

VORLESUNG MATERIALWISSENSCHAFTEN

138.016

Ernst Bauer
Christoph Eisenmenger-Sittner
Josef Fidler

Institut für Festkörperphysik, TU Wien

12. Dez. 2007

Vorlesungsinhalt

- 1) **Kristallstrukturen**
- 2) **Beugung und Strukturbestimmung**
- 3) **Mehrstoffsysteme**
- 4) **Makroskopische Eigenschaften von Festkörpern, und Grenzflächen und ihre Bestimmung**
 - Metalle
 - Halbleiter
 - Mechanische Eigenschaften
 - Thermische Eigenschaften
 - **Magnetische Eigenschaften**

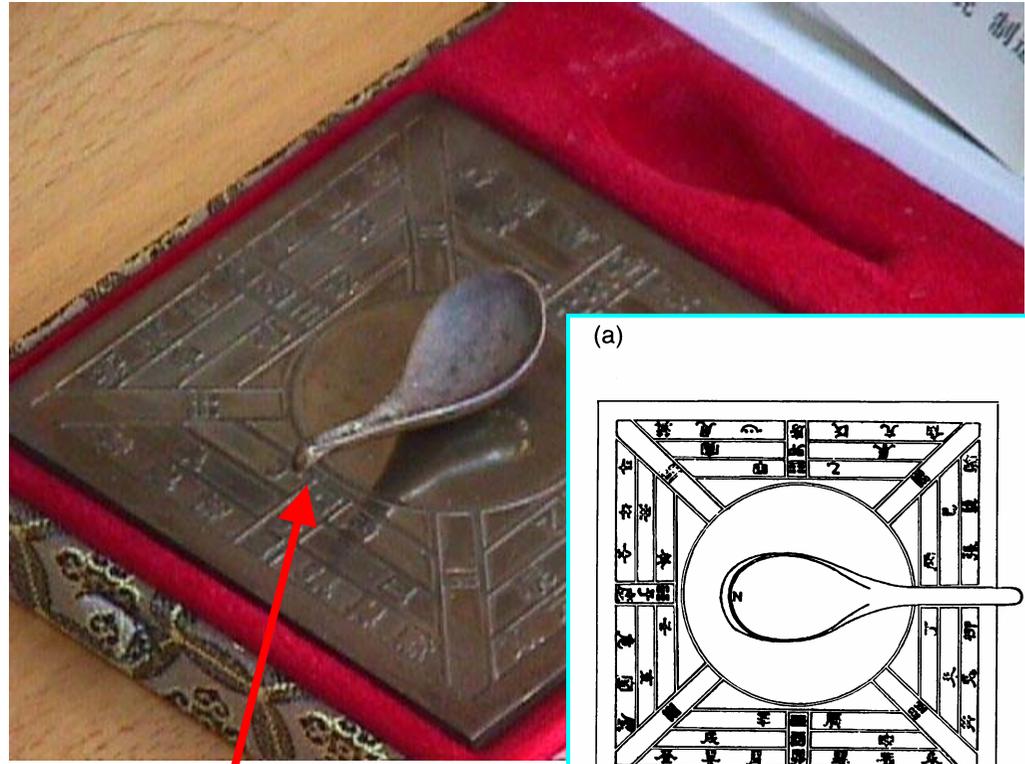
Magnetismus - Historische Entwicklung

- B.C. China → Magneteisenstein (Magnetit), magnetischer Draht,
- 1086 **Shen Kua** → Kompass in China
- 1187 **Neckam**, „de utensilibus“, „de naturis rerum“, Kompass in Europe
- 1600 **Gilbert**, „de magnete“, Dauermagnet
- 1730 **Savery**, first powerful permanent magnet
- 1743 **Dietrich/Bernoulli**, Hufeisenmagnet
- 1750 **Knight**, Fe-Oxid Magnet
- 1825 **Sturgeon**, Elektromagnet
- 1931 **Mishima**, AlNiCo-Magnet
- 1940 Hartferrit
- 1966 **Strnat**, Selten Erd (Rare Earth) -cobalt Magnet
- 1983 **Sagawa, Herbst and Croat, Hadjipanayis**, RE-Fe-B Magnet



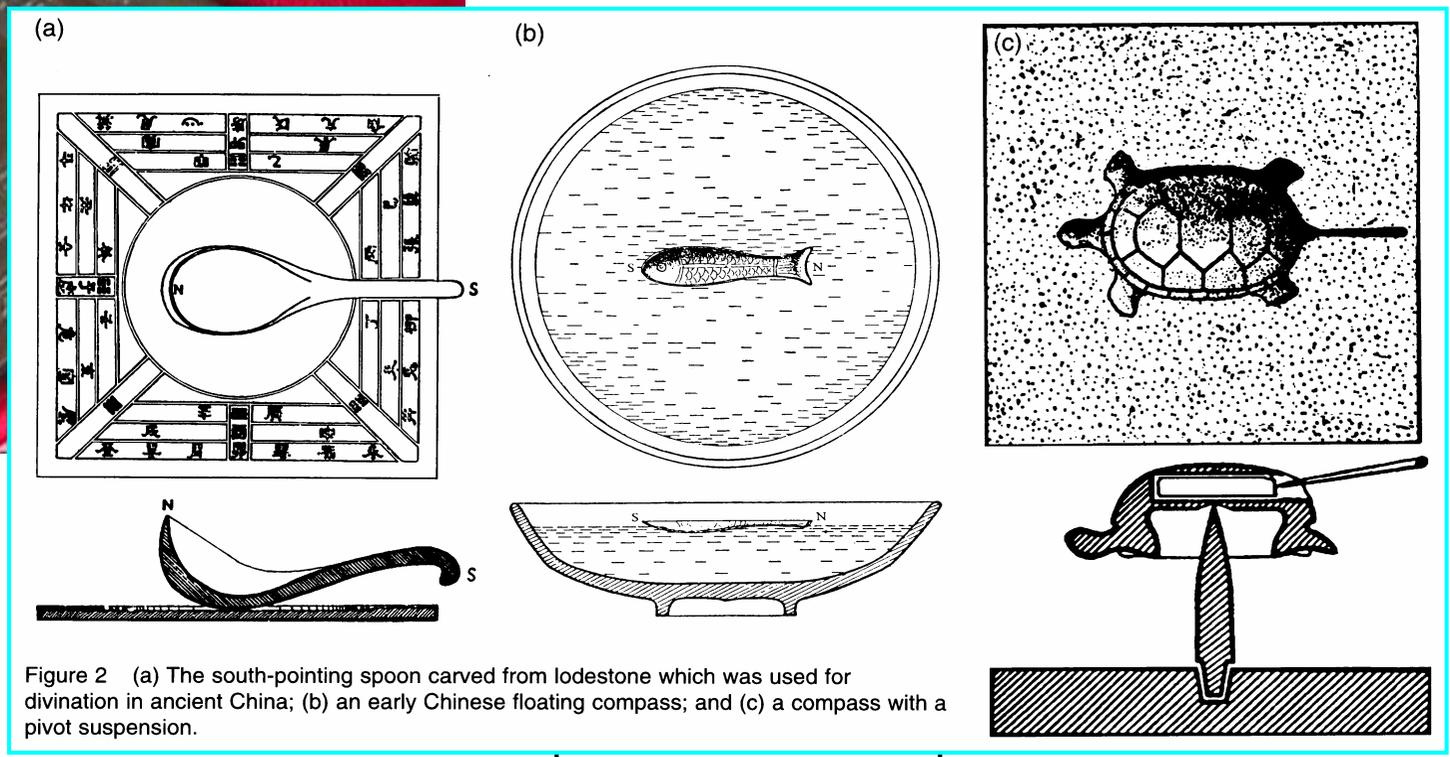
250 years of progress in magnet technology - the lodestone, ferrite and Nd-Fe-B magnets each produce half a Joule of magnetic energy, yet the size of the magnet has decreased a thousandfold. (Photo: Coey, Trinity College Dublin.)

Magnetkompass - China AD



zeigt nach Süden

Die stets in gleiche Richtung zeigende Magnetnadel ist die älteste Anwendung von Dauermagneten



Magnetische Eigenschaften

- Maxwellschen Gleichungen

$$\nabla \cdot \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \rho(\mathbf{r}, t)$$

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = - \frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = 0$$

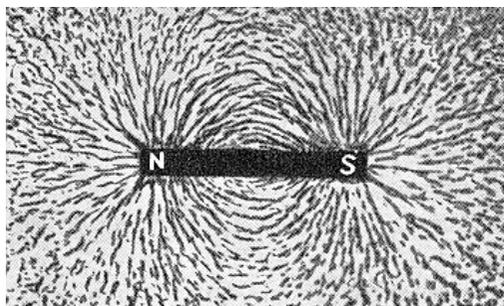
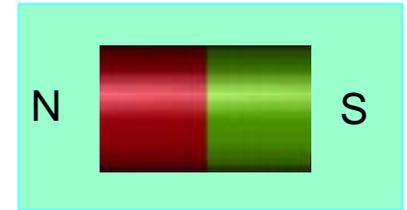
$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{s}(\mathbf{r}, t) + \frac{\partial \mathbf{D}(\mathbf{r}, t)}{\partial t}$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \cdot \mathbf{E} \quad , \quad \mathbf{s} = \gamma \cdot \mathbf{E} \quad , \quad \mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H}$$

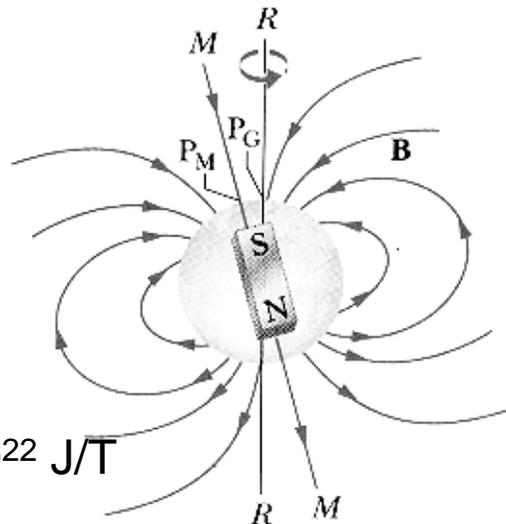
- Elektrische und **magnetische Felder** werden durch die elektrischen **Ladungen** und durch die magnetischen **Momente** der Elementarteilchen erzeugt. Magnetische Felder werden aber auch von **bewegten elektrischen Ladungsträgern** hervorgerufen.
- Materialkonstanten haben die Bedeutung von **makroskopischen Mittelwerten** der betreffenden Eigenschaften über die atomistische Struktur der Substanzen und werden
 - ⇒ teilweise mit Hilfe der Quantentheorie berechnet sowie
 - ⇒ aus dem Experiment bestimmt.

Magnetische Eigenschaften

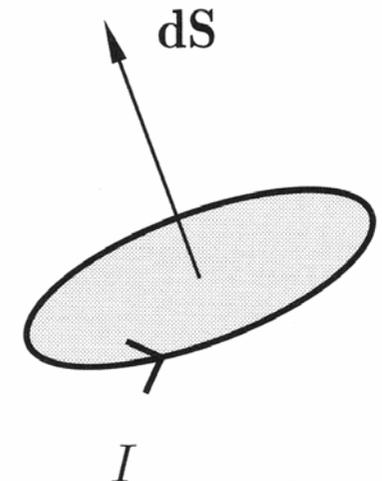
- lassen sich auf *magnetische Momente* und ihren *Wechselwirkungen* zurückführen.
- unterschiedliche Formen der Wechselwirkung führen zu den verschiedenen Arten der magnetischen Erscheinungen.
- Der fundamentale Baustein der magnetischen Eigenschaften ist der magnetische *Dipol* und das damit verbundene magnetische Moment.



$$\mu_{\text{erde}} = 8.0 \times 10^{22} \text{ J/T}$$



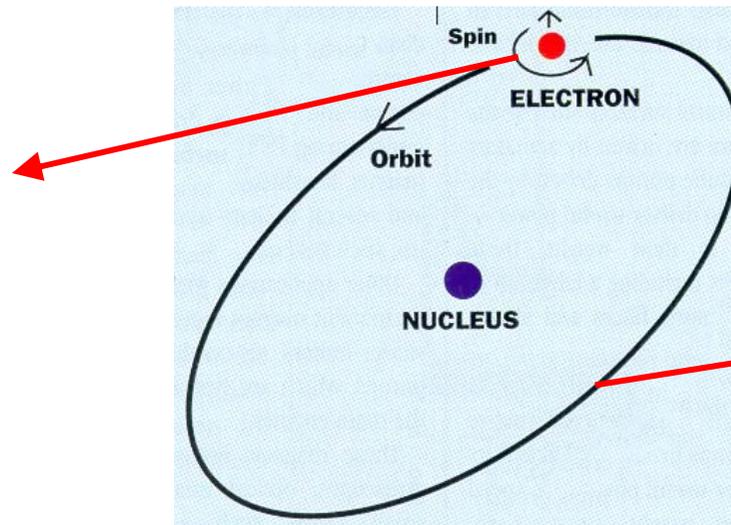
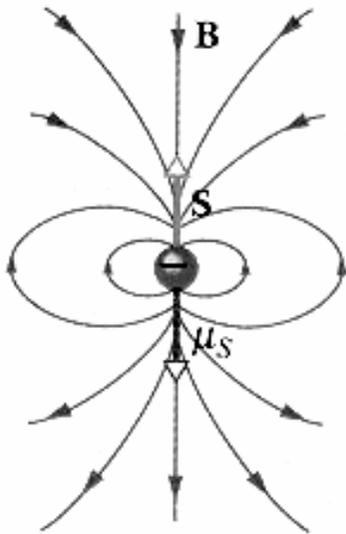
$$\boldsymbol{\mu} = i \cdot d\mathbf{S} \quad [\text{Am}^2]$$



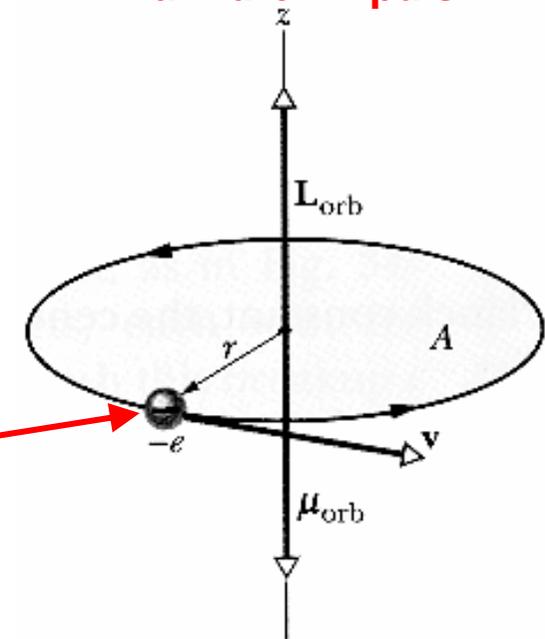
Magnetische Eigenschaften von Festkörpern

- bestimmt durch das resultierende Moment aller Elektronen, die durch die in der Substanz befindlichen Atome gegeben sind
- die Wechselwirkung dieser magnetischen Momente und
- das magnetische Moment des Atomkernes und seiner Wechselwirkung mit der Elektronenhülle.*

