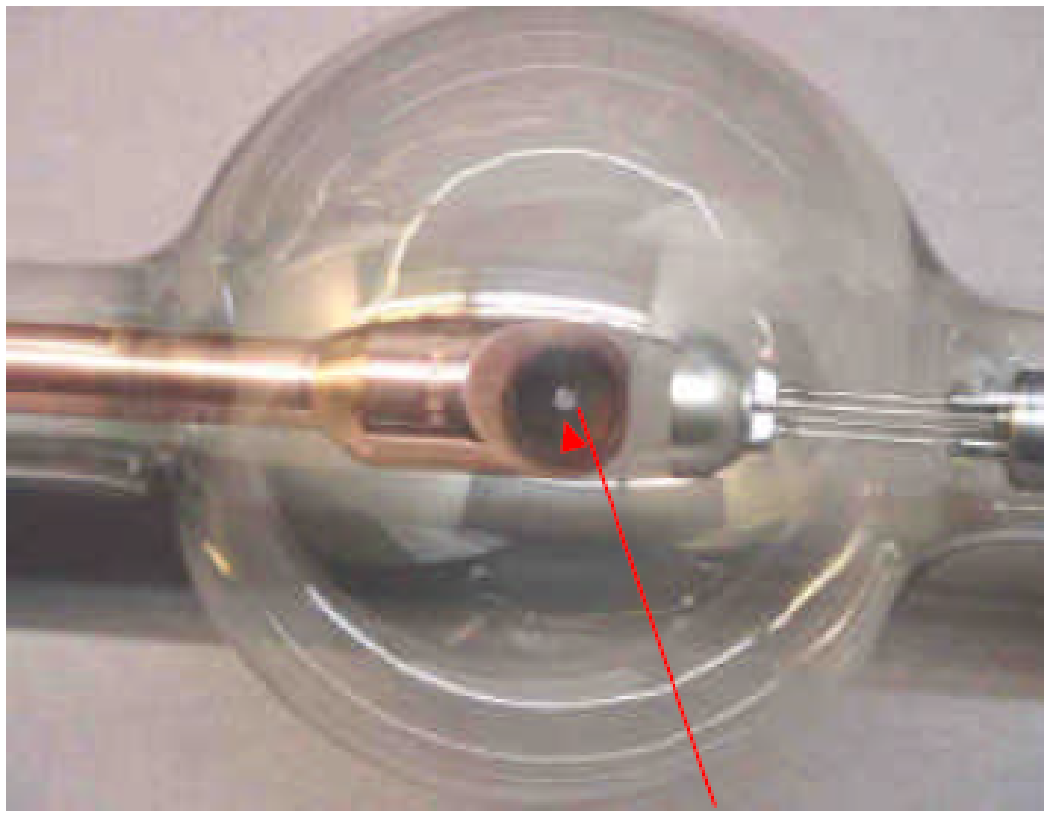
Bezeichnung	Wellenlänge	Frequenz	Photonen-Energie	Erzeugung / Anregung	Technischer Einsatz
Niederfrequenz *Längstwellen* (VLF, ULF, ELF, SLF)	> 10 km	< 30 kHz	< $2{,}0 \cdot 10^{-29}$ J < 120 peV	Bodendipol, Antennenanlagen	U-Boot Kommunikation (DHO38, ZEVS, Sanguine, SAQ), Funknavigation
Radiowellen	< 10 km	> 30 kHz		elektr. Schwingkreis + Antenne	
Langwelle (LW)	< 10 km	> 30 kHz	> $2{,}0 \cdot 10^{-29}$ J > 120 peV		Langwellenrundfunk
Mittelwelle (MW)	< 650 m	> 650 kHz	> $4{,}3 \cdot 10^{-28}$ J > 2,7 neV		Mittelwellenrundfunk
Kurzwelle (KW)	< 180 m	> 1,7 MHz	> $1{,}1 \cdot 10^{-27}$ J > 6,9 neV		Kurzwellenrundfunk
Ultrakurzwelle (UKW)	< 10 m	> 30 MHz	> $2{,}0 \cdot 10^{-26}$ J > 120 neV	Anregung von Kernspinresonanz	Rundfunk, Fernsehen, Radar, Magnetresonanztomografie
Mikrowellen	1 mm - 1 m	300 MHz - 300 GHz	>$2{,}0 \cdot 10^{-25}$ J > 1,2 µeV	Magnetron, Klystron, Maser, kosmische Hintergrundstrahlung Anregung von Elektronenspinresonanz, Molekülschwingungen, Molekülrotationen	Radar

