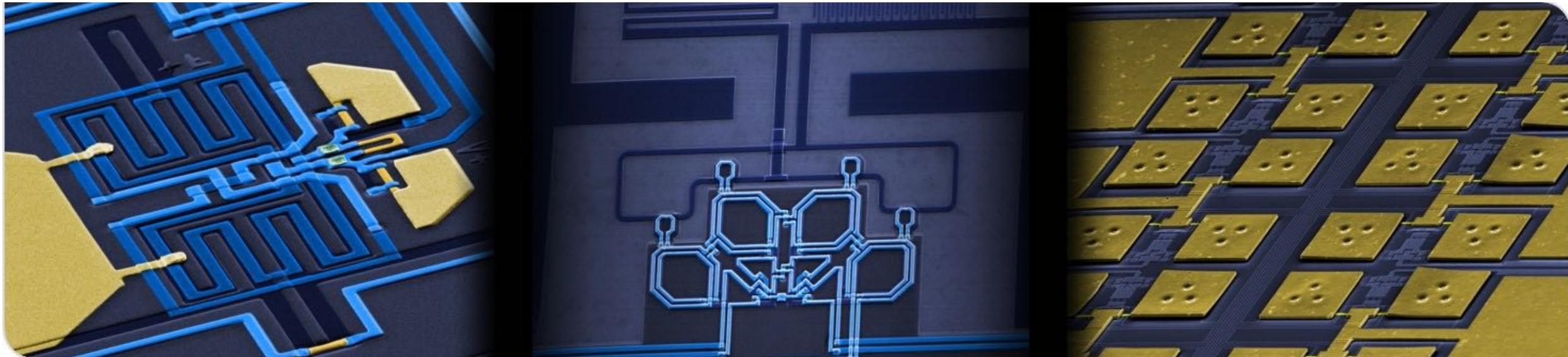


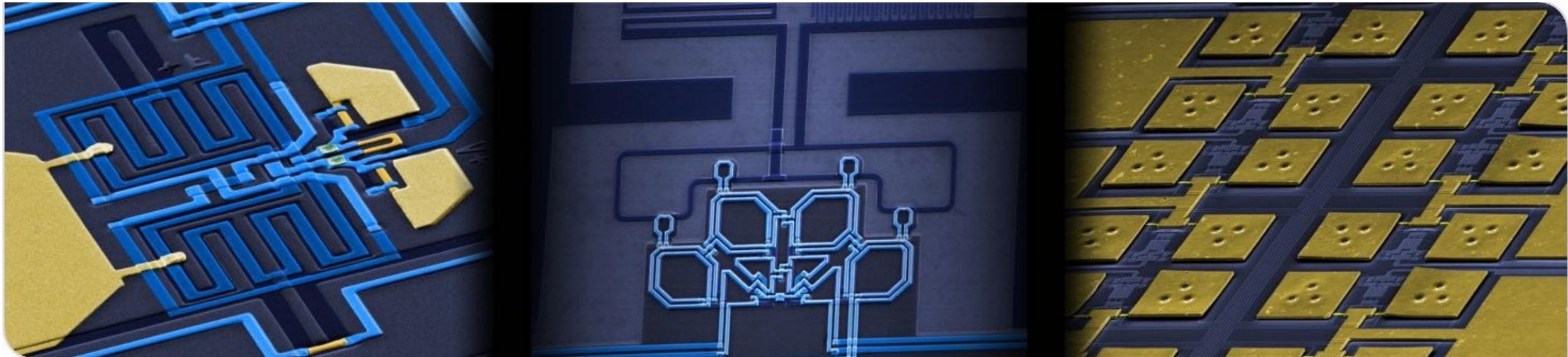
# Bauelemente der Elektrotechnik

Prof. Dr. rer. nat. Sebastian Kempf  
Wintersemester 2021/22

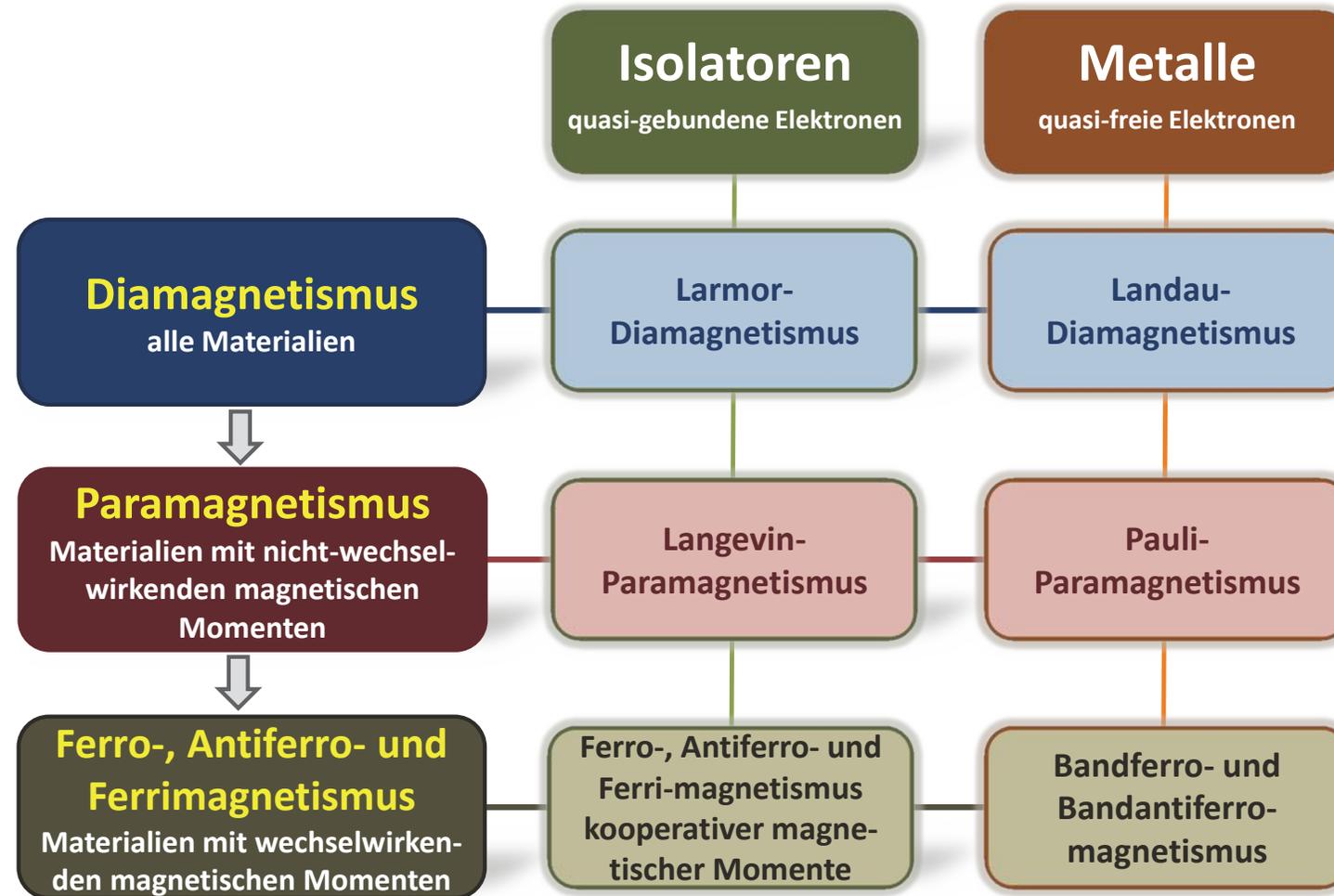


# Bauelemente der Elektrotechnik

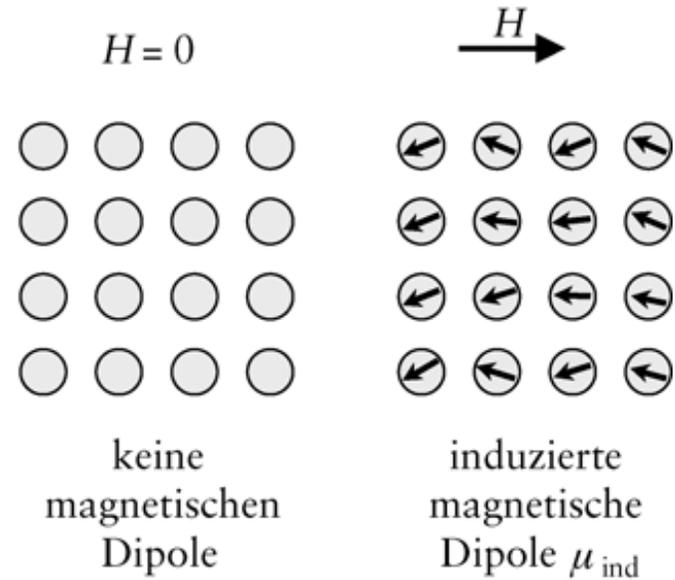
## Magnetismus und magnetische Werkstoffe Wintersemester 2021/22