Eigendrehimpuls



Bahndrehimpuls



$$\mu_s = \frac{\mu_0 e \hbar}{m_e} \sqrt{s(s+1)} = 2\mu_B \sqrt{s(s+1)}$$

$$\mu_l = \frac{\mu_0 e \hbar}{2m_e} \sqrt{l(l+1)} = \mu_B \sqrt{l(l+1)}$$

Quantenzahlen

Bezeichnung	Interpretation	Formelzeichen	Wertevorrat
Hauptquantenzahl	Elektronenschale "Energie"wert	n	$n = 1, 2, 3 \dots$
Nebenquantenzahl	Bahndrehimpuls	l	$l = 0, 1 \dots, n - 1$ mit den Bezeichnungen für l : 0 1 2 3 s p d f
Richtungsquantenzahl	Quantenzahl einer Komponente des Bahndrehimpuls	l_z	$l_z = -l, -l + 1 + \dots 0 \dots l - 1, l$
Spinquantenzahl	Orientierungsquantenzahl, Quantenzahl des Eigendrehimpuls	s_z	$s_z = -1/2, + 1/2$

Bohrsches Magneton μ_B

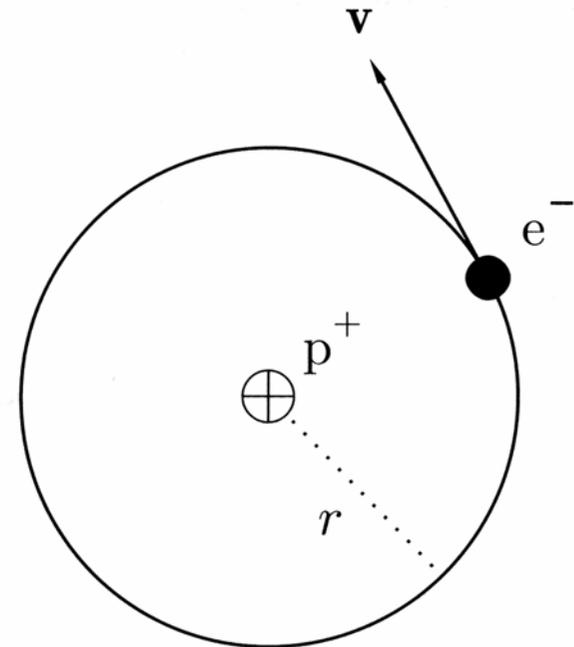
- Nach dem Bohr-Sommerfeldschen Atommodell wird das Bahnmoment aus dem magnetischen Moment eines Kreisstromes berechnet. Für $l=0$ erhält man so das Bohrsche Magneton μ_B zu

$$m_e \cdot v \cdot r = \hbar \quad \rightarrow \quad v = \frac{\hbar}{m_e \cdot r}$$

$$i = -\frac{e}{\tau} = -\frac{e \cdot v}{2\pi r} \quad \rightarrow \quad i = -\frac{e \cdot \hbar}{2\pi r^2 m_e}$$

$$\mu = \pi r^2 i = -\frac{e\hbar}{2m_e} \equiv -\mu_B$$

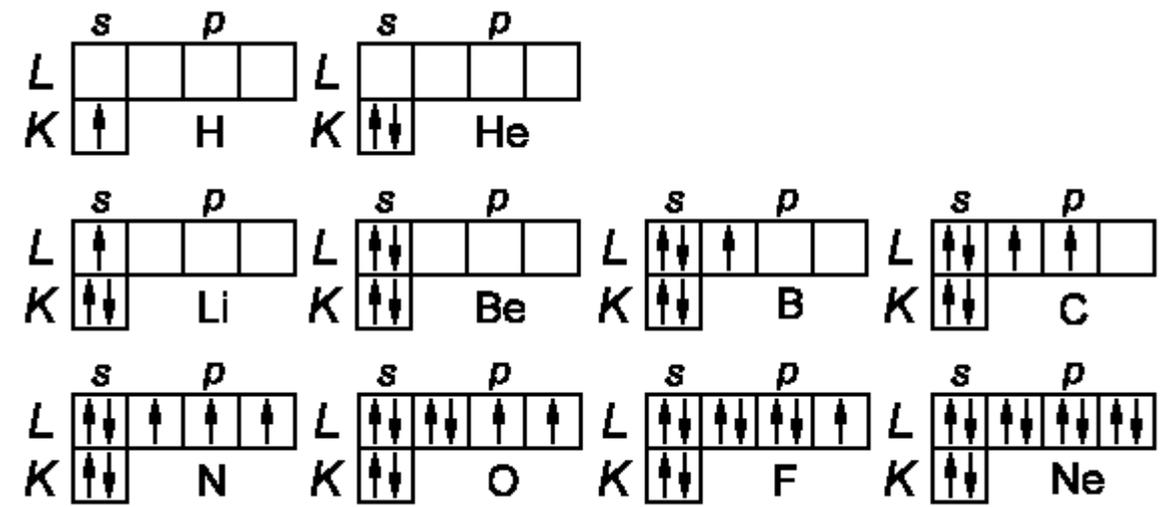
$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = 9,274 \cdot 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2$$





Hundsche Regel (1925)

- Stehen für die energiereichsten Elektronen eines Atoms mehrere Orbitale gleicher Energie zur Verfügung, so werden diese zunächst einfach besetzt.



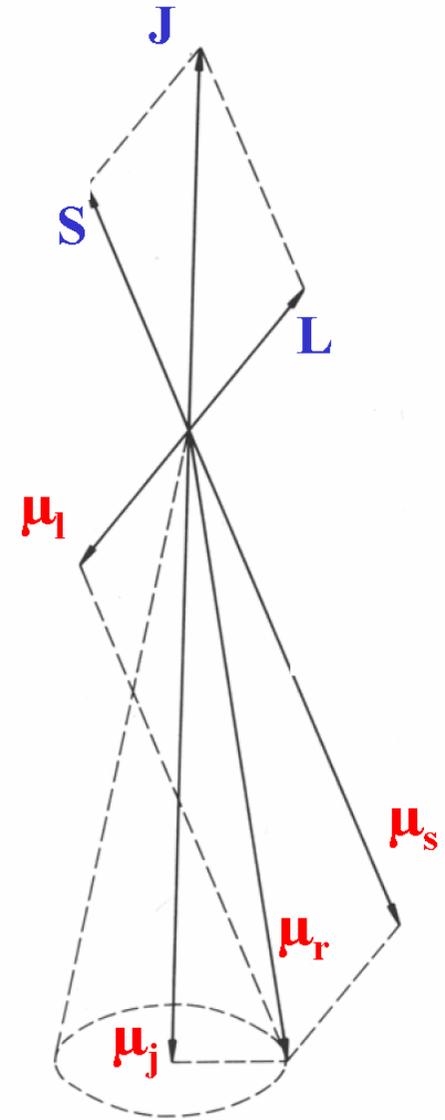
Die s-Niveaus nehmen zwei Elektronen mit entgegengesetztem Spin auf; die p-Niveaus bestehen aus drei Einzelniveaus ($l_z = -1, 0, +1$) mit jeweils max. zwei Spinzuständen, die normalerweise energiegleich (entartet) sind.

Atomares magnetisches Moment

- nur Elektronen der nicht abgeschlossenen inneren Schalen ergeben ein resultierendes Moment.
- Die Aufteilung der Elektronen auf die Terme der nicht voll besetzten Schalen kann mit Hilfe der Hund'schen Regeln verstanden werden.
- Betrag des magnetischen Momentes eines Atoms mit dem Gesamtdrehimpuls \mathbf{J} :

$$\mu_j = g\mu_B\sqrt{J(J+1)} = n_B\mu_B$$

$$g = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}$$



g ist der Landé-Faktor und n_B die Zahl der Bohrschen Magnetonen

Atomares magnetisches Moment

- Nur Atome mit nicht aufgefüllten inneren Elektronenschalen, bewirken merkliche Werte der magnetischen Polarisation
- **Eisengruppe** (3d) Cr, Mn, **Fe, Co, Ni**, Cu
- Seltenen Erdmetalle (4f und 3d) Ce... Yb
- Wertmetalle (4d) Zr... Te,
- Aktiniden (5f) U...Cm

- **Makroskopische Magnetisierung**

(magnetisches Moment pro Volumen) :

$$\mathbf{M} = \frac{\boldsymbol{\mu}_{\text{total}}}{V} \quad [\text{A/m}]$$

- Die **magnetische Polarisation** ist gegeben durch:

$$\mathbf{J} = \mu_0 \mathbf{M} \quad [\text{T} = \text{Vs/m}^2]$$

$$\mu_0 = \frac{4 \pi}{10^7} \quad \left[\frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}} \right]$$

- Die entsprechende Materialgleichung aus den Maxwell'schen Gleichungen wird zu:

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{J} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} = \boldsymbol{\mu} \mathbf{H}$$

mit μ als **Permeabilität** und μ_r als relative Permeabilität.

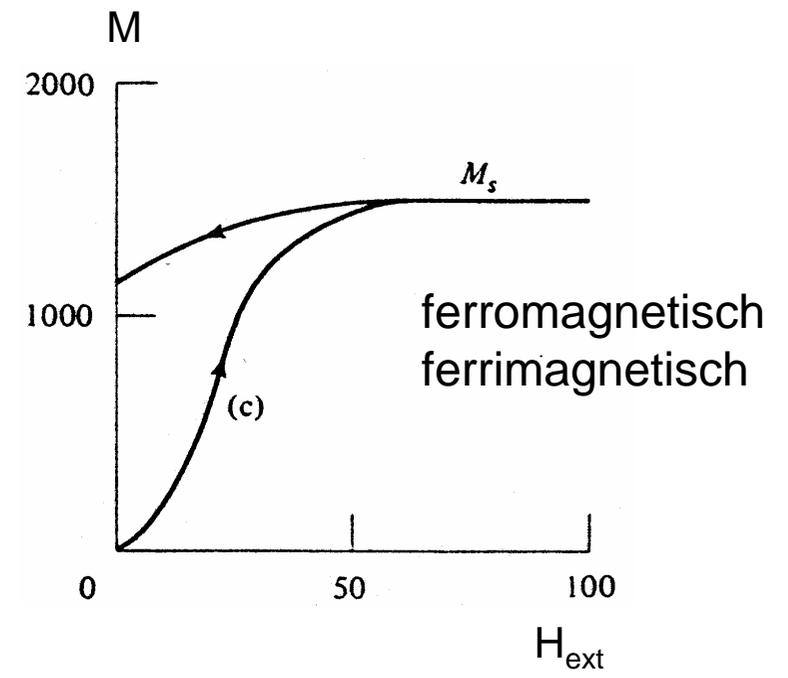
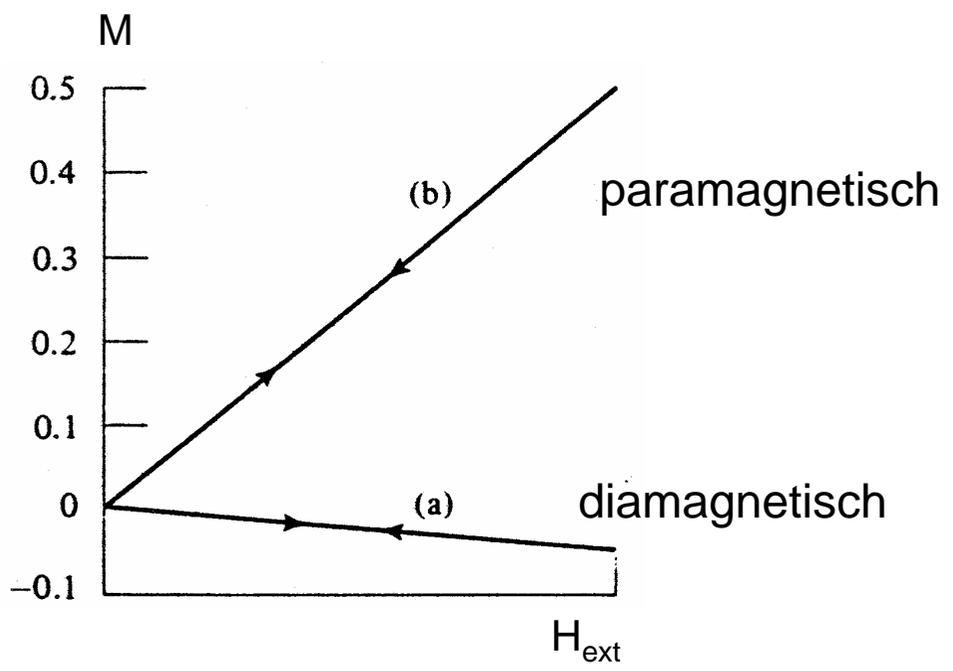
- Zusammenhang zwischen der Magnetisierung \mathbf{M} und dem äußeren Feld \mathbf{H} , wobei χ die magnetische **Suszeptibilität** ist.

$$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H}$$

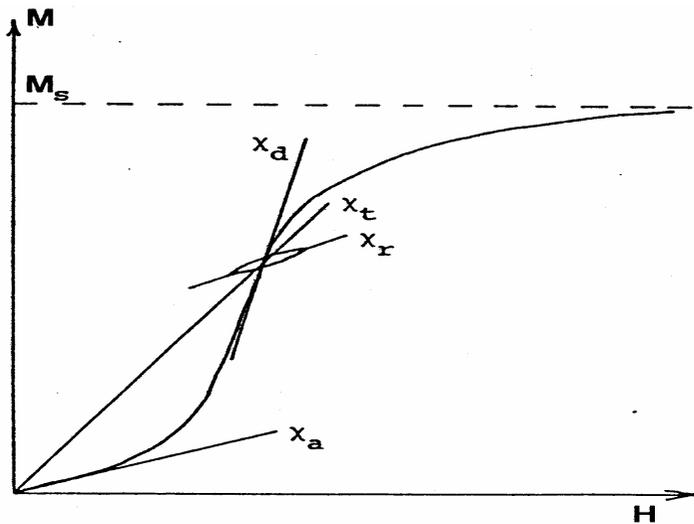
$$\mathbf{B} = \mu_0 (1 + \chi) \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad , \quad \mu_r = (1 + \chi)$$

Einteilung der magnetischen Eigenschaften

- Diamagnetismus $\chi < 0$
- Paramagnetismus $\chi > 0$
- Ferro- bzw. Ferrimagnetismus $\chi \gg 0$
- Antiferromagnetismus $\chi > 0$