Dezimeterwellen	10 cm - 1 m	300 MHz- 3 GHz	> 2,0 · 10^{-25} J > 1,2 µeV	Anregung von Kernspinresonanz	Magnetresonanztomografie, Mobilfunk, Fernsehen, Mikrowellenherd, WLAN
Zentimeterwellen	1 cm - 10 cm	3 - 30 GHz	> 2,0 · 10^{-24} J > 12 µeV		Radioastronomie, Richtfunk, Satellitenfernsehen, WLAN
Millimeterwellen	1 mm - 1 cm	30 - 300 GHz	> 2,0 · 10^{-23} J > 120 µeV		Radioastronomie, Richtfunk
Terahertzstrahlung	30 µm - 3 mm	0,1 THz - 10 THz	> 6,6 · 10^{-23} J > 0.4 meV	Synchrotron, Freie-Elektronen-Laser	Radioastronomie, Spektroskopie, Abbildungsverfahren
Infrarotstrahlung (Wärmestrahlung)	< 1,0 mm	> 300 GHz		Wärmestrahler, Synchrotron Anregung äußerer Elektronen	IR-Spektrometer, Infrarotastronomie
Fernes Infrarot	< 1,0 mm	> 300 GHz	> 2,0 · 10^{-22} J > 1,2 meV		
Mittleres Infrarot	< 50 µm	> 6,00 THz	> 4,0 · 10^{-21} J > 25 meV	Kohlendioxidlaser	
Nahes Infrarot	< 2,5 µm	> 120 THz	> 8,0 · 10^{-20} J > 500 meV	Nd:YAG-Laser, Laserdiode	Fernbedienung, Datenkommunikation (IRDA), CD

Licht	< 780 nm	> 384 THz	> $2{,}6 \cdot 10^{-19}$ J > 1,6 eV	Wärmestrahler(Glühbirne), Gasentladung(Neonröhre), Farbstoff- und andere Laser, Synchrotron Anregung von Valenzelektronen	Beleuchtung, Colorimetrie, Fotometrie
Rot	640 - 780 nm	384 - 468 THz			DVD, Laserpointer
Orange	600 - 640 nm	468 - 500 THz			
Gelb	570 - 600 nm	500 - 526 THz			
Grün	490 - 570 nm	526 - 612 THz			
Blau	430 - 490 nm	612 - 697 THz			
Violett	380 - 430 nm	697 - 789 THz			Blu-ray Disc
UV-Strahlen	< 380 nm	> 789 THz	> $5{,}2 \cdot 10^{-19}$ J > 3,3 eV		Desinfektion, UV-Licht, Spektroskopie
schwache UV-Strahlen	< 380 nm	> 789 THz	> $5{,}2 \cdot 10^{-19}$ J > 3,3 eV	Gasentladung, Synchrotron, Excimerlaser	Schwarzlicht Fluoreszenz, Phosphoreszenz, Banknotenprüfung, Fotolithografie
Starke UV-Strahlen	< 200 nm	> 1,5 PHz	> $2{,}0 \cdot 10^{-19}$ J > 6,2 eV	Gasentladung, Synchrotron,	

