

The image features a dense, repeating pattern of interlocking polygons, primarily hexagons and pentagons, in various shades of blue, gray, and white. The polygons are outlined in black, creating a complex, crystalline structure. In the center of the image, there is a semi-transparent gray rectangular box containing the text "VIII. Magnetismus" in a yellow, serif font.

## VIII. Magnetismus

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

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

$M \ll H$  Temperaturunabhängige Beiträge:

### Pauli-Paramagnetismus

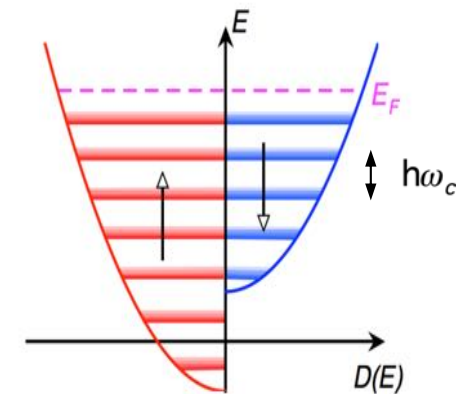
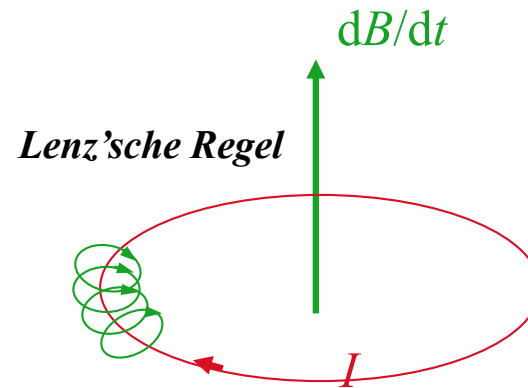
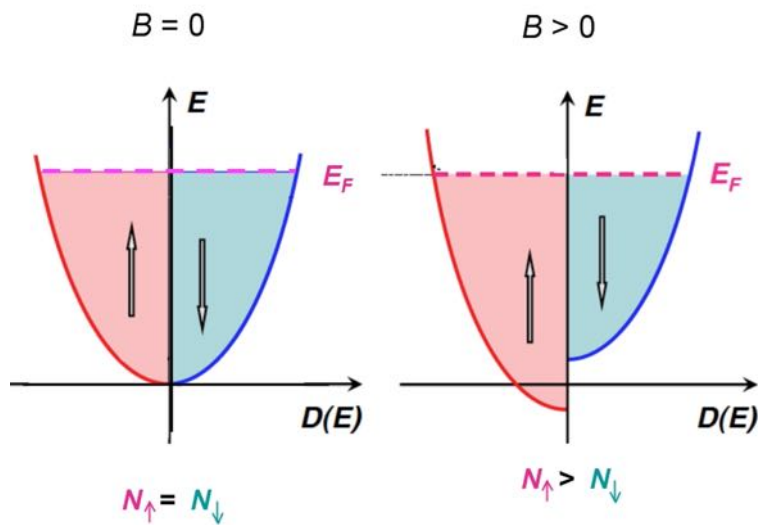
### Larmor-Diamagnetismus

### Landau-Diamagnetismus

Metalle

alle Atome mit gefüllten  
Elektronenschalen

Metalle



$\approx$  Korrektur auf Grund der  
Landau-Quantisierung

$\approx$  atomare Abschirmströme

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

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

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

$Z_a$ : Anzahl Elektronen in äusserster Schale  
 $r_a$ : Atomradius

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

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

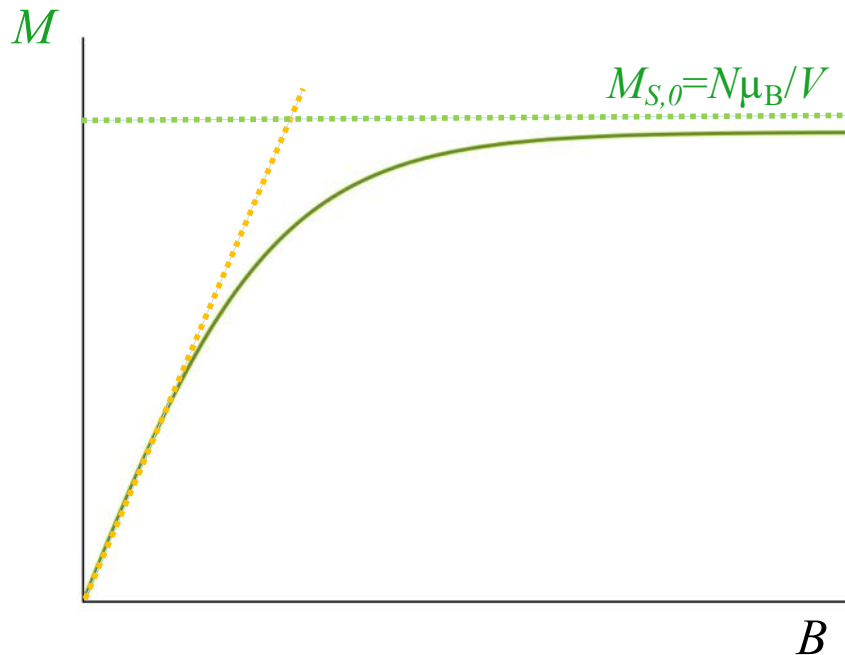
$$\vec{B} \approx \mu_0\vec{H}$$

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

$$\chi \approx \frac{\mu_0 M}{B}$$

$$M \ll H$$

*Isolierte magnetische Momente:  
Curie-Gesetz*



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

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

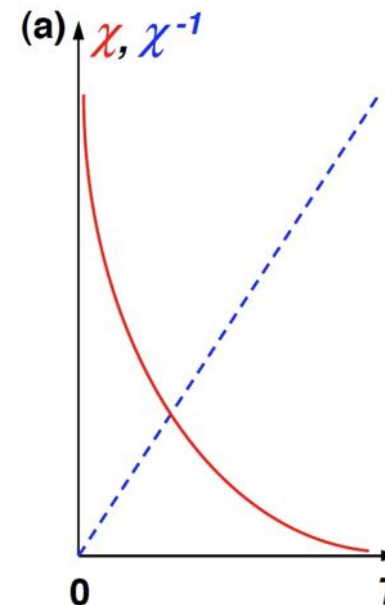
*Curie-Gesetz*

*Allgemeine isolierte magnetische Momente:*

$$M(B) = gJ\mu_B B_j(x)N/V \quad \text{mit "Brioullin-Funktion" } B_j(x) \quad \text{und } x = gJ\mu_B B/k_B T$$

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

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



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

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

$$\vec{B} \approx \mu_0 \vec{H}$$

$$\chi \approx \frac{\mu_0 M}{B} \quad M \ll H$$

**Isolierte magnetische Momente:  
Curie-Gesetz**

Ion	Konfiguration	Schema <small><math>m_l = +2, +1, 0, -1, -2</math></small>	S	L	J	Term	$p = \frac{g_J [J(J+1)]^{1/2}}{g_S [S(S+1)]^{1/2}}$	$p = \frac{g_S [S(S+1)]^{1/2}}{g_J [J(J+1)]^{1/2}}$	$p$ (Exp.)
Ti <sup>3+</sup> V <sup>4+</sup>	[Ar]3d <sup>1</sup>	↑	1/2	2	3/2	<sup>2</sup> D <sub>3/2</sub>	1.55	1.73	1.8
V <sup>3+</sup>	[Ar]3d <sup>2</sup>	↑ ↑	1	3	2	<sup>3</sup> F <sub>2</sub>	1.63	2.83	2.8
Cr <sup>3+</sup> V <sup>2+</sup>	[Ar]3d <sup>3</sup>	↑ ↑ ↑	3/2	3	3/2	<sup>4</sup> F <sub>3/2</sub>	0.77	3.87	3.8
Mn <sup>3+</sup> Cr <sup>2+</sup>	[Ar]3d <sup>4</sup>	↑ ↑ ↑ ↑	2	2	0	<sup>5</sup> D <sub>0</sub>	0	4.90	4.9
Fe <sup>3+</sup> Mn <sup>2+</sup>	[Ar]3d <sup>5</sup>	↑ ↑ ↑ ↑ ↑	5/2	0	5/2	<sup>6</sup> S <sub>5/2</sub>	5.92	5.92	5.9
Fe <sup>2+</sup>	[Ar]3d <sup>6</sup>	↑ ↓ ↑ ↑ ↑ ↑	2	2	4	<sup>5</sup> D <sub>4</sub>	6.70	4.90	5.4
Co <sup>2+</sup>	[Ar]3d <sup>7</sup>	↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↑ ↑	3/2	3	9/2	<sup>4</sup> F <sub>9/2</sub>	6.63	3.87	4.8
Ni <sup>2+</sup>	[Ar]3d <sup>8</sup>	↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↓ ↑	1	3	4	<sup>3</sup> F <sub>4</sub>	5.59	2.83	3.2
Cu <sup>2+</sup>	[Ar]3d <sup>9</sup>	↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↑	1/2	2	5/2	<sup>2</sup> D <sub>5/2</sub>	3.55	1.73	1.9
Zn <sup>2+</sup>	[Ar]3d <sup>10</sup>	↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↓	0	0	0	<sup>1</sup> S <sub>0</sub>	0	0	0

Grundzustandskonfiguration und effektive Magnetonezahl  $p$  einiger Ionen der Übergangsmetalle.

