

Magnetismus

Es beruht vor allem auf dem Buch (weitere Literatur dort)

Völz, H.: Handbuch der Speicherung von Information Bd. 3 Geschichte und Zukunft elektronischer Medien. Shaker Verlag Aachen 2007, ist u.a. auch vollständig auf der CD enthalten:

Völz, H.: Wissen - Erkennen - Information. Datenspeicher von der Steinzeit bis ins 21. Jahrhundert. Digitale Bibliothek Bd. 159, Berlin 2007

Der Inhalt wurde gekürzt, auf den neuesten Stand gebracht und die Bilder z.T. farbig umgesetzt

Bei **Angabe der Quelle** ist das Material zum **privaten Gebrauch** voll nutzbar

Bei **kommerzieller Nutzung** bzw. in Publikationen usw. ist eine Abstimmung mit mir notwendig

Bilder sind in höherer Qualität ca. 2000×3000 Pixel oder *.cdr Version 12 verfügbar

Email: hvoelz@fpk.cs.tu-berlin.de bzw. h.voelz@online.de

Prof. Dr. Horst Völz, Koppenstr. 59, 10243 Berlin, Tel./Fax 030 288 617 08

Material wurde *heruntergeladen* von

aes.cs.tu-berlin.de/voelz bzw. <http://www.medienwissenschaft.hu-berlin.de/vlz>

Vielfalt, Eigenschaften und Vorteile

Magnetische Speicher waren, sind und bleiben **wesentlich**

Varianten sind Ferritkern-, Trommel-, Bubble-, Platten-, Band-, magnetooptische und künftige MRAM-Speicher

Wesentlich ist die stark ausgeprägte **Hysterese**, durch sie bleiben Daten auch **ohne Energiezufuhr** erhalten

Sie sind außerdem über **sehr lange Zeiten** sehr zuverlässig

Selbst das veränderliche **Magnetfeld der Erde** ist so im Sedimentgestein „eingeschrieben“

Zweiter Vorteil ist die unmittelbare Verknüpfung mit elektrischen Erscheinungen, u.a. durch die **Induktionsgesetze**

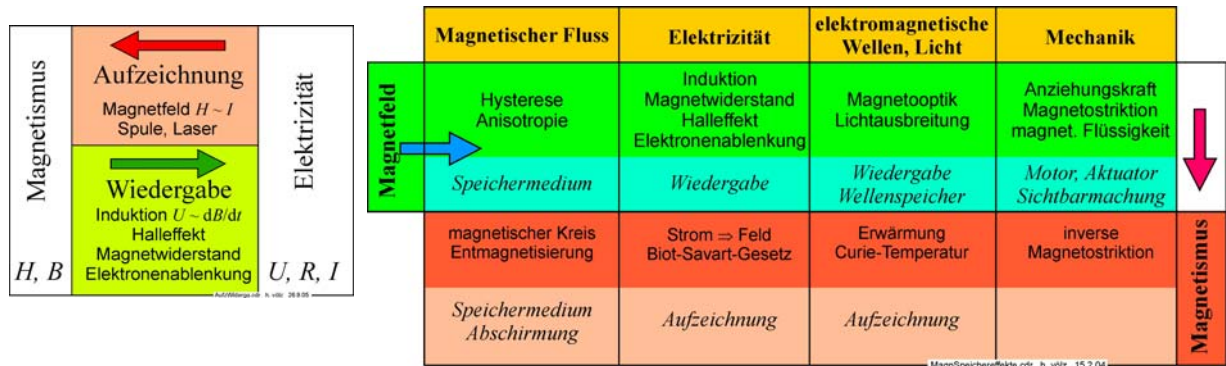
Probleme könnten entstehen falls **optische Signale** wichtig werden, geringe Wechselwirkung

Magnetismus **wichtig für:** Abschirmungen, Aktuatoren, Antennen, Antriebe, Dauermagnete, Drucker, Dynamo, Lautsprecher,

Magnetostriktion, Magnetseparation, Messtechnik, Mikrowellen, Motoren, Relais, Spulen, Starkstrom- und

Energietechnik, Transformatoren, Übertrager, Wandler

Erscheinungen sind nur **quantenphysikalisch** zu erklären.



Geschichte Altertum

China: Als Kompass wahrscheinlich schon um 2500 v.Chr. benutzt: Eisennadel schwamm im Bambusrohr auf Öl

Auch beim Bau der großen Chinesischen Mauer um 250 v.Chr. soll er benutzt worden sein

Erste Beschreibung 121 n.Chr. vom Chinesen HI-Ü-TSCHIN.

Wikinger: Schiffe Magnetkompass ab etwa 700 v.Chr. nachgewiesen.

Antike: Magnetismus *griechisch mágnes, líthos magnetes* Magnetstein, Mineral Magnetit ≈ 800 v.Chr. erwähnt

THALES VON MILET (624 – 546 v.Chr.) war bekannt, dass es Eisen anzieht.

G. PLINIUS d. Ä.: Hirte Magnes, wird auf Berg Ida durch eiserne Schuhnägel und eiserne Spitze seines Stabes festgehalten

LUKREZ (99 – 55 v.Chr.): Namen der Stadt Magnesia, wo Griechen das Mineral erstmals gefunden haben sollen

Geschichte Mitteleuropa

Zuerst ALEXANDER NEQUAM (1157 – 1217), ausführlich von P. PEREGRINUS (1269)

WILLIAM GILBERT (1544 – 1603) unterscheidet Elektrizität und Magnetismus („De magnetibus ...“)

Um 1600 entstehen Vorstellungen zum Erdmagnetismus

Mitte 18. Jh. wird Zusammenhang mit der Elektrizität festgestellt

Ab 1766 erprobt FRANZ ANTON MESMER (1734 – 1815) den „tierischen Magnetismus“ als Heilmethode

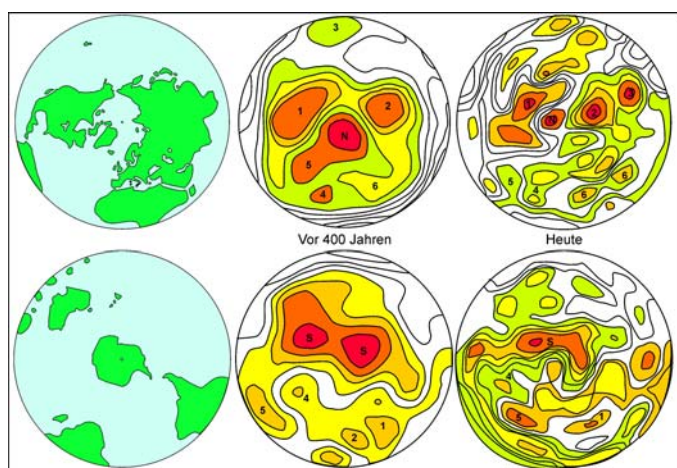
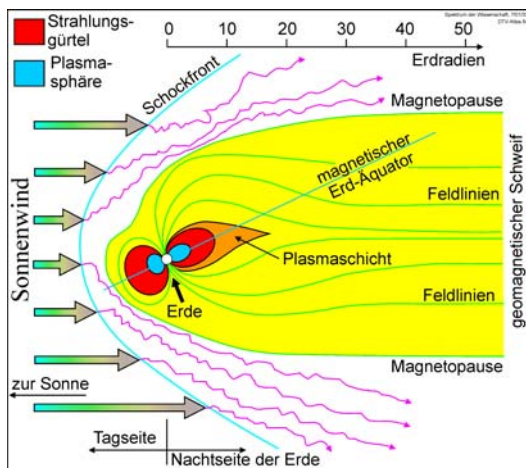
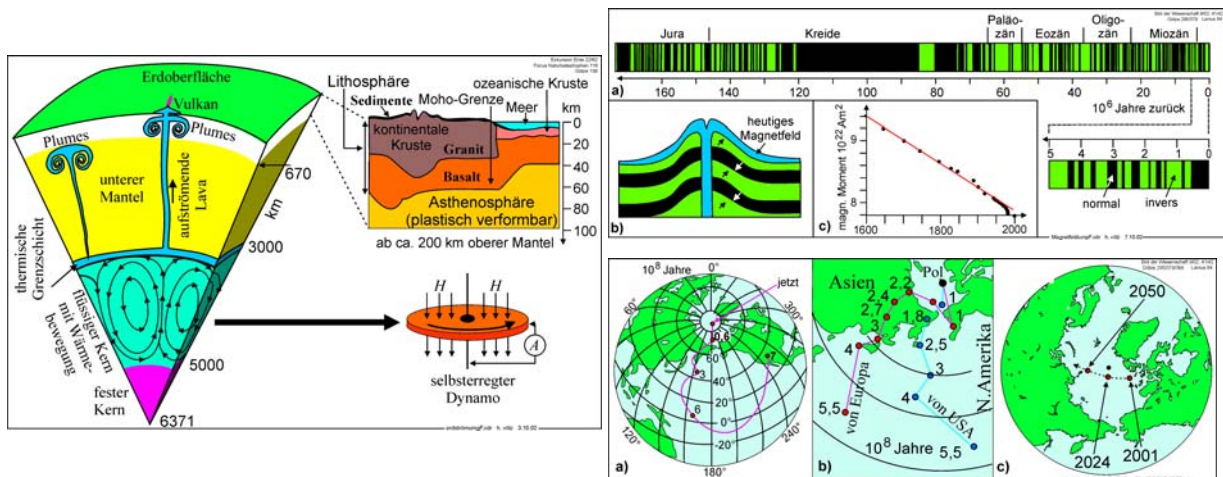
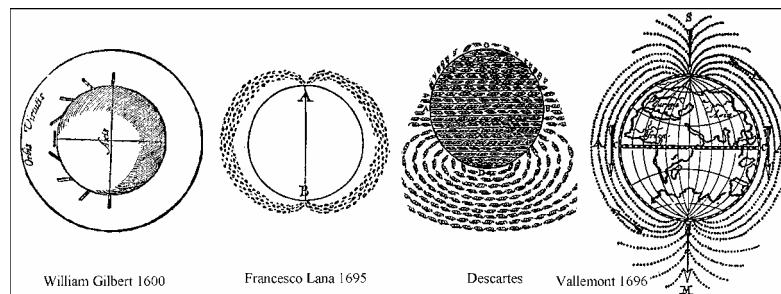
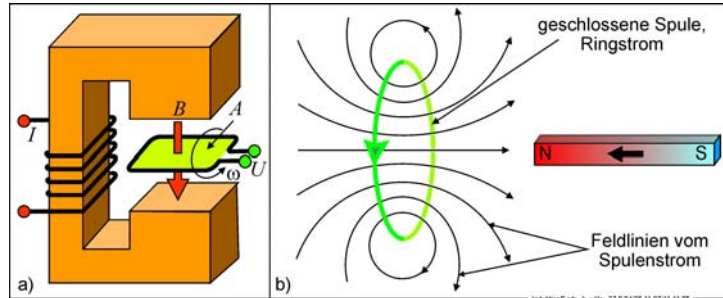
1819 entdeckt HANS CHRISTIAN ØRSTED (1777 – 1851) = Ørsted: Wechselwirkung Elektrizität $\Leftrightarrow$ Magnetismus

MICHAEL FARADAY (1791 – 1867) entwickelt erste Ansätze zu Elektromotor

1830 finden JOSEPH HENRY (1797 – 1878) und unabhängig 1831 FARADAY das Induktionsgesetz
 1861 JAMES CLERK MAXWELL (1831 – 1879) MAXWELL-sche Gleichungen
 PIERRE CURIE (1859 – 1906) unterscheidet Dia-, Para- und starken (Ferro-) Magnetismus
 1895 das CURIE-sche Gesetz des Paramagnetismus
 1907 PIERRE ERNEST WEISS (1865 – 1940) Molekularfeldtheorie des Ferromagnetismus
 1927 WOLFGANG PAULI (1900 – 1958) Theorie des Paramagnetismus metallischer Leitungselektronen
 1948 LOUIS EUGÈNE FÉLIX NÉEL (1904 – 2000) Erklärung des Ferrimagnetismus

Kloss, A.: Geschichte des Magnetismus. VDE-Verlag, Berlin - Offenbach 1994

Völz, H.: Handbuch der Speicherung von Information Bd. 1 Grundlagen und Anwendung in Natur, Leben und Gesellschaft.
 Shaker Verlag Aachen 2003 (s. auch CD oben)



Magnetische Einheiten

Magnetismus ist weniger anschaulich, als Elektrostatik oder gar elektrische Strom

Es gibt auch keine positiven und negativen Ladungen, die kompensieren können (magnetischer Monopol)

Selbst bei kleinsten Abmessungen existiert immer ein Dipol aus Nord- und Südpol

Magnetische Felder sind daher quellenfrei

Als Ursache gilt das Magnetfeld H und als Wirkung die Flussdichte (Induktion) B

In der Praxis, Messtechnik wird meist jedoch von B ausgegangen, und dann H berechnet.

Zwischen beiden vermittelt die Permeabilität μ gemäß $B = \mu \cdot H$

Das ermöglicht gewisse Analogie zur Elektrostatik und stationären elektrischen Strom

Auch für die entsprechenden Bauelemente gibt es Unterschiede, beim Magnetismus ist die Windungszahl n zusätzlich

Für den Magnetismus gibt es keine effektiven „Leiter“

Beim Strom Verhältnis vom Isolator zum Leiter $\approx 10^{20}$, Für μ bestenfalls 10^5 erreichbar

Maßeinheiten und SI

Das System International (SI) hat im Gegensatz zu theoretischen Aussagen **keine Basiseinheit für Magnetismus** eingeführt

Alle Einheiten werden mittelbar über elektrische Größen ausgedrückt

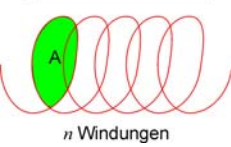
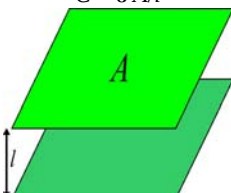
So gilt für die Feldstärke A/m , was bestenfalls bei stromerregten Spulen sinnvoll ist

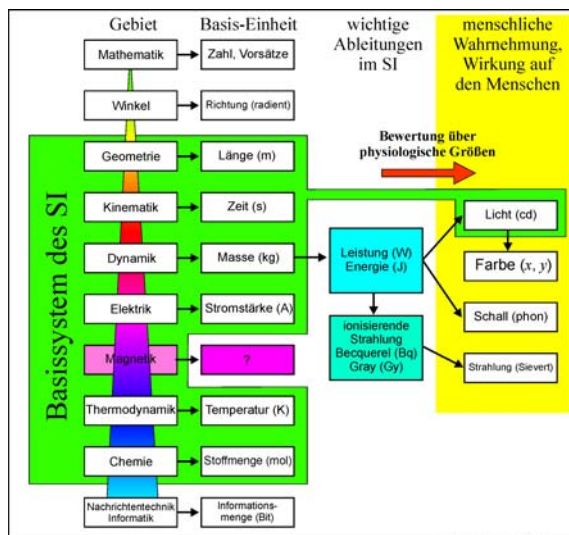
Magnetische Durchflutung entspricht auf Länge l bezogene elektrische Spannung: $\Theta = H \cdot l$, Ampere ist also unlogisch

Folglich werden die seit 1954 international gesetzlich festgelegten Einheiten nicht immer benutzt (unpraktisch)

Magnetische Feldstärke H mit $1 \text{ Oe} = 79,6 \text{ A/m}$ (Örsted) und Durchflutung mit $1 \text{ Gb} = 0,796 \text{ A}$ (Gilbert)

Wirkungskette allgemein = Strom $I \rightarrow$ Feldstärke $H \rightarrow$ Induktion $B \rightarrow$ Kraft F .

	Magnetismus	Ergänzungen	Statischer Strom	Elektrostatik
Ursache	Feldstärke H in A/m	Alt: Örsted $1 \text{ Oe} = 79,6 \text{ A/m}$ Alt: Gauß $1 \text{ G} = 10^{-4} \cdot T$	Feldstärke E in V/m	Feldstärke E in V/m
Wirkung	Flussdichte = Induktion B in T		Stromdichte i in A/m^2	Verschiebung D in C/m^2
Gesetz	$B = \mu \cdot H$ mit $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$	Suszeptibilität $\kappa = \mu - 1$	$i = E/\rho$ ρ spez. Widerstand	$D = \epsilon \cdot E$ mit $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$ $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C/(V}\cdot\text{m)}$
Fläche A	$\Phi = B \cdot A$	Alt: Maxwell $1 \text{ Mx} = 10^{-8} \cdot \text{Wb}$	$I = i \cdot A$	$Q = D \cdot A$
Länge l	Fluss in $\text{Wb} = V \cdot s$ $V (= \Theta) = H \cdot l$ Durchflutung in A	Alt: Θ in Gilbert $1 \text{ Gb} = 0,796 \text{ A}$	Stromstärke in A $U = E \cdot l$ Spannung in V	Ladung in C $U = E \cdot l$ Spannung in V
Energie	$N = L \cdot I^2/2$	in $J = W \cdot s$	$N = U \cdot I \cdot t$	$N = C \cdot U^2/2$
Energiedichte	$w = B \cdot H/2$	in J/m^3	$w = i \cdot E \cdot t/2$	$w = D \cdot E/2$
diff. Gesetz	$U = d\Phi/dt$		$I = dQ/dt$	$I = dQ/dt$
Bauelement	$L = n^2 \cdot \mu \cdot A/l$  n Windungen	$n = \text{Windungen}$ $P = \frac{l}{\mu \cdot A}$	$R = \rho \cdot l/A$ 	$C = \epsilon \cdot A/l$ 



Beschreibungen des Magnetismus

Wege zur Beschreibung der Erscheinungen, die sich ergänzen und schwer ineinander überführbar sind

Phänomenologie = Beschreibung der makroskopischen Eigenschaften ohne inhaltliche Erklärung

Bereiche, kleinste magnetische Kristalle, magnetische Wände, Erklärung über Energieminimum

Quantenphysik, erklärt magnetische Eigenschaften aus den Atommodellen

Technische Bezüge für die Speicherung

Technologie zur Herstellung der verschiedenen benötigten Magnetmaterialien

Speichermedien u.a. Magnetband und dünne Schichten

Aufzeichnung, Wiedergabe, z. B. Magnetköpfe

Phänomenologie

Magnetismus im Vakuum und Stoffen

Erscheinungen werden oft im Material und Vakuum gesondert betrachtet

Im **Vakuum** gilt die **magnetische Feldkonstante** $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ (Induktionskonstante, Vakuum-, absolute Permeabilität).

Vermittelt vom erregendem Feld $H \Rightarrow$ Wirkung = magnetische Flussdichte = Induktion B ; *lateinisch inducere* hineinführen

Im **Stoff** ist die Wirkung (Flussdichte) anders (vgl. $\approx$ optisch Brechungsindex n)

Daher der einheitenfreie Faktor = relative **Permeabilität** μ_r (*lateinisch permeare* durchgehen, durchdringen) $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$

Nur bei stark magnetischen Materialien (z.B. Eisen) gilt $\mu_r \gg 1$, meist gilt $\mu_r \approx 1$

Daher **Suszeptibilität** $\chi = \mu - 1$ (*lateinisch suscipere* aufnehmen, *sus* aufwärts, empor und *capere* nehmen, fassen)

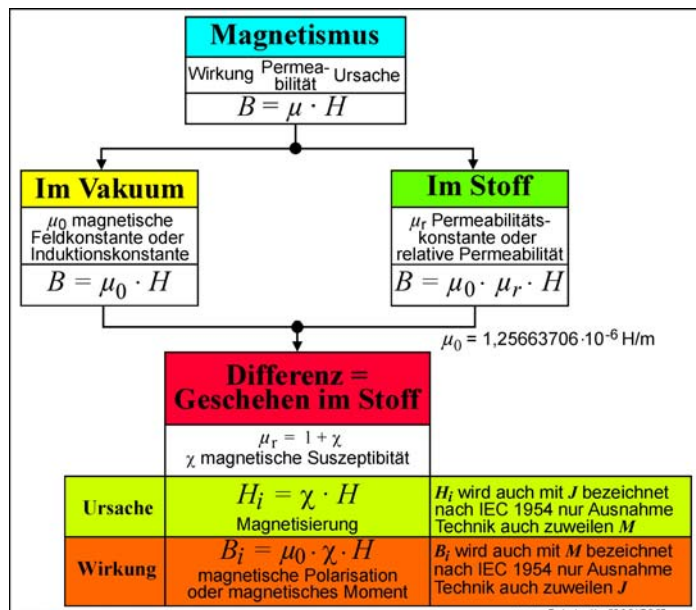
Im Material zusätzliche Wirkung B_i (M) = Magnetisierung = magnetische Polarisation = magnetisches Moment

Eigentlich ist „ M “ bereits seit 1954 nur als Ausnahme zulässig, ist aber unpraktisch

In einem speziellen Maßsystem gilt dabei $M = B - H$

Nützlich ist weiter im Material eine „zweite“ Feldstärke H_i ($= J$) einzuführen $\Rightarrow B_i = \mu_0 \cdot H_i$ (seit 1954 ebenfalls unzulässig)

In der technischen Literatur werden zur weiteren Verwirrung zuweilen auch die Formelzeichen J und M vertauscht.



Zwei Ergänzungen

Zwischen Elektrostatik mit Dielektrizitätskonstante ϵ und Magnetismus gilt für die **Lichtgeschwindigkeit**

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}}$$

Magnetismus letztlich gequantelt auf (s.u.), gilt insbesondere für den Fluss $\Phi = B \cdot A$ (A = Fläche, Querschnitt)

Das **magnetische Flussquant** beträgt $2,07 \cdot 10^{-15} \text{ Wb}$

Alle Magnetflüsse können hiervon nur ganzzahlige Vielfache sein.

Arten des Magnetismus

Grob werden unterschieden

- Atomarer, molekularer** (schwacher, weicher) Magnetismus: 2 Varianten Dia- und Paramagnetismus
griechisch diá durch und pará neben; entlang; vorbei; über hinaus; (ent-) gegen)

Suszeptibilität $|\chi|$ liegt im Bereich von 10^{-3} bis 10^{-6} .

Ohne äußeres Magnetfeld besitzen sie kein eigenes, nach Außen wirksames magnetisches Moment
auch keine Hysterese, Nachwirkung

Diamagnetismus erstmalig 1827 von ANTOINE CÉSAR BECQUEREL (1788 – 1878)

1846 für Antimon und Wismut durch MICHAEL FARADAY (1791 – 1867) nachgewiesen

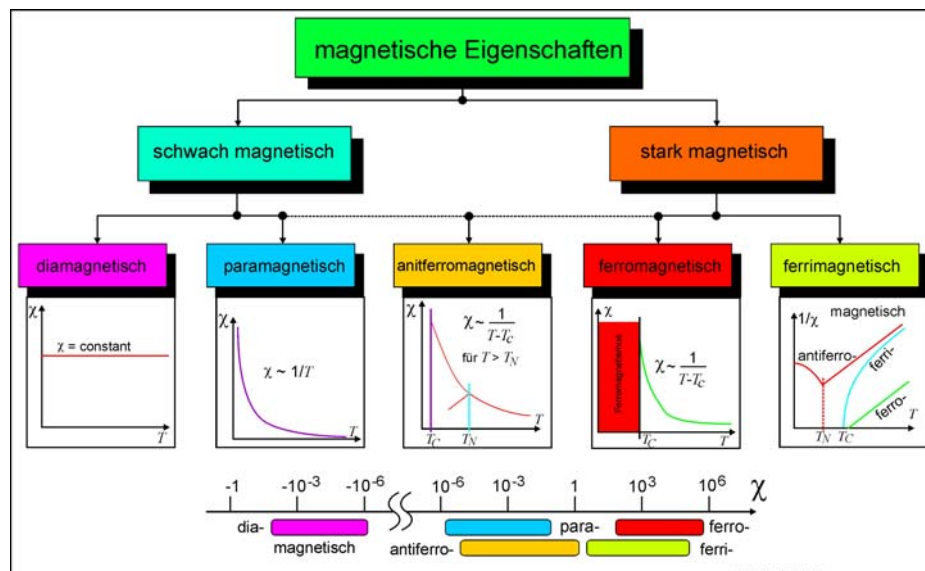
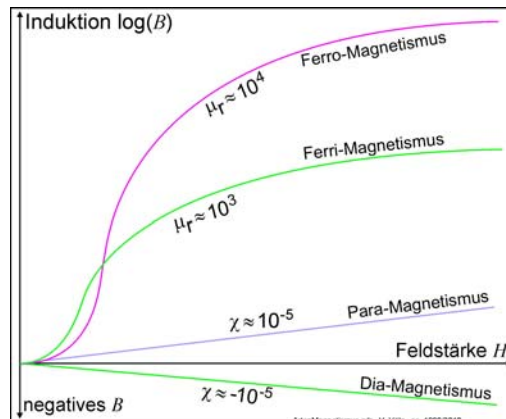
- **Kollektiver** (starker, harter) Magnetismus in mindestens 3 Varianten:

Ferro-, Antiferro- und Ferrimagnetismus mit $\mu_r > 2$ bis 10 000, *lateinisch Ferrum* Eisen

Es gibt remanente Magnetfelder und Hysterese, wichtig für Speicherung

Unterschiede nur quantenphysikalisch und kristallografisch zu erklären

LOUIS EUGÈNE FÉLIX NÉEL (1904 – 2000) benannte in 20er Jahren Unterschied: harter und weicher Magnetismus
Sagte 1930 den Antiferromagnetismus voraus, 1942 definierte er Ferrimagnetismus



Einige Daten

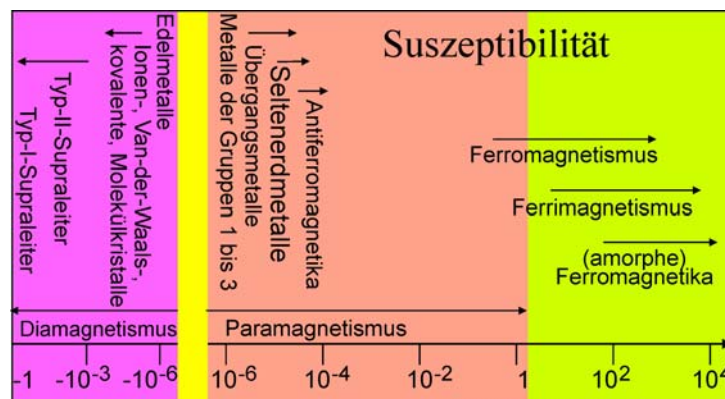
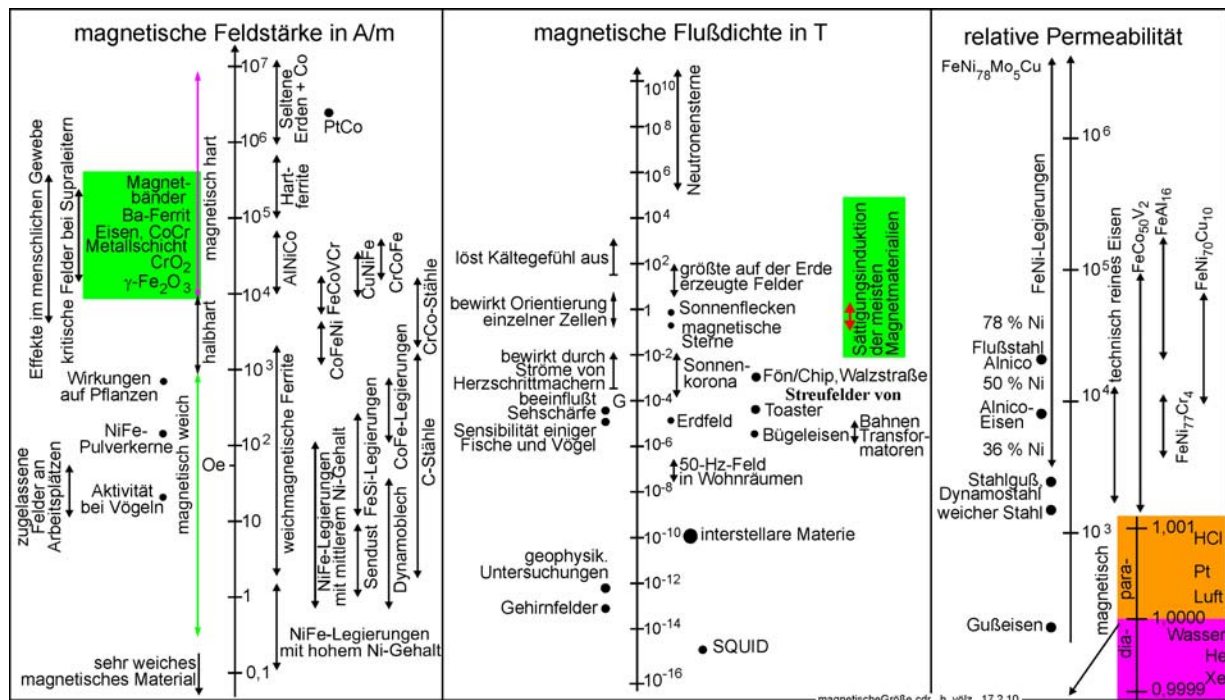
Diamagnetismus		Paramagnetismus	
Material	χ in 10^{-6}	Material	χ in 10^{-6}
Wasserstoff	-0,0002	Sauerstoff	0,015
Kupfer	-0,8	Luft	0,03
Wasser	-1	Zinn	0,19
Cu ₂ O	-2	Aluminium	1,7
Quecksilber	-3	Barium	1,9
Al ₂ O ₃	-4	Natrium	16
Helium	-6	Chrom	26
Argon	-6	Palladium	60
Ethanol	-9	Platin	260
Antimon	-9	O (flüssig)	280
Petroleum	-11	Eisenchlorid	300
NH ₃	-12	CoCl	1300
Wismut	-15	Neodym	6000
Xenon	-40	HCl	10000

Wichtige Materialeigenschaften

Magnetisches Material hauptsächlich durch drei Kennwerte gekennzeichnet

- **Magnetisch Feldstärke H** gibt an welche Erregung in einem magnetischen möglich ist
Sie ist für die Aufzeichnung besonders wichtig, begrenzt aber auch die erreichbare mechanische Kraft
Sonderfall **Koerzitivfeldstärke H_C** gibt an, wie leicht oder schwer ein Material umzumagnetisieren ist
es existieren drei Klassen: hart, halbhart und weich
Ursprung: Bei frühen Magnetstählen war hohe Koerzitivfeldstärke mit hoher mechanischer Härte gekoppelt
- **Magnetische Flussdichte = Induktion B** ist ein Maß für die im Material erreichbare Wirkung
Zu ihr gehört auch die **Sättigungsremanenz B_r**
- **Permeabilität** ist der Kennwert zwischen Feldstärke und Induktion. Infolge der Hysterese gibt viele Varianten (s.u.)
meist wird die relative Anfangs-Permeabilität angegeben.

Größenordnung von H , B und μ_r



Hysterese allgemein

Griechisch **hystéresis** Zukurzkommen, Zurückbleiben, Hinterherhinken, **hýsteron** später, geringer
1880 E. WARBURG beschreibt die erste Hysterese, 1882 führt J. A. ERING den Namen ein
Hysterese liegt immer dann vor, wenn von der Einwirkung im Material etwas zurückbleibt (Relaxation)
In diesem „Rest“ ist immer etwas von der Vorgeschichte *gespeichert*
Besonders ausgeprägt ist sie bei ferro- und ferrimagnetisches Material, z.T. auch bei antiferroelektrischen
Auch einige Festkörper, z.B. Gummibänder und Kunststoffe zeigen solch Verhalten
Teilweise wird eine Hysterese indirekt erzeugt, z. B. beim SCHMITT-Trigger und Flip-Flop
Seit geraumer Zeit wird der Begriff auch in den Wirtschaftswissenschaften verwendet (Nachwirkung)

Neukurve

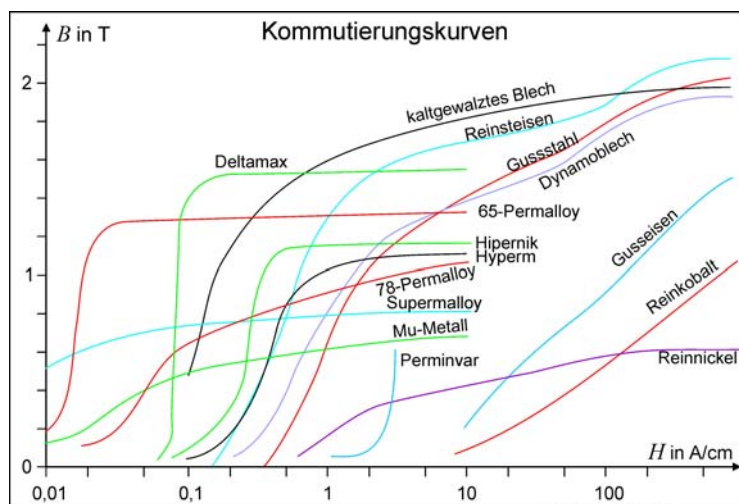
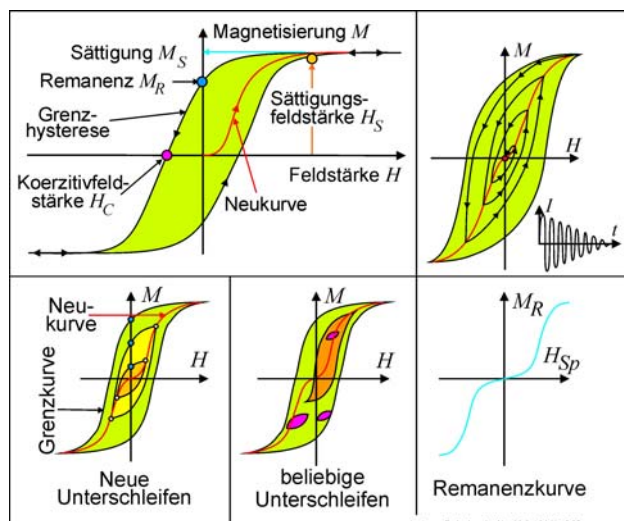
Magnetische Induktion B (magnetische Moment J) hängt von der Feldstärke H und „Vorgeschichte“ ab
 Am einfachsten ist die vom Ursprung ($H = 0, B = 0$) ausgehende *Neukurve* (= jungfräuliche Kurve $\approx$ Kommutterungskurve)
 Zunächst wächst die Induktion schwach mit dem äußeren Feld
 Danach wird der Zuwachs steiler, um später wieder flacher zu werden
 Schließlich wird ab der *Sättigungsfeldstärke* H_s die konstante *Sättigungsmagnetisierung* J_s (B_s) erreicht
 H_s ist nicht genau definiert (flache Kurve), daher wird meist jene Feldstärke gewählt, die 95 % der Sättigung bewirkt.

Grenzhysterese

Von diesem Wert aus wird mit Umkehr ($-H, +H$) die Grenzhysterese durchlaufen
 Bei der Koerzitivfeldstärke $-H_C$ wird (ohne Feldabschaltung) $B = 0$ erreicht (nicht Koerzitivkraft!).
 Mit allen Feldstärken können nur (aber auch alle) Wertepaare innerhalb der Grenzhysterese erreicht werden
 Die Fläche der Grenzhysterese bestimmt die Ummagnetisierungsverluste (Erwärmung nicht Wirbelstrom!)
 Innerhalb der Grenzhysterese existieren auch recht symmetrischer Kurven

Wird ein Magnetfeld zurückgenommen $H \rightarrow 0$, so verbleibt eine Remanenz B_s, J_s
 Für alle Ausgangspunkte von der Neukurve entsteht so die Remanenzkurve
 Sie ist noch mehr nichtlinear als die Neukurve, ist aber für die Speicherung entscheidend

Nur mit periodischen aber langsam abnehmenden Feldern kann wieder der Ursprung erreicht werden



Koerzitivfeldstärke

Mittels der Koerzitivfeldstärke H_C werden drei Materialgruppen unterschieden

- magnetische weiche Materialien $H_C < 10 \text{ A/cm}$ Spulen, Transformatoren, Magnetköpfe usw.
- magnetische halbharte Materialien $10 \text{ A/cm} < H_C < 100 \text{ A/cm}$ wenig Anwendungen
- magnetische harte Materialien $H_C > 100 \text{ A/cm}$ Speichemedien, Dauermagnete

Vor allem die Koerzitivfeldstärke ist stark durch Technologien zu beeinflussen

Vielfalt der Hysterese-Kurven

Grob werden vier Typen von Hysterese-Kurven unterschieden

N normal, **F** fein, flach, **R** Rechteck, regulär und **S** Sonderfälle

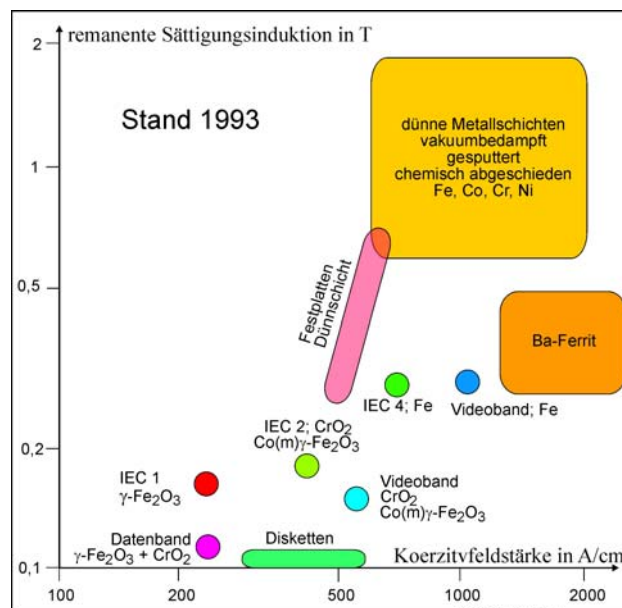
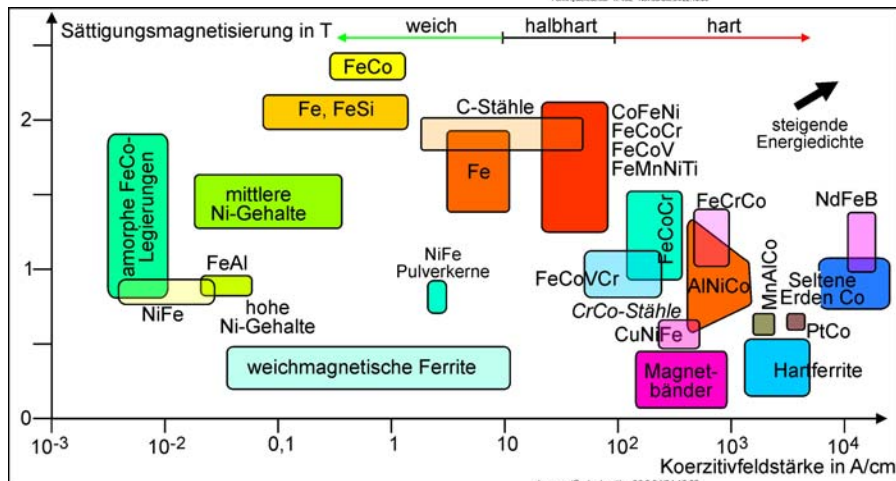
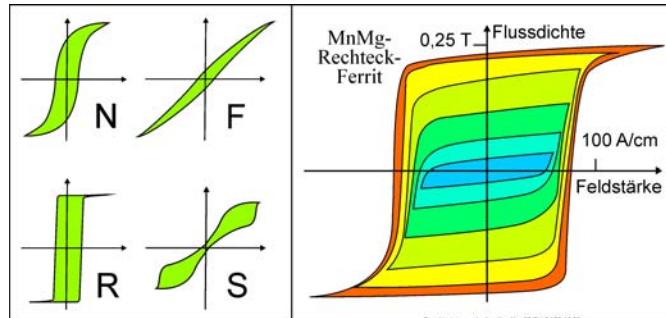
Typisch für die Unterscheidung ist der **Rechteckfaktor** = Verhältnis Remanenz- zu Sättigungsinduktion

Bei exakt rechteckiger = 1, . Bei sehr geneigter, betonter **F**-Form 1/10 bis 1/100, maximal etwa 1/1000

N und **R** sind meist hart-, **F** weichmagnetisch

Speichermaterial verlangt möglichst rechteckige Formen **R**, extrem für Ferritkernspeicher

Übertrager, Magnetköpfe dagegen **F** → geringe Hysterese-Verluste.



Magnetische Permeabilität

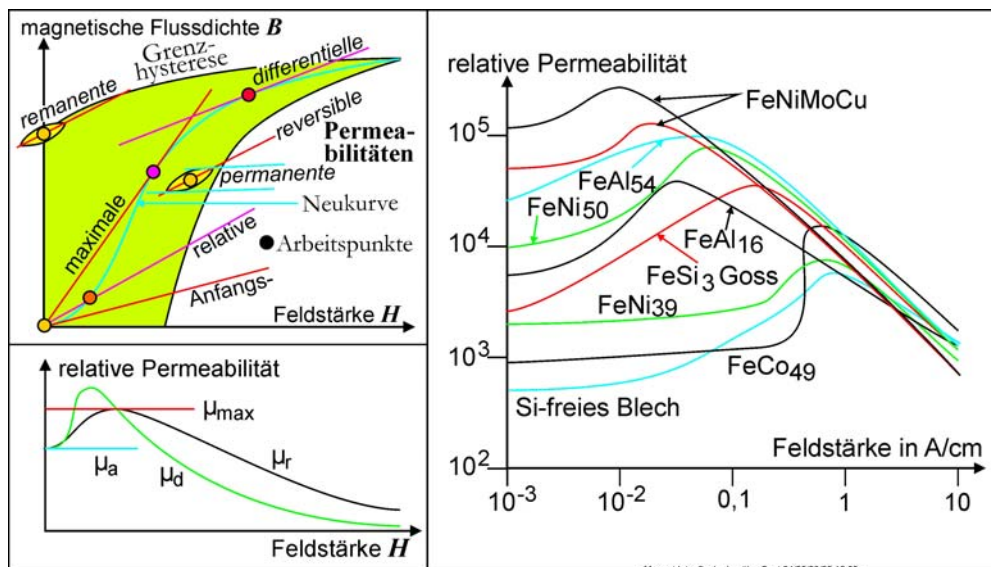
Magnetische Permeabilität ist ähnlich wie spezifischer Widerstand oder Dielektrizitätskonstante ein typischer Materialwert

Doch wegen der Hysterese-Kurven, der Unterschleifen und ihrer Vielfalt ist sie keine Konstante

Vielmehr existiert eine Vielzahl unterschiedlich definierter Permeabilitäten ≈ je nach Anwendung:

- **Relative** μ_r = Gerade-Steigung (B/H) vom Nullpunkt zum Arbeitspunkt auf der Neukurve. Für große Feldstärken $\rightarrow 1$
- **Maximale** μ_{max} = Größtwert der relativen $\Rightarrow$ Steigung der Tangente vom Ursprung an Neukurve
- **Anfangs-** μ_a = Sonderfall von $\mu_r \rightarrow$ Steigung am Ursprung: $B/H = dB/dH \Rightarrow$ wichtig für kleine Aussteuerungen, z. B. Magnetköpfe bei Wiedergabe
- **Differentielle** $\mu_{diff} = dB/(\mu_0 dH)$ insbesondere bei Unterschleifen, folgt aus der jeweiligen Tangente
- **Reversible** $\mu_{rev} \approx \Delta B/(\mu_0 \cdot \Delta H)$ für $\Delta H \rightarrow 0$, kleine Aussteuerung um beliebigen Arbeitspunkt $\Rightarrow$ ellipsenähnliche Schleife (RAYLEIGH-Ellipse) = flache Tangenten an der oberen und unteren Kante
- **Permanente** $\mu_{per} \approx \Delta B/(\mu_0 \cdot \Delta H) \Rightarrow$ ebenfalls aus RAYLEIGH-Ellipse, jedoch aus Neigung der Hauptachse
- **Remanente** $\mu_{rem} \approx \Delta B/(\mu_0 \cdot \Delta H)$ für $H=0 \Rightarrow$ RAYLEIGH-Ellipse im Remanenzpunkt = dortige permanente

Lord JOHN WILLIAM RAYLEIGH, vor Adelung J. W. STRUTT; 1842 – 1919)



Beispiele für Anfangs- und Maximal-Permeabilität (weiche Materialien)

Stoff	Zusammensetzung	μ_a	μ_{max}
Eisen	Fe ₉₆ Si ₄	400	8 000
Heuslersche Leg.	Cu _{75,6} Mn _{14,3} Al _{10,1}	48	80
Hipernik	Ni ₅₀ Fe ₅₀	5 000	56 000
Hyperm 20	Cr ₂₀ Al ₅ Fe ₇₅	650	10 000
Kobalt	Co ₉₆ Ci _{1,4} Ni _{0,8} Mn _{0,25} Fe _{0,9} Si _{0,4}	84	175
Mu-Metall	Ni ₇₆ Fe ₁₇ Cu ₅ Cr ₂	12 000	45 000
Cr-Permalloy	Ni _{78,5} Cr _{3,8} Fe _{17,7}	12 000	62 000
Mo-Permalloy	Ni _{78,5} Mo _{3,8} Fe _{17,7}	20 000	75 000

Permeabilitäten nicht aus der Hysterese-Kurve

- **Scheinbare** = **apparative** = Verhältnis der Induktivität einer Spule mit und ohne magnetischem Kern
- **Impuls-** folgt aus Verhalten von Impulstransformatoren
- **Komplexe** berücksichtigt indirekt auch Verluste einer Induktivität, $\approx$ Materialeigenschaft

Mit Windungszahl n , Permeabilität μ_r , Fläche A und Länge l gilt zunächst (A_L -Wert $\approx$ magnetischer Widerstand):

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

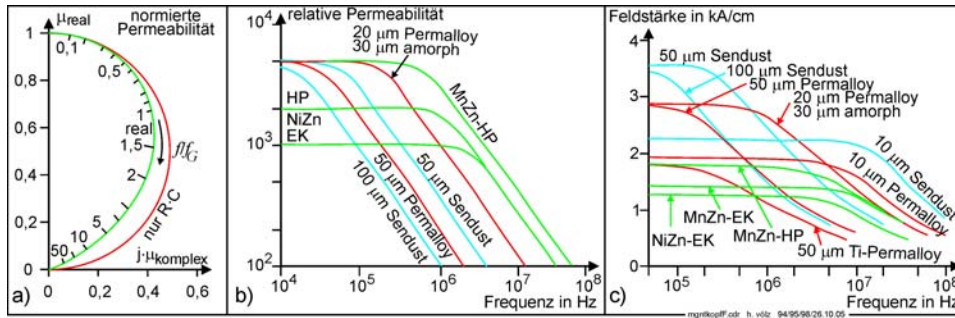
Verluste bewirken: Ohmscher Widerstand der Wicklung R_Ω , Hysterese $k_H \cdot \omega$ und Wirbelstrom $k_W \cdot j \cdot \omega^2$

$$R \approx R_\Omega + \omega(j \cdot L - k_H \cdot \omega + j \cdot k_W \cdot \omega^2)$$

Auflösung nach L bzw. $\mu_r \rightarrow$ komplexe Permeabilität:

$$\mu_{r, \text{komplex}} = \mu_r + \mu_W \cdot \omega^2 + j \cdot \left(\frac{\mu_\Omega}{\omega} + \mu_H \cdot \omega \right)$$

Bewirkt typische Grenzfrequenz f_G



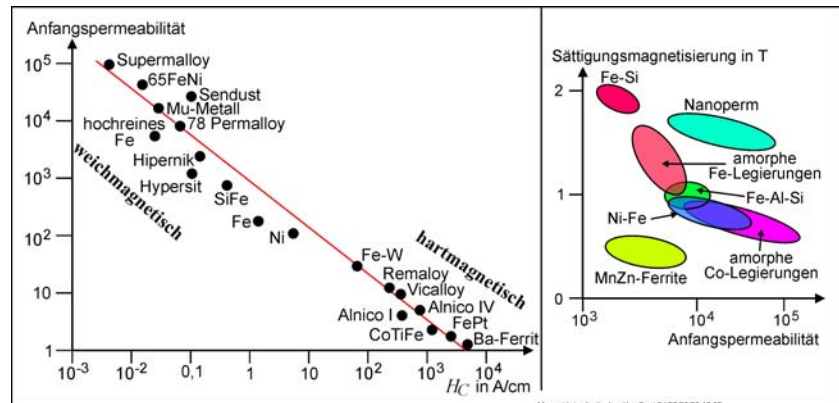
Zusammenhänge

Infolge Vielfalt magnetischer Erscheinungen kaum allgemeine Zusammenhänge

Hartmagnetische Materialien kleine und **weichmagnetische** Materialien hohe Anfangspermeabilität $\rightarrow \mu_r \sim 1/H_C$

Eine weitere experimentelle Näherung ist die Formel von GANZ:

$$\frac{\mu_r}{\mu_a} = 3 \cdot \left[\left(\frac{J_{sätt}}{J} \right)^2 - \frac{1}{\sinh \left(\frac{J}{J_{sätt}} \right)} \right]$$



Dauermagnete

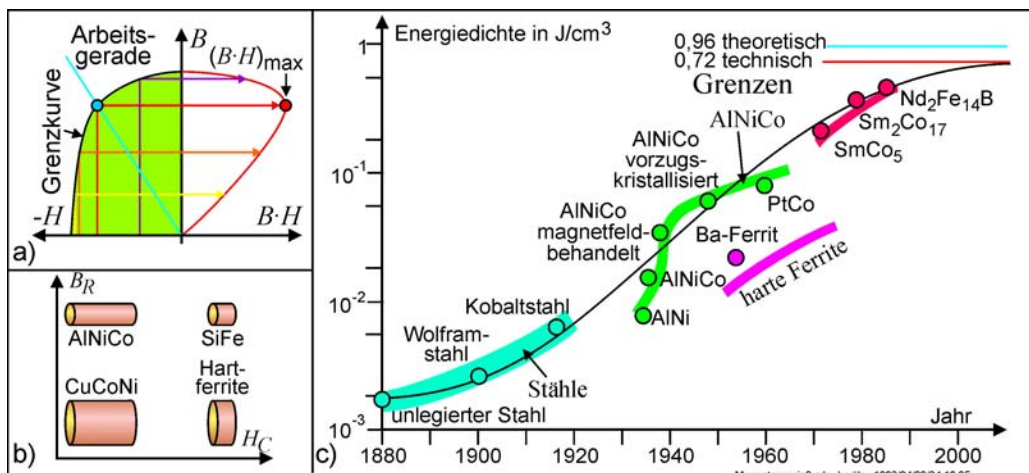
Haben nutzbare Energie gespeichert, wichtig daher **Energiedichte** mit $w = B \cdot H / 2 \Rightarrow$ remanenter Teil 4. Quadrant

Für Produkt $B \cdot H$ existiert ein Maximum mit vorteilhafter Arbeitsgeraden $\rightarrow$ Steigung abhängig von M_s/H_C

Bewirkt für Dauermagnete unterschiedliche Längen-Querschnitts-Verhältnisse (für Feldstärke im Abstand)

Geschichte Energiedichte vier wichtigsten Etappen

1. verschiedenen Stähle, 2. AlNiCo-Verbindungen, 3. harte Ferrite und 4. Seltene-Erden-Verbindungen



Temperaturabhängigkeit

1895 fand PIERRE CURIE (1859 – 1906) experimentell das CURIE-sche Gesetz: $\chi = C_M/T$ (T = absolute Temperatur)

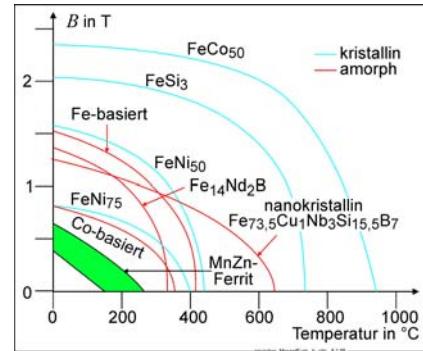
Von PIERRE ERNEST WEISS (1865 – 1940) mit den Konstanten C_m und T_C erweitert (CURIE-WEISS-sches Gesetz)

$$\chi = \frac{T_C}{\lambda \cdot (T - T_C)} = \frac{C_m}{T - T_C} \text{ mit } T > T_C$$

Bei der Curie-Temperatur T_C ist die thermische Energie so groß, dass der Magnetismus verschwindet (Details später)

Beispiele für ferromagnetische Stoffe.

Material	CURIE-Temperatur (K)	Magnetisches Moment (V·s/m ²)
Fe	1043 (1100) ≈ 770 °C	2,18
Co	1400 (1420) ≈ 1120 °C	1,84
Ni	630 (650) ≈ 358 °C	0,63
Gd	292 (302)	2,52
MnBi	630	3,5
CrO ₂	405	0,76
CrBr ₃	37 (50)	0,34
EuO	69 (80)	2,41
CdCr ₂ Se ₄	129 (204)	0,45



Entmagnetisierung

Häufig verlaufen geschlossene magnetischen Feldlinien im Material ($\mu_r \gg 1$; Hysterese) und in der Luft ($\mu_r \approx 1$, konstant)
 Hierdurch wird die wirksame magnetische Kennlinie verändert
 Begriffe dafür sind **Scherung**, **Entmagnetisierung** (sehr unglücklicher Begriff) und englisch **demagnetization**

Zwei wichtige **Spezialfälle**: unterbrochener Magnetkreis und kleines Magnetteichen

Nahezu geschlossener Magnetkreis

Ist nur durch engen Luftspalt unterbrochen

Vorteilhaft Modell des Magnetkreises als zwei in Reihe geschaltete magnetische Widerstände

Nichtlinearität der Hysterese wird so durch die Feldunabhängigkeit des Spaltes linearisiert (verflacht)

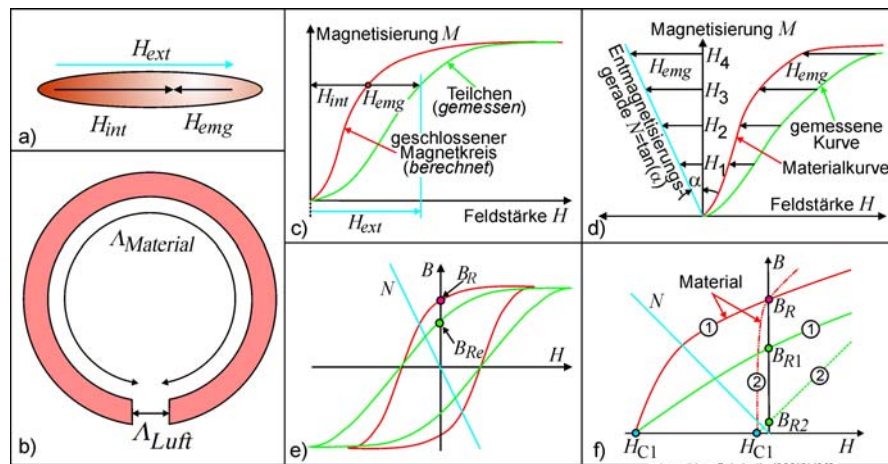
Magnetischer Spaltwiderstand kann durch eine Entmagnetisierungs-Gerade beschrieben werden

Ihre Steigung α bestimmt den **Entmagnetisierungsfaktor** $N = \tan(\alpha)$.

Für die **Material-Neukurve** fehlt daher die im Spalt befindliche Feldstärke

$$H_{emg} = N \cdot M / \mu_0$$

Wichtig: Die Entmagnetisierung ändert nicht die Koerzitivfeldstärke, es nimmt remanente Flussdichte B_R ab
 Technisch wichtig für rückwärtigen Spalt in Magnetköpfen (weniger Remanenz!)



Magnetteilchen → Entmagnetisierungsfaktor

Durch ein äußeres, externes Feld H_{ext} bilden sich an seinen Enden Pole aus

Sie bewirken ein Feld H_{emg} , das dem externen Feld entgegengerichtet ist

Im Innern existiert dann nur noch

$$H_{int} = H_{ext} - H_{emg}$$

Dabei geht die Geometrie, Gestalt des magnetischen Materials ein → formabhängiger Entmagnetisierungsfaktor N

Er muss in drei Richtungskomponenten zerlegt werden, wobei gilt: $N_x + N_y + N_z = 1$.

Die Anisotropie-Energie hängt von den Richtungskosinussen $\alpha_i = \cos(\beta_i)$ des Raumwinkels β_i ab

$$w = \frac{1}{2} \cdot \mu_0 \cdot M^2 \cdot (N_x \cdot \alpha_x^2 + N_y \cdot \alpha_y^2 + N_z \cdot \alpha_z^2).$$

Ist ein Material in eine Richtung unendlich weit ausgedehnt, so wird die entsprechende Komponente = 0

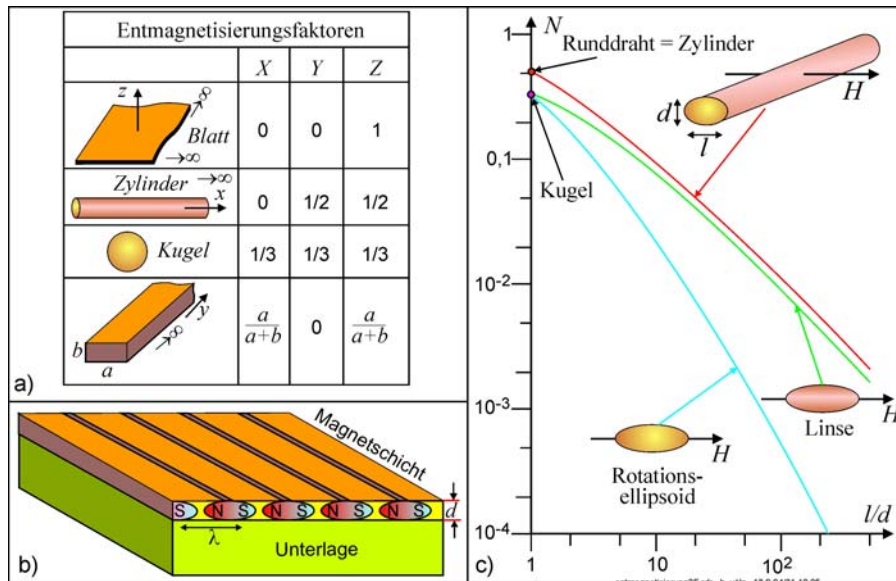
Bei gleichberechtigten Richtungen (Würfel, Kugel) sind die alle N_i gleich groß.

Für ein langgestrecktes Rotationsellipsoid gilt z. B.:

$$N_x = \frac{\ln(2 \cdot m - 1)}{2 \cdot m^2} \quad \text{mit } m = l_x/l_y = l_x/l_z \gg 1$$

Für magnetische Speicherung (Längsaufzeichnung) gilt näherungsweise mit Schichtdicke d und Wellenlänge $\lambda \rightarrow l \approx \lambda/2$

$$N = \frac{1}{1 + l/d} \quad \text{bzw.} \quad N = \frac{2 \cdot d}{2 \cdot d + \lambda}$$



Magnetische Anisotropie

Griechisch **an-** nicht, un; **ísos** gleich, ähnlich, entsprechend; **trópé** Wendung, Umkehr, Wechsel

trópos Richtung, Wendung, Art und Weise

Betrifft Richtungsabhängigkeit bzgl. sehr verschiedener Eigenschaften, z. B. Gerichtetheit der Zeit

Materie bzgl. Brechungsindex, Dielektrizitätskonstante, Elastizität, Leitfähigkeit, Härte, Druck, Wärmeleitung usw.

Magnetische Anisotropien: Form, Kristall, Magnetisierung, Koerzitivfeldstärke, Verformung usw.

Weitere Details später

Ausgewählte magnetische Effekte

Magnetomechanische Effekte

1. **Anziehung/Abstoßung:** Motor, Hubmagnet, Lautsprecher, Drehspulinstrument, Aktuator (*lateinisch actuare* sich betätigen) usw.
2. **Wirkung auf Kenngrößen,** wie Hysteresekurve, Koerzitivfeldstärke, Permeabilität und (Sättigungs-) Magnetisierung vor allem durch Druck und Zug
3. **Magnetostraktion** (*lateinisch strictus* zusammengeschnürt, straff, eng, streng)

1846 JAMES PRESCOTT JOULE (1818 – 1889) entdeckt Längenänderung eines ferromagnetischen Stoffes durch Magnetisierung

= JOULE-Effekt bezeichnet, zusätzlich tritt Volumenänderung, teilweise auch Scherung (= Torsion) auf

Magnetostraktion wird häufig zur Erzeugung von Ultraschallwellen benutzt (Brummen von Transformatoren)

1847 entdeckte P. A. MATTEUCHI, 1865 bestätigte E. VILLARI auch Umkehrung *magnetoelastischen Effekt*

Wird 1861 JOHANN PHILIPP REIS (1834 – 1874) für sein Telefon benutzt

Relative Änderung der Länge l wird mit einer Konstante λ beschrieben: $\lambda = \Delta l/l$.

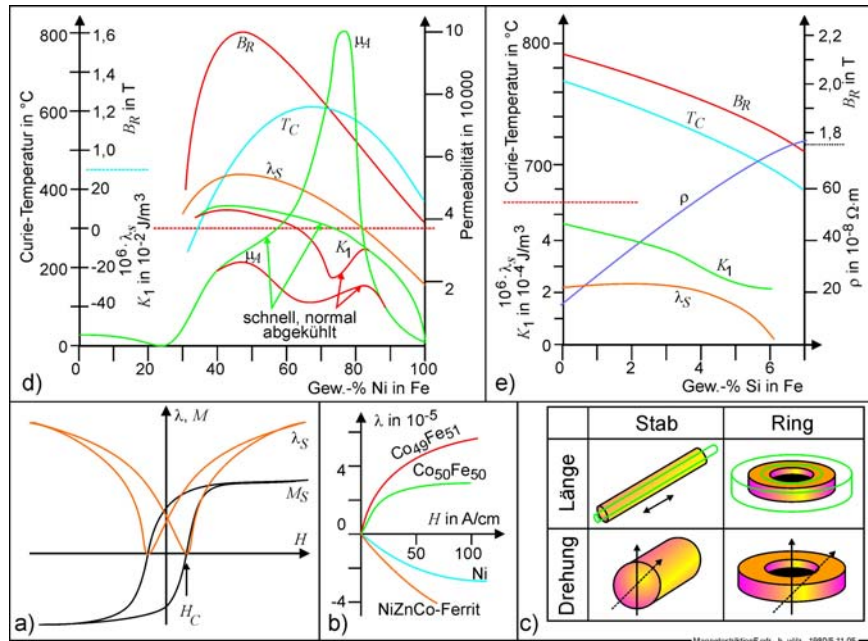
λ kann positiv oder negativ sein, Größenordnung bei para- und diamagnetischen Stoffen $|\lambda| \approx 10^{-8}$

Ferro-, antiferro- und ferrimagnetische Stoffe bei $1 \text{ T } 10^{-5} > |\lambda| > 10^{-2}$. Sondermaterial erheblich größere Werte

hoch magnetostruktive Stoffe

E = Elastizitätsmodul, * = bei 77 K.

	*Tb _{0,6} Dy _{0,4}	*TbZn	Tb _{0,3} Dy _{0,7} Fe ₂	TbFe ₂	DyFe ₂	SmFe ₂	TbFe ₃
B_S in T	3,4	2,2	1,0				
T_C in K	≈ 200	≈ 200	≈ 700	697	635	676	
λ_S in 10^{-6}	6 500	5 500	$> 5\,000$	1750	433	-1560	693
λ_{111} in 10^{-6}				2460	1260	-2100	
H_S in kA/m	40	25	80	> 200	> 200	150	> 200
E in GPa	60	50	100	94			131



HALL-Effekt

HALL-Effekt wurde 1880 von EDWIN HERBERT HALL (1855 – 1938) an Goldblättchen entdeckt
 Die Flussdichte B wirkt auf die elektrische Ladungen q , die sich mit der Geschwindigkeit v bewegen
 Ladungen können u.a. in Elektronenstrahlen oder als Leitungselektronen in Feststoffen vorhanden sein
 Hierbei entsteht die LORENTZ-Kraft (HENDRIK ANTOON LORENTZ; 1853 – 1928): $F_L = q(v \times B)$
 Sie lenkt die Ladungsträger von ihrer Bewegungsrichtung ab.

Auf ein Material der Dicke d wirken das Magnetfeld B (H) und Strom I orthogonal ein
 Senkrecht zu beiden entsteht so die HALL-Spannung

$$U_H = R_H \cdot I = A_H \cdot \frac{B \cdot I}{d} = \frac{3 \cdot \pi}{8 \cdot n \cdot e \cdot d} \cdot B \cdot I$$

HALL-konstante A_H hängt von Ladungsträgerkonzentration n und Elektronenladung $e_0 = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ab $R_H = \pm 3 \cdot \pi / (8 \cdot e_0 \cdot n)$.
 Der Halleffekt wurde mehrfach für Magnetköpfe erprobt, Vorteil Spannung unabhängig von Geschwindigkeit und Frequenz
 Erlangte dennoch für sie keine Bedeutung.

HALL-Konstanten

in $10^{-11} \text{ m}^3/\text{C}$; * abhängig von Dotierung

Stoff	A_H
Aluminium	-3,5
Antimon	+2000
Blei	+0,9
Gold	-7,2
InAs*	+10 ⁷
Kadmium	+5,9
Kupfer	-5,2
Palladium	-8,6
Platin	-2,0
Si*	3·10 ⁸
Silber	-9,9
Wismut	+6·10 ⁴
Wolfram	-1,2
Zink	+6,5

Magnetoresistiver Effekt

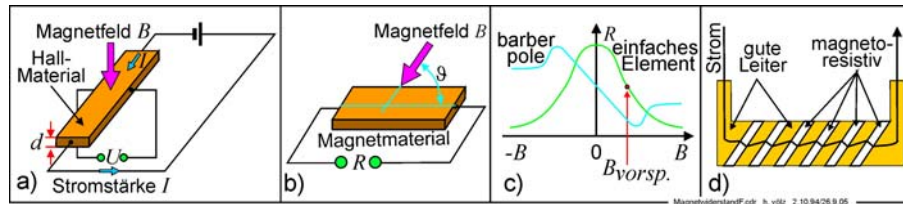
Er wurde recht spät bekannt, wurde dann für Magnetköpfe genutzt, ist inzwischen durch bessere Varianten ersetzt
 Durch ein Magnetfeld ändert ein Magnetmaterial, z.B. Permalloy seinen Widerstand, nur wenige %
 Es entsteht eine zu Null symmetrische, etwa parabelförmige Kurve
 Für annähernde Linearität muss ein Arbeitspunkt mit B_{vorsp} (Dauermagnet) gewählt werden
 Vorteilhafter erwies sich ein „barber pole“ (abgeleitet vom Kennzeichen der Friseur engl. barber)

2006 wurde **Spin-Hall-Effekt** experimentell nachgewiesen

Elektronen tunneln von ferromagnetischen Material über Isolationsschicht in 400 nm breiten Al-Streifen

Nur bei spinpolarisierten Elektronen treten etwa 10 nV auf.

Ab Frühjahr 1993 wurde von IBM der **GMR** (giant magnetic resistive effect) und dessen Weiterentwicklungen benutzt (s.u.)



Magnetooptik

Geschichte

1846 entdeckte MICHAEL FARADAY (1791 – 1867) den nach ihm benannten, relativ starken Effekt

1876 entdeckte JOHN KERR (1824 - 1907) Drehung der Polarisation bei Reflexion an Metalloberflächen (polarer Kerr-Effekt)

1895 sagte HENDRIK ANTOON LORENTZ (1853 – 1928) die magnetische Aufspaltung der Spektrallinien im Magnetfeld voraus

1896 wurde er von PIETER ZEEMAN (1865 – 1943) nachgewiesen

1907 wurde COTTON-MOUTON-Effekt von A. COTTON (1869 – 1951) und H. MOUTON an Nitrobenzol entdeckt

1908 schuf WOLDEMAR VOIGT (1850 – 1919) eine umfassende Theorie der Magnetooptik

1956 gelang WILLIAMS die erste magnetische Aufzeichnung und Wiedergabe mit MnBi

1985 ca. wurde erstmalig ein Störabstand um 50 dB für elektronische Wiedergabe erreicht

Der MACALUSO-CORBINO-Effekt tritt bei größeren Teilchenaggregaten auf

Der VOIGT-Effekt wurde von WOLDEMAR VOIGT (1850 – 1919) gefunden

Der MAJORANA-Effekt tritt nach QUIRINO MAJORANA (1871 – 1957) in kolloiden Lösungen, diamagnetische Sole auf

Fünf magnetooptischen Effekte

Beeinflussung von polarisiertem Licht durch Magnetismus

Bestimmt durch Magnetisierungsrichtung im Material + Transmission oder Reflexion

Großer Nachteil extrem geringe Kopplung (Wirkungsgrad) zwischen Licht und Magnetismus

Effekte müssen durch zusätzliche optische Hilfsschichten verstärkt werden

FARADAY-Effekt unabhängig von der Durchstrahlungsrichtung, kann durch Spiegel zurückgelenkt werden

Dann ähnlich wie KERR-Effekt erscheinen, FARADAY-Effekt hat aber Dämpfung.

Dennoch dann technisch schwer zu unterscheiden

Magnetisierung	Lichteinfall	
	transversal	longitudinal
polar		
transversal	Faraday-Effekt $\varphi = V \cdot d \cdot B = F \cdot d$ φ spezifische Faraday-Drehung φ Drehwinkel der Polarisation V Verdet'sche Konstante B magnetische Flussdichte d durchstrahlte Schichtdicke	Kerr-Effekte $\varphi \sim B + c \cdot B^2$ φ Drehwinkel der Polarisation c Wert $\ll 1$ B magnetische Flussdichte
longitudinal	Voigt- u. Cotton-Mouton-Effekt dichroitische Doppelbrechung $n \sim d \cdot B^2$ B magnetische Flussdichte d durchstrahlte Schichtdicke sehr kleiner Effekt n Brechungsindex	

Mathematische Zusammenhänge

Für ein isotropes Medium und Magnetfeld in z-Richtung beträgt die Dielektrizitätskonstante

$$\epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & 0 \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{pmatrix}.$$

ϵ_{zz} ist skalar, ϵ_{xy} hängt linear von der Feldstärke ab, beide sind klein gegenüber den Diagonalelementen

$\epsilon_{xx} - \epsilon_{zz}$ hängt quadratisch vom Magnetfeld ab und ist meist klein gegenüber ϵ_{zz}

Für zirkular polarisierte Wellen existieren die komplexen Brechungsindizes:

$$n_{\pm} = \sqrt{\epsilon_{xx} \pm i\epsilon_{xy}}$$

Für Licht senkrecht zum Magnetfeld ergeben sich zwei linear polarisierte Wellen

$$n_{\perp} = \sqrt{\epsilon_{xx} + \frac{\epsilon_{xy}^2}{\epsilon_{xx}}} \text{ bzw. } n_{\parallel} = \sqrt{\epsilon_{zz}}$$

Der Drehwinkel beim **Faraday-Effekt** hängt ab von Schichtdicke l und magnetischer Flussdichte:

$$\varphi_F = V \cdot l \cdot B$$

Darin ist V ist die materialspezifische VERDET-Konstante = zuweilen KUNDT-sche Konstante K

Sie hängt ab von der Temperatur, der Wellenlänge λ und der Dispersion des Brechungsindizes n ($dn/d\lambda$)

$$V = V_0 \cdot \lambda \cdot dn/d\lambda$$

Typische Werte der Verdet-Konstanten

Stoff	V in Bogenminuten/(T·cm)
Luft	0,063
CO ₂	0,094
NH ₄ Fe(SO ₄) ₂ ·12 H ₂ O	-5,8
CaF ₂	-120
C ₂ H ₅ OH	120
H ₂ O	131
Quarz	166
Flintglas	317
NaCl	359
CS ₂	440
Ce-Phosphat-Glas	550
TbAlSi-Glas	2000
EuF ₂	50000
EuSe	100000

Magnetische Domänen und Wände

Magnetfelder werden in der Schule durch Eisenfeilspäne dargestellt.

Doch was im Innern oder auf der Oberfläche geschieht, ist so nicht sichtbar zu machen

Hierzu müssen sehr feine Eisenteilchen in einer Lösung benutzt werden (s. magnetische Flüssigkeit)

Auch magnetooptische Methoden sind brauchbar

Beide erlauben nur einen Blick auf die unmittelbare Oberfläche

Hier werden Wände sichtbar, die einzelne Bereiche trennen, die spontan und gesättigt magnetisiert sind

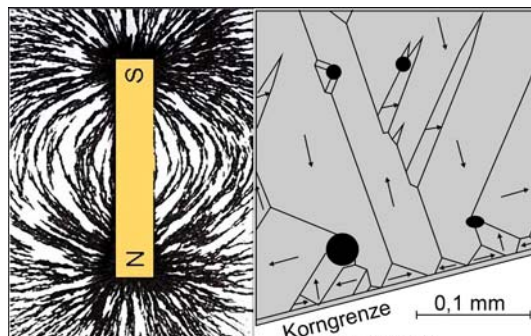
Diese Bereiche heißen auch Domänen oder WEISS-sche Bezirke

lateinisch **domus** Haus; PIERRE ERNEST WEISS (1865 – 1940)

Bereiche müssen mindestens 1000 Atome besitzen, meist sind es 10^6 bis 10^9 Atome bzw. Moleküle

Das typische Volumen liegt bei etwa 10^{-8} cm^3 .

Die **pauschale Magnetisierung** integriert über alle vorhandenen Bezirke und wird nach Außen hin wirksam.



Magnetisch $\Leftrightarrow$ magnetisiert

Es gibt nur wenig Stoffe die (stark) magnetisch sind, vor allen Fe, Ni, Co und Seltene Erden

Der Magnetismus muss dabei aber nicht pauschal erkennbar sein.

Die einzelnen magnetischen Bereiche sind oft so angeordnet, dass sich ihre Wirkung in einiger Entfernung aufhebt

Magnetisiert erscheint magnetisches Material nur dann, wenn die Bereiche sich nicht kompensieren = Dauermagnete

Magnetisches Material kann also pauschal magnetisiert oder nicht magnetisiert sein

Magnetische Wände

Die gesamte magnetische Energie eines spontan magnetisierten Materials beträgt

$$W_{\text{Feld}} = \int_V \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} \cdot dV.$$

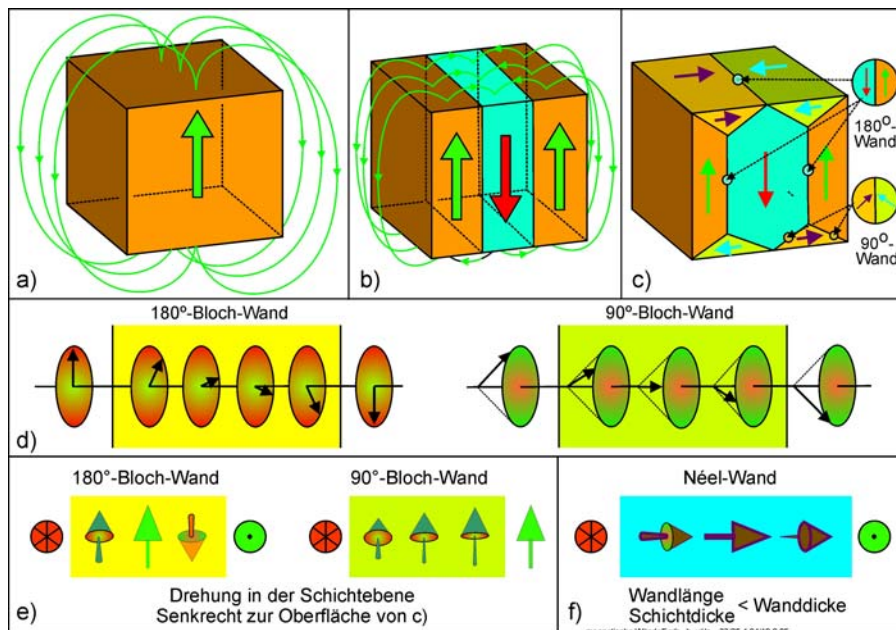
Eine beachtliche Energie kann sich dabei auch im äußeren Luftraum befinden

Um sie zu verringern, entstehen im Material spontan verschiedene orientierte Domänen, die durch Wände getrennt sind

Die Wände sind ≈ 100 nm dick, in ihnen ändert sich die Magnetisierungsrichtung sprunghaft in mehreren Schritten

Je nach Material und Kristallrichtung treten mehrere Varianten der Wände auf:

- BLOCH-Wände zwischen Bereichen, FELIX BLOCH (1905 – 1983), kubische Kristalle in 100-Richtung = leichte Achse
Zwei Wänden mit jeweils entgegengesetzter Magnetisierung (180°)
Zusätzlich um 45° geneigte Wände (90°)
Hexagonale Kristalle besitzen nur 180° -Wände
- In der 111-Richtung gibt es auch $70,5^\circ$ - und $109,5^\circ$ -Wände
- NÉEL-Wände, die nur in dünnen Schichten auftreten. LOUIS EUGÈNE FÉLIX NÉEL (1904 – 2000)



Beispiele für Bloch-Wände

Berechnungen erfolgen über das Austauschintegral s. [Völz Handbuch 3]

Für eine Wand ist umso weniger Energie aufzuwenden, je mehr Schritte vorliegen bzw. je kleiner die Winkelschritte $\Delta\phi$ sind
 δ_B Wanddicke, γ_B gesamte Energiedichte; Abmessungen in nm,

	δ_B	γ_B in mJ/m ²	Atomabstand	Atomlagen
Co	16	9,5	0,2	80
Ni	100	1	0,24	400
Fe	40	4	$\approx 0,2$	≈ 200
SmCo ₅	2	100		einzelne

An Nanodrähten aus Eisen wurden sogar Wände aus nur 2 Atomlagen nachgewiesen

Bewegung von Wänden

Durch ein äußeres Magnetfeld werden die Wände zur Energieminimierung bewegt

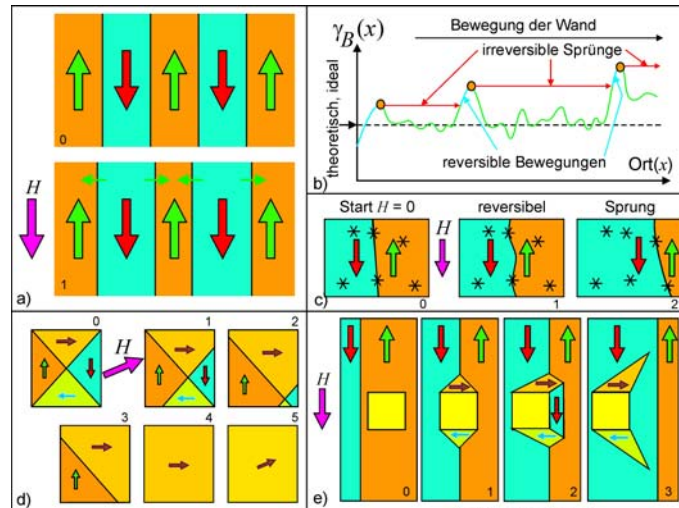
Domänen, die zur äußeren Magnetisierung passen, vergrößern sich auf Kosten der anderen

Hierbei treten komplizierte Mechanismen in Erscheinung, die durch Störstellen (Wandenergie) bedingt sind

Genauere Analysen zeigen, dass „NÉEL-Spieße“ und „Schlauchziehen“ auftreten (1944 von NÉEL zunächst nur berechnet)

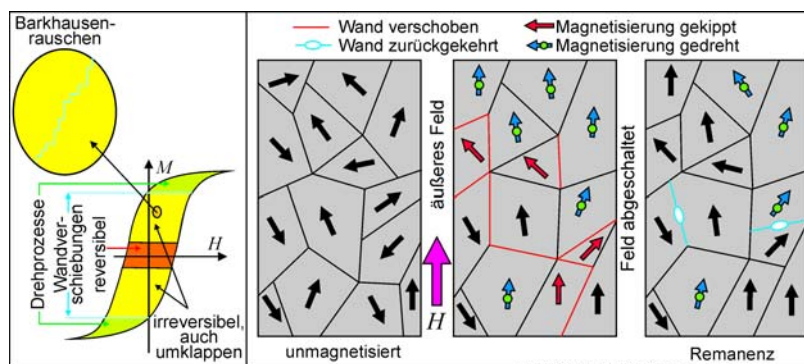
Die Néel-Spieße verschwinden erst dann, wenn ihre Länge etwa 1,3-mal so lang wie die Störstelle ist

KONDORSKI: Zusammenhang Störstellengröße $\leftrightarrow$ Koerzitivfeldstärke übereinstimmend experimentellen Daten berechnet



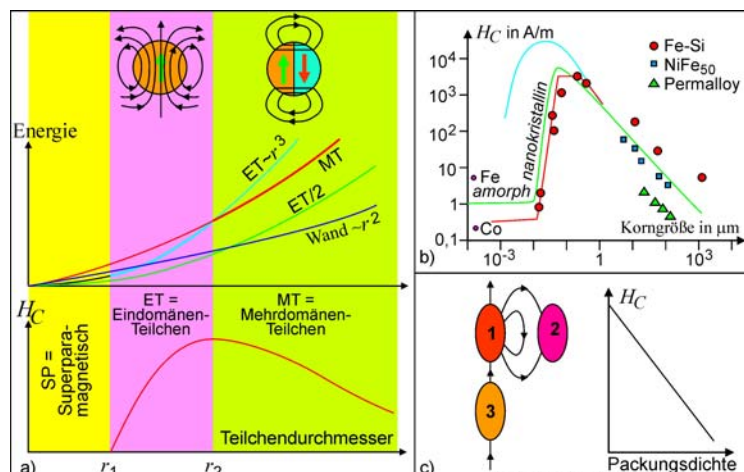
Prozesse für Änderung der Magnetisierung

- Eine Wand kann sich verlagern reversibel oder irreversibel an Störungen im Kristall
 - Die Magnetisierung einer Domäne kann umklappen irreversibel
 - Die Richtung der Magnetisierung kann sich in die Richtung des äußeren Feldes drehen reversibel
- Hiermit lässt sich die Hysteresis erklären
 Klappprozesse und irreversible Wandverschiebungen $\Rightarrow H$ - M -Kurve ein diskretes Verhalten
 Hat 1917 HEINRICH BARKHAUSEN (1881 – 1956) erstmalig akustisch nachgewiesen.



Übergang zu Einbereichsteilchen

- Es sei von einer Kugel aus magnetischem Material ausgegangen: Volumen $\sim r^3$ (1000 Atome!)
 Wenn die Abmessungen verkleinert werden können sich immer weniger Wände ausbilden
 Sobald keine Wand mehr möglich ist, liegt ein Einbereichs- = Eindomänen-Teilchen = englisch single domain vor
 Dieser Übergang wurde erst in den 1980er Jahren technologisch möglich
 Noch weitere Verkleinerung führt zu superparamagnetischen Material
 Es besitzt beachtliches μ_r aber keine Hysteresis wegen $H_c \rightarrow 0$, ist daher nicht zur Speicherung geeignet



STONER-WOHLFARTH-Modell

Bereits ab 1938 entwickelten E. C. STONER und ab 1948 P. WOHLFARTH das **Stoner-Wohlfarth-Modell**

Es wurde benutzt ein **rotationssymmetrisches Ellipsoid** angenommen

Die Magnetisierung M hat Vorzugsrichtung in der Längsachse = „leichte Achse“, energetische Minimum

Hierfür sind zwei entgegengesetzte, aber gleichwertige Richtungen von M möglich

Ein äußeres Feld H kann infolge der Rotationssymmetrie zu dieser Achse um einen Winkel Θ abweichen

Zur Energieminimierung wird sich dadurch M (eventuell) in eine Zwischenrichtung einstellen

Dabei muss die Summe von zwei Energien ein Minimum ($\partial W / \partial \Theta \rightarrow 0$) annehmen

Richtungsabhängiger Anisotropie-Energie $W_{Anisotr}$ und vom Feld eingebrachte Energie (ZEEMAN-Energie) W_{Feld} :

$$W = W_{Anisotr} + W_{Feld} = K_0 + K_U \sin^2(\alpha) - H \cdot M \cos(\Theta - \alpha).$$

K_0 und K_U sind Materialkonstanten, berücksichtigen Form (große: kleine Achse) und die Materialeigenschaften

Es sind drei Fälle zu unterscheiden

H in Richtung der Vorzugsache

Gleiche Richtung $\Theta = 0^\circ$ verstärkt das wirksame M_{total} ohne Richtungsänderung

Gegenrichtung $-H \approx \Theta = 180^\circ$ bewirkt zunächst eine Schwächung von M_{total}

Wird die **Koerzitivfeldstärke** $-H_C$ überschritten, so springt M schlagartig in die Richtung des äußeren Feldes

Folge exakt **rechteckförmige Hysterese-Kurve**

H senkrecht zur leichten Achse

Äußeres Feldes verdreht M in die Richtung zu H

Ab $H = H_C$ reicht die Energie aus, um M vollständig in diese Richtung von H zu zwingen

Es entsteht ein geradliniger Kurvenverlauf ohne Hysterese vor

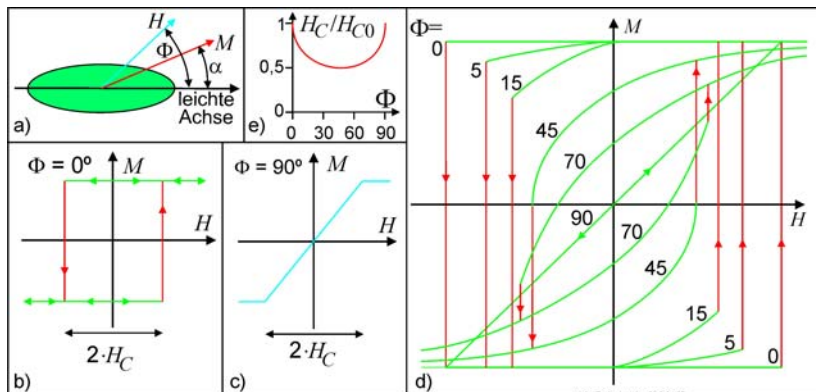
Beim Abschalten von H stellt sich M auf die nächstliegende Richtung der leichten Achse ein.

$$\Theta \neq 0^\circ, \pm 90^\circ \text{ oder } 180^\circ$$

Verhalten liegt zwischen den beiden Extremen

Es treten sowohl Umklappen der Magnetisierung als auch Drehprozesse auf,

Umklappen erfolgt bereits bei $H < H_C$ (Bild 11e)



PREISACH-Modell

1935 (vor STONER-WOHLFARTH) entwickelte F. PREISACH ein Modell, das heute seinen Namen trägt

In seinen Voraussetzungen ist eigentlich falsch, dennoch liefert es Ergebnisse, die recht gut zur Wirklichkeit passen

Das Material soll aus dicht gepackten, genau gleich ausgerichteten Einbereichsteilchen (Rechteckkurven) bestehen

Sie sind statistisch verteilt, besitzen teilweise unterschiedliche Achsenverhältnisse → verschiedene Koerzitivfeldstärken H_C

Das äußere Magnetfeld H soll nur in Richtung der leichten Achse wirken, gleich oder entgegengesetzt

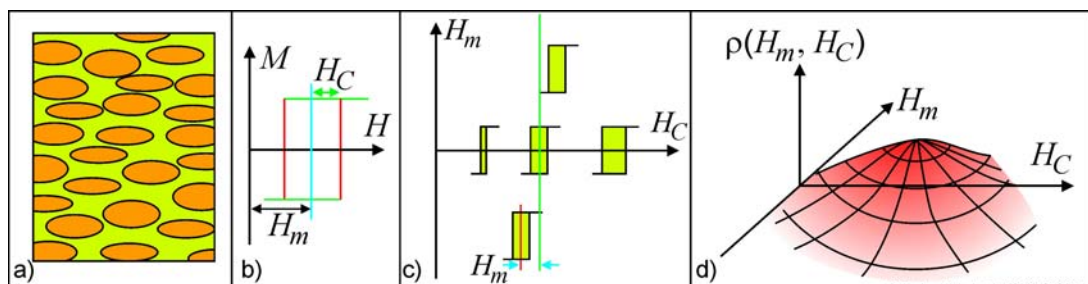
Die magnetischen Momente der Teilchen beeinflussen sich → individuelle (unveränderliche) Vorspann-Feldstärke H_m

Jedes Teilchen ist vollständig beschrieben durch Rechteckschleife mit den beiden Parametern H_C und + oder $-H_m$

Für beide wird ein Koordinatensystem aufgespannt, das nur in der die rechte Halbebene mit $H_C \geq 0$ existiert

Die Materialeigenschaften ergeben dann eine Belegungsdichte $\rho(H_C, H_m)$, die experimentell bestimmbar ist

Dargestellt als Höhenlinien in der Preisach-Ebene



PREISACH-Modell $\Rightarrow$ Hysterese-Schleife

Die aktuelle Magnetisierung (Vorgeschichte) wird durch eine Magnetisierungs-Funktion $m(H_c, H_m)$ ausgedrückt (± 1)
 Zunächst sei konstante Belegungsfunktion für $0 \leq H \leq H_{C, \text{Max}}$ und $|H_m| < H_{m, \text{Max}}$ angenommen
 Außerhalb des Rechtecks sollen keine Teilchen existieren

Zunächst seien alle Teilchen negativ magnetisiert = überall $m(H_c, H_m) = -1$ = höchstmögliche negative Magnetisierung

Es wird ein äußeres Feld H so angelegt, dass es die Teilchen nach $+1$ zu magnetisieren versucht

Alle Teilchen mit $H \geq H_m + H_c$ ändern Magnetisierung nach $+1 \Rightarrow$ unter $+45^\circ$ geneigte Magnetisierungsfront

Je größer H wird, desto weiter schreitet die Front fort

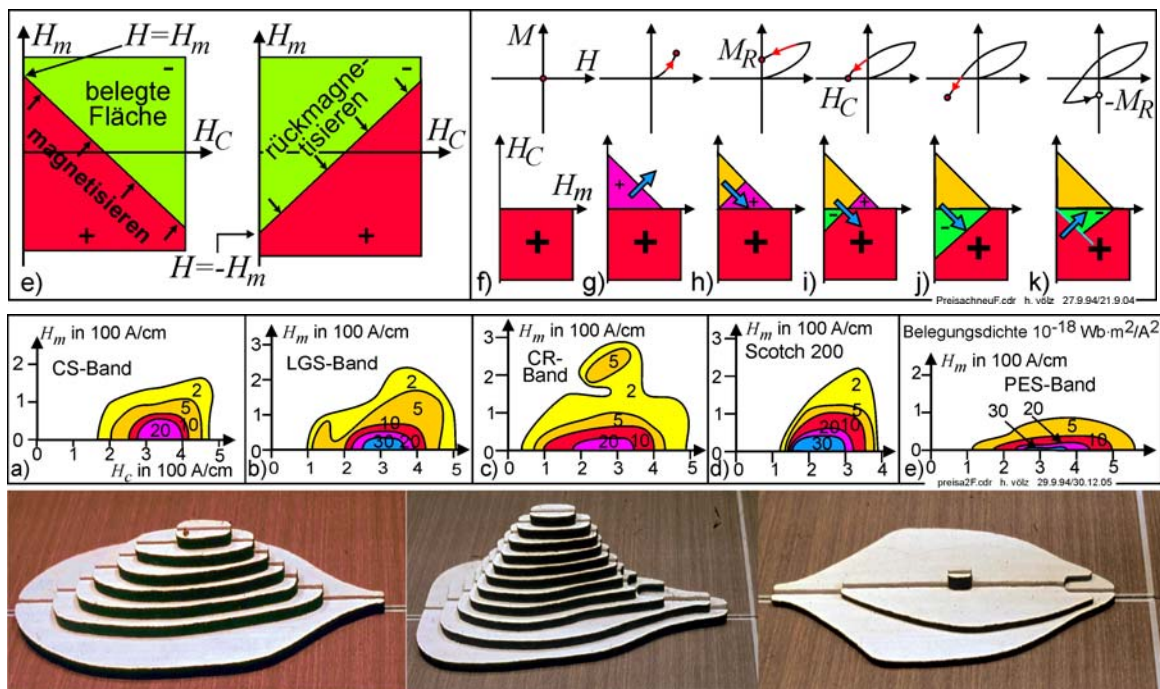
Für $H > H_{m, \text{Max}} + H_{C, \text{Max}}$ ist die gesamte Belegungsfläche ummagnetisiert, Material ist $+$ gesättigt $\rightarrow m(H_c, H_m) = +1$

Material nun entgegengesetzt ($-H$) magnetisiert, Teilchen mit $H \leq H_m - H_c$ klappen zurück

Front der Rückmagnetisierung ist um -45° geneigt ... usw.

Im H - M -Diagramm entsteht schließlich die Grenzhysterese

Auch Unterschleifen lassen sich so erklären



Preisach, F.: „Über die Magnetische Nachwirkung“. Z. f. Physik **94** (1935), S. 277 – 302.

Anisotropie beim Einkristall

Vielzahl der Kristallstrukturen, u. a. kubisch und hexagonal

Kubischer Kristall u.a. raumzentriert (z. B. Fe) oder flächenzentriert (z.B. Ni)

Dan Eigenschaften längs der Würfelkanten $[100]$, $[010]$ und $[001]$ gleichwertig

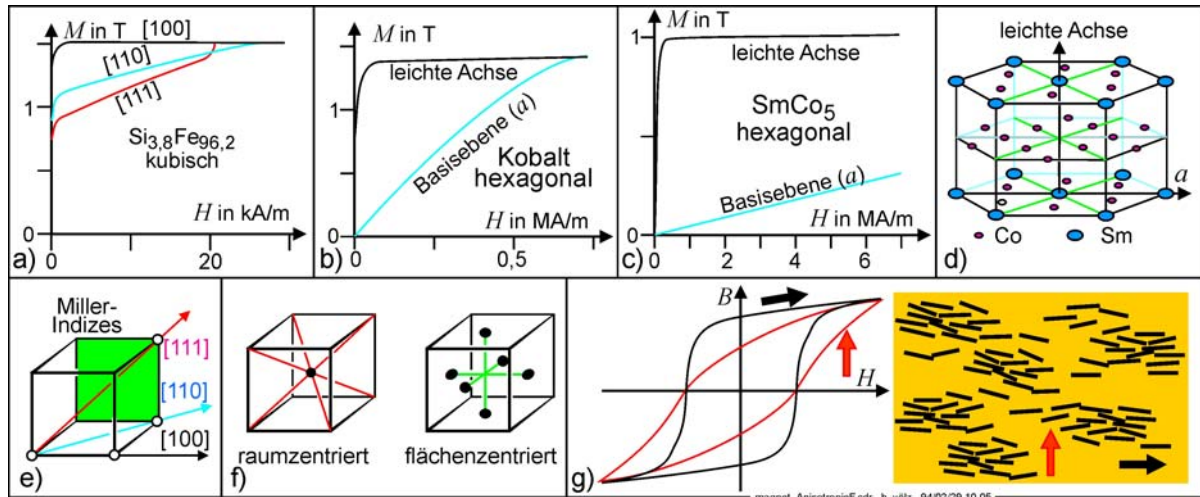
Dazu anisotrop bezüglich der Flächendiagonalen $[110]$, $[011]$ und $[101]$ sowie Raumdiagonale $[111]$

Bei einer Anisotropie weist die Flussdichte B in eine (etwas) andere Richtung als das äußere Feld H

Nur im isotropen Fall gemeinsame Richtung $\rightarrow B = \mu \cdot H$, μ = skalarer (Zahlen-) Wert

Anisotropes Material μ ein Tensor, in der Komponentenschreibweise gilt

$$\begin{aligned} B_x &= \mu_{11} H_x + \mu_{12} H_y + \mu_{13} H_z, \\ B_y &= \mu_{21} H_x + \mu_{22} H_y + \mu_{23} H_z, \\ B_z &= \mu_{31} H_x + \mu_{32} H_y + \mu_{33} H_z. \end{aligned}$$



Anisotropie-Varianten

Magnetisches Material besteht zum großen Teil aus kleinen Kristallen, den Kristalliten. Die Anordnung der Atome und Moleküle auf Gitterplätzen bewirkt eine Anisotropie. Gemittelt über viele kleine Kristallite kann sie statistisch verschwinden, unterscheiden:

- *Kristall-Anisotropie* bei allen nicht kubisch-gleichen Kristall-Gittern
- *Form-Anisotropie* bei einzelnen Teilchen
- *Lokale Anisotropie* bestimmt die Ausrichtung der einzelnen Weißschen Bezirke: Kristallbaufehler und Verunreinigungen
- *Globale Anisotropie* entsteht u.a. durch mechanische Spannungen, wie Druck oder Zug

Letztere wird auch technologisch absichtlich erzeugt, u.a. entstehen dabei Texturen.

Verfahren u.a. Ausscheidungs- und Umwandlungsprozesse, Walzen, Wärmebehandlung und Magnetfelder.

Globale Anisotropien auch bei zufällig verteilten Bereichen oder Kristalliten, Beispiel Magnetband.

Für hartmagnetisches Material (Dauermagnete) ist stark ausgeprägte Anisotropie notwendig.

Für Spulen, Transformatoren, Magnetköpfe, Abschirmungen usw. soll dagegen die Anisotropie möglichst gering sein.

Quantentheoretische Grundlagen

Etwas Geschichte

Magnetismus ist nur mit der Quantentheorie korrekt zu verstehen.

440 v. Chr. erklärte DEMOKRIT von Abdera (= Demokritos; 460 – 375 v. Chr.) das Atom als Grundbaustein der Welt.

Atom griechisch *átomos* ungeschnitten, unteilbar, von *a-* nicht und *témnein* schneiden.

1803 führt sie JOHN DALTON (1766 – 1844) wegen Stöchiometrie (griechisch *stoicheia* Grundstoff und *metrein* messen) ein.
 ⇒ Chemische Verbindungen setzen sich ganzzahlig aus ihren Bestandteilen, den Atomen zusammen.

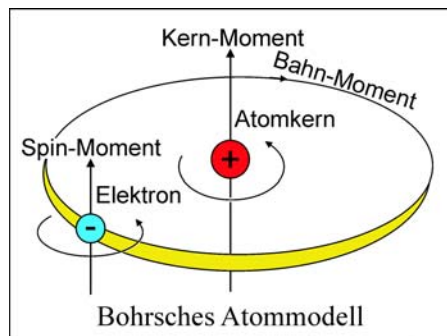
In der Physik erst viel später akzeptiert, waren nicht experimentell erfassbar.

1890 wird das Elektron nachgewiesen, Proton 1914 als Wasserstoffkern, 1932 das Neutron.

1911 stellte ERNEST RUTHERFORD (1871 – 1937) ein Atom-Modell auf ≈ Planetensystem.

1913 schuf NILS BOHR (1885 – 1962) aus Spektrallinien des Wasserstoffs das heute noch oft benutzte Atom-Modell.

Bahnen: Zentrifugalkraft der rotierenden Elektronen = Anziehungskraft positiver Kern-, negative Elektronen.



1924 Begründung diskreter Bahnen durch Dissertation LOUIS-VICTOR PIERRE RAYMOND DE BROGLIE (1892 – 1987).

Welle-Teilchen-Dualismus ⇒ stehende Wellen: Masse m , Geschwindigkeit v und PLANCK-sche Konstante h . Wellenlänge

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

Muss ganzzahligem Vielfachen $k \cdot \lambda$ entsprechen. Mit der Elektronenmasse $m_e \rightarrow$ Radius der Bahn (k erste Quantenzahl)

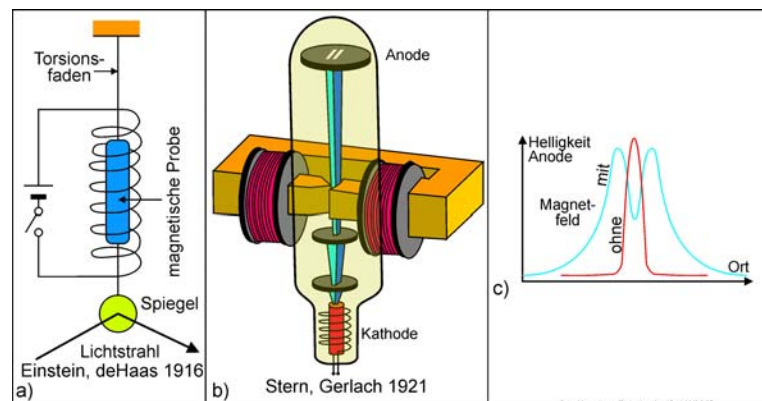
$$2 \cdot \pi \cdot r = k \cdot \lambda = k \cdot \frac{h}{m_e \cdot v}$$

NILS BOHR führt wegen umlaufendes Elektron (Ladung e_0) das **Bohrsche Magnetron** als magnetisches Moment ein (Achtung! Trotz Bezeichnung μ besteht kein Zusammenhang zu magnetischen Permeabilitäten, z.B. μ_0)

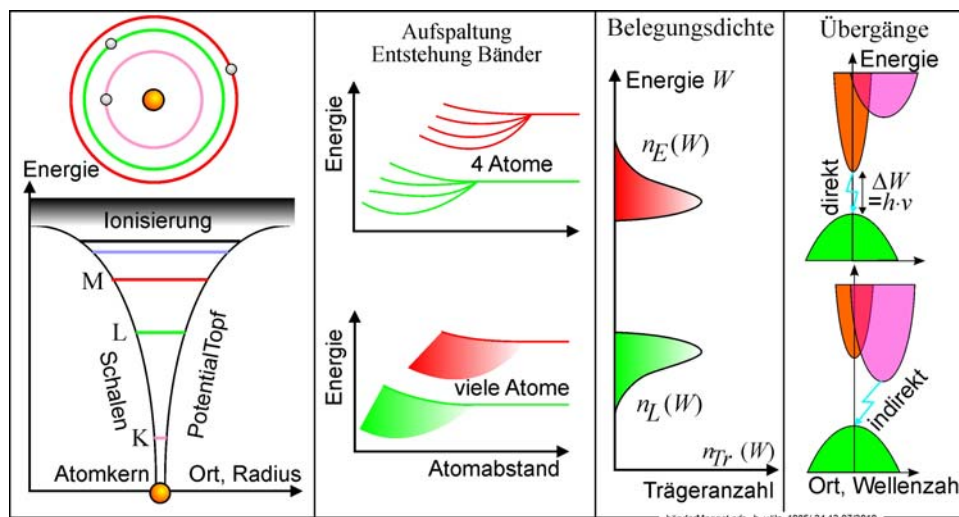
$$\mu_B = \frac{e_0 \cdot h}{4 \cdot \pi \cdot m_e} \approx 9,2704078 \cdot 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot$$

1915 Versuche Kreisströme nachzuweisen durch ALBERT EINSTEIN (1879 – 1955), WANDER JOHANNES DE HAAS (1878 – 1960)
= gyromagnetischer, EINSTEIN-DE-HAAS- oder RICHARDSON-EINSTEIN-DE-HAAS-Effekt

1921 durch den **Stern-Gerlach-Versuch** gefunden (OTTO STERN; 1888 – 1969; WALTHER GERLACH; 1889 – 1979)
= Spinquenzahl s. u.



Bänder-Modell



Zwei Quantenzahlen

1926 führt ARNOLD SOMMERFELD (1868 – 1951) führte zu den Bahnen zweite Quantenzahl ein

Hauptquantenzahl $\approx$ Schale n = großen Ellipsen-Achse, wächst bzgl. Energie mit n^2

Nebenquantenzahl = Drehimpulsquantenzahl l entspricht der kleinen Ellipsen-Achse

Schalen = K, L, ... gemäß der Hauptquantenzahl n besitzen maximal $2 \cdot n^2$ Elektronen = Folge der Nebenquantenzahl l .

n	Schale	maximale Anzahl der Elektronen	Zustände
1	K	$2 = 2 \times 1s$	1s2
2	L	$8 = 2 \times 2s + 6 \times 2p$	2s2, 2p6
3	M	$18 = 2 \times 3s + 6 \times 3p + 10 \times 3d$	3s2, 3p6, 3d10
4	N	$32 = \dots + 14 \times 4f$	4s2, 4p6, 4d10, 4f14
5	O	$50 = \dots + 18 \times 5g$	... 5g18
6	P	$72 = \dots + 22 \times 6h$	... 6h22

Spin

1925 GEORGE EUGENE UHLENBECK (1900 – 1988), SAMUEL ABRAHAM GOUDSMIT (1902 – 1978) Eigenrotation der Elektronen = **Spin** (englisch **to spin** spinnen; (sich) drehen)

Zunächst nur Theorie (Dissertation) PAUL EHRENFEST (1880 – 1933), HENDRIK ANTOON LORENTZ, (1853 – 1928):

»Ich habe Ihre Abhandlung bereits vor längerer Zeit abgeschickt. Sie sind beide noch jung genug, um sich ein paar Dummheiten erlauben zu können! «

Liefert die Erklärung für die 1896 von PIETER ZEEMAN (1865–1943) entdeckte Aufspaltung Spektrallinien durch Magnetfeld

Achtung! Meisten **Materialien unmagnetisch**, Einzel-Spins kompensieren sich, Ausnahme Fe, Ni, Co (Mn)

Bosonen haben **keinem oder ganzzahligem** Spin, benannt nach SATYENDRA NATH BOSE (1894 – 1974)

Fermionen haben **halbzahligem** Spin (Elektron, Proton und Neutron), benannt nach ENRICO FERMI (1901 – 1954)

1988 erste Anwendung des Elektronen-Spins beim **GMR-Elementen** (giant magnetic resistive)

Quantentheorie

Mai 1925 beurlaubt MAX BORN (1882 - 1970) WERNER KARL HEISENBERG (1901 – 1976) wegen Heuschnupfen, Helgoland Matrizen-Mechanik = Quantentheorie, Spektrallinien berechnet. 1927 WERNER KARL HEISENBERG Unschärferelation

1926 ERWIN SCHRÖDINGER (1887 – 1961) kontinuierliche Schrödinger-(Wellen-)Gleichung

$$\nabla \psi = (W - U) \cdot \psi \cdot \frac{2 \cdot m}{h^2}.$$

W = Gesamtenergie, U = potentielle Energie, ψ = Wellenfunktion, $\nabla = \delta_2(\cdot)/\delta t^2$ Operator zweifacher partieller Ableitung

1927 MAX BORN definiert $|\psi|^2$ als Wahrscheinlichkeit für den Aufenthalt von Teilchen im Volumen V

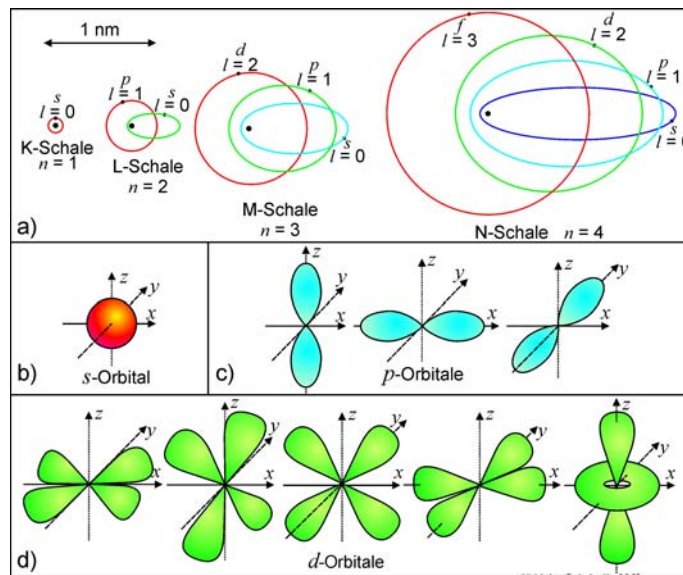
$$dW = |\psi|^2 \cdot dV.$$

Es folgt Einführung der **Orbitale** (lateinisch **orbis** Umlauf)

Elektronen befinden sich nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit an den verschiedenen Orten

Historische Kennzeichnung der Spektrallinien + Orbitale

<i>l</i>	Herleitung	Aussehen der Orbitale
0	s: sharp	radialsymmetrisch
1	p: principal	hantelförmig in den drei Raum-Achsen
2	d: diffuse	gekreuzte Doppelhantel
3	f: fundamental	rosettenförmig



Quantenzahlen und Orbitale

Aussehen der Orbitale nicht von der Schale (Hauptquantenzahl n) abhängig → Größe proportional n^2

1. Vereinfacht bestimmt **Hauptquantenzahl** n (die Schale) Größe der Elektronenbahn $\approx$ Orbital $\approx$ größten Energieanteil

2. **Nebenquantenzahl** l bestimmt Achsverhältnis der Ellipse $\approx$ Gestalt des Orbitals $\approx$ zusätzlich kleinen Energieanteil
 3. **Magnetische Quantenzahl** zusätzliche Ausrichtung der Achsen bzw. Orbitale im Raum
 $\approx$ klassisches BOHR'sches Magneton $\approx$ umlaufende Elektron = Ringstrom $\rightarrow$ Magnetfeld $\approx$ Feinstruktur der Spektrallinien
 Quantentheorie ermöglicht $2 \cdot l + 1$ Orientierungen = $-l, -l+1, \dots, -1, 0, +1, \dots, l-1$ und l
 4. **Spinquantenzahl** s bzw. $S \rightarrow$ STERN-GERLACH-Versuch = zwei Orientierungen = $s = +1/2$ bzw. $s = -1/2 \rightarrow \text{spin}\uparrow, \text{spin}\downarrow$

In jedem Atom können nur Elektronen existieren, die sich zumindest in einer Quantenzahl unterscheiden
 Gilt als PAULI-Regel generell für alle Quantenzustände

So werden die einzelnen Schalen mit Elektronen belegt (WOLFGANG ERNST PAULI, 1900 – 1958)

Besonders gut darstellbar mit der Kästchen-Belegung = HUND-sche Regel (FRIEDRICH HUND; 1896 – 1997)

Stark vereinfachte Veranschaulichung der Orbitale

Windmühle bei schneller Drehung können wir nicht mehr die Flügel erkennen

Subjektiv wird unterschiedlich dicht belegte Scheibe wahrgenommen

Formal Vergleich Grenze unserer zeitlichen Auflösung mit der **Unschärfe-Relation**

Helligkeitswerte der Scheibe $\Leftrightarrow$ **Breite der Flügel** in Abständen zum Drehpunkt

Gilt unmittelbar für kugelsymmetrische Orbitale

Andere Orbitale verlangen eine **Geschwindigkeit, die vom Drehwinkel** abhängt $\approx$ Ellipsenbahn

$\rightarrow$ Elektron in Kernnähe bewegt sich viel schneller als in großer Entfernung

Mehrfache Ausbeulungen erfordern mehrere unterschiedliche Flügel

Vgl. **Korrespondenz-Prinzip** von BOHR klassisch $\Leftrightarrow$ quantentheoretisch

Lage der Energieterme

Quantenzustände der Atome folgen nur grob in der **Reihenfolge** der Hauptquantenzahlen = Schalen ($n = 1, 2, 3 \dots K, L, M \dots$)

Abweichungen entstehen jedoch infolge der Energieunterschiede durch die **Nebenquantenzahlen**

Erstmalig überlappen sich so die Schalen **M und N**: $4s < 3d$, So schirmt Schale N teilweise Schale M ab

Hierdurch ist die Schale M bei einigen Atomen nicht voll mit Elektronen belegt, so können sich **Spins addieren**

Chemisch wirksam sind immer nur die Elektronen der **äußersten Schale** = **Valenz-Elektronen**

Erstbelegung einer Schale erfolgt bei Alkalimetallen ${}^3\text{Li}$, ${}^{11}\text{Na}$, ${}^{19}\text{K}$, ${}^{37}\text{Rb}$, ${}^{55}\text{Cs}$ und ${}^{87}\text{Fr}$ = einwertige Elemente, Ia-Gruppe

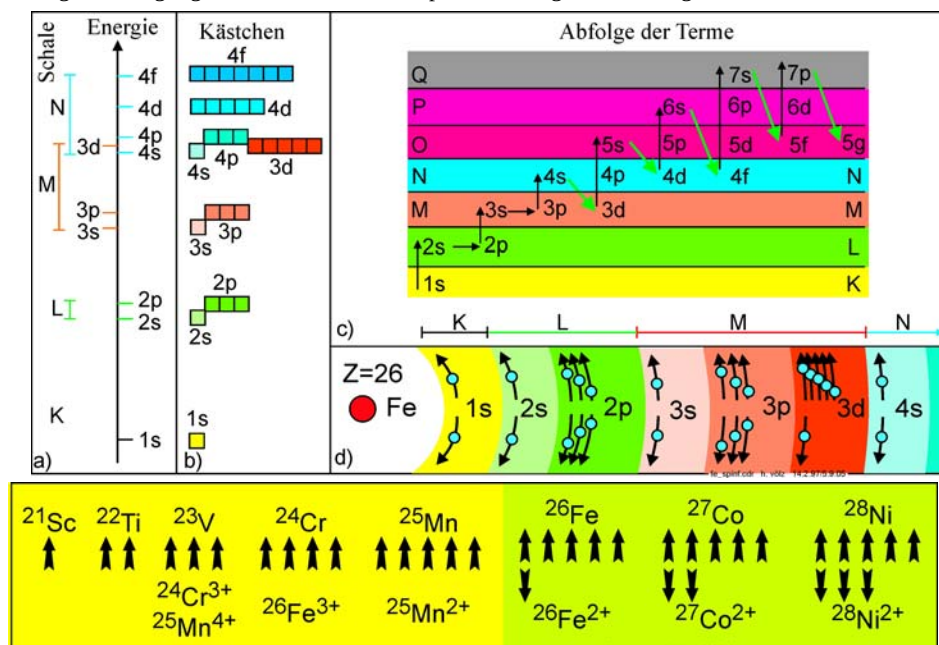
„Falsche“ Reihenfolgen: $3p-4s-3d$; $4p-5s-4s$; „Rücksprünge“ um 2 Schalen: $6s-4f-5p-6p$ und $7s-5f-6d-7p$.

Bei einigen höheren Schalen werden für nächstfolgendes Element sogar schon belegte Schalen vorübergehend wieder geleert

Extrem bei ${}^{14}\text{Pd}$ (Palladium) = einzige Element nach ${}^{37}\text{Rb}$, bei dem $n = 5$ nicht belegt ist

Hieraus ergeben sich die **ferromagnetischen Metalle** Fe, Co und Ni und später die **Seltenerd-Atome**

Die „unregelmäßigen“ Belegungen führen u.a. auch zu speziellen magnetischen Eigenschaften der Seltenen Erden



Wichtige Elemente mit nicht abgeschlossenen Schalen.

Gruppe	Elektronen	ausgewählte Elemente
Eisengruppe	3d	${}^{24}\text{Cr}$, ${}^{25}\text{Mn}$, ${}^{26}\text{Fe}$, ${}^{27}\text{Co}$, ${}^{28}\text{Ni}$, ${}^{29}\text{Cu}$
Seltene Erden	4f, 3d	${}^{58}\text{Ce}$ bis ${}^{70}\text{Yb}$
Wertmetalle	4d	${}^{40}\text{Zr}$ bis ${}^{52}\text{Te}$
Aktiniden	5f	${}^{92}\text{U}$ bis ${}^{96}\text{Cm}$

Diamagnetismus

Griechisch **diá** durch; ohne äußeres Magnetfeld kein eigenes, nach Außen wirksames magnetisches Moment, keine Hysterese
Absolutwert ihrer Suszeptibilität $|\chi|$ liegt im Bereich von 10^{-3} bis 10^{-6} .

1827 wies erstmalig ANTOINE CÉSAR BECQUEREL (1788 – 1878) auf Möglichkeit des **Diamagnetismus** hin

1846 Nachweis für Antimon und Wismut durch MICHAEL FARADAY (1791 – 1867)

Bei ihm kompensieren sich in jedem Atom die einzelnen Spin-Komponenten → nach Außen keine Magnetisierung

Auf den Bahnen umlaufenden Elektronen → mechanischen Analogie als Kreisel

Durch äußere Kraft präzessiert der Kreisel, analog Elektronenbahnen durch äußeres magnetisches Feld

Präzession lateinisch **praecedere** vorangehen

Bei Feldstärke H beträgt die zugehörige Larmor-Umlauf-Frequenz (nach Sir JOSEPH LARMOR; 1857 – 1942):

$$\omega_L = \frac{e_0}{2 \cdot m \cdot c} \cdot H$$

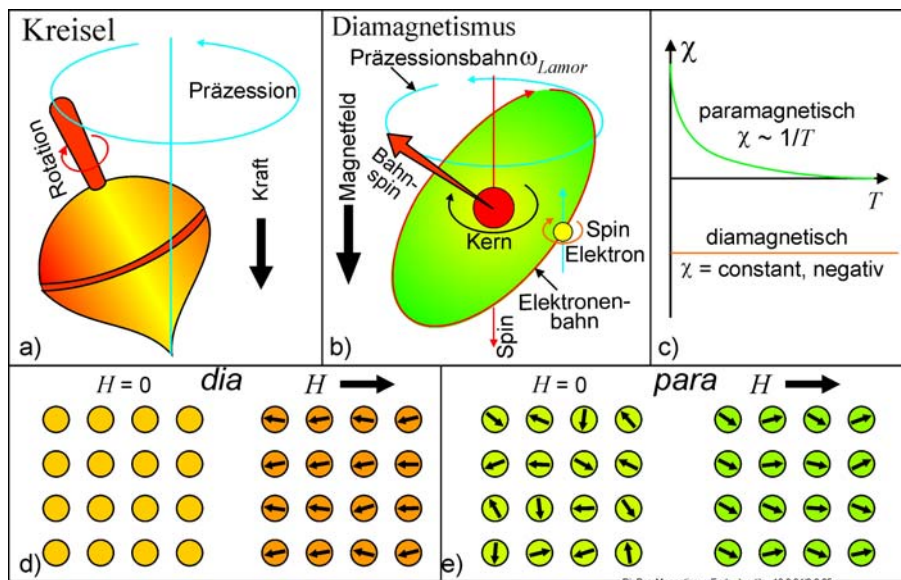
e_0 = Elementarladung, m = Elektronenmasse, c = Lichtgeschwindigkeit

Folge verändertes Bahnmoment mit zusätzlichem magnetischem Moment, ist äußerem Feld H entgegengerichtet

Entspricht LENZ-scher Regel (HEINRICH FRIEDRICH EMIL LENZ; 1804 – 1865)

Eine elektrische Reaktion immer so gerichtet, dass sie der Ursache entgegenwirkt ⇒ negative Suszeptibilität $\chi < 0$

Alle Einflüsse sind temperaturunabhängig → auch Suszeptibilität



Paramagnetismus

Griechisch **pará** neben; entlang; vorbei; über hinaus; (ent-) gegen

Die Spin- und Bahnmomente der einzelnen Atome, Ionen, Moleküle usw. sind nicht voll kompensiert

Daher jedes Atom, Molekül besitzt ein eigenes magnetisches Moment

Thermischen Energie verteilt im Gesamtmaterial Momente räumlich statistisch → kein äußeres Moment

Wechselwirkung zwischen den Teilchen kann meist vernachlässigt werden, besonders gut bei Gasen erfüllt

Äußeres Feld H wirkt gemäß seiner Stärke der statistischen Verteilung entgegen → gewisse Ausrichtung der Momente

1905 hat so PAUL LANGEVIN (1872 - 1946) (Schüler von CURIE) Berechnungen für experimentelle Daten angestellt

μ = magnetische Moment der individuellen Moleküle oder Atome, N ihre Anzahl, Magnetisierung maximal möglich $M_0 = N \cdot \mu$

Teilchen-Feld-Wechselwirkung $\mu \cdot H$ muss auf die thermische Energie $k \cdot T$ bezogen werden

k Boltzmann-Konstante, T absolute Temperatur → Richtgröße

$$a = \frac{\mu \cdot H}{k \cdot T}$$

Nach einer längeren Rechnung folgt LANGEVIN-Formel für auftretende relative Magnetisierung

$$\frac{M}{M_0} = \coth a - \frac{1}{a}$$

Für nicht zu große Feldstärken H und bei Zimmertemperatur genügt tangentielle Näherung → CURIE-schen Gesetz

$$\chi_{\text{par}} = \frac{C_m}{T}$$

C_m die Curie-Konstante, Materialkonstanten

Meist ist die paramagnetische Suszeptibilität etwa 500-Mal so groß wie die diamagnetische.

1927 zeigte WOLFGANG ERNST PAULI (1900 – 1958), Elektronengas im Leitungsband trägt zum Paramagnetismus bei

Wechselwirkung für magnetische Momente

Ferromagnetisch, antiferromagnetisch und ferrimagnetisch sind zu unterscheiden

Lateinisch **ferrum** Eisen wahrscheinlich aus vorderasiatischer Sprache und Hebräisch und Phönizisch ins Lateinische

Gemeinsam, aber in der Ausprägung kollektiver = starker Magnetismus, aber unterschiedlich, wichtig drei Erscheinungen:

- Es gibt **Austauschwechselwirkung** zwischen magnetische Momente der Atome, Ionen, Moleküle usw.
- Durch **Spin** ↑ und ↓ der Elektronen sind **Bänder** (u.a. Leitungs- und Valenzband) im Gegensatz zur Halbleitertechnik zweigeteilt und magnetisch unterschiedlich beeinflussbar
- **Geometrischen Formen** von Magnetteilchen, Kristallite bestimmen auch magnetische **Anisotropien**

Ferromagnetismus → CURIE-Temperatur

1907 älteste theoretische Modell von PIERRE ERNEST WEIß (1865 – 1940), benutzt damals schon bekannten **Domänen**

In ihnen weisen die magnetischen Momente aller Teilchen in eine Richtung

→ auch bei $H = 0$ spontane (Sättigungs-)Magnetisierung M_0 , heute durch Austauschwechselwirkung erklärt

Bewirkt zum Paramagnetismus ein zusätzliches, inneres Magnetfeld, WEIß-sche Konstanten λ = hypothetisch

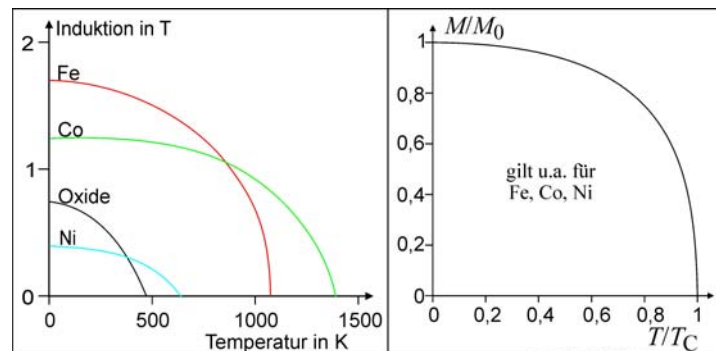
$$H_r = H + \lambda \cdot M$$

Aus der Theorie folgt CURIE-Temperatur T_C , bei der die kollektive Ausrichtung aufgehoben wird, nur noch Paramagnetismus
Verlauf der Magnetisierung benötigt BRILLOUIN-Funktion B_J und gequantelten Drehimpuls J

$$\frac{M}{M_0} = B_J \left(\frac{3 \cdot J}{J+1} \frac{M}{M_0} \frac{T_C}{T} \right) \text{ für } T < T_C \text{ mit der Näherung } \frac{M - M(T)}{M_0} \sim T^{3/2}.$$

In der Praxis genügt das CURIE-WEIß-sche Gesetz mit den experimentellen Konstanten C_m und T_C

$$\chi = \frac{T_C}{\lambda \cdot (T - T_C)} = \frac{C_m}{T - T_C} \text{ mit } T > T_C.$$



ISING-Modell

Wurde 1920 von W. LENZ entwickelt und 1925 von seinem Schüler ERNST ISING (1900 - 1998) fertig gestellt

Magnetische Momente eines jeden Atoms stellen sich parallel oder antiparallel zum äußeren Feld B

Außerdem wechselwirken sie nur mit den unmittelbar nächsten Nachbarn $\Leftrightarrow$ thermische Energie wirkt dagegen

1936 gelang es Sir RUDOLPH ERNST PEIERLS (1907 – 1995) erstmals exakt für einige zweidimensionale Anordnungen

1944 verallgemeinerte es LARS ONSAGER (1903 – 1976), Doch stets waren zusätzliche experimentelle Daten notwendig

Daher hat es heute für den Magnetismus kaum noch Bedeutung. Doch auf anderen Gebieten als statistische Modell erfolgreich

Austauschwechselwirkung $\Rightarrow$ BETHE-SLATER-Kurve

1928 erklären WERNER KARL HEISENBERG (1901 – 1976), PAUL ADRIEN MAURICE DIRAC (1902 – 1984) Weißsche

Molekularfeld durch Einführung einer **Austauschwechselwirkung**

1932 stellt JOHN HASBROUK VAN VLECK (1899 – 1980) Lehrbuch Magnetismus die vollständige, noch heute weitgehend gültige Fassung vor

Zwischen benachbarten Atomen können mit einer Wahrscheinlichkeit **Elektronen ausgetauscht** werden

Die Austauschenergie erhöht die Gesamt-Energie des Festkörpers, Anteil für zwei benachbarte Atome mit Spins S_i, S_j beträgt

$$W_{ji} = -2 \cdot A(S_i, S_j).$$

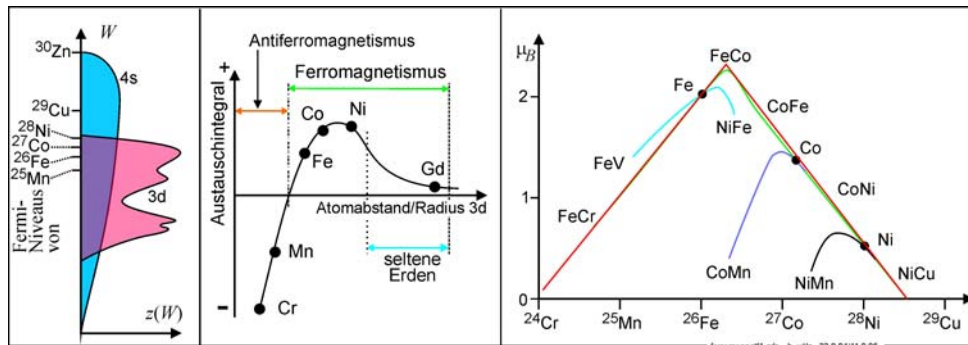
Das Austauschintegral A konnte bisher nicht berechnet werden, stammt von experimentellen Daten

Wesentlich sind nicht abgeschlossene Elektronenschalen (s.o.), insbesondere 3d-Elektronen

Zunächst wird dabei immer eine Spinrichtung aufgefüllt, Gesamtenergie dann am geringsten

HANS ALBRECHT BETHE (1906 – 2005), JOHN CLARKE SLATER (1900 – 1976) zeigten, dass das Verhältnis a/r_n entscheidend ist

a = Abstand benachbarter Atome, r_n = Radius der nicht abgeschlossenen Schale $\rightarrow$ BETHE-SLATER-Kurve



Daten zur BETHE-SLATER-Kurve

a und r_n sind in 10^{-10} m, Spalte x : **f** = ferromagnetisch und **p** = paramagnetisch.

Element	a	r_n	a/r_n	x
Mangan	2,52	1,71	1,47	p
Eisen	2,50	1,53	1,63	f
Kobalt	2,51	1,38	1,82	f
Nickel	2,50	1,27	1,97	f
Platin	2,77	2,25	1,23	p
Gadolinium	3,35	1,08	3,10	f

Anschauung

Geringe Atomabstände energetisch günstiger, wenn Elektronen hoch wahrscheinlich zwischen den Atomrümpfen
→ geringere abstoßende Kraft; PAULI-Prinzip: eng benachbarten Elektronen müssen entgegengesetzten Spin aufweisen
Große Atomabstände abschirmende Wirkung der Elektronen weniger wichtig; Elektronen stoßen sich gegenseitig ab
→ erhöht ihren Abstand und Spins können teilweise in die gleiche Richtung weisen
SLATER-Koeffizienten a/r_n → Austauschintegral zunächst negativ, ab 1,5 wird es positiv, Maximum bei 3

Bändermodell Verlauf für die 3d- bzw. 4s-Elektronen (Bild oben), FERMI-Niveau wichtig
Auffüllung mit 3d-Elektronen von Ni bis Fe die bestmöglichen spontan-magnetischen Werte
Auch für die seltenen Erdmetalle, wie z.B. Gd, tritt so erneut der Ferromagnetismus auf
Auch viele Legierungen bestätigen dies; theoretisch folgt ein Dreieck

Probleme

Magnetische Momente müssten eigentlich ganzzahlige μ_B sein, real Fe, Co und Ni etwa 2.21, 1.60 und 0.62
→ ungepaarten Spins nicht genau lokalisiert → Elektronengas-Theorie DRUDE-LORENTZ viele frei bewegliche Elektronen
1938 E. C. STONER gemittelt Spinfeld annimmt, das mit jeweils einem Spin wechselwirkt
Ferromagnetika meist bei etwa 1 T gesättigt, dazu gehört inneres Feld mit $M_S \approx 10^6$ A/m
Eisen etwa $n \approx 10^{29}$ Atome/m³ vorhanden → jedes Atom $M_S/n \approx 10^{-23}$ A/m² $\approx$ Umlauffrequenz 10^{14} Hz, $r \approx 10^{-10}$ m
⇒ Ferromagnetismus ein Elektron je Atom wirksam
Quantentheorie fordert aber für Ferromagnetismus mindestens tausend Atome notwendig
Meist sogar 10^6 bis 10^9 Atome in einem magnetischen Bezirk

fünf typische ferromagnetische Stoffgruppen

- Die drei **ferromagnetischen Elemente** Fe, Ni und Co
- **chemische Verbindungen**, welche die drei Elemente enthalten
- **Heuslerschen Verbindungen** = einige Mn-Verbindungen z.B. mit Cu oder Al.
- **Intermetallische Verbindungen** ohne ferromagnetische Elemente, wie Au_4V , $ZrZn_2$, CrO_2 .
- Bei **tiefen Temperaturen** zusätzlich die Elemente Gd, Dy und Er

Es gibt Verbindungen, bei denen T_C unterhalb der Zimmertemperatur liegt

Sie sind daher unter normalen Bedingungen nicht magnetisierbar, u.a. rostfreie Fe-Legierungen, z.B. V2A-Stahl

Geschichte Antiferro- und Ferrimagnetismus

Gemeinsam mit Ferro- und Abgrenzung gegenüber Para- und Diamagnetismus kollektiv geordnete magnetische Momente
Gegensatz zu Ferromagnetismus: kollektive magnetische Vektoren (Spins) weisen in unterschiedliche Richtungen
Ende der 20er Jahre unterschied LOUIS EUGÈNE FÉLIX NÉEL (1904 – 2000) harten und weichen Magnetismus
1930 sagte er den Antiferromagnetismus voraus, führte den Begriff aber erst 1932 ein
1942 definierte er den Ferrimagnetismus
1948 führt NÉEL die zwei Untergitter ein: **Magnetische Zelle besteht aus ≥ 2 chemischen, (Kristall-) Zellen**

Antiferromagnetismus

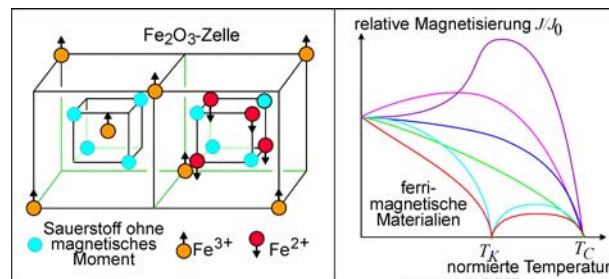
Mehrere ferromagnetische Strukturen mit entgegengesetzter Magnetisierung, heben sich genau auf
Globale Suszeptibilität bei 10^{-3} , z. B.: CrAl, CrF₂, Cr₂O₃, CrSb, MnO₂, MnF₂, MnS, MnSe₂, FeO, CoO, NiO und VO₂
Beispiel MnO: beide 2p-Elektronen von O wegen PAULI-Verbot entgegengesetzten Spin, dito 3d-Spins der beiden Mn-Atome
Die 2p-O-Orbitale überlagern sich mit den 3d-Mn-Orbitalen (grüne Fläche h + Bild j)
G-Typ in kubischen Perowskiten, z.B. LaFeO₃, auf (benannt nach Graf L. A. PEROWSKI; 1792 – 1856)
Lagenartiger A-Typ, z. B. LaMnO₃: alle benachbarten Spins antiparallel ausgerichtet.

NÉEL-Temperaturen

Material	FeCO ₃	MnO ₂	FeO	MnSe	CoO	MnTe	Cr ₂ O ₃	NiO	CrSb
T_C in °C	-216	-183	-75	-26	-2	34	47	247	427

Ferrimagnetismus

Kompensation ist unvollständig und stark temperaturabhängig
Hauptsächlich Ferrite und Granate, Typisch z. B.: Fe₂O₃-Zelle: 2 Kristallzellen = 1 magnetische Zelle
Z. B.: Fe₃O₄ → FeO·Fe₂O₃ → Fe²⁺- und Fe³⁺-Ionen befinden sich in getrennten Untergittern
Besonders typisch bei Seltenen Erden (Me, auch RE genannt englisch rare earth) Summenformel Me₃Fe₅O₁₂
Es sind CURIE- und Inversion- (= Kompensations-) Temperatur zu unterscheiden: $T_C > T_K$
Im Bereich $T_K < T < T_C$ ist die Magnetisierung entgegengesetzt
Heute vielfältige ferrimagnetische Materialien (s. später)



Weitere Varianten des harten Magnetismus

Superparamagnetismus: ferro- und ferrimagnetischen Stoffen als Kolloide oder Ausscheidungsteilchen in nichtmagnetisierbaren Grundsubstanz sehr fein verteilt vorliegen
besitzen beachtlich hohe Suszeptibilität aber keine Hysterese

Helikale Anordnung der Spins häufiger bei Selten-Erddmetallen auf, die in Lagen kristallisieren

Beim Dy (Dysprosium) Kopplungen J_1 zur nächsten und J_2 zur übernächsten Lage bewirken, dass Spin Winkel Θ dreht

Spingläser. Bekannt seit 1954 = ungewöhnliche magnetische Ordnungen

z. B.: Au_{1-x}Fe_x und Cu_{1-x}Mn_x + wenige % Mn-, Fe-Ionen, Auch Eu_xSr_{1-x}S.

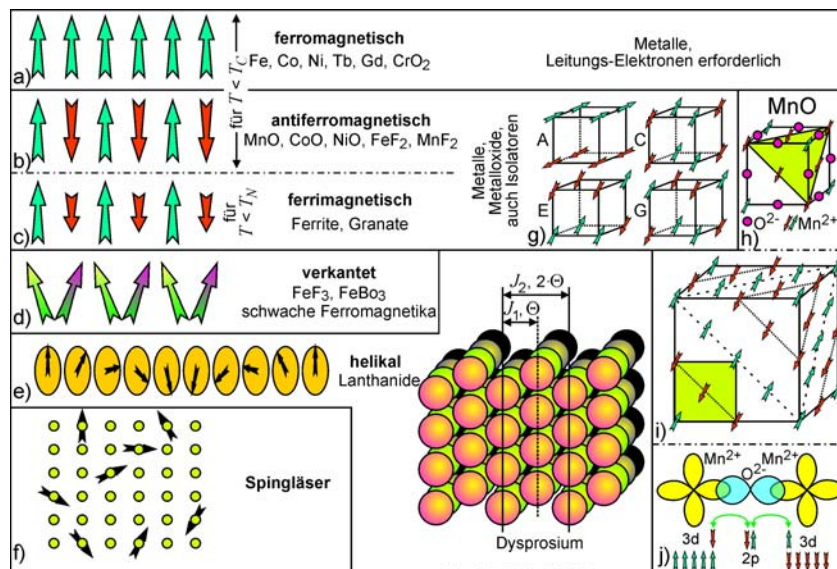
Alle besitzen glasartige (nichtperiodische, zufällige) Anordnung und Richtungen der magnetischen Momente

Nur lokale spontane Magnetisierung, globale verschwindet

Kernmagnetismus: Bei sehr tiefen Temperaturen können sich auch die magnetischen Momente der Kerne magnetisch ordnen

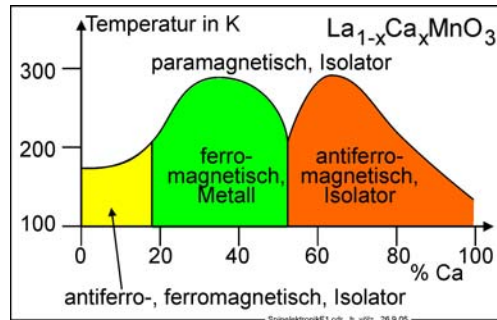
z. B. besitzt Cu einen antiferromagnetischen Kernübergang bei 58 nK und Ag bei 560 pK

besonders einfach ist festes ³He mit Kernspin 1/2 und magnetischen Moment 2,1 μ_K .



Übergänge zwischen den Arten des Magnetismus

Hierfür gibt es viele Beispiele. Ausgewählt ist nur eine Verbindung



Spin und Stromfluss

Spin der Elektronen nach, zwei Arten „ $\uparrow$ “ und „ $\downarrow$ “, „up“ und „down“

Im „üblichen“ elektrischen Strom beide Spin gleich stark $\Rightarrow$ rotationssymmetrischer magnetischer Wirbel um Stromfluss

Zusätzlich bewirkt jeder Spin einen transversalen Wirbel, kompensieren sich aber durch gleiche Anteile

Fließt der Strom durch Magnetmaterial mit Magnetfluss B , dann kann „Spin-Flip“ auftreten

Elektronen mit Spin in „ungünstiger“ Orientierung kippen ihre Spin-Richtung, z.B. „ $\downarrow$ “ $\Rightarrow$ „ $\uparrow$ “

Dabei kann, muss aber nicht die Stromstärke erhalten bleiben

Fließt Strom anschließend durch Magnetmaterial mit entgegengesetztem Fluss $-B$, so erfolgt erneut eine Spin-Auswahl

Dabei tritt eine Stromreduzierung auf, Anwendung GMR und MRAM (s. d.)

Es besteht Analogie zu Phototonen durch Polarisationsfilter