UV-Strahlen	< 380 nm	> 789 THz	> $5{,}2 \cdot 10^{-19}$ J > 3,3 eV		Desinfektion, UV-Licht, Spektroskopie
schwache UV-Strahlen	< 380 nm	> 789 THz	> $5{,}2 \cdot 10^{-19}$ J > 3,3 eV	Gasentladung, Synchrotron, Excimerlaser	Schwarzlicht Fluoreszenz, Phosphoreszenz, Banknotenprüfung, Fotolithografie
Starke UV-Strahlen	< 200 nm	> 1,5 PHz	> $2{,}0 \cdot 10^{-19}$ J > 6,2 eV	Gasentladung, Synchrotron, Excimerlaser	
XUV	1 - 50 nm	300 PHz - 1 PHz	$2{,}0 \cdot 10^{-16}$ - $5{,}0 \cdot 10^{-18}$ J 20 - 1000 eV	XUV-Röhre, Synchrotron	EUV-Lithografie, Röntgenmikroskopie, Nanoskopie
Röntgenstrahlen	< 1 nm	> 300 PHz	> $2{,}0 \cdot 10^{-16}$ J > 1 keV	Röntgenröhre Anregung von inneren Elektronen, Auger-Elektronen	medizinische Diagnostik, Sicherheitstechnik, Röntgen-Strukturanalyse, Röntgen-Beugung
Gammastrahlen	< 10 pm	> 30 EHz	> $2{,}0 \cdot 10^{-14}$ J > 120 keV	Radioaktivität, Annihilation Anregung von Kernzuständen	

