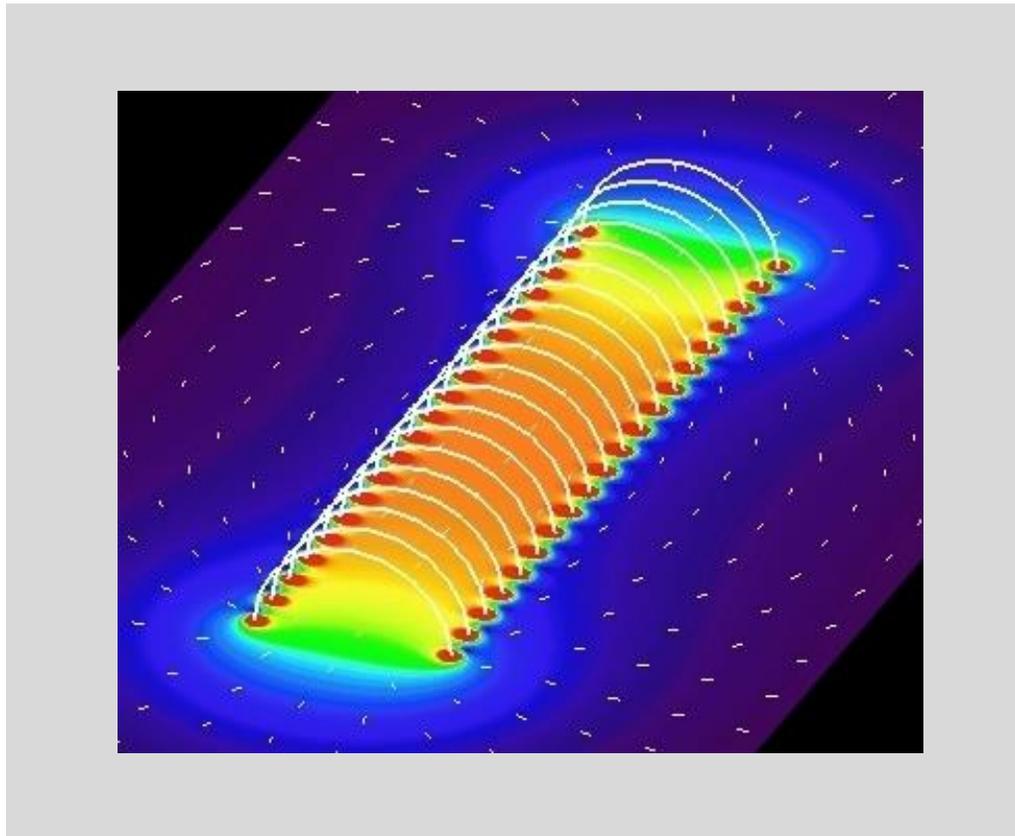


Kapitel 4

Magnetische Werkstoffe und ihre Bauelemente



Kapitel 4

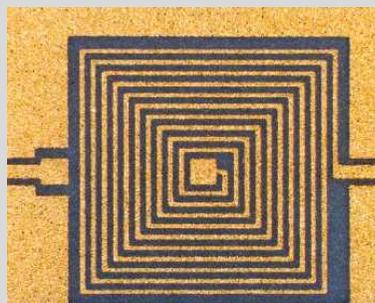
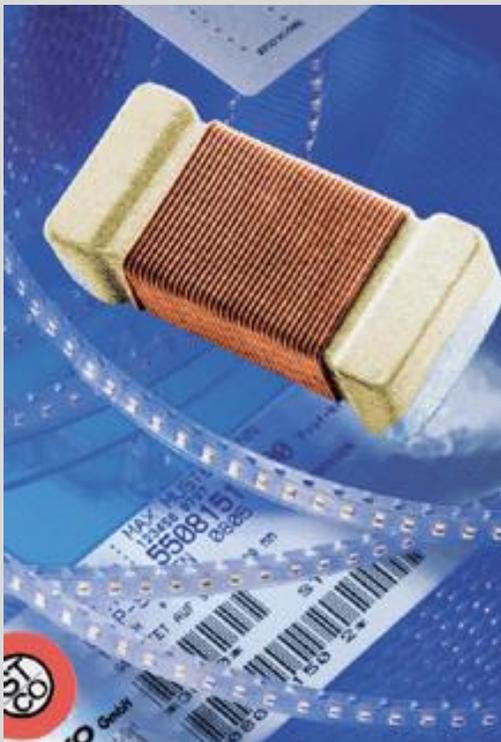
Magnetische Werkstoffe und ihre Bauelemente

- 4.1 Einführung
- 4.2 Grundlagen
- 4.3 Polarisationsmechanismen
- 4.4 Magnetische Hysterese
- 4.5 Verhalten von Magnetika im Wechselfeld
- 4.6 Bauelemente und Anwendungen

4.1 Einführung

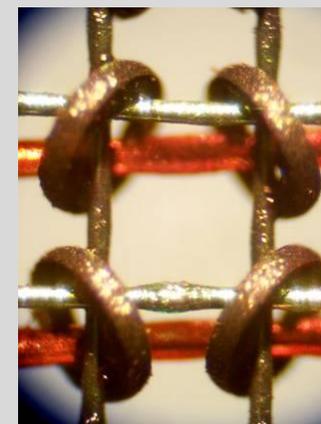
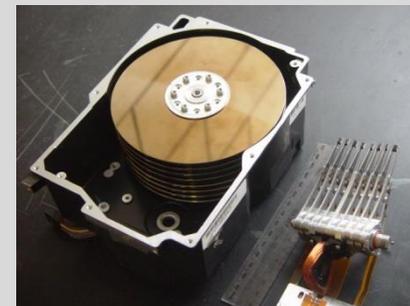
Anwendung von magnetischen Werkstoffen in Bauelementen (1)

Spulen



[www.fzk.de/anka]

Speicher



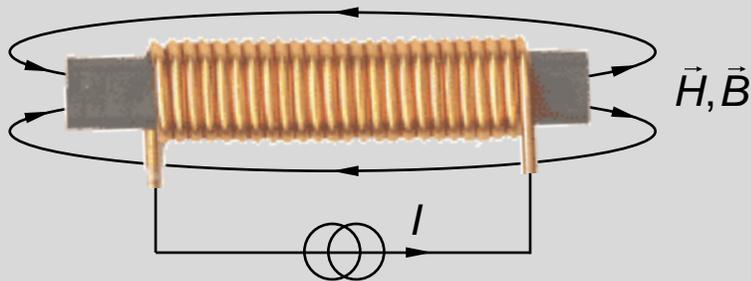
[www.walenz.org]

4.2 Grundlagen

Magnetisches Verhalten von Werkstoffen

Feldstärke H und Flussdichte B

Die magnetische Feldstärke H wird durch einen elektrischen Strom I erzeugt. Die magnetische Flussdichte B ist über die Kraftwirkung auf eine bewegte Ladung definiert (nach Lorentz).



Definition: relative Permeabilitätszahl

In linearer, isotroper Materie ist die angelegte magnetische Feldstärke H proportional zur magnetischen Flussdichte B .

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

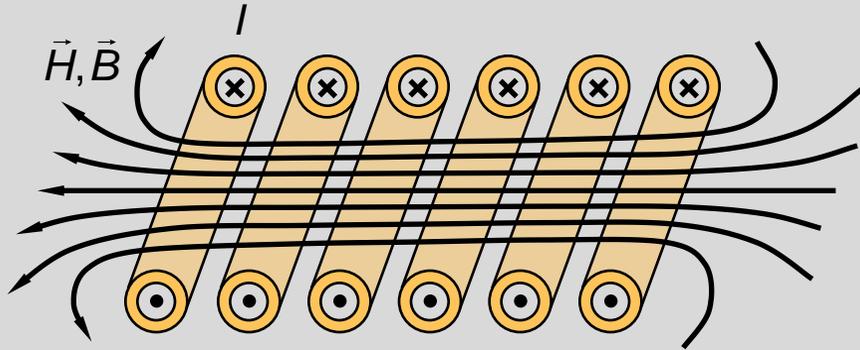
μ_r : relative Permeabilitätszahl (des Werkstoffs)

μ_0 : magnetische Feldkonstante (des Vakuums)

Die physikalische Deutung dieser Beziehung, die Behandlung nichtlinearer Materie sowie die Querempfindlichkeit der Permeabilitätszahl zu anderen physikalischen Größen (z.B. Temperatur) und die Anwendung in Bauelementen ist Gegenstand des folgenden Kapitels.

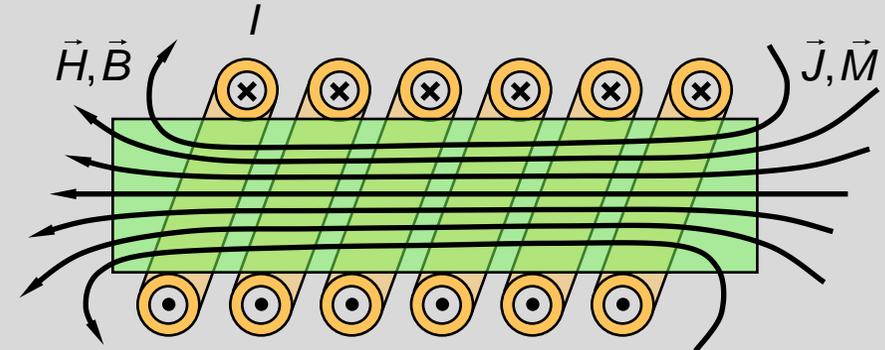
4.2 Grundlagen Magnetisierung von Materie

Flussdichte im Vakuum



B_0 : magnetische Vakuumflussdichte

Flussdichte in Materie



J : magnetische Polarisation

M : Magnetisierung

$$\vec{B}_0 = \mu_0 \cdot \vec{H}$$

magnetische Feldkonstante
 $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} + \vec{J}$$

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{M})$$

$$\vec{J} = \mu_0 \cdot \vec{M}$$

$$J, M = \text{fkt}(H, T, \dots)$$

4.2 Grundlagen

Permeabilitätszahl und Suszeptibilität in linearer Materie

Flussdichte in Materie (allg.)

$$B = \mu_0 \cdot H + J = \mu_0 \cdot (H + M)$$

In linearer Materie sind Feldstärke und Polarisation (Magnetisierung) proportional:

$$J = \mu_0 \cdot \chi_m \cdot H \quad (M = \chi_m \cdot H)$$

χ_m : magnetische Suszeptibilität

Daher gilt $B = \mu_0 \cdot (1 + \chi_m) \cdot H$

Definition: relative Permeabilitätszahl

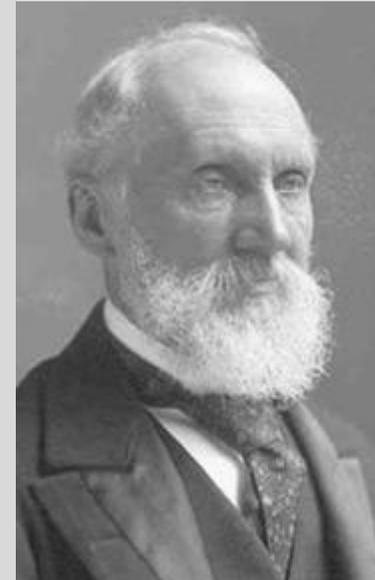
$$\mu_r = 1 + \chi_m$$



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

in linearer Materie

William Thomson, Lord Kelvin
* 1824 † 1907



William Thomson führt 1850 die magnetische Permeabilität und Suszeptibilität ein.

4.2 Grundlagen

Analogien zwischen Magnetika und Dielektrika (1)

Magnetika

Magnetische Feldstärke H [A/m]

Magnetische Flussdichte/Induktion B [Vs/m²]

Magnetische Polarisierung J [Vs/m²]

Magnetisierung M [A/m]

$$B = \mu_0 \cdot H + J = \mu_0 \cdot (H + M)$$

Dielektrika

Elektrische Feldstärke E [V/m]

Dielektrische Verschiebungsdichte D [As/m²]

Dielektrische Polarisierung P [As/m²]

(-)

$$D = \varepsilon_0 \cdot E + P$$

In linearer Materie

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$$

$$J = \mu_0 \cdot \chi_m \cdot H$$

$$M = \chi_m \cdot H$$

$$\mu_r = 1 + \chi_m$$

In linearer Materie

$$D = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot E$$

$$P = \varepsilon_0 \cdot \chi_e \cdot E$$

(-)

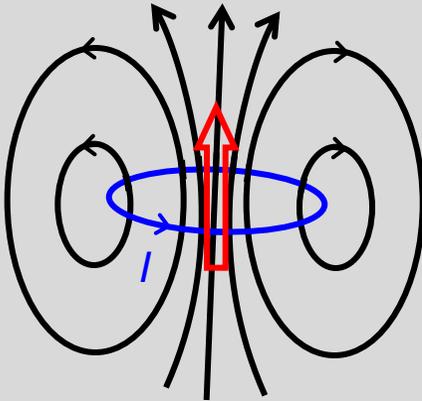
$$\varepsilon_r = 1 + \chi_e$$

4.2 Grundlagen

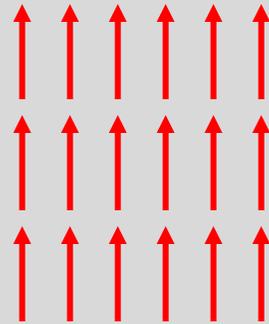
Analogien zwischen Magnetika und Dielektrika (2)

Magnetika

mikroskopisch



makroskopisch



z.B. Ampèresche
Kreisströme

magnetisches
Moment

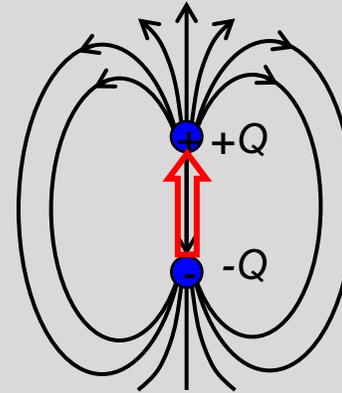
$$\mu_M = i \cdot A$$

magnetische
Polarisation

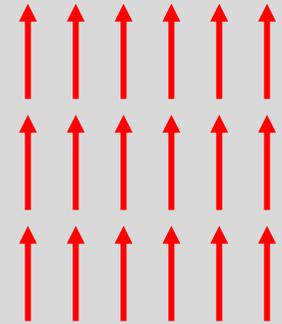
$$J = n \cdot \mu_M$$

Dielektrika

mikroskopisch



makroskopisch



z.B. induzierte
elektrische Dipole

elektrisches
Dipolmoment

$$\mu_P = Q \cdot d$$

dielektrische
Polarisation

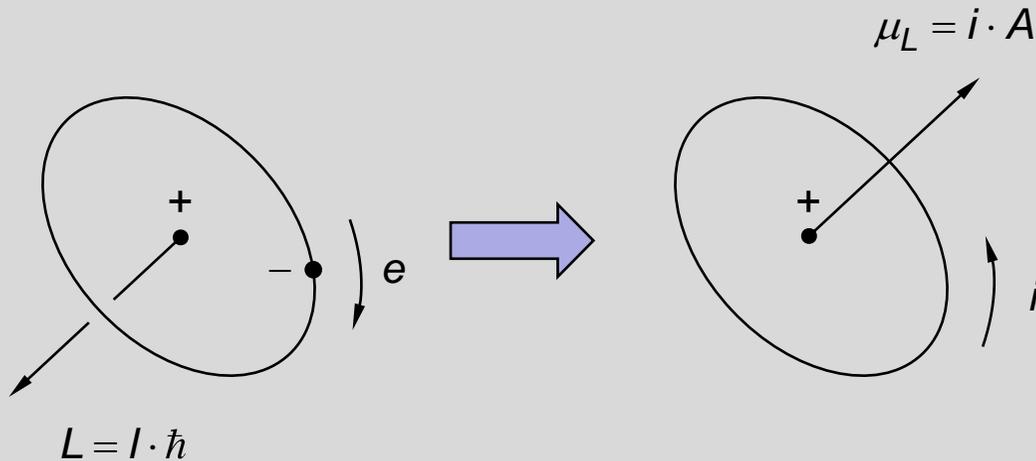
$$P = n \cdot \mu_P$$

[Arlt 1989]

4.3 Polarisationsmechanismen

Magnetische Momente der Atome (1)

Bahndrehimpuls der Elektronen



- L : Bahndrehimpuls der Elektronen
- l : Drehimpulsquantenzahl (ganze Zahl, vgl. Kap. 1.1)
- μ_L : magnetisches Moment der Bahndrehung
- i : atomarer Kreisstrom
- A : Fläche der Kreisbahn
- \hbar : Plancksches Wirkungsquantum

Quantisierter Bahndrehimpuls

$$L = l \cdot \hbar = m_e \cdot \omega \cdot r^2$$

$$\rightarrow \omega = l \cdot \frac{\hbar}{m_e \cdot r^2}$$

Atomarer Kreisstrom

$$i = \frac{q}{t} = \frac{e_0 \cdot v}{2\pi \cdot r} = \frac{e_0 \cdot \omega}{2\pi}$$

Magnetisches Bahnmoment

$$\mu_L = \frac{e_0 \omega}{2\pi} \cdot \pi r^2 = l \cdot \frac{e_0 \hbar}{2m_e} \equiv l \cdot \mu_B$$

μ_B : Bohrsches Magneton

4.3 Polarisationsmechanismen

Magnetische Momente der Atome (2)

Bohrsches Magneton

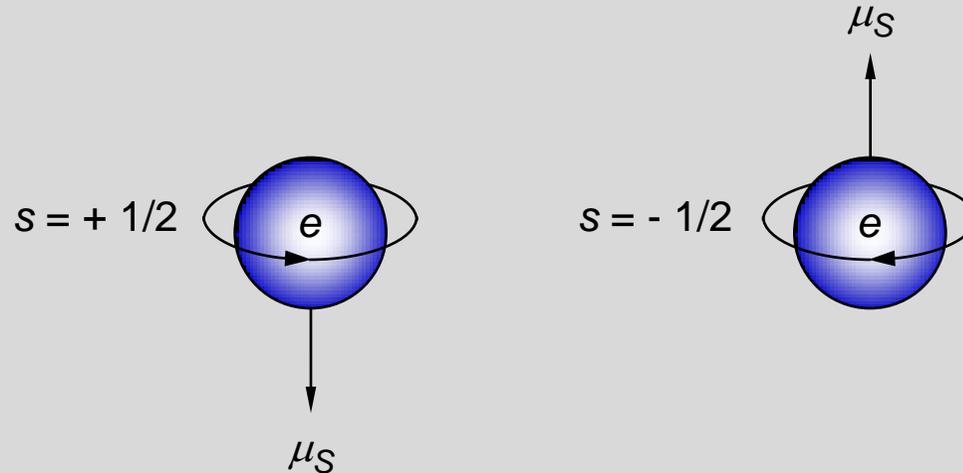
Elementarquantum magnetischer Momente, d.h. das Bahnmoment tritt in Vielfachen des Bohrschen Magnetons μ_B auf.

$$\mu_B = \frac{e_0 \cdot h}{4\pi \cdot m_e}$$

Zahlenwert:

$$\mu_B = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2$$

Eigendrehimpuls der Elektronen (Spin)



s : Eigendrehimpulsquantenzahl (vgl. Kap. 1.1)

μ_S : magnetisches Moment der Eigendrehung

Für das magnetische Moment ergibt sich:

$$\mu_S = 2\mu_B \cdot s = \pm\mu_B$$

4.3 Polarisationsmechanismen

Überblick

Schwache Formen

Diamagnetismus

Induzierung atomarer magnetischer Momente entgegen der Richtung des äußeren Magnetfelds

Paramagnetismus

Ausrichtung permanent vorhandener atomarer magnetischer Momente in Richtung des äußeren Magnetfelds

Starke Formen

Ferromagnetismus

Spontane Parallelstellung aller magnetischen Momente in einer Domäne des Kristallgitters (nur bei metallischen Leitern)

Antiferromagnetismus

Vollständige Kompensation aller magnetischen Momente durch Antiparallelstellung

Ferrimagnetismus

Spontane Orientierung der magnetischen Momente in einer Domäne durch Parallelstellung überwiegend in einer Richtung

4.3 Polarisationsmechanismen

Einteilung der magnetischen Stoffklassen (1)

$$\mu_r < 1, \chi_m < 0$$

Diamagnetismus

linear (d.h. unabhängig von H)
praktisch temperaturunabhängig

Wirkung: sehr schwach*

$$\mu_r = 1, \chi_m = 0$$

magnetisch neutrale Stoffe

idealisierter Grenzfall

$$\mu_r > 1, \chi_m > 0$$

Para- und Antiferromagnetismus

praktisch linear (beachte Sättigung)
temperaturabhängig

Wirkung: schwach/mäßig

$$\mu_r \gg 1, \chi_m > 0$$

Ferro- und Ferrimagnetismus

nichtlinear und Hysterese
temperaturabhängig

Wirkung: stark

* Ausnahme Supraleiter, die mit $\chi_m = -1$ ideale Diamagnete sind

4.2 Grundlagen

Einteilung der magnetischen Stoffklassen (2)

Magnetische Suszeptibilität χ_m der Elemente

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
H (-2,5)	alle Angaben gelten für 300 K, bei Ferromagnetika ist die Sättigungspolarisation (in T) angegeben																He (-1,1)
Li 24	Be -23											B -19	C -22	N (-6,3)	O 7,9	F	Ne (-4,0)
Na 8,1	Mg 5,7											Al 21	Si -3,4	P -23	S -12	Cl (-22)	Ar (-11)
K 5,7	Ca 21	Sc 264	Ti 181	V 383	Cr 267	Mn 828	Fe 2,16	Co 1,76	Ni 0,61	Cu -9,7	Zn -12	Ga -23	Ge -7,3	As -5,4	Se -18	Br -16	Kr (-16)
Rb 4,4	Sr 36	Y 122	Zr 109	Nb 236	Mo 119	Tc 373	Ru 66	Rh 170	Pd 783	Ag -25	Cd -19	In -8,2	Sn 2,4	Sb -67	Te -24	I -22	Xe (-24)
Cs 5,3	Ba 6,7	La 63	Hf 71	Ta 175	W 78	Re 96	Os 15	Ir 37	Pt 264	Au -34	Hg -28	Tl -36	Pb -16	Bi -153	Po	At	Rn

diamagnetisch

paramagnetisch

ferromagnetisch

Zahlen ohne (): $\cdot 10^{-6}$
Zahlen in (): $\cdot 10^{-9}$

[Münc 1987]

4.3 Polarisationsmechanismen Diamagnetismus (1)

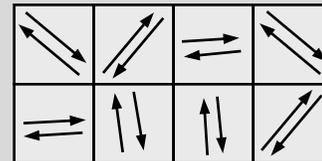
Voraussetzungen:

Atome mit abgeschlossenen Orbitalen

Magnetisches Moment:

Ohne äußeres Feld kein magnetisches Moment
Kompensation der Spinnmomente

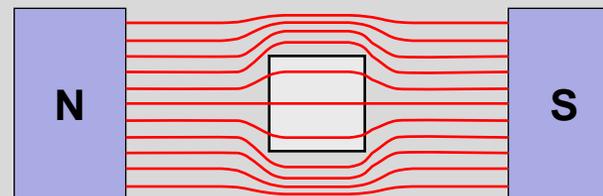
Richtung der Momente ($H = 0$):



Permeabilität/Suszeptibilität:

$\mu_r < 1$, $\chi_m < 0$ (sehr schwach ausgeprägt)

Wirkung auf den Feldlinienverlauf
in einem homogenen Feld:
(schematisch)



Werkstoffe:

Edelgase, Ionenkristalle, Halbleiter, Cu, Au, Ag

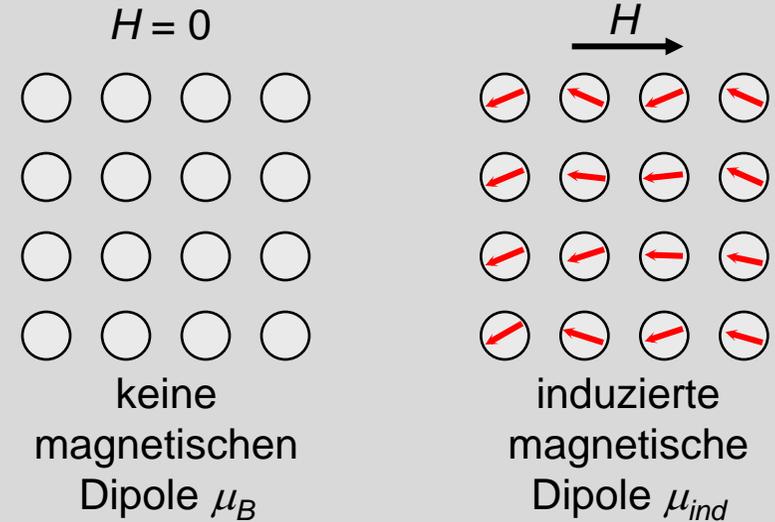
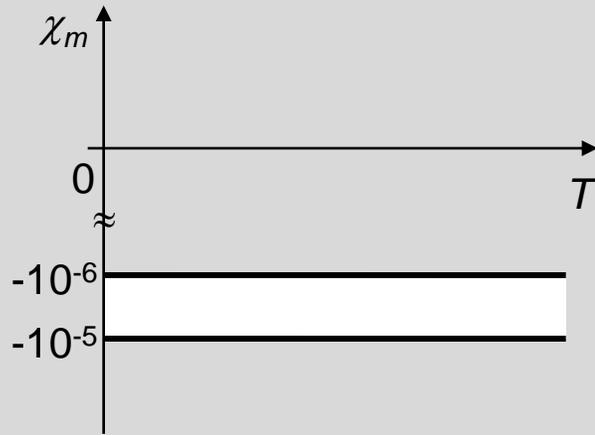
[Hahn 1983]

4.3 Polarisationsmechanismen

Diamagnetismus (2)

Beispiele

Ge: $\chi_m \cong -7 \cdot 10^{-6}$ H₂O: $\chi_m \cong -9 \cdot 10^{-6}$



[Callister 1994]

$$\bar{\mu}_{ind} = -\frac{e_0^2 \cdot r^2}{6m_e} B$$

$$\chi_m = -\mu_0 \cdot N \cdot \frac{e_0^2 \cdot r^2}{6m_e}$$

- $|\chi_m| \cong 10^{-5} \dots 10^{-6} \rightarrow \mu_r \approx 1$
- χ_m praktisch temperaturunabhängig

4.3 Polarisationsmechanismen

Paramagnetismus (1)

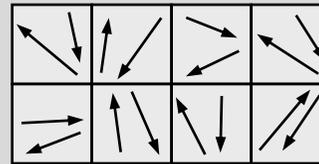
Voraussetzungen:

Atome mit unabgeschlossenen Orbitalen

Magnetisches Moment:

Moment klein, auch ohne äußeres Feld vorhanden
Regellose Verteilung der Momentrichtungen

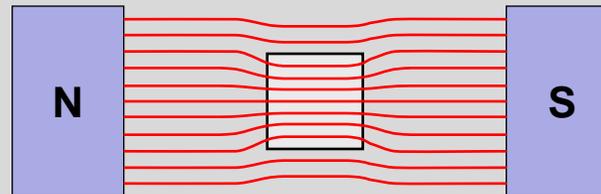
Richtung der Momente ($H = 0$):



Permeabilität/Suszeptibilität:

$\mu_r > 1$, $\chi_m > 0$ (schwach ausgeprägt)

Wirkung auf den Feldlinienverlauf
in einem homogenen Feld:
(schematisch)



Werkstoffe:

Alkali- und Übergangsmetalle, Seltene Erden
 O_2 , Al, Sn, Pt

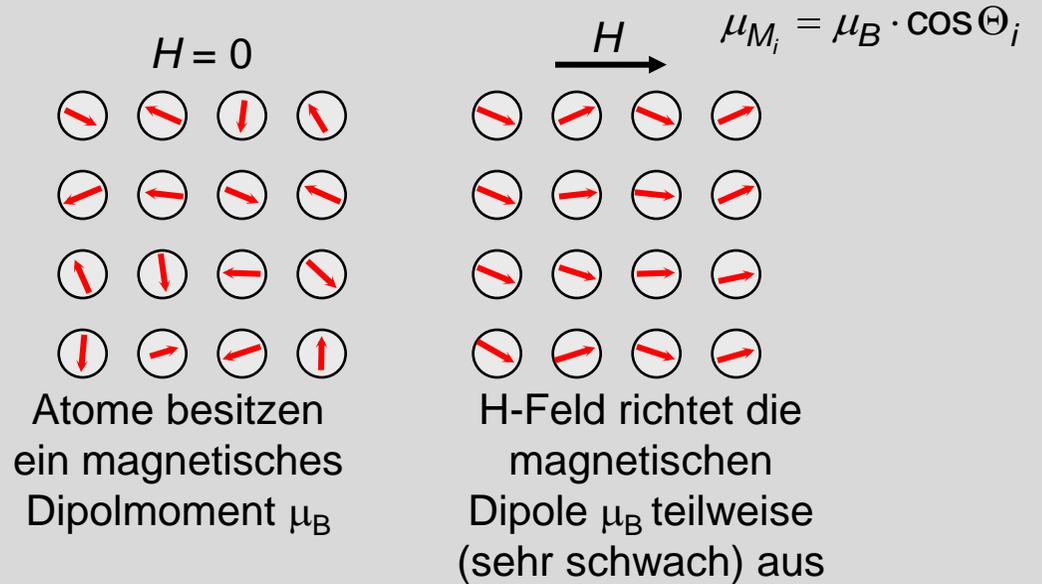
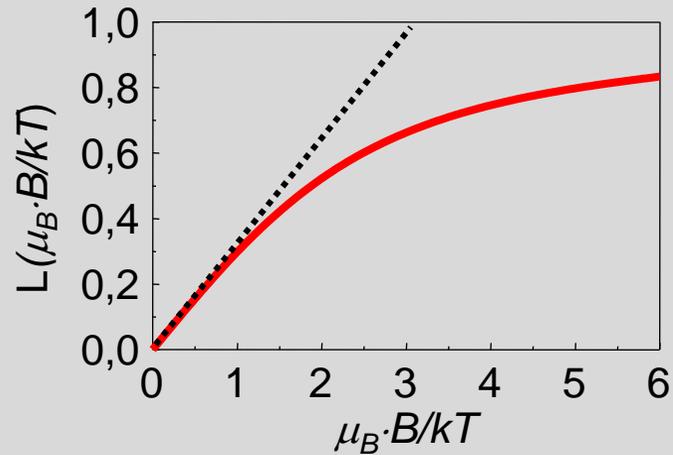
[Hahn 1983]

4.3 Polarisationsmechanismen

Paramagnetismus (2)

Beispiele

Pt: $\chi_m \cong 270 \cdot 10^{-6}$ Al: $\chi_m \cong 22 \cdot 10^{-6}$



[Münch 1993]

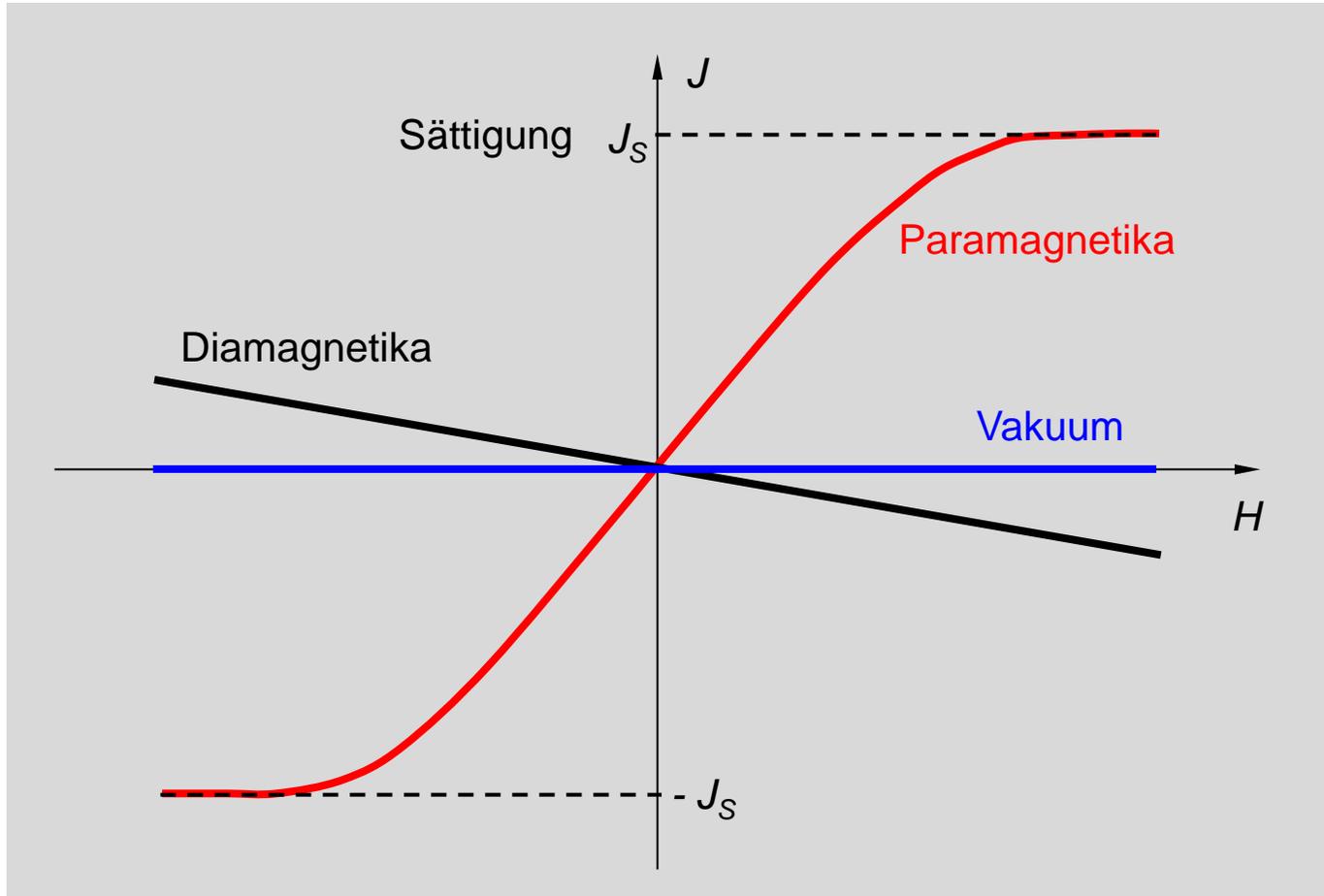
Ansatz wie in Kap. 3.2

$$M = \frac{1}{V} \sum_i \mu_{M_i} = N \mu_B \cdot L\left(\frac{\mu_B B}{kT}\right) \rightarrow \chi_m = \frac{\mu_0 N \mu_B^2}{3kT}$$

- $|\chi_m| \cong 10^{-3} \dots 10^{-6} \rightarrow \mu_r \approx 1$
- Temperaturabhängigkeit: $\chi_m = C / T$ (Curie-Gesetz)
- k: Boltzmann-Konstante

4.3 Polarisationsmechanismen

Magnetisierungskurven in Dia- und Paramagnetika



[Hahn 1983]

4.3 Polarisationsmechanismen

Magnetische Ordnungszustände (1)

Ausrichtung der magnetischen Elektronenspins in den 3d-Zuständen nach der Hundschen Regel.

Sc 21 ↑	Ti 22 ↑↑	V 23 ↑↑↑	Cr 24 ↑↑↑↑
Mn, Mn ²⁺ 25 ↑↑↑↑↑	Fe, Fe ²⁺ 26 ↑↑↑↑↑ ↓	Co, Co ²⁺ 27 ↑↑↑↑↑ ↓↓	Ni, Ni ²⁺ 28 ↑↑↑↑↑ ↓↓↓
Cr ³⁺ 24 ↑↑↑	Mn ⁴⁺ 25 ↑↑↑	Fe ³⁺ 26 ↑↑↑↑↑	

atomares magnetisches Moment:
 ↑ = μ_B
 Bohrsches Magneton

Bei den Atomen bzw. Ionen der 3d-Schale treten resultierende magnetische Momente bis zu einem Wert von $5\mu_B$ auf.

Unter „geeigneten“ Bedingungen (siehe Bethe-Slater-Diagramm) führt die Wechselwirkung der Nettomomente benachbarter Atome bzw. Ionen zu einem räumlich ausgedehnten Ordnungszustand (Parallel- oder Antiparallelstellung der resultierenden Momente). Bei paralleler Ausrichtung der Momente ist die Wirkung des Magnetismus sehr stark ausgeprägt.

Räumliche Bereiche gleichartiger Ordnungszustände nennt man **Domänen** oder **Weißsche Bezirke**.

4.3 Polarisationsmechanismen

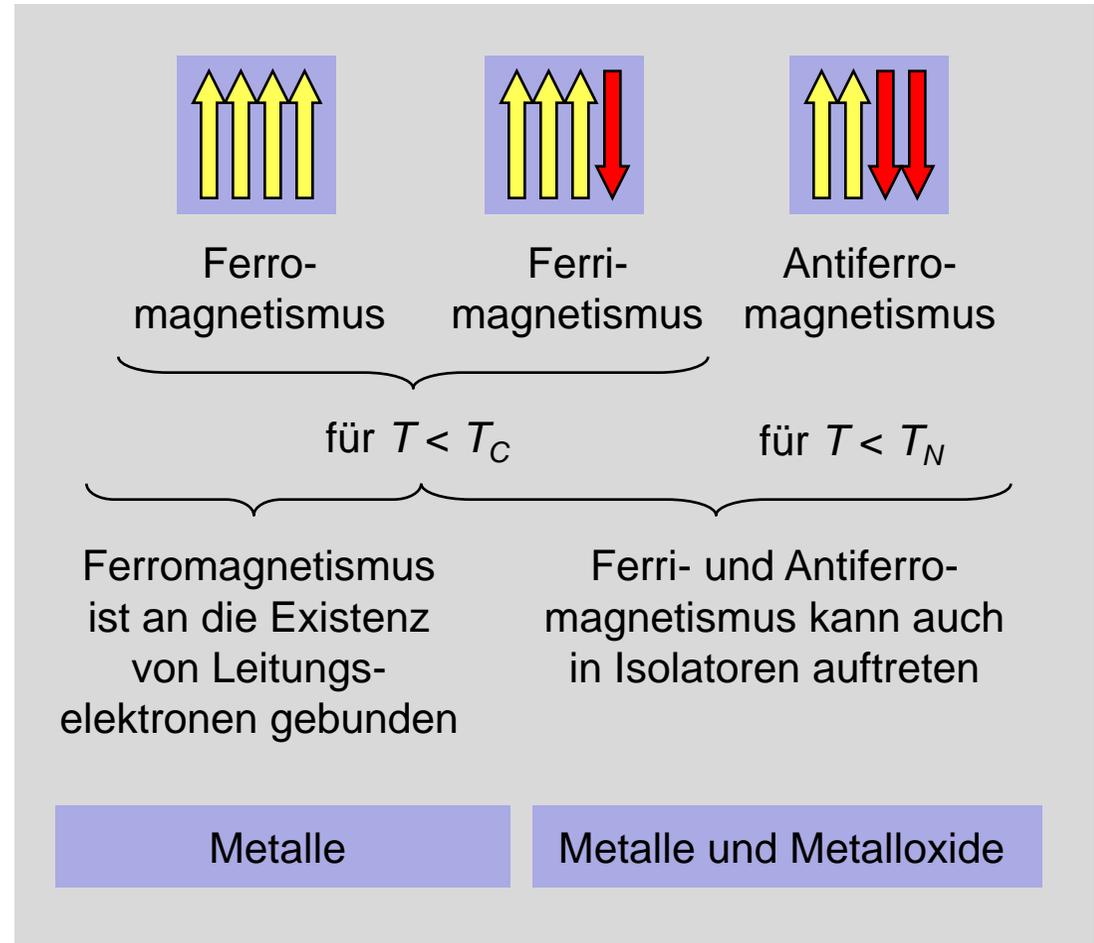
Magnetische Ordnungszustände (2)

Die magnetischen Ordnungszustände innerhalb einer Domäne werden in drei Klassen unterteilt (Ferro-, Ferri- und Antiferromagnetismus).

Beim Überschreiten einer bestimmten Temperatur werden die magnetischen Ordnungszustände und damit die Magnetisierung zerstört. Jenseits davon verhalten sich die Substanzen paramagnetisch.

T_C : Curie-Temperatur

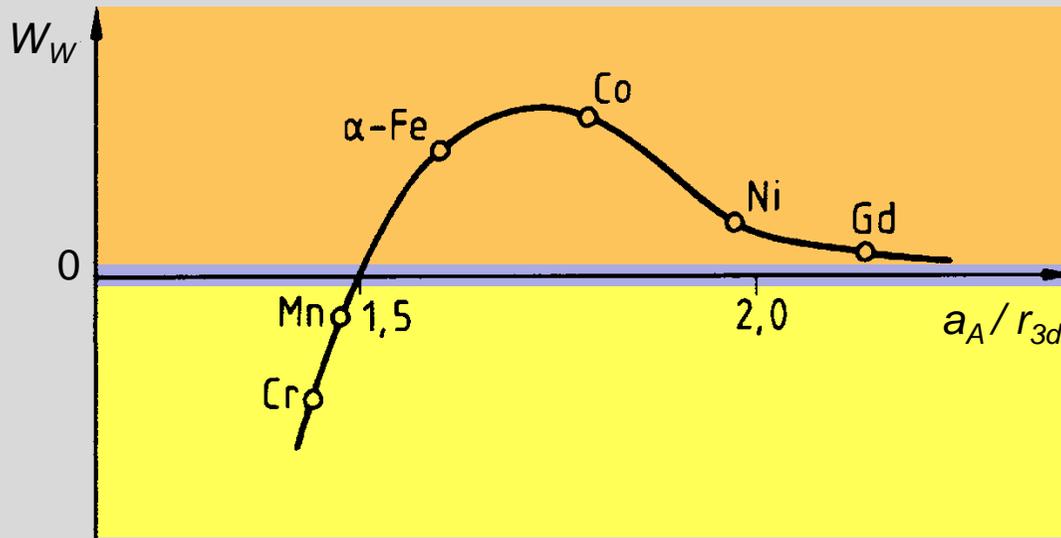
T_N : Néel-Temperatur



[Münch 1987]

4.3 Polarisationsmechanismen

Bethe-Slater-Diagramm



$W_W > 0$: Ferromagnetismus
(parallele Momente)

W_W klein: Paramagnetismus

$W_W < 0$: Antiferromagnetismus
(antiparallele Momente)

W_W : Austauschwechselwirkungsenergie

a_A : Atomabstand im Metall
 r_{3d} : Radius der 3d-Schale

$W_W > 0$: Parallelstellung der magnetischen Momente

$W_W < 0$: Antiparallelstellung der magnetischen Momente

[Münc 1987]

4.3 Polarisationsmechanismen

Ferromagnetismus (1)

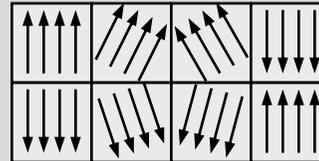
Voraussetzungen:

Atome mit un abgeschlossenen Orbitalen

Magnetisches Moment:

Moment groß, spontane Magnetisierung
Weißsche Bezirke, Elementarmagnete

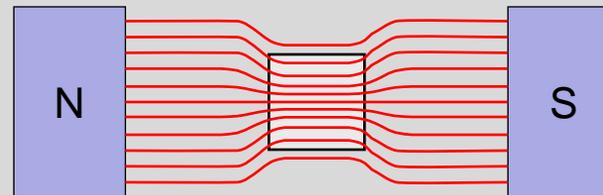
Richtung der Momente:



Permeabilität:

$\mu_r \gg 1$, $\chi_m > 0$ (stärkste Form des Magnetismus)

Wirkung auf den Feldlinienverlauf
in einem homogenen Feld:
(schematisch)

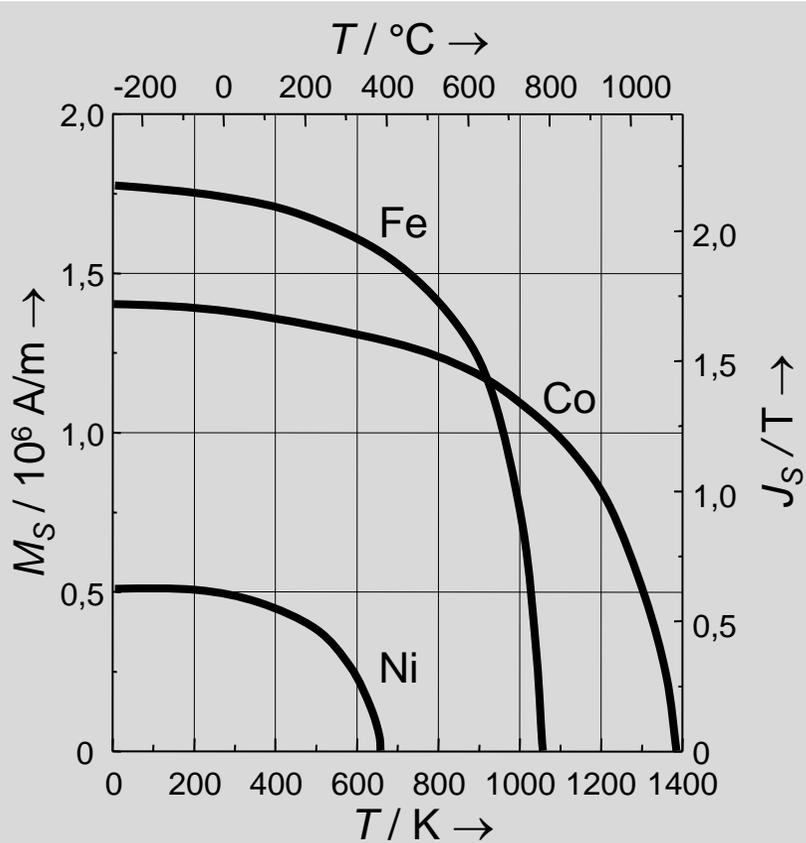


Werkstoffe:

Fe, Co, Ni, Legierungen

[Hahn 1983]

4.3 Polarisationsmechanismen Ferromagnetismus (2)



Temperaturabhängigkeit der Sättigungsmagnetisierung M_S bzw. der Sättigungspolarisation J_S

Eigenschaften der Elemente Fe, Co, Ni

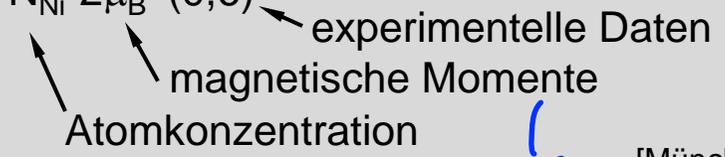
	Eisen	Kobalt	Nickel
Ordnungszahl	26	27	28
Atomgewicht	55,8	58,9	58,7
Gitterstruktur	krz	hdp	kfz
Gitterkonstante a	2,86	2,50	3,52
Gitterkonstante c	-	4,06	-
spez. Gewicht / (g/cm ³)	7,9	8,8	8,9
Schmelzpunkt / $^\circ\text{C}$	1536	1495	1453
Curie-Temperatur	770	1130	358
Sättigungsmagnetisierung / (10^5 A/m)	17,3	14,4	5,1
spontane Magnetisierung (300 K) / (10^5 A/m)	17,1	14,2	4,9
Sättigungspolarisation / T	2,18	1,81	0,64
spontane Polarisation (300 K) / T	2,16	1,78	0,61

Sättigungswerte der Magnetisierung M_{S0}

$$M_{S0,Fe}: N_{Fe} \cdot 4\mu_B \quad (2,2)$$

$$M_{S0,Co}: N_{Co} \cdot 3\mu_B \quad (1,7)$$

$$M_{S0,Ni}: N_{Ni} \cdot 2\mu_B \quad (0,6)$$



[Münc 1987]

*Wie wird μ in eine
Realung (pauli Folie)*

4.3 Polarisationsmechanismen

Antiferromagnetismus (1)

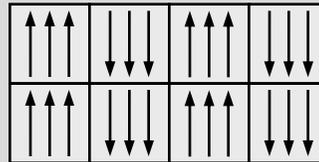
Voraussetzungen:

unabgeschlossene Orbitale, sehr geringer Atomabstand

Magnetisches Moment:

in jedem Atom wird die Magnetisierung vollständig kompensiert

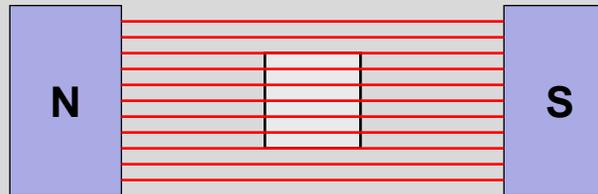
Richtung der Momente:



Permeabilität:

$\mu_r \approx 1$, $\chi_m \approx 0$ (schwache Ausprägung)

Wirkung auf den Feldlinienverlauf in einem homogenen Feld: (schematisch)

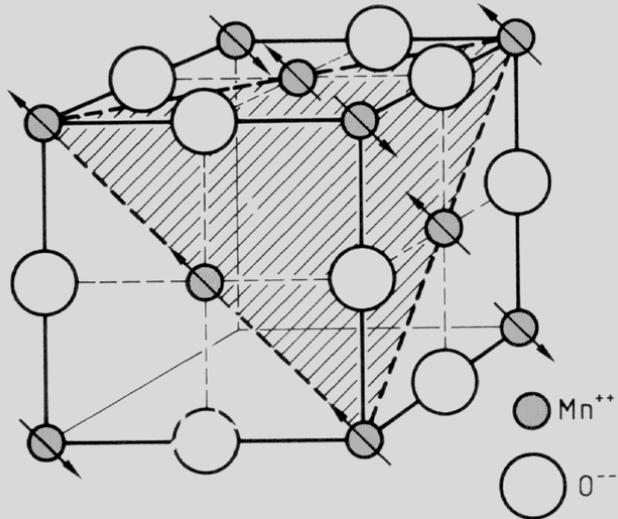


Werkstoffe:

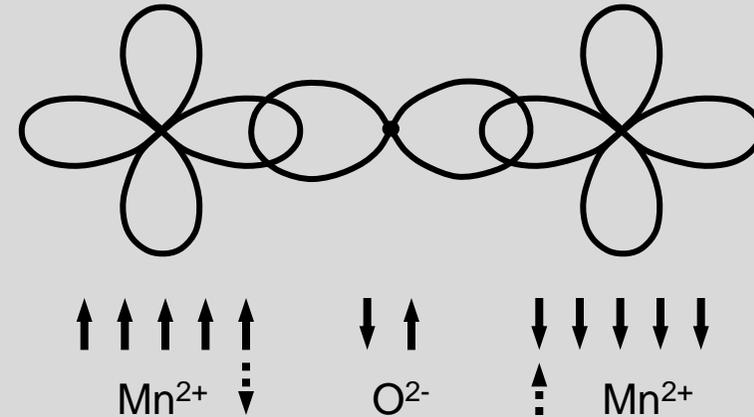
MnO, FeO, CoO, NiO und andere Oxidverbindungen

[Hahn 1983]

4.3 Polarisationsmechanismen Antiferromagnetismus (2)



- Gitteraufbau und Spinorientierung bei Manganoxid (MnO)
- antiparallele Ausrichtung der Momente in Mn²⁺ durch nichtmagnetische O²⁻-Ionen

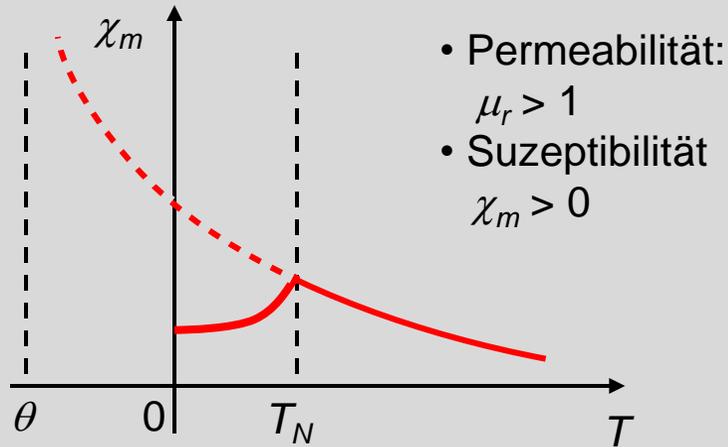


- Verteilung und Spinorientierung 3d-Elektronen von Mn²⁺ und 2p-Elektronen des O²⁻
- teilweise Überlappung von 3d- und 2p-Orbitalen bewirkt (Hundsche Regel) eine antiparallele Orientierung der magnetischen Momente

[Münch 1987]

4.3 Polarisationsmechanismen

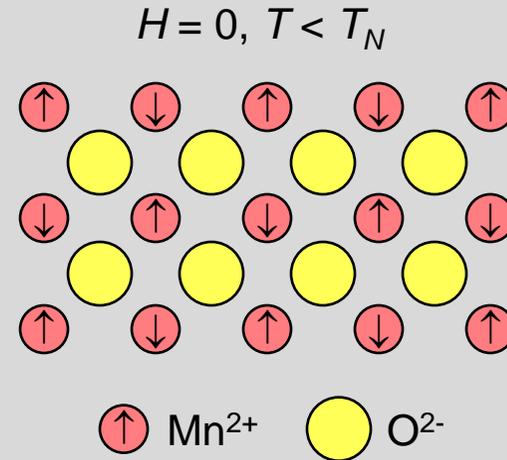
Antiferromagnetismus (3)



- Temperaturabhängigkeit $T > T_N$

$$\chi_m = \frac{C}{T - \Theta}$$

(Curie-Weiß-Gesetz mit negativer Curietemperatur)



- Bei $T < T_N$ erfolgt Antiparallelstellung der magnetischen Dipole
- Bei $T > T_N$ wird diese durch thermische Einflüsse zerstört

[Callister 1994]

4.3 Polarisationsmechanismen Ferrimagnetismus (1)

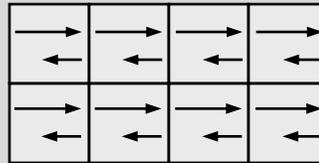
Voraussetzungen:

Atome mit unabgeschlossenen Orbitalen
Gitterstruktur

Magnetisches Moment:

Moment durch nicht vollständige
Kompensation vorhanden

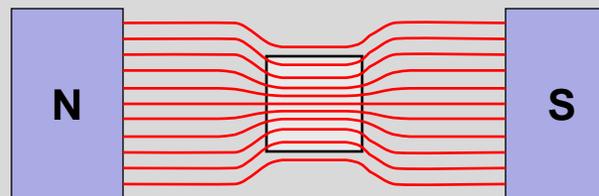
Richtung der Momente:



Permeabilität:

$\mu_r \gg 1$, $\chi_m > 0$ (stark ausgeprägt, kleiner als Ferrom.)

Wirkung auf den Feldlinienverlauf
in einem homogenen Feld:
(schematisch)



Werkstoffe:

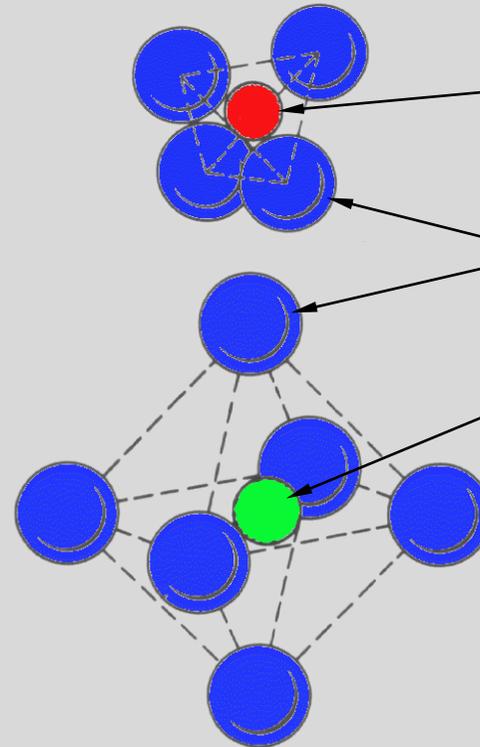
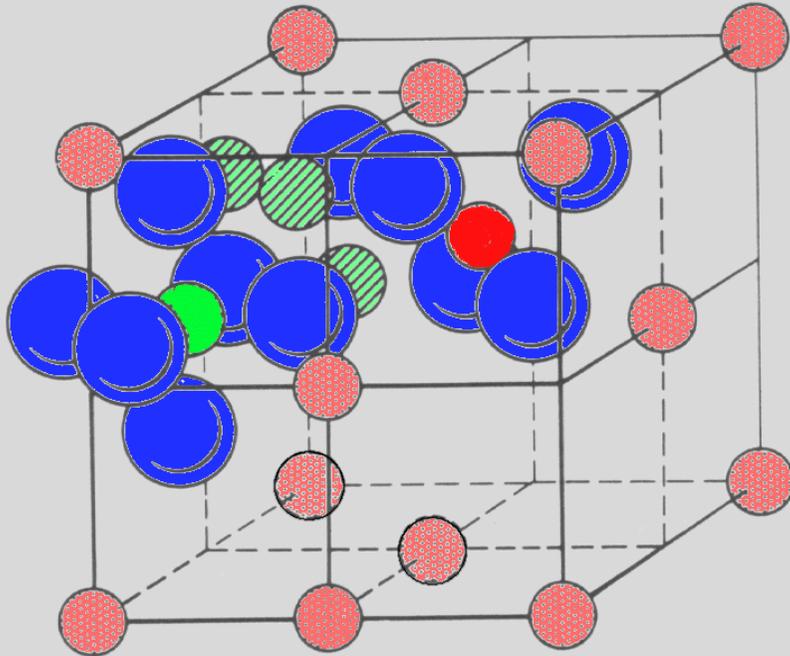
sog. Ferrite: Spinelle (AB_2O_4)

[Hahn 1983]

4.3 Polarisationsmechanismen

Ferrimagnetismus (2)

Struktur der Spinelle $AB_2O_4 = AO \cdot B_2O_3$



A-Kationen:
kleineres Kation in
Tetraeder-Umgebung

O-Anionen:
kfz- oder hdp-Packung

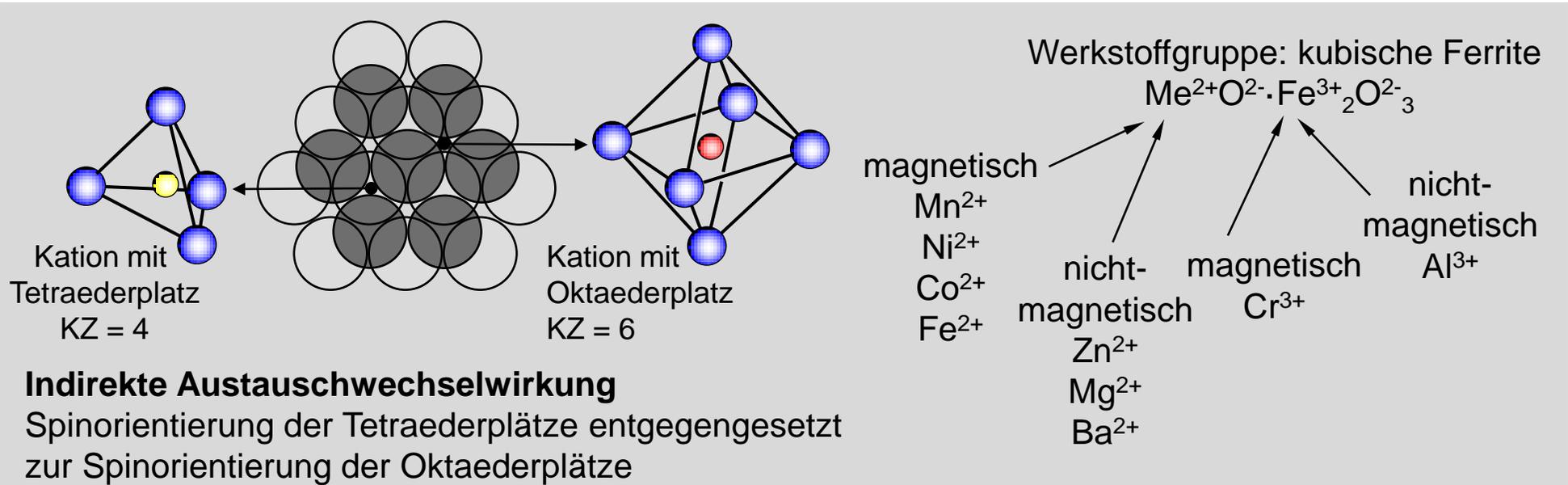
B-Kationen:
größeres Kation in
Oktaeder-Umgebung

Beispiele:

A = Mg, Mn, Co, Ni, Zn, Fe

B = Al, Cr, Fe, Mn, Co, $MgAl_2O_4$ (Spinell), Fe_3O_4 ($Fe^{3+}Fe^{3+}Fe^{2+}O_4^{2-}$) (inverser Spinell)

4.3 Polarisationsmechanismen Ferrimagnetismus (3)



Indirekte Austauschwechselwirkung
 Spinorientierung der Tetraederplätze entgegengesetzt zur Spinorientierung der Oktaederplätze

Beispiel: Manganferrit $MnO \cdot Fe_2O_3$

$$Mn^{2+}_8 [Fe^{3+}_{16}] O^{2-}_{32} \quad -8 \cdot 5\mu_B + 16 \cdot 5\mu_B = 40\mu_B$$

↑
z

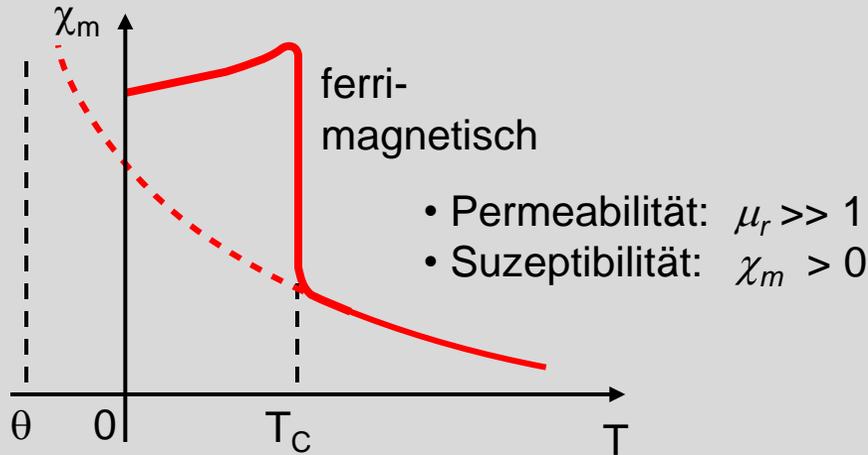
$$J_S = \mu_0 \cdot \frac{z \cdot \mu_B}{a^3}$$

a: Gitterkonstante

resultierendes magnetisches Moment entspricht theoretischer Sättigungspolarisation J_S

[Münch 1987]

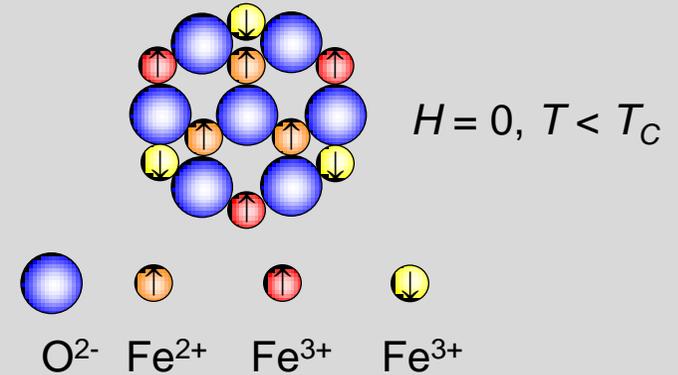
4.3 Polarisationsmechanismen Ferrimagnetismus (4)



- Temperaturabhängigkeit

$$T > T_C: \chi_m = \frac{C}{T - \Theta}$$

$T < T_C: \chi_m$ wird sehr groß



- Antiparallelstellung der magnetischen Dipole, die aber von unterschiedlicher Größe sind
- Bei $T < T_C$ resultieren spontane Dipole auch bei $H = 0$, geringe Feldstärken genügen zur Ausrichtung in Feldrichtung

Werkstoffe: Fe_3O_4
 $T_C / K:$ 858

$CoFe_2O_4$
793

$NiFe_2O_4$
858

$CuFe_2O_4$
728

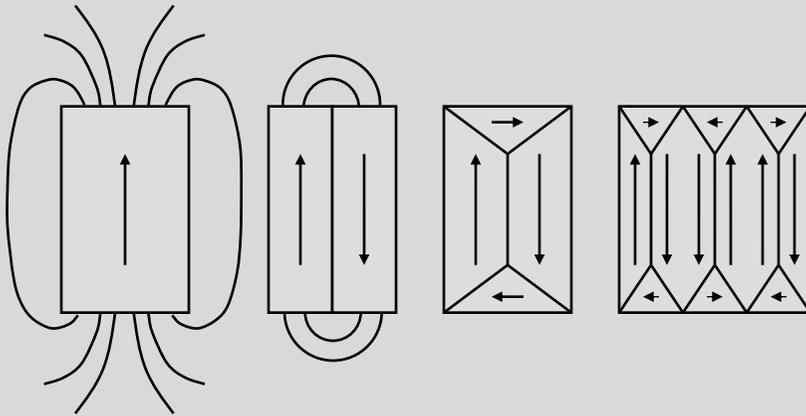
Mn-Zn-Ferrit
363-560

[Callister 1994 / Arlt 1989]

4.4 Magnetische Hysterese

Ausbildung von Domänen bei Ferro- und Ferrimagnetika

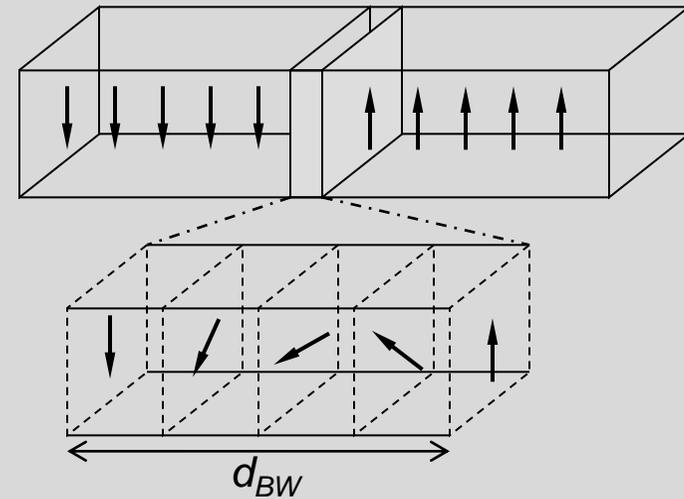
Domänenbildung (Weißsche Bezirke)



räumliche Ausbildung der Domänen minimiert Gesamtenergie des Systems.

Bloch-Wand: Grenzflächen der Weißschen Bezirke

Domänen mit 180° Bloch-Wand



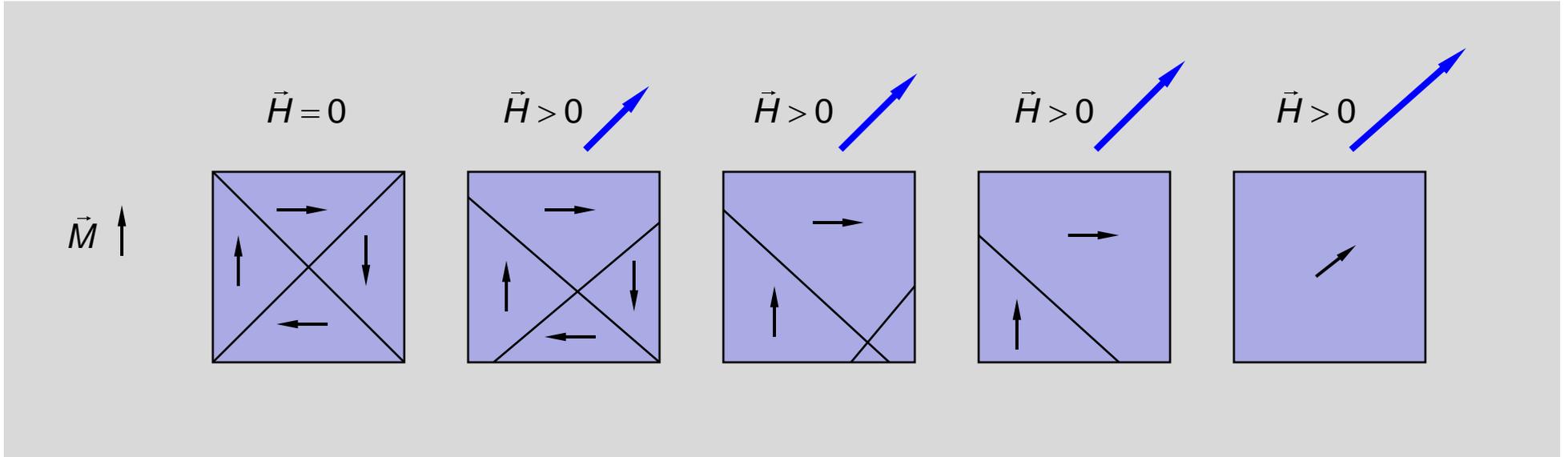
Umkehrung der Magnetisierungsrichtung in der Bloch-Wand ist über eine Reihe von Dipolen verteilt.

$d_{BW}(\text{Co}) \approx 60 \text{ nm}$ (ca. 250 Atomlagen)

[Münch 1987]

4.4 Magnetische Hysterese

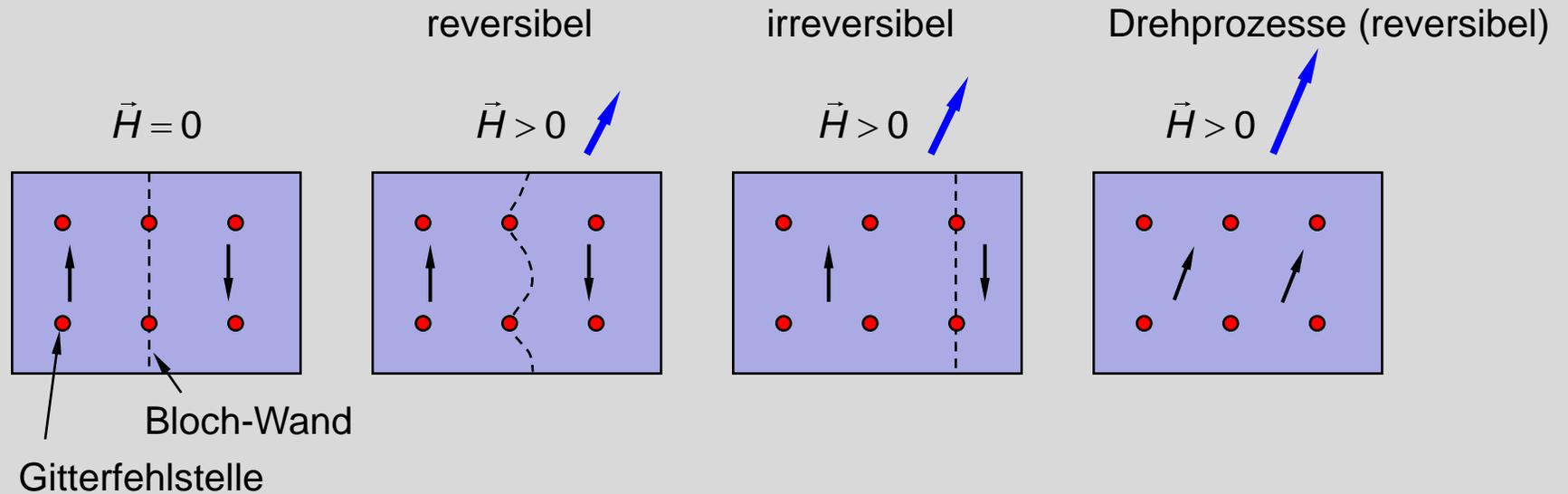
Domänenwachstum bei ansteigender magnetischer Feldstärke (1)



4.4 Magnetische Hysterese

Domänenwachstum bei ansteigender magnetischer Feldstärke (2)

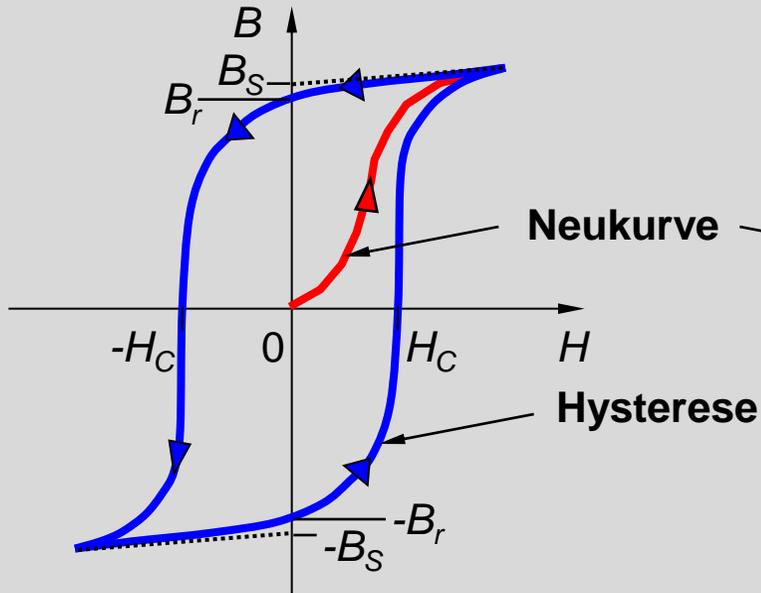
Reversible und irreversible Verschiebungen einer Bloch-Wand



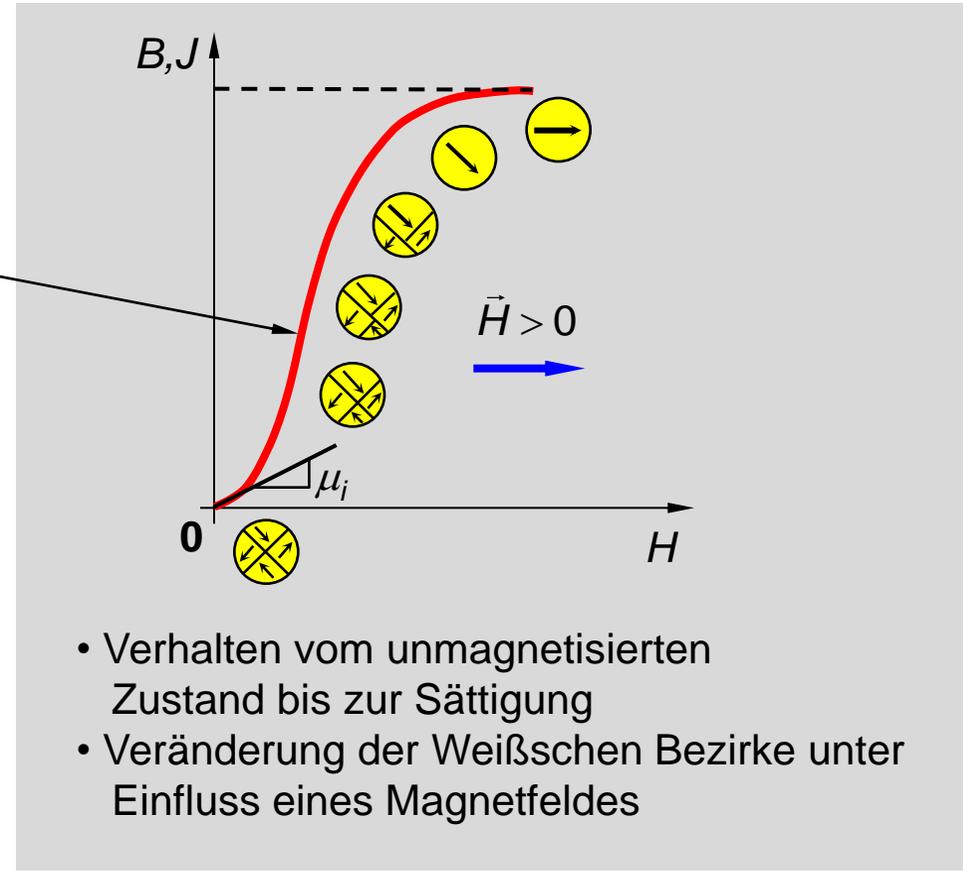
Fehlstellen (Verunreinigungen, Leerstellen, Korngrenzen, Versetzungen, etc.) beeinflussen die magnetischen Eigenschaften eines Werkstoffs maßgeblich.

4.4 Magnetische Hysterese

Magnetisierungskurven bei Ferro- und Ferrimagnetika (1)



- H_C : Koerzitivfeldstärke
- B_r : Remanenzinduktion
- B_S : Sättigungsinduktion (volle Aussteuerung)



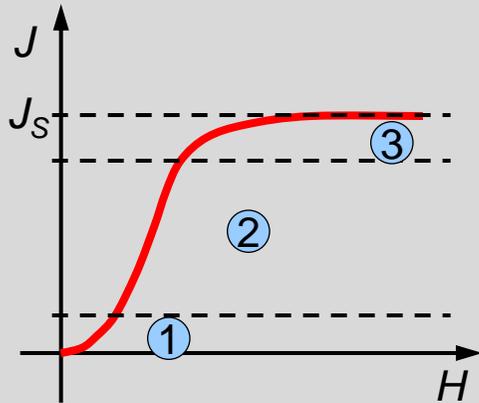
- Verhalten vom unmagnetisierten Zustand bis zur Sättigung
- Veränderung der Weißschen Bezirke unter Einfluss eines Magnetfeldes

[Münch 1993 / Callister 1994]

4.4 Magnetische Hysterese

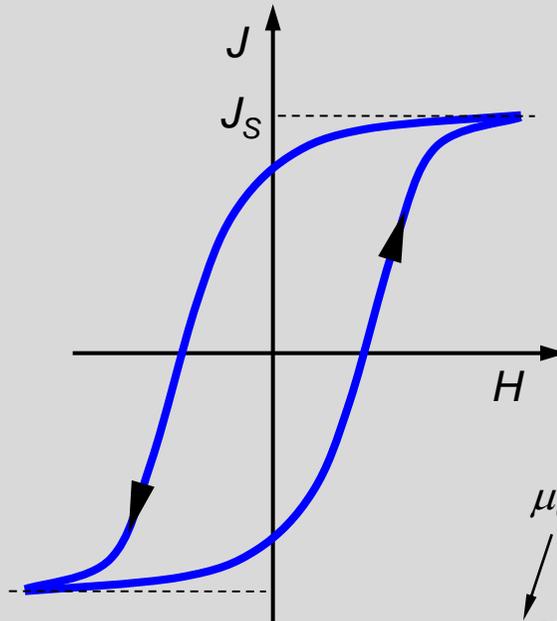
Magnetisierungskurven bei Ferro- und Ferrimagnetika (2)

Neukurve

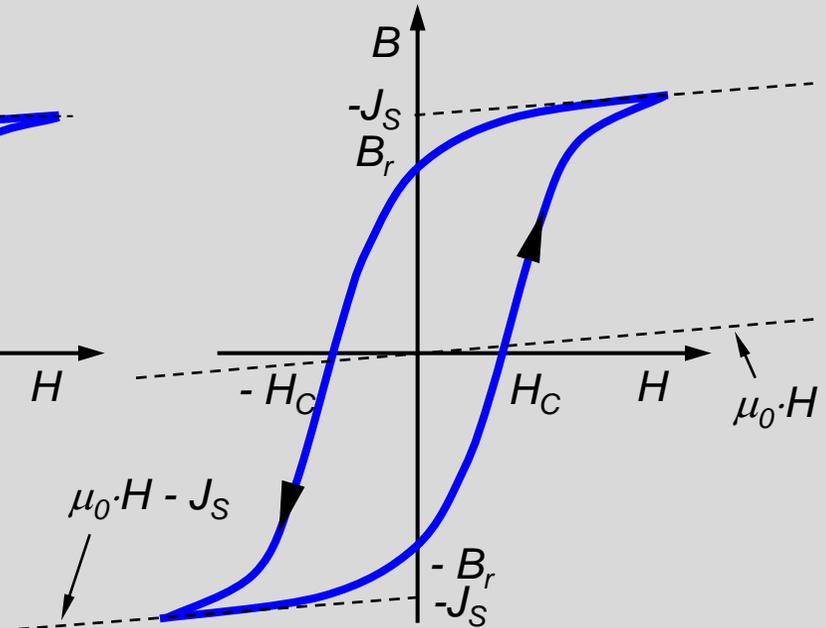


- ① reversible
Blochwandverschiebung
- ② irreversible
Blochwandverschiebung
- ③ reversible
Drehprozesse

J(H)-Diagramm

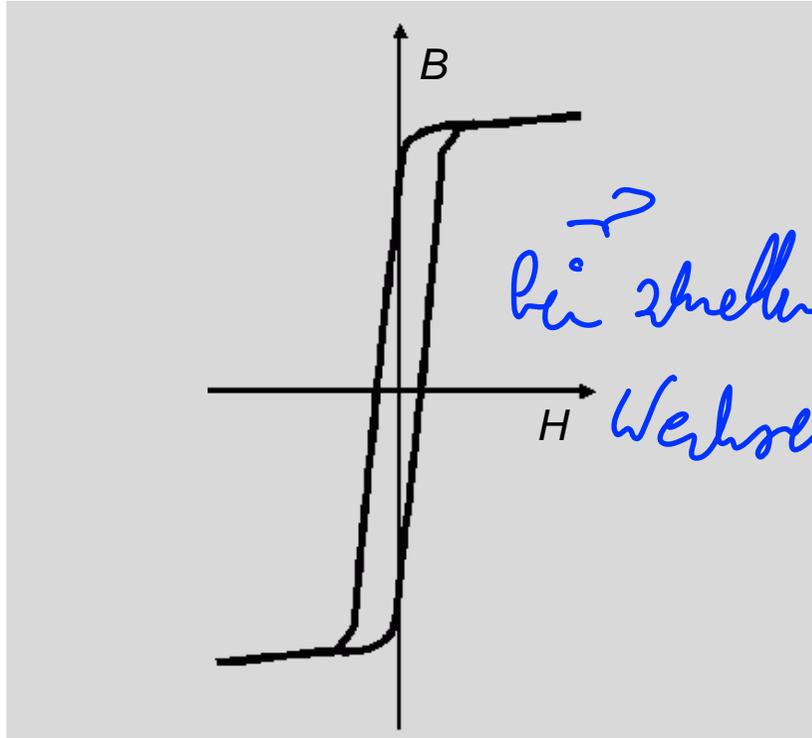


B(H)-Diagramm



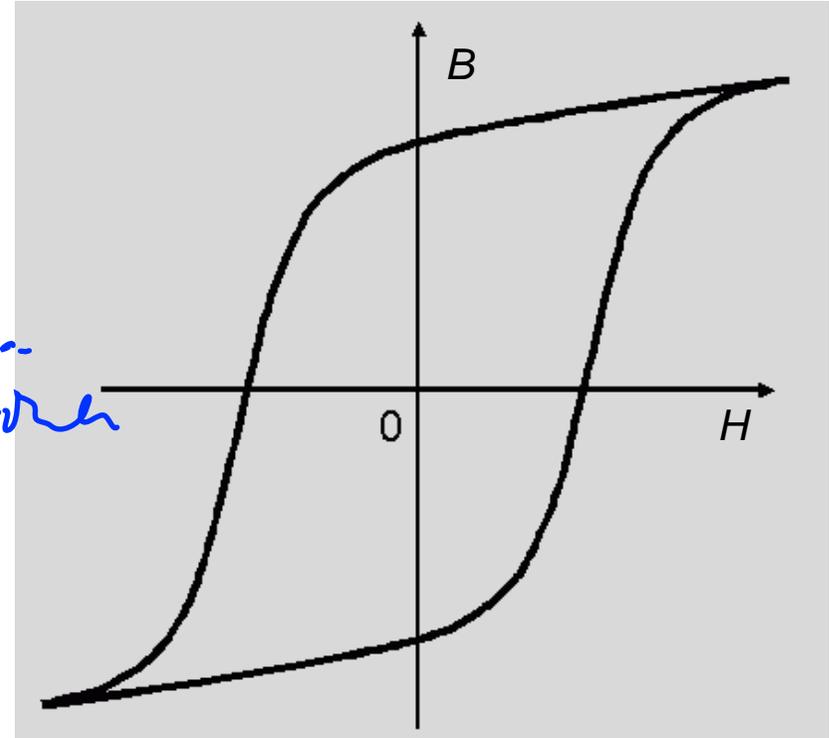
4.4 Magnetische Hysterese

Weich- und hartmagnetische Werkstoffe (1)



→
bei 2 Umläufen
Wechselstrom

weichmagnetischer Werkstoff mit
kleiner Koerzitivfeldstärke $H_C < 10 \text{ A/cm}$

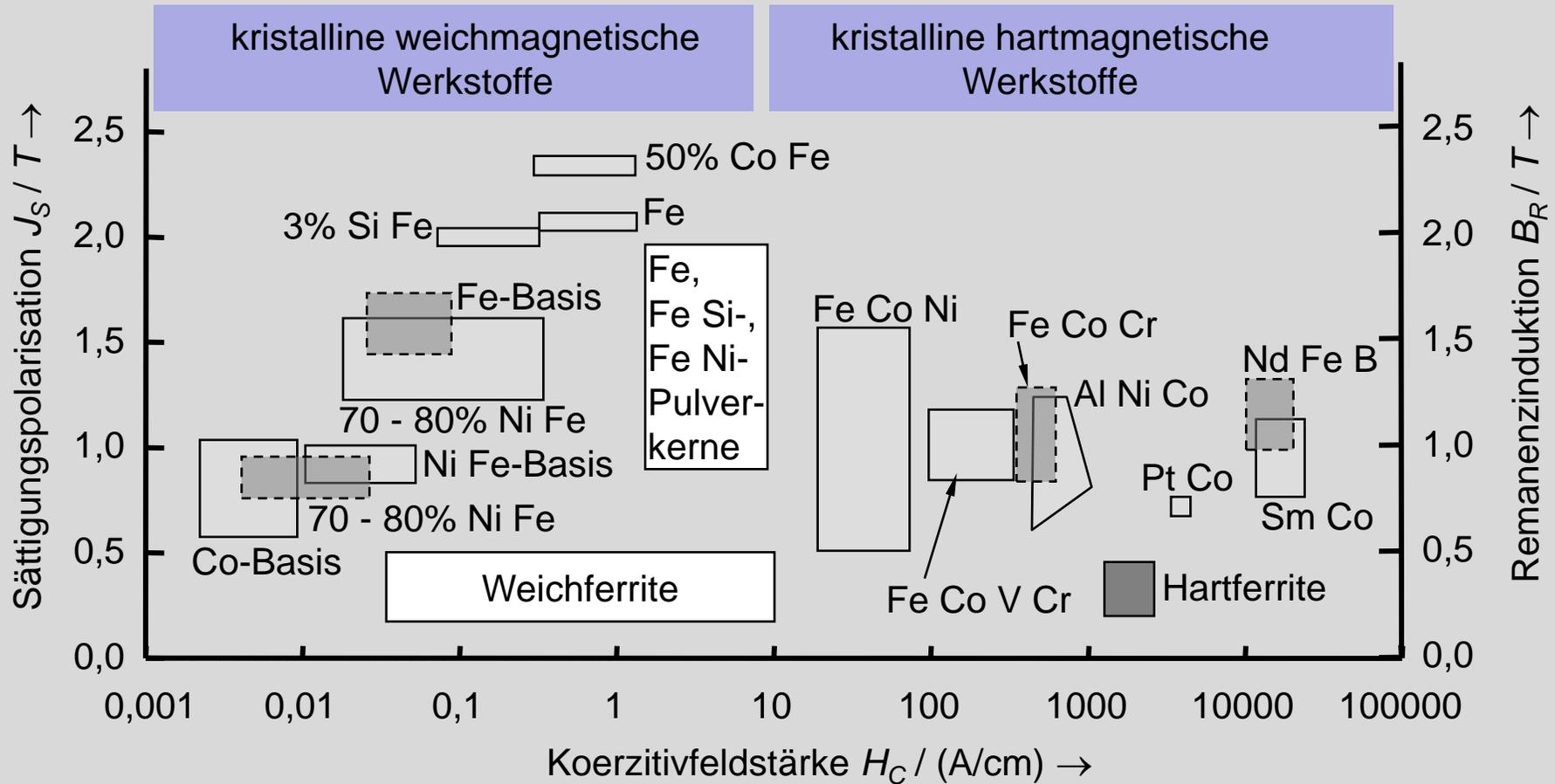


hartmagnetischer Werkstoff mit großer
Koerzitivfeldstärke $H_C > 100 \text{ A/cm}$

[Münc 1987]

4.4 Magnetische Hysterese

Weich- und hartmagnetische Werkstoffe (2)

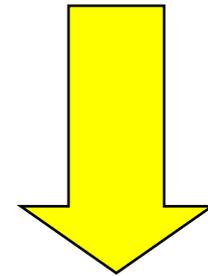
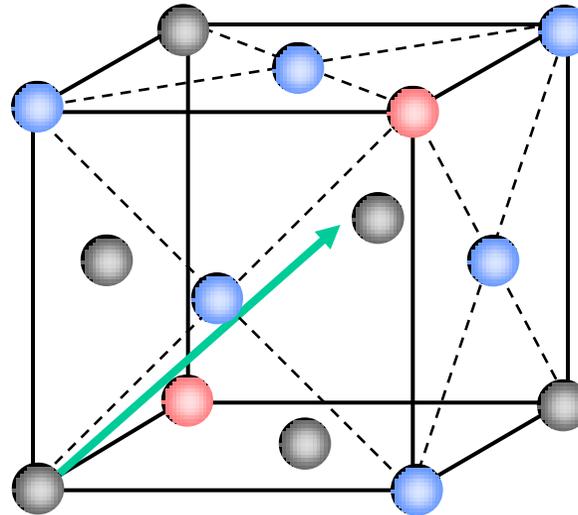
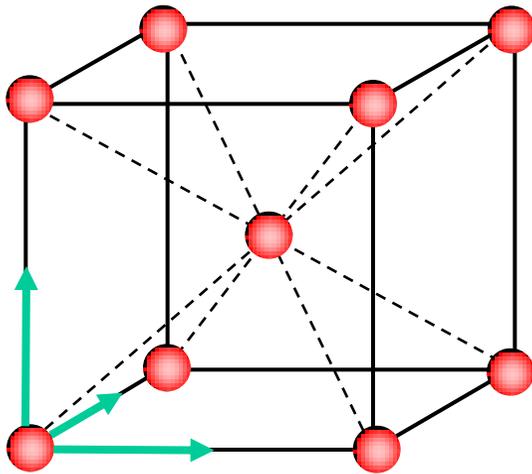


[Boll 1990]

4.4 Magnetische Hysterese

Weich- und hartmagnetische Werkstoffe (3)

Eisen (Fe) kubisch raumzentriertes Gitter + **Nickel (Ni)** kubisch flächenzentriertes Gitter → **Permalloy** (80% Ni + 20% Fe)



Vorzugsmagnetisierungsrichtungen →

entlang der Würfelkante

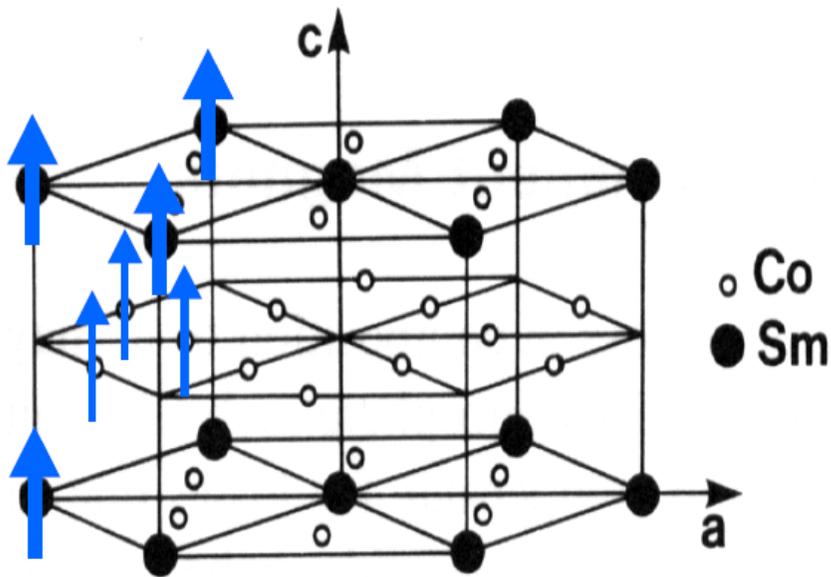
entlang der Diagonalen

**keine Vorzugs-
magnetisierungsrichtung**

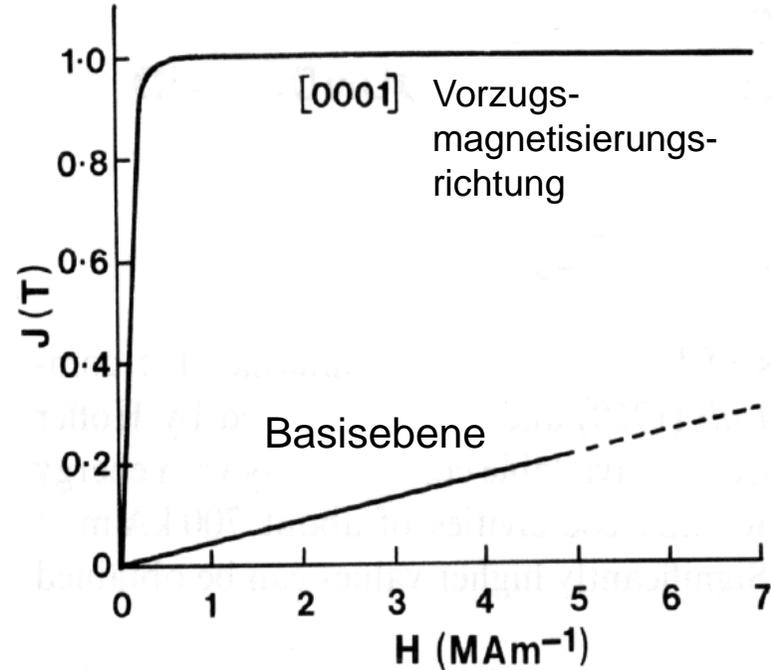
4.4 Magnetische Hysterese

Weich- und hartmagnetische Werkstoffe (3)

SmCo₅
hexagonales Gitter

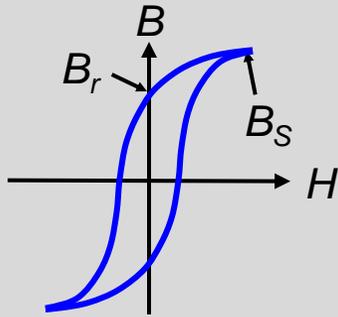


eine Vorzugsmagnetisierungsrichtung
in Richtung der c-Achse

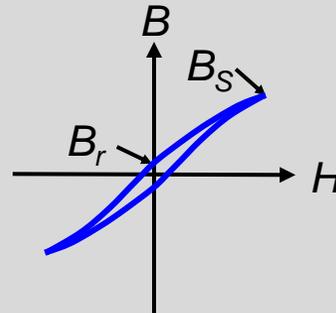


4.4 Magnetische Hysterese

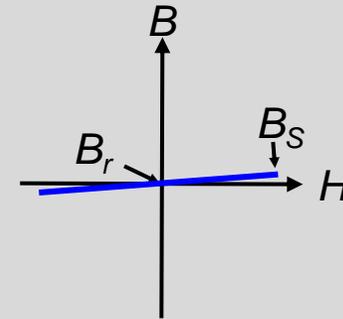
Typisierung technischer Hystereseschleifen



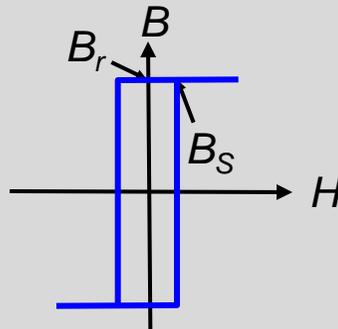
„normale“ Schleife
 $B_r \approx 1/2 B_S$



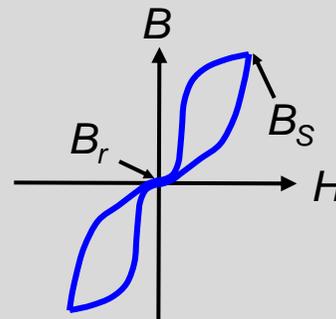
flache Schleife,
 niedrige Remanenz
 hoher Induktionshub



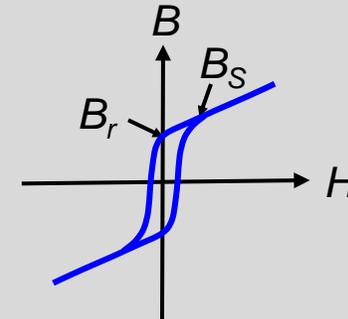
lineare, extrem flache
 Schleife, typisch für
 Pulververbundwerkstoffe



Rechteckschleife
 $B_r \approx B_S$ (Speicher)



Perminvar-Schleife,
 in der Mitte eingeschnürt,
 zweigeteilte Hysterese



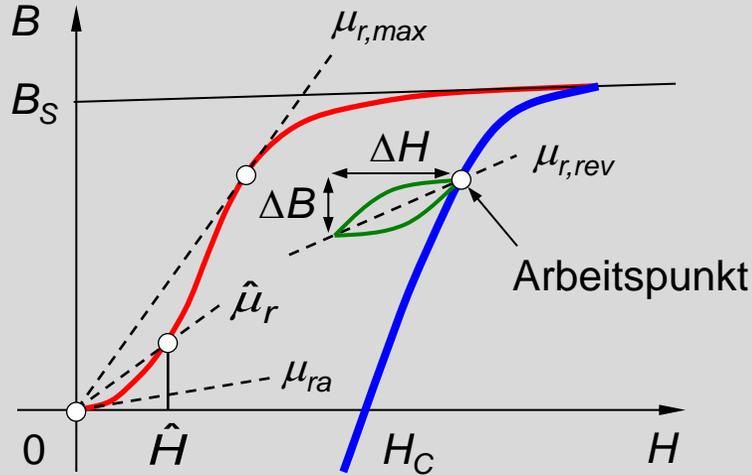
nichtlineare Schleife,
 typisch für Kerne aus
 zwei Werkstoffen

[Boll 1990]

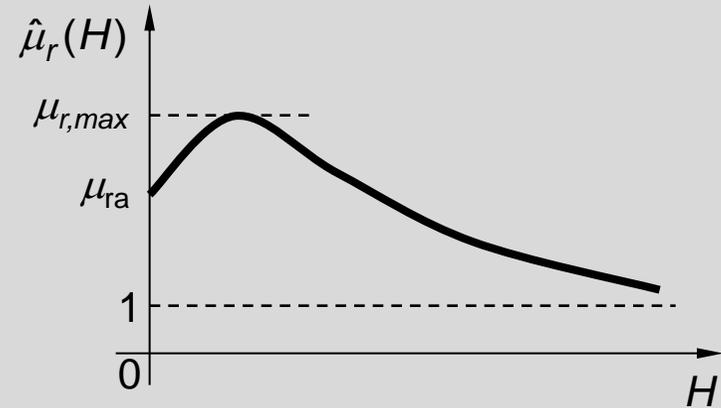
4.4 Magnetische Hysterese

Technische Permeabilitätszahlen (1)

Permeabilitätszahl aus der Neukurve



Feldstärkeabhängigkeit von $\hat{\mu}_r$



Reversible Permeabilitätszahl

$$\mu_{r,rev} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \left(\frac{\Delta B}{\Delta H} \right)_{AP}$$

Anfangs-Permeabilität

$$\mu_{ra} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \left(\frac{dB}{dH} \right)_{H=0}$$

relative Amplitudenpermeabilität

$$\hat{\mu}_r = \frac{1}{\mu_0} \cdot \left(\frac{B}{H} \right)_{H=\hat{H}}$$

[Münch 1987]

4.4 Magnetische Hysterese

Technische Permeabilitätszahlen (2)

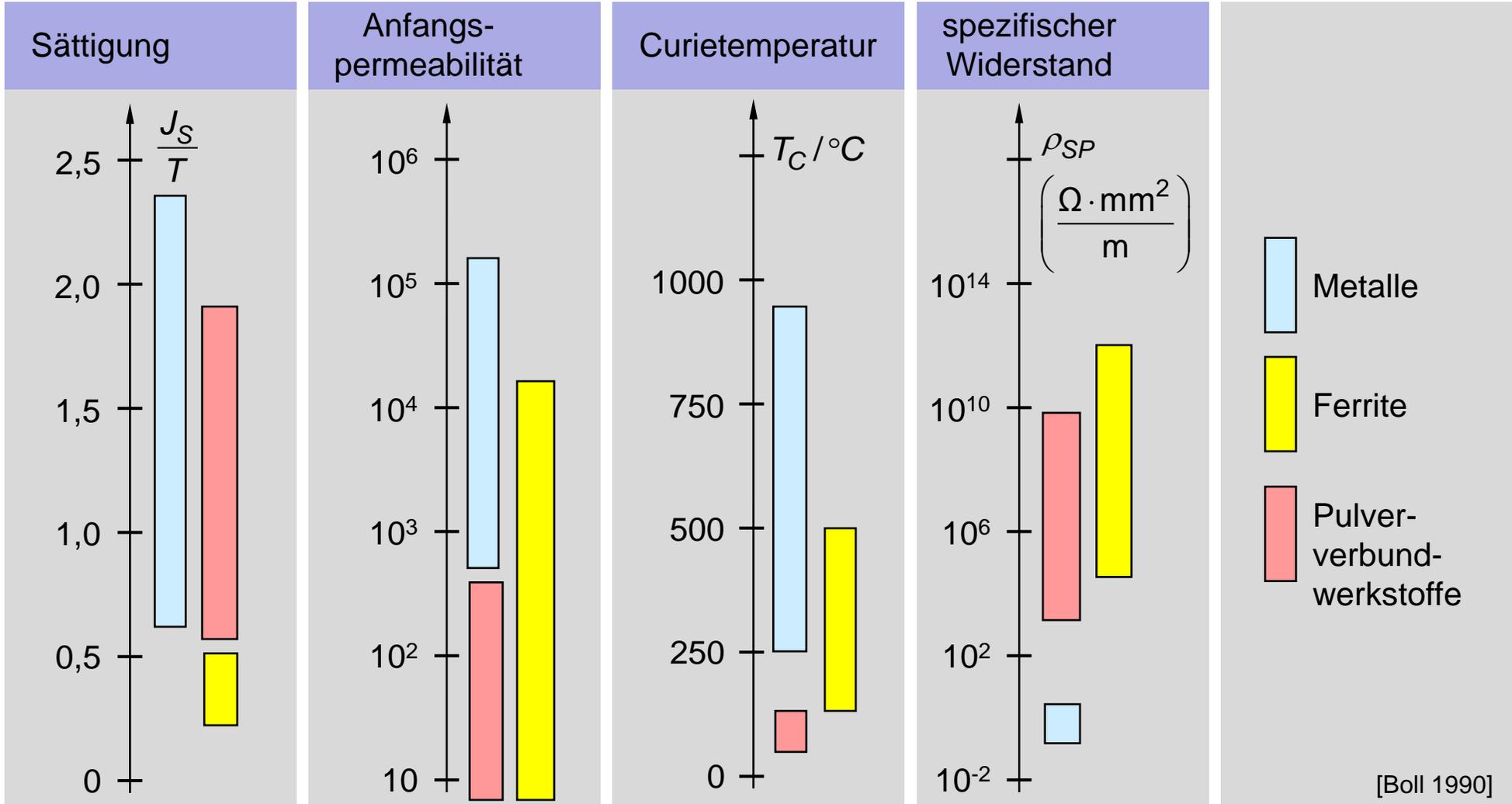
Typische ferro-/ferrimagnetische Werkstoffe

Werkstoff	Zusammensetzung in Gew.% (Rest Fe)	B_r [T]	H_C [A/m]	μ_{ra}	$\hat{\mu}_{r,max}$
Dynamoblech	2Si		60	500	6000
Trafohlech	4Si		40	300	7000
Permalloy	78Ni, 3Mo	0,6	1	10^4	$8 \cdot 10^4$
Mumetall	76Ni, 5Cu, 2Cr	0,4	2	$3 \cdot 10^4$	10^5

[Münch 1987]

4.4 Magnetische Hysterese

Übersicht ferro- und ferrimagnetischer Werkstoffklassen

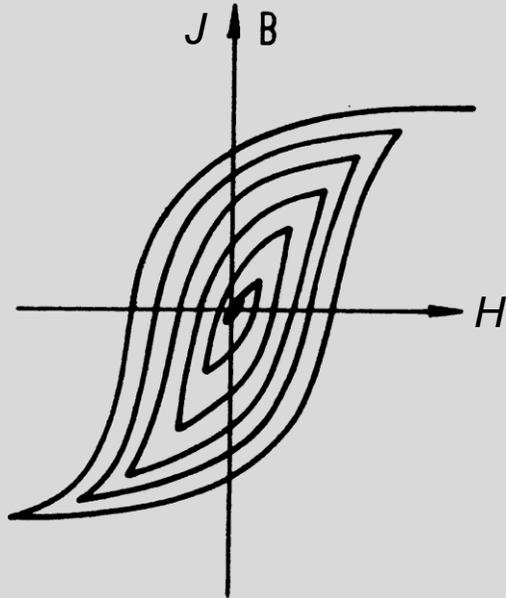


[Boll 1990]

4.4 Magnetische Hysterese

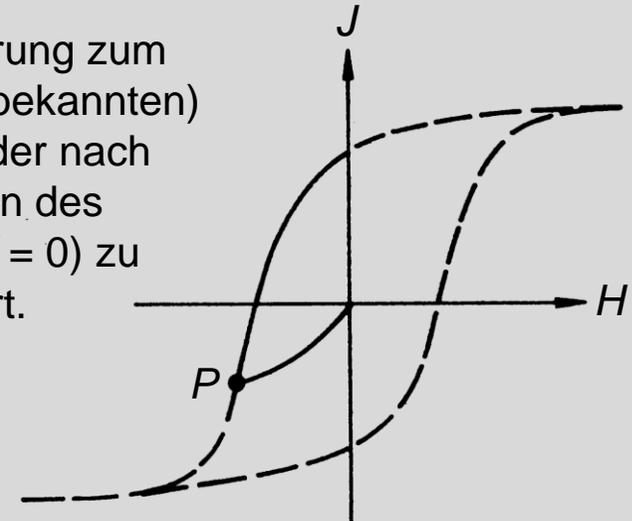
Abmagnetisierung der Werkstoffe

Wechselfeld-Abmagnetisierung



Scheinbare Abmagnetisierung

Aussteuerung zum (meist unbekanntem) Punkt P , der nach Abschalten des Feldes ($H = 0$) zu $J = 0$ führt.



Temperaturbehandlung

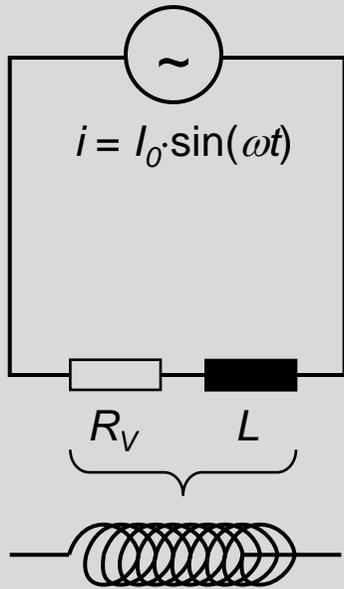
Wiederherstellung des unmagnetisierten Zustands durch Erwärmen des Werkstoffs über T_C

[Arlt 1989]

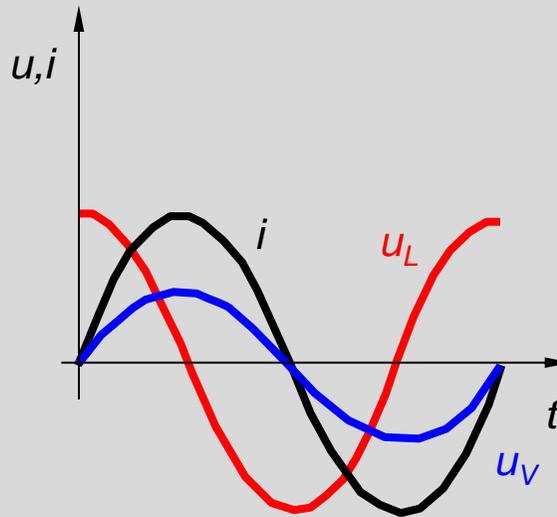
4.5 Verhalten von Magnetika im Wechselfeld

Verlustfaktor und komplexe Permeabilitätszahl

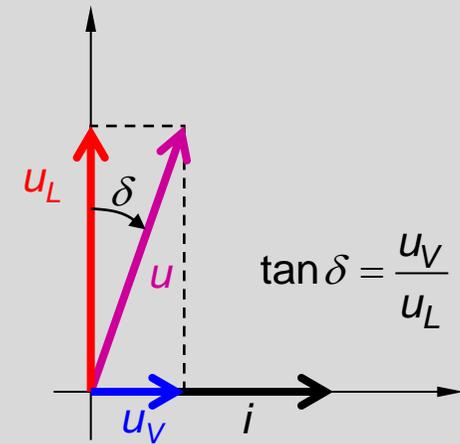
Spule mit eingprägtem Wechselstrom



Strom- und Spannungsverlauf



Zeigerdiagramm und Verlustfaktor



[Münc 1987]

Induktivität (lange Spule):

$$L \approx \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{n^2 \cdot A}{l}$$

komplexe Permeabilitätszahl:

$$\mu_r^* = \mu_r' - j \cdot \mu_r''$$

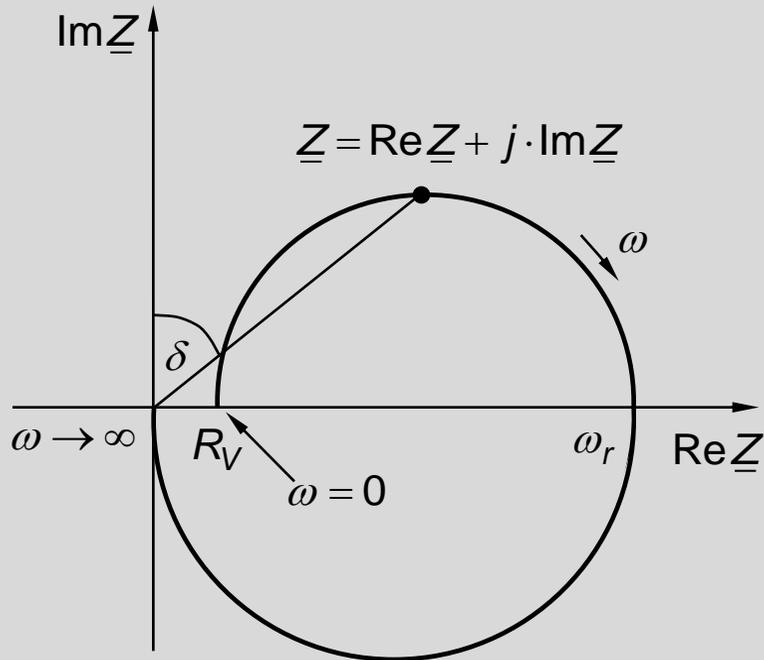
Verlustfaktor:

$$\tan \delta = \frac{\mu_r''}{\mu_r'}$$

4.5 Verhalten von Magnetika im Wechselfeld

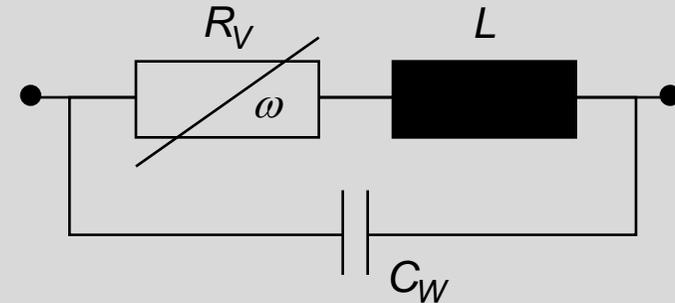
Ortskurve und Ersatzschaltbild einer realen Spule

Ortskurve einer realen Spule



R_V : Leitungs-, Hysterese-, Wirbelstromverluste
 C_W : Wicklungskapazität

Ersatzschaltbild einer realen Spule



kleine Kapazität C_W (technischer Fall)

Verlustfaktor

$$\tan \delta = \frac{\text{Re}\underline{Z}}{\text{Im}\underline{Z}} = \frac{R_V(\omega)}{\omega \cdot L}$$

Güte

$$Q = \frac{1}{\tan \delta}$$

Näherung für
kleine Verluste

$$\tan \delta \approx \delta = \frac{1}{Q} \quad (R_V \ll \omega L)$$

4.5 Verhalten von Magnetika im Wechselfeld Verluste durch Hysterese (Ummagnetisierung)

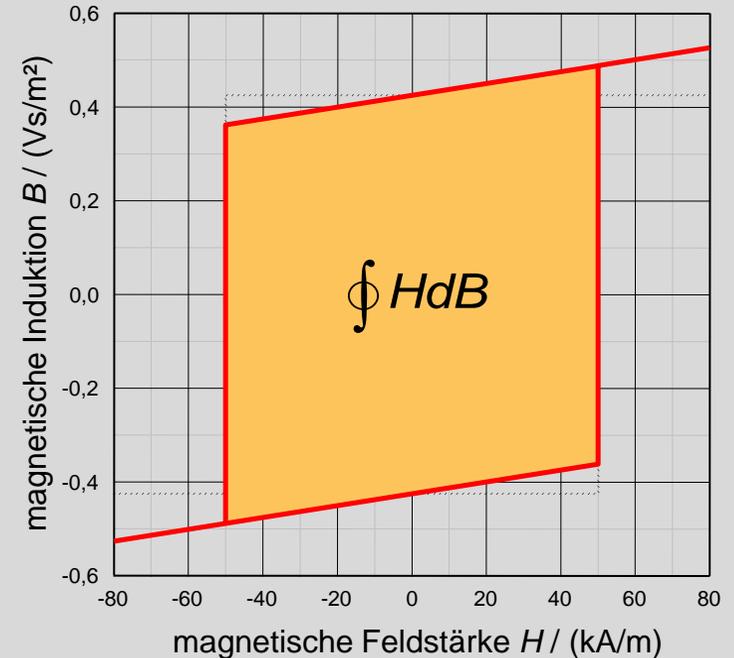
Bei der Ummagnetisierung ferro-/ferrimagnetischer Werkstoffe entstehen spezifische Wärmeverluste w_H [J/m³], welche dem Umlaufintegral auf der $B(H)$ -Kennlinie entsprechen (eingeschlossene Fläche).

Energiedichte des Verlusts: $w_H = \oint HdB$

Bei Wechselstromerregung führt dies zu einem Verlust, der sog. Hystereseverlustleistung P_H .

$$P_H = V \cdot f \cdot \oint HdB$$

Mit $\mu_0 \cdot H \ll J$ folgt: $P_H \approx V \cdot f \cdot \oint HdJ$



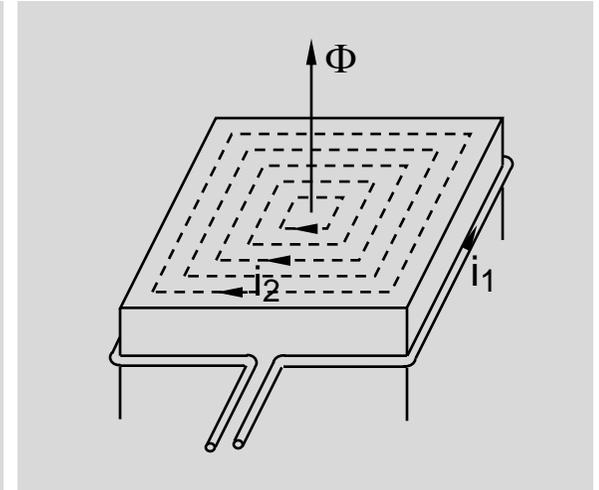
4.5 Verhalten von Magnetika im Wechselfeld

Verluste durch Wirbelströme

Eisenkern im Wechselfeld

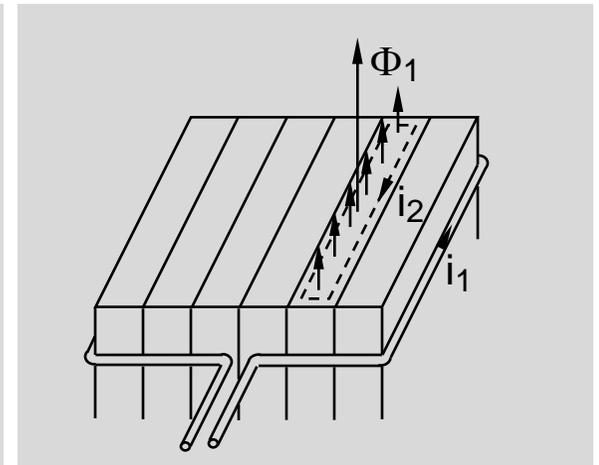
Befindet sich ein elektrischer Leiter in einem Wechselfeld, z.B. in einer Spule oder einem Transformator, so werden in ihm sog. Wirbelströme induziert (gemäß Lenzscher Regel). Diese führen zu Erwärmung und damit zu Verlusten.

⇒ **Wirbelstromverluste**



Abhilfe in der Technik

Kernschichten aus dünnen, voneinander isolierten Eisenblechen. Zusätzlich Erhöhen des spezifischen Widerstands des Eisens durch Hinzulegieren von Silizium.



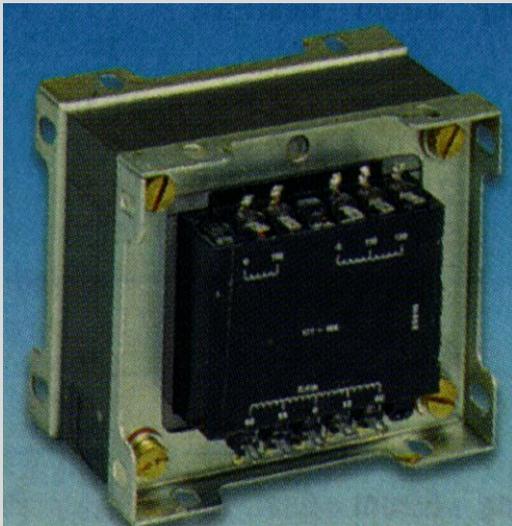
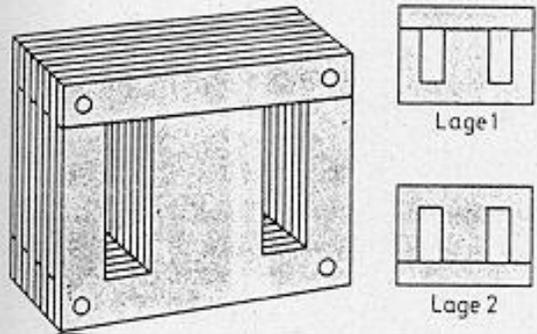
4.6 Bauelemente und Anwendungen

Einsatzgebiete magnetischer Werkstoffe

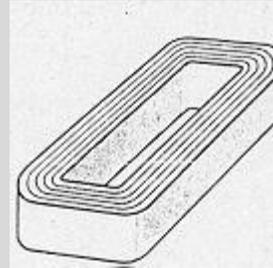
Anwendungen	Anforderungen	Werkstoffe
Transformatoren Motoren Generatoren	hohe Sättigungsmagnetisierung J_s geringe Koerzitivfeldstärke H_C geringe Leitfähigkeit	Fe + 0,7...4 Si Fe + 35...50 Co
NF-Übertrager	Linearität der $B(H)$ -Kennlinie geringe Leitfähigkeit	Fe + 36 Ni ca. 20 Fe + 40 Ni ca. 20 Fe + 40 Co
HF-Übertrager	Linearität der $B(H)$ -Kennlinie sehr geringe Leitfähigkeit	Ni-Zn-Ferrite
Abschirmungen	sehr hohe Anfangspermeabilität μ_{ra}	Fe + 76...79 Ni (+ Cu, Cr, Mo)
Digitale Informationsspeicher	rechteckige $B(H)$ -Kennlinie ($J_s \approx B_r$)	Fe + 50 Ni, Mg-Zn-Ferrite Granatschichten
Dauermagnete	Produkt $ B \cdot H $ möglichst groß	50Fe+24Co+14Ni+9Al+3Cu BaO·6Fe ₂ O ₃ , Sm ₂ Co ₁₇ , NdFeB

4.6 Bauelemente und Anwendungen Transformatoren, Übertrager

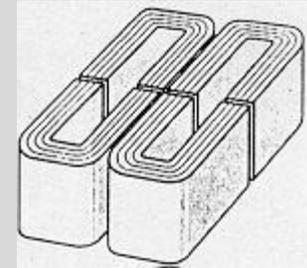
Geschichteter Eisenkern



Bandkern



Schnittbandkern

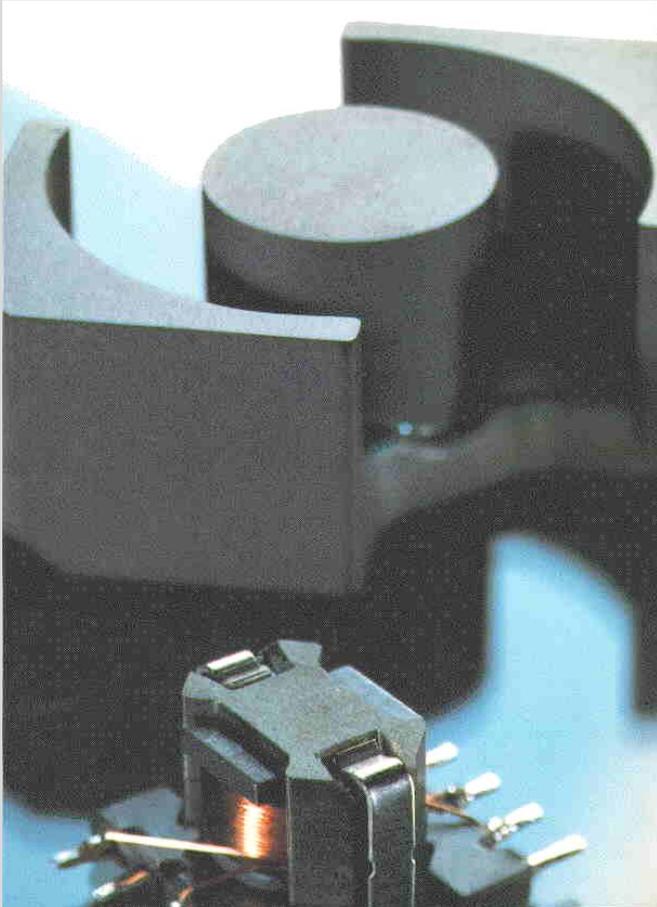


Ringkern

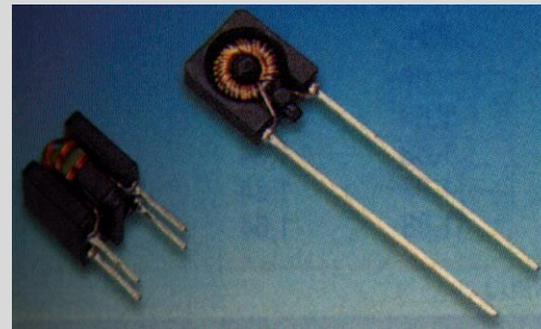
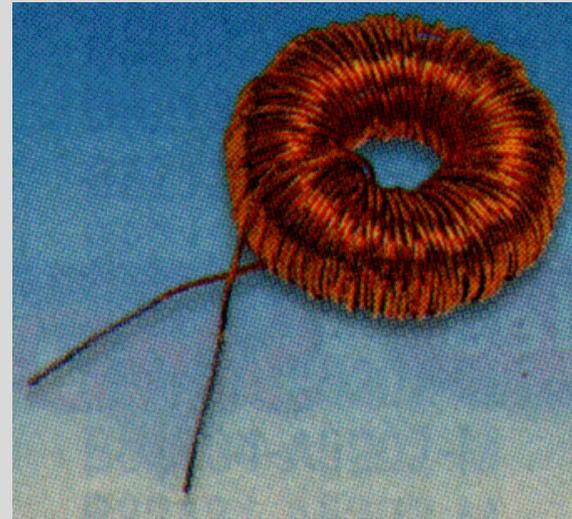


4.6 Bauelemente und Anwendungen Übertrager, Drosselspulen

Schalenkern für Übertrager

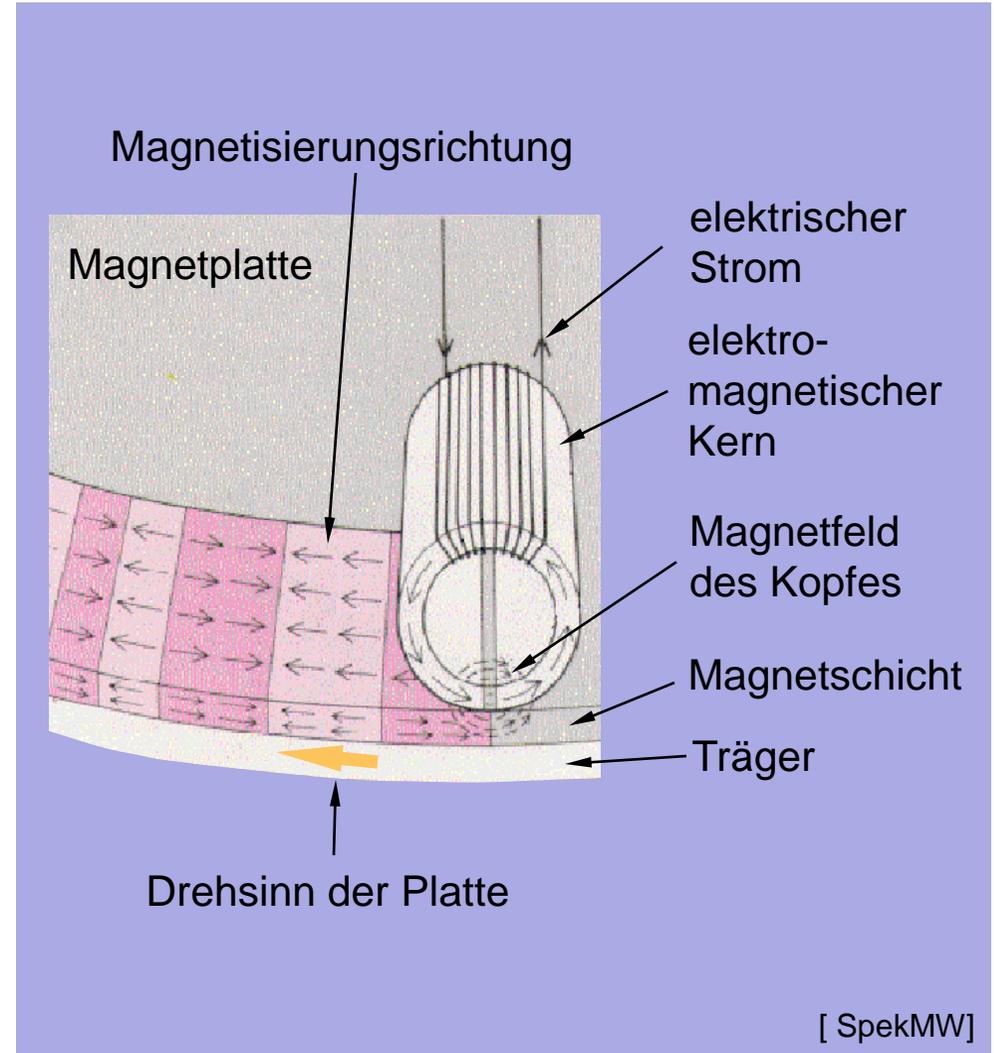
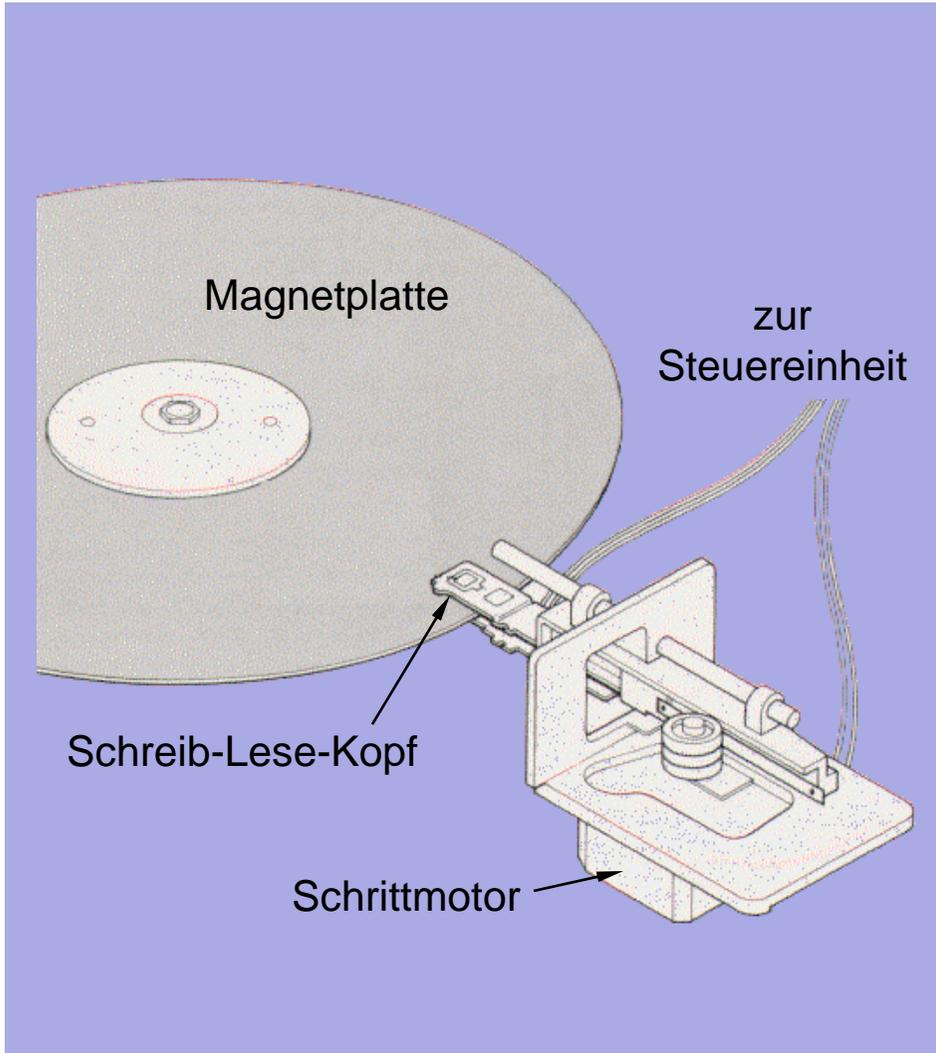


Drosseln mit Ferritkern



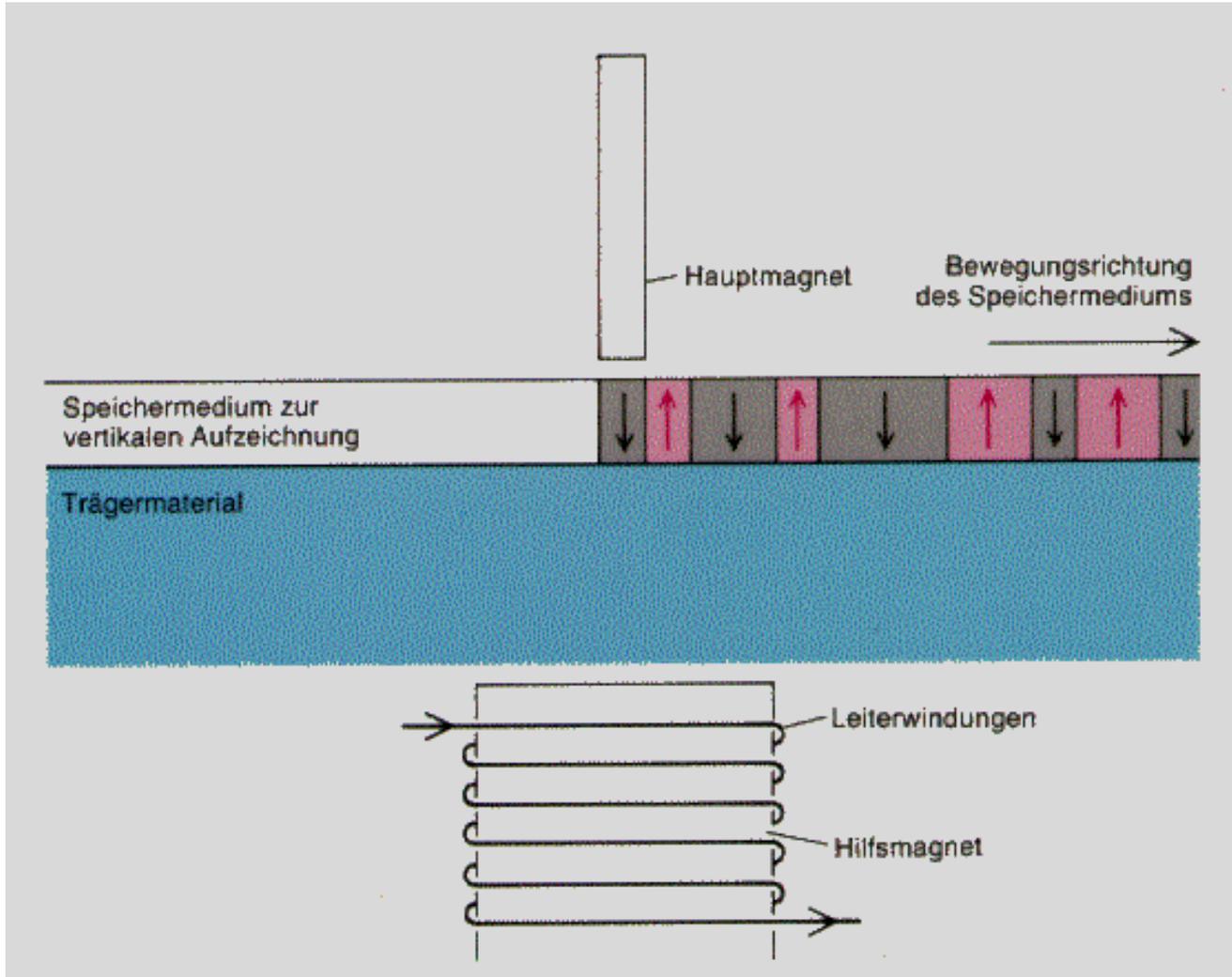
4.6 Bauelemente und Anwendungen

Magnetplatte als Speichermedium: horizontale Polarisation



4.6 Bauelemente und Anwendungen

Magnetplatte als Speichermedium: vertikale Polarisation

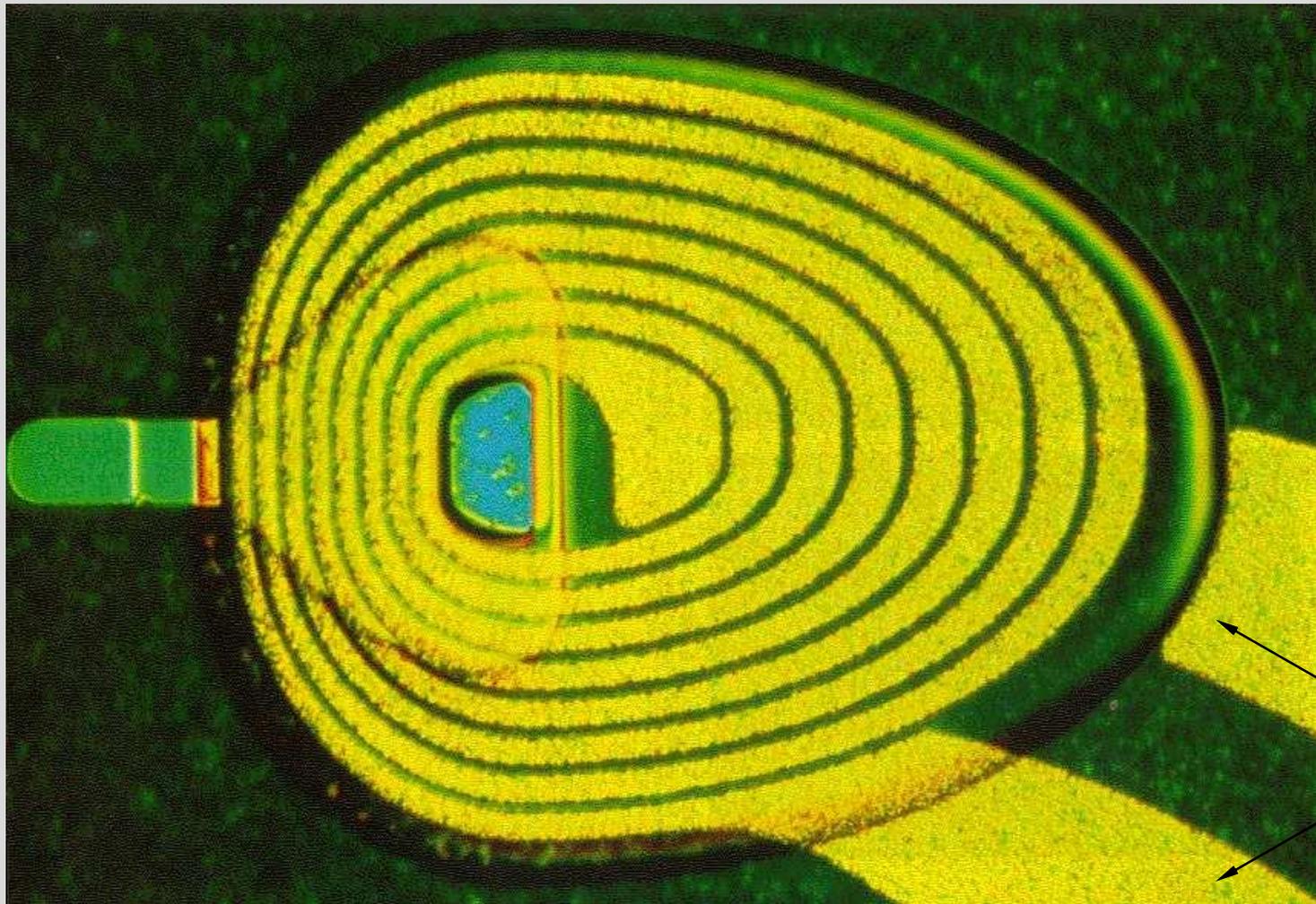


Maximale Speicherdichte wird erhöht durch vertikale Polarisation.

[Spektrum]

4.6 Bauelemente und Anwendungen

Schreib/Lese-Kopf für Magnetplatten in Dünnschichttechnik



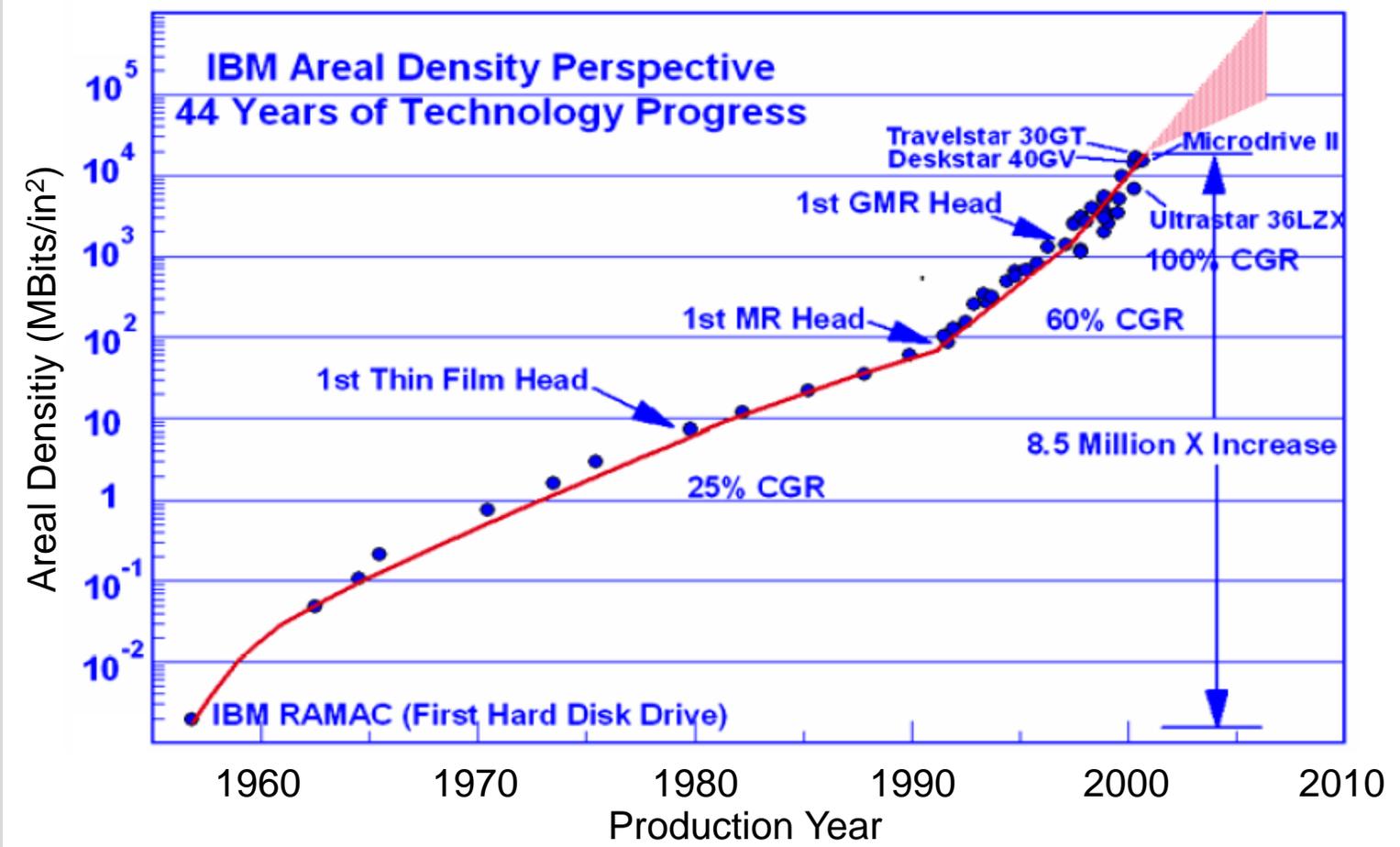
Keramik-substrat

Strom-zuführungen

[Spektrum]

4.6 Bauelemente und Anwendungen

Technologieentwicklung von Magnetspeicherplatten



[IBM]

4.6 Bauelemente und Anwendungen Permanentmagnete

Anforderungen an Dauermagneten

Remanenz B_r

- Koerzitivfeldstärke BH_C und JH_C
- Form der Entmagnetisierungskurve
- Güteprodukt bzw. Energiedichte $(BH)_{max}$
- TK von B_r bzw. H_C

Entmagnetisierungskurven von 2 Werkstoffen mit Arbeitspunkten gleichen maximalen Güteprodukts (Energiedichte)

