

1. Magnetismus

Was man längst wissen sollte ...

Maßeinheiten, Diamagnet, Paramagnet,
Suszeptibilität, Magnetisierung,
Spin-Bahn Wechselwirkung, Hund'sche Regeln,

Südweiser (?), Kompass

Maschinen (Motoren, Generatoren, Kühlschränke, Lautsprecher)

Datenspeicher (Ringkern, Winchester, GMR)

verwickelt: lokal – delokal, mikro – atomar, x



1.1 Geschichtlicher Überblick



Thales von Milet, 624 – 546 v. Chr.

(Vorsokratiker)

"Alles ist voll von Göttern."

Magnetstein besitzt eine Seele,
weil er das Eisen bewegt.



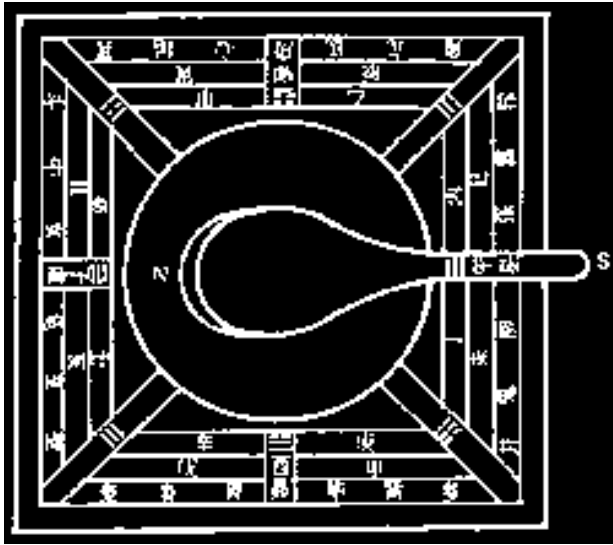
Magnetstein = Magnetit = Fe_3O_4

$T_N = 871 \text{ K}$ Remanenz $\leq 500 \text{ nT}$

Hanfuzius (280 – 233 v. Chr.)

baut den Si Nan

Einsatz als Kompass: ca. 1100



William Gilbert (1544 – 1603)

Widerlegt Behauptung, Knoblauch entmagnetisiere
1600: *De Magnete, Magnetisque Corporibus, et de
Magno Tellure*

Erdmagnetismus hängt mit Erddrehung zusammen

Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts:

Mikroskopische Modelle des Magnetismus

- Elektrodynamik (Maxwell)
- Statistische Thermodynamik (Boltzmann)

Beispiel: Curie-Gesetz

$$X_{\text{param}} \propto T^{-1}$$

Experiment: P. Curie, Ann. Chim. Phys. **5**, 289 (1895)

Theorie: P. Langevin, J. Phys. **4**, 678 (1905)

- Klassische Physik erklärt Magnetismus nicht
J. H. van Leeuwen, J. Phys. **2**, 361 (1921)
- Mikroskopische Theorie des Ferromagnetismus
P. Weiss, J. Phys. **6**, 661 (1907)
- Neue Quantenzahl ("Spin") für das Elektron nötig
E. Landé, Z. Phys. **15**, 189 (1923)
G. E. Uhlenbeck, S. Goudsmit, Nature **117**, 264 (1926)
- Heisenberg-Modell für FM und AFM
W. Heisenberg, Z. Phys. **38**, 441 (1926)
- W. Heitler, F. London, Z. Phys. **44**, 455 (1927)
H₂ – Molekül: Singulett- und Triplett-Zustand
- Itineranter Elektronenmagnetismus
E. C. Stoner, Proc. Roy. Soc. A **154**, 656 (1936); A **165**, 372 (1938)
- Theorie des Antiferromagnetismus
L. Néel, Ann. Phys. **3**, 137 (1948)

Heute:

z. B. Dichte-Funktionaltheorie

P. Hohenberg, W. Kohn, Phys. Rev. **136**, 864 (1964)

Magnetismus von stark korrelierten Systemen
(z.B. Hochtemperatursupraleiter) ist bislang nicht
voll verstanden.

1.2 Magnetische Speichertechnologie

Datenspeicher (traditionell)



Magnetic Recording: The First 100 Years

eds. Daniel, Mee & Clark, 1999, IEEE Press

1898 Valdemar Poulsen: Telephonograph, phone answering machine

1935 AEG Magnetophon: audio recording device

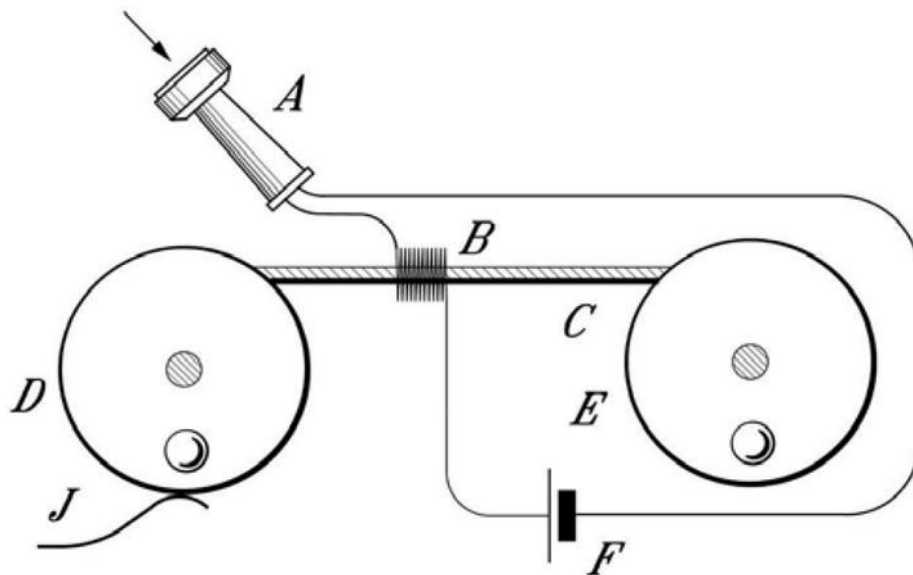
1956 IBM RAMAC: 5 MB, sized 2 large refrigerators, \$10.000 per MB

1963 Philips compact audio cassette

1971 IBM floppy disk drive

1975 Sony Betamax: home video system

1997 IBM GMR heads

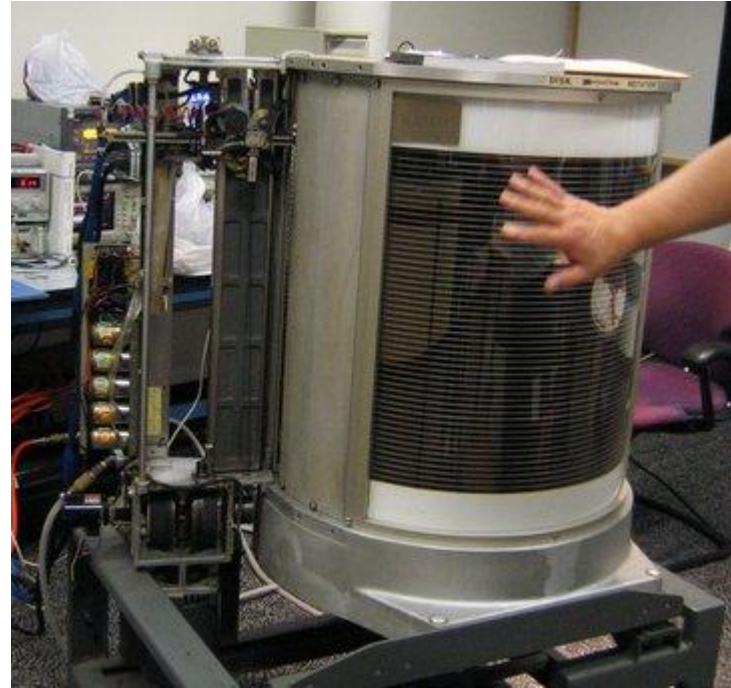


1878 Magnetic sound
recording by Oberlin Smith

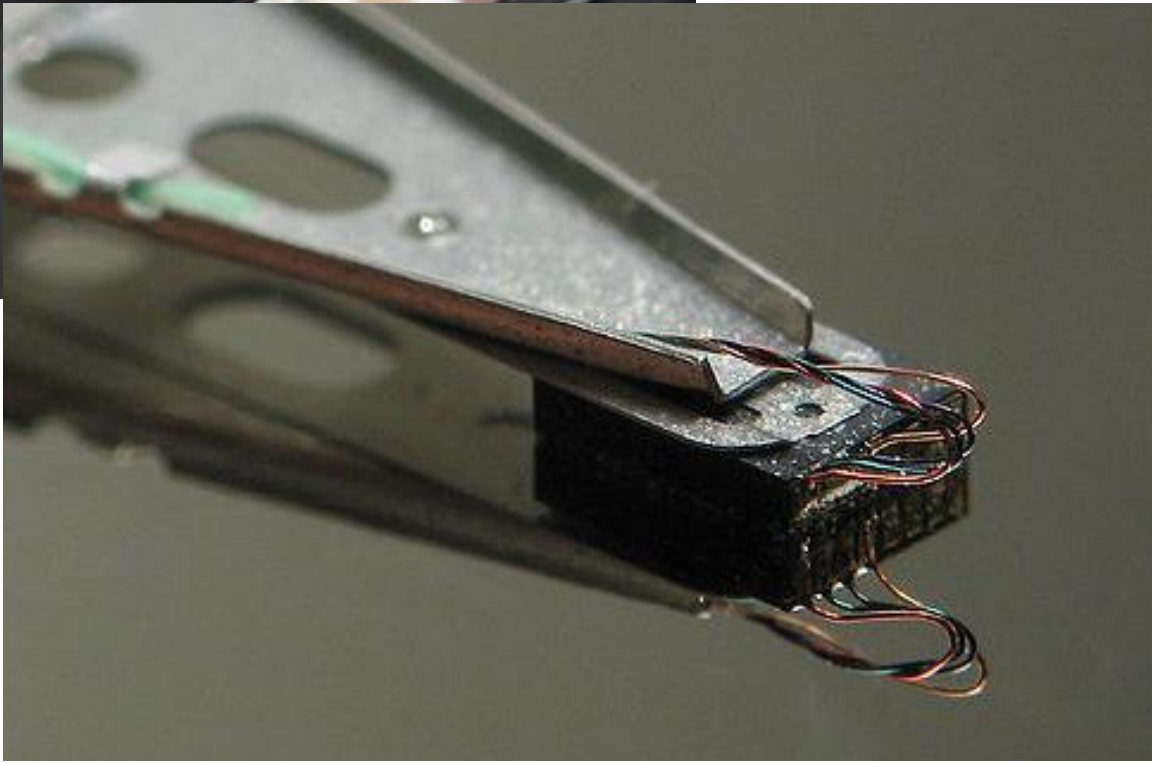
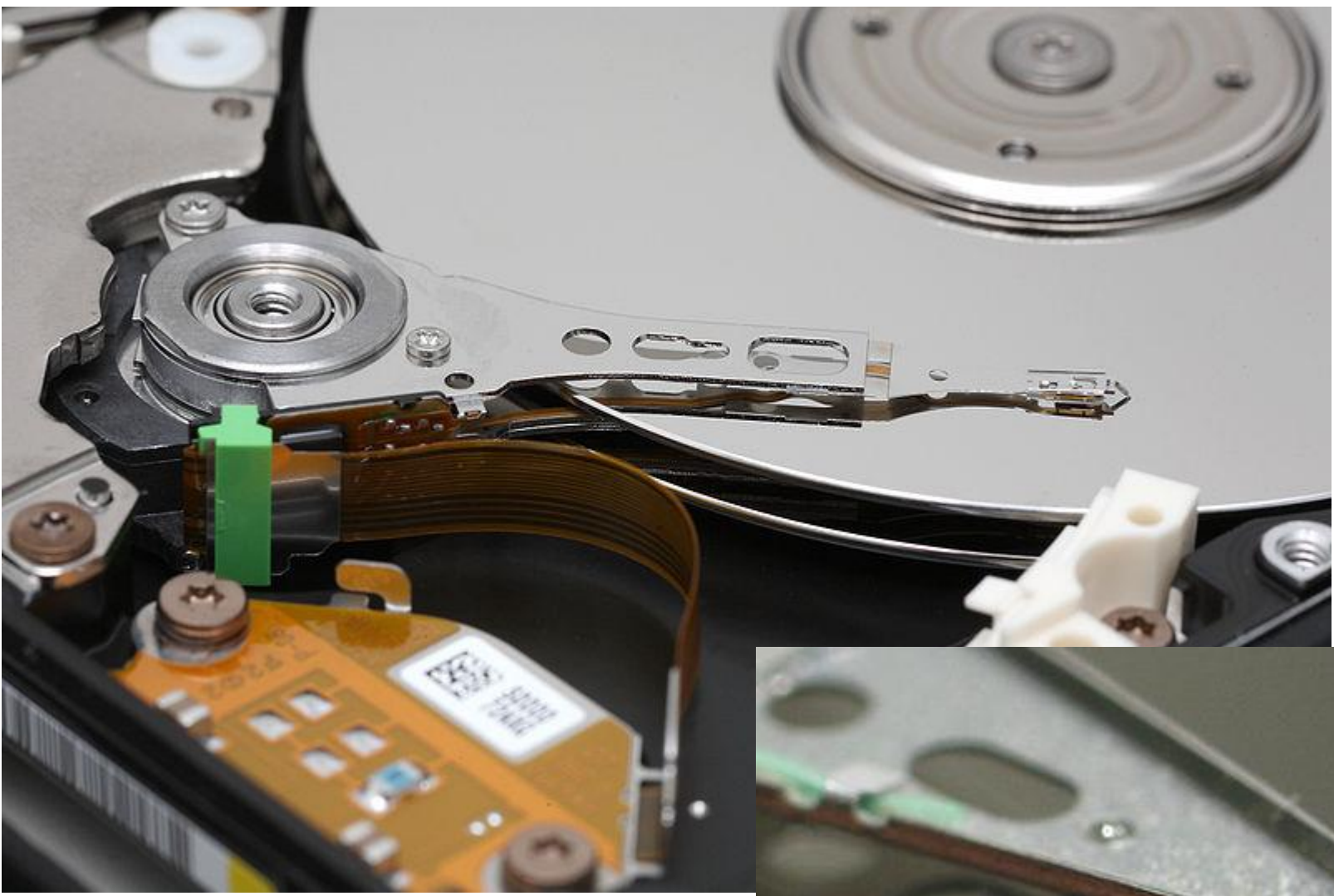
IBM 305 RAMAC (1956)