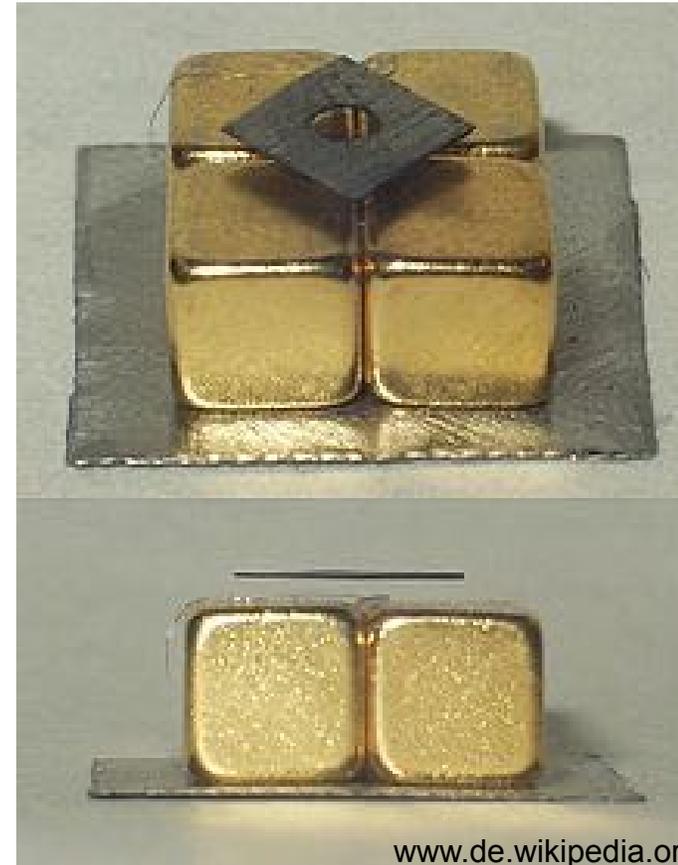
# Arten des Magnetismus



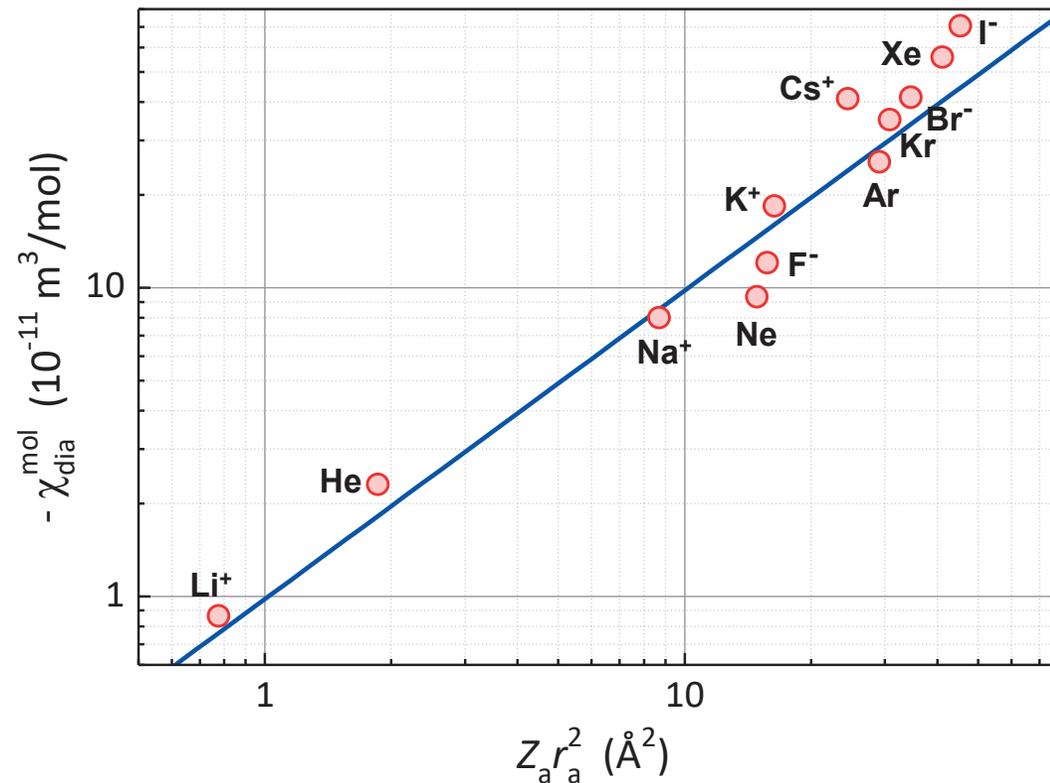
# Diagnomagnetismus



Induzierte magnetische Dipole sind dem äußeren Magnetfeld **entgegen gerichtet**.

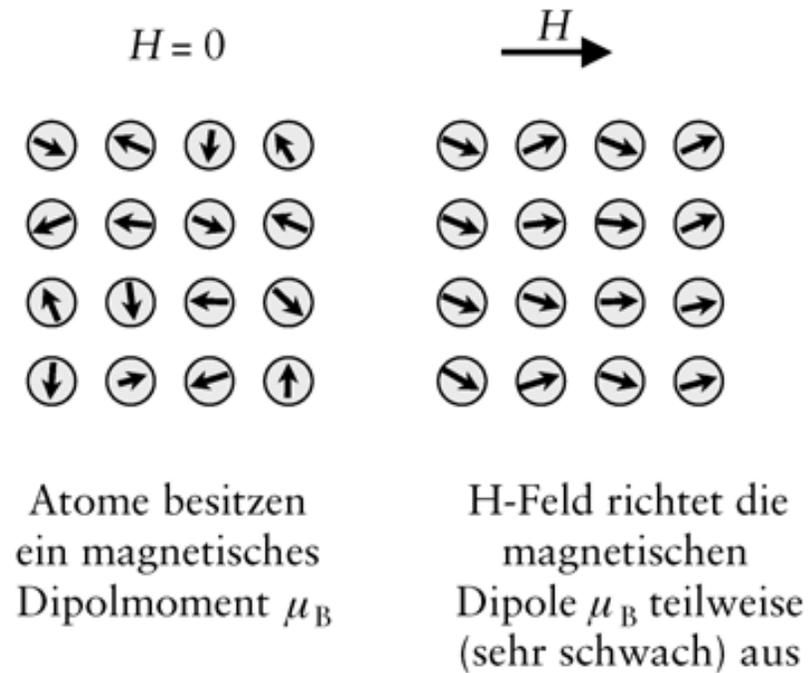


# Suszeptibilität von Atomen und Ionen mit abgeschlossener Elektronenschale



- Atome bzw. Ionen mit großer Ausdehnung ( $r_a$ ) zeigen einen besonders großen Diamagnetismus
- Diamagnetismus ist schwach (siehe Größenordnung der y-Achse)
- Suszeptibilität des Festkörpers erhält man, indem man den angegebenen Wert mit  $\rho/M_{\text{mol}}$  multipliziert.

# Paramagnetismus



# Grundzustandskonfiguration und effektive Magnonenzahl der Seltenen Erden

Ion	Konfiguration	Schema $m_\ell = +3, +2, +1, 0, -1, -2, -3$	S	L = $ \Sigma m_\ell $	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

← Effektive Magnonenzahl

$$p = g_J \sqrt{J(J + 1)}$$

## Wichtig:

Magnetisches Moment wird durch nicht abgeschlossene 4f-Schale verursacht. Diese wird durch die Elektronen der 5s- und 5p-Schale vor dem Einfluss der elektrischen Felder der Nachbaratome abgeschirmt.

→ Magnetische Momente werden durch das Kristallfeld kaum beeinflusst.

# Grundzustandskonfiguration und effektive Magnonenzahl der Übergangsmetalle

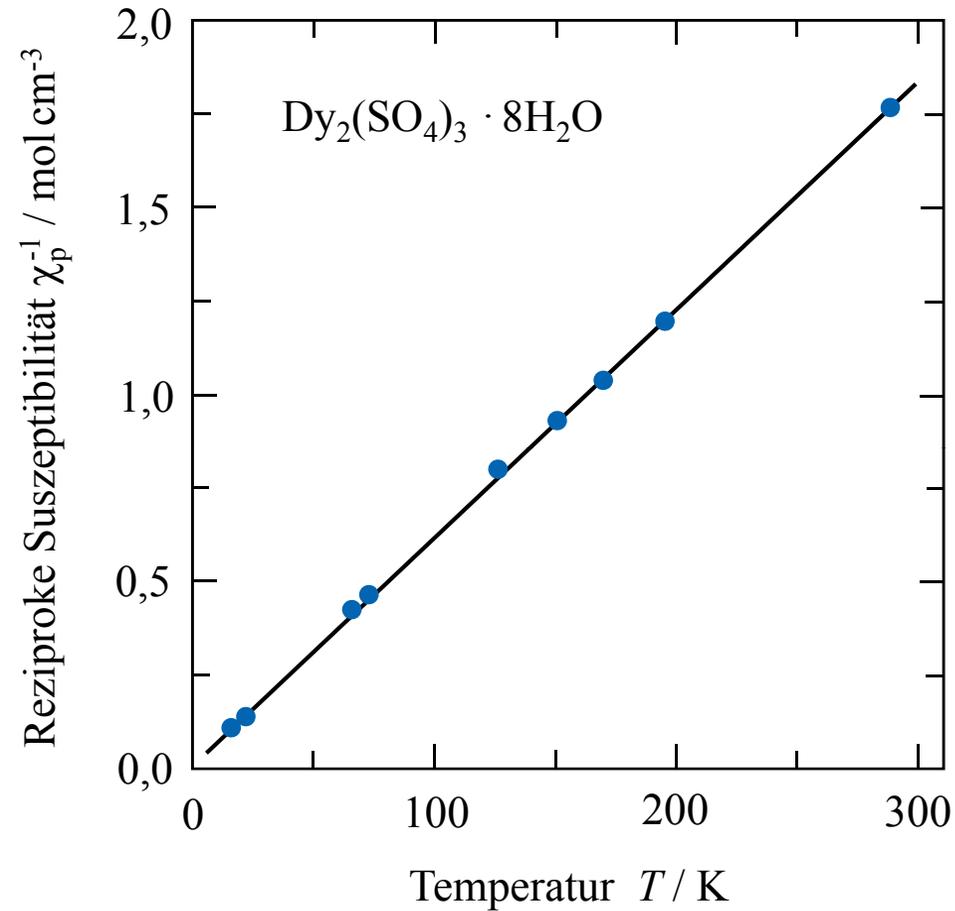
Ion	Konfiguration	Schema $m_\ell = +2, +1, 0, -1, -2,$	S	L = $ \sum m_\ell $	J	Term	$p =$ $g_J [J(J+1)]^{1/2}$	$p =$ $g_S [S(S+1)]^{1/2}$	p (Exp.)
Ti <sup>3+</sup> V <sup>4+</sup>	[Ar]3d <sup>1</sup>	↑	1/2	2	3/2	<sup>2</sup> D <sub>3/2</sub>	1.55	1.73	1.8
V <sup>3+</sup>	[Ar]3d <sup>2</sup>	↑ ↑	1	3	2	<sup>3</sup> F <sub>2</sub>	1.63	2.83	2.8
Cr <sup>3+</sup> V <sup>2+</sup> Mn <sup>4+</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

## Wichtig:

Magnetisches Moment wird durch nicht abgeschlossene, **außenliegende** 3d-Schale verursacht. Diese wird nicht durch andere Elektronen abgeschirmt; der Einfluss der elektrischen Felder der Nachbaratome ist spürbar.

