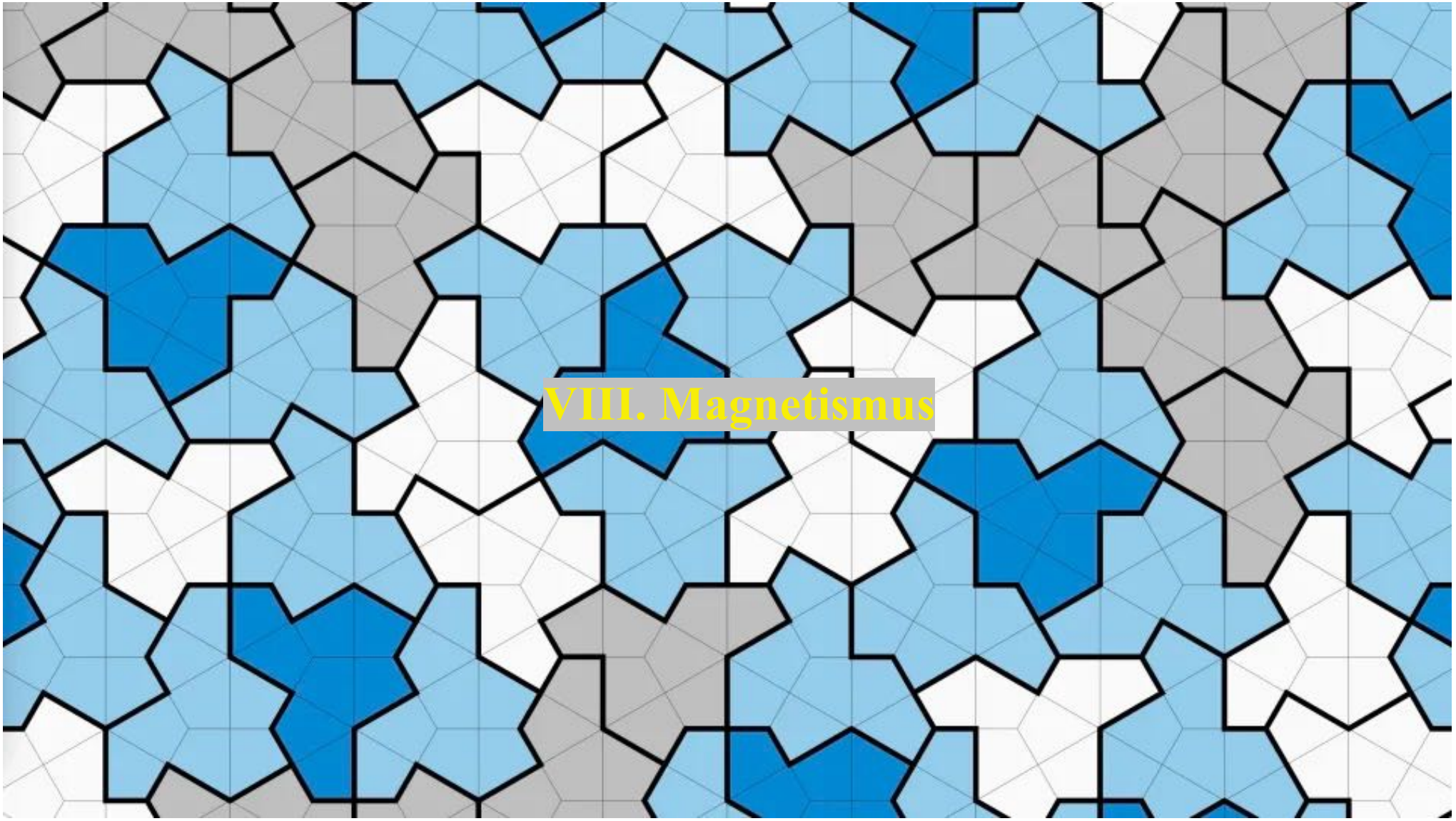

VIII. Magnetismus

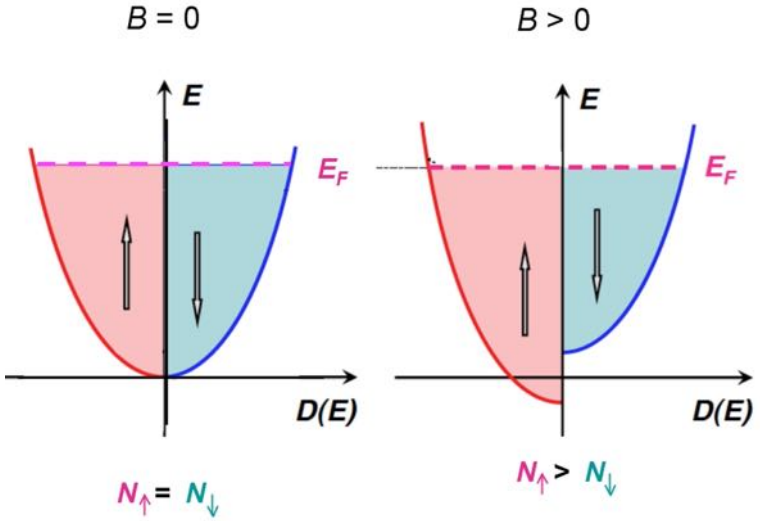
$$\vec{B} = \mu_0(\vec{M} + \vec{H}) \qquad \vec{B} \approx \mu_0 \vec{H}$$

$$\chi = \frac{M}{H} \qquad \chi \approx \frac{\mu_0 M}{B}$$

$M << H$ ***Temperaturunabhängige Beiträge:***

Pauli-Paramagnetismus

Metalle

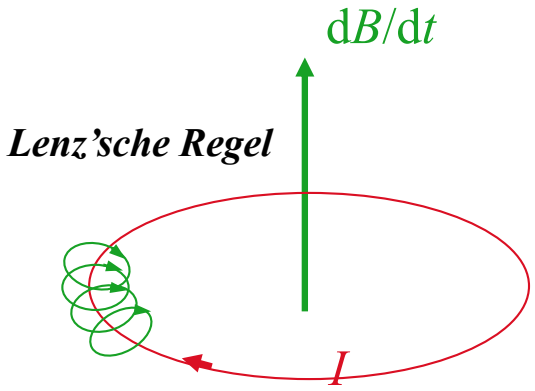


$$\chi_{Pauli} = \frac{\mu_0 \mu_B{}^2 D(E_F)}{V}$$

$$\approx \frac{3\mu_0 \mu_B{}^2}{2E_F}\frac{N}{V} \approx 10^{-5} > 0$$

Larmor-Diamagnetismus

alle Atome mit gefüllten Elektronenschalen



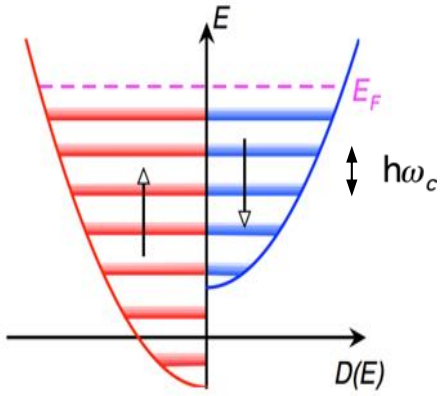
≈ atomare Abschirmströme

$$\chi_{Larmor} = -\frac{\mu_0 e^2 Z_a r_a{}^2}{m_e}\frac{N}{V} \approx -10^{-6} < 0$$