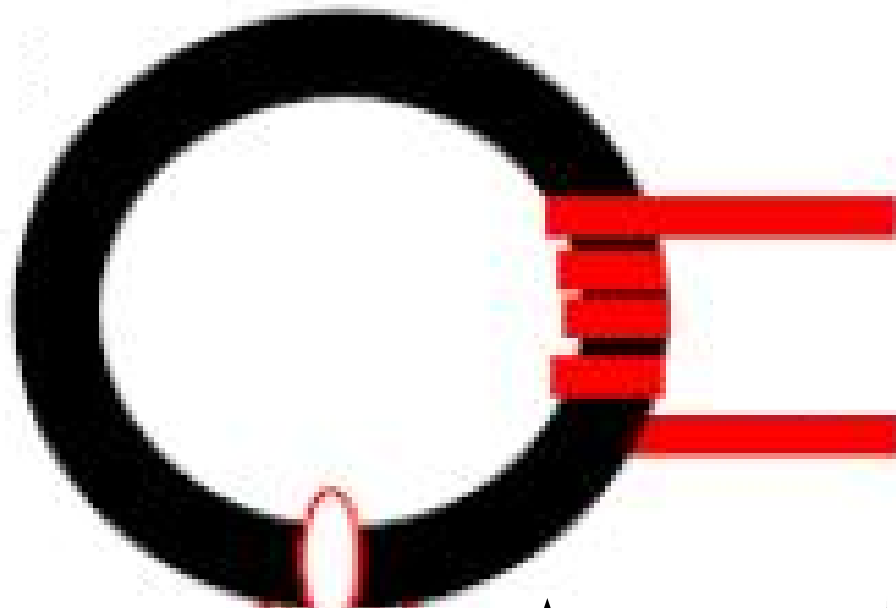


A storage plate
Covered with iron oxide

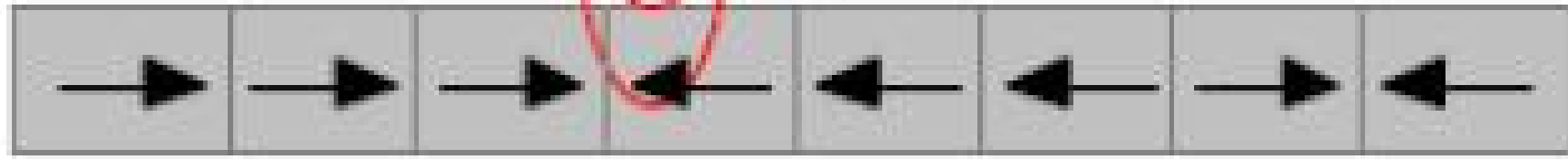


$1.5 \times 1.7 \times 0.6 \text{ m}^3$
1 t
5 Mbyte (8 bit per byte)
1200 rpm





some tens of nm



10 - 20 nm
CoCrPt

10 nm

single domain magnets
coercivity: 0.3 T

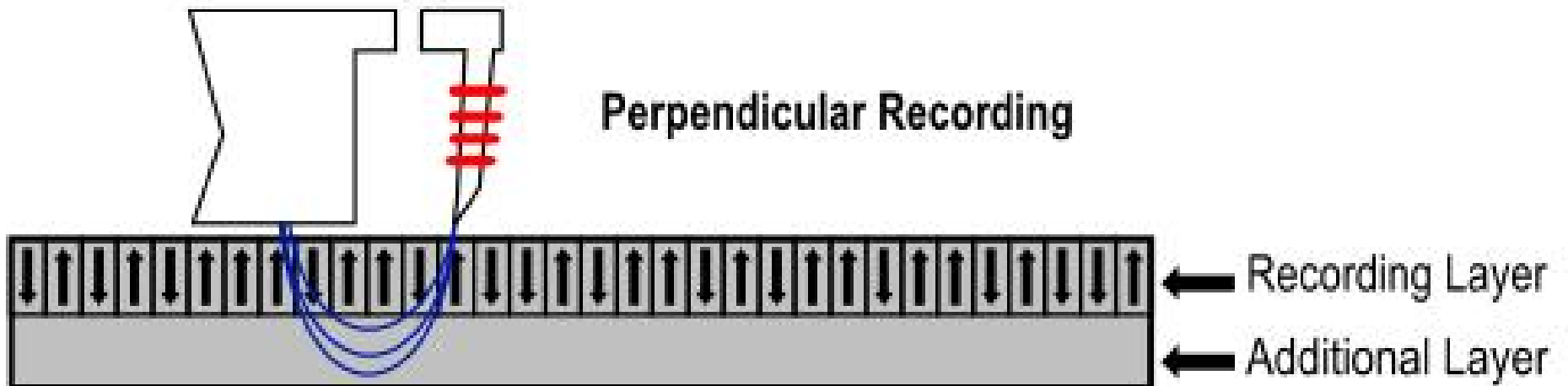
"Ring" writing element

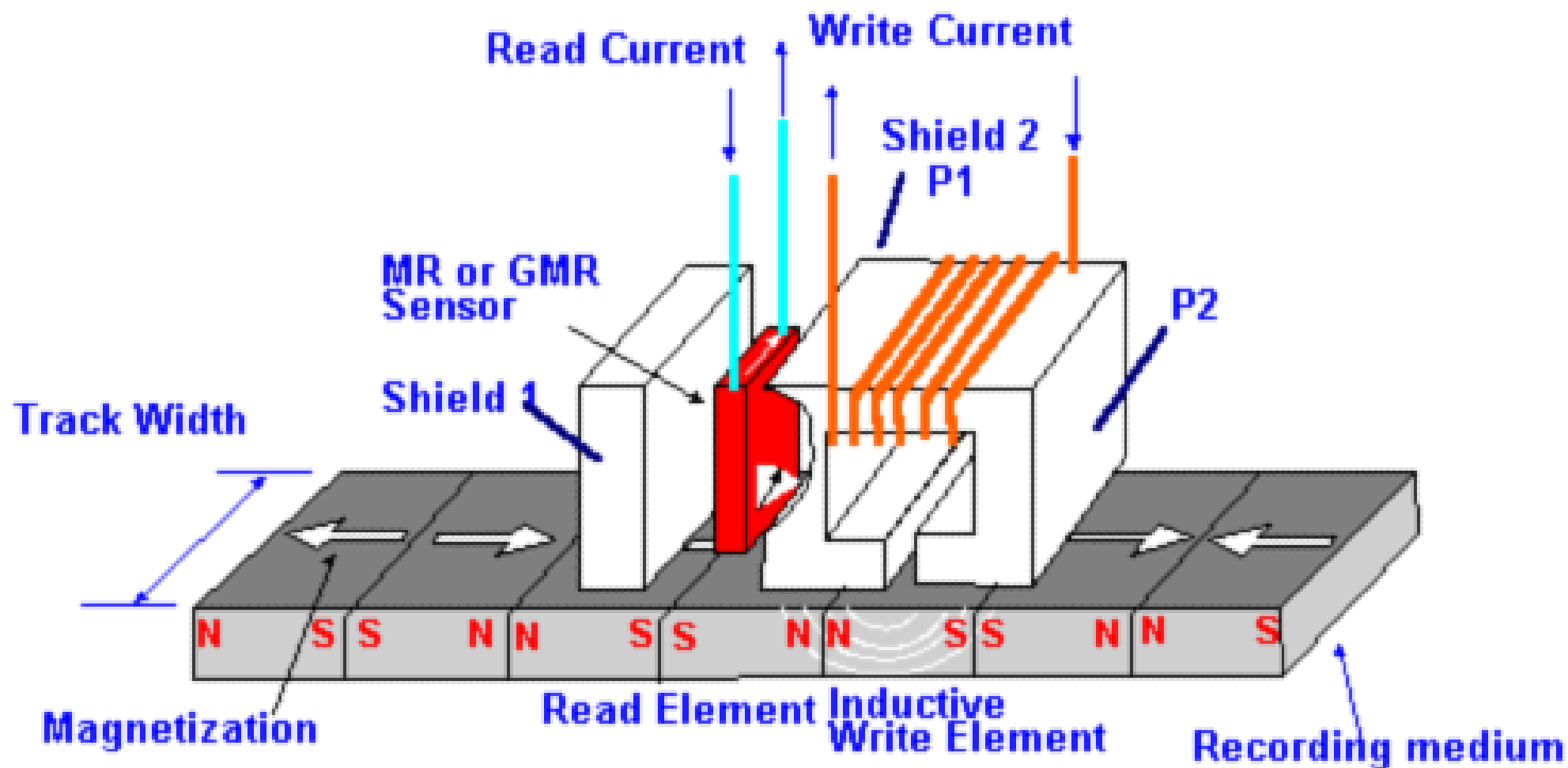
100 – 200 Gbit / in²



≈ 1 Tbit / in²

"Monopole" writing element





Hard disk: data in magnetization of patches of a disk surface

maximum areal density determined by ...

size of magnetic particles (T matters)

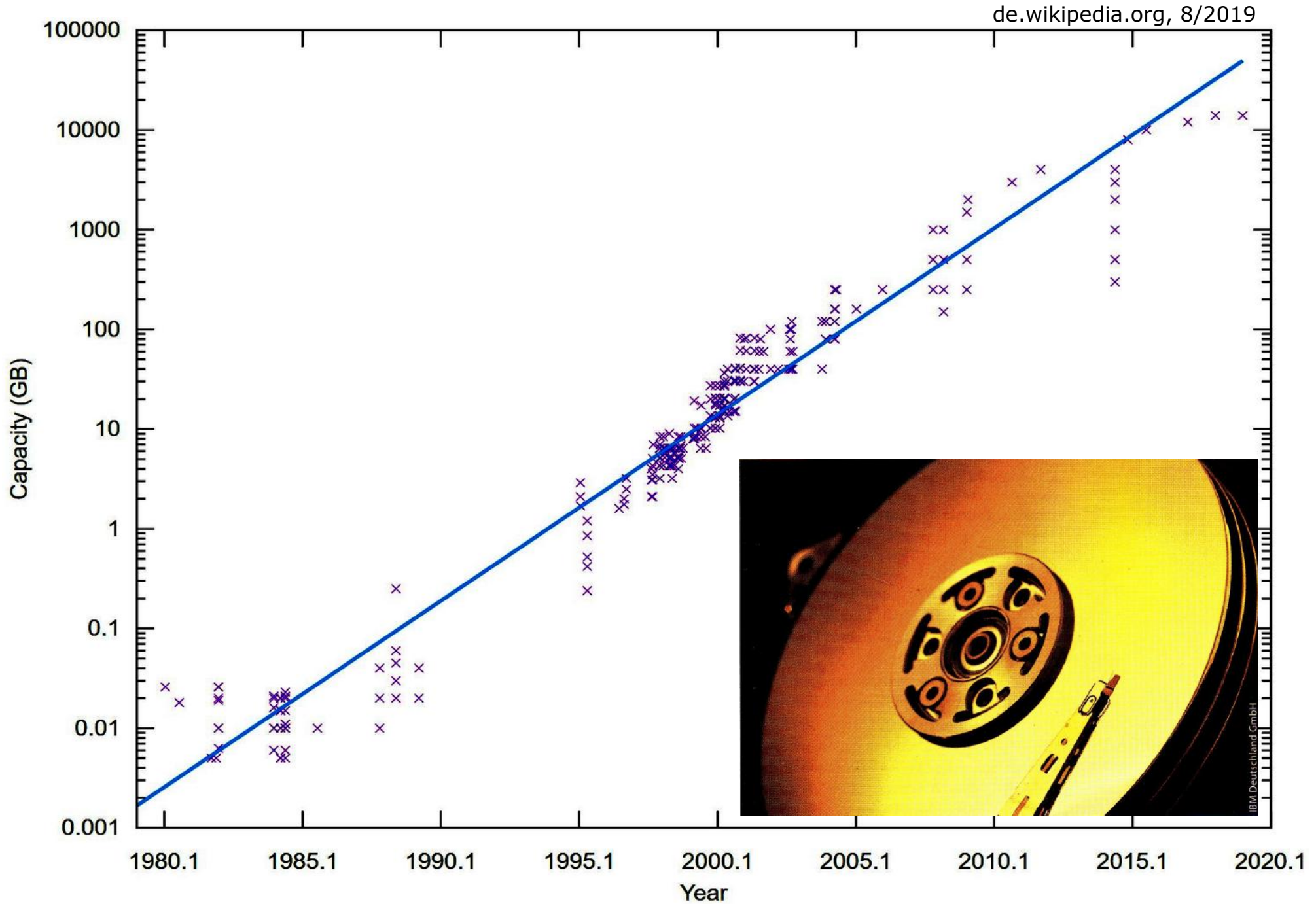
size of read/write head

mechanical precision

1956 2000 bit/in² *2015* 1.34 Tbit/in² (factor > 600 million)

"feasible" scale > 5 Tbit/in² (heat-assisted and microwave-assisted magnetic recording)

Media, Write-read heads, Mechanics, ...



Limit: Superparamagnetism

For crystallites with 1 – 10 nm diameter:

$T < T_{C'}, T_N$: Magnetic moment of particle as a whole can fluctuate

Néel-Arrhenius equation:

$$\tau = \tau_0 \exp \left(\frac{E}{k_B T} \right)$$

τ : attempt time

τ_0 : attempt period

E : magnetic anisotropy energy

Nobel Prize in Physics
2007
Peter Grünberg 1939-2018
F'zentrum Jülich

Albert Fert 1938
Université Paris-Sud
Orsay

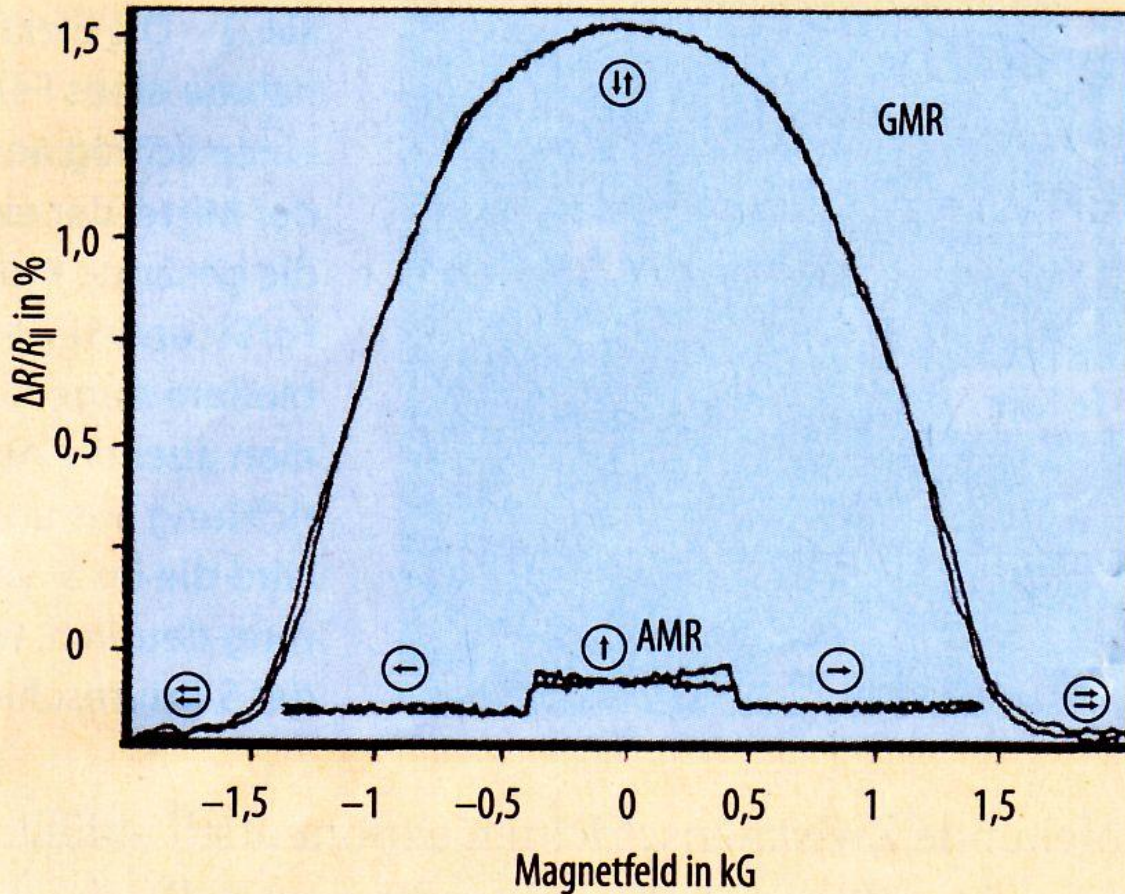
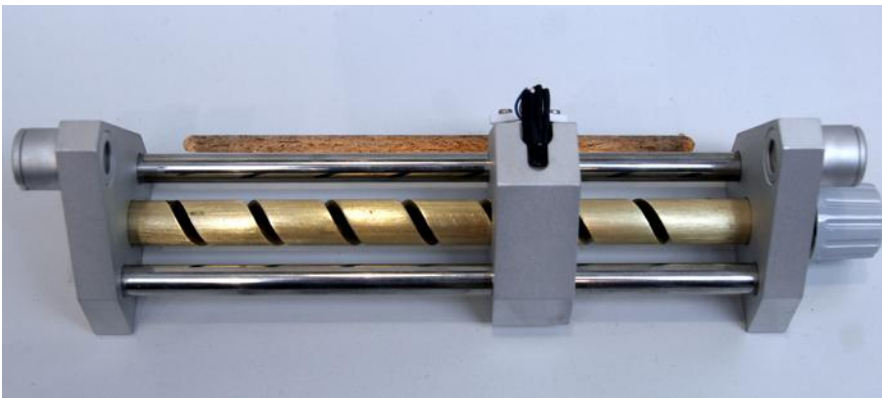
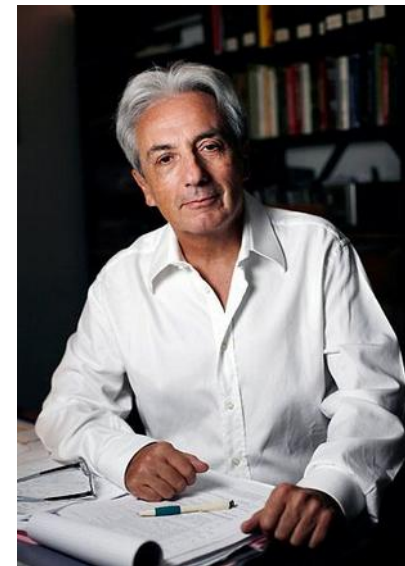
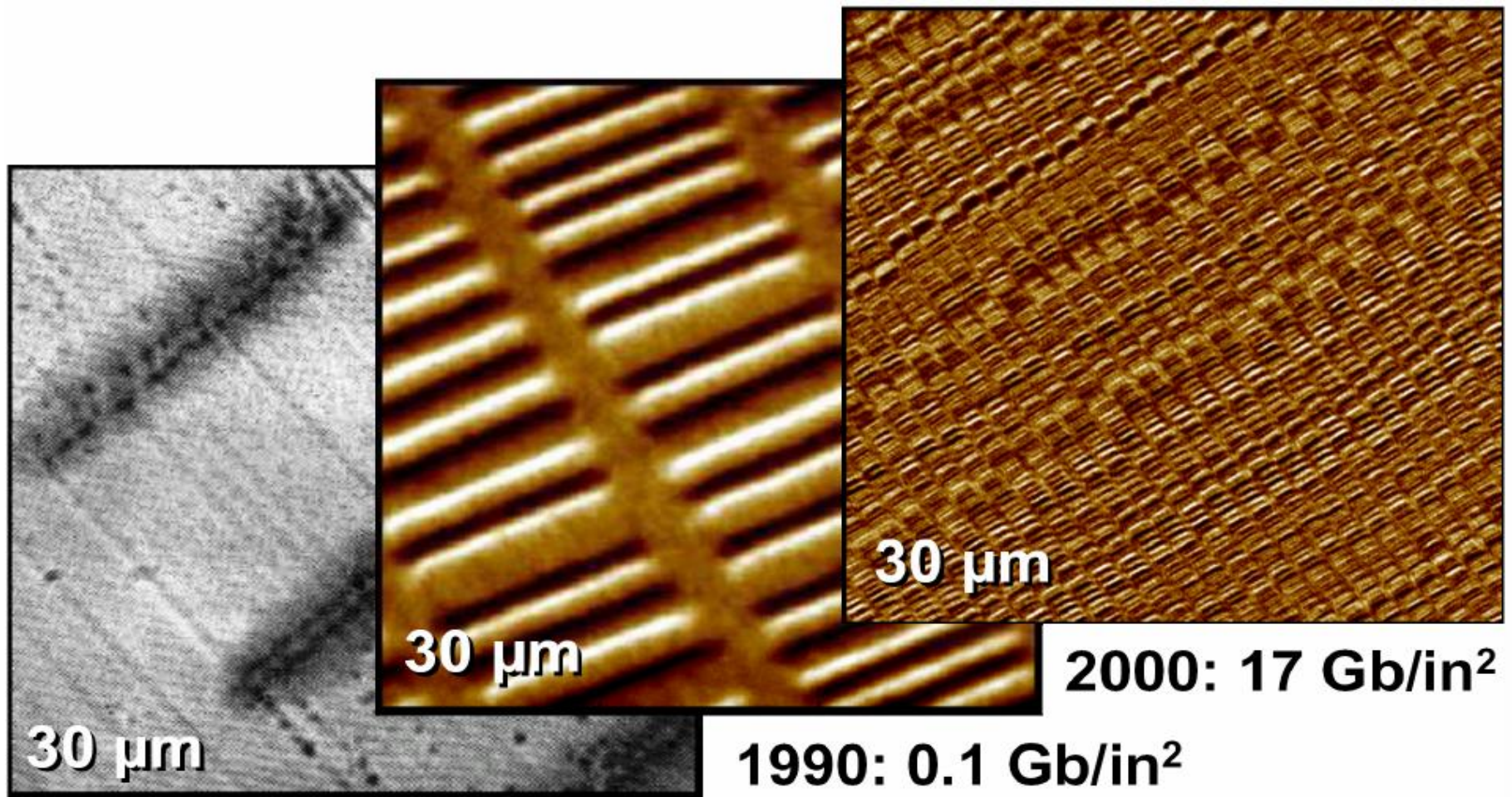


Abb. 4 Der GMR-Effekt im Dreilagensystem Fe/Cr/Fe (Schichtdicke des Eisens: 12 nm) ist im Vergleich zum AMR-Effekt eines 25 nm dicken Fe-Films deutlich ausgeprägter.