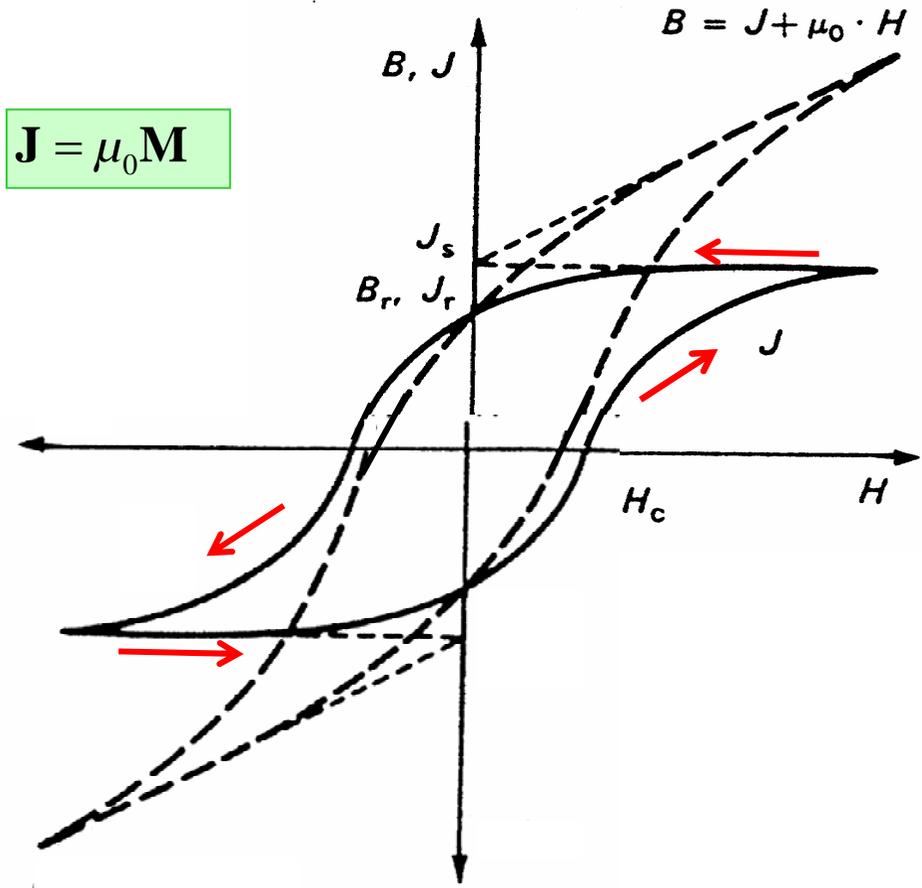


Hysterese Kurve (Ferro- und Ferrimagnetismus)

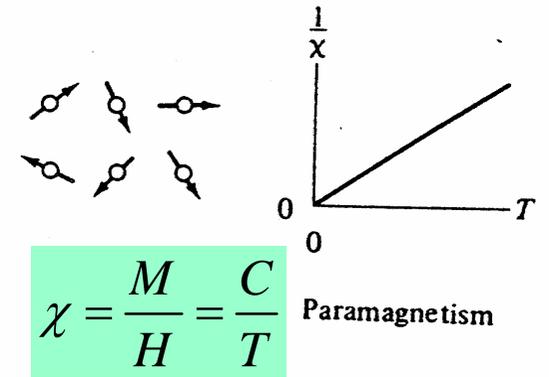
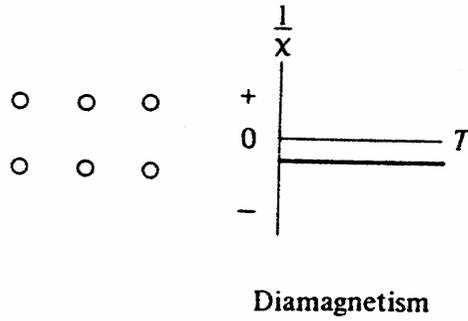
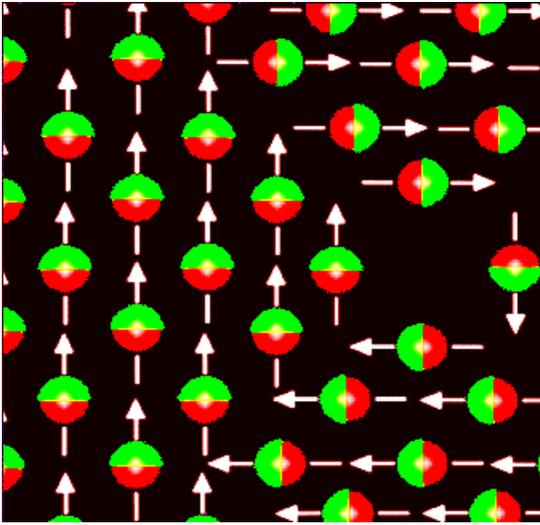


$$M = \chi H$$

$$J = \mu_0 M$$

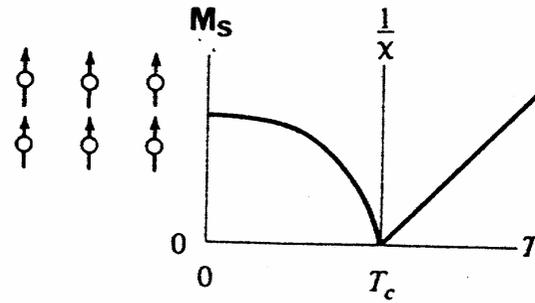


$$B = \mu_0 (H + M) = \mu_0 H + J = \mu_0 \mu_r H = \mu H$$

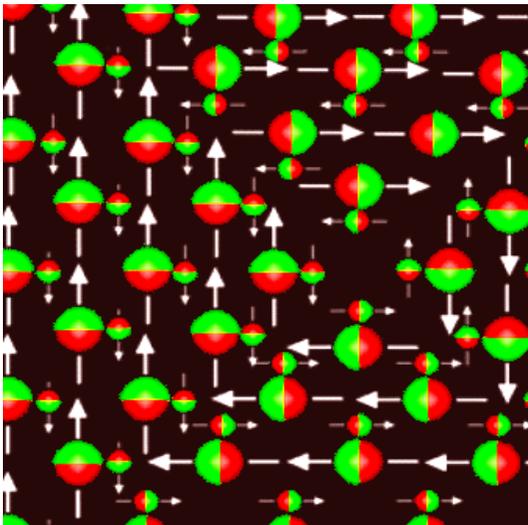
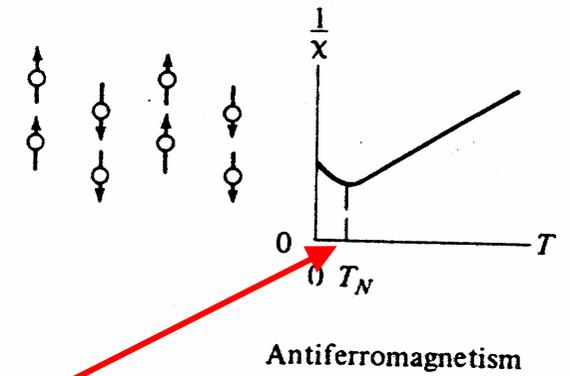


$$\chi = \frac{M}{H} = \frac{C}{T}$$

Fe
Co
Ni

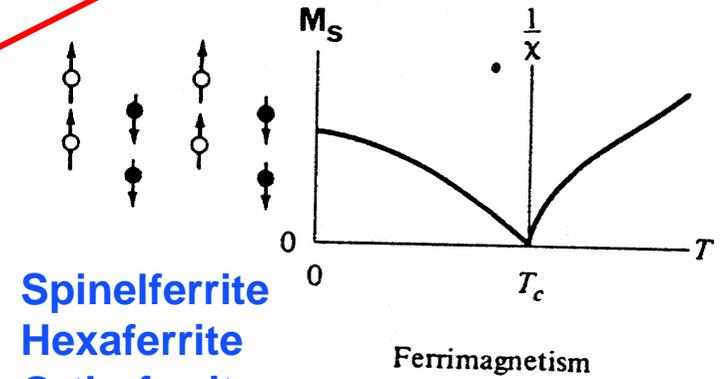


$$\chi = \frac{M}{H} = \frac{C}{T - T_C}$$



CrSb
CrAl
Metalloxiide
MnO
MnO₂
FeO
NiO

$$\chi = \frac{M}{H} = \frac{C}{T + T_N}$$



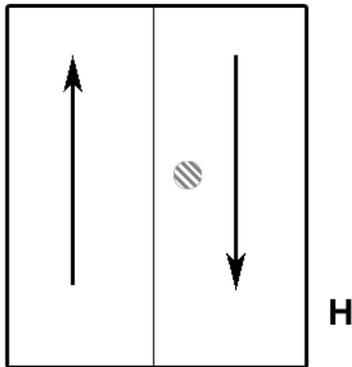
Spinferrite
Hexaferrite
Orthoferrite
Granate

Barkhausen Effekt (1919)

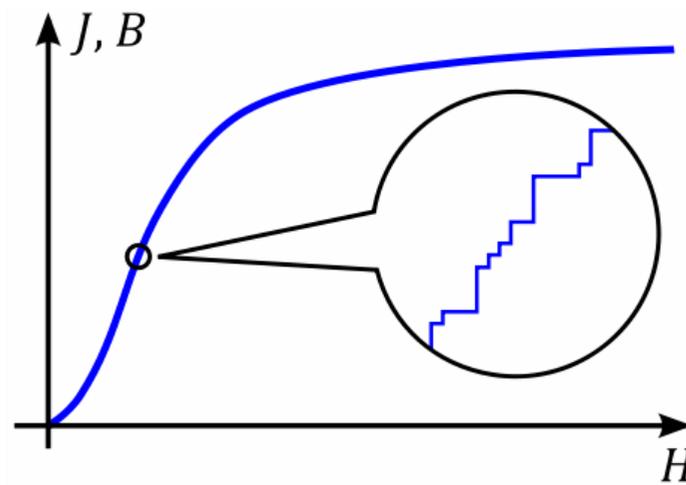
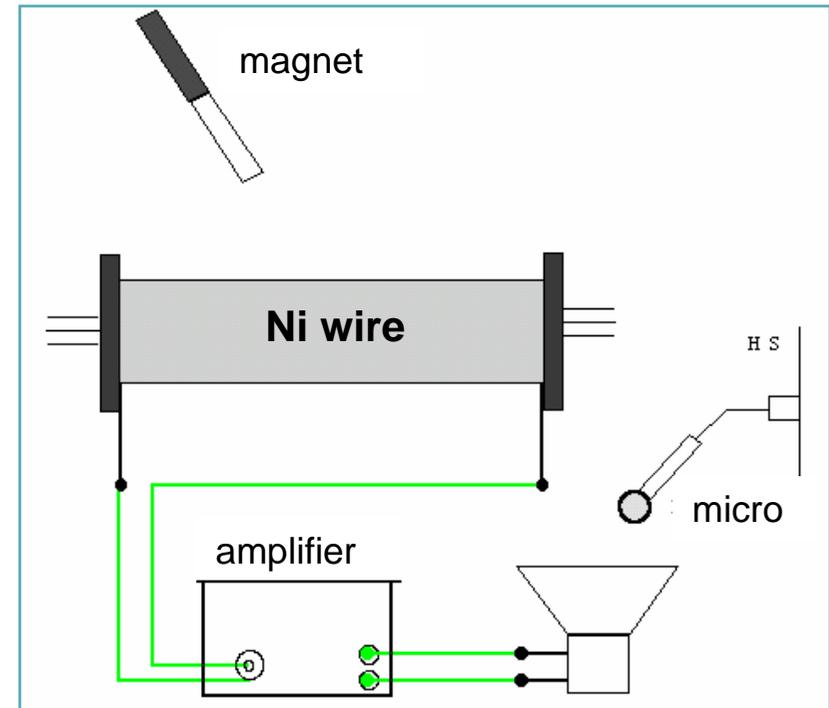
$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\int_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$$

$$u_{ind} = -N \frac{d\phi}{dt}$$



Barkausen jump due to moving domain wall



Magnetische Domänen und Hysterese Kurve

- Beitrag zur freien Energie des Systems

(Thermodynamik)

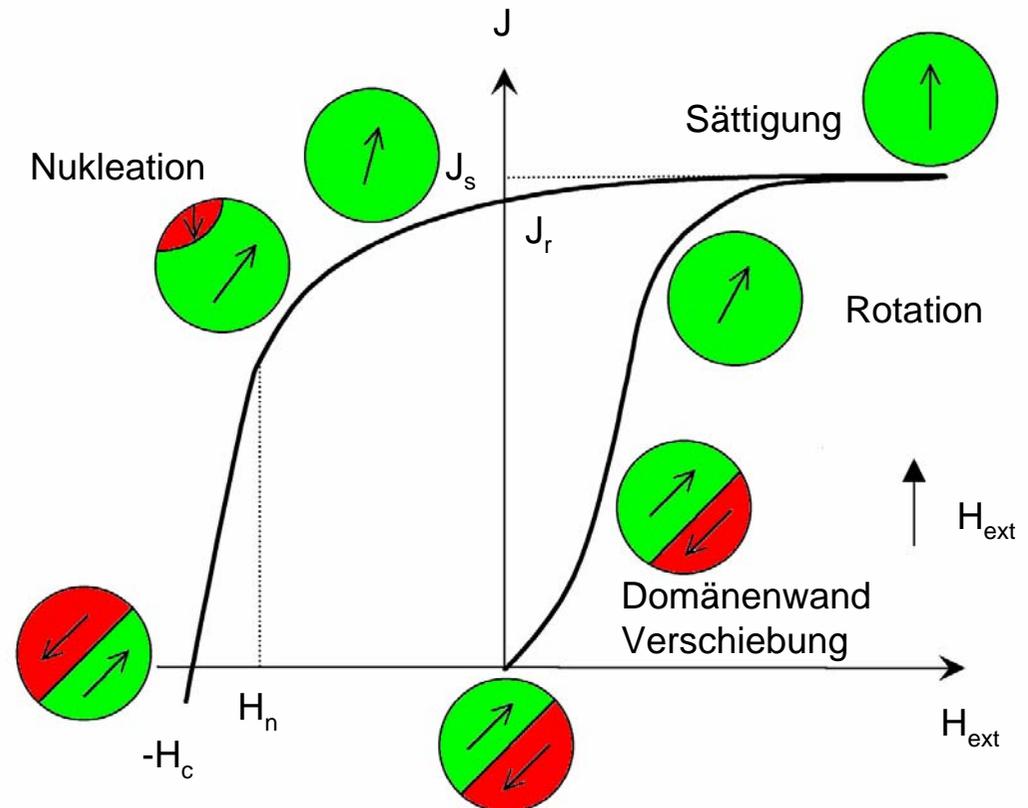
- Magnetic domain struct

⇒ uniaxial materials

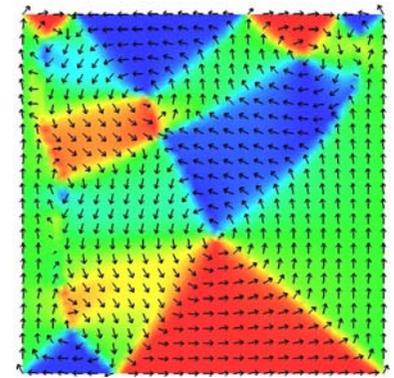
⇒ cubic materials

⇒ thin films

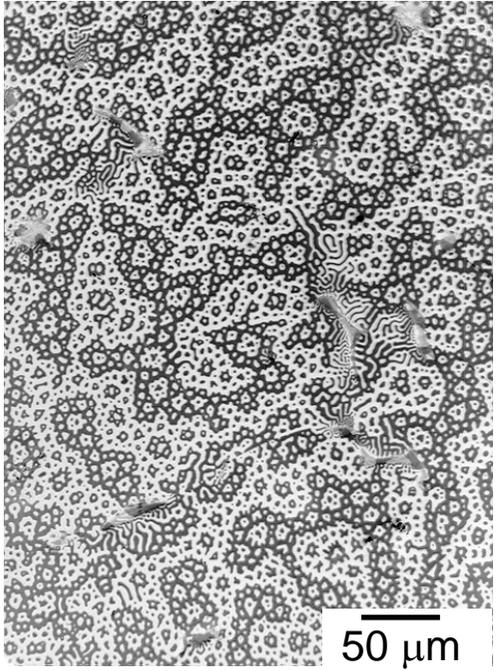
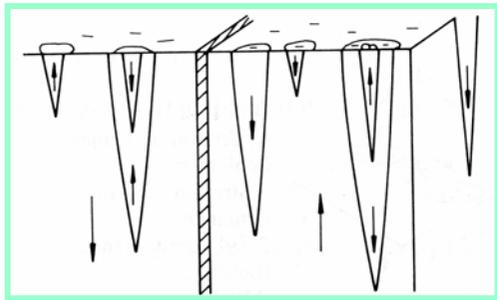
- Domänen Wände