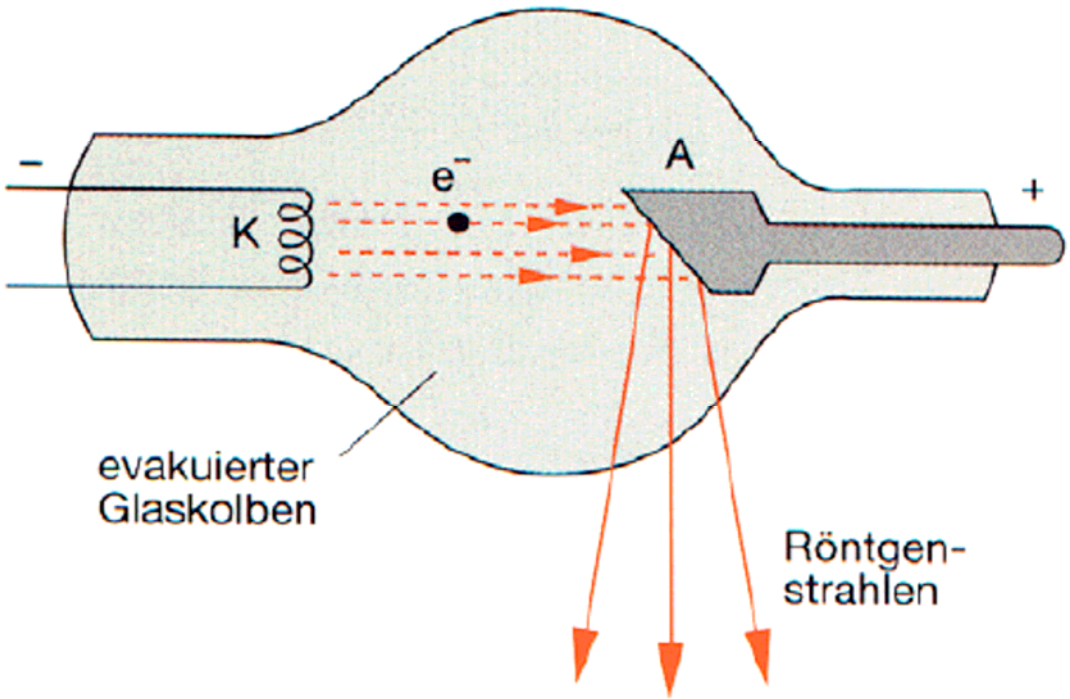
Leistungs-Röntgenröhren



Brennfleck

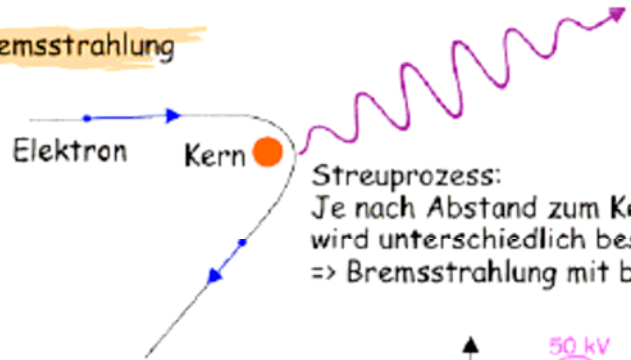
Wasserkühlung

Röntgenröhre



Bremsstrahlung

Bremsstrahlung



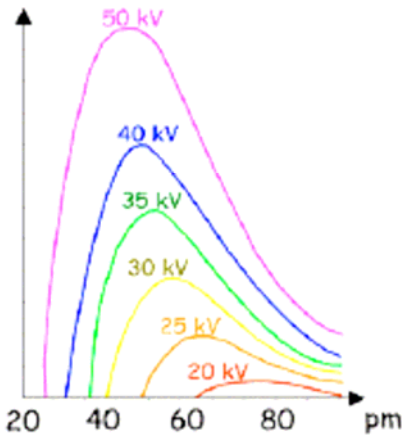
Streuprozess:
Je nach Abstand zum Kern und Geschwindigkeit wird unterschiedlich beschleunigt.
=> Bremsstrahlung mit bel. $\lambda > \lambda_{min}$

Beschleunigung: $W_{kin} = eU$
=> Energie pro e- ist max. eU
=> Bei WW wird max. eU frei
=> λ_{min} entspricht eU

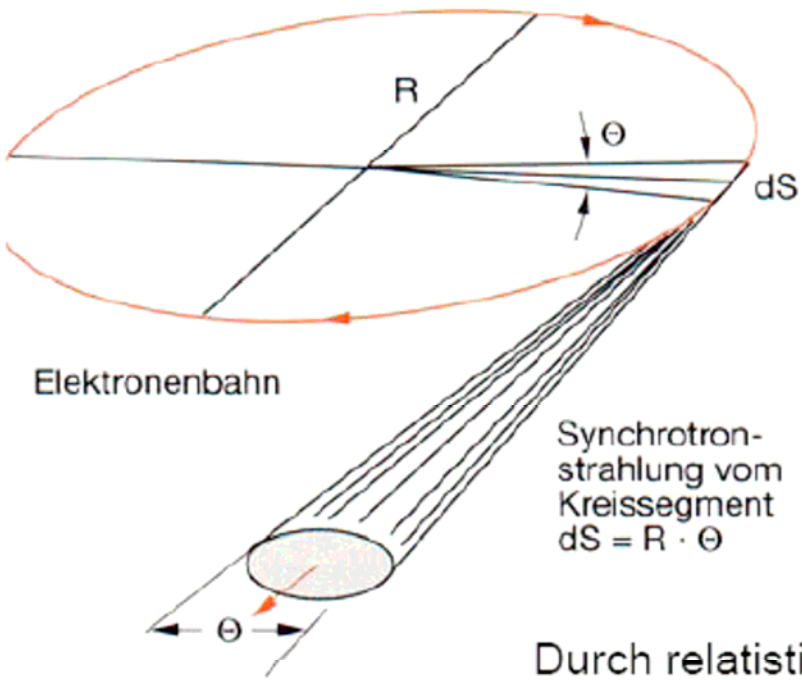
B $U = 35$ kV

$$\lambda_{min} = \frac{hc}{W} = \frac{hc}{eU} = \frac{4{,}14 \cdot 10^{-15} \, 3{,}0 \cdot 10^{8}}{35 \cdot 10^{3}} \, m$$