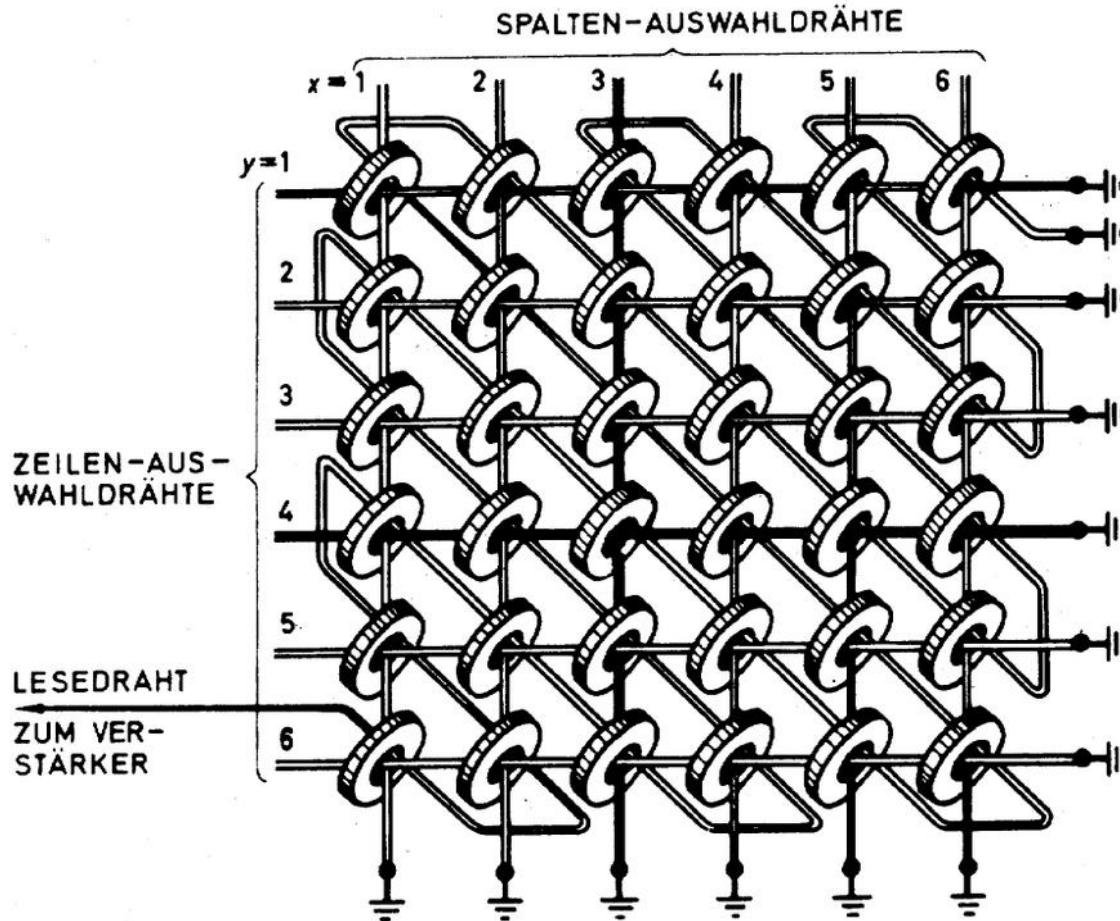




Bits auf Festplatten
Bildkanten jeweils 30μm

Jedes Bit = Hunderte Partikel

"MRAM" Ringkernspeicher



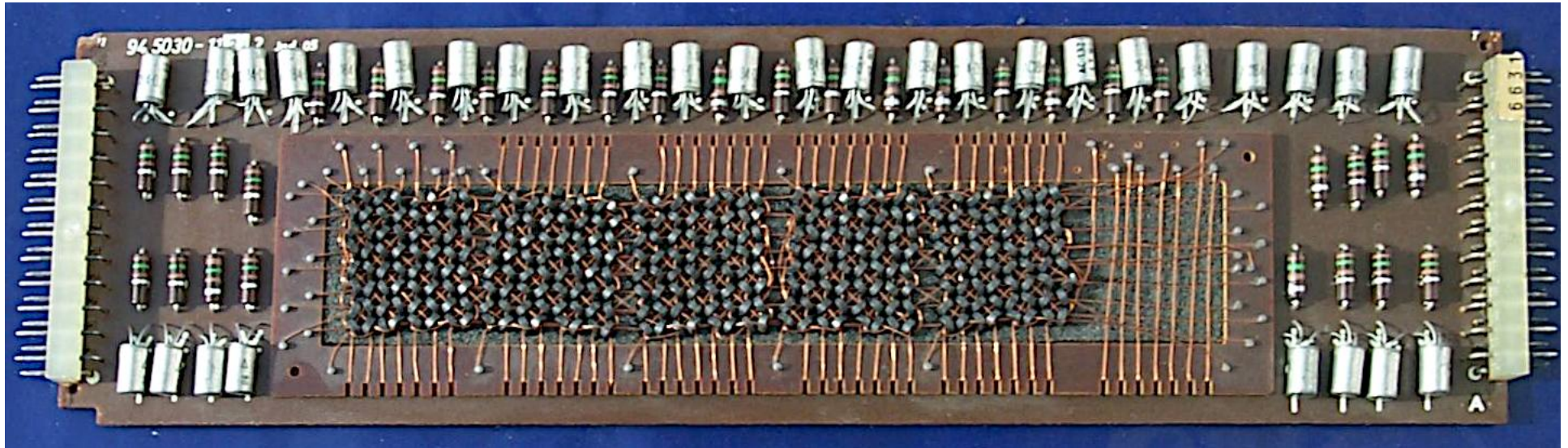
Lese- & Schreibzyklus gleichzeitig.

Lesen: mit X- & Y-Drähten gewünschten Kern zur '0' hin magnetisieren

falls zuvor '0': keine Änderung, kein Spannungspuls auf Lesedraht

falls zuvor '1': Änderung, Spannungspuls auf Lesedraht

Kernspeicherplatine aus einer Olympia Rechenmaschine ca. 1968



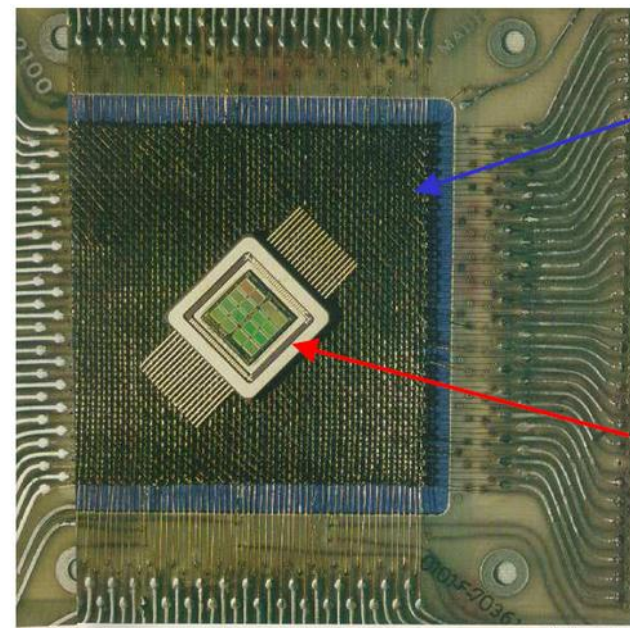
32 Bit Wort - 32 Ebenen (!)

Takt bis 3 MHz

Nicht flüchtig

core dump: (wikipedia)

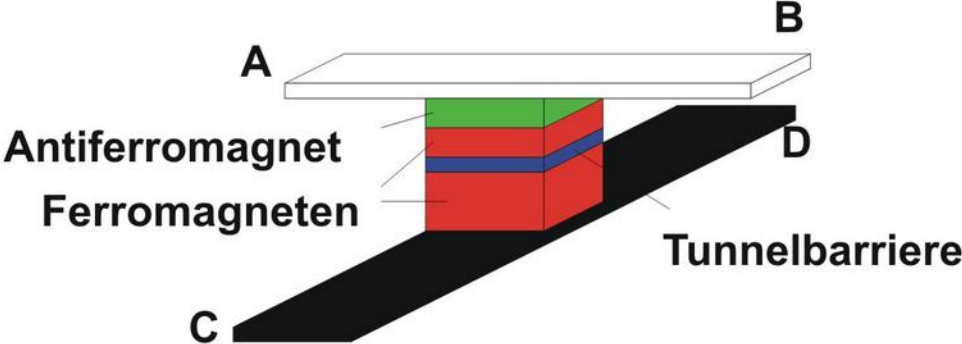
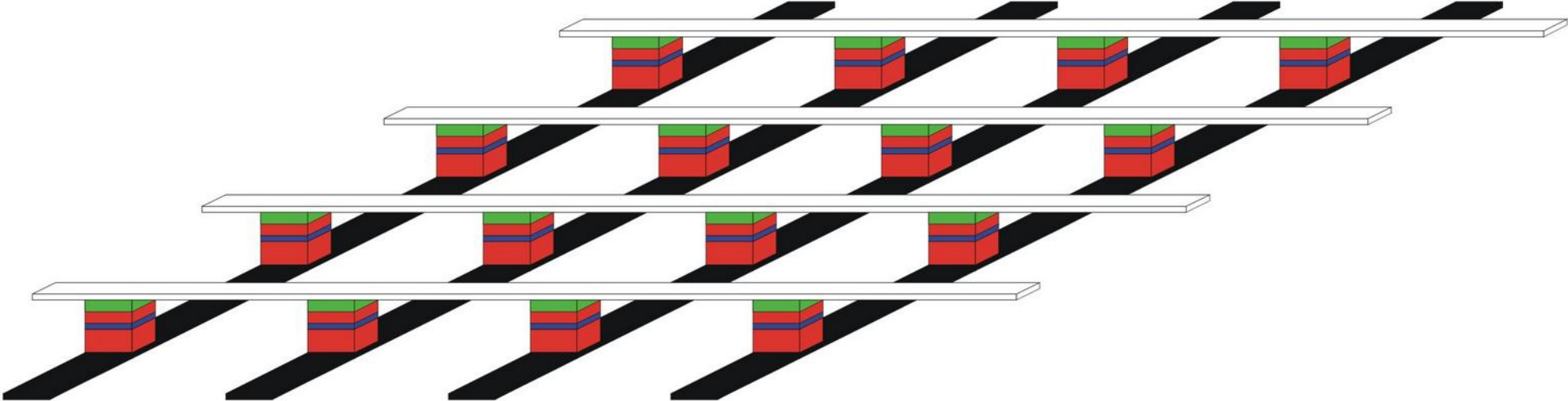
Momentaufnahme des Kernspeichers



1 kBit
Ringkern-
speicher

16 kBit
Dünnschicht-
Speicher
(Honeywell)

Magnetic RAM



Lesen: Strom A->D
Schreiben: Strom A->B; C->D

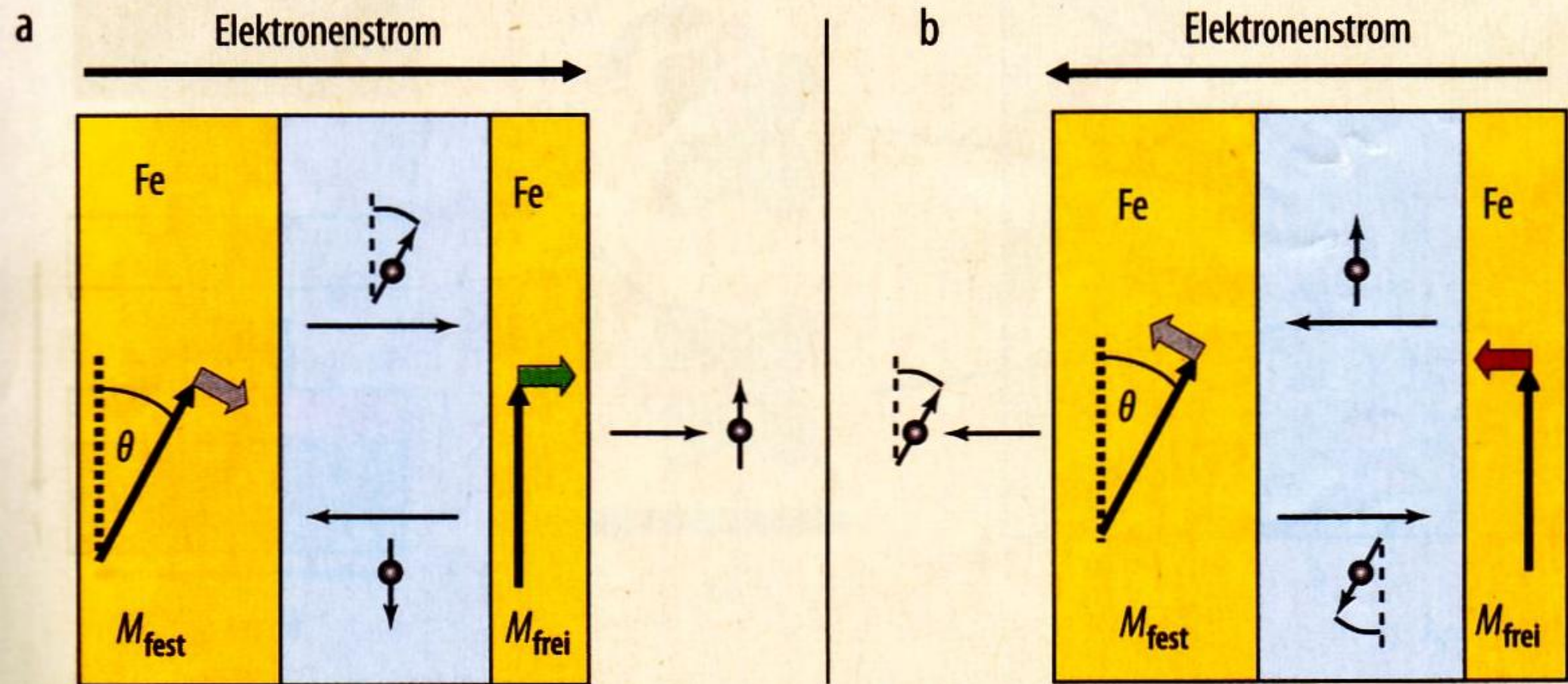


Abb. 6 Beim strominduzierten Schalten (hier unter der Annahme positiver Spinpolarisation, $\alpha > 1$) fließen Elektronen von der hartmagnetischen Schicht zur weichmagnetischen (a) und umgekehrt (b). Elektronen, die in Elektronenstromrichtung fließen, sind parallel polarisiert, reflektierte Elektronen antiparallel. Wenn die Elektronen sich der Magnetisierungsrichtung anpassen, bewirken sie ein Drehmoment auf die Magnetisierung und drehen diese.

Status (en.wikipedia, 2019)

2010 Hitachi and Tohoku Univ announced Multi-level SPRAM

2011 PTB, Germany, announces having achieved a below 500 ps (2Gbit/s) write cycle

2012 Chandler, AZ, USA, Everspin debuts 64Mb ST-MRAM

Currently:

diverse MRAM products available from Everspin Technol., www.everspin.com

products planned by Samsung and Hynix

main applications: high reliability industry apps, aviation, spacecrafts

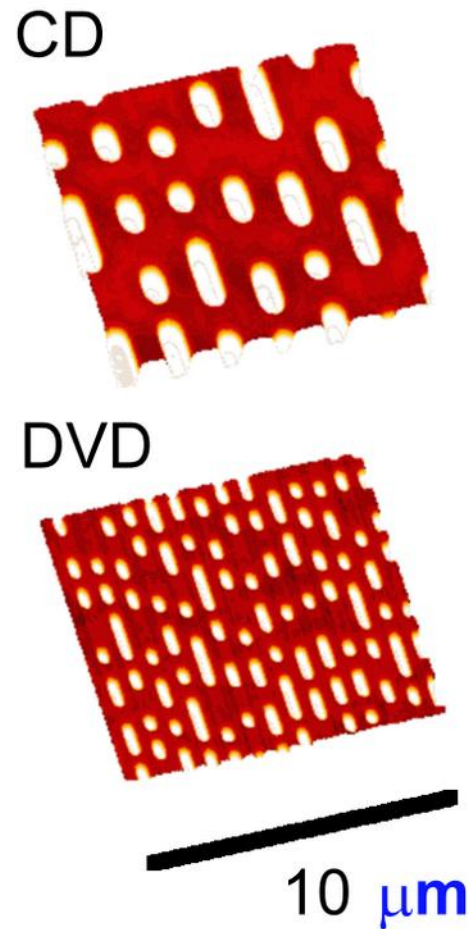
All of the information ... in **all the books** in the world can be written ... **in a cube of material 1/200 inch** [0.13 mm] wide.

Use 125 atoms to store one bit.

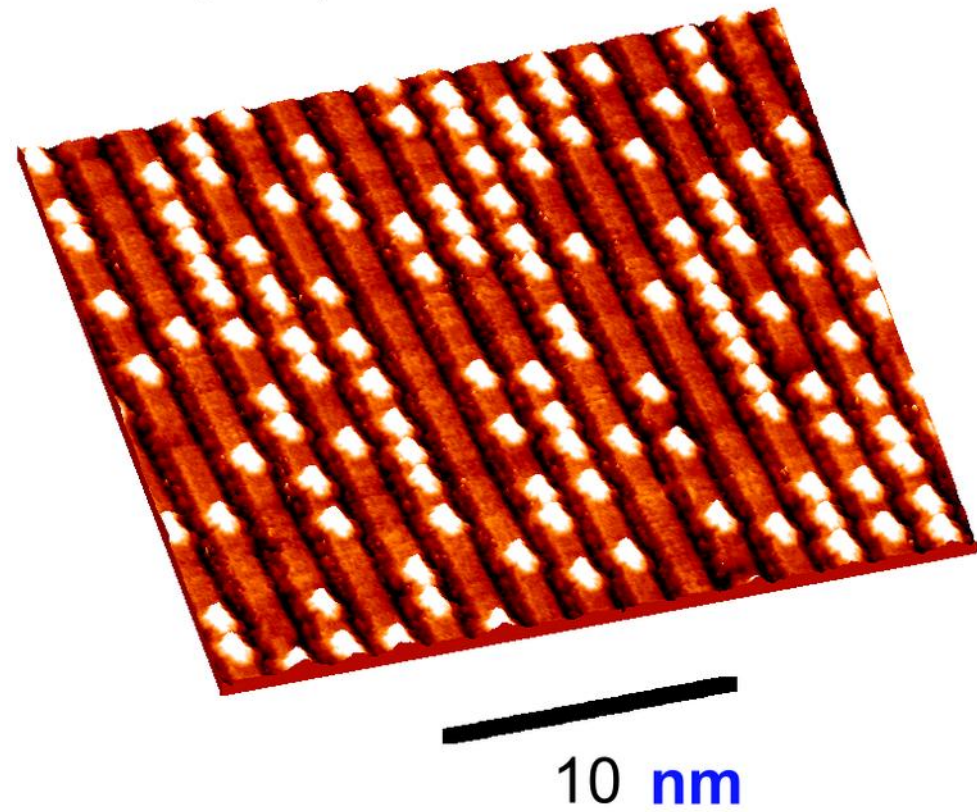
R. Feynman, Caltech, December 29th, 1959