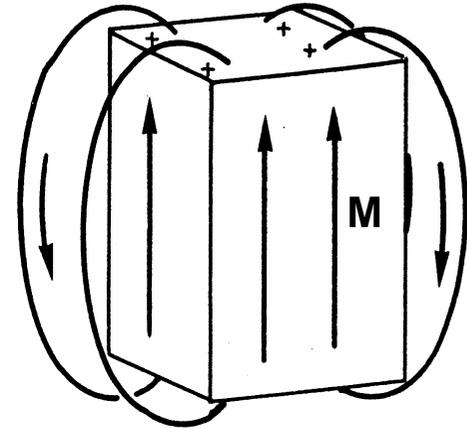
Magnetische Domänenstruktur



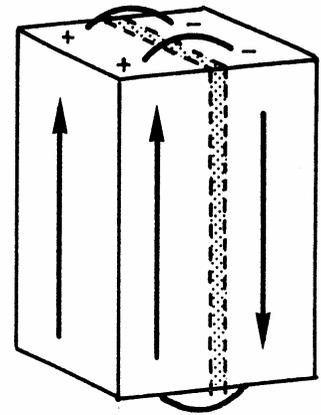
Landau und Lifschitz (1935)
Mikromagnetismus (W.F. Brown)



SmCo₅ Kristall
(**M** ⊥ Oberfläche)



starke Streufelder



verminderte Streufelder bei
einachsigen und kubischen
Kristallen

Mikromagnetismus

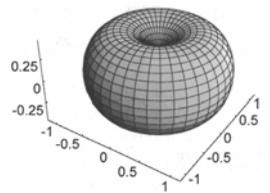
Drehmoment
 $\tau = \mu \times H_{\text{ext}}$

Minimierung der Gesamtenergie

$$\Phi_{\text{tot}} = \Phi_A + \Phi_K + \Phi_H + \Phi_S + \Phi_m$$

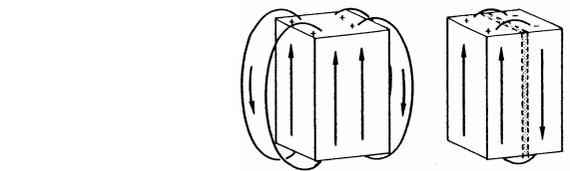


Austausch



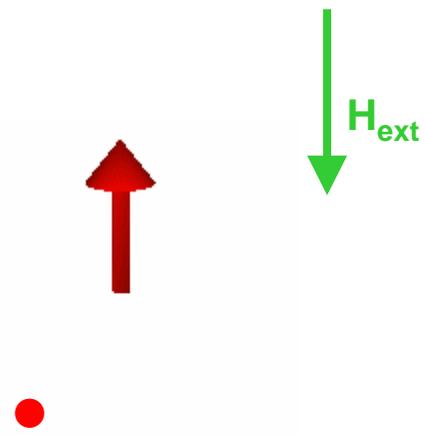
Anisotropie

leichte Richtungen



Äußeres Feld

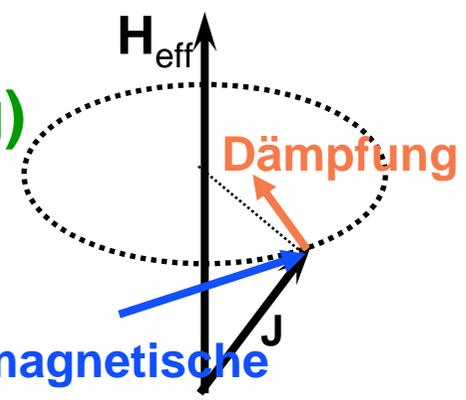
Streufeld



Drehmoment auf Magnetisierung (LL-Gleichung)

$$\frac{\partial \mathbf{J}}{\partial t} = -\frac{|\gamma|}{1 + \alpha^2} (\mathbf{J} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}) - \frac{\alpha}{J_s \cdot (1 + \alpha^2)} [\mathbf{J} \times (\mathbf{J} \times \mathbf{H}_{\text{eff}})]$$

$$\mathbf{H}_{\text{eff}} = -\frac{\delta \Phi_{\text{gesamt}}}{\delta \mathbf{J}} = \mathbf{H}_A + \mathbf{H}_K + \mathbf{H} + \mathbf{H}_S + \mathbf{H}_M$$



gyromagnetische Präzession

Klassische Theorie des Ferromagnetismus

- Nach dem Weiß'schen Ansatz ist die Magnetisierung einem **Molekularfeld** proportional, das mit Werten um 10^9 A/m alle technisch erzeugbaren Felder um mehrere Größenordnungen übertrifft.
- **Austauschwechselwirkung nach Heisenberg**

$I_A > 0$ eine parallele Spinkopplung und
 $I_A < 0$ eine antiparallele Spinkopplung.

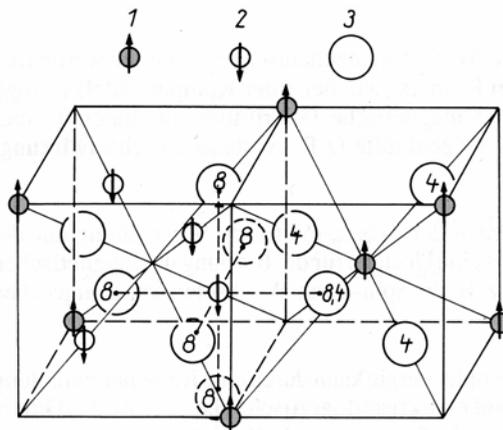
$$\phi_{ij} = -2I_A \cdot \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j$$



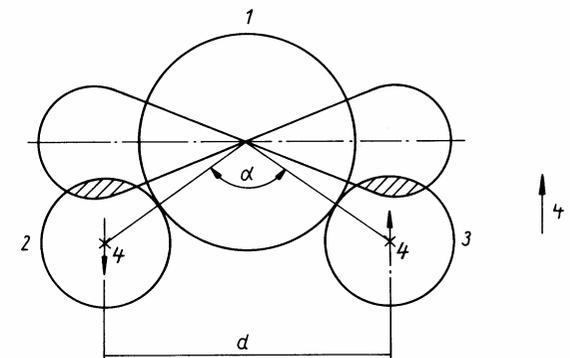
$$A_{bcc} = \frac{I_A S^2}{a}$$

$$\Phi_A' = A \cdot \sum_{k,l} \left(\frac{\partial \alpha_k}{\partial x_l} \right)^2$$

Beispiel:
Superaustausch
Spinellferrit



- (1) O^{2-}
- (2) Fe^{3+}
- (3) Mn^{2+}



Kristallanisotropieenergie Φ_c

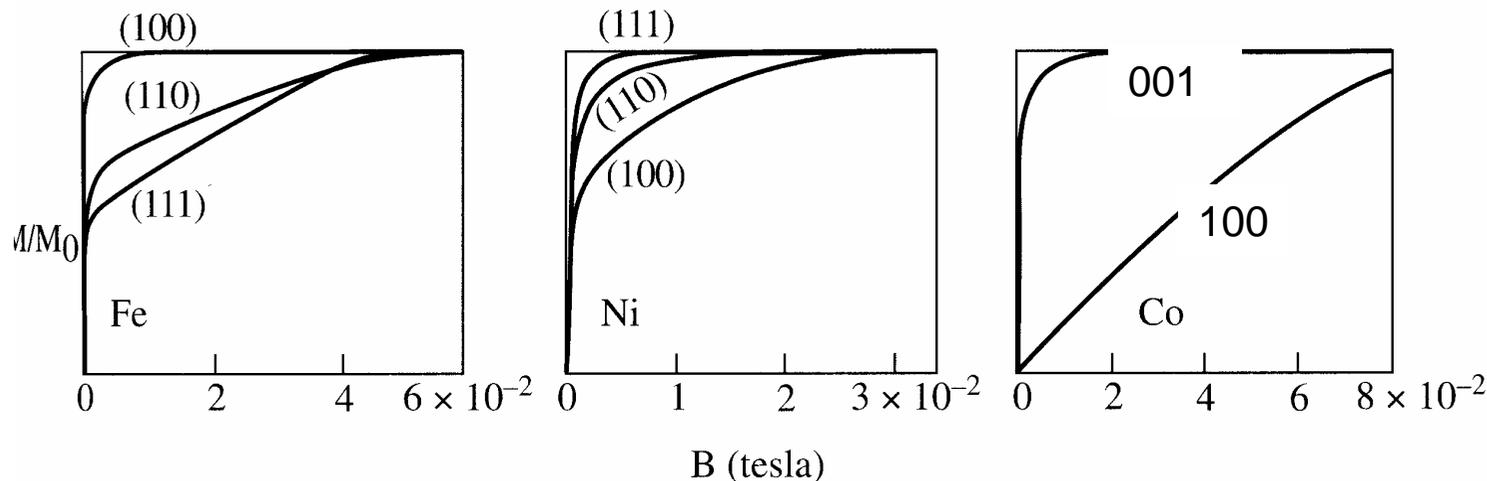
- Der Vektor der magnetischen Polarisation ist in einem Festkörper an **bestimmte Richtungen (leichte Achsen)** gebunden. Diese sind durch die Kristallstruktur oder andere Anisotropien, wie z.Bsp. Spannungsanisotropie, induzierte Anisotropie, Formanisotropie, etc. vorgegeben.
- Man unterscheidet zwischen einachsiger und kubischer Anisotropie:

$$\Phi_c' = \sum_n K_n \cdot \sin^{2n} \Theta \cong K_0 + K_1 \cdot \sin^2 \Theta + K_2 \cdot \sin^4 \Theta + \dots$$

einachsig

$$\Phi_c' = K_0 + K_1 \cdot (\alpha_1^2 \cdot \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \cdot \alpha_3^2 + \alpha_1^2 \cdot \alpha_3^2) + K_2 \cdot (\alpha_1^2 \cdot \alpha_2^2 \cdot \alpha_3^2)$$

kubisch



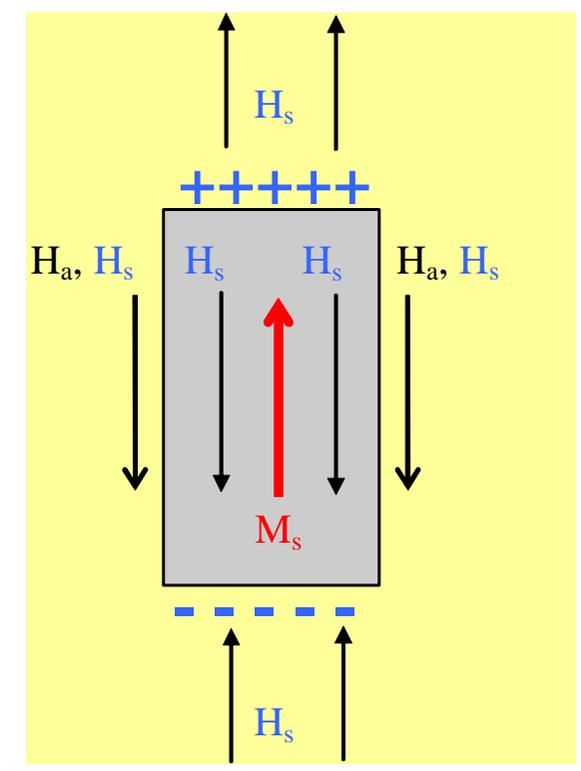
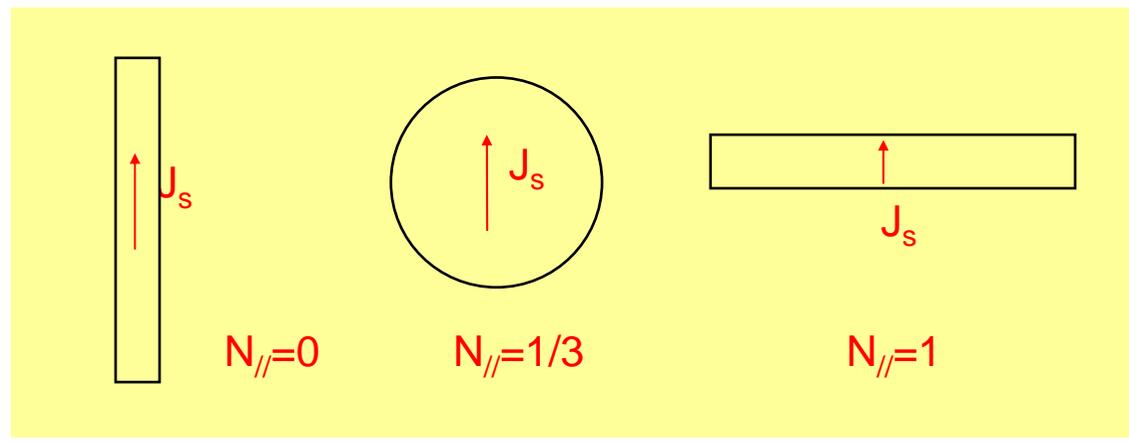
Magnetisches Streufeld - Formanisotropie

- Das entmagnetisierende Feld \mathbf{H}_s oder das magnetische Streufeld ist proportional zu \mathbf{M}_s und dem von der Probengeometrie abhängigen Entmagnetisierungsfaktor N:

$$\mathbf{H}_s = -N \cdot \mathbf{M}_s$$

- Streifeldenergiedichte

$$\Phi_{s'} = -\frac{1}{2} \cdot \mathbf{H}_s \cdot \mathbf{J}_s = -\frac{1}{2} \cdot \mu_0 \cdot \mathbf{H}_s \cdot \mathbf{M}_s = \frac{1}{2} \cdot \mu_0 \cdot N \cdot \mathbf{M}_s^2$$



Eindomänen Teilchen

Kritische Größe

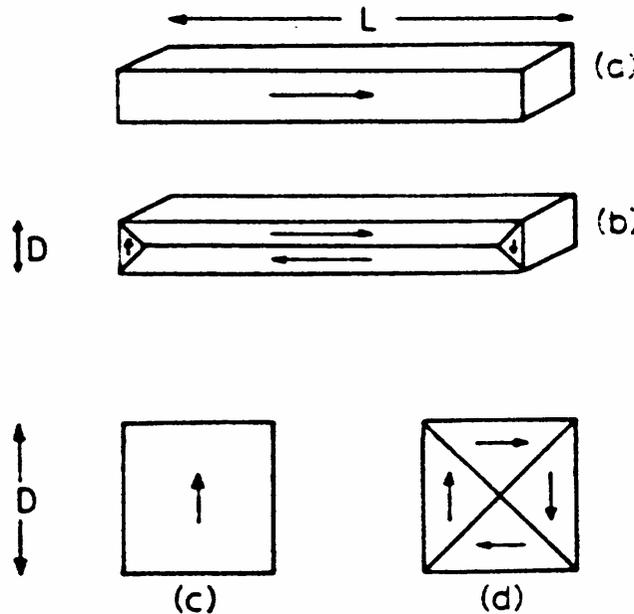
Beispiel: Würfel

$$\Phi_\gamma = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \gamma \cdot D^2$$

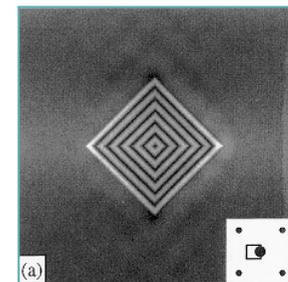
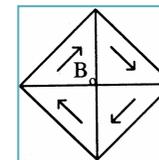
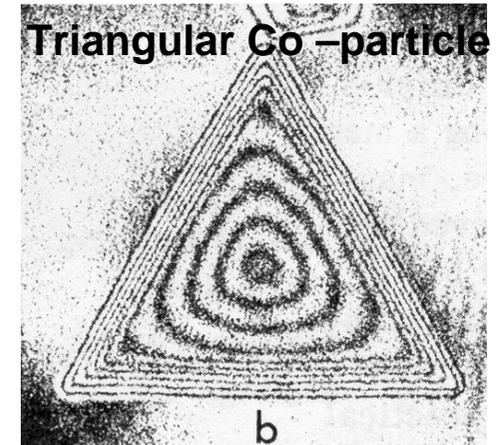
$$\Phi_s \approx \mu_0 \cdot \frac{1}{6} \cdot M_s^2 \cdot D^3$$

$$\frac{\partial}{\partial D} (\Phi_\gamma - \Phi_s) = 0$$

$$D_0 = \frac{8 \cdot \sqrt{2} \cdot \gamma}{M_s^2 \cdot \mu_0}$$



Needle and cube as single-domain particles (a, c) and subdivided into domains (b, d).



Bloch - Domänenwand

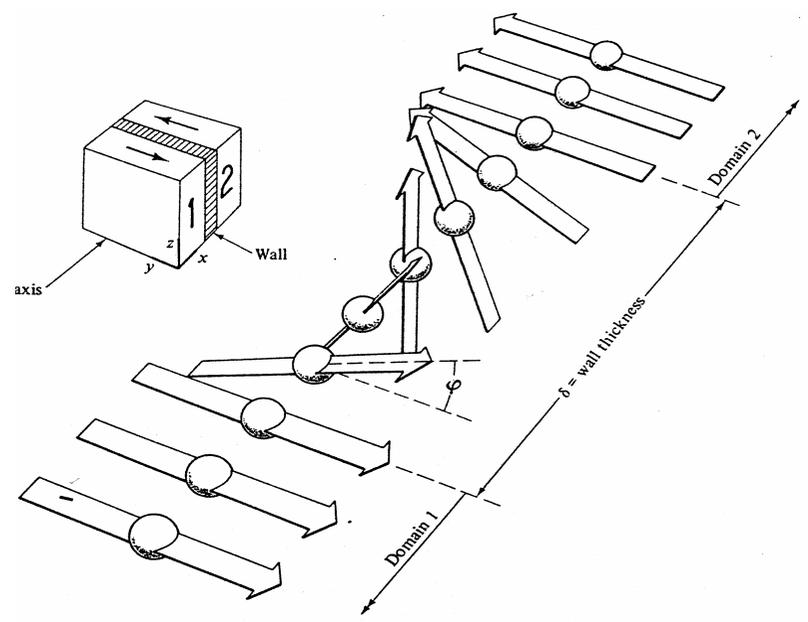
$$\Phi_{ex}' = \int A \cdot \left(\frac{\partial \alpha_k}{\partial x_l} \right)^2 \cdot dx$$

$$\Phi_c' = \int K_1 \cdot \sin^2 \varphi \cdot dx$$

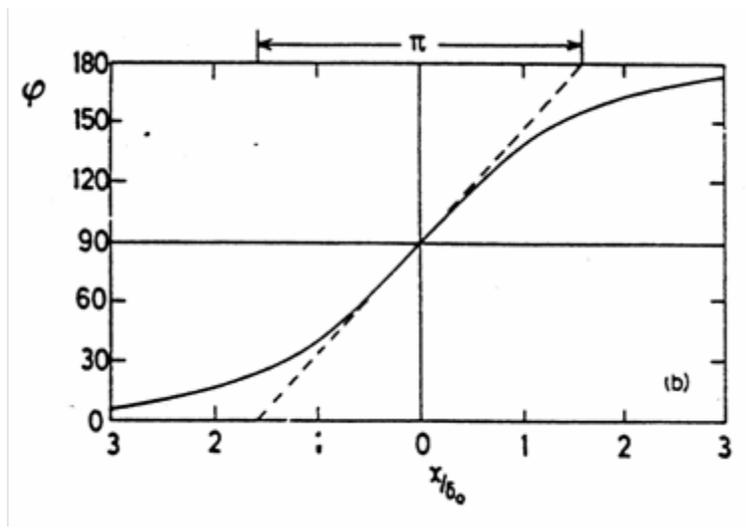
$$\frac{\partial \Phi_t'}{\partial x_0} = 0 \Rightarrow$$

$$\delta_0 = \sqrt{\frac{A}{K_1}}$$

$$\cos \varphi = -\tanh\left(-\frac{x}{\delta_0}\right)$$



Structure of a 180° wall.



$$\delta = \pi \cdot \delta_0 = \pi \cdot \sqrt{\frac{A}{K_1}}$$

Berücksichtigung von K_2 :

$$\delta = \pi \cdot \sqrt{\frac{A}{K_1}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{K_2}{K_1}}}$$

for $K_1 > -2K_2$

Weich oder hart magnetisch?

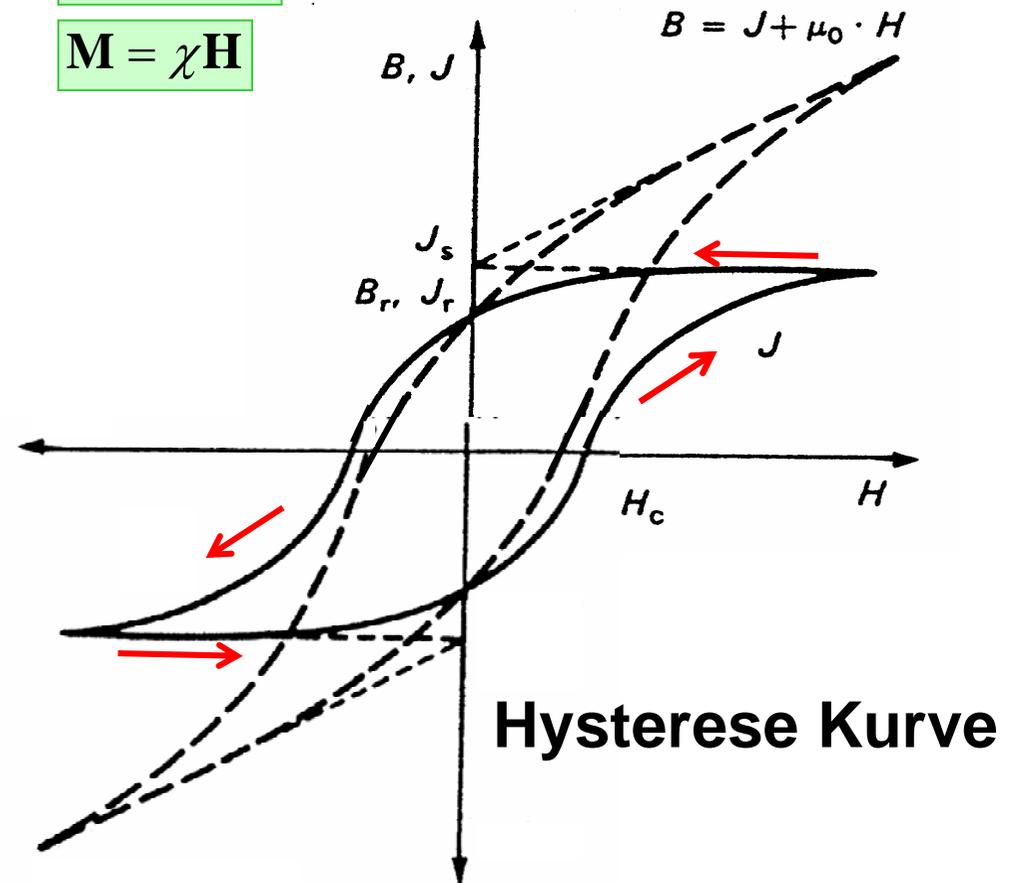
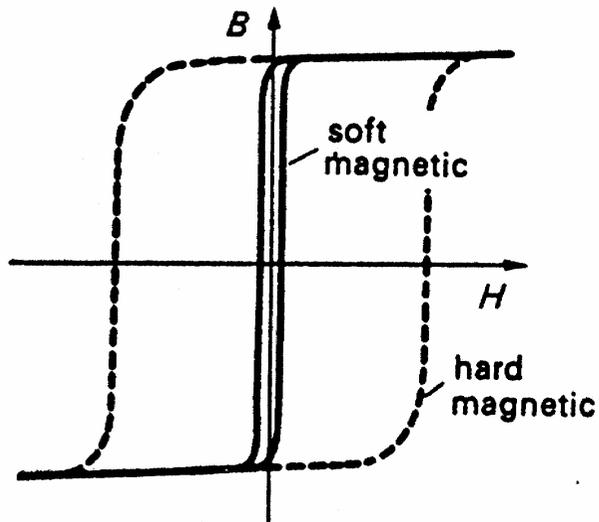


Koerzitivfeld H_c

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{J} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} = \mu \mathbf{H}$$

$$\mathbf{J} = \mu_0 \mathbf{M}$$

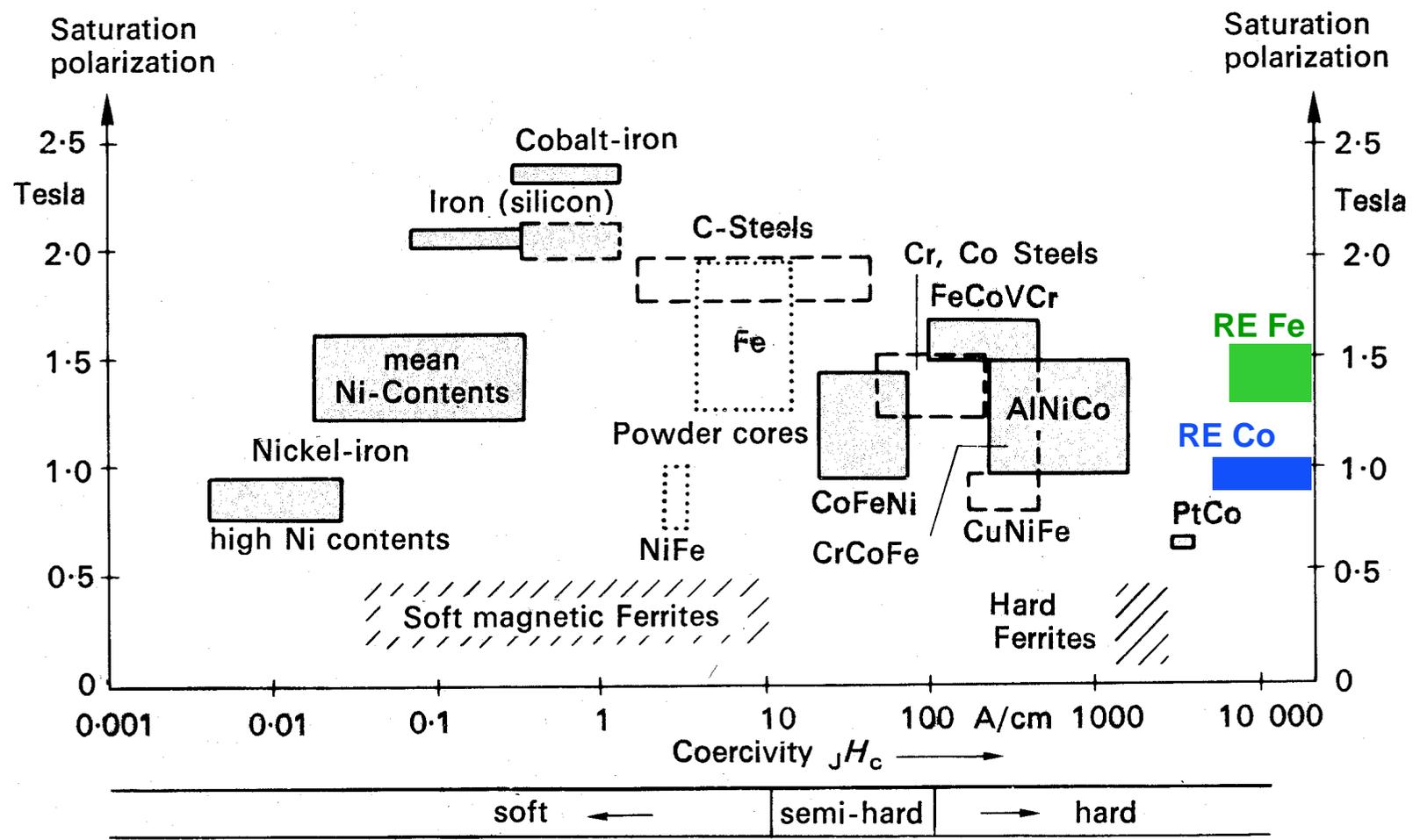
$$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H}$$



Intrinsische Eigenschaften

	n_B (0K)	J_S (0K) [T]	J_S (300K) [T]	T_C [K]	K_1 (300K) [k J/m ³]	A (300K) [p J/m ³]
Fe	2,2	2,19	2,14	1043	48	8,8-33
Ni	0,608	0,656	0,61	631	5	3,4
Co	1,74	1,78	1,75	1400	430	10,3
FeCo 50/50	2,43		2,45		-35	
SmCo₅			1,10	990	17000	12-22
Nd₂F₁₄B			1,61	585	4900	10
(BaO.6Fe₂O₃)	20	0,72	0,47	730	300	
(NiO.Fe₂O₃)	2,3	0,34	0,31	840	-7	
(MnO.Fe₂O₃)	5	0,69	0,48	615	-4	

Übersicht der magnetischen Werkstoffe



R. Boll, „Soft Magnetic Materials“, Siemens AG, Hyden & Son, 1977

Weichmagnetische metallische Werkstoffe

- Metallische

- Keramische
Mn/Zn Ferrite
Ni/Zn Ferrite

Kristalline Werkstoffe

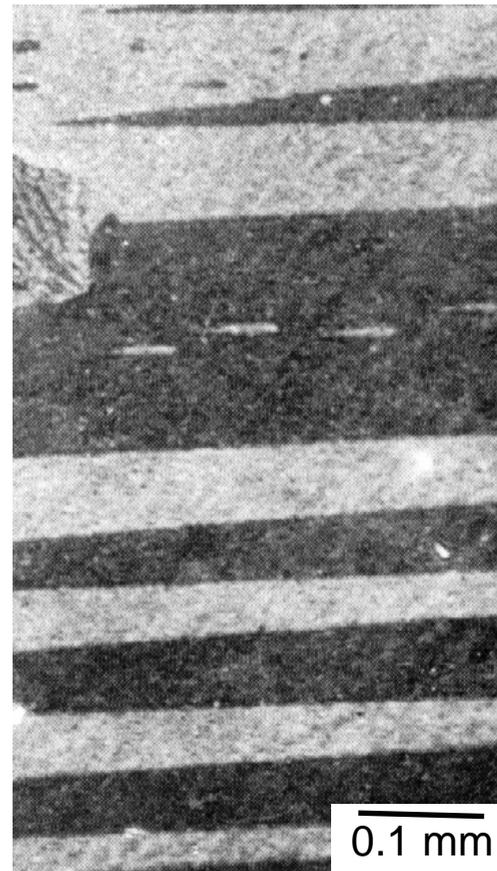
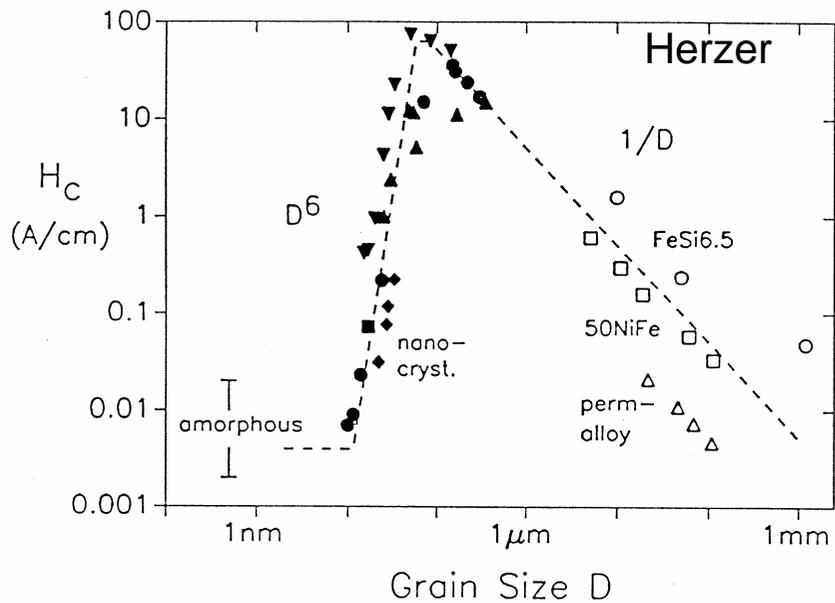
- Eisen
- Kohlenstoffstähle
- andere Stähle
- FeSi-Legierungen (bis ca. 3,5 % Si)
- FeNi-Legierungen
 - 72...83 % Ni
 - 54...68 % Ni
 - 45...50 % Ni
 - 35...40 % Ni
 - 30 % Ni
- FeCo-Legierungen
 - 47...50 % Co
 - 35 % Co
 - 23...27 % Co
- FeAl-Legierungen
- FeAlSi-Legierungen
(Sendust: $FeSi_9,6Al_{15,4}$)

Amorphe Werkstoffe

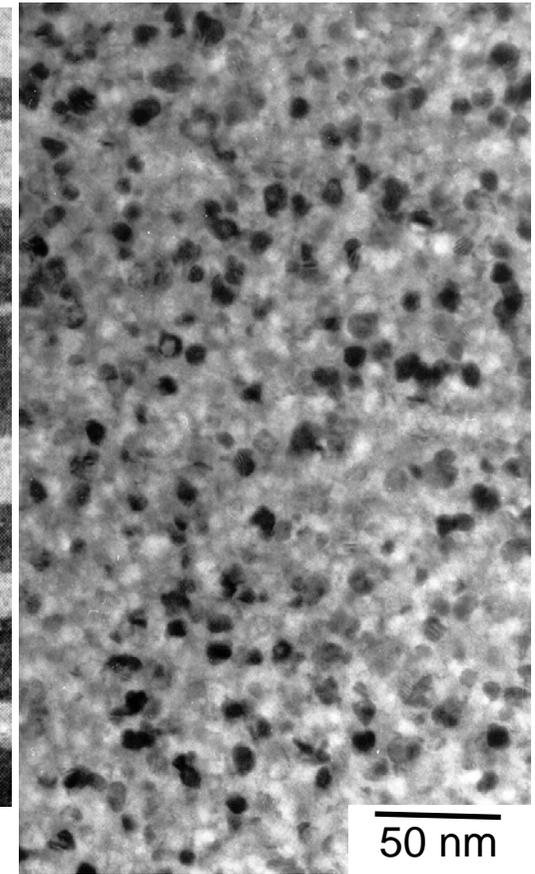
- FeBSi-Legierungen
- FeNiBSi-Legierungen
- Co-Basis-Legierungen
 - (Co, Fe, Ni) (B, Si, C)
 - (Co, Fe)M mit
M: Zr, Hf, Nb

Weichmagnete

Magnet	J_r (T)	H_{cJ} (A/m)
Fe	2.15	10-100
Fe-Si	2.0	8
Fe-Ni	0.75	0.5
Fe-Cu-Nb-Si-B (nanokristallin)	1.23	0.4
Co-Fe-Mo-Si-B (amorph)	0.55	0.3



Domänen innerhalb eines Fe-Si Korns

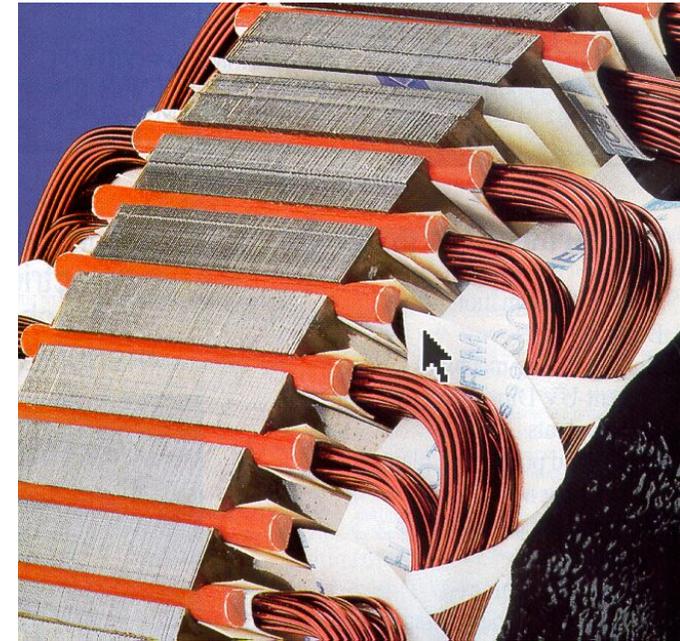


$Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ nanokristallin

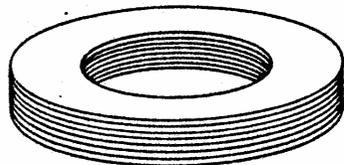
Weichmagnete Anwendungen

- Transformatoren
- Generatoren, Motoren
- Relais, Wandler und Übertrager, Fehlerstromschutzschalter, Leistungselektronik
- Magnetköpfe
- Hochfrequenzanwendungen (MHz – GHz)

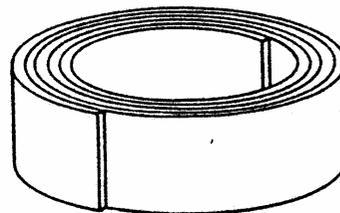
Spinellferrite, Granate



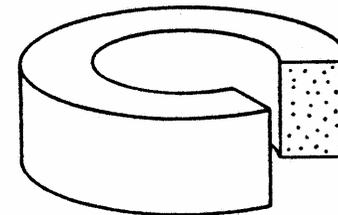
Wichtig !!!
Vermeidung von mechanischen Spannungen



(a) Stacked laminations

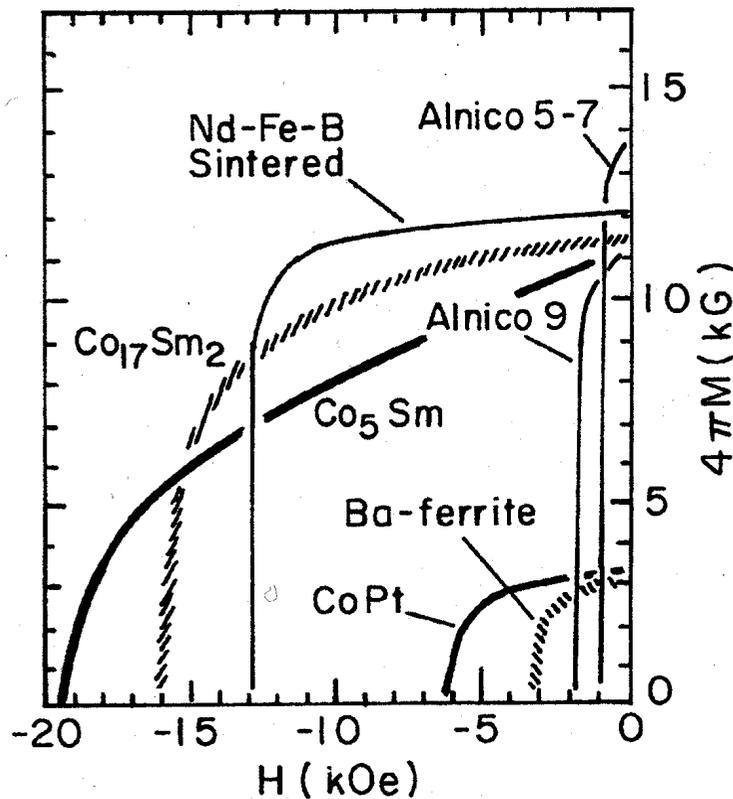


(b) Tape-wound core

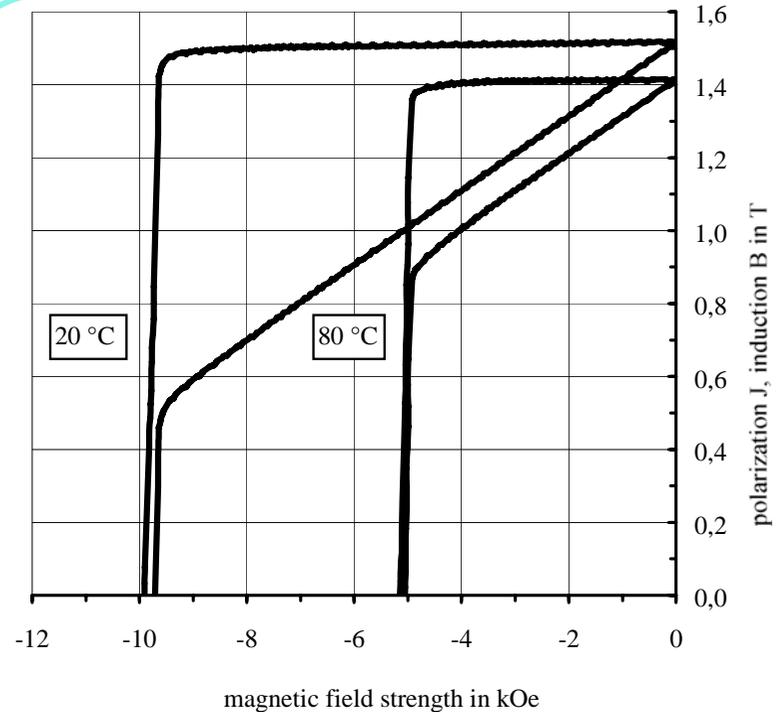


(c) Powder core

Hartmagnete - Entmagnetisierungskurven



R. O'Handley, „Modern Magnetic Materials, Principles and Applications, Wiley, 2000.



W. Rodedwald, B. Wall, M. Katter and K.Uestuener, „Top Nd-Fe-B Magnets: >56 MGOe Energy Density, 9.8 kOe Coercivity“, IEEE Trans.Magn. 38 (2002) 2955-2957.

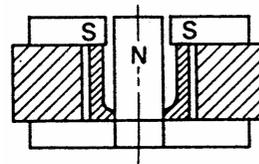
$J_r=1.519 \text{ T}, H_c=780 \text{ kA/m}, (B.H)_{\max}= 451 \text{ kJ/m}^3$

Anwendung von Hartmagneten

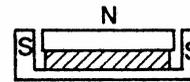
$$H_{ag} \approx \sqrt{\frac{V_m \cdot (B_m \cdot H_m)}{\mu_0 \cdot V_{ag}}}$$

Lautsprechermagnet:

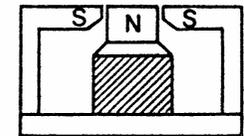
Ferrite



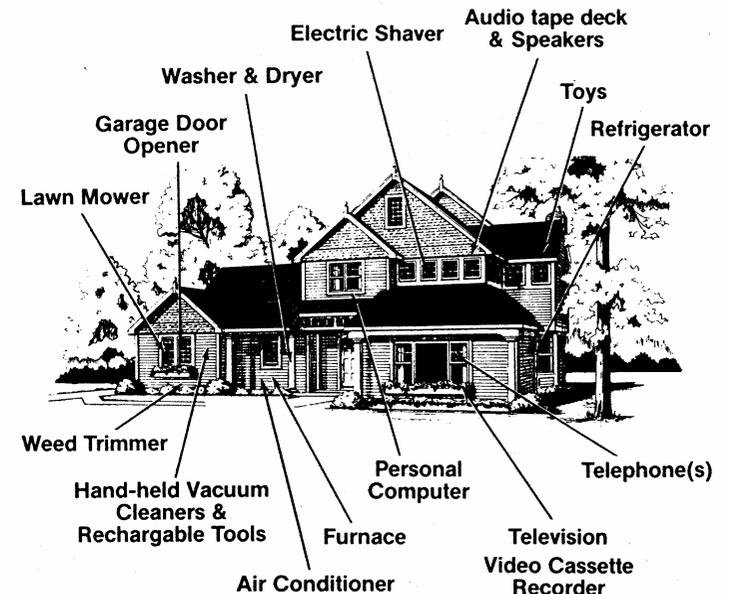
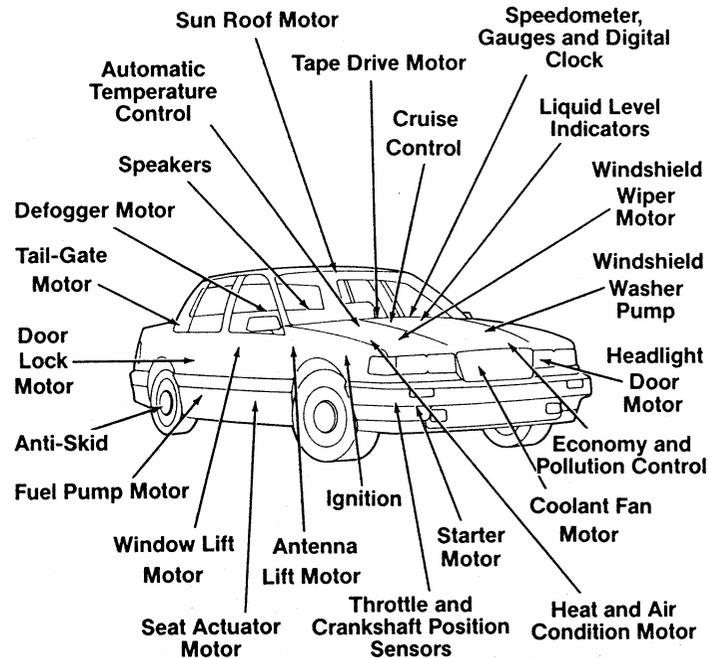
Sm-Co



AlNiCo

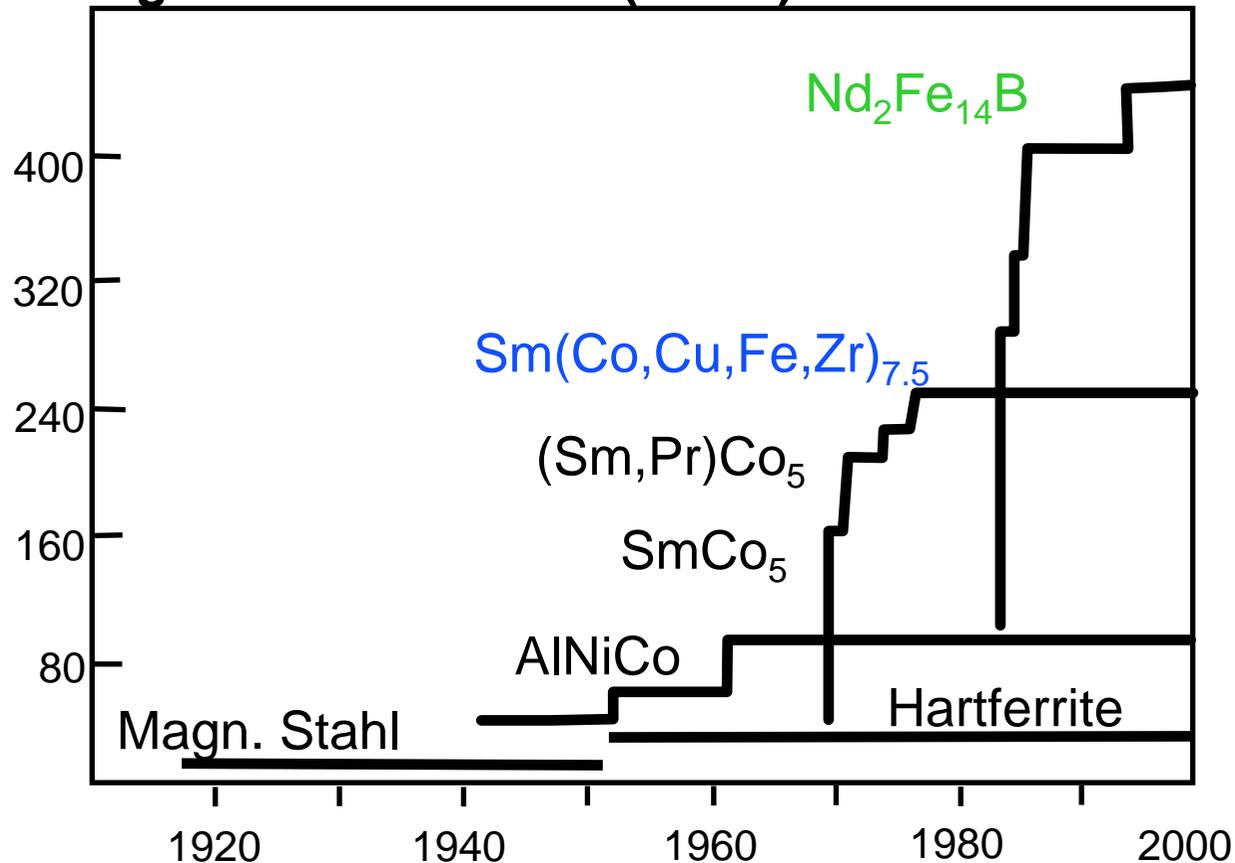


Magnete in Auto und Haus:



Hartmagnetische Werkstoffe

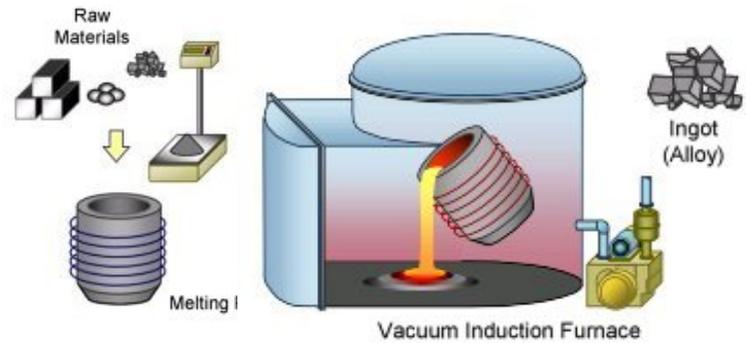
Energie Dichte Produkt (kJ/m³)



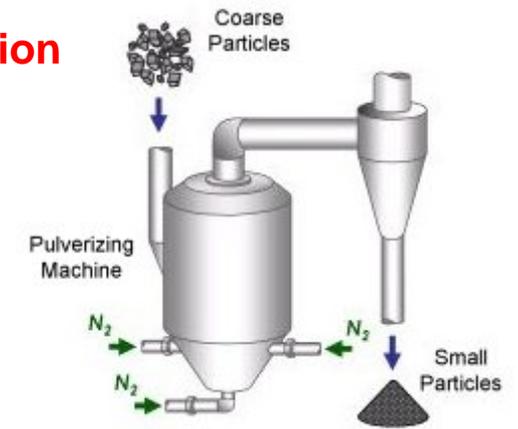
Magnet	Jahr	JH_c (kA/m)	T_c (°C)
Magn.Stahl	1890	1	
AlNiCo	1955	100	850
Hardferrite	1960	200	450
Sm-Co 1:5	1975	3000	720
Sm-Co 2:17	1982	2000	820
Nd-Fe-B	1990	1500	310

Pulvermetallurgie – Sinter REPM

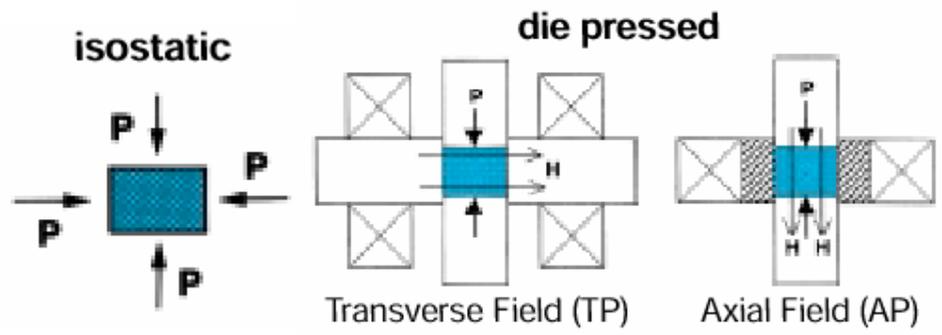
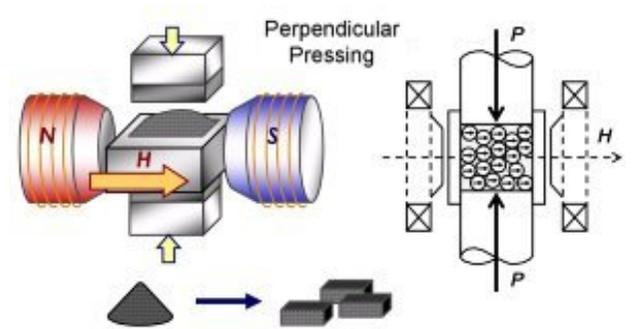
1. Melting of the alloy under vacuum



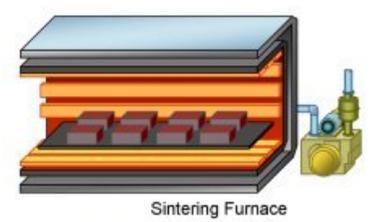
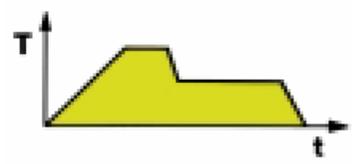
2. Pulverization



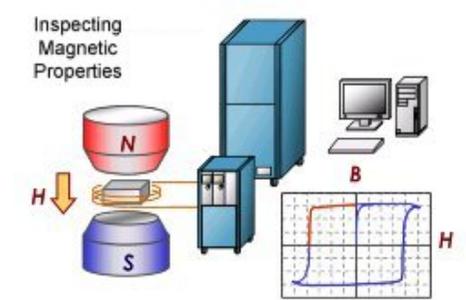
3. Alignment and Compacting in a Magnetic Field



4. Sintering/Annealing

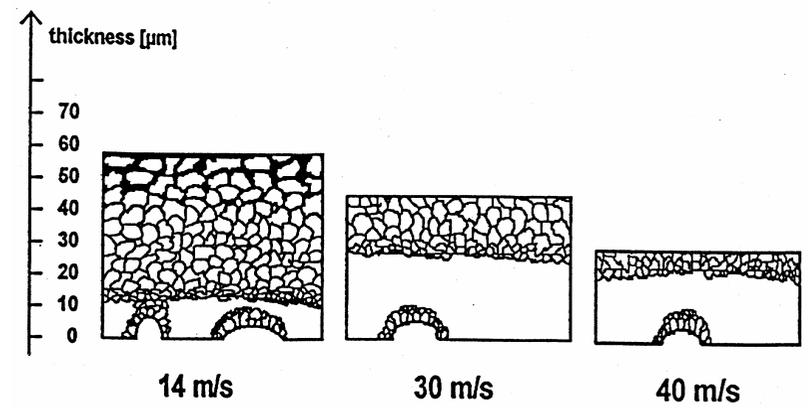
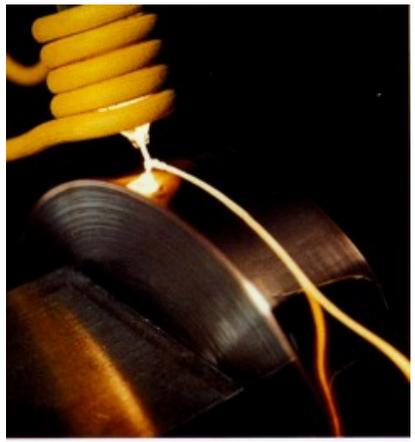
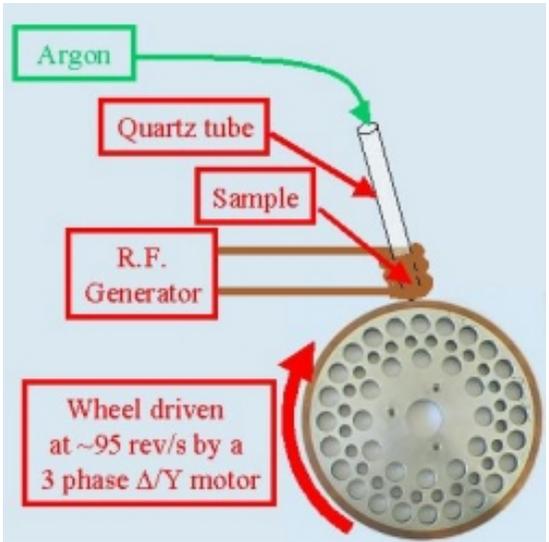
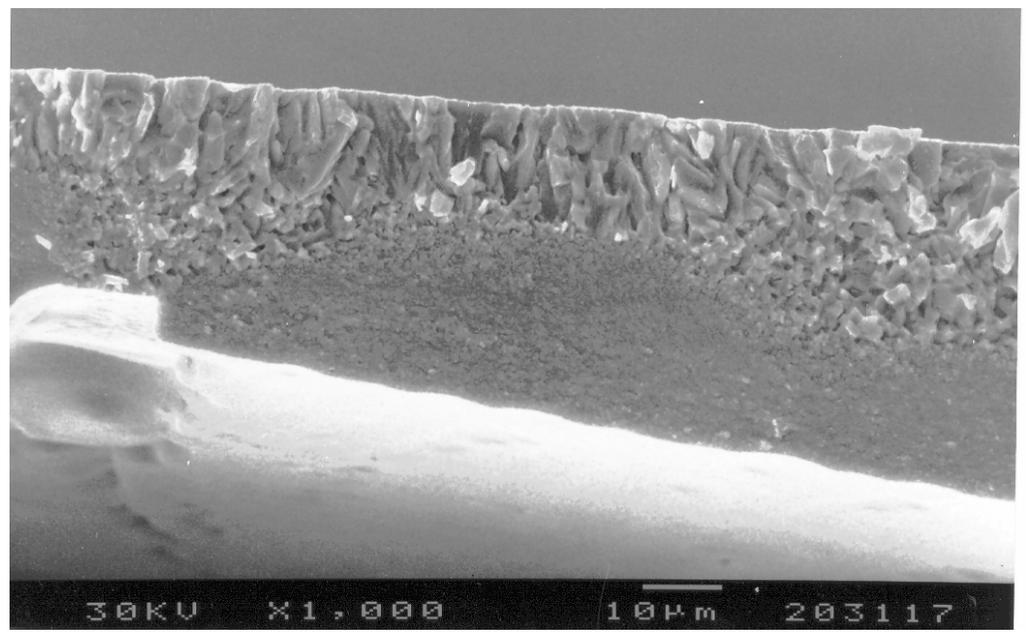


5. Inspecting Magnetic Properties



„Melt-spun Nd-Fe-B“ Magnete

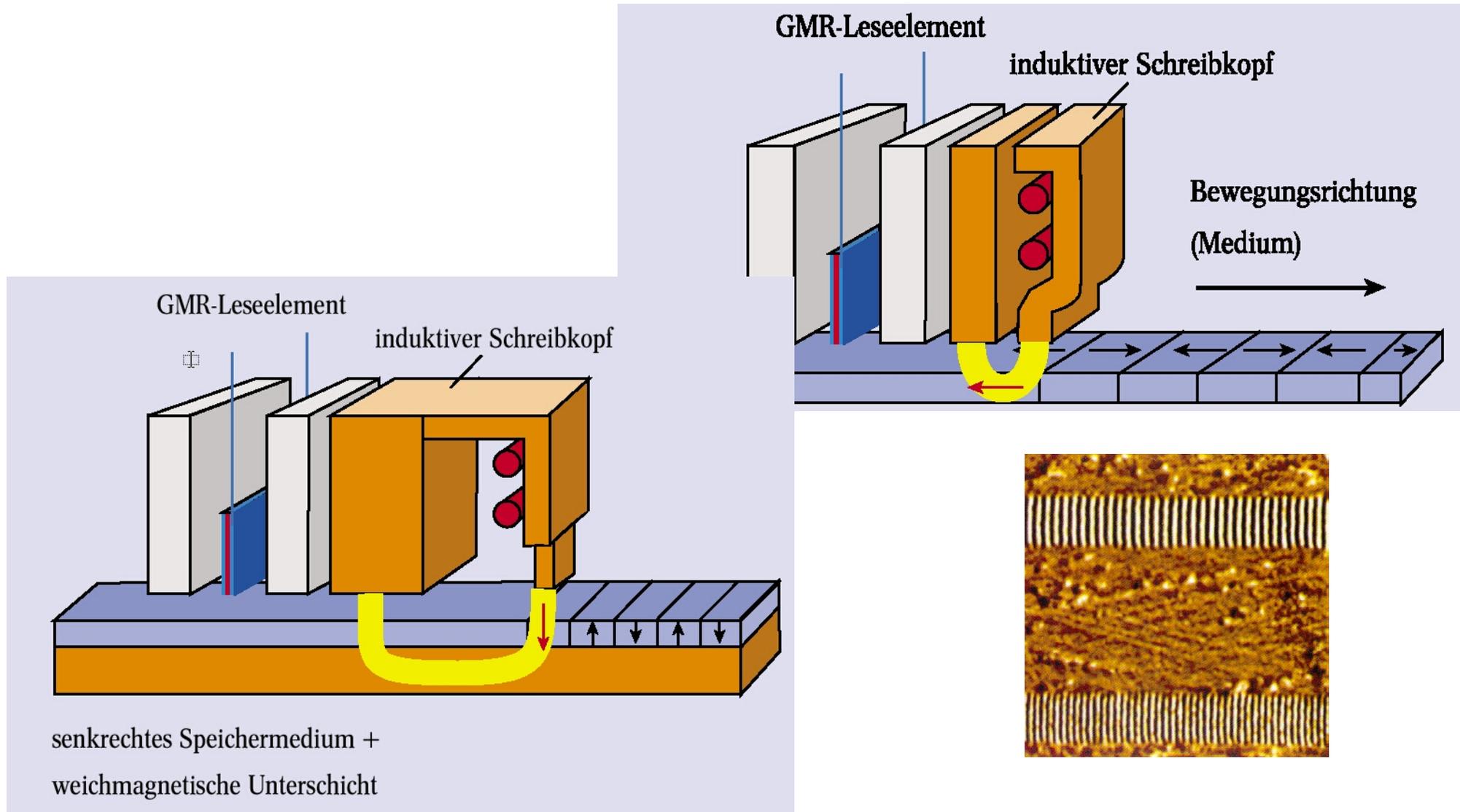
- ▶ quenching rate („wheel speed“)
- ▶ annealing (time and heating rate)
- ▶ composition



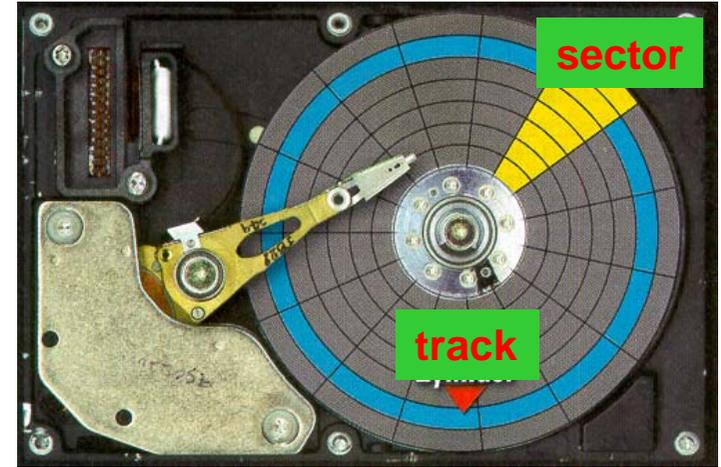
Materialien für die magnetische Aufzeichnung und Datenspeicherung

- Speichermedien für die Ton-, Bild- und Datenspeicherung:
 - ⇒ Partikelschichten
 - ⇒ Metallschichten.
- Verwendung in Magnetbändern in der **Audio**- und **Videotechnik**, Computertechnik sowie bei Floppy-Disk und auch bei Festplatten.
- Man unterscheidet zwischen:
 - ⇒ **digitaler** oder **analoger** Informationsspeicherung
 - ⇒ Längsaufzeichnung („**longitudinal**“) oder Senkrechtaufzeichnung („**perpendicular**“)
 - ⇒ **Magnetooptischer** Aufzeichnung

Unterschied zwischen „Longitudinal“ und „Perpendicular recording“



CoCrPtX Hard Disks



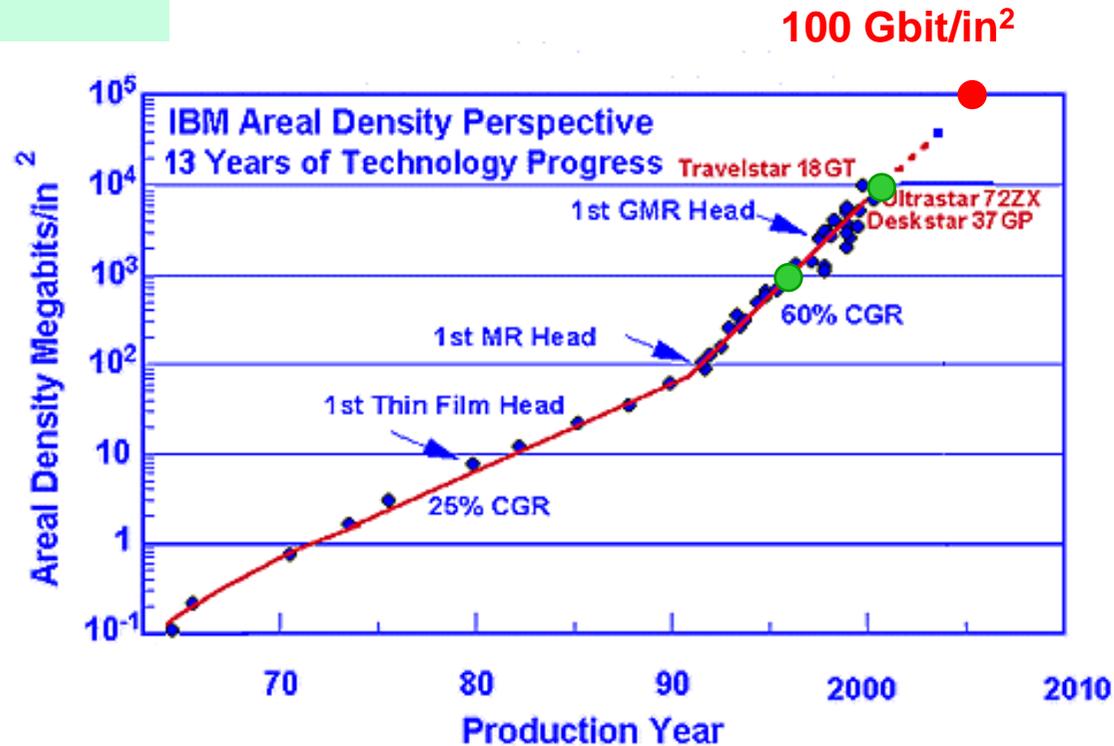
Comparison of Magnetic Bit Sizes

1 Gb/in²
(150 kbp_i x 6600 tpi)  150 nm
3.1 μm

10 Gb/in²
(400 kbp_i x 25 ktpi)  64 nm
800 nm

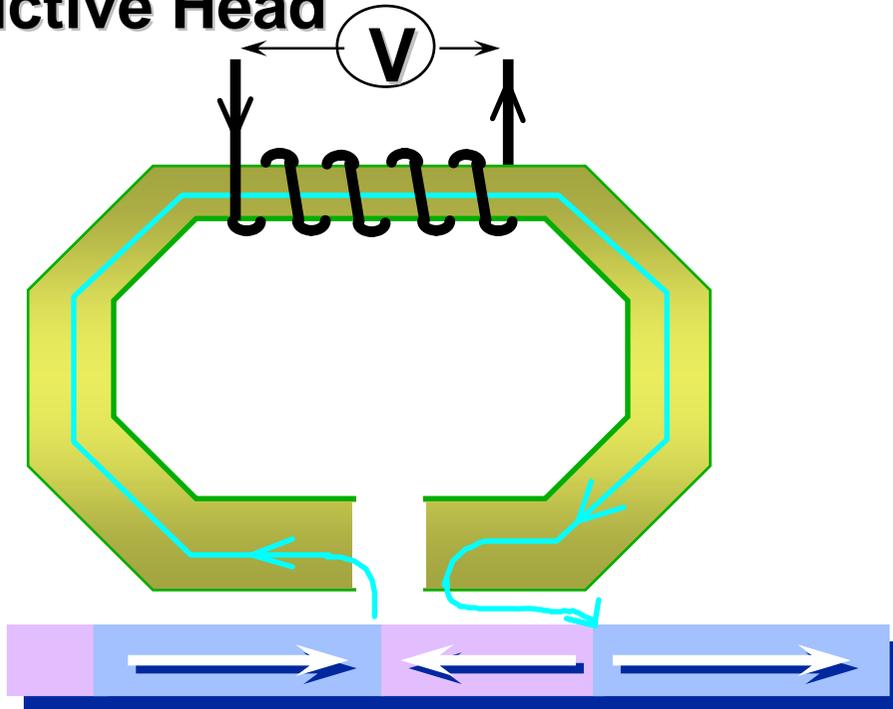
40 Gb/in²
(800 kbp_i x 50 ktpi)  32 nm
400 nm

100 Gb/in²
(500 kbp_i x 200 ktpi)  45 nm
130 nm

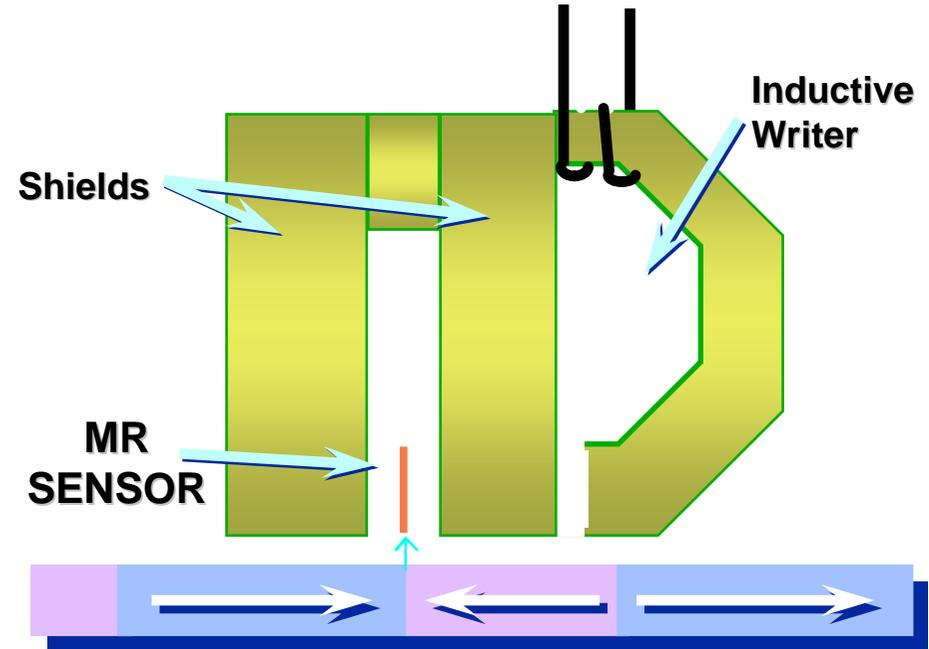


The Readback Process: Inductive vs. MR

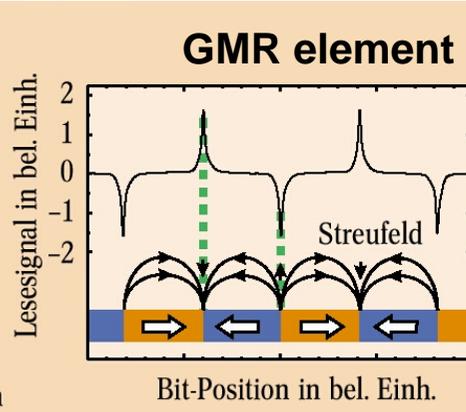
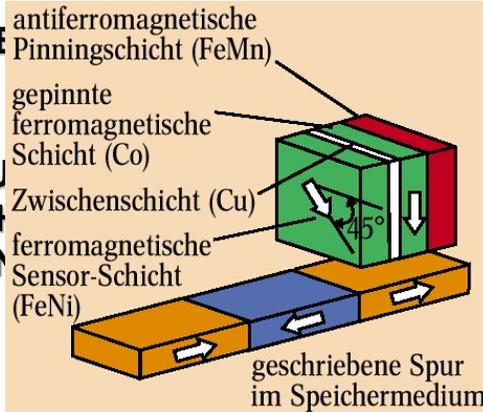
Inductive Head



Magnetoresistive Head



MAGNETIC FIELD FROM THE DISC THREADS THE CORE; THE CHANGING STRENGTH OF THIS MAGNETIC FIELD INDUCES A VOLTAGE, V , ACROSS THE COIL. THE VOLTAGE DEPENDS ON

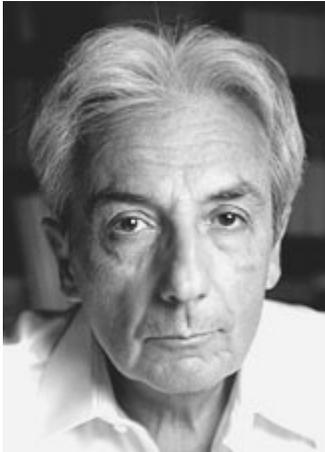


FIELD FROM THE DISC. THE MR SENSOR, DIRECTLY SENSES THE FIELD, A VOLTAGE SIGNAL PROPORTIONAL TO THE FIELD & INDEPENDENT OF

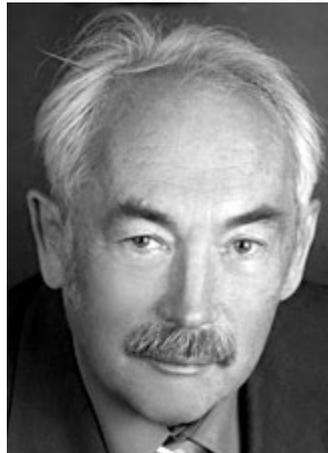
Nobelpreis für Physik 2007



"for the discovery of Giant Magnetoresistance"



Albert Fert



Peter Grünberg

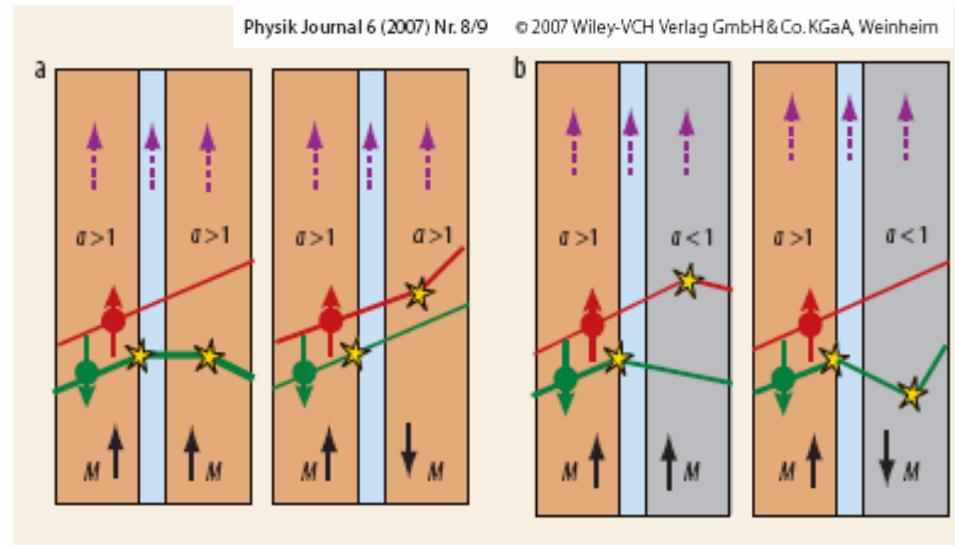


Abb. 5 In dem hier gezeigten idealisierten Modell werden je nach magnetischem Material und Grenzfläche nur Elektronen mit Spin down ($\alpha > 1$) oder Spin up ($\alpha < 1$) gestreut (Streuprozesse sind durch Sterne markiert). Ist α in beiden Schichten kleiner bzw. größer als 1, führt dies zum normalen GMR-Effekt (a). Die Kombination von $\alpha > 1$ und $\alpha < 1$

führt zum inversen GMR-Effekt (b), bei dem $R_p > R_{ap}$ ist. Spinabhängige Grenzflächenreflektivität ist nicht dargestellt, da sie wegen der Translationssymmetrie in der Schichtebene den Elektronenimpuls in Stromrichtung nicht verändert. Für Ströme senkrecht zur Schichtebene trägt neben der Streuung auch die Reflexion zum GMR-Effekt bei.