**Allgemeine isolierte magnetische Momente:**

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

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

$J$ : Gesamtdrehimpulsquantenzahl    $g$ : Landé-Faktor    $p$ : effektive Magnetonezahl

Ion	Konfiguration	Schema <small><math>m_l = +3, +2, +1, 0, -1, -2, -3</math></small>	S	L	J	Term	$p$ (berechnet)	$p$ (Experiment)
La <sup>3+</sup>	[Xe]4f <sup>0</sup>		0	0	0	<sup>1</sup> S <sub>0</sub>	0	0
Ce <sup>3+</sup>	[Xe]4f <sup>1</sup>	↑	1/2	3	5/2	<sup>2</sup> F <sub>5/2</sub>	2.54	2.4
Pr <sup>3+</sup>	[Xe]4f <sup>2</sup>	↑ ↑	1	5	4	<sup>3</sup> H <sub>4</sub>	3.58	3.5
Nd <sup>3+</sup>	[Xe]4f <sup>2</sup>	↑ ↑ ↑	3/2	6	9/2	<sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	3.62	3.5
Pm <sup>3+</sup>	[Xe]4f <sup>4</sup>	↑ ↑ ↑ ↑	2	6	4	<sup>5</sup> I <sub>4</sub>	2.68	--
Sm <sup>3+</sup>	[Xe]4f <sup>5</sup>	↑ ↑ ↑ ↑ ↑	5/2	5	5/2	<sup>6</sup> H <sub>5/2</sub>	0.84	1.5
Eu <sup>3+</sup>	[Xe]4f <sup>6</sup>	↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑	3	3	0	<sup>7</sup> F <sub>0</sub>	0	3.4
Gd <sup>3+</sup>	[Xe]4f <sup>7</sup>	↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑	7/2	0	7/2	<sup>8</sup> S <sub>7/2</sub>	7.94	8.0
Tb <sup>3+</sup>	[Xe]4f <sup>8</sup>	↑ ↓ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑	3	3	6	<sup>7</sup> F <sub>6</sub>	9.72	9.5
Dy <sup>3+</sup>	[Xe]4f <sup>9</sup>	↑ ↓ ↓ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑	5/2	5	15/2	<sup>6</sup> H <sub>15/2</sub>	10.63	10.6
Ho <sup>3+</sup>	[Xe]4f <sup>10</sup>	↑ ↓ ↓ ↓ ↑ ↑ ↑ ↑	2	6	8	<sup>5</sup> I <sub>8</sub>	10.60	10.4
Er <sup>3+</sup>	[Xe]4f <sup>11</sup>	↑ ↓ ↓ ↓ ↓ ↑ ↑ ↑	3/2	6	15/2	<sup>4</sup> I <sub>15/2</sub>	9.59	9.5
Tm <sup>3+</sup>	[Xe]4f <sup>12</sup>	↑ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↑ ↑	1	5	6	<sup>3</sup> H <sub>6</sub>	7.57	7.3
Yb <sup>3+</sup>	[Xe]4f <sup>13</sup>	↑ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↑	1/2	3	7/2	<sup>2</sup> F <sub>7/2</sub>	4.54	4.5
Lu <sup>3+</sup>	[Xe]4f <sup>14</sup>	↑ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓	0	0	0	<sup>1</sup> S <sub>0</sub>	0	0

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



# In Verbindungen meist unvollständig gefüllte Orbitale

## Meist vollständig gefüllte Orbitale

<b>1</b>																	<b>18</b>	
1 1.0079 -252.7 -259.2 0.071 <b>H</b> 1s <sup>1</sup> Wasserstoff																	2 4.0026 -268.9 -269.7 0.126 <b>He</b> 1s <sup>2</sup> Helium	
3 6.941 1330 180.5 0.53 <b>Li</b> [He] 2s <sup>1</sup> Lithium	4 9.0122 2770 1277 1.85 <b>Be</b> [He] 2s <sup>2</sup> Beryllium											5 10.811 - (2030) 2.34 <b>B</b> [He] 2s <sup>2</sup> 2p <sup>1</sup> Bor	6 12.011 4830 3727g 2.26 <b>C</b> [He] 2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup> Kohlenstoff	7 14.0067 -195.8 -210 0.81 <b>N</b> [He] 2s <sup>2</sup> 2p <sup>3</sup> Stickstoff	8 15.9994 -183 -218.8 1.14 <b>O</b> [He] 2s <sup>2</sup> 2p <sup>4</sup> Sauerstoff	9 18.9984 -188.2 -219.6 1.505 <b>F</b> [He] 2s <sup>2</sup> 2p <sup>5</sup> Fluor	10 20.1797 -246 -248.6 1.20 <b>Ne</b> [He] 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup> Neon	
11 22.9898 892 97.8 0.97 <b>Na</b> [Ne] 3s <sup>1</sup> Natrium	12 24.3050 1107 650 1.74 <b>Mg</b> [Ne] 3s <sup>2</sup> Magnesium											13 26.9815 2450 660 2.33 <b>Al</b> [Ne] 3s <sup>2</sup> 3p <sup>1</sup> Aluminium	14 28.0855 2680 1410 2.33 <b>Si</b> [Ne] 3s <sup>2</sup> 3p <sup>2</sup> Silizium	15 30.9738 280w 44.2w 1.82w <b>P</b> [Ne] 3s <sup>2</sup> 3p <sup>3</sup> Phosphor	16 32.066 444.6 44.2w 2.07 <b>S</b> [Ne] 3s <sup>2</sup> 3p <sup>4</sup> Schwefel	17 35.4527 -34.7 -101.0 1.56 <b>Cl</b> [Ne] 3s <sup>2</sup> 3p <sup>5</sup> Chlor	18 39.948 -185.8 -189.4 1.40 <b>Ar</b> [Ne] 3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup> Argon	
19 39.0983 760 63.7 0.86 <b>K</b> [Ar] 4s <sup>1</sup> Kalium	20 40.078 1440 838 1.55 <b>Ca</b> [Ar] 4s <sup>2</sup> Kalzium	21 44.9559 2730 1539 3.0 <b>Sc</b> [Ar] 3d <sup>1</sup> 4s <sup>2</sup> Scandium	22 47.88 3260 1668 4.51 <b>Ti</b> [Ar] 3d <sup>2</sup> 4s <sup>2</sup> Titan	23 50.9415 3450 1900 6.1 <b>V</b> [Ar] 3d <sup>3</sup> 4s <sup>2</sup> Vanadium	24 51.9961 2665 1875 7.19 <b>Cr</b> [Ar] 3d <sup>5</sup> 4s <sup>1</sup> Chrom	25 54.9380 2150 1245 7.43 <b>Mn</b> [Ar] 3d <sup>5</sup> 4s <sup>2</sup> Mangan	26 55.847 3000 1536 7.86 <b>Fe</b> [Ar] 3d <sup>6</sup> 4s <sup>2</sup> Eisen	27 58.9332 2900 1495 8.9 <b>Co</b> [Ar] 3d <sup>7</sup> 4s <sup>2</sup> Kobalt	28 58.69 2730 1453 8.9 <b>Ni</b> [Ar] 3d <sup>8</sup> 4s <sup>2</sup> Nickel	29 63.546 2595 1083 8.96 <b>Cu</b> [Ar] 3d <sup>10</sup> 4s <sup>1</sup> Kupfer	30 65.39 906 419.5 7.14 <b>Zn</b> [Ar] 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> Zink	31 69.723 2237 29.8 5.91 <b>Ga</b> [Ar] 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>1</sup> Gallium	32 72.61 2830 937.4 5.32 <b>Ge</b> [Ar] 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>2</sup> Germanium	33 74.9216 613 subl. 5.72 <b>As</b> [Ar] 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>3</sup> Arsen	34 78.96 685 217 4.79 <b>Se</b> [Ar] 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>4</sup> Selen	35 79.904 58 -7.2 3.12 <b>Br</b> [Ar] 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>5</sup> Brom	36 83.80 -152 -187.4 2.6 <b>Kr</b> [Ar] 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>6</sup> Krypton	
37 85.4678 688 38.9 1.53 <b>Rb</b> [Kr] 5s <sup>1</sup> Rubidium	38 87.62 1380 768 2.6 <b>Sr</b> [Kr] 5s <sup>2</sup> Strontium	39 88.9058 2927 1509 4.47 <b>Y</b> [Kr] 4d <sup>1</sup> 5s <sup>2</sup> Yttrium	40 91.224 3580 1852 6.49 <b>Zr</b> [Kr] 4d <sup>2</sup> 5s <sup>2</sup> Zirkon	41 92.9064 3300 2468 8.4 <b>Nb</b> [Kr] 4d <sup>4</sup> 5s <sup>1</sup> Niob	42 95.94 2610 10.2 <b>Mo</b> [Kr] 4d <sup>5</sup> 5s <sup>1</sup> Molybdän	43 98.9063 2140 11.5 <b>Tc</b> [Kr] 4d <sup>5</sup> 5s <sup>2</sup> Technetium	44 101.07 4900 2500 12.2 <b>Ru</b> [Kr] 4d <sup>6</sup> 5s <sup>1</sup> Ruthenium	45 102.9055 4500 1966 12.4 <b>Rh</b> [Kr] 4d <sup>7</sup> 5s <sup>1</sup> Rhodium	46 106.42 3980 1552 12.0 <b>Pd</b> [Kr] 4d <sup>10</sup> 5s <sup>0</sup> Palladium	47 107.8682 2210 960.8 10.5 <b>Ag</b> [Kr] 4d <sup>10</sup> 5s <sup>1</sup> Silber	48 112.411 765 320.9 8.65 <b>Cd</b> [Kr] 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> Cadmium	49 114.82 2000 156.2 7.31 <b>In</b> [Kr] 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>1</sup> Indium	50 118.710 2270 231.9 7.30 <b>Sn</b> [Kr] 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>2</sup> Zinn	51 121.75 1380 630.5 6.62 <b>Sb</b> [Kr] 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>3</sup> Antimon	52 127.60 989.8 449.5 6.24 <b>Te</b> [Kr] 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>4</sup> Tellur	53 126.9045 183 499.5 4.94 <b>I</b> [Kr] 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>5</sup> Jod	54 131.29 -108.0 -111.9 3.06 <b>Xe</b> [Kr] 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup> Xenon	
55 132.9054 690 28.7 1.90 <b>Cs</b> [Xe] 6s <sup>1</sup> Cäsium	56 137.327 1640 714 3.5 <b>Ba</b> [Xe] 6s <sup>2</sup> Barium	57 138.9055 3470 2222 6.17 <b>La</b> [Xe] 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup> Lanthan	72 178.49 5400 13.1 <b>Hf</b> [Xe] 4f <sup>14</sup> 5d <sup>2</sup> 6s <sup>2</sup> Hafnium	73 180.9479 5425 2996 16.6 <b>Ta</b> [Xe] 4f <sup>14</sup> 5d <sup>3</sup> 6s <sup>2</sup> Tantal	74 183.85 5930 3410 19.3 <b>W</b> [Xe] 4f <sup>14</sup> 5d <sup>4</sup> 6s <sup>2</sup> Wolfram	75 186.207 5900 3180 21.0 <b>Re</b> [Xe] 4f <sup>14</sup> 5d <sup>5</sup> 6s <sup>2</sup> Rhenium	76 190.2 5500 2454 22.6 <b>Os</b> [Xe] 4f <sup>14</sup> 5d <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup> Osmium	77 192.22 5300 1769 22.5 <b>Ir</b> [Xe] 4f <sup>14</sup> 5d <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup> Iridium	78 195.08 4530 2454 21.4 <b>Pt</b> [Xe] 4f <sup>14</sup> 5d <sup>9</sup> 6s <sup>1</sup> Platin	79 196.9665 2970 1063 19.3 <b>Au</b> [Xe] 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>1</sup> Gold	80 200.59 357 13.6 <b>Hg</b> [Xe] 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> Quecksilber	81 204.3833 1457 303 11.85 <b>Tl</b> [Xe] 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>1</sup> Thallium	82 207.2 1725 327.4 11.4 <b>Pb</b> [Xe] 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>2</sup> Blei	83 208.9804 1560 271.3 9.8 <b>Bi</b> [Xe] 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>3</sup> Bismuth	84 (208.9824) - 254 (9.2) <b>Po</b> [Xe] 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>4</sup> Polonium	85 (209.9871) - (302) 2.4 <b>At</b> [Xe] 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>5</sup> Astat	86 (222.0176) (-61.8) (-71) - <b>Rn</b> [Xe] 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>6</sup> Radon	
87 (223.0197) - (27) <b>Fr</b> [Rn] 7s <sup>1</sup> Francium	88 (226.0254) 700 5.0 <b>Ra</b> [Rn] 7s <sup>2</sup> Radium	89 (227.0278) 1050 - <b>Ac</b> [Rn] 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> Actinium																