In pursuit of the ultimate storage medium

1 Atom per Bit



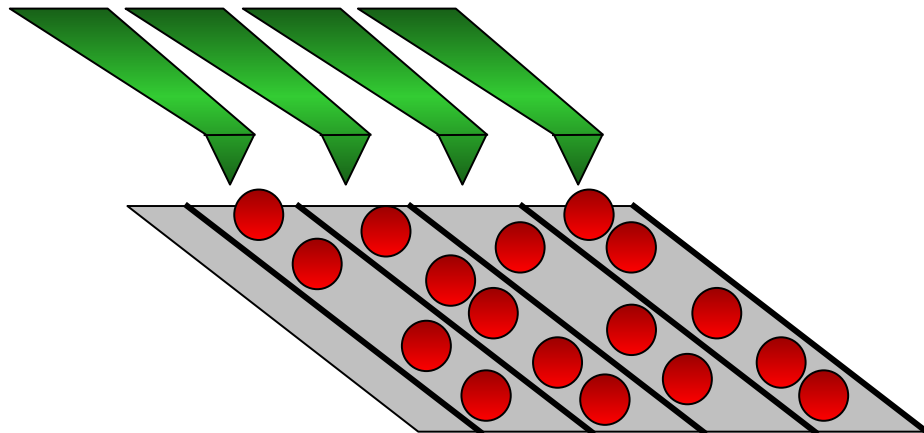
Si (111) - Au 5x2



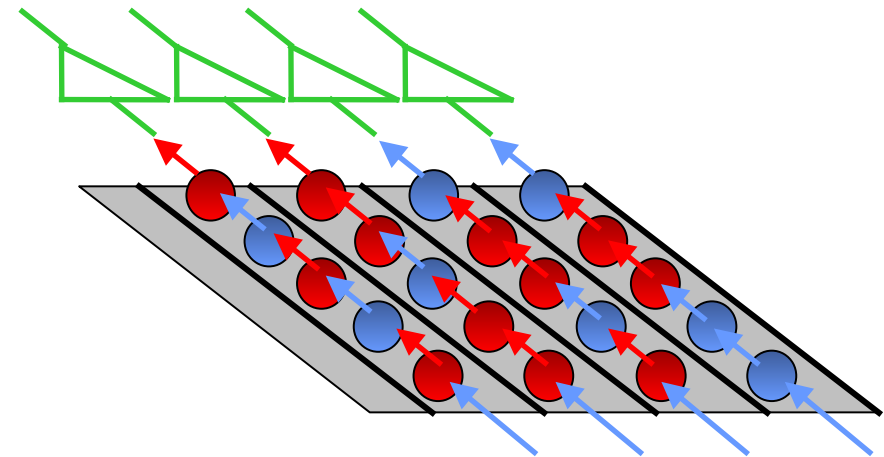
Smaller Bits \Rightarrow Less Energy Stored \Rightarrow Slower Readout

Use **Highly-Parallel** Readout

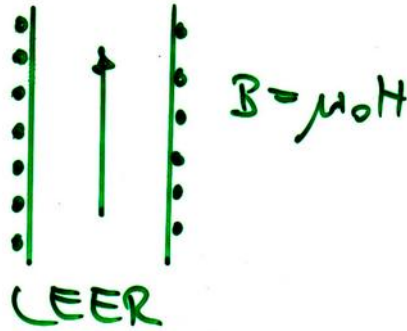
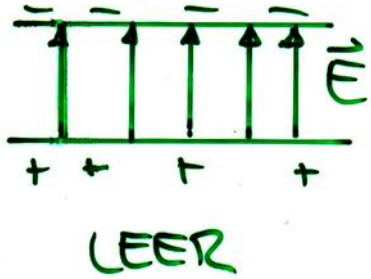
Array of Scanning Probes
(Millipede, IBM Zürich)



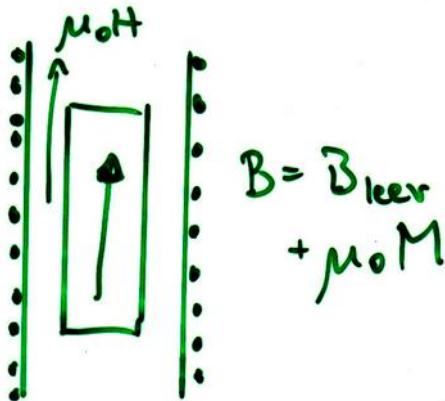
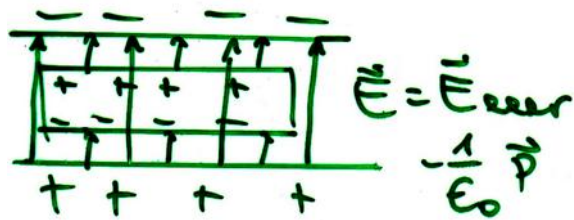
Array of Shift Registers
(nm \Rightarrow μm)



Gegenüberstellung: elektr. & magn. Größen



E	\longleftrightarrow	B
ϵ_0		$\frac{1}{\mu_0}$
P		$-M$
$P = \chi_{el} E$	aber	$\Pi = \chi_m H$



MIT MATERIE

Maxwell Gleichungen

$$\text{rot } \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} = \mu_0 (\mathbf{J}_{\text{bound}} + \mathbf{J}_{\text{free}})$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0$$

B ist physikalisch relevant

Hilfsfelder (Eichfreiheit bzgl. $\text{div } \mathbf{H}$, $\text{div } \mathbf{M}$)

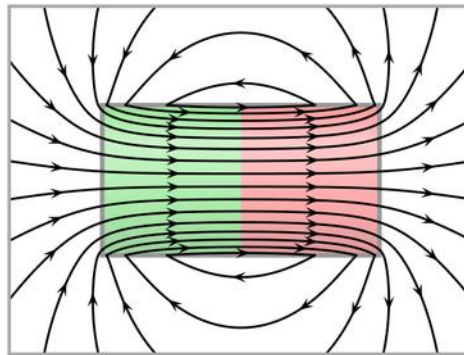
$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M})$$

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J}_{\text{free}}$$

$$\text{div } \mathbf{M} = -\text{div } \mathbf{H}$$

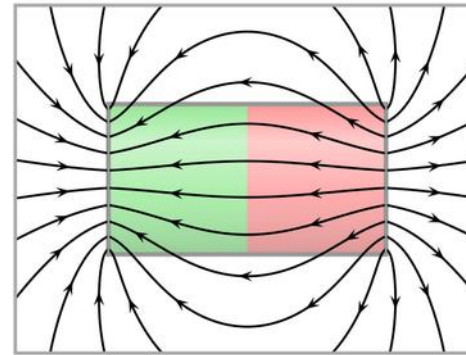
$$\text{rot } \mathbf{M} = \mathbf{J}_{\text{bound}}$$

$\vec{\mathbf{B}}$



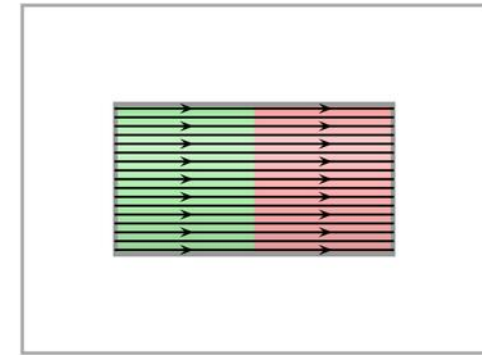
$$\begin{aligned} \text{rot } \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{J}_{\text{bound}} \\ \text{div } \mathbf{B} &= 0 \end{aligned}$$

$\vec{\mathbf{H}}$



$$\begin{aligned} \text{rot } \mathbf{H} &= 0 \\ \text{div } \mathbf{H} &\neq 0 \end{aligned}$$

$\vec{\mathbf{M}}$



$$\begin{aligned} \text{rot } \mathbf{M} &= \mathbf{J}_{\text{bound}} \\ \text{div } \mathbf{M} &\neq 0 \end{aligned}$$

übliche Eichung

$\mathbf{H} \neq 0$ ohne freie Ströme

$\mathbf{M} = 0$ im Vakuum

$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$ im Vakuum

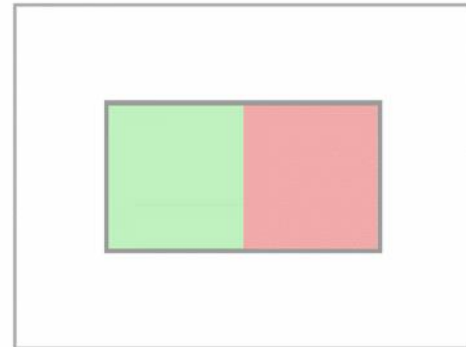
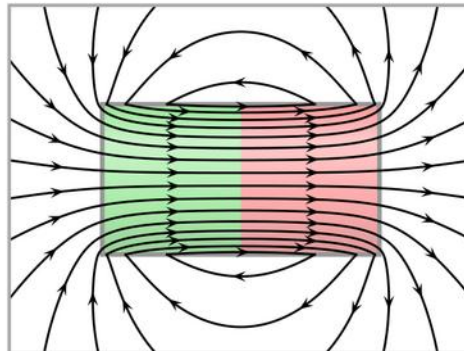
altern. Eichung

\mathbf{M} durch $\mathbf{J}_{\text{bound}}$ erzeugt

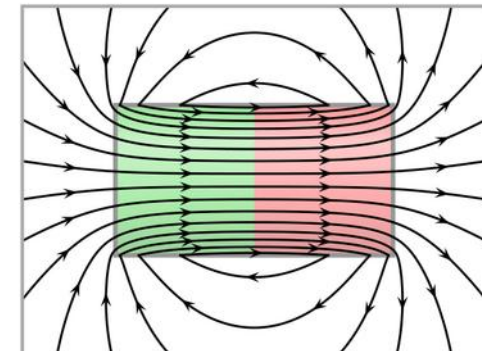
(inkl. Fernfeld)

$\mathbf{H} = 0$, da kein \mathbf{J}_{free}

$\mathbf{B} \neq \mu_0 \mathbf{H}$ im Vakuum



$$\text{div } \mathbf{H} = 0$$



$$\text{div } \mathbf{M} = 0$$

GROUND STATES OF IONS WITH PARTIALLY FILLED *d*- OR *f*-SHELLS,
AS CONSTRUCTED FROM HUND'S RULES*

251 L_J

Für magnet. Eigenschaften

besonders wichtig:

3*d*, 4*d*, 5*d* *l*=2

4*f*, 5*f* *l*=3

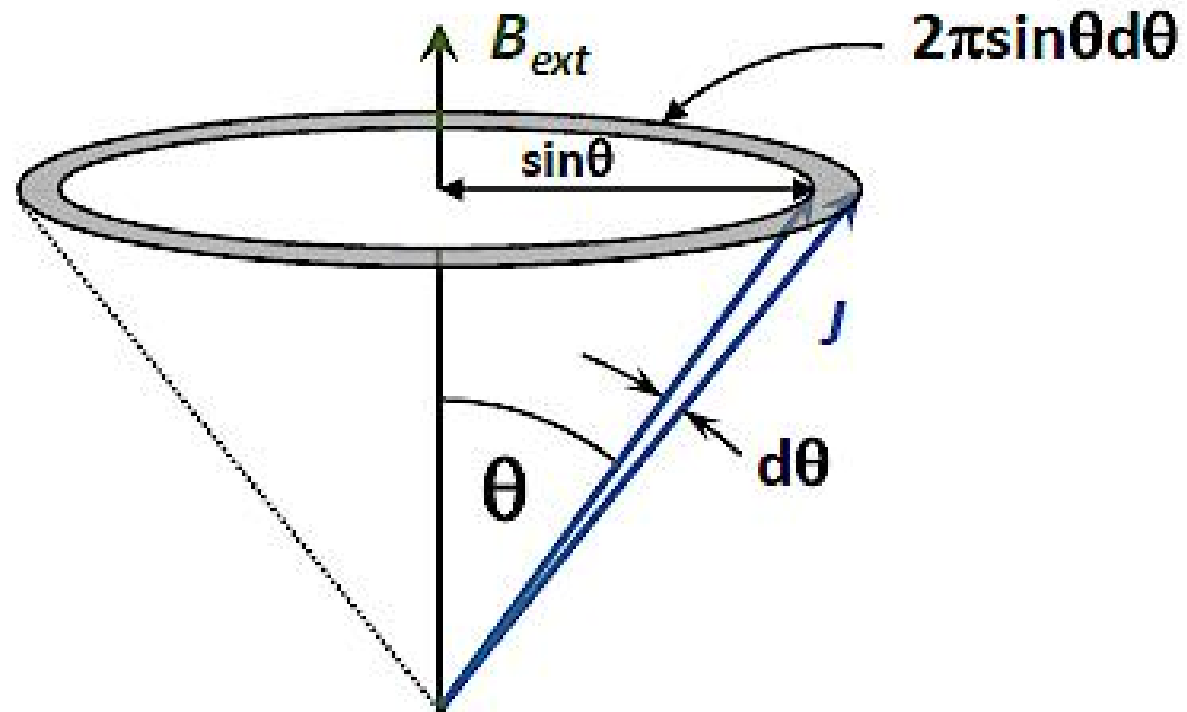
<i>d</i> -shell (<i>l</i> = 2)						<i>S</i>	<i>L</i> = Σ <i>l_z</i>	<i>J</i>	SYMBOL	
<i>n</i>	<i>l_z</i> = 2,	1,	0,	-1,	-2					
1	↓					1/2	2	3/2	} <i>J</i> = <i>L</i> - <i>S</i>	² <i>D</i> _{3/2}
2	↓	↓				1	3	2		³ <i>F</i> ₂
3	↓	↓	↓			3/2	3	3/2		⁴ <i>F</i> _{3/2}
4	↓	↓	↓	↓		2	2	0	} <i>J</i> = <i>L</i> - <i>S</i>	⁵ <i>D</i> ₀
5	↓	↓	↓	↓	↓	5/2	0	5/2		⁶ <i>S</i> _{5/2}
6	↑↓	↑	↑	↑	↑	2	2	4	} <i>J</i> = <i>L</i> + <i>S</i>	⁵ <i>D</i> ₄
7	↑↓	↑↓	↑	↑	↑	3/2	3	9/2		⁴ <i>F</i> _{9/2}
8	↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑	1	3	4		³ <i>F</i> ₄
9	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑	1/2	2	5/2	} <i>J</i> = <i>L</i> - <i>S</i>	² <i>D</i> _{5/2}
10	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	0	0	0		¹ <i>S</i> ₀
<i>f</i> -shell (<i>l</i> = 3)						<i>S</i>	<i>L</i> = Σ <i>l_z</i>	<i>J</i>	SYMBOL	
<i>n</i>	<i>l_z</i> = 3,	2,	1,	0,-1,-2,-3						
1	↓					1/2	3	5/2	} <i>J</i> = <i>L</i> - <i>S</i>	² <i>F</i> _{5/2}
2	↓	↓				1	5	4		³ <i>H</i> ₄
3	↓	↓	↓			3/2	6	9/2		⁴ <i>I</i> _{9/2}
4	↓	↓	↓	↓		2	6	4	} <i>J</i> = <i>L</i> - <i>S</i>	⁵ <i>I</i> ₄
5	↓	↓	↓	↓	↓	5/2	5	5/2		⁶ <i>H</i> _{5/2}
6	↓	↓	↓	↓	↓	3	3	0	} <i>J</i> = <i>L</i> - <i>S</i>	⁷ <i>F</i> ₀
7	↓	↓	↓	↓	↓	7/2	0	7/2		⁸ <i>S</i> _{7/2}
8	↑↓	↑	↑	↑	↑	3	3	6		⁷ <i>F</i> ₆
9	↑↓	↑↓	↑	↑	↑	5/2	5	15/2	} <i>J</i> = <i>L</i> + <i>S</i>	⁶ <i>H</i> _{15/2}
10	↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑	2	6	8		⁵ <i>I</i> ₈
11	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑	3/2	6	15/2		⁴ <i>I</i> _{15/2}
12	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑	1	5	6	} <i>J</i> = <i>L</i> - <i>S</i>	³ <i>H</i> ₆
13	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑	1/2	3	7/2		² <i>F</i> _{7/2}
14	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	0	0	0	¹ <i>S</i> ₀	

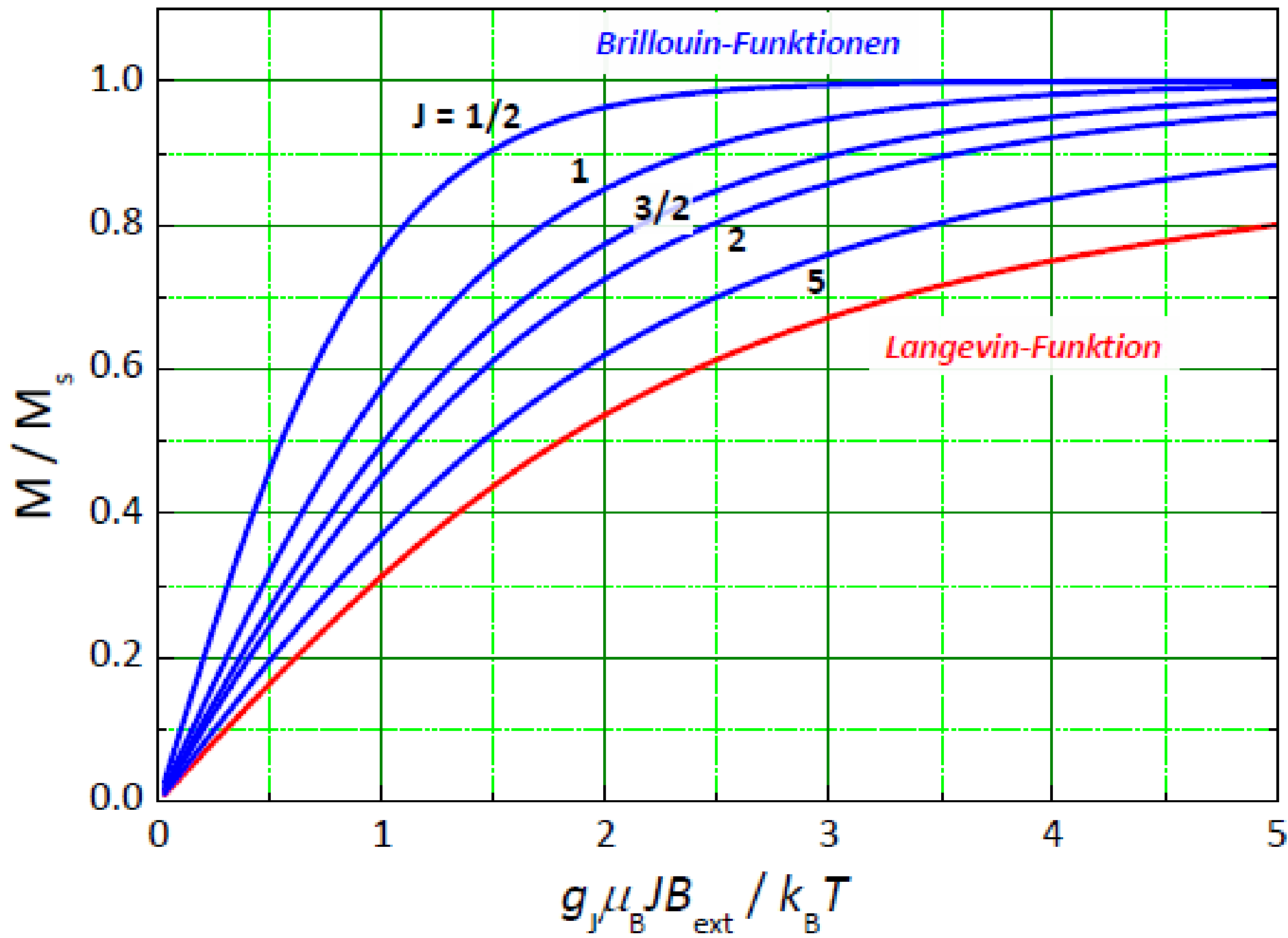
*↑ = spin 1/2; ↓ = spin -1/2.