$= \underline{35 \text{ pm}}$



Synchrotronstrahlung

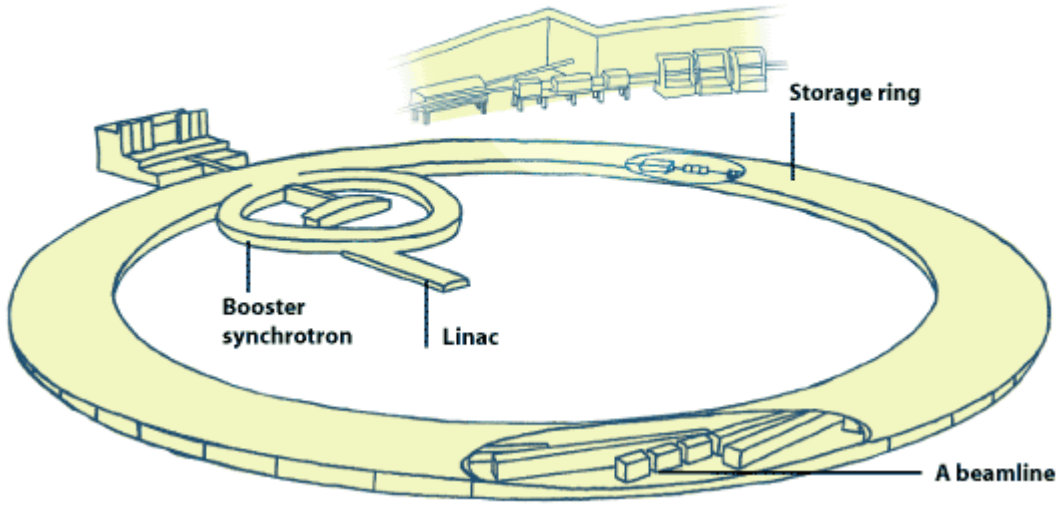


Durch relatistische Effekte
Abstrahlung in Bündel in Richtung
der Geschwindigkeit

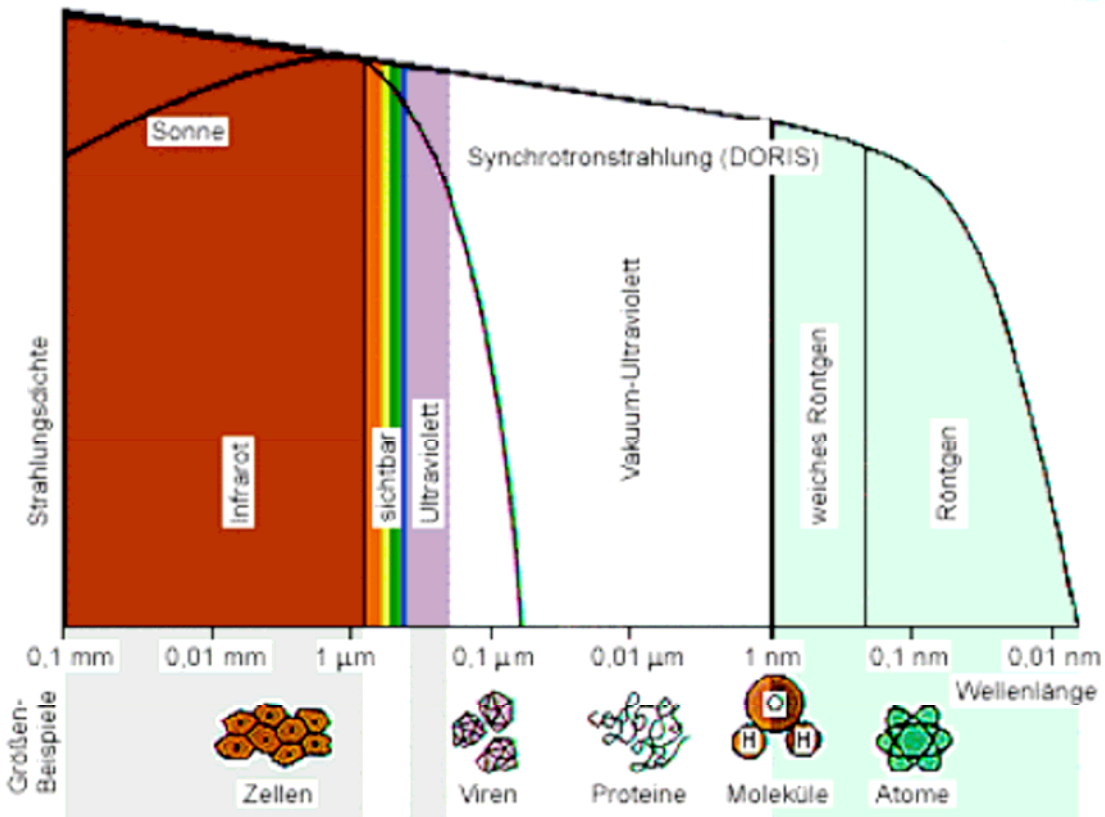
Die Synchrotronstrahlung wurde Ende vergangenen Jahrhunderts von *Liénard* theoretisch vorhergesagt.