Z_a: Anzahl Elektronen in äusserster Schale
r_a: Atomradius

Landau-Diamagnetismus

Metalle



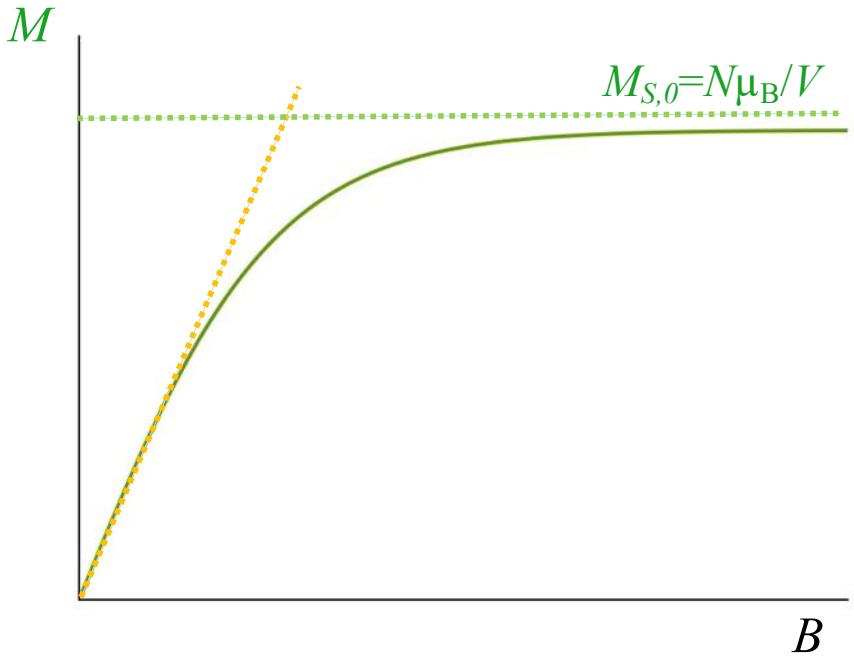
≈ Korrektur auf Grund der Landau-Quantisierung

$$\chi_{Landau} = -1/3\,\chi_{Pauli}$$

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{M} + \vec{H}) \qquad \vec{B} \approx \mu_0 \vec{H} \qquad M << H$$

$$\chi = \frac{M}{H} \qquad \chi \approx \frac{\mu_0 M}{B}$$

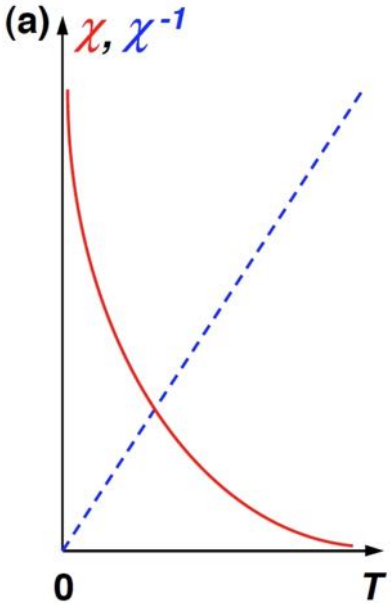
Isolierte magnetische Momente: Curie-Gesetz



$$M(B) = \mu_B \frac{N}{V} \tanh\left(\frac{\mu_B B}{k_B T}\right) \quad \text{für } s = +/-1/2$$

$$\chi_{Curie}(T) = \frac{\mu_0 \mu_B^{\,2}}{k_B T} \frac{N}{V} = \frac{C}{T} \quad (\mu_B B << k_B T)$$

Curie-Gesetz



Allgemeine isolierte magnetische Momente:

$M(B) = gJ\mu_B B_J(x)N/V$ mit "Brioullin-Funktion" $B_J(x)$ und $x = gJ\mu_B B/k_B T$

$$\chi_{Curie}(T) = \frac{\mu_0 \mu_B^{\,2} p^2}{3k_B T} \frac{N}{V} = \frac{C}{T} \qquad p = g\sqrt{J(J+1)} \qquad \vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$$

J:Gesamtdrehimpulsquantenzahl g: Landé-Faktor p: effektive Magnetonenzahl

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{M} + \vec{H}) \qquad \vec{B} \approx \mu_0 \vec{H} \qquad M << H$$

$$\chi = \frac{M}{H} \qquad \chi \approx \frac{\mu_0 M}{B}$$

Isolierte magnetische Momente: Curie-Gesetz

Ion	*Konfiguration*	*Schema* m_ℓ = +2, +1, 0, -1, -2,	*S*	*L*	*J*	*Term*	$p = g_J[J(J+1)]^{1/2}$	$p = g_S[S(S+1)]^{1/2}$	*p (Exp.)*
Ti^{3+} V^{4+}	$[Ar]3d^1$	↑	1/2	2	3/2	$^2D_{3/2}$	1.55	1.73	1.8
V^{3+}	$[Ar]3d^2$	↑ ↑	1	3	2	$^3F_2$	1.63	2.83	2.8
Cr^{3+} V^{2+}	$[Ar]3d^3$	↑ ↑ ↑	3/2	3	3/2	$^4F_{3/2}$	0.77	3.87	3.8
Mn^{3+} Cr^{2+}	$[Ar]3d^4$	↑ ↑ ↑ ↑	2	2	0	$^5D_0$	0	4.90	4.9
Fe^{3+} Mn^{2+}	$[Ar]3d^5$	↑ ↑ ↑ ↑ ↑	5/2	0	5/2	$^6S_{5/2}$	5.92	5.92	5.9
Fe^{2+}	$[Ar]3d^6$	↑↓ ↑ ↑ ↑	2	2	4	$^5D_4$	6.70	4.90	5.4
Co^{2+}	$[Ar]3d^7$	↑↓ ↑↓ ↑ ↑ ↑	3/2	3	9/2	$^4F_{9/2}$	6.63	3.87	4.8
Ni^{2+}	$[Ar]3d^8$	↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑ ↑	1	3	4	$^3F_4$	5.59	2.83	3.2
Cu^{2+}	$[Ar]3d^9$	↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑	1/2	2	5/2	$^2D_{5/2}$	3.55	1.73	1.9
Zn^{2+}	$[Ar]3d^{10}$	↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓	0	0	0	$^1S_0$	0	0	0

Grundzustandskonfiguration und effektive Magnetonenzahl p einiger Ionen der Übergangsmetalle.

Ion	*Konfiguration*	*Schema* m_ℓ = +3, +2, +1, 0, -1, -2, -3	*S*	*L*	*J*	*Term*	*p (berechnet)*	*p (Experiment)*
La^{3+}	$[Xe]4f^0$		0	0	0	$^1S_0$	0	0
Ce^{3+}	$[Xe]4f^1$	↑	1/2	3	5/2	$^2F_{5/2}$	2.54	2.4
Pr^{3+}	$[Xe]4f^2$	↑ ↑	1	5	4	$^3H_4$	3.58	3.5
Nd^{3+}	$[Xe]4f^2$	↑ ↑ ↑	3/2	6	9/2	$^4I_{9/2}$	3.62	3.5
Pm^{3+}	$[Xe]4f^4$	↑ ↑ ↑ ↑	2	6	4	$^5I_4$	2.68	--
Sm^{3+}	$[Xe]4f^5$	↑ ↑ ↑ ↑ ↑	5/2	5	5/2	$^6H_{5/2}$	0.84	1.5
Eu^{3+}	$[Xe]4f^6$	↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑	3	3	0	$^7F_0$	0	3.4
Gd^{3+}	$[Xe]4f^7$	↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑	7/2	0	7/2	$^8S_{7/2}$	7.94	8.0
Tb^{3+}	$[Xe]4f^8$	↑↓ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑	3	3	6	$^7F_6$	9.72	95
Dy^{3+}	$[Xe]4f^9$	↑↓ ↑↓ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑	5/2	5	15/2	$^6H_{15/2}$	10.63	10.6
Ho^{3+}	$[Xe]4f^{10}$	↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑ ↑ ↑ ↑	2	6	8	$^5I_8$	10.60	10.4
Er^{3+}	$[Xe]4f^{11}$	↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑ ↑ ↑	3/2	6	15/2	$^4I_{15/2}$	9.59	9.5
Tm^{3+}	$[Xe]4f^{12}$	↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑ ↑	1	5	6	$^3H_6$	7.57	7.3
Yb^{3+}	$[Xe]4f^{13}$	↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑	1/2	3	7/2	$^2F_{7/2}$	4.54	4.5
Lu^{3+}	$[Xe]4f^{14}$	↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓	0	0	0	$^1S_0$	0	0

Tabelle 12.1: Grundzustandskonfiguration und effektive Magnetonenzahl p der dreiwertigen Ionen der Seltenen Erden.