1.3 Dia- und Paramagnetismus

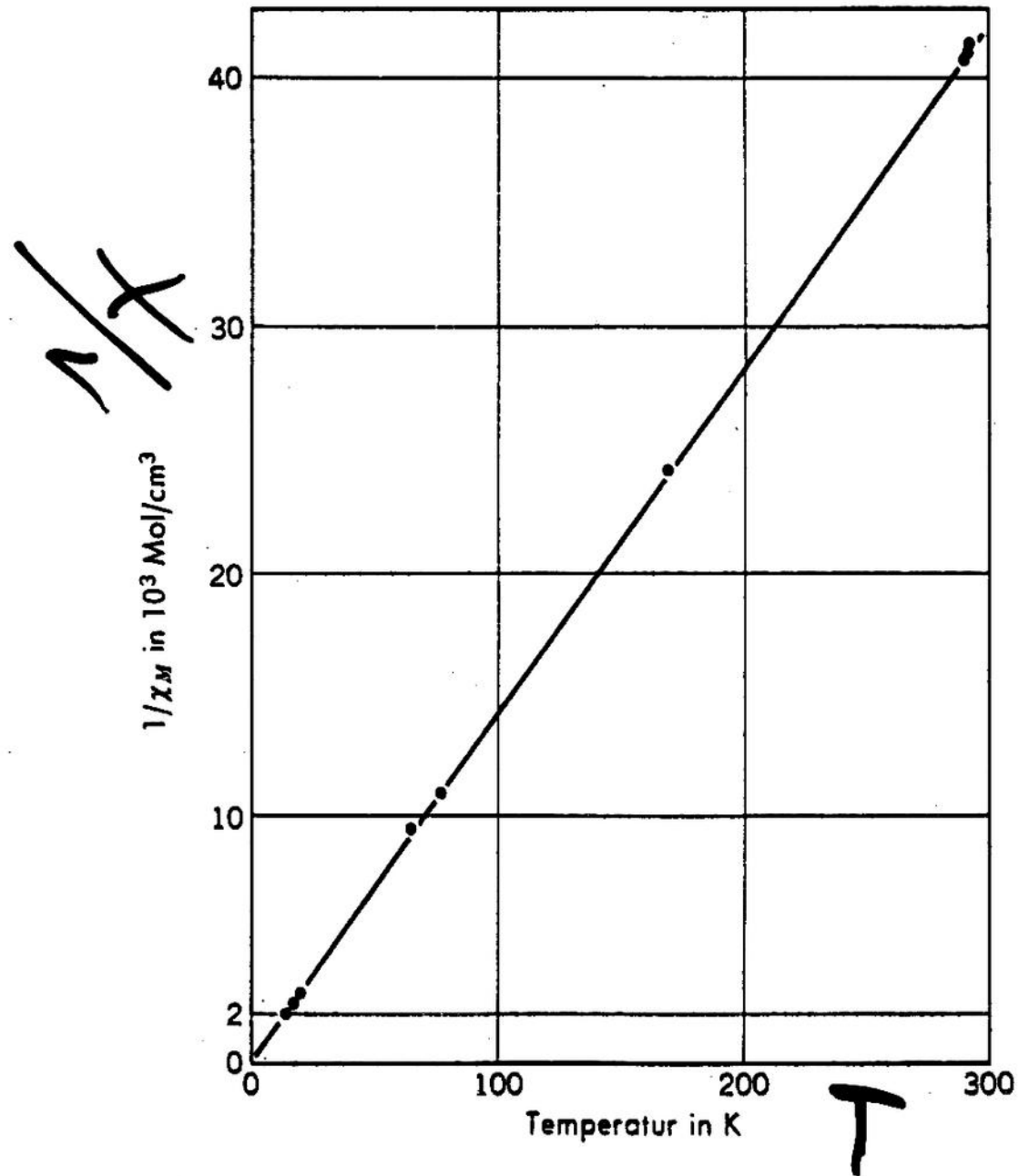
- Diamagnet: magnetisches Momente nur in äußerem Feld
Larmor-Diamagnetismus (atomar)
Landau-Diamagnetismus (freie Elektronen)
- Paramagnet: magnetische Momente ohne äußeres Feld
Langevin-Paramagnetismus (atomar)
Pauli-Paramagnetismus (freie Elektronen)

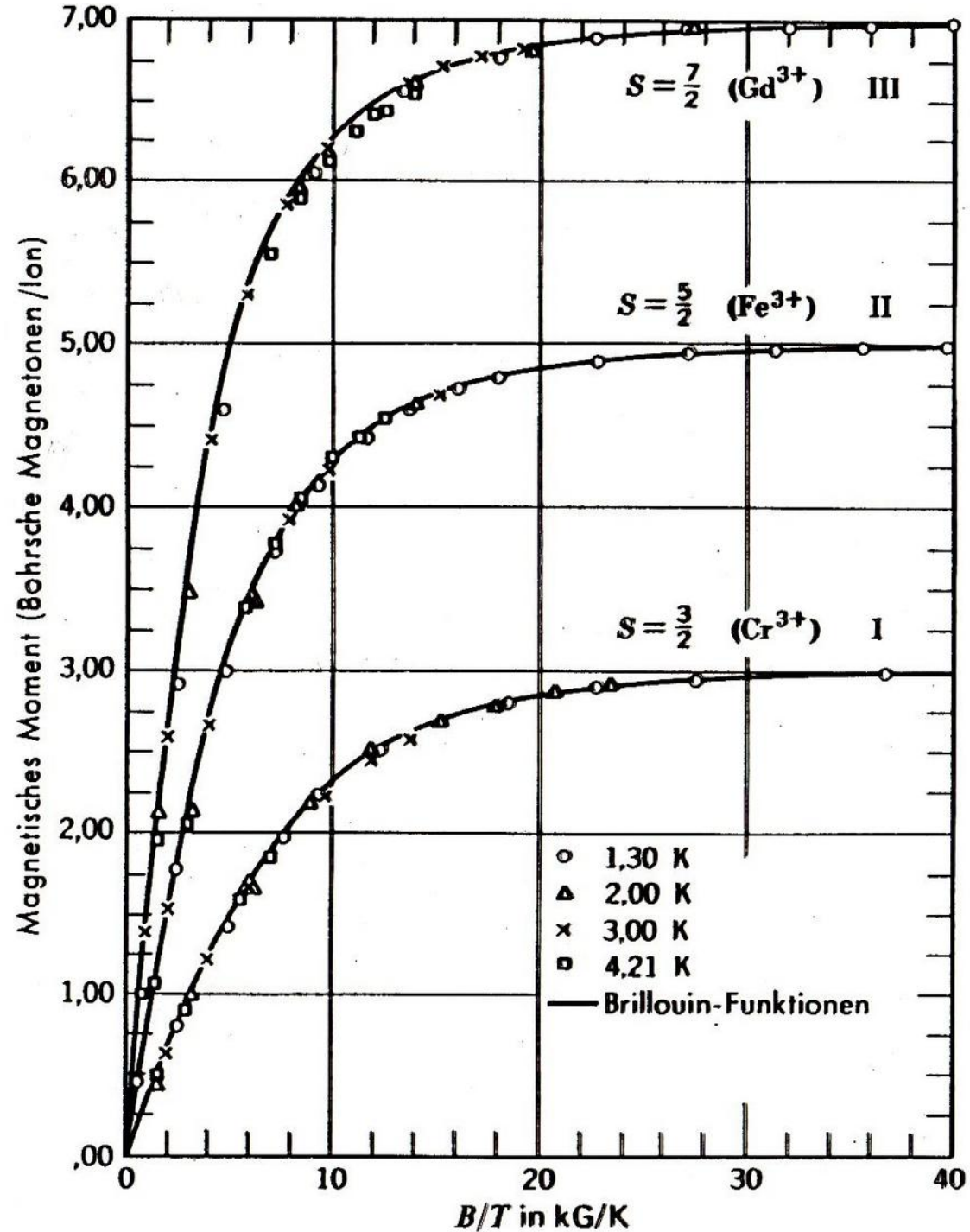
Langevin - Paramagnetismus





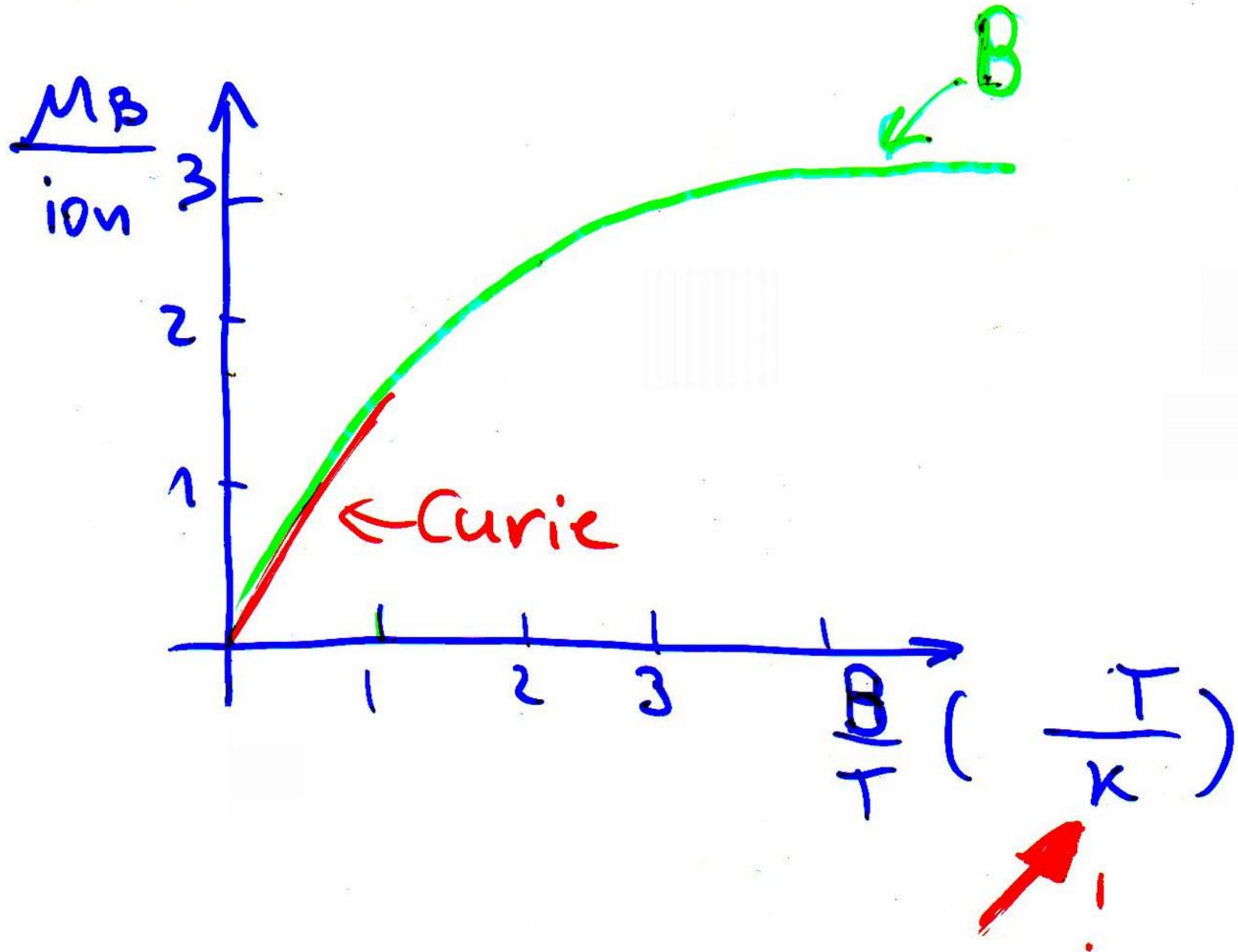
Temperaturabhängigkeit der reziproken Suszeptibilität $1/\chi$ eines Gadoliniumsalzes Gd $(C_2H_5SO_4)_3 \cdot 9 H_2O$. Die gerade Linie entspricht dem Curiegesetz (nach L. C. Jackson und H. Kamerlingh Onnes).





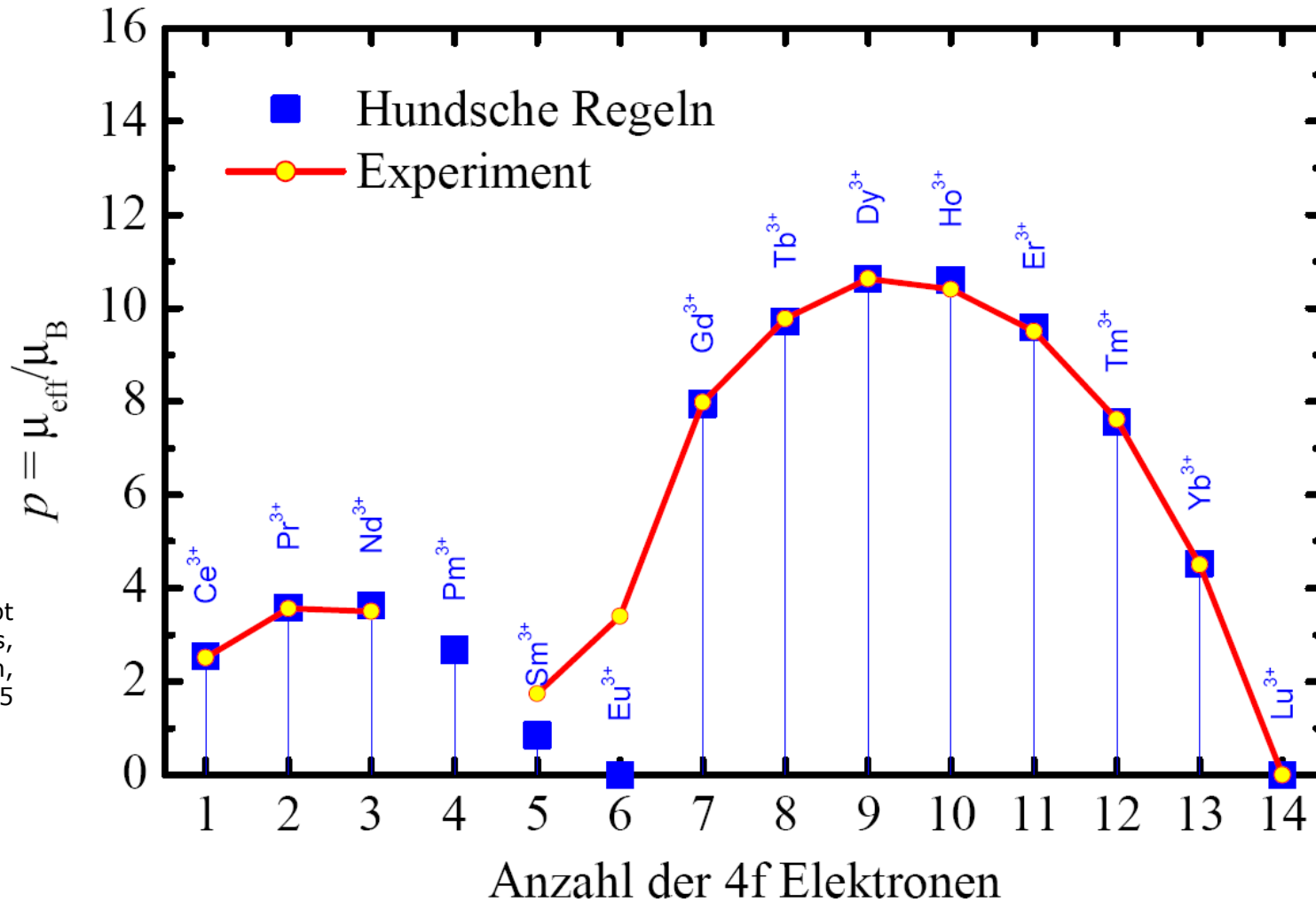
Abhängigkeit des magnetischen Moments von B/T für kugelförmige Proben aus (I) Kalium-Chrom-Alaun, (II) Eisen-III-Alaun und (III) Gadolinium-Sulfat-Oktahydrat. Bei 1,3 K und etwa 50 000 Gauß wird eine 99,5%ige magnetische Sättigung erreicht. [Nach

Zimmertemperatur = 293 K



Effektive Magnetonezahl p der 4f-Ionen

$$\chi = \frac{N}{V} \frac{\mu_B^2 \mu_0}{3k_B T} g_j^2 j(j+1) = \frac{N}{V} \frac{\mu_B^2 \mu_0}{3k_B T} p^2 \quad p = g_j \sqrt{J(J+1)}$$



Skript
Magnetismus,
TU München,
WS 2004/5

Seltene Erden: Erwartetes p passt gut zu experimentellen Werten, denn die magnetisch relevanten 4f-Elektronen werden durch 5sp-Elektronen gut von den Nachbarn abgeschirmt. Verhalten sich fast wie einzelne Ionen.