Der experimentelle Nachweis gelang in den 40er Jahre am 70 MeV-Synchrotron von General Electric in den USA.

ESRF Grenoble (France)



Spektrum von Synchrotronstrahlung



Bei hohen Elektronenenergien muß wegen der Relation

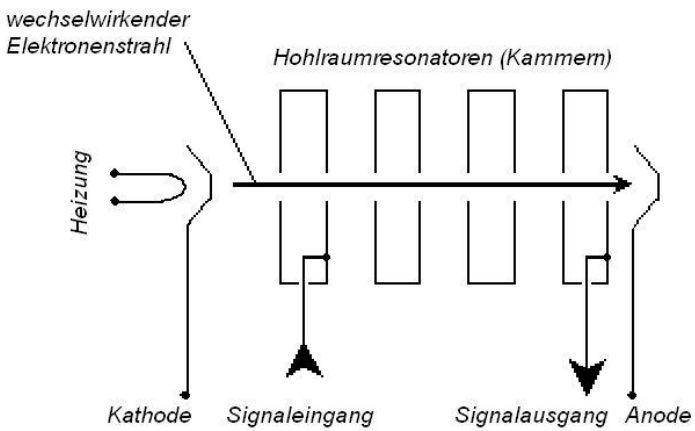
$$\Delta E \propto \frac{E^4}{R}$$

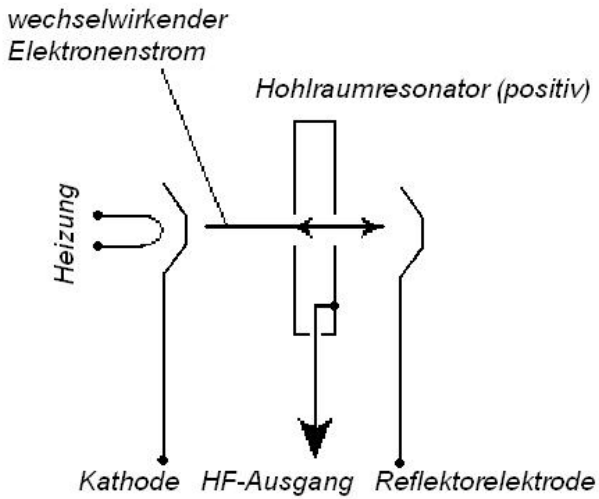
der Biegeradius überproportional wachsen.

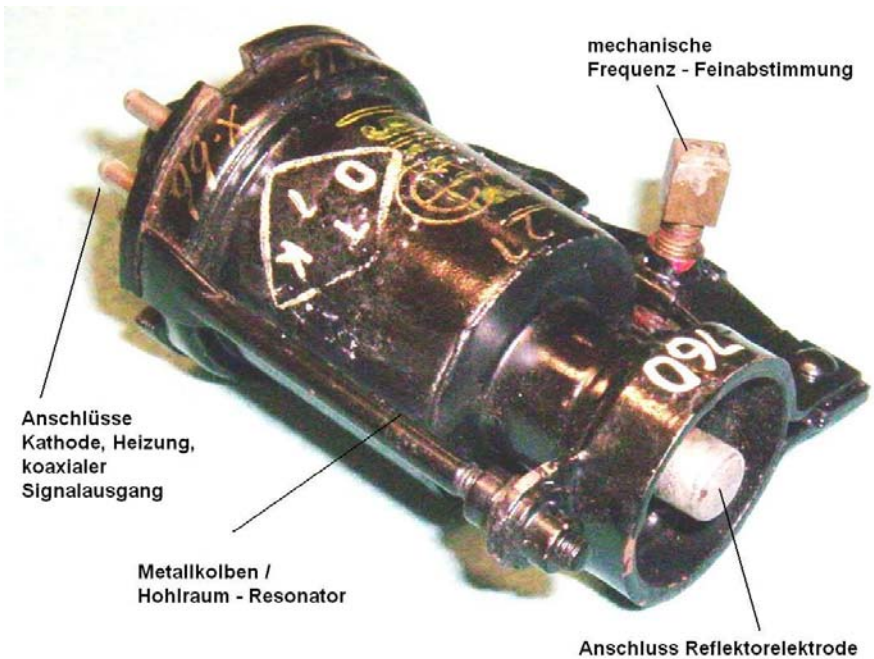
Daten einiger Elektronen-Kreisbeschleuniger:

	L [m]	E [GeV]	R [m]	B [T]	ΔE [keV]
BESSY I	62.4	0.80	1.78	1.500	20.3
DELTA	115	1.50	3.34	1.500	134.1
DORIS	288	5.00	12.2	1.370	$4.53 \cdot 10^3$
ESRF	844	6.00	23.4	0.855	$4.90 \cdot 10^3$
PETRA	2304	23.50	195.0	0.400	$1.38 \cdot 10^5$
LEP	$27 \cdot 10^3$	70.00	3000	0.078	$7.08 \cdot 10^5$

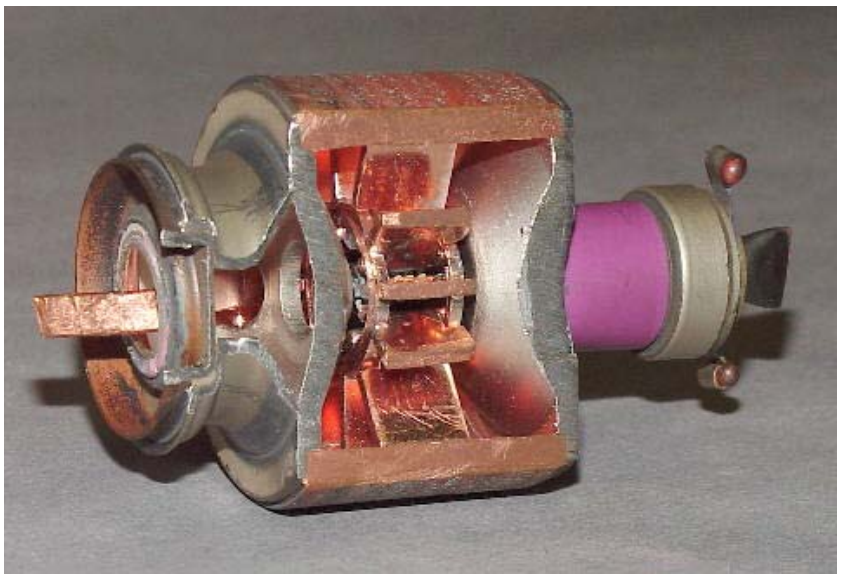
Erzeugung von Mikrowellen : Klystron und Reflexklystron