Allgemeine isolierte magnetische Momente:

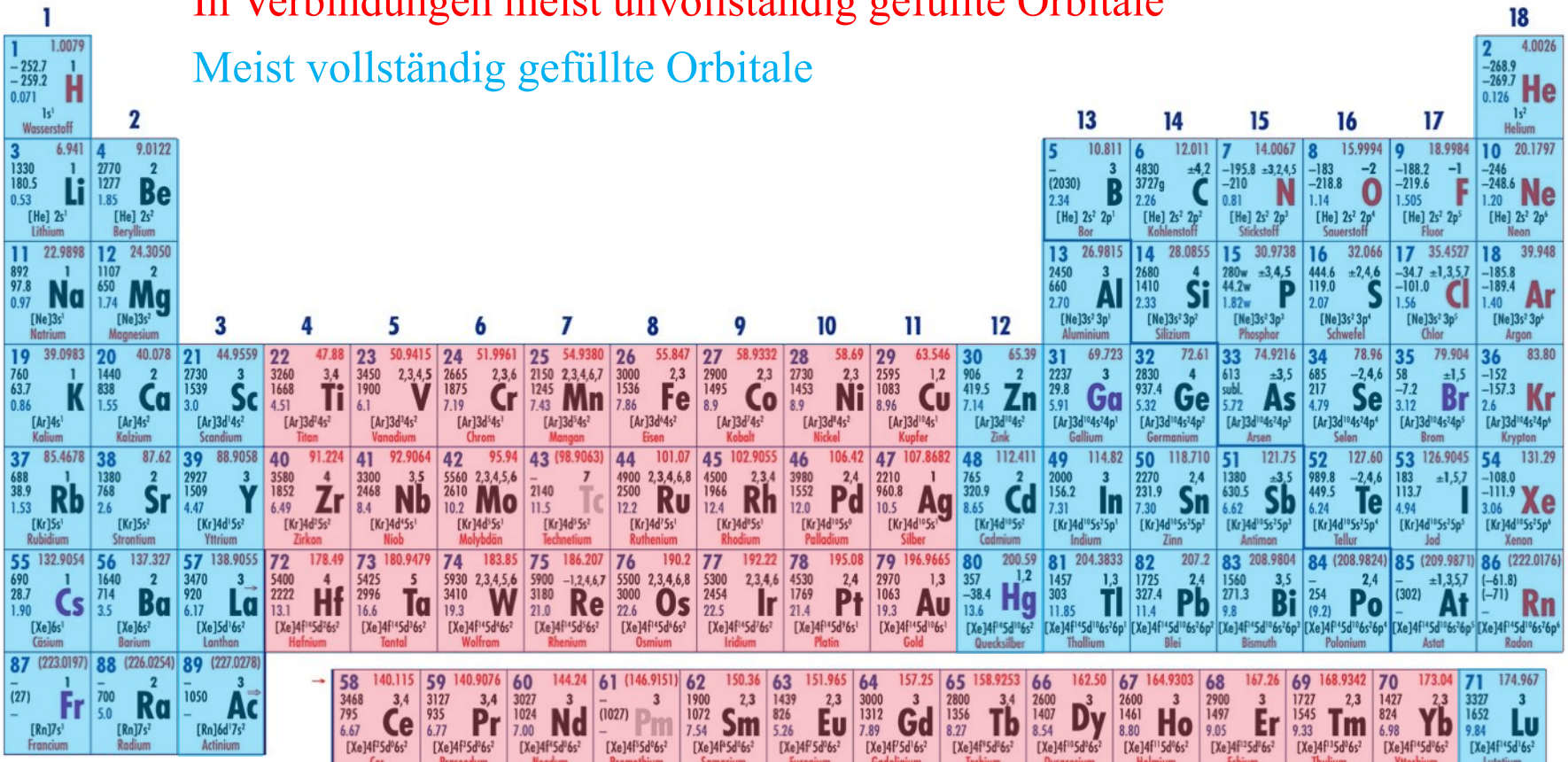
$M(B) = gJ\mu_B B_J(x)N/V$ mit "Brioullin-Funktion" $B_J(x)$ und $x = gJ\mu_B B/k_B T$

$$\chi_{Curie}(T) = \frac{\mu_0 \mu_B{}^2 p^2}{3k_B T}\frac{N}{V} = \frac{C}{T} \qquad p = g\sqrt{J(J+1)} \qquad \vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$$

J:Gesamtdrehimpulsquantenzahl g: Landé-Faktor p: effektive Magnetonenzahl

In Verbindungen meist unvollständig gefüllte Orbitale

Meist vollständig gefüllte Orbitale

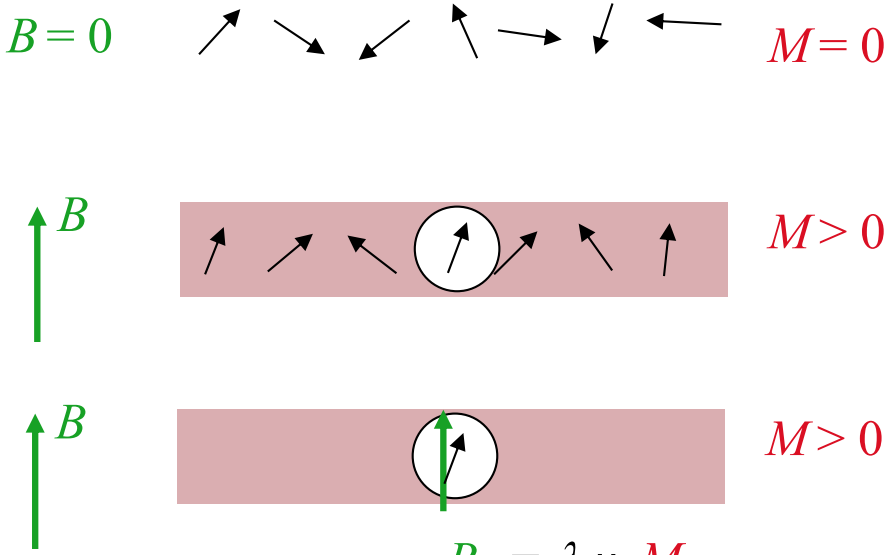


Bemerkungen:

(+) schwarz – fest, rot – gasförmig, lila – flüssig, grau – instabil, nicht in der Natur vorkommend

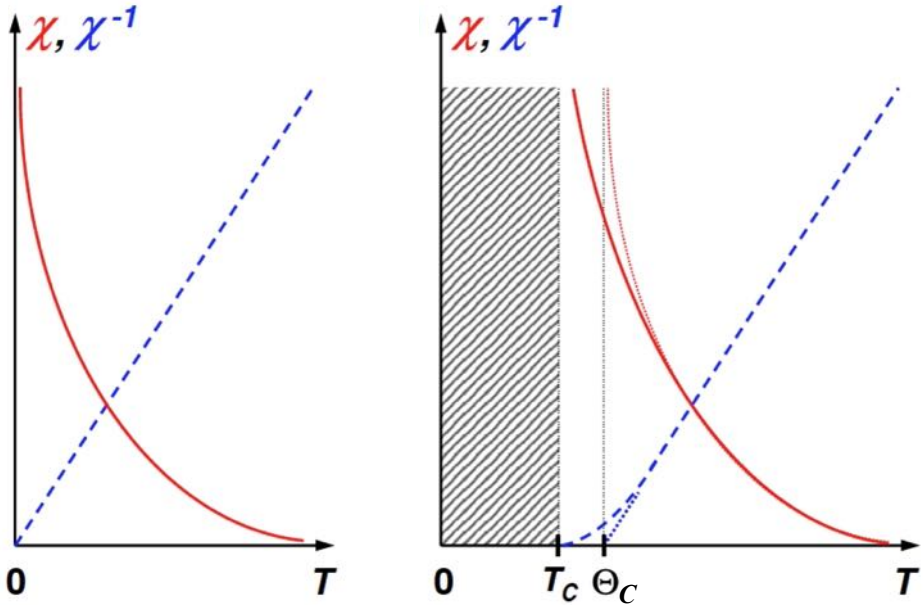
(++) Die Dichte für gasförmige Elemente entspricht dem Wert der flüssigen Form beim Siedepunkt.

Ferromagnetismus:



$$B_A = \lambda\, \mu_0 M$$

B_A: *molekulares Austauschfeld ("Molekularfeld")*



Curie-Gesetz ***Curie-Weiss-Gesetz***

$$\mu_0 M = \chi_{Curie}(T) B_{total} = \chi_{Curie}(T)(B + \lambda \mu_0 M)$$

$$\chi(T) = \frac{C}{T - \lambda C} = \frac{C}{T - \Theta_C}$$

Curie-Weiss-Gesetz

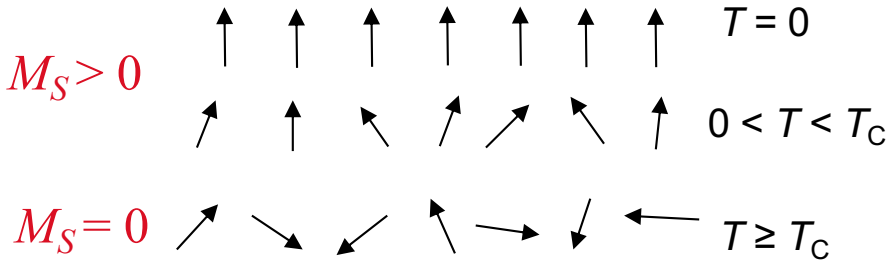
Material	T_C (K)	Θ_C(K)	C (K)	M_{s0} (10^6A/m)	n_B $=M_{s0}/\mu_B$ pro Atom
Fe	1043	1100	2.22	1.746	2.22
Co	1395	1415	2.24	1.446	1.72
Ni	629	649	0.588	0.510	0.060
Gd	289	302	5.00	2.060	7.63
Dy	87	157	—	2.920	10.2
EuO	69.4	78	4.68	1.930	6.8
MnAs	630	318	—	870	3.4
Fe_3O_4	858	—	—	510	4.1

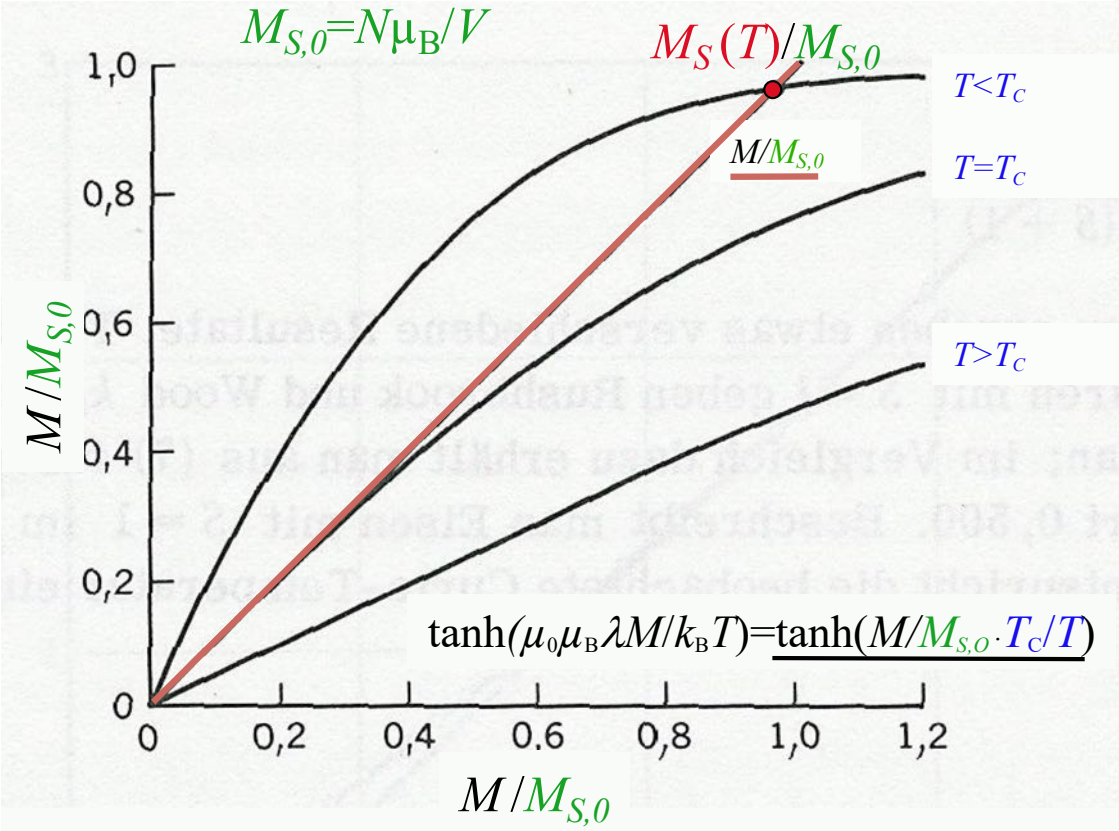
$\Theta_C \approx T_C$: Curie-Temperatur ("Curie-Punkt")

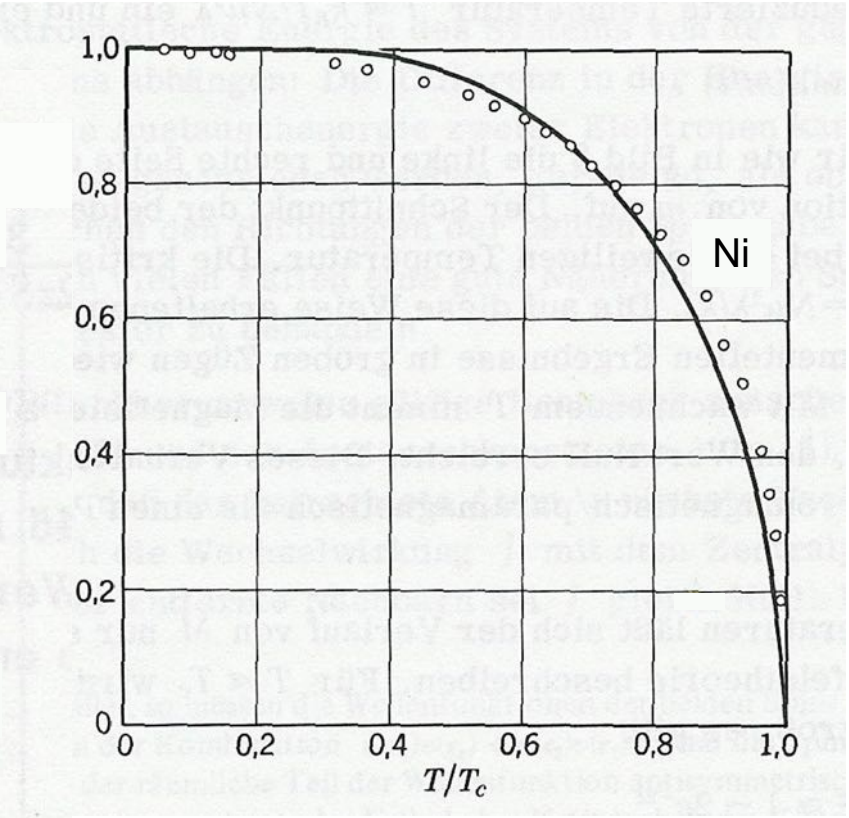
Ferromagnetismus:

Sättigungsmagnetisierung für $B = 0$:

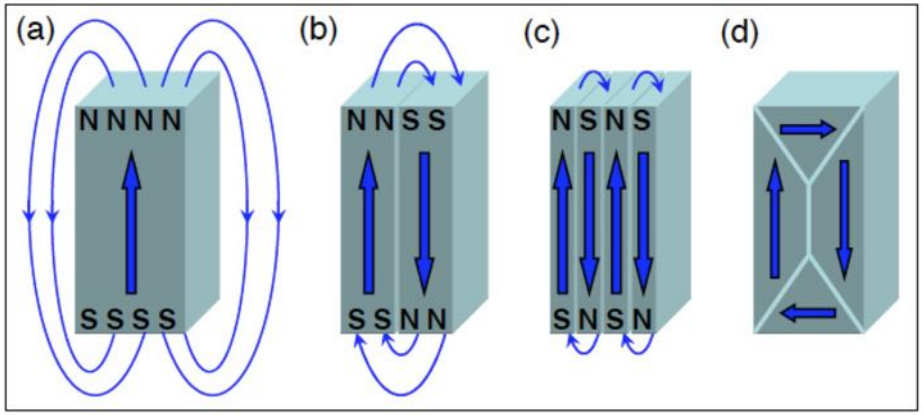
$$M_S = M_{S,0} \tanh\left(\frac{\mu_0 \mu_B \lambda M_S}{k_B T}\right) \quad \textit{(für s = +/-1/2)}$$



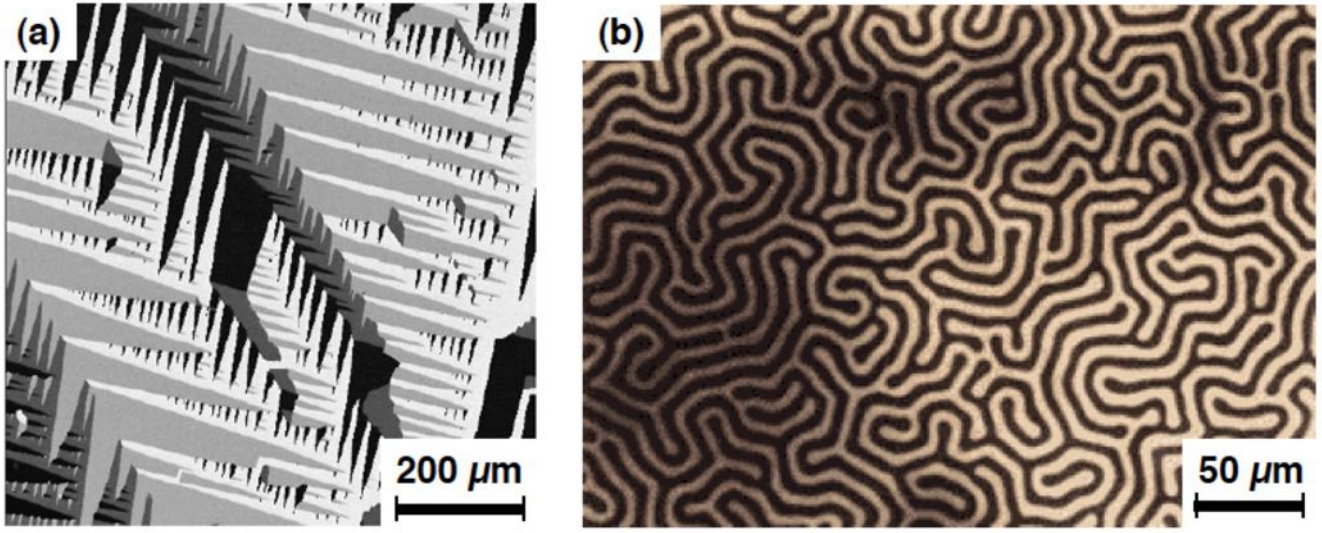




Ferromagnetismus: Domänenbildung für $T<T_C$



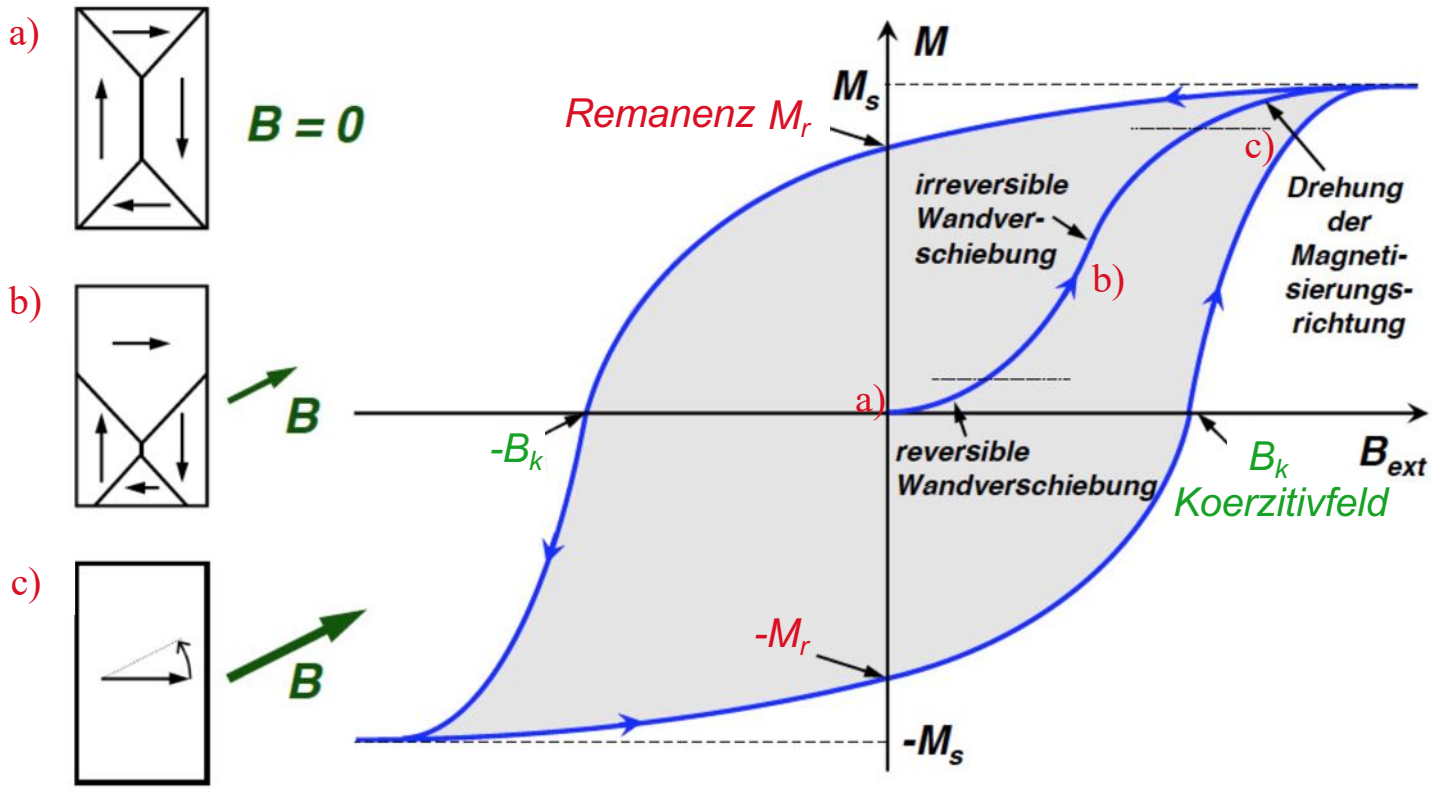
Zur Ursache der Domänenstruktur in Ferromagneten. Die magnetische Feldenergie nimmt von links nach rechts ab, die Wandenergie dagegen zu.



(a) Domänenstrukturen in einem Fe (100) Film aufgenommen mit einem spin-polariserten Rasterelektronenmikroskop. (b) Magnetooptische Abbildung der Domänenstruktur in einem amorphen Gd-Co-Film.

Ferromagnetismus: Domänenbildung für $T<T_C$

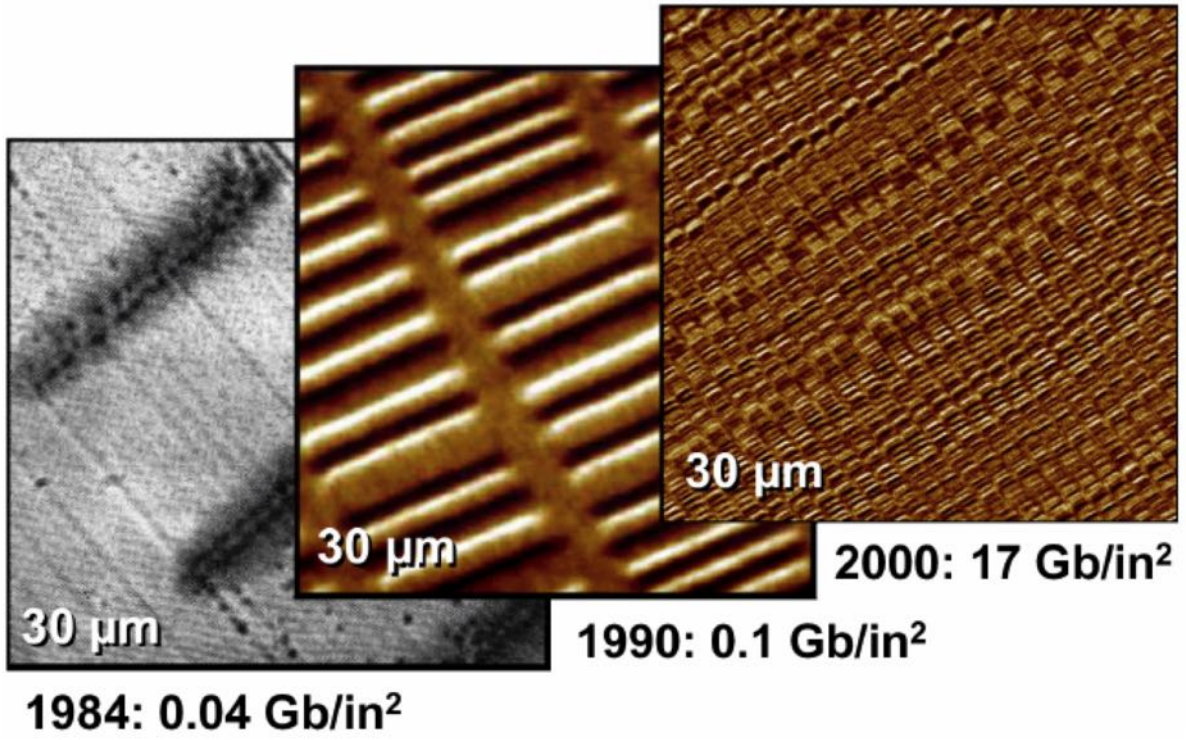
Ursache für Hysterese im magnetischen Verhalten



Ferromagnetismus: Domänenbildung für $T<T_C$

Ursache für Hysterese im magnetischen Verhalten

Technische Anwendung: magnetische Festplatten!
1 Bit = durch den magnetischen Schreibkopf erzeugte Domäne,
deren remanente Magnetisierung nach dem Schreibvorgang erhalten bleibt

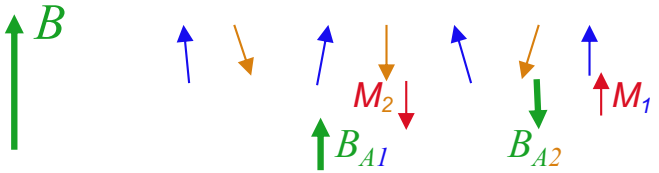


Verkleinerung des Bitmusters auf einer magnetischen Festplatte zwischen 1984 und 2000. Der Bildausschnitt beträgt jeweils 30x30 μm^2 (Quelle: IBM Deutschland).

Antiferromagnetismus:

$$B_A = -\lambda \mu_0 M$$

molekulares Austauschfeld mit negativer Austauschkopplung



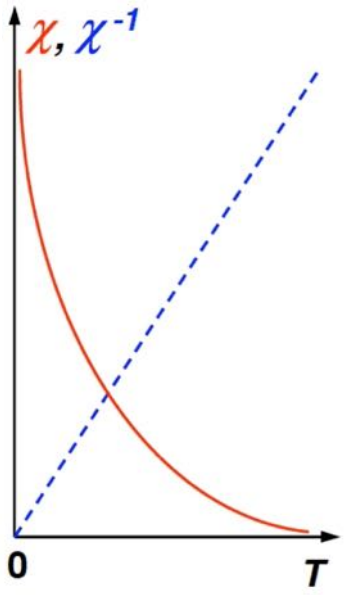
2 Untergitter mit Magnetisierungen M_1 und M_2

$$B_{A1} = -\lambda \mu_0 M_2 \qquad B_{A2} = -\lambda \mu_0 M_1$$

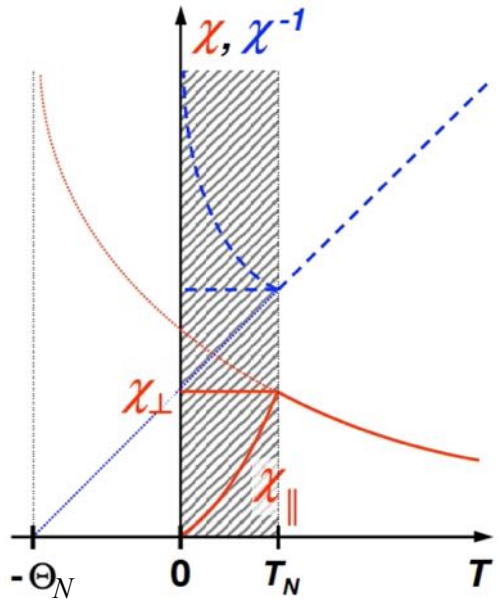
$$\mu_0 M_i = 1/2 \chi_{Curie}(T)(B - \lambda \mu_0 M_j)$$

$$\mu_0 M = \mu_0 (M_1 + M_2)$$
$$= \chi_{Curie}(T) B - 1/2 \chi_{Curie}(T) \lambda \mu_0 M$$

$$\chi(T) = \frac{C}{T + \lambda C/2} = \frac{C}{T + \Theta_N}$$



Curie-Gesetz

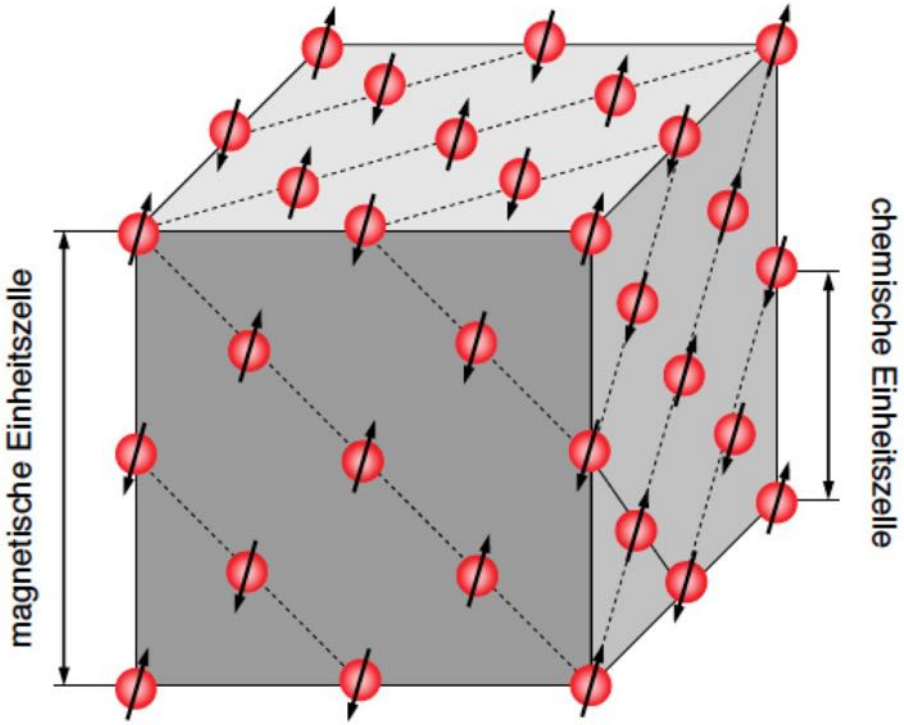


Antiferromagnet

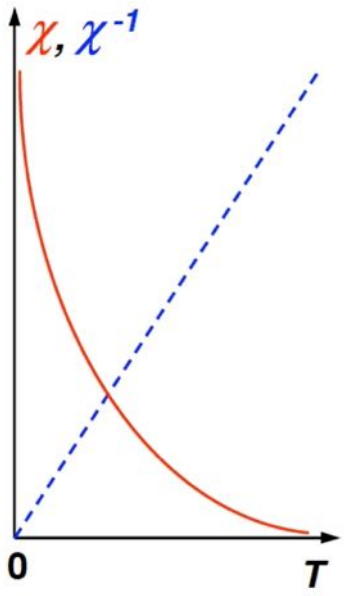
Substanz	T_N (K)	Θ_N(K)	Θ_N/T_N
MnO	122	610	5.3
MnF_2	67	82	1.24
FeO	195	570	2.9
$FeCl_2$	24	48	2
CoO	291	330	1.14
$CoCl_2$	25	38.1	1.53
NiO	525	~ 2000	~ 4
$NiCl_2$	50	68.2	1.37

$\Theta_N \approx T_N$: Néel-Temperatur

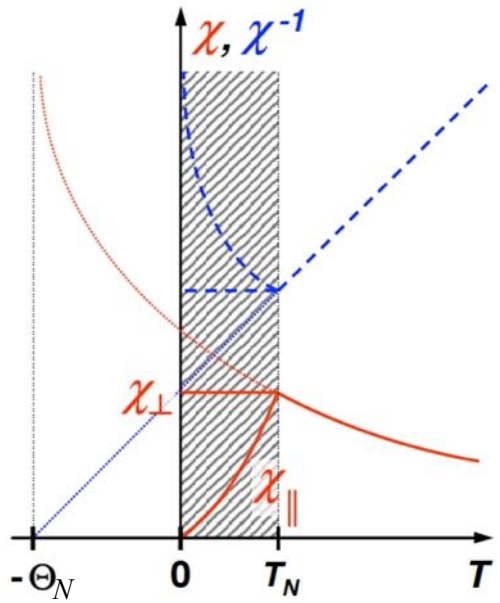
Antiferromagnetismus:



Anordnung der Spins der Mn^{2+}-Ionen in antiferromagnetischem MnO. Die zwischen den Mn^{2+}-Ionen liegenden O^{2-}-Ionen sind nicht gezeigt.



Curie-Gesetz

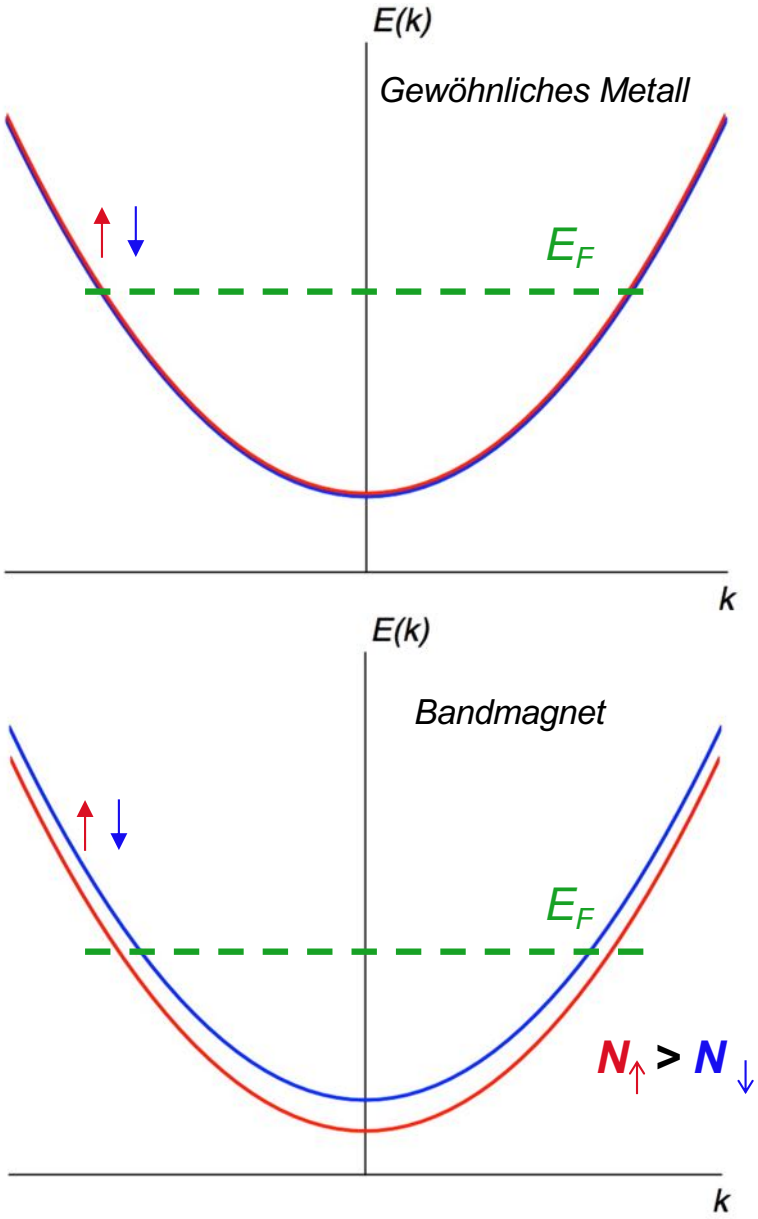


Antiferromagnet

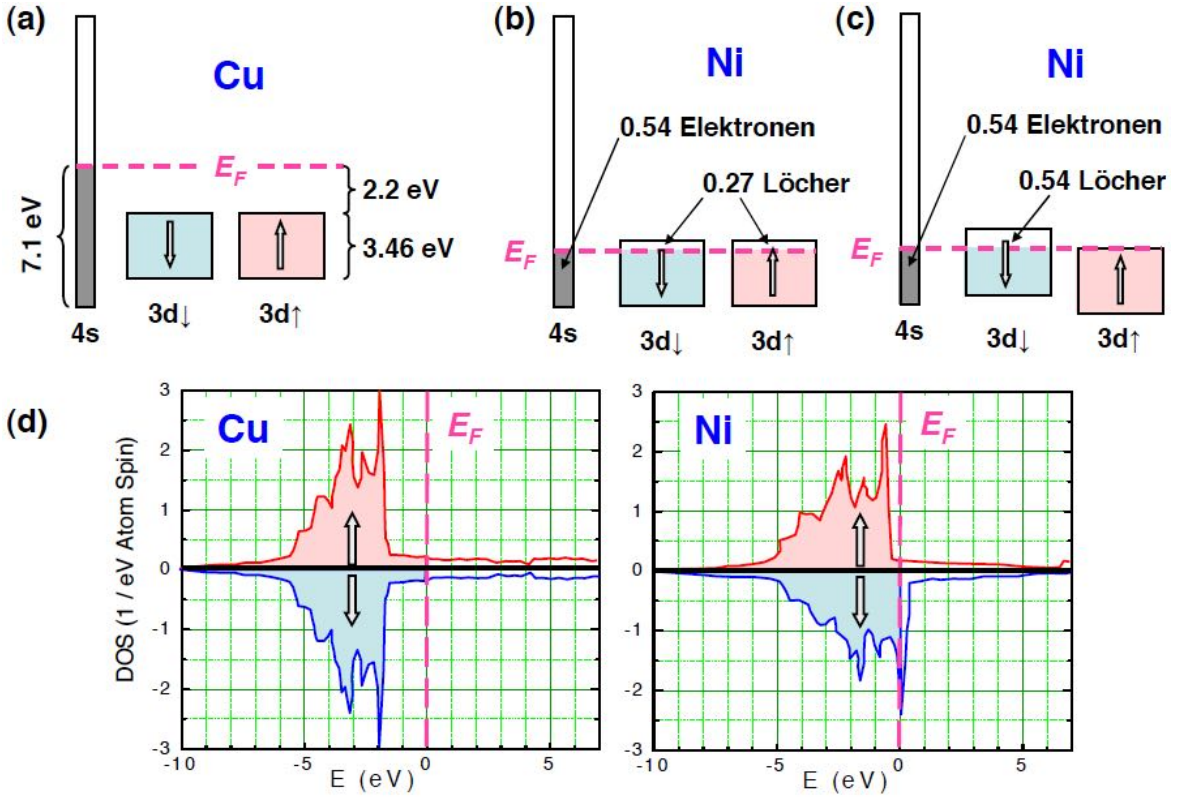
Substanz	T_N (K)	Θ_N(K)	Θ_N/T_N
MnO	122	610	5.3
MnF_2	67	82	1.24
FeO	195	570	2.9
$FeCl_2$	24	48	2
CoO	291	330	1.14
$CoCl_2$	25	38.1	1.53
NiO	525	$\sim$ 2000	$\sim$ 4
$NiCl_2$	50	68.2	1.37

$\Theta_N \approx T_N$: Néel-Temperatur

Bandferromagnetismus:

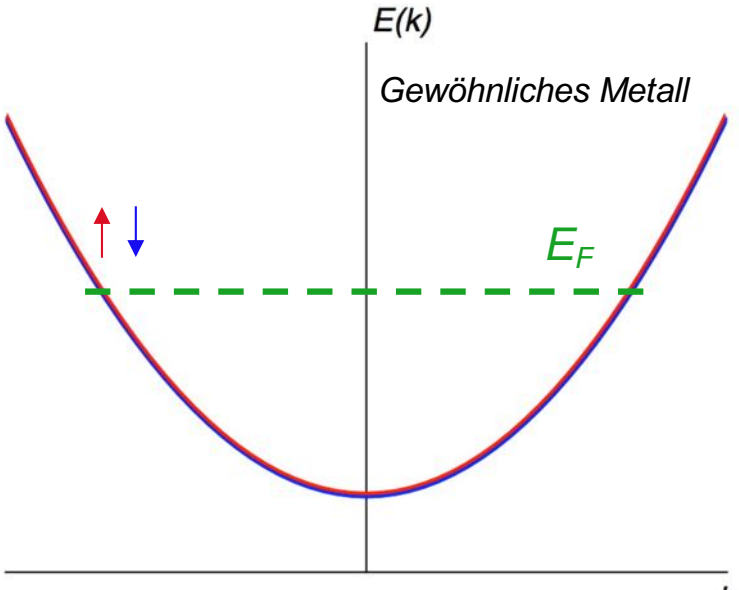


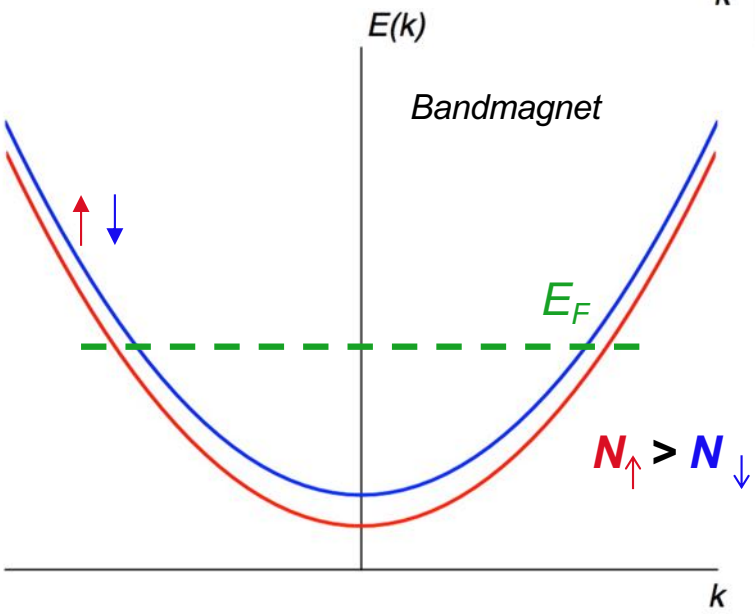
paramagnetisch ferromagnetisch



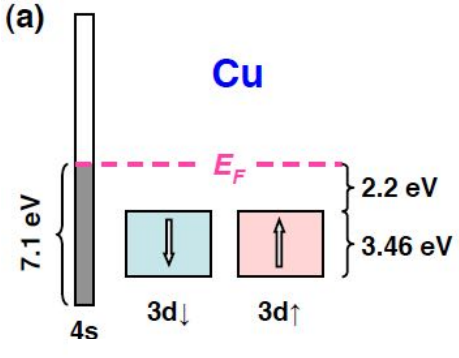
Schematische Darstellung der Besetzung der 3*d*- und 4*s*-Niveaus bei Cu (a) und Ni im paramagnetischen (b) und ferromagnetischen Zustand (c). In (d) ist die berechnete Zustandsdichte der 3*d*- und 4*s*-Elektronen von Cu und Ni gezeigt (nach J. Callaway und C.S. Wang, Phys. Rev. B 7, 1096 (1983)). Die 4*s*-Elektronen resultieren in einer geringen Zustandsdichte, die sich über einen weiten Energiebereich (große Bandbreite) von etwa -10 bis +7 eV erstreckt. Die 3*d*-Elektronen resultieren dagegen in einer hohen Zustandsdichte in einem schmalen Band mit einer Breite von etwa 4 eV.

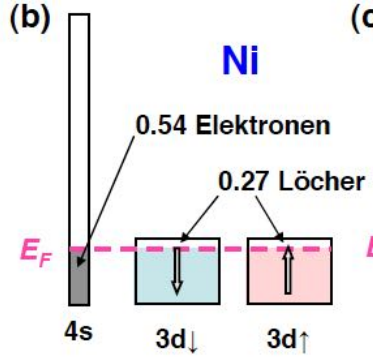
Bandferromagnetismus:

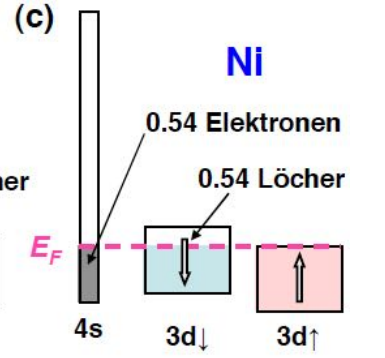


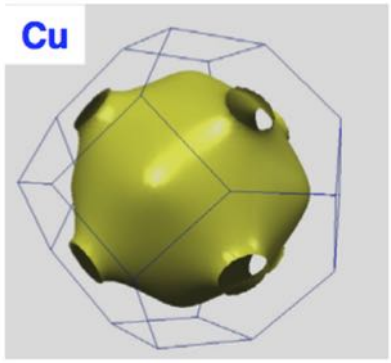


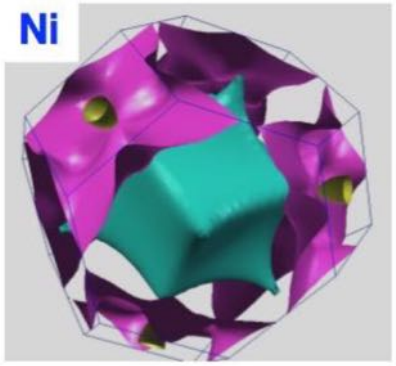
paramagnetisch ferromagnetisch

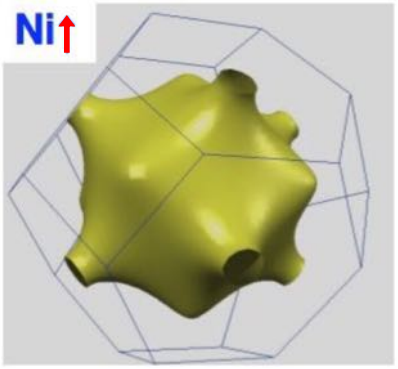


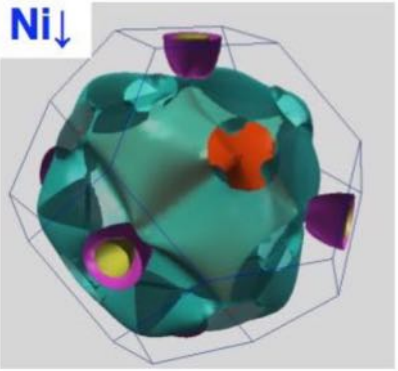




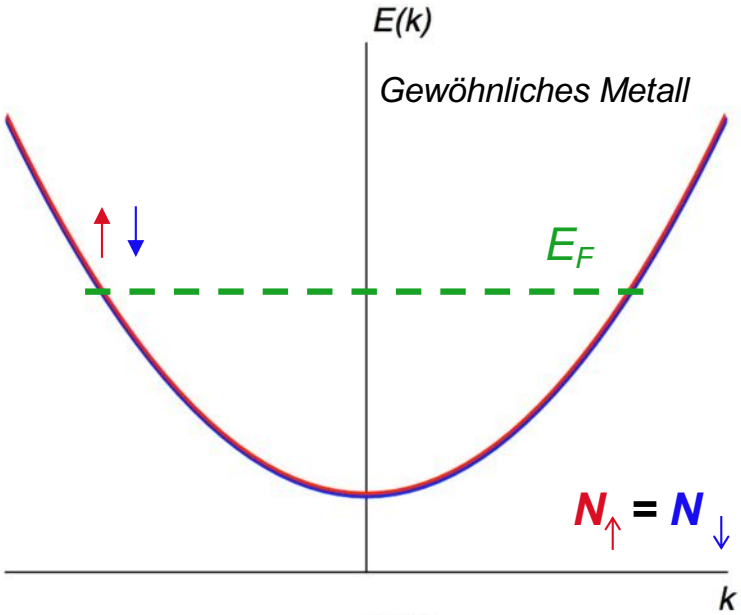


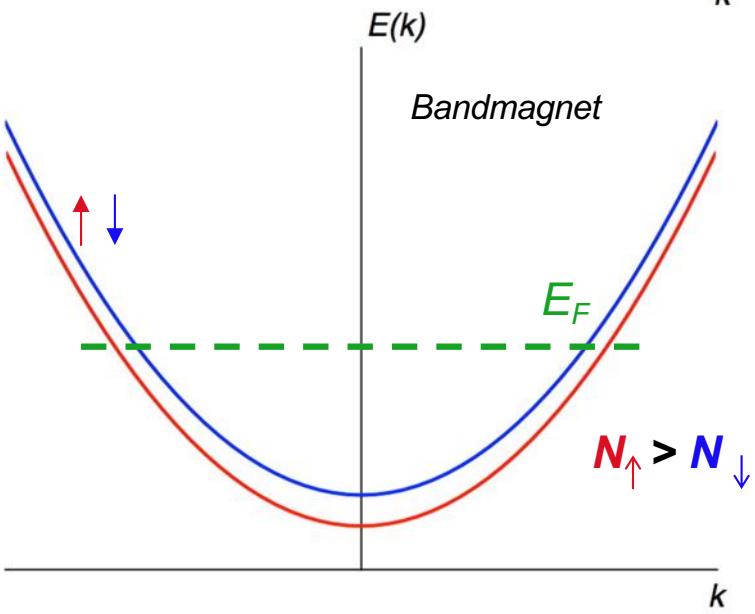


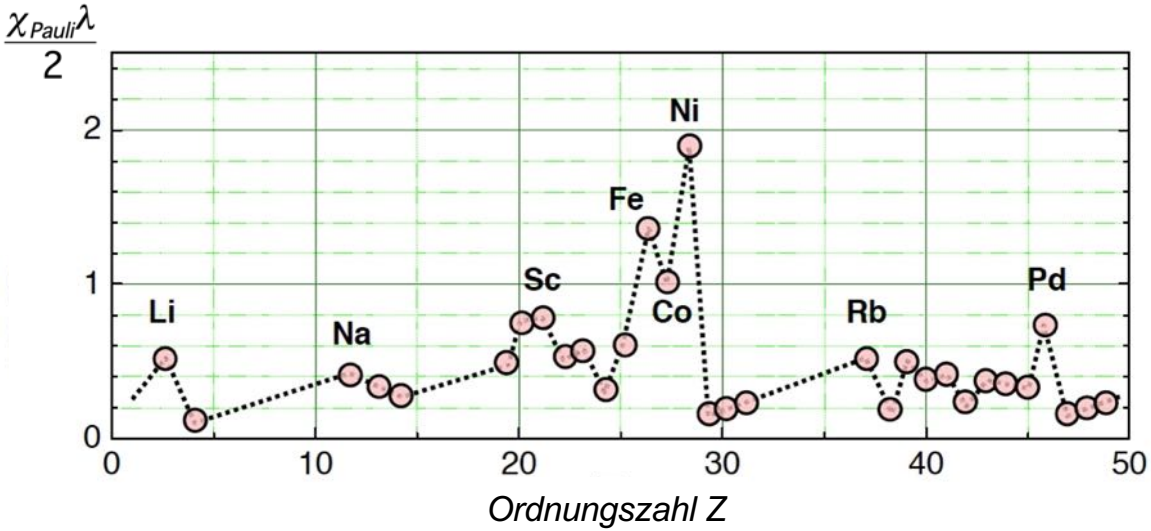




Bandferromagnetismus:







Bandmagnet: Aufspaltung der Energiebänder für B = 0, sobald

$$\frac{\chi_{Pauli}\lambda}{2} > 1$$

(Stoner-Kriterium)