Effektive Magnetonezahl: 3d-Ionen

			Exp.	$\mu(J= L+S)$	$\mu(J=S)$
Cr ³⁺	3d ³	⁴ F _{3/2}	3.7	0.77	3.87
Fe ²⁺	3d ⁶	⁵ D ₄	5.4	6.7	4.9
Co ²⁺	3d ⁷	⁴ F _{9/2}	4.8	6.54	3.87
Ni ²⁺	3d ⁸	³ F ₄	3.2	5.59	2.83
Cu ²⁺	3d ⁹	² D _{5/2}	1.9	3.55	1.73

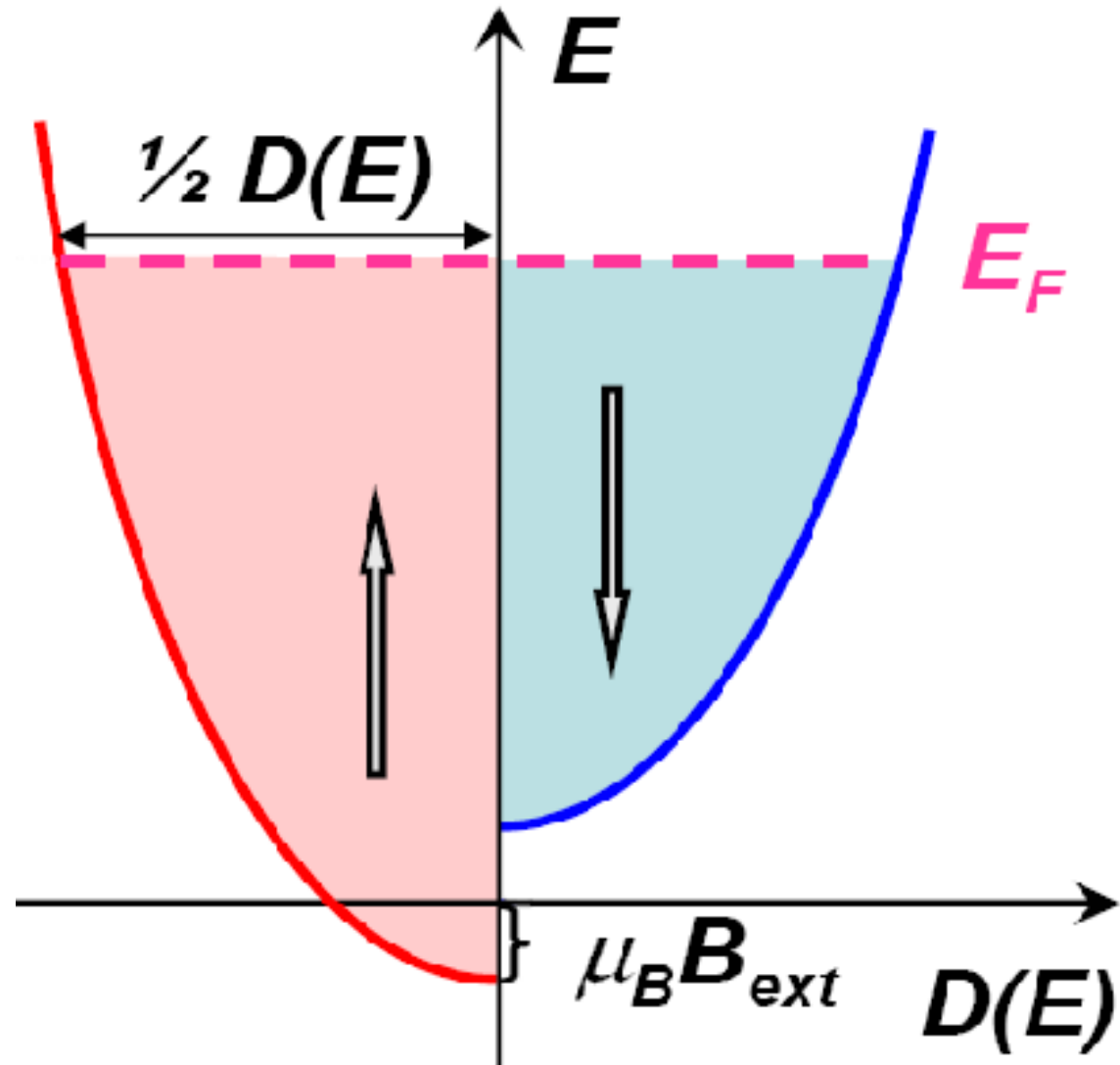
Schlechte Übereinstimmung bei Übergangsmetallen

Ursache: größere Kristallfeldaufspaltung;

Ausgangslage "Zeemaneffekt hebt m_j -Entartung auf"

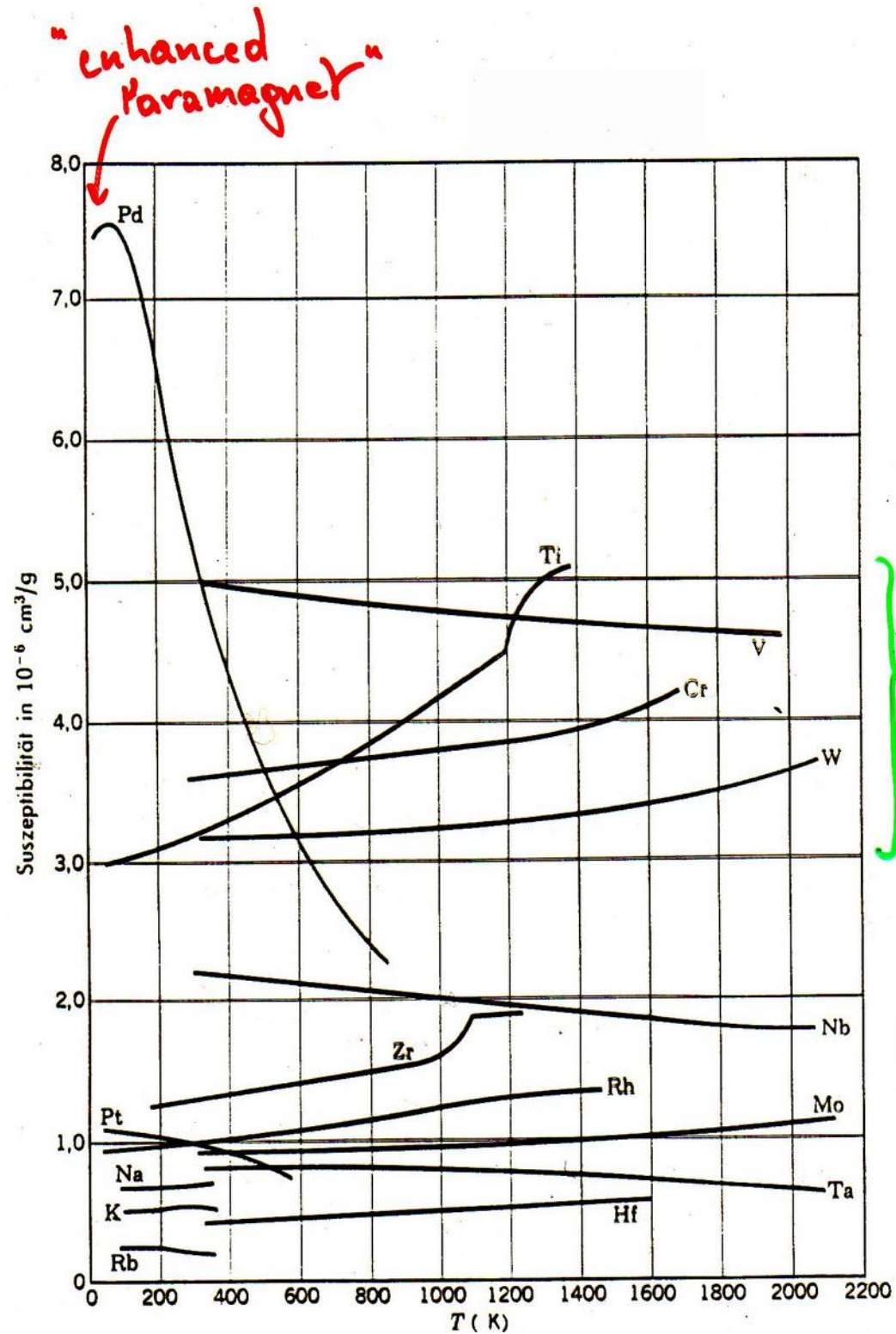
nicht mehr gegeben

Paulischer Paramagnetismus



Suszeptibilität von Metallen

- "T-unabhängig"
- $D(E_F)$



Larmor - Diamagnetismus

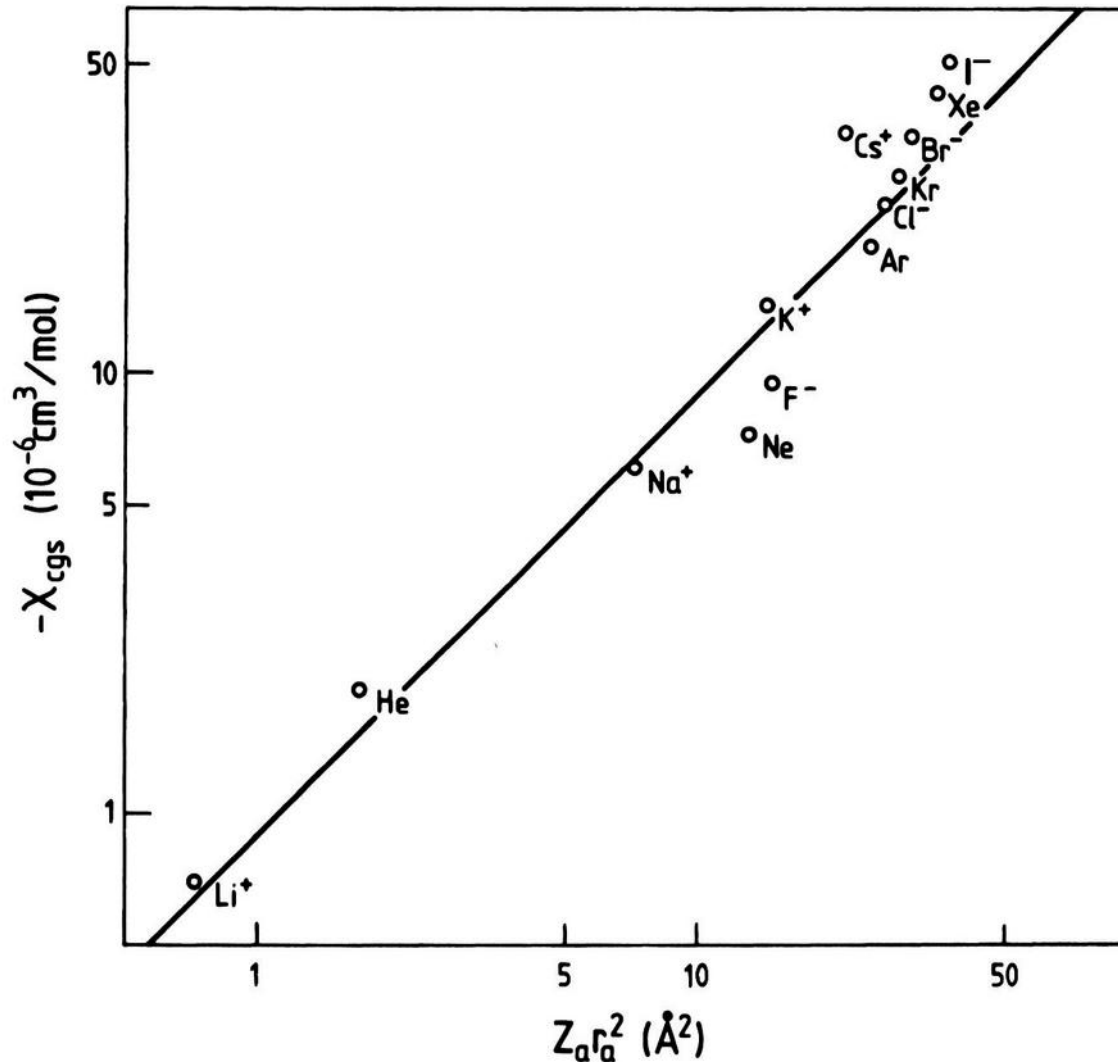


Fig. 8.1. Molar diamagnetic susceptibility (in cgs units) of atoms and ions with closed shells as function of $Z_a r_a^2$. In order to obtain the susceptibility of a material, e.g. a gas composed of these atoms or ions, one has to multiply by the density in mol cm^{-3} . If one inserts the value of the ionic radius r_a in [\AA], then the value of $Z_a r_a^2$ immediately provides an estimate for χ in units of $10^{-6} \text{ cm}^3/\text{mol}$. To convert χ to SI units one must simply multiply by 4π

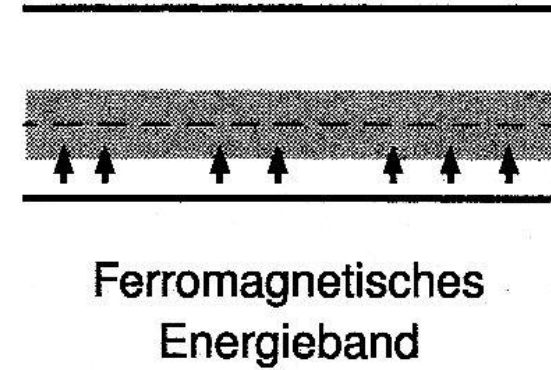
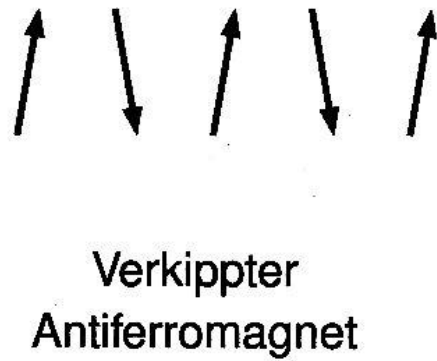
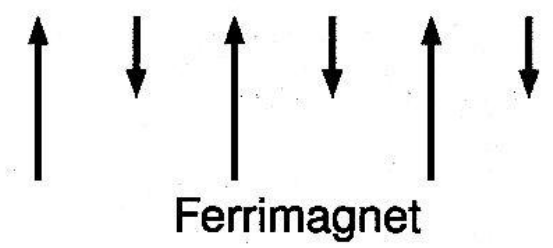
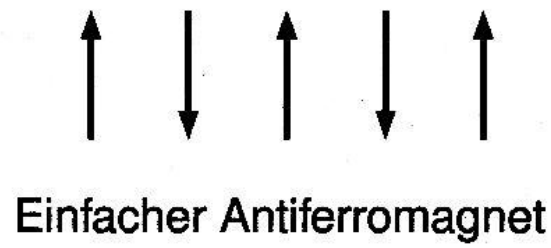
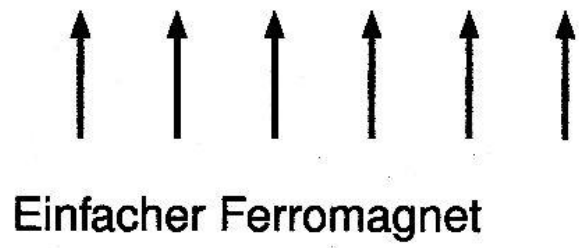
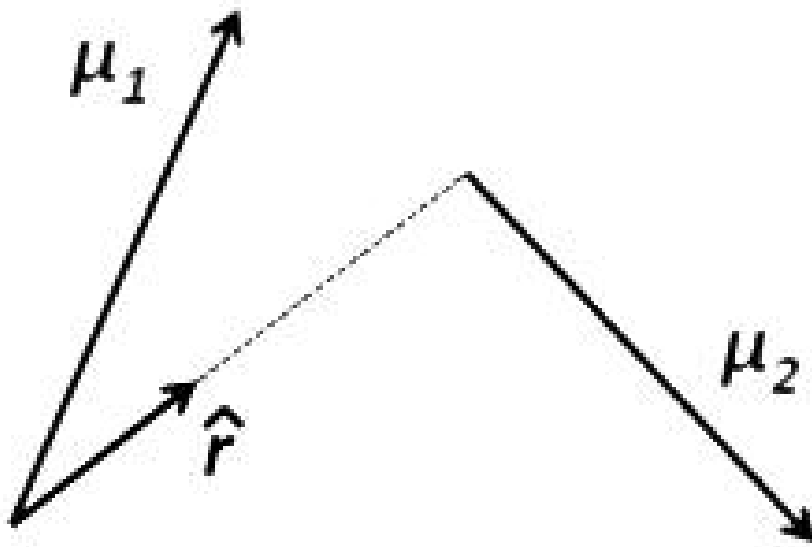


Bild 12.1: Ordnungszustände von Elektronenspins.

1.3_{jdkr} magnetisch relevante Wechselwirkungen zwischen Elektronen



Die nicht.

Austauschwechselwirkung

H₂ Molekül als Modell für magnetische Isolatoren

$$H(1,2) = H(1) + H(2) + H_{\text{WW}}(1,2) \quad 1,2: \text{Elektronen, A,B: Kerne}$$

$$\text{Ansatz: } \Psi = (\Psi_A(1) + \Psi_B(1)) (\Psi_A(2) + \Psi_B(2))$$

ionische Anteile weglassen – Heitler-London-Näherung

Antisymmetrie von Ψ (Ort und Spin)

Singulett $S=0$ Triplett $S=1, m_s = -1, 0, 1$

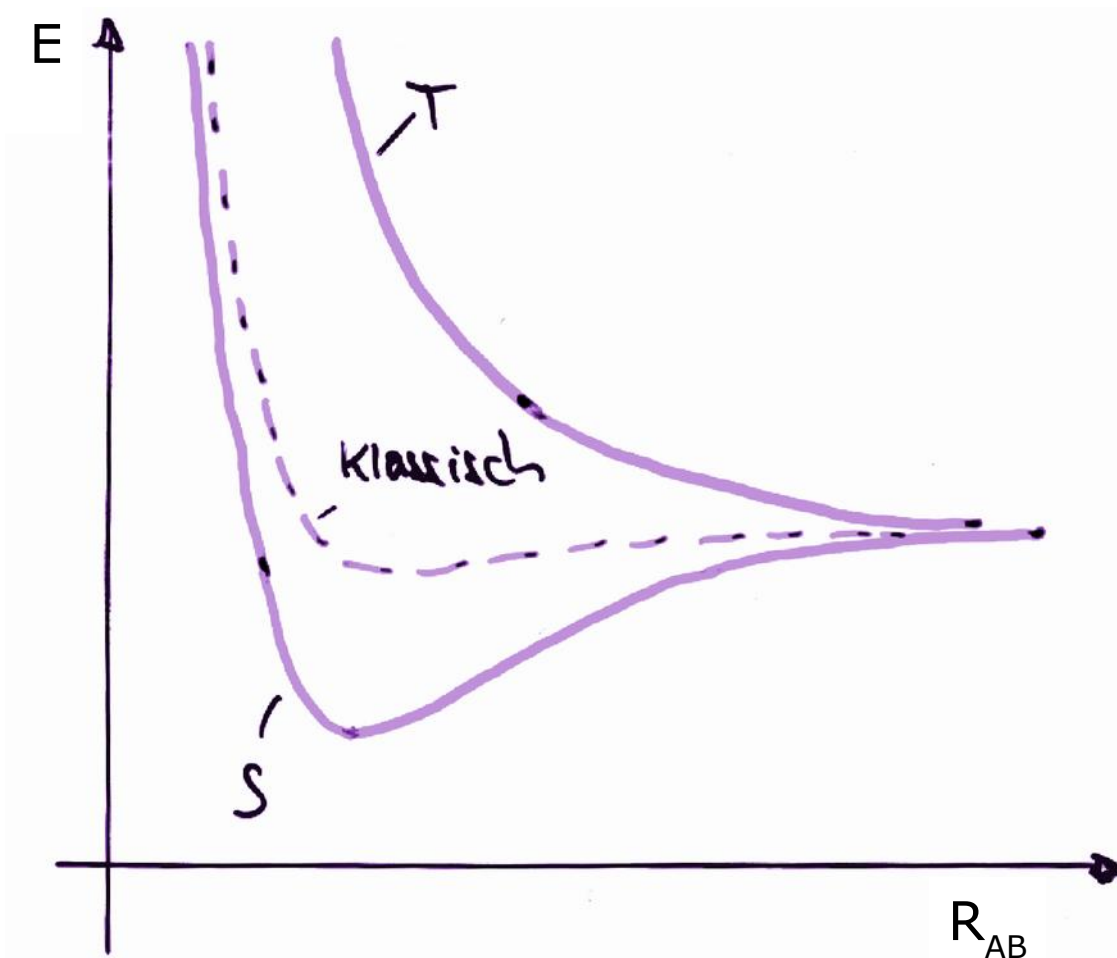
$$E = 2E_I + \frac{C \pm A}{1 \pm S}$$

- $+$: Singulett, $-$: Triplett
- Ionisierungsenergie, Coulomb-, Austausch-, Überlappintegral

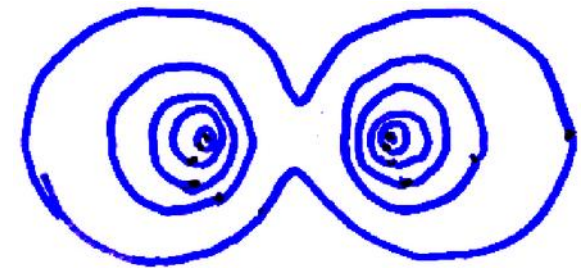
$$E = 2E_I + \frac{C \pm A}{1 \pm S}$$

Triplett: ungebunden

Singulett: 3 eV Bindung (Exp.: 4,5 eV)