→ Teilweise bzw. vollständige Aufhebung der Spin-Bahn-Kopplung; teilweise **Auslöschung** der Bahn-Moment

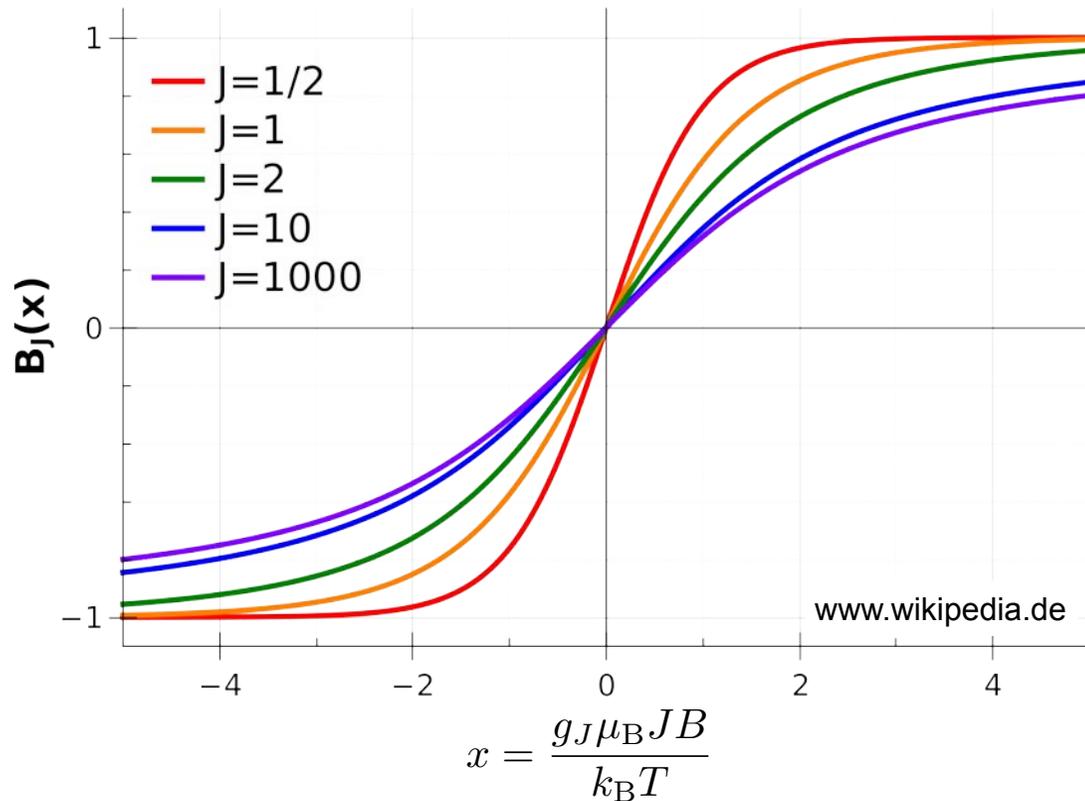
# Suszeptibilität von $\text{Dy}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$



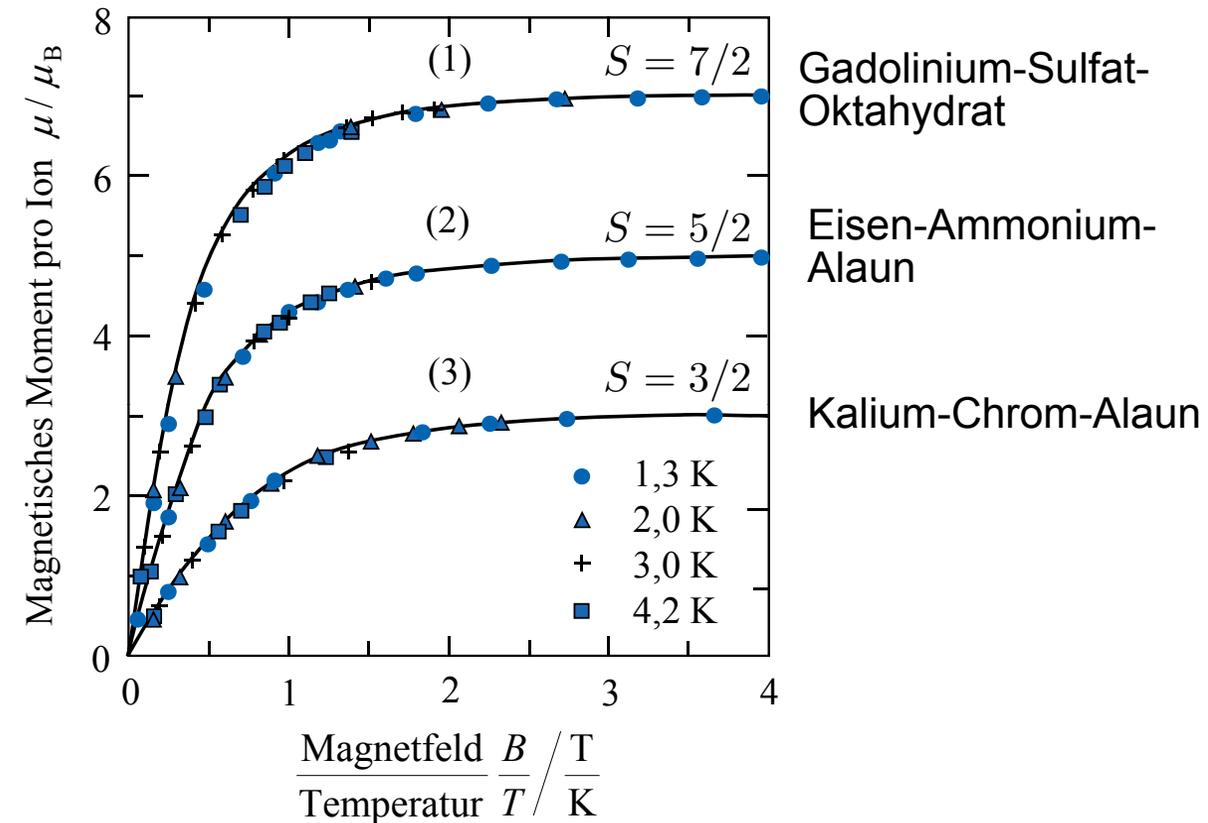
Curie-Gesetz:  $M \propto \frac{B}{T} \propto \frac{1}{T}$

# Temperaturabhängigkeit der paramagnetischen Suszeptibilität

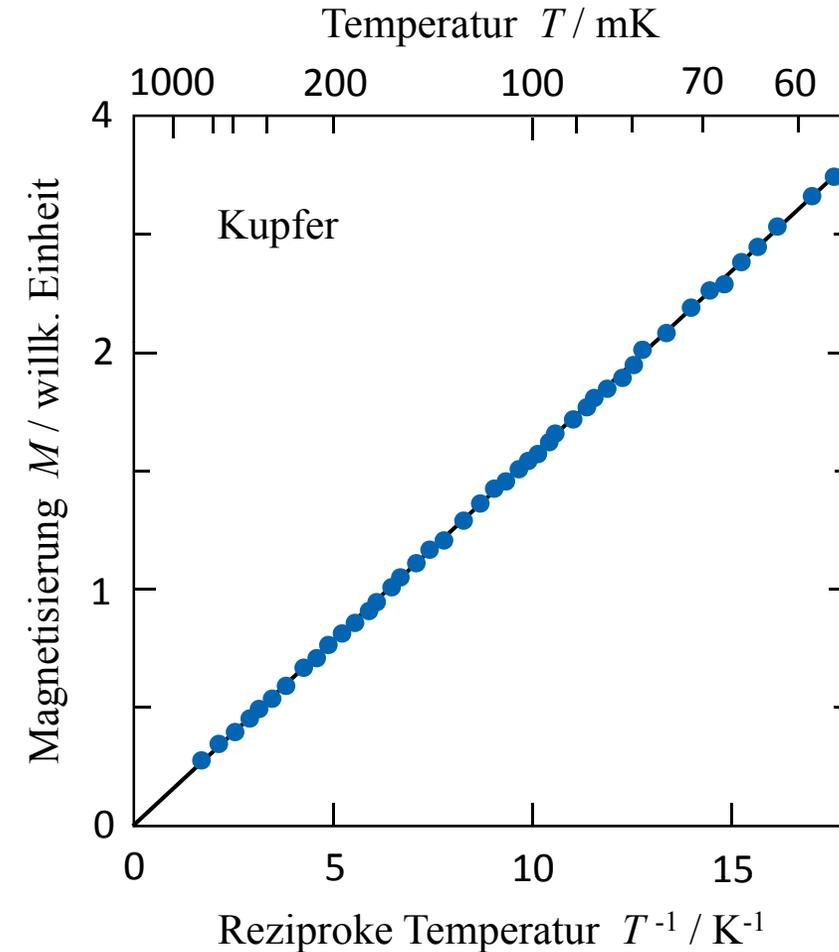
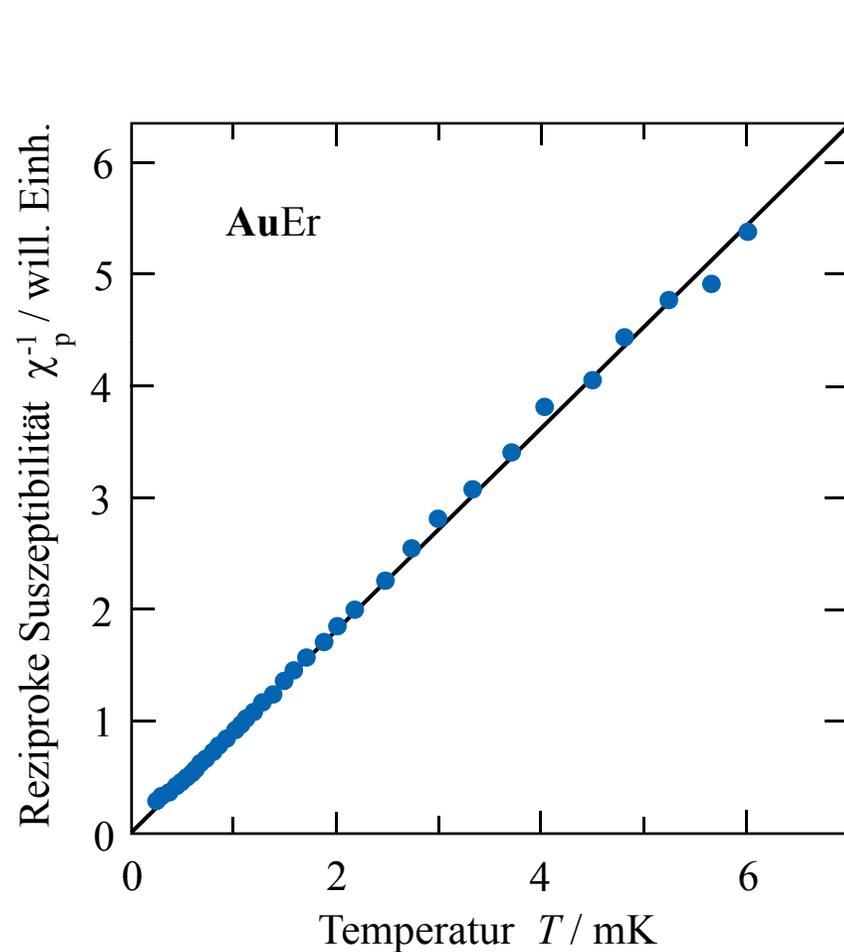
Brillouin-Funktion für verschiedene Werte des Gesamtdrehimpulses  $J$



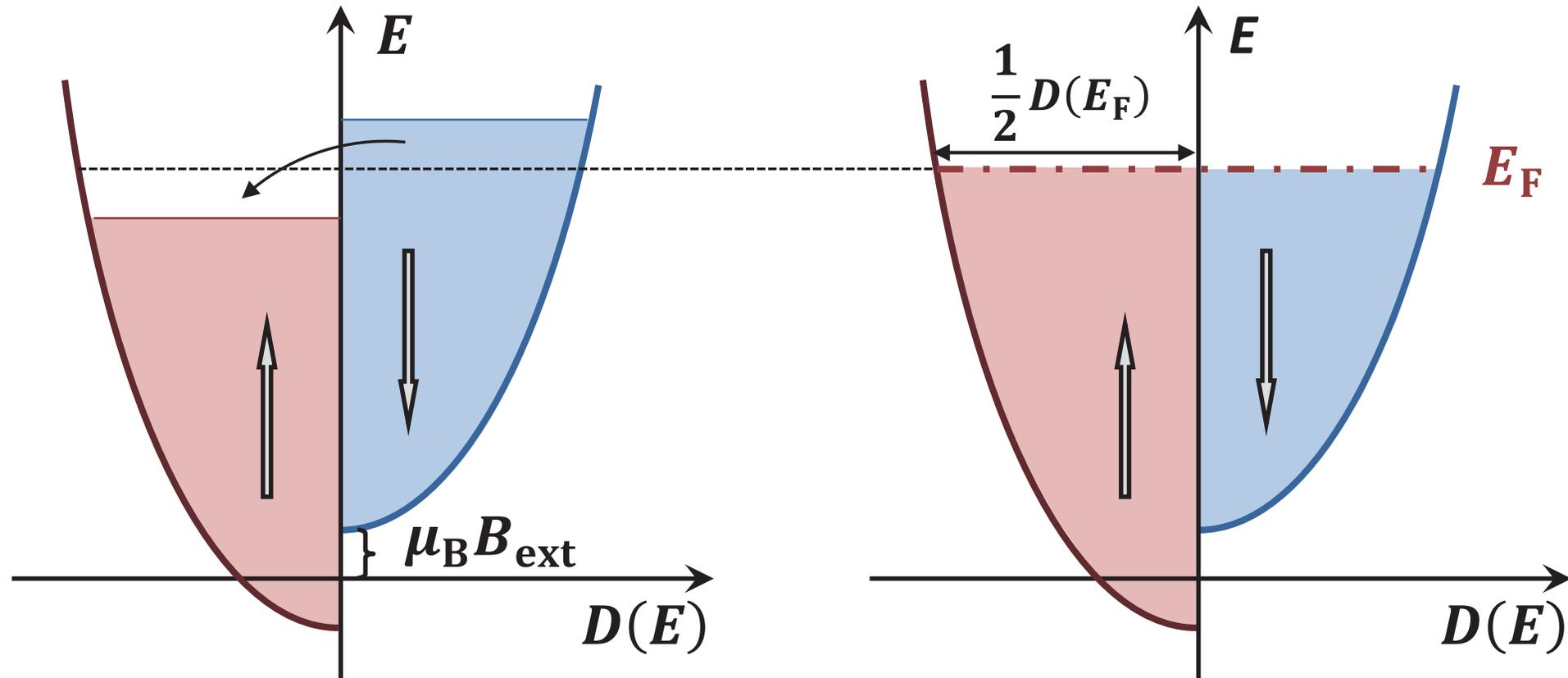
Temperaturverlauf  $\chi_{\text{para}}(T)$  wird durch Brillouin-Funktion beschrieben



# Beispiele für paramagnetische Materialien

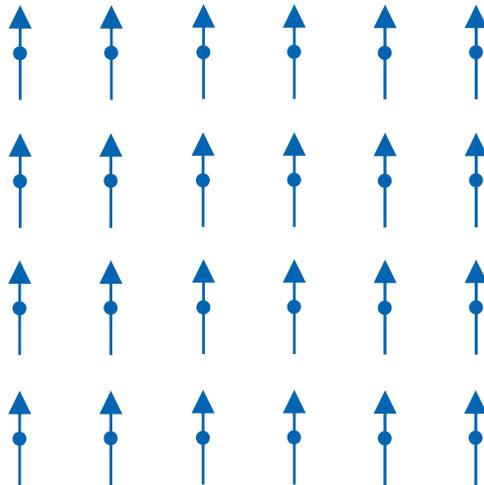


# Pauli-Paramagnetismus



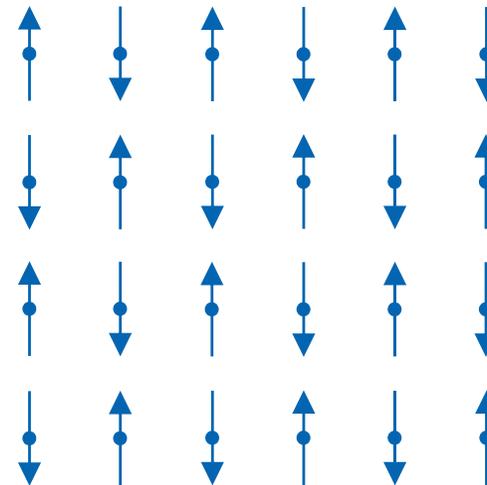
# Ferro-, antiferro- und ferrimagnetische Systeme

## Ferromagnetismus



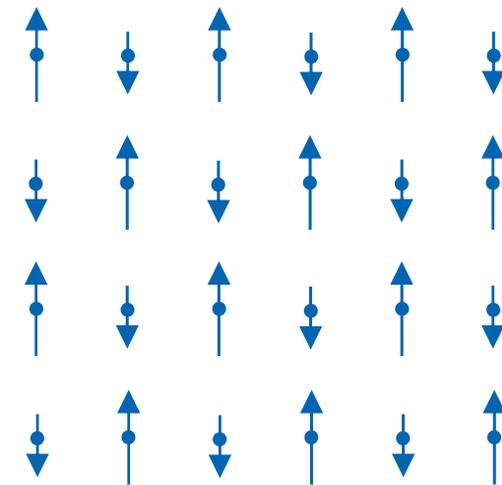
Alle magnetischen Momente sind in gleicher Richtung ausgerichtet.

## Antiferromagnetismus



Die Magnetisierungen verschiedener Untergitter heben sich auf

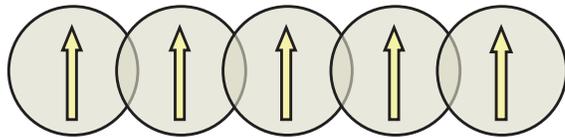
## Ferrimagnetismus



Die Magnetisierungen verschiedener Untergitter sind unterschiedlich groß und heben sich nicht exakt auf

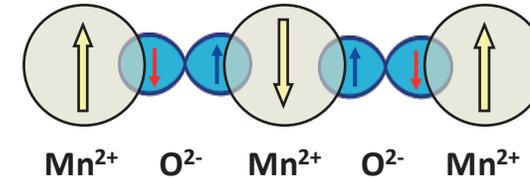
# Austauschwechselwirkung

## Direkte Austauschwechselwirkung



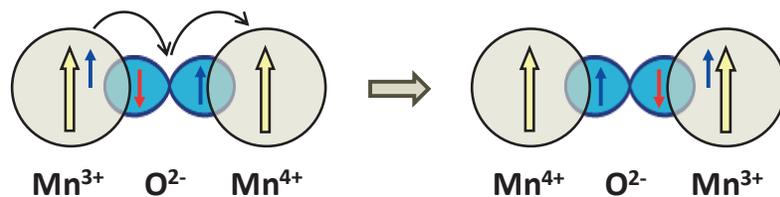
Direkter Überlapp der Wellenfunktionen der Gitteratome mit magnetischen Momenten

## Superaustausch



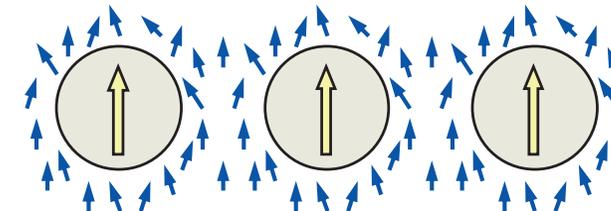
Wechselwirkung erfolgt indirekt über die Orbital dazwischenliegender diamagnetischer Atome bzw. Ionen

## Doppelaustausch



Analog zum Superaustausch; die Ionen haben aber unterschiedliche Valenzen

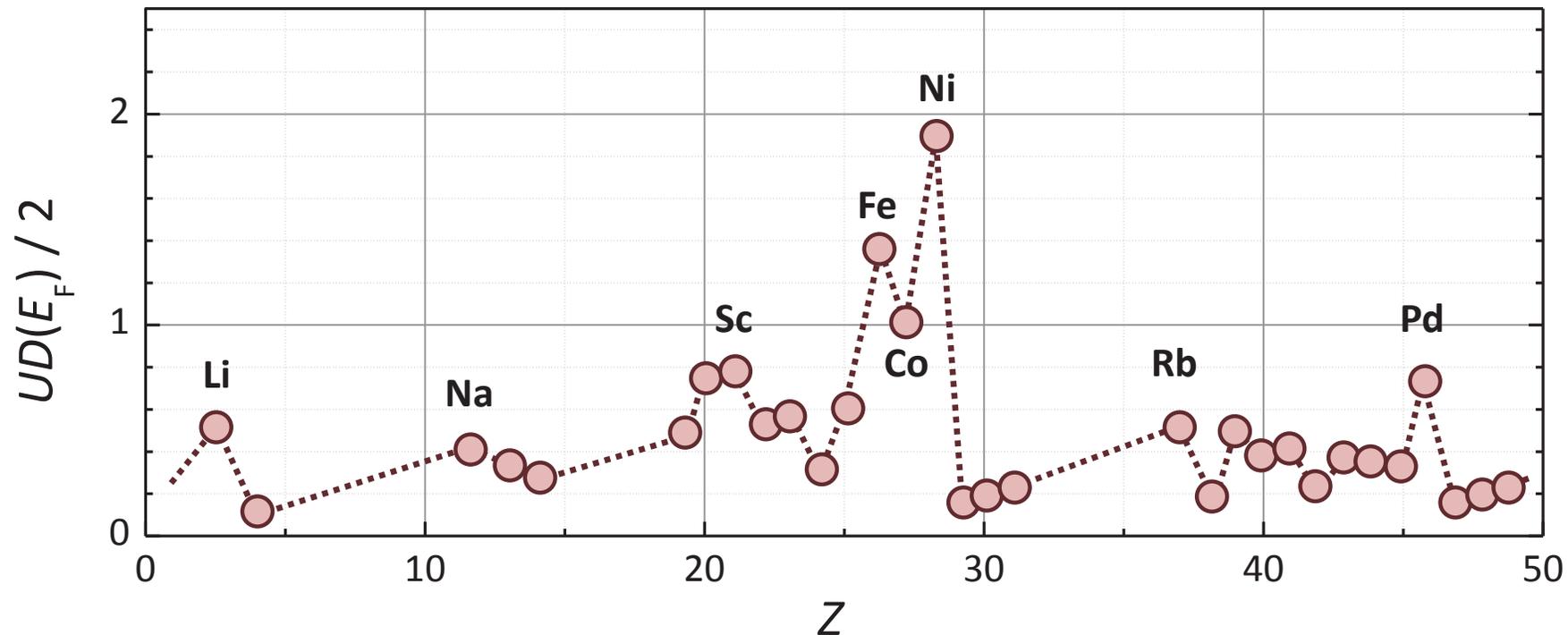
## RKKY-Wechselwirkung



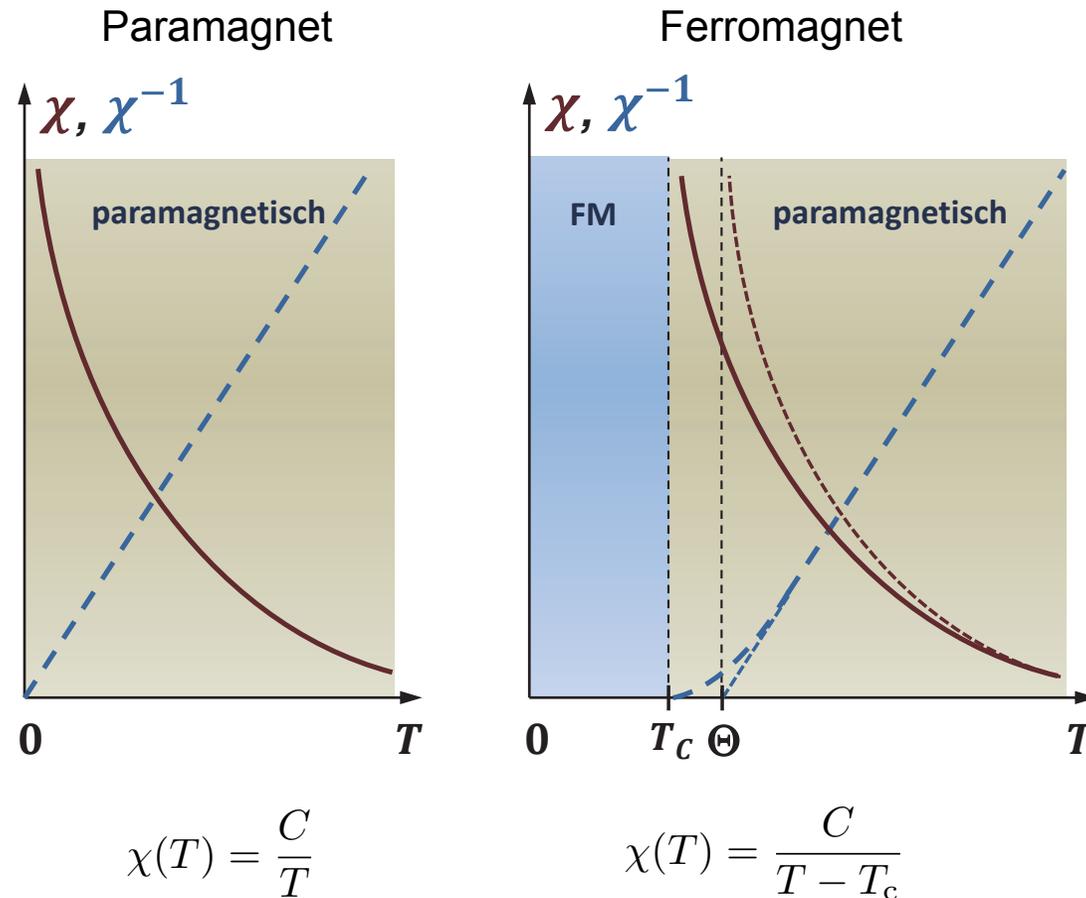
Indirekter Austausch, der durch die magnetischen Momente der Leitungselektronen vermittelt wird.

# Stoner-Kriterium

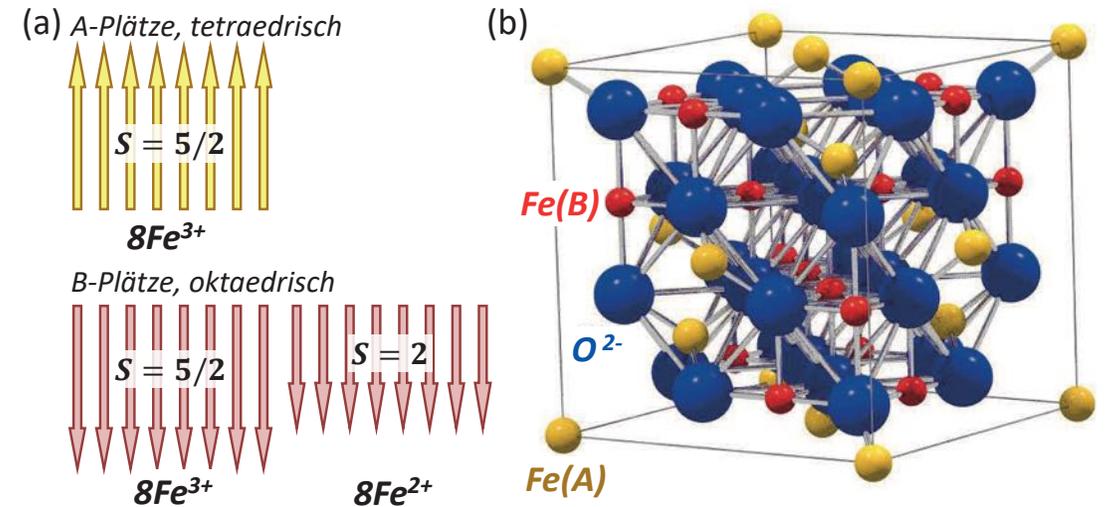
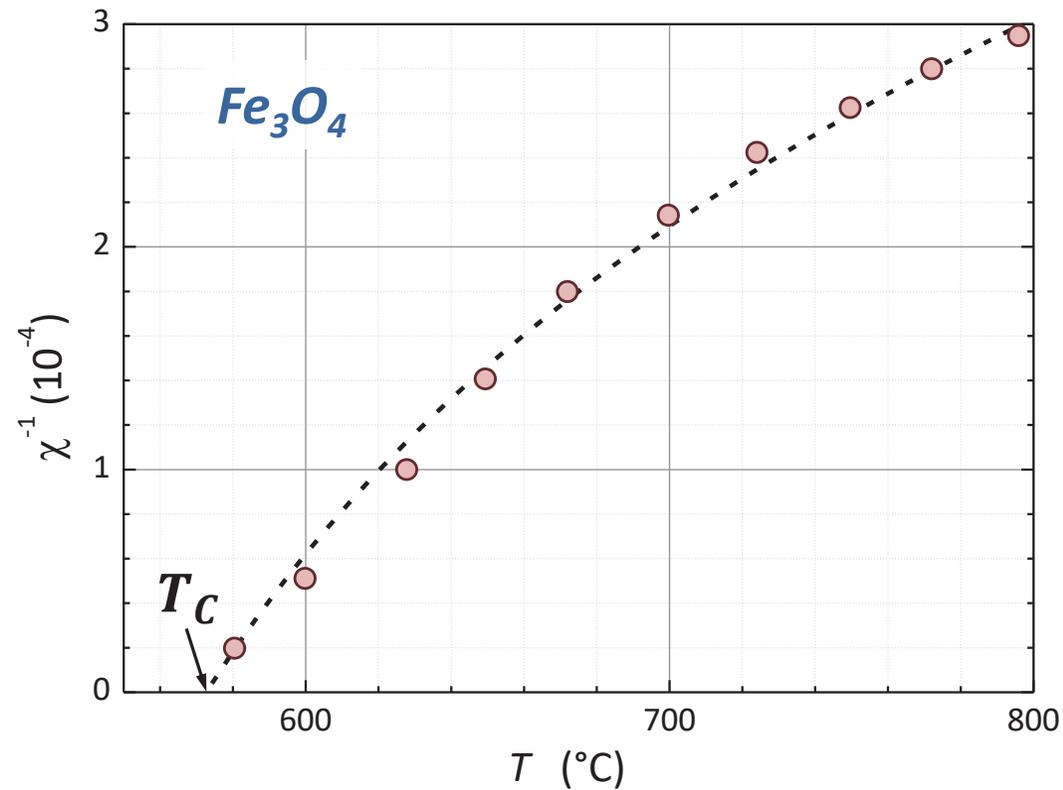
Eisen (Fe), Kobalt (Co) und Nickel (Ni) zeigen ferromagnetisches Verhalten



# Temperaturabhängigkeit der Suszeptibilität - Ferromagnetismus -



# Temperaturabhängigkeit der Suszeptibilität - Ferrimagnetismus -



Néel-Temperatur:

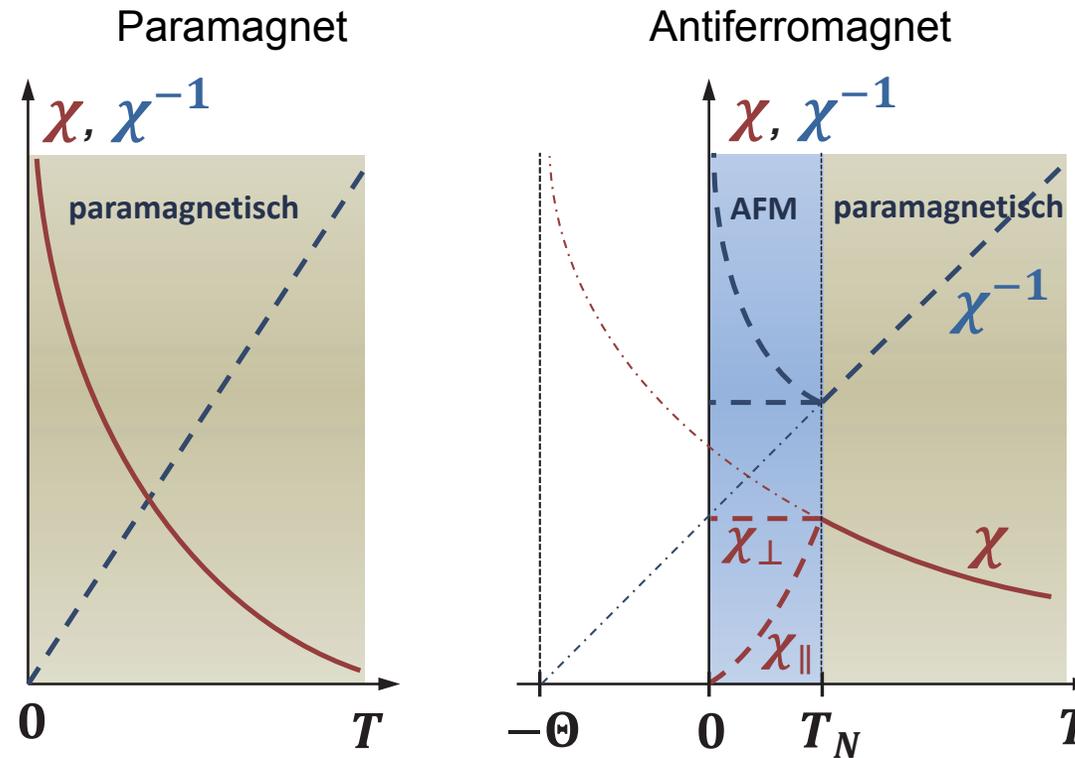
$$T_c = |\gamma_{AB}| \sqrt{C_A C_B}$$

← Curie-Konstanten der beiden Untergitter

Suszeptibilität:

$$\chi = \frac{(C_A + C_B)T - 2|\gamma_{AB}|C_A C_B}{T^2 - T_c^2}$$

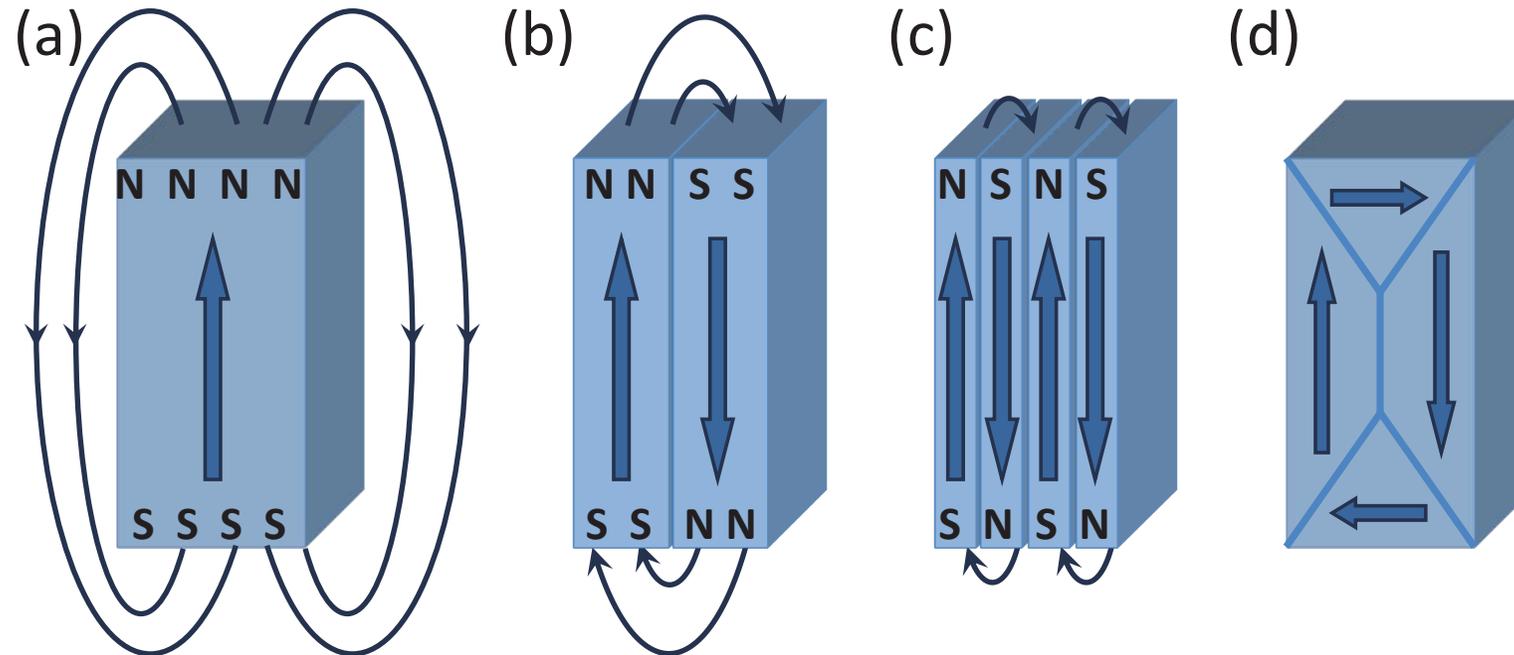
# Temperaturabhängigkeit der Suszeptibilität - Antiferromagnetismus -



$$\chi(T) = \frac{C}{T}$$

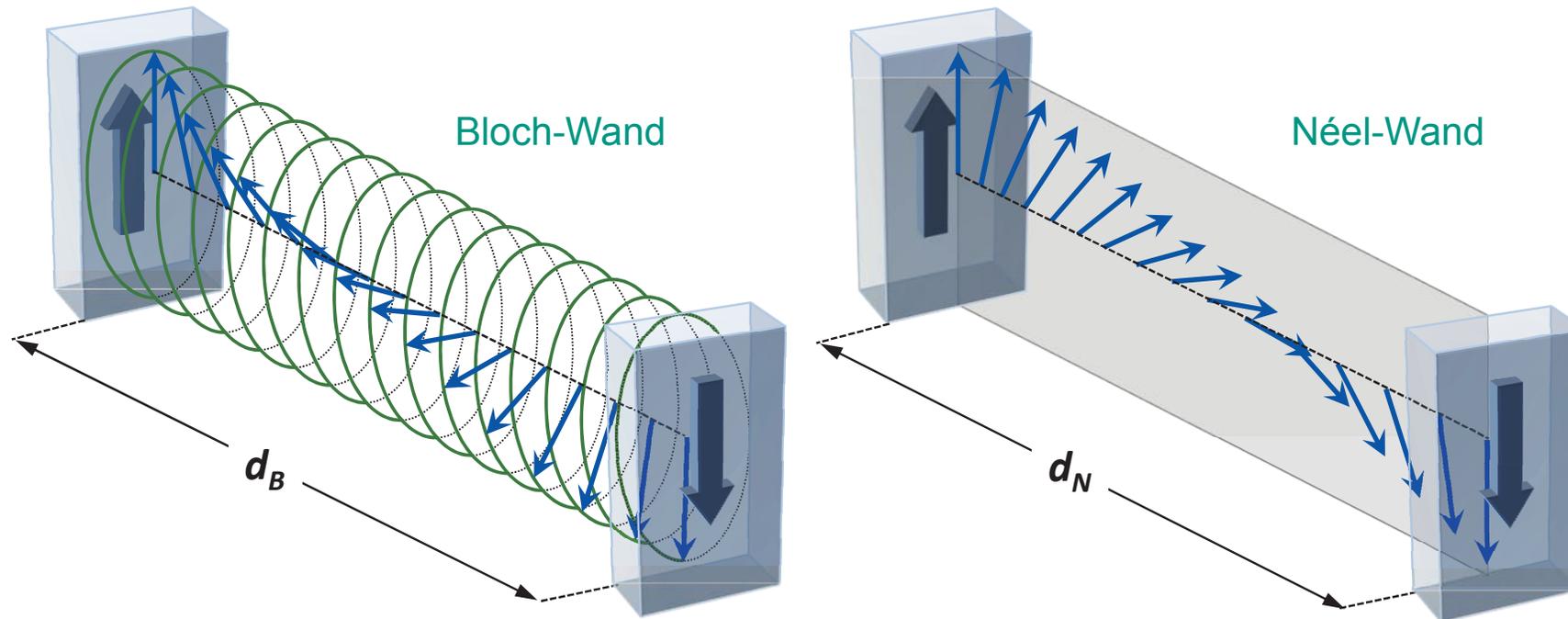
$$\chi(T) = \frac{2C}{T + \Theta}$$

# Magnetische Domänen



Die magnetostatische Selbstenergie nimmt von links nach rechts ab  
 besonders günstig: Domänenabschlusswände (siehe d)

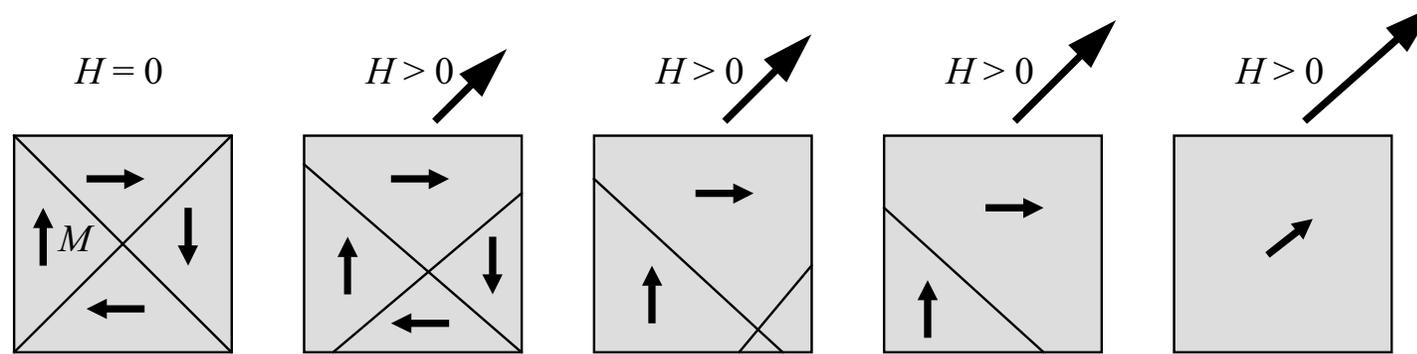
# Bloch- und Néel-Wände



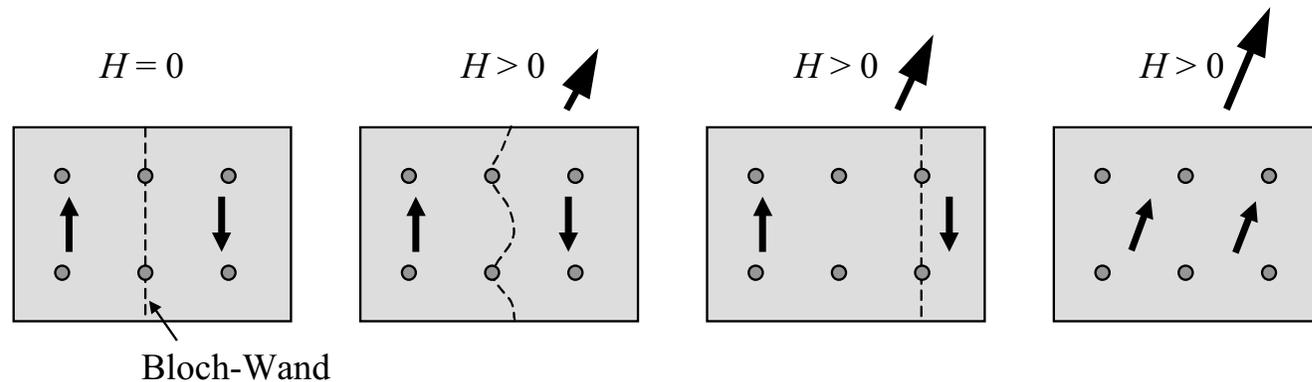
Änderung der Spin-Richtung erfolgt  
in Ebene parallel zur Wandfläche

Änderung der Spin-Richtung erfolgt  
in Ebene senkrecht zur Wandfläche

# Domänenprozesse

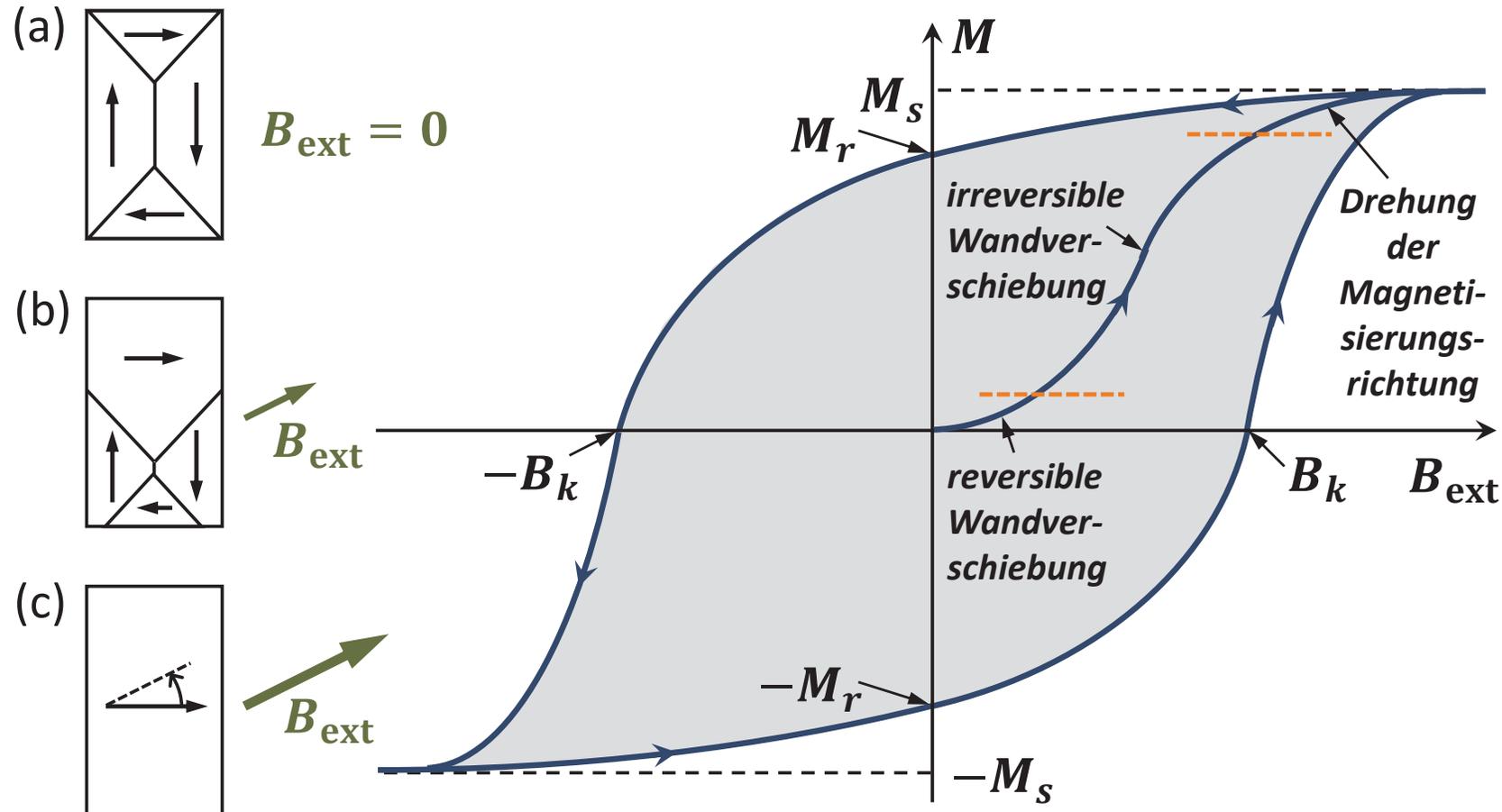


reversible und irreversible Verschiebungen sowie Drehung einer Bloch-Wand

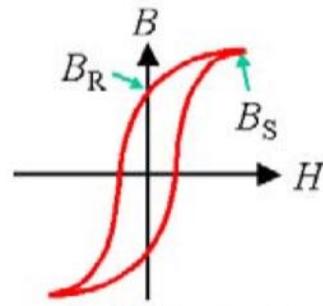


reversible und irreversible Verschiebungen einer Bloch-Wand

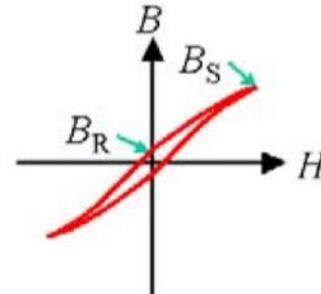
# Magnetisierungskurve eines Ferromagneten



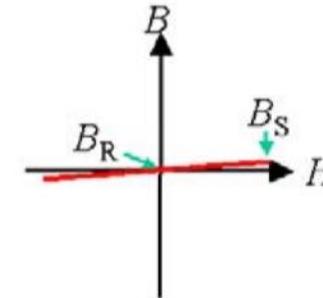
# Hysteresekurven



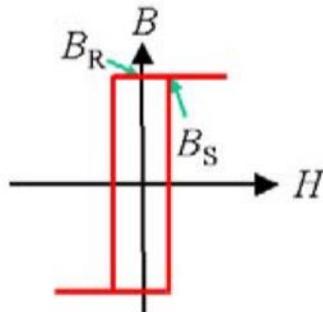
normale Schleife  
 $B_R \approx 1/2 B_S$



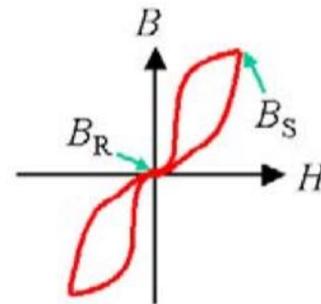
flache Schleife  
niedrige Remanenz  
hoher Induktionshub



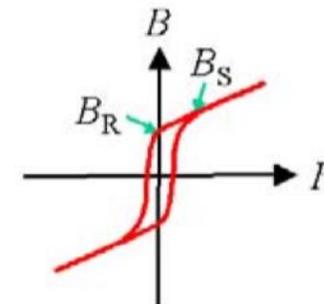
lineare, extrem flache  
Schleife (typisch für Pulver-  
verbundwerkstoffe)



normale Schleife  
 $B_R \approx B_S$

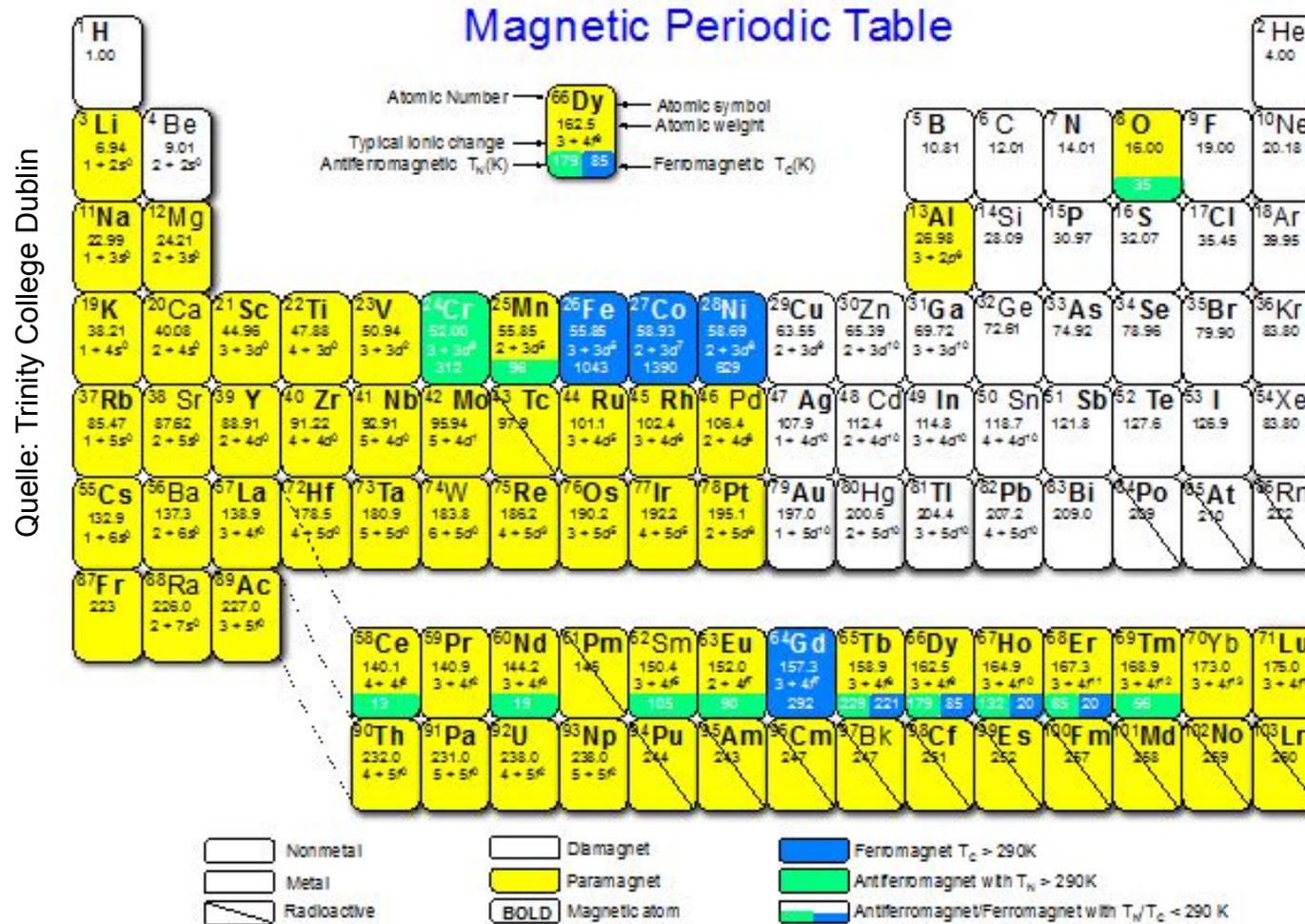


Perminvar-Schleife  
in der Mitte eingeschnürt  
(zweigeteilte Hysterese)

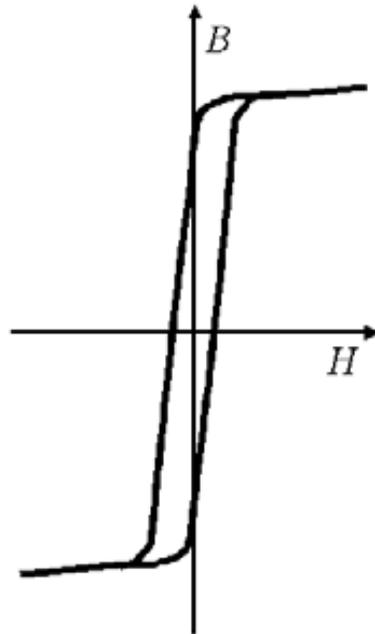


nichtlineare Schleife  
(typisch für Kerne aus  
zwei Werkstoffen)

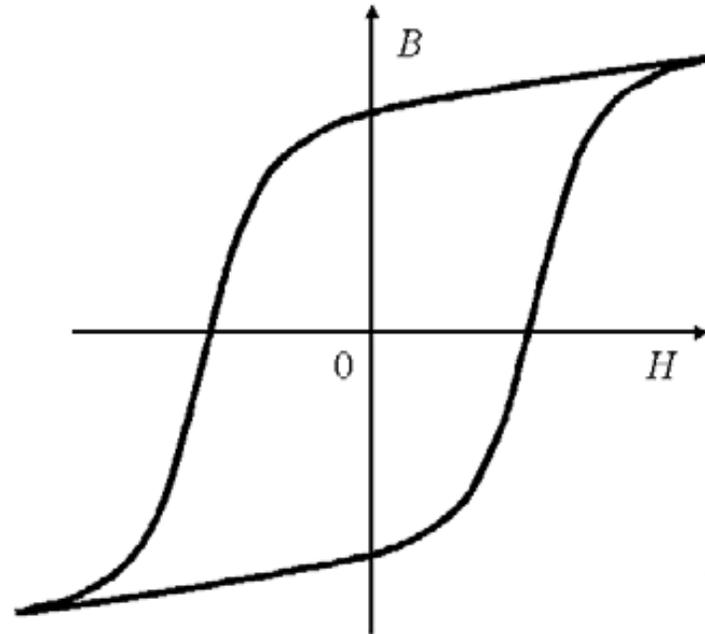
# Magnetische Materialien



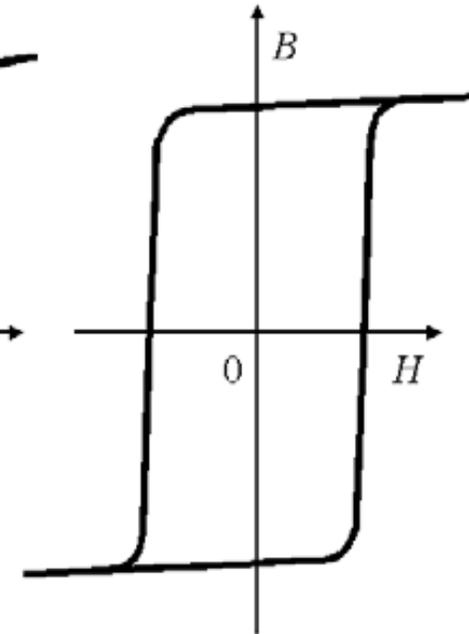
# Weich- und hartmagnetische Stoffe



weichmagnetischer Werkstoff  
kleine Koerzitivfeldstärke  
 $H_c < 100 \text{ A/cm}^2$



hartmagnetischer Werkstoff  
große Koerzitivfeldstärke  
 $H_c > 100 \text{ A/cm}^2$



Rechteck-Hysteresekurve  
Werkstoffe für Speicher  
 $B_R \approx B_S$

# Einsatzgebiete magnetischer Werkstoffe

Anwendungen	Anforderungen	Werkstoffe
Transformatoren Motoren Generatoren	hohe Sättigungsmagnetisierung $J_s$ geringe Koerzitivfeldstärke $H_c$ geringe Leitfähigkeit	Fe + 0.7...4 Si Fe + 30...50 Co
NF-Übertrager	Linearität der $B(H)$ -Kennlinie geringe Leitfähigkeit	Fe + 36 Ni ca. 20 Fe + 40 