**Ordnungszahl** ↓ **Relative Atommasse** ↓

Siedepunkt, °C → 3000  
Schmelzpunkt, °C → 1536  
Dichte, g/cm<sup>3</sup> (++) → 7.86

**26** **55.847**  
**Fe**  
[Ar] 3d<sup>6</sup> 4s<sup>2</sup>  
**Eisen**

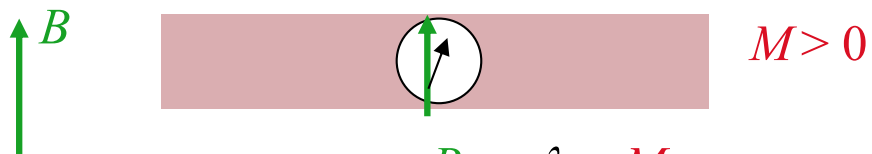
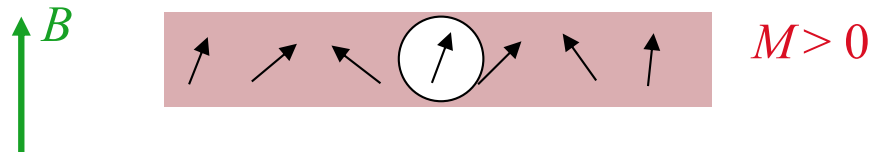
Oxidationszahl (fett: stabilste) → 2,3  
Symbol (+)  
Elektronenkonfiguration → [Ar] 3d<sup>6</sup> 4s<sup>2</sup>  
Name → Eisen

58 140.115 3468 795 6.67 <b>Ce</b> [Xe] 4f <sup>1</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup> Cer	59 140.9076 3127 935 6.77 <b>Pr</b> [Xe] 4f <sup>3</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup> Praseodym	60 144.24 3027 1024 7.00 <b>Nd</b> [Xe] 4f <sup>4</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup> Neodym	61 (146.9151) - (1027) 3 7.54 <b>Pm</b> [Xe] 4f <sup>5</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup> Promethium	62 150.36 1900 826 5.26 <b>Sm</b> [Xe] 4f <sup>6</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup> Samarium	63 151.965 1439 1312 7.89 <b>Eu</b> [Xe] 4f <sup>7</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup> Europium	64 157.25 3000 1407 8.27 <b>Gd</b> [Xe] 4f <sup>7</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup> Gadolinium	65 158.9253 2800 1356 8.27 <b>Tb</b> [Xe] 4f <sup>9</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup> Terbium	66 162.50 2600 1461 8.54 <b>Dy</b> [Xe] 4f <sup>10</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup> Dysprosium	67 164.9303 2600 1497 8.80 <b>Ho</b> [Xe] 4f <sup>11</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup> Holmium	68 167.26 2900 1545 9.05 <b>Er</b> [Xe] 4f <sup>12</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup> Erbium	69 168.9342 1727 824 9.33 <b>Tm</b> [Xe] 4f <sup>13</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup> Thulium	70 173.04 1427 824 6.98 <b>Yb</b> [Xe] 4f <sup>14</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup> Ytterbium	71 174.967 3327 1652 9.84 <b>Lu</b> [Xe] 4f <sup>14</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup> Lutetium
90 232.0381 3850 1750 11.7 <b>Th</b> [Rn] 5f <sup>14</sup> 6d <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup> Thorium	91 (231.0359) - (1230) 4,5 15.4 <b>Pa</b> [Rn] 5f <sup>14</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> Protactinium	92 238.0289 3818 1132 19.07 <b>U</b> [Rn] 5f <sup>14</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> Uran	93 (237.0482) - 637 19.5 <b>Np</b> [Rn] 5f <sup>14</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> Neptunium	94 (244.0642) 3235 640 11.7 <b>Pu</b> [Rn] 5f <sup>14</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> Plutonium	95 (243.0614) - - 3,4,5,6 <b>Am</b> [Rn] 5f <sup>14</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> Americium	96 (247.0703) - - 3 <b>Cm</b> [Rn] 5f <sup>14</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> Curium	97 (247.0703) - - 3,4 <b>Bk</b> [Rn] 5f <sup>14</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> Berkelium	98 (251.0796) - - - <b>Cf</b> [Rn] 5f <sup>14</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> Californium	99 (252.0829) - - - <b>Es</b> [Rn] 5f <sup>14</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> Einsteinium	100 (257.095) - - - <b>Fm</b> [Rn] 5f <sup>14</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> Fermium	101 (258.099) - - - <b>Md</b> [Rn] 5f <sup>14</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> Mendelevium	102 (259.101) - - - <b>No</b> [Rn] 5f <sup>14</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> Nobelium	103 (260.105) - - - <b>Lw</b> [Rn] 5f <sup>14</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> Lawrencium

**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:



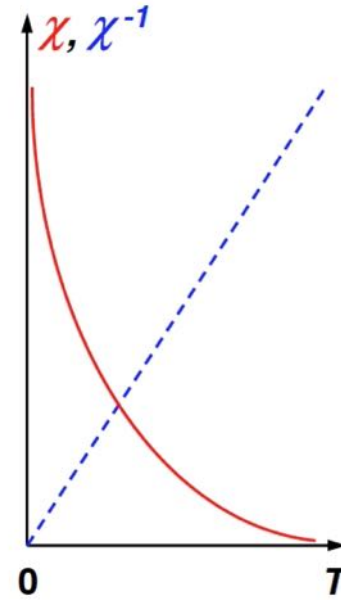
$$B_A = \lambda \mu_0 M$$

$B_A$ : molekulares Austauschfeld ("Molekularfeld")

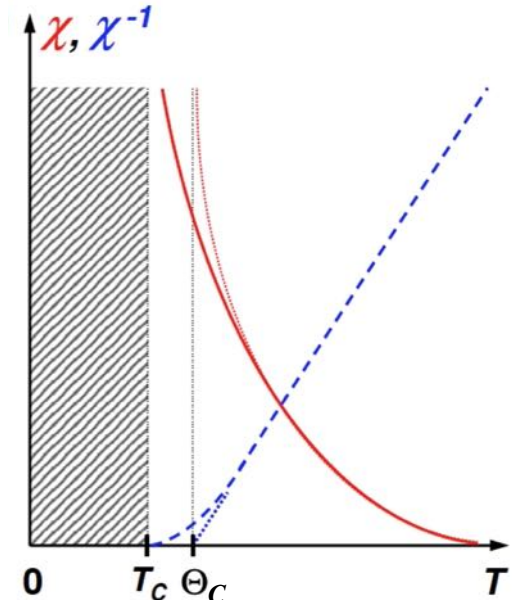
$$\mu_0 M = \chi_{Curie}(T) B_{total} = \chi_{Curie}(T) (B + \lambda \mu_0 M)$$

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

**Curie-Weiss-Gesetz**



Curie-Gesetz



Curie-Weiss-Gesetz

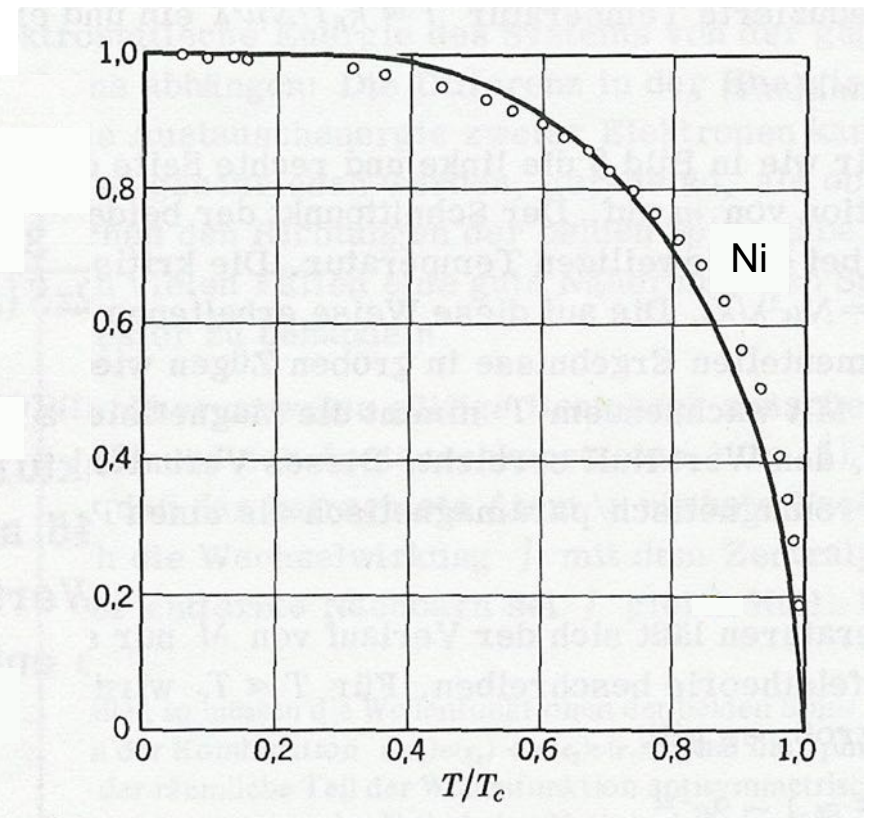
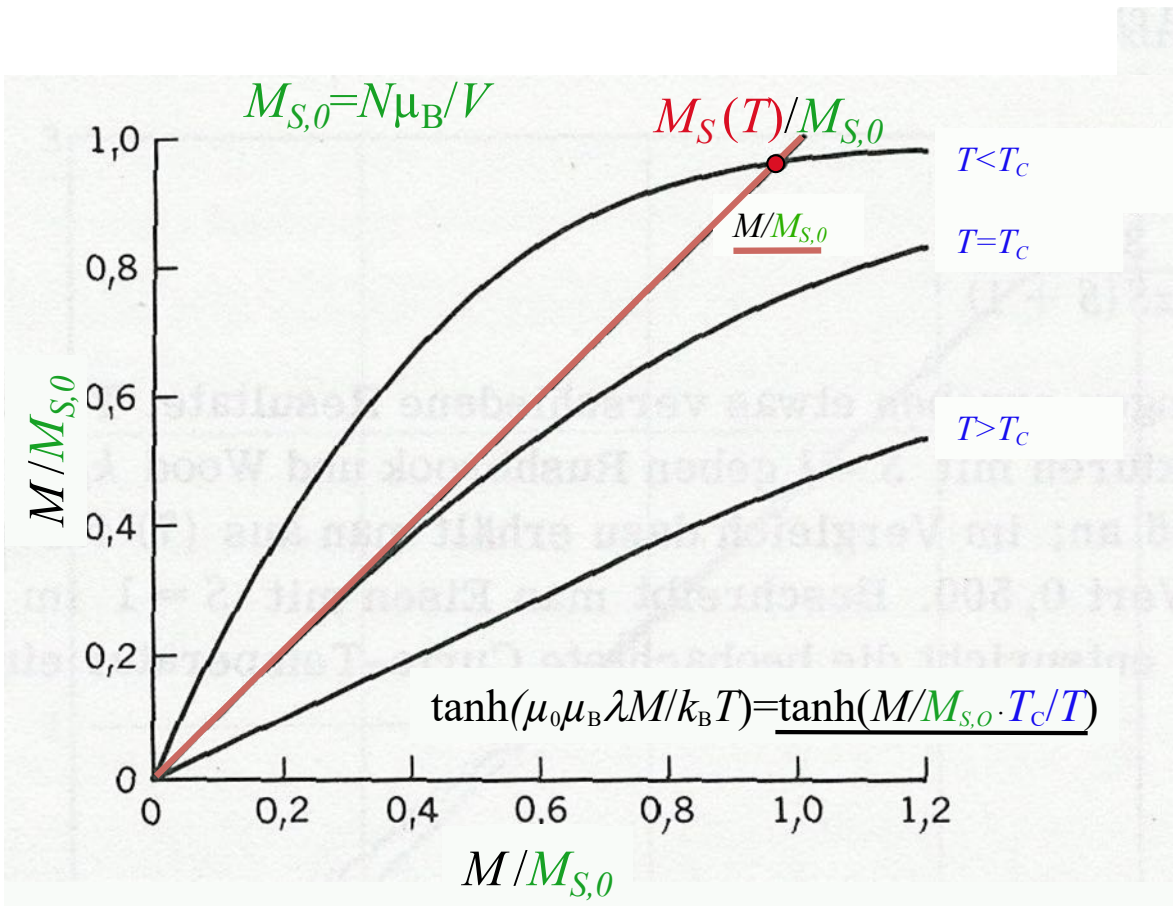
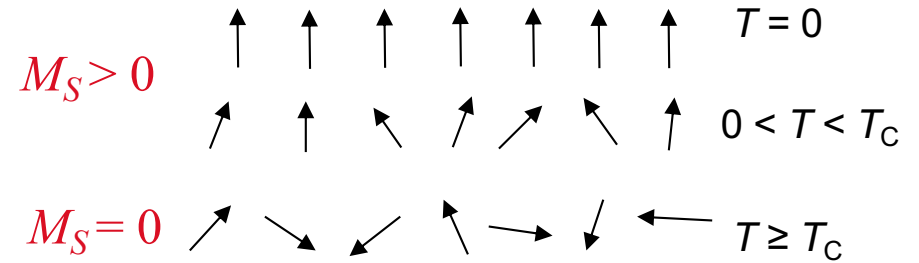
Material	$T_C$ (K)	$\Theta_C$ (K)	$C$ (K)	$M_{sp}$ ( $10^6$ A/m)	$n_B$ = $M_{s0}/\mu_B$ pro Atom
Fe	1043	1100	2.22	1.746	2.22
Co	1395	1415	2.24	1.446	1.72
Ni	629	649	0.588	0.510	0.060
Gd	289	302	5.00	2.060	7.63
Dy	87	157	—	2.920	10.2
EuO	69.4	78	4.68	1.930	6.8
MnAs	630	318	—	870	3.4
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	858	—	—	510	4.1

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

## Ferromagnetismus:

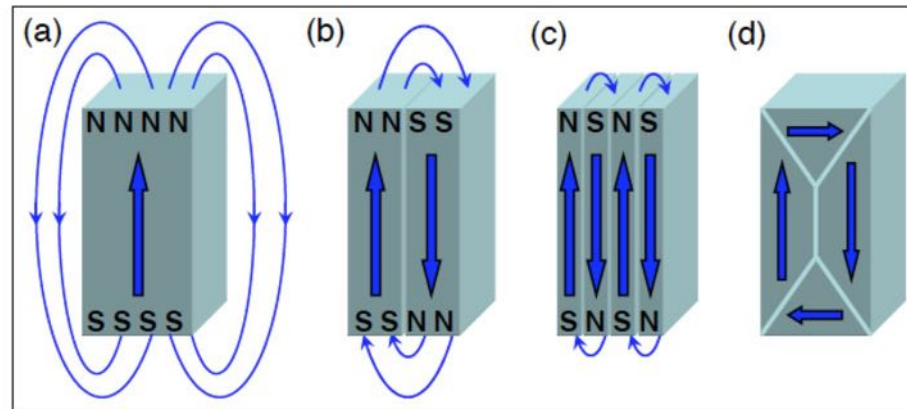
Sättigungsmagnetisierung für  $B = 0$ :

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

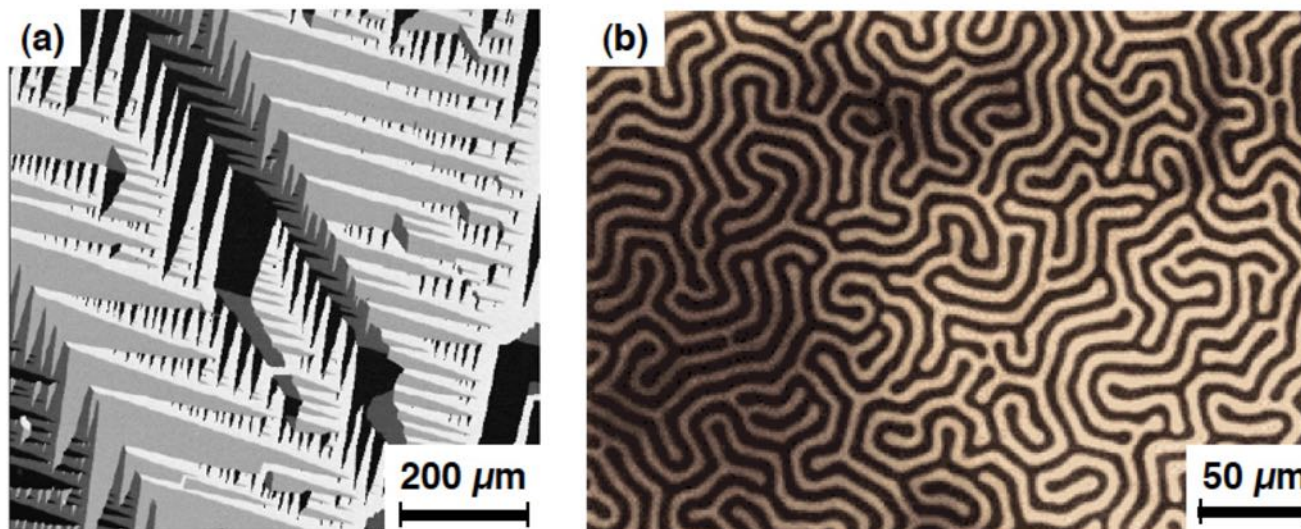




***Ferromagnetismus:*** Domänenbildung für  $T < T_c$



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



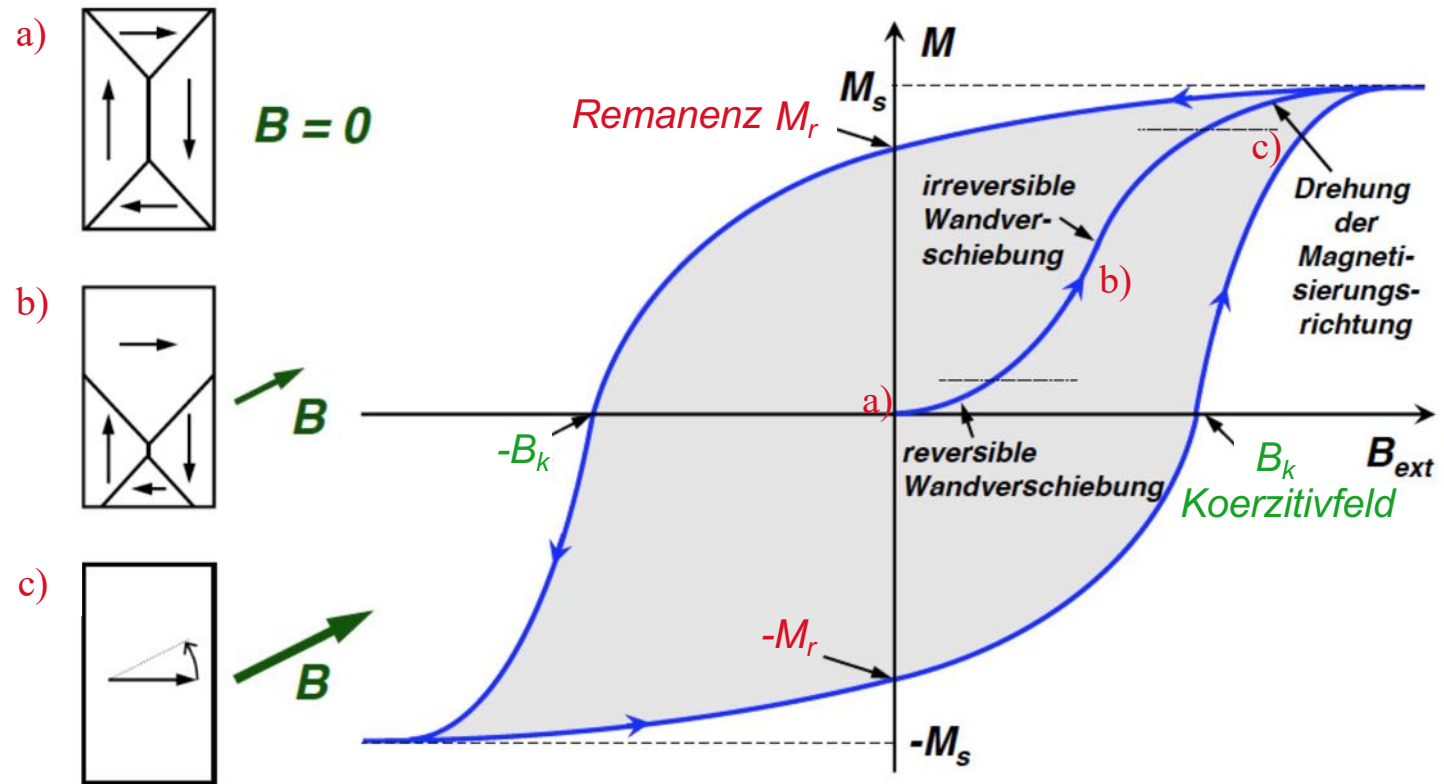
(a) Domänenstrukturen in einem Fe (100) Film aufgenommen mit einem spinpolarisierten Rasterelektronenmikroskop. (b) Magnetooptische Abbildung der Domänenstruktur in einem amorphen Gd-Co-Film.



# Ferromagnetismus:

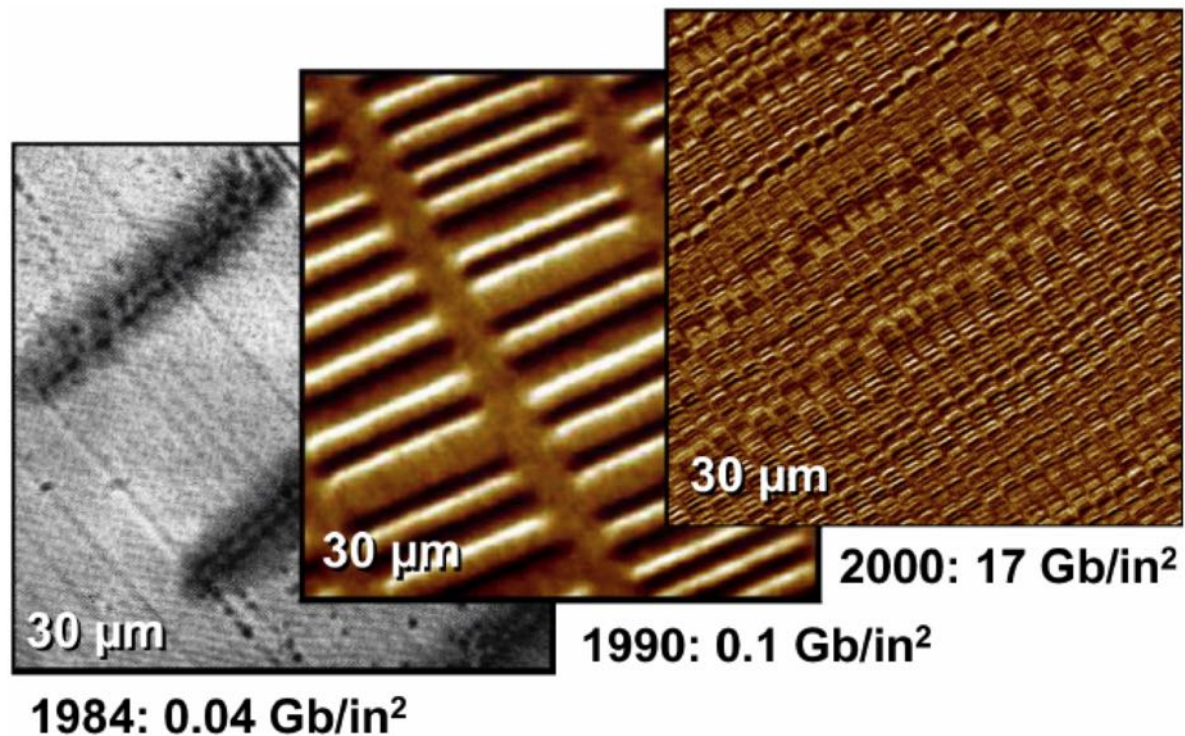
Domänenbildung für  $T < T_c$

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

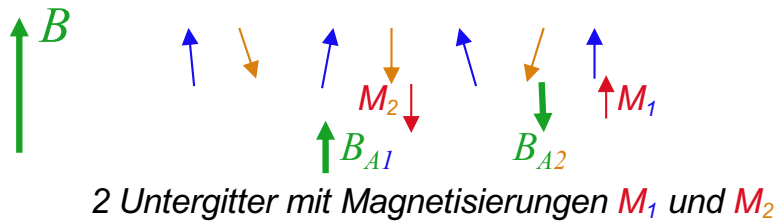


Verkleinerung des Bitmusters auf einer magnetischen Festplatte zwischen 1984 und 2000. Der Bildausschnitt beträgt jeweils  $30 \times 30 \mu\text{m}^2$  (Quelle: IBM Deutschland).

## Antiferromagnetismus:

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

molekulares Austauschfeld mit negativer Austauschkopplung



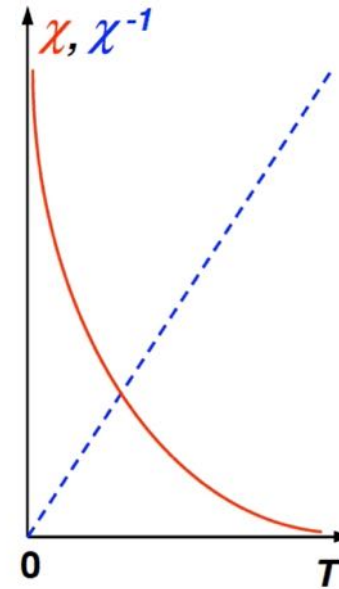
$$B_{A1} = -\lambda \mu_0 M_2 \quad B_{A2} = -\lambda \mu_0 M_1$$

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

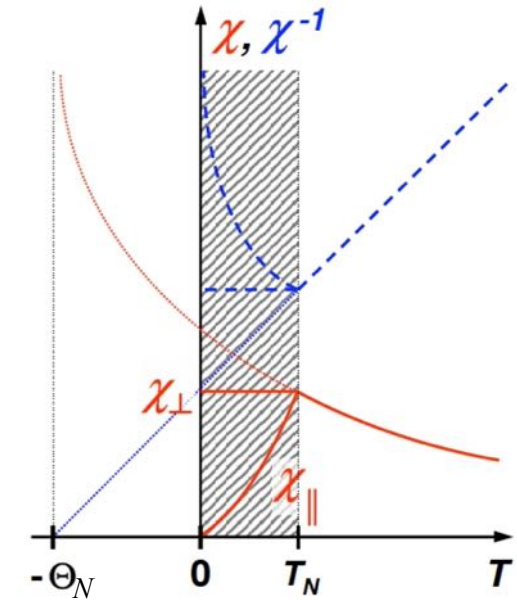
$$\mu_0 M = \mu_0 (M_1 + M_2)$$

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

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



Curie-Gesetz



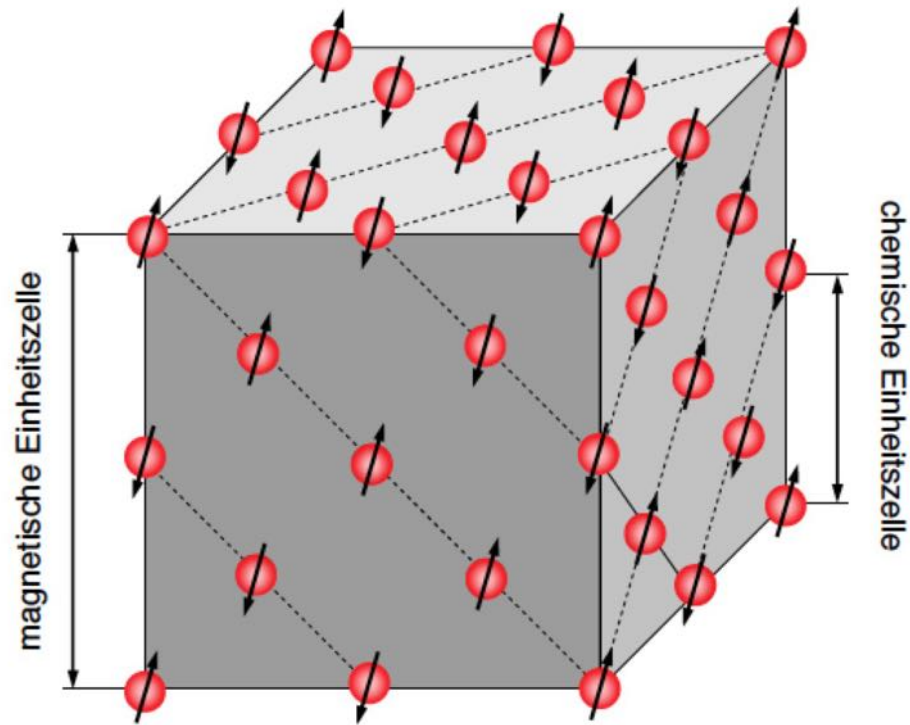
Antiferromagnet

Substanz	$T_N$ (K)	$\Theta_N$ (K)	$\Theta_N/T_N$
MnO	122	610	5.3
MnF <sub>2</sub>	67	82	1.24
FeO	195	570	2.9
FeCl <sub>2</sub>	24	48	2
CoO	291	330	1.14
CoCl <sub>2</sub>	25	38.1	1.53
NiO	525	~ 2000	~ 4
NiCl <sub>2</sub>	50	68.2	1.37

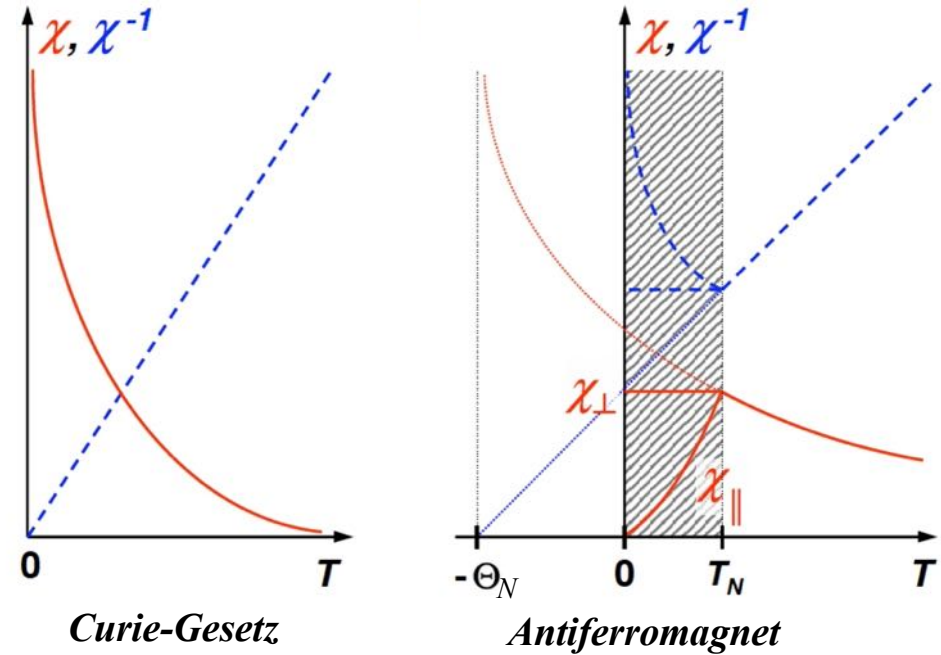
$\Theta_N \approx T_N$  : Néel-Temperatur



## Antiferromagnetismus:



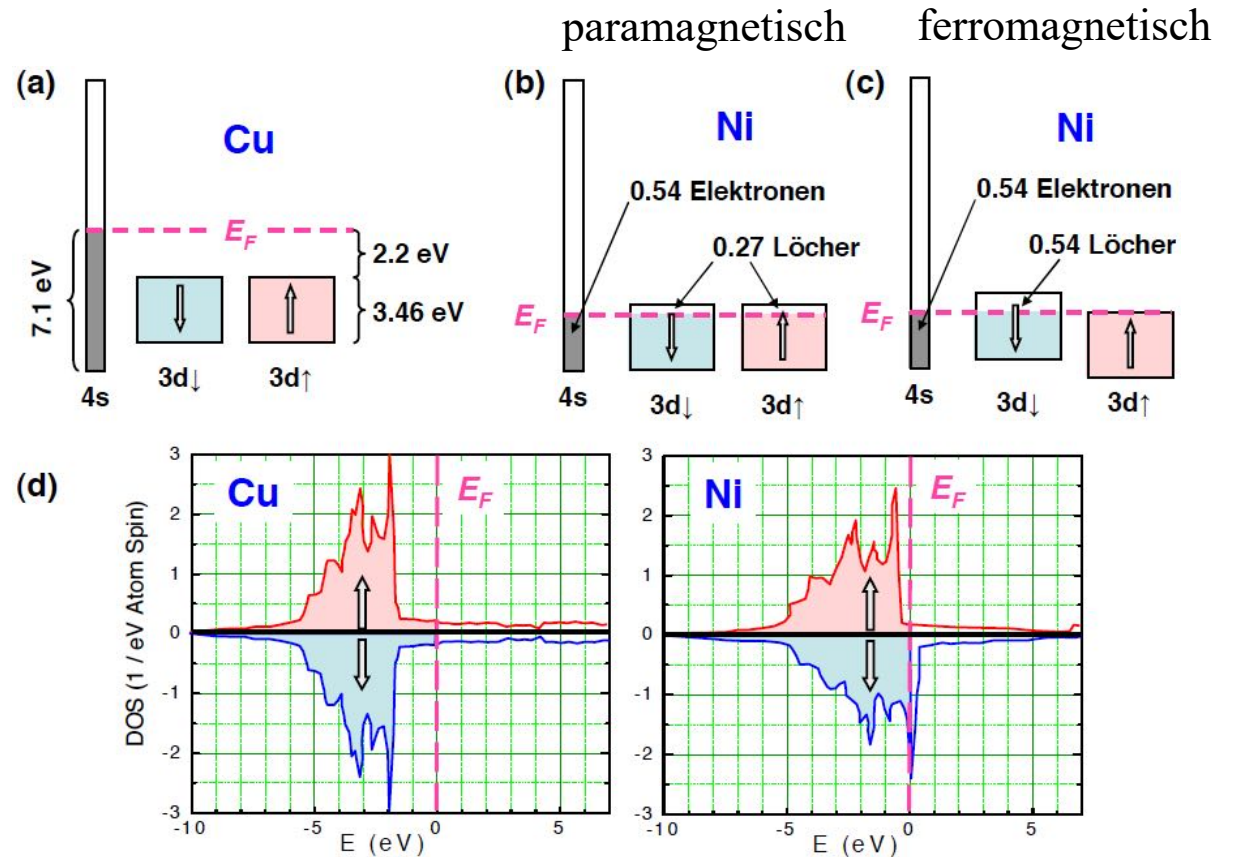
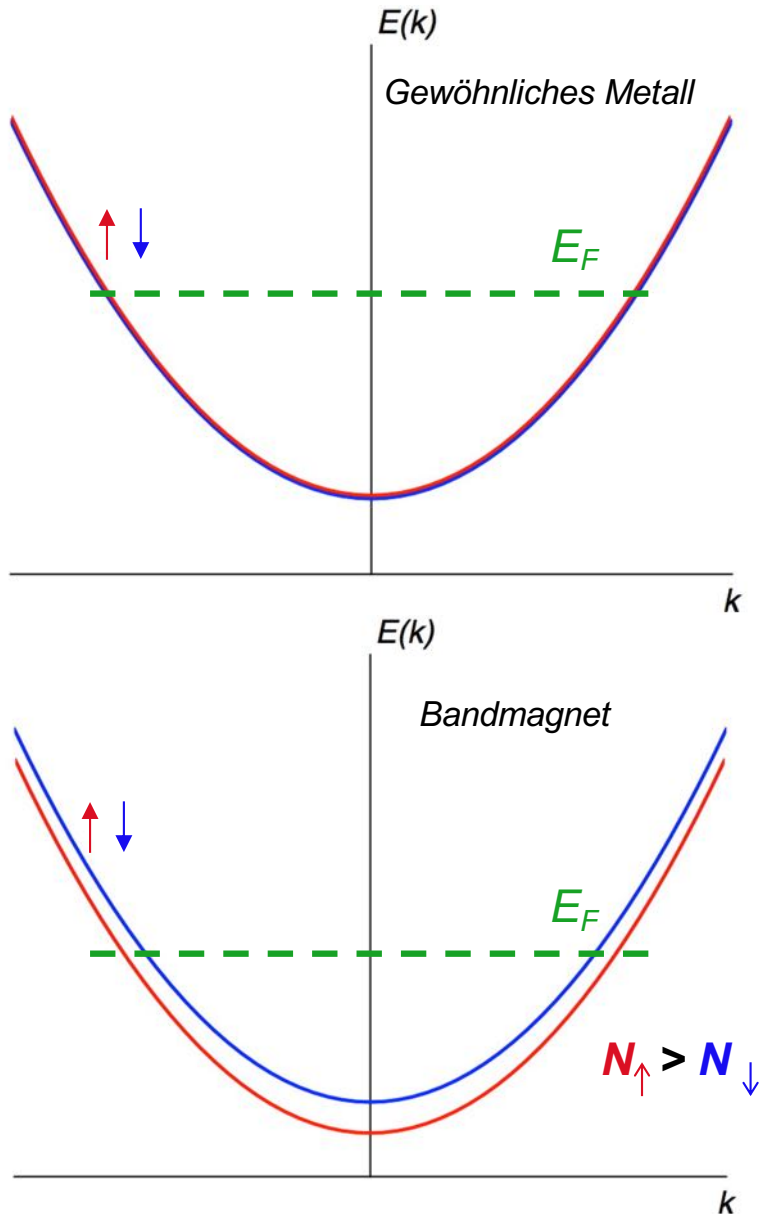
Anordnung der Spins der  $\text{Mn}^{2+}$ -Ionen in antiferromagnetischem  $\text{MnO}$ . Die zwischen den  $\text{Mn}^{2+}$ -Ionen liegenden  $\text{O}^{2-}$ -Ionen sind nicht gezeigt.



Substanz	$T_N$ (K)	$\Theta_N$ (K)	$\Theta_N/T_N$
MnO	122	610	5.3
MnF <sub>2</sub>	67	82	1.24
FeO	195	570	2.9
FeCl <sub>2</sub>	24	48	2
CoO	291	330	1.14
CoCl <sub>2</sub>	25	38.1	1.53
NiO	525	~ 2000	~ 4
NiCl <sub>2</sub>	50	68.2	1.37

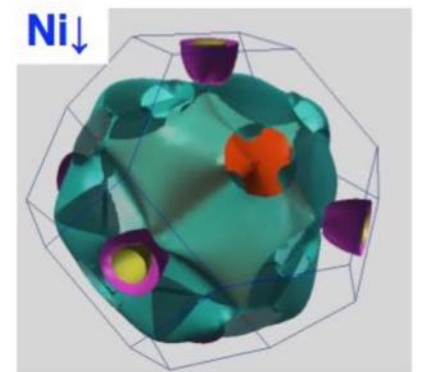
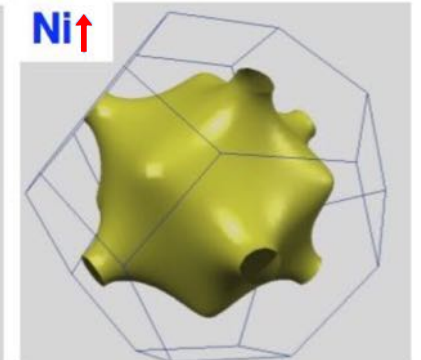
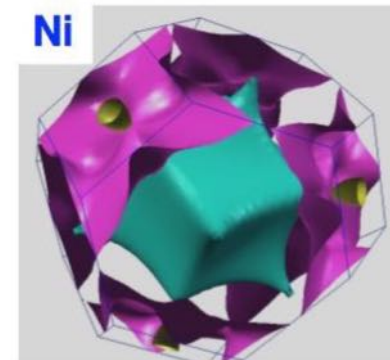
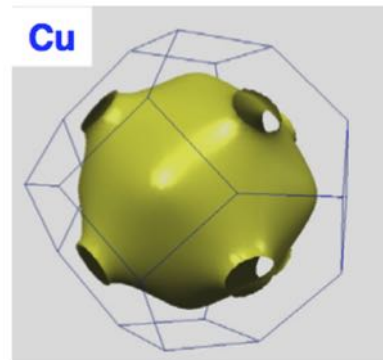
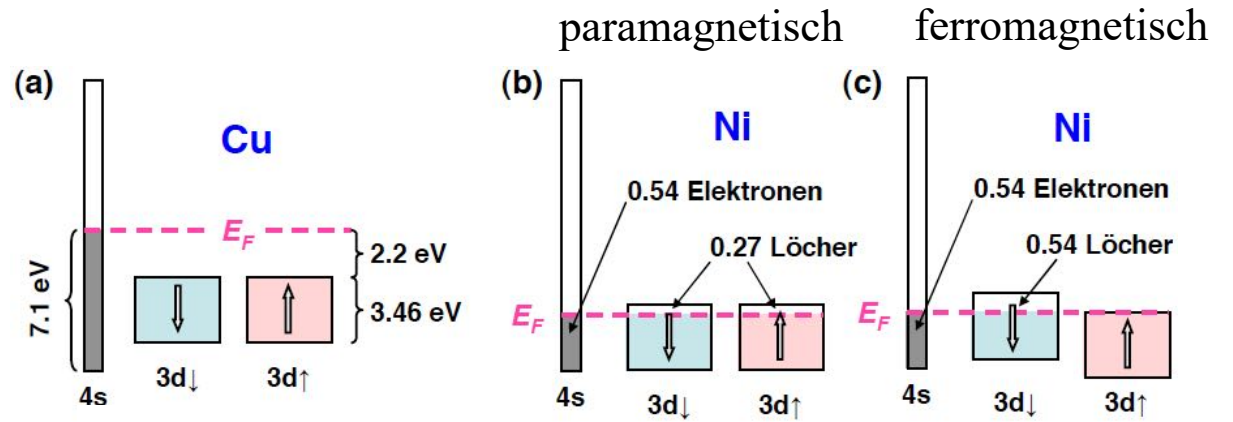
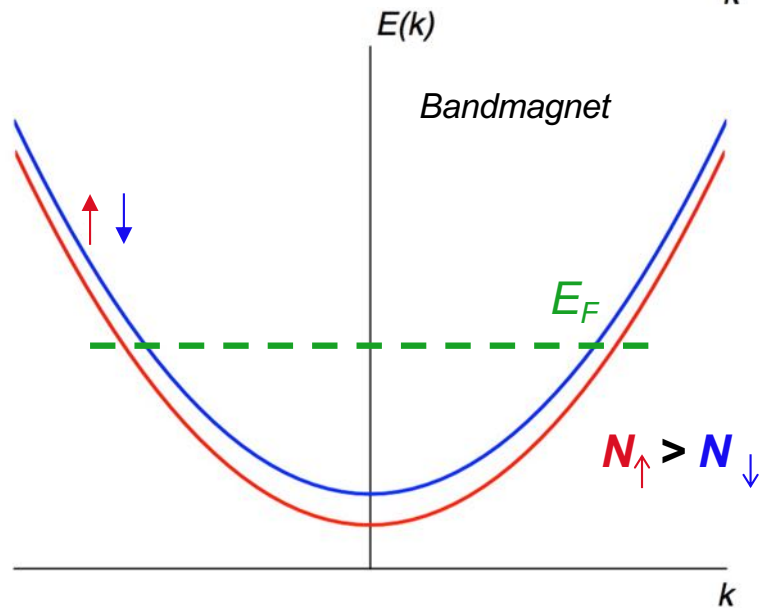
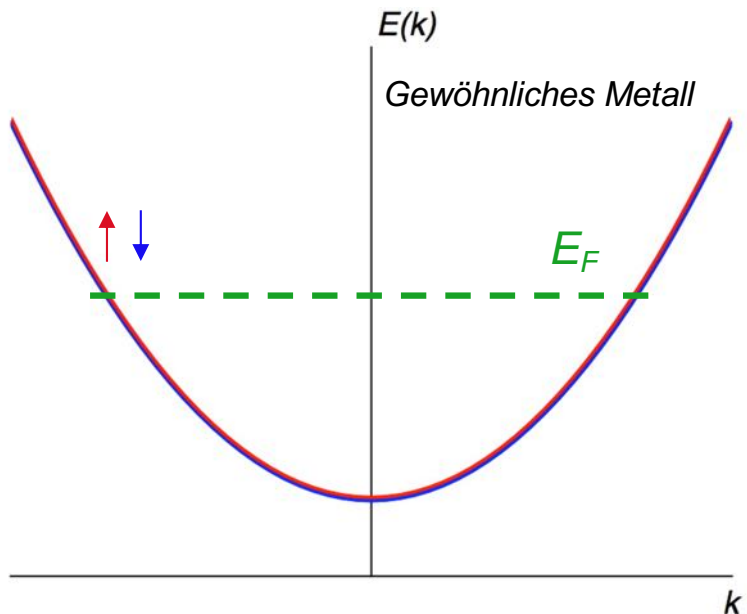
$\Theta_N \approx T_N$  : Néel-Temperatur

# Bandferromagnetismus:



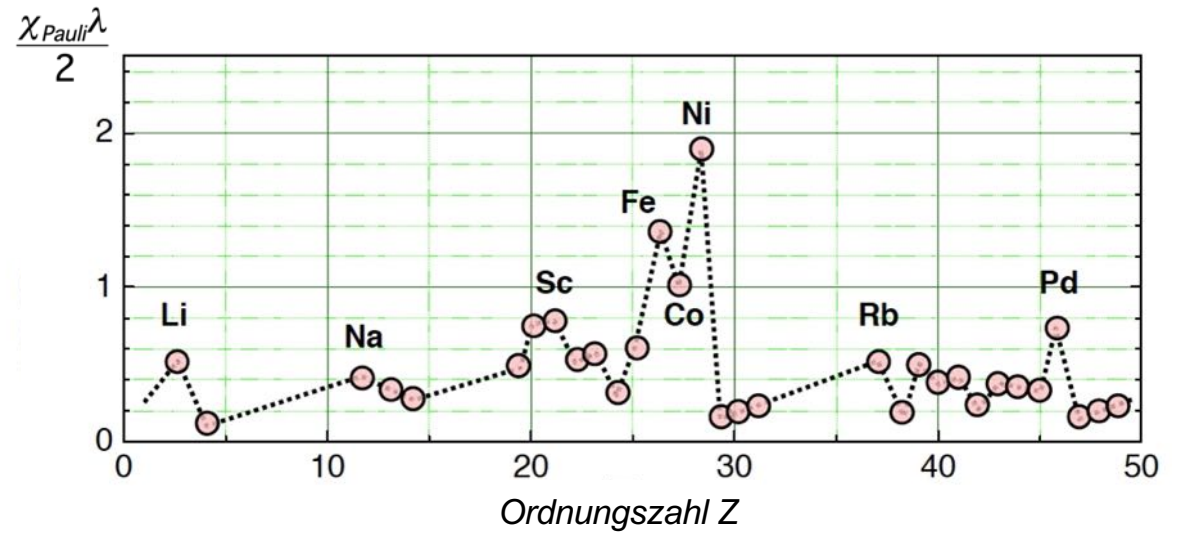
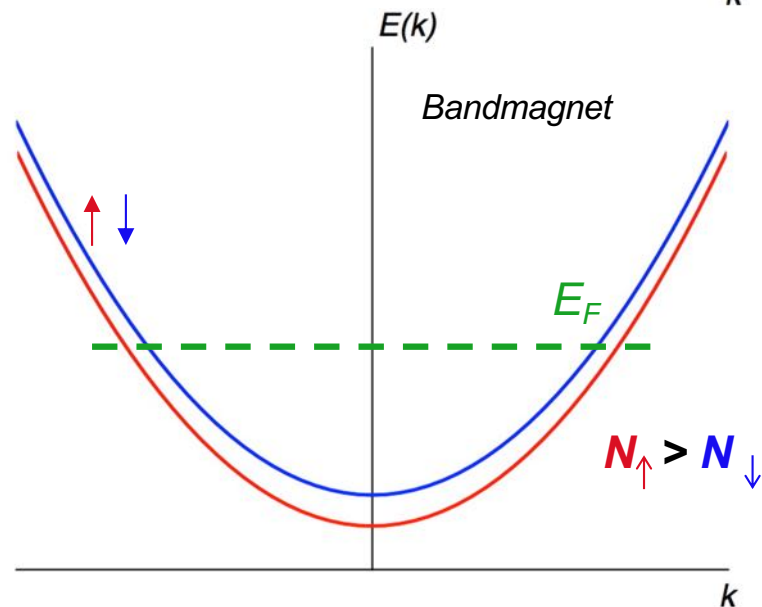
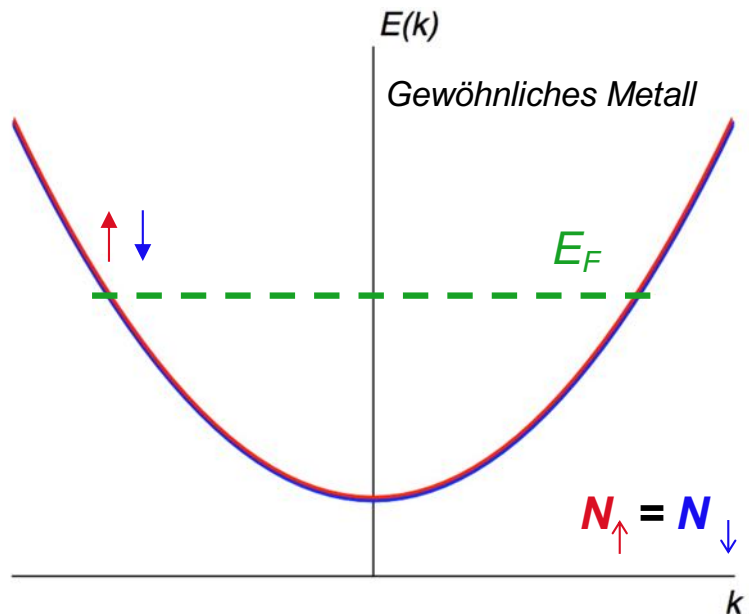
Schematische Darstellung der Besetzung der 3d- und 4s-Niveaus bei Cu (a) und Ni im paramagnetischen (b) und ferromagnetischen Zustand (c). In (d) ist die berechnete Zustandsdichte der 3d- und 4s-Elektronen von Cu und Ni gezeigt (nach J. Callaway und C.S. Wang, Phys. Rev. B 7, 1096 (1983)). Die 4s-Elektronen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

# Bandferromagnetismus:





# Bandferromagnetismus:



Bandmagnet: Aufspaltung der Energiebänder für  $B = 0$ , sobald

$$\frac{\chi_{\text{Pauli}} \lambda}{2} > 1 \quad (\text{Stoner-Kriterium})$$