Triplett



Singulett

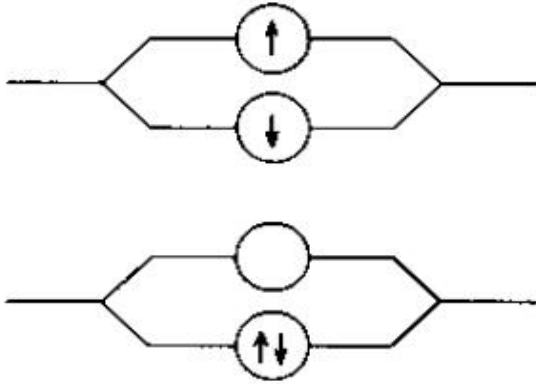


- Pauli-Prinzip fordert Antisymmetrie der gesamten Wellenfunktionen
- Symmetrie des Spinteils → verschiedene Ortswellenfunktionen von Singulett- und Triplett
- Coulombwechselwirkung ergibt unterschiedliche Energien

Summa summarum:

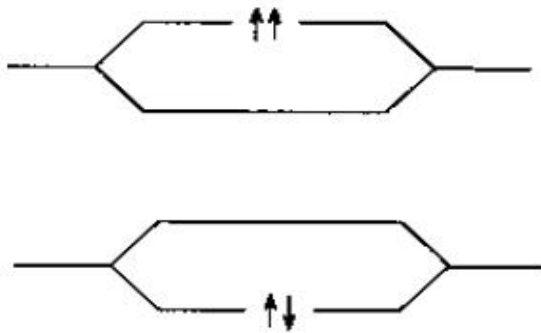
Elektrostatische WW erzeugt magnetische WW

1-Elektronen-Modell



Niveaubesetzung 0, 1 oder 2 Elektronen
Singulett- oder Triplett im 1. angeregten Zustand,
entartet

2-Elektronen-Modell

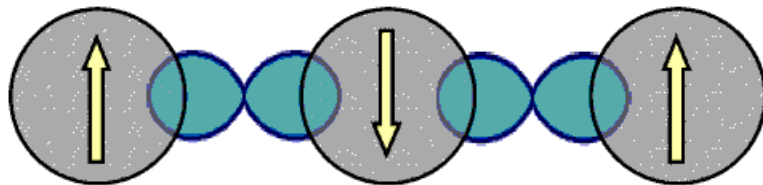
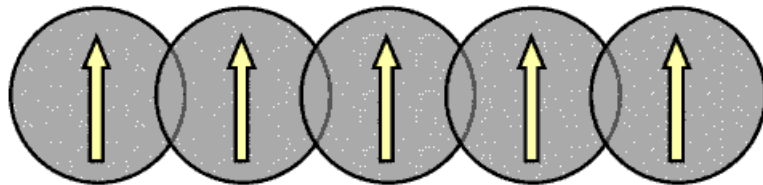


Energie eines einzelnen Elektrons nicht definiert
Triplett ist 1. angeregter Zustand

Wechselwirkungen lokalisierter Momente

Direkter Austausch

z. B. Fe, Co, Ni



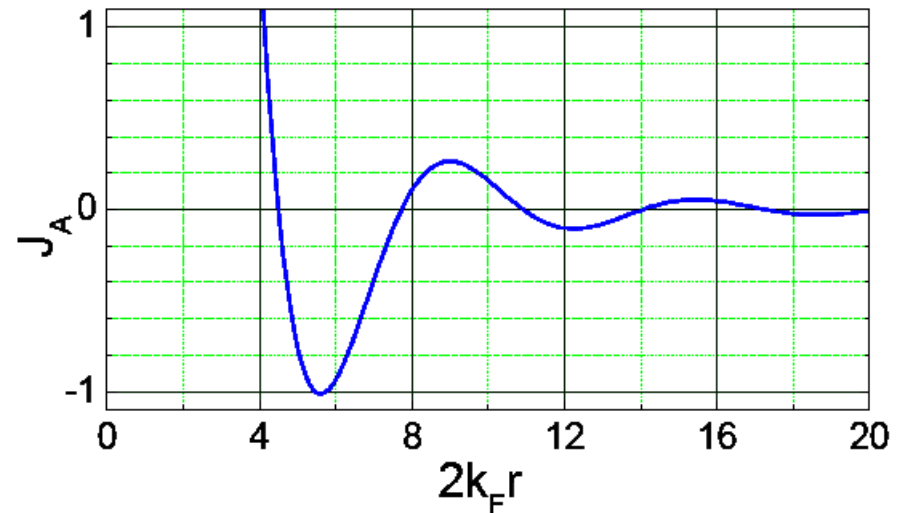
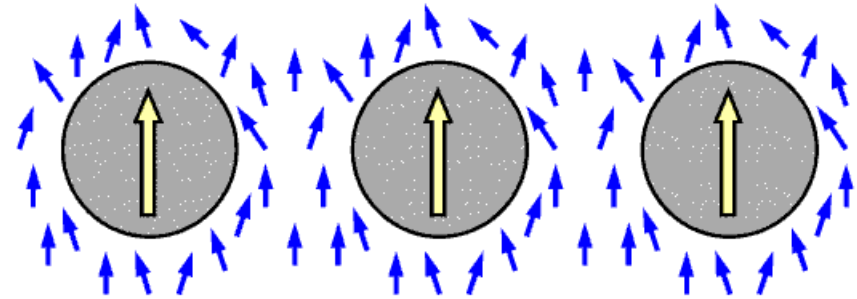
Mn²⁺ O²⁻ Mn²⁺ O²⁻ Mn²⁺

Superaustausch über
diamagnetische O²⁻-Ionen

Mn $d_z^2 \uparrow$ \downarrow O $p_z \uparrow \downarrow$ Mn d_z^2

indirekter Austausch über Leitungs-e⁻

z. B. Gd[4f] e⁻ Gd[4f]

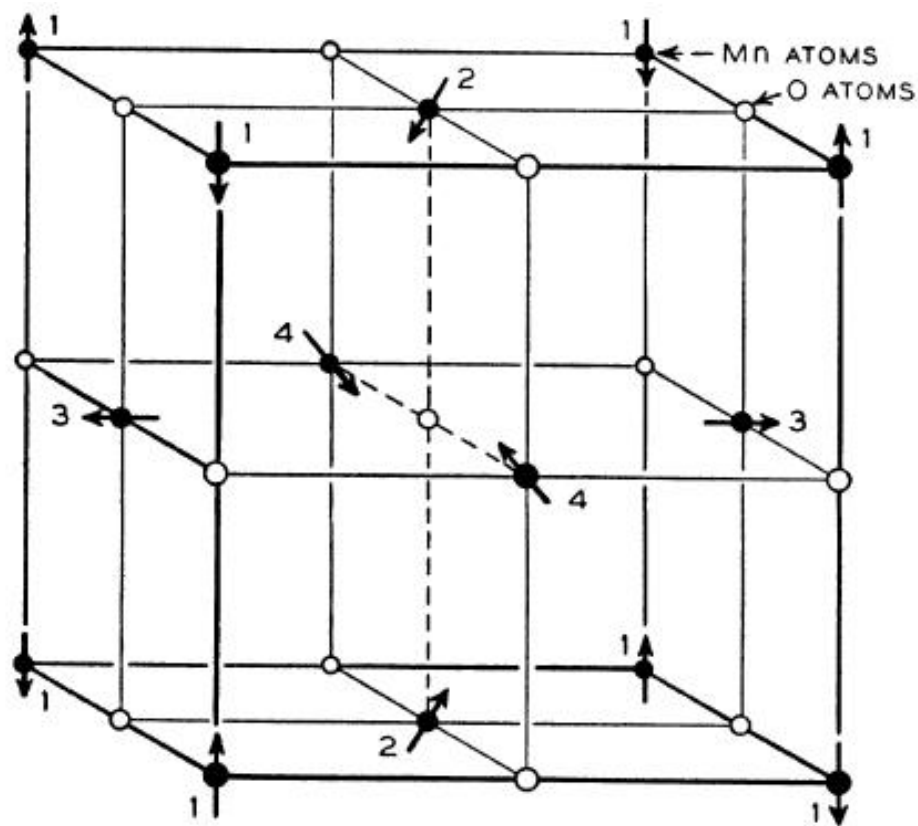


RKKY-Wechselwirkung

Austauschkonstante J_A

Rudermann, Kittel, Kasuya, Yosida

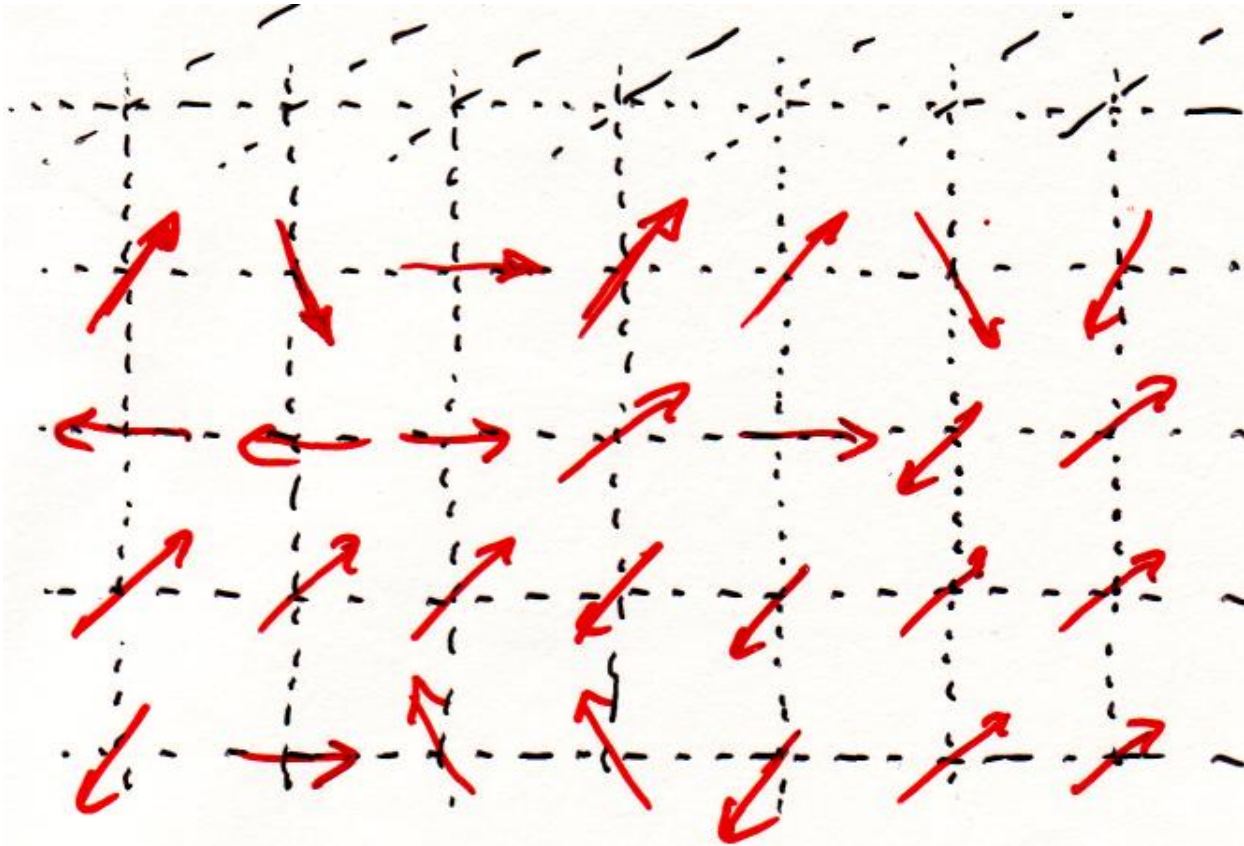
Antiferromagnetische Kopplung durch Superaustausch



MnO crystal

Heisenbergmodell

$$H = -\frac{1}{2} \sum_{j \neq i} J_{ij} \vec{S}_i \vec{S}_j + \vec{H} \sum_i \vec{S}_i \quad J = E_S - E_T$$

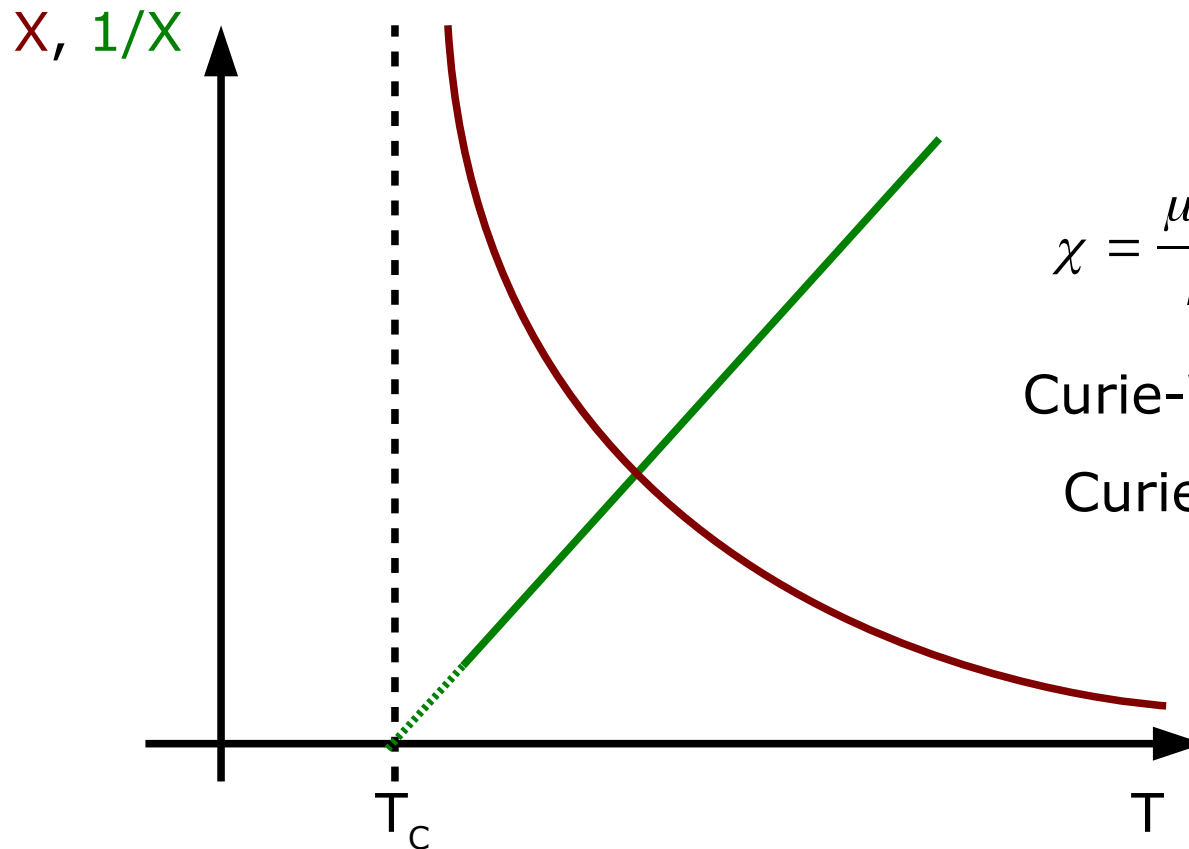


Isingmodell: nur S_z

W. Lenz-Ising?



Paramagnetismus **wechselwirkender** Atome



$$\chi = \frac{\mu_0 \mathbf{M}}{\mathbf{B}_a} = \frac{C}{T - T_C}$$

Curie-Weiss-Gesetz

Curietemperatur

$$\lambda = \frac{2zJ}{g^2 \mu_B^2 N}$$

$$C = \frac{N g^2 \mu_B^2 j(j+1)}{3k_B}$$

$$\rightarrow T_C = \frac{2zJ j(j+1)}{3k_B}$$

Genauere Lösung des H'bergmodells: $\chi \propto \frac{1}{(T - T_C)^{4/3}}$

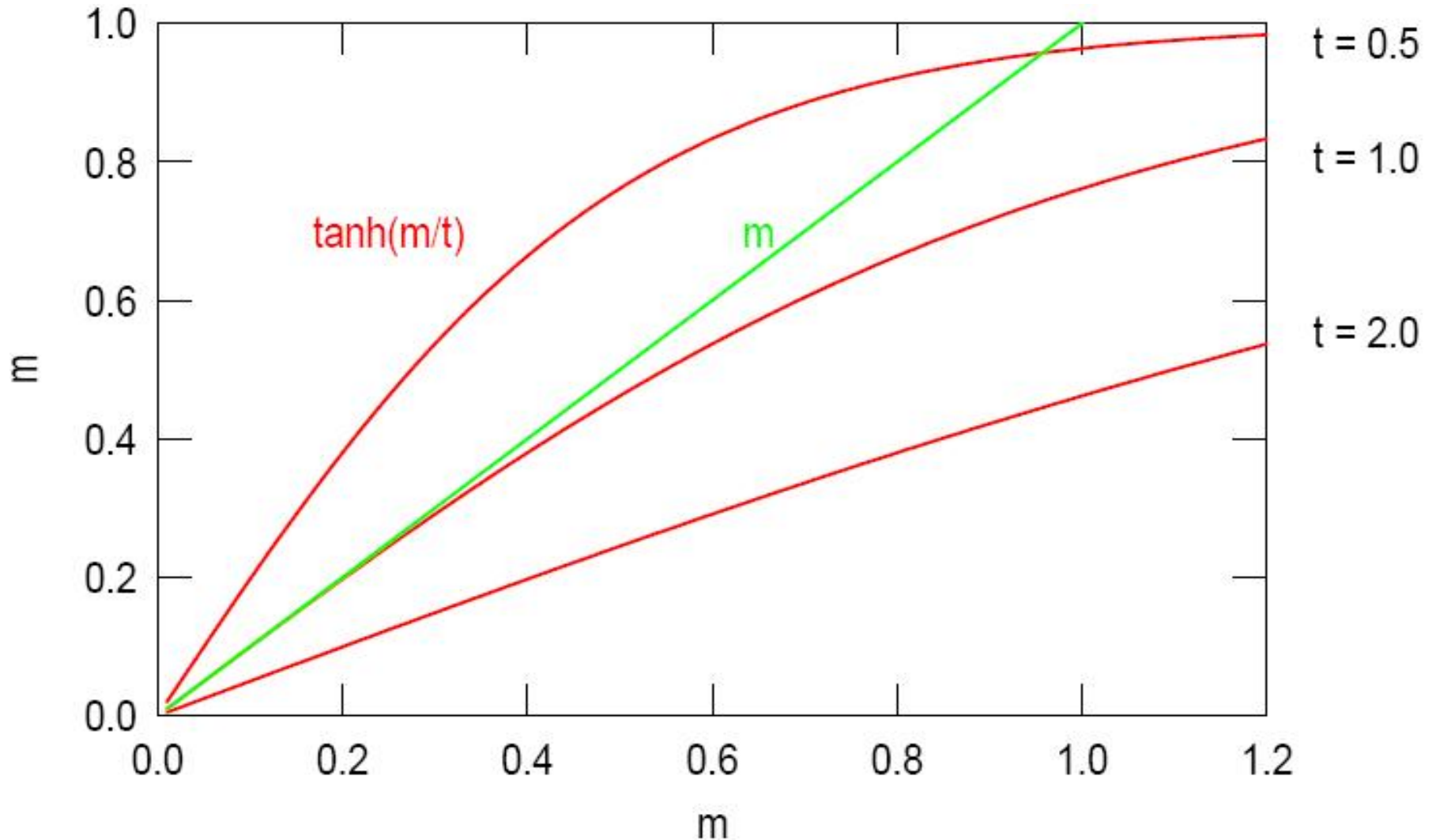
Einige wichtige Ferromagnete:

Curietemperaturen T_c , $k_B T_c$, Austauschfeld B_M

	T_c [K]	$k_B T_c$ [meV]	B_M [T]
Fe	1043	89.9	1552
Co	1393	120	2074
Ni	631	54.4	939
Gd	290	25.0	432

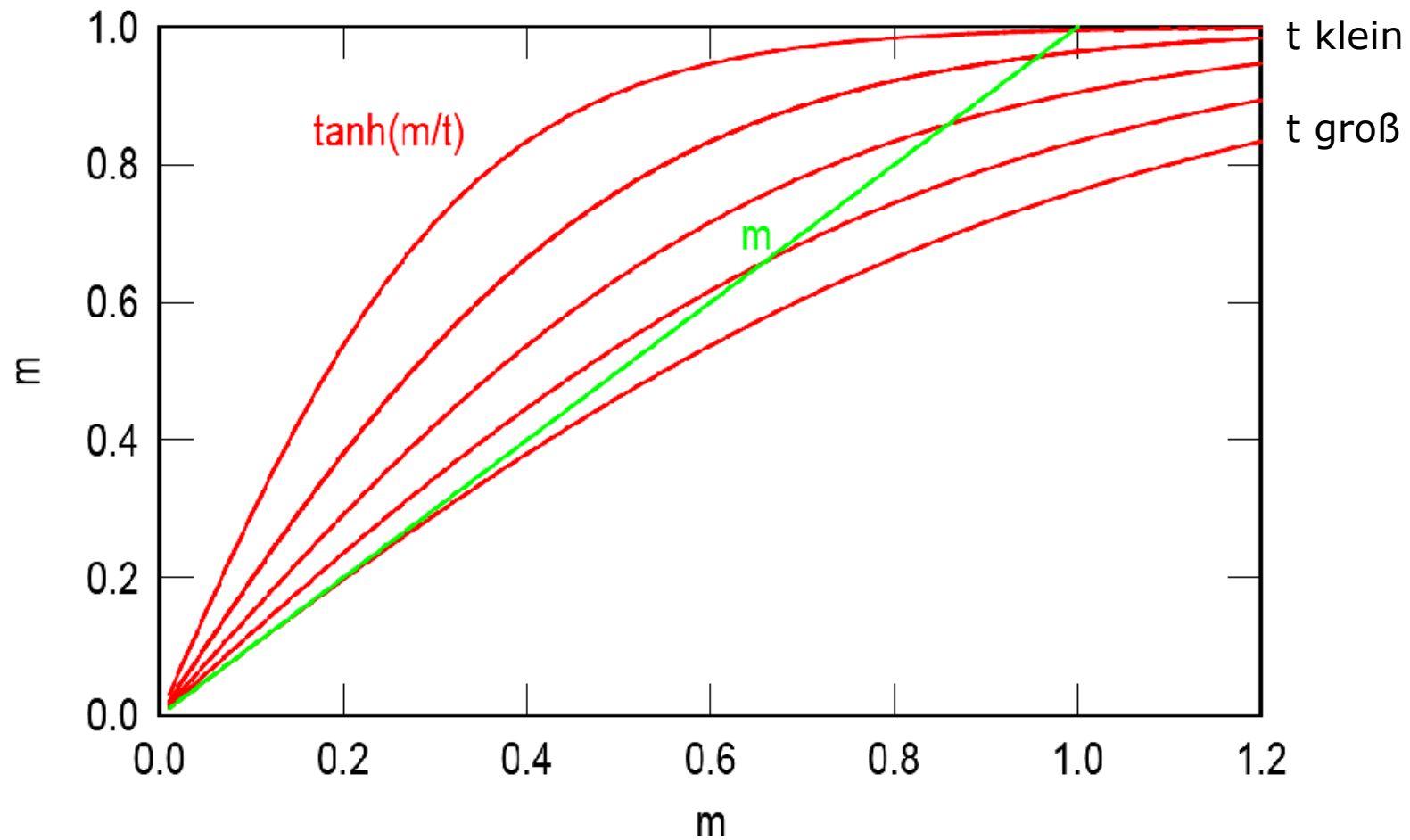
Graphische Bestimmung der Magnetisierung eines Spin-1/2- Ferromagneten

$$m = \frac{V}{N} \frac{1}{\mu} M \quad t = \frac{k_B T}{N \mu_0 \mu^2 \lambda} = \frac{T}{T_c} \quad \text{mit } T_c = \frac{N \mu_0 \mu^2 \lambda}{k_B}$$

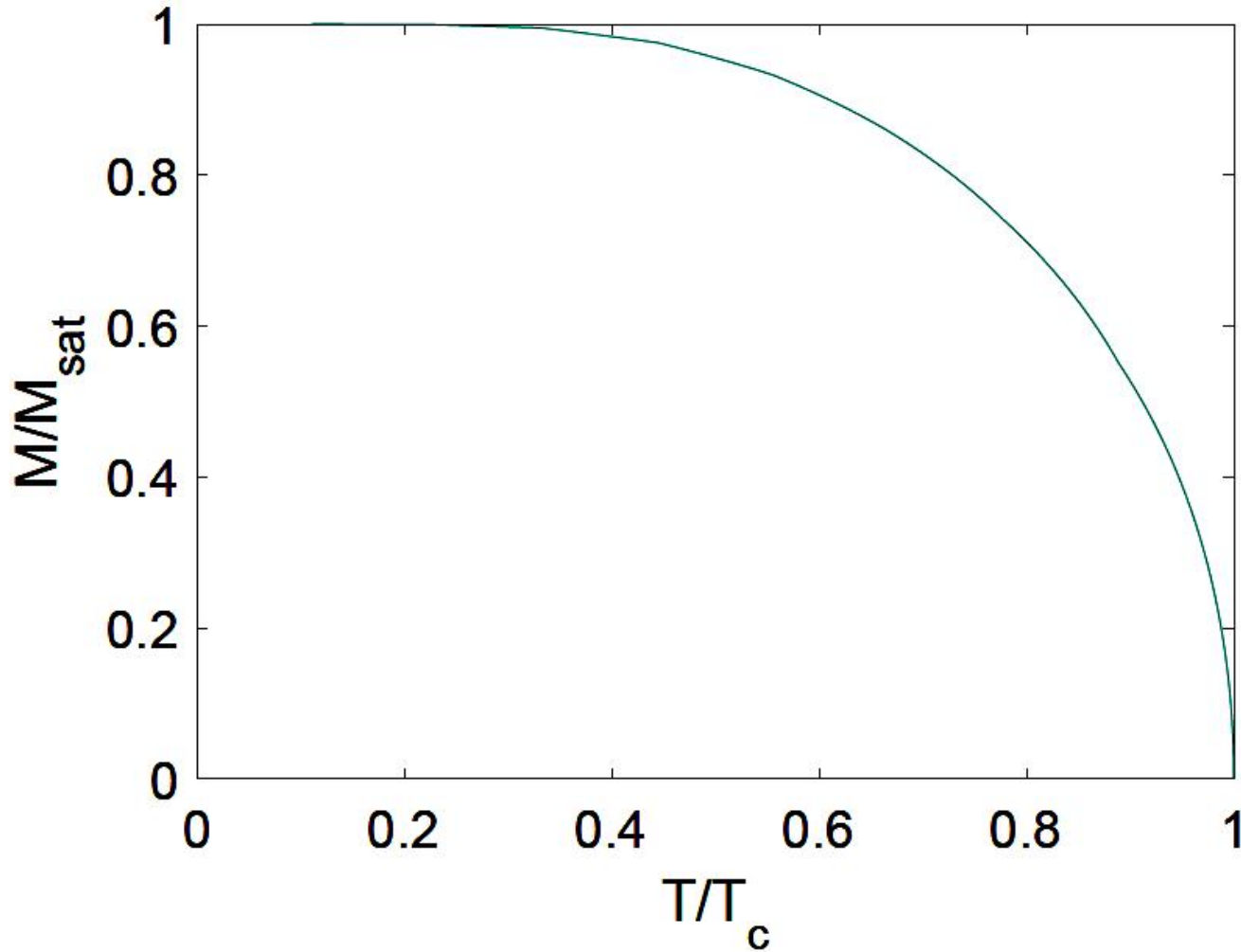


Schnittpunkt der Brillouin-Funktion $B_{1/2}$ mit Gerade $m=m$

$m(t)$ in Weiss'scher MF-Näherung



Mean-field Solution for Spin 1/2 Ferromagnet



```
clear;
Nm=100;
Nt=10;
[m,t]=meshgrid([0:1./(Nm-1):1],[0:1./(Nt-1):1]);
F=tanh(m./t)-m;
contour(t,m,F,[0 0]);
```

```
clear;
punkte=1000;
for tt=1:punkte
    t=tt/punkte;
    myfun = @(m,t) tanh(m/t)-m;
    fun = @(m) myfun(m,t);
    temp(tt)=t;
    m(tt)=fzero(fun,1);
end
plot(temp,m);
```

M(T): Experiment und Molekularfeldnäherung

mean field approximation

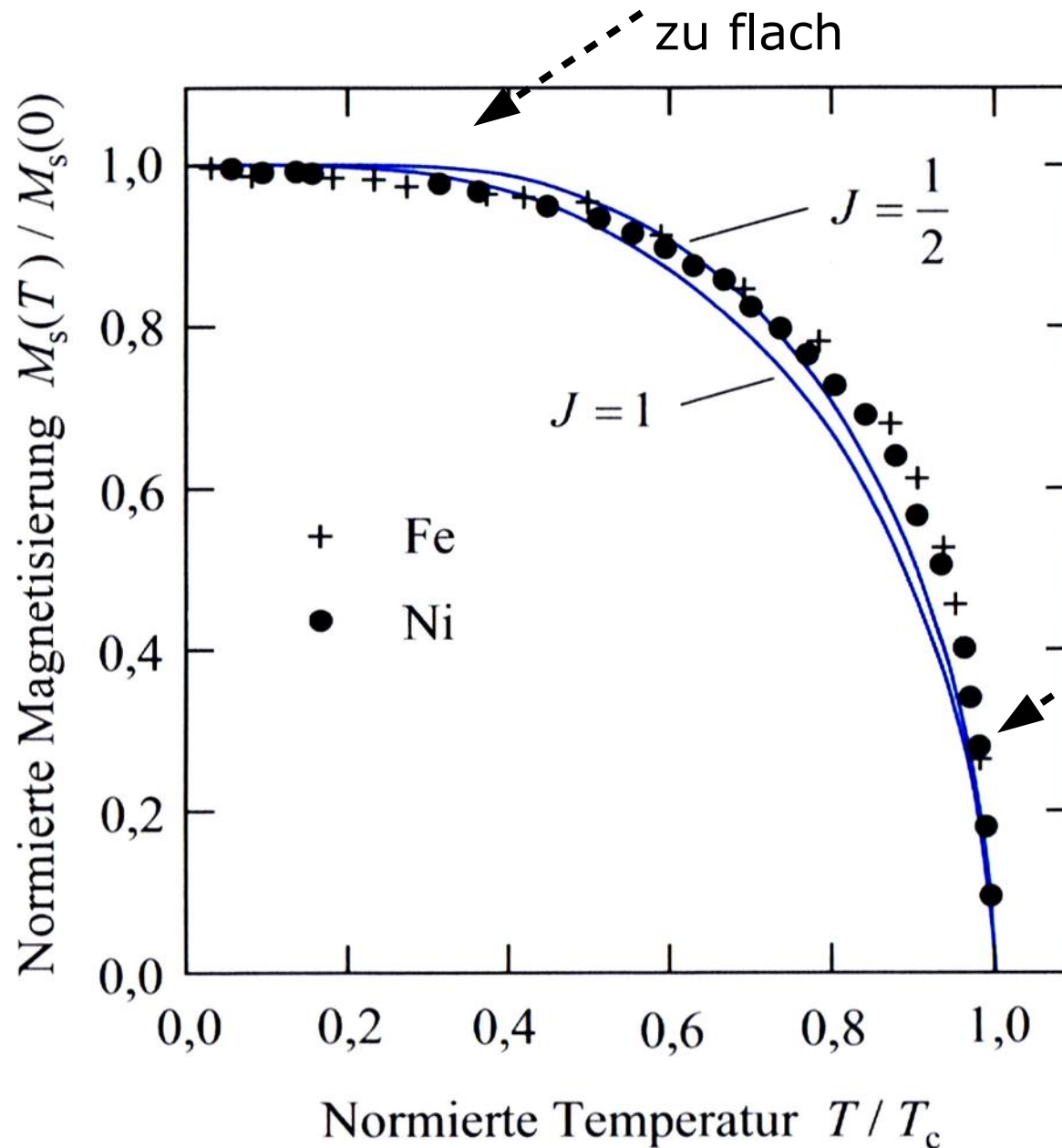
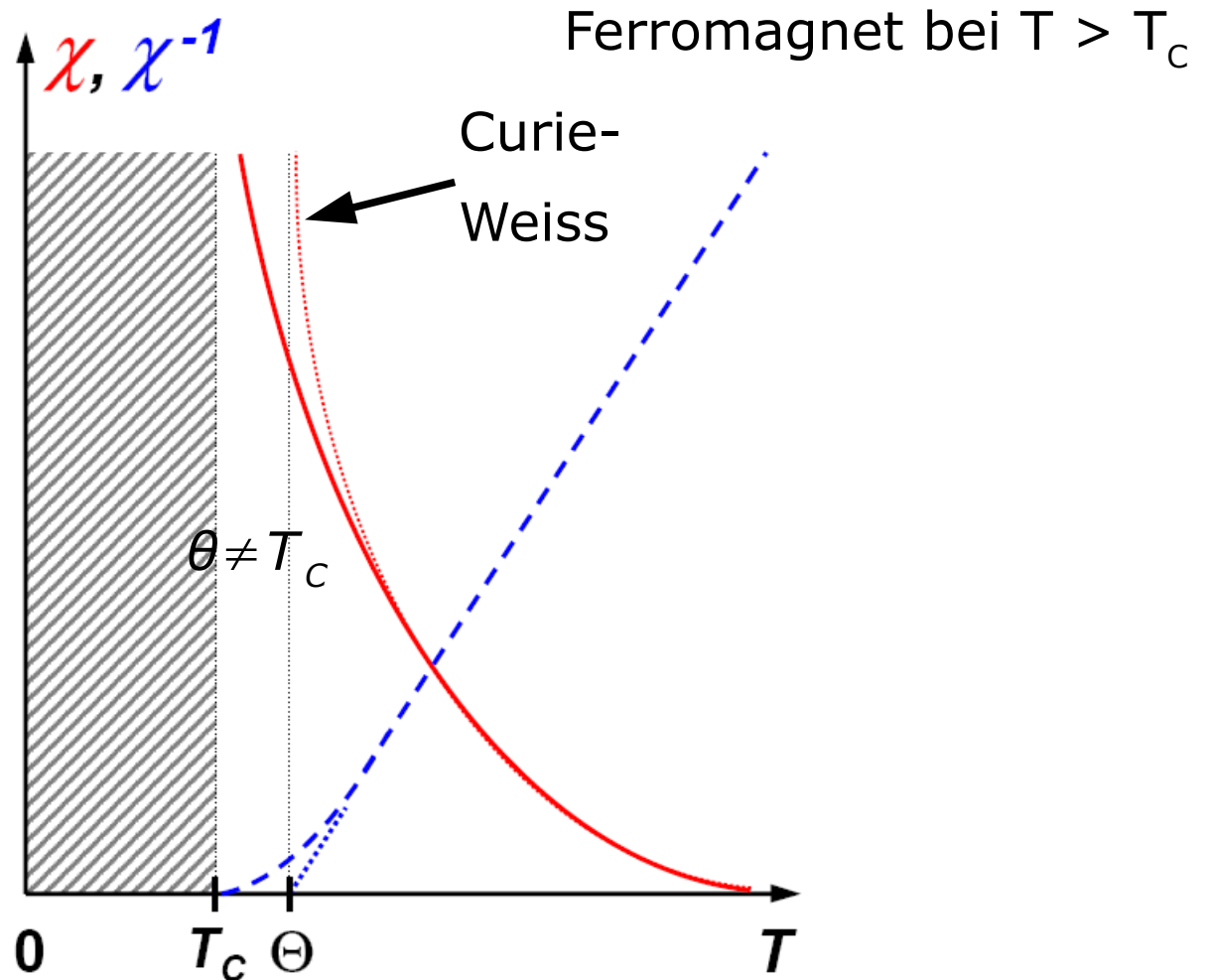
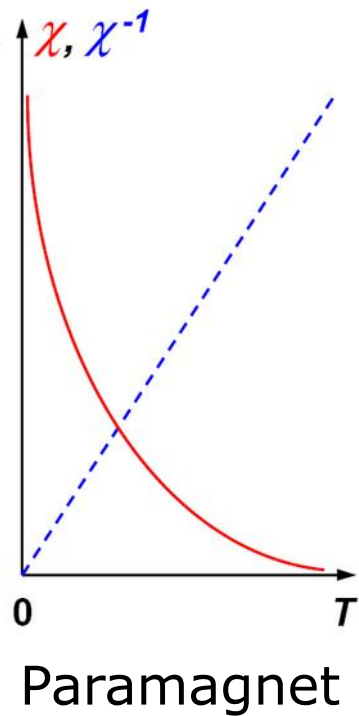


Bild 12.7: Spontane Magnetisierung von Nickel und Eisen als Funktion der Temperatur, aufgetragen in normierten Einheiten. Die durchgezogenen Kurven erhält man in der Molekularfeldnäherung für die Werte $J = 1/2$ und $J = 1$. (Nach P. Weiss, R. Forrer, Ann. Phys. **5**, 153 (1926) ; H. Potter, Proc. Roy. Soc. (London) **A 146**, 362 (1934)).

T-Abhängigkeiten von **Suszeptibilität** und **reziproker Suszeptibilität**



FM: Curie-Weiss-Gesetz bei $T \gg T_C$ gute Näherung

Aber: Extrapolation von $1/\chi$ auf 0: paramagnetische Curie-Temperatur $\theta \neq T_C$

Ursache: langreichweitige Fluktuationen (Phasenübergang 2. Ordnung) Neel7

"Bilanz" der Weiss'schen MF-Näherung

- Einfach & beliebt
- Curie-Weiss-Gesetz bei $T > T_C$ o.k.
- $M(T)$ grob richtig
- kritischer Exponent β falsch; $M/M_0 = (1 - T/T_C)^\beta$
- bei $T \rightarrow 0$ Abweichungen, weil Spinwellen nicht berücksichtigt