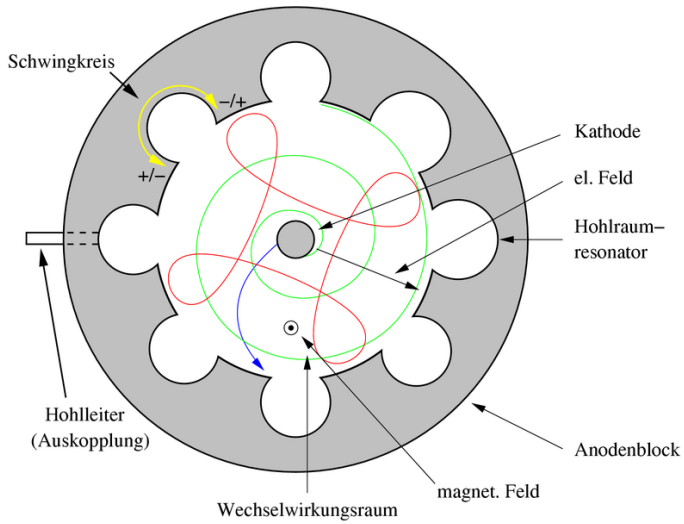






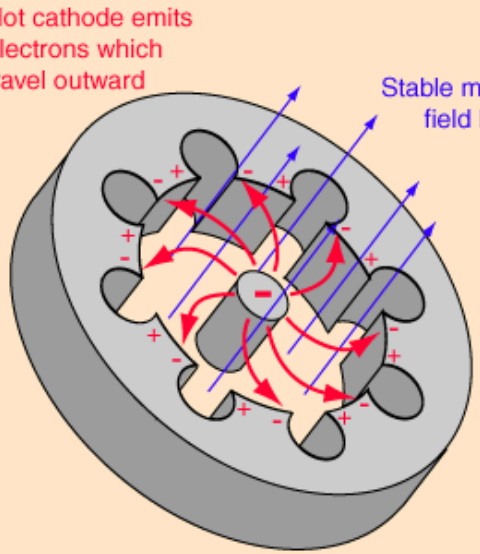
Erzeugung von Mikrowellen : Magnetron



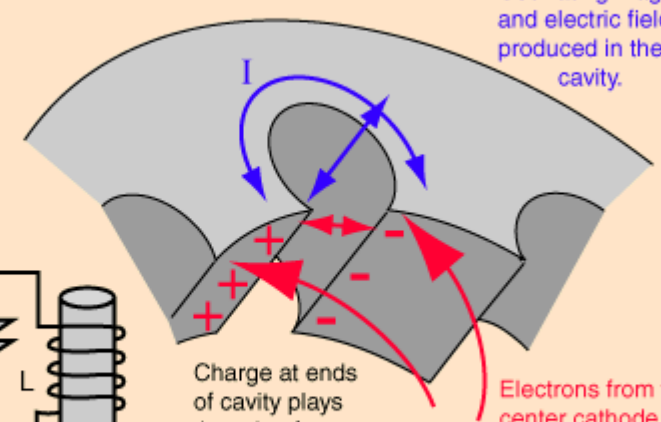


The Magnetron

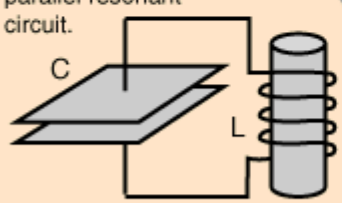
The microwave radiation of microwave ovens and some radar applications is produced by a device called a magnetron.



Electrons from a hot filament would travel radially to the outside ring if it were not for the magnetic field. The magnetic force deflects them in the sense shown and they tend to sweep around the circle. In so doing, they "pump" the natural resonant frequency of the cavities. The currents around the resonant cavities cause them to radiate electromagnetic energy at that resonant frequency.



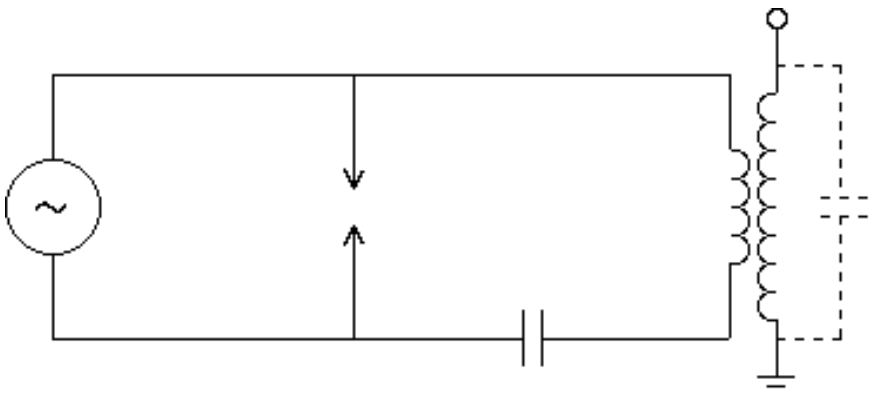
The cavity exhibits a resonance analogous to a parallel resonant circuit.



$$f_{resonance} \approx \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}}$$

Wirkung von Mikrowellenstrahlung : hier eine DVD !

Tesla-Transformator



Frohe Ferien

Folien unter www.ph2.uni-koeln.de/de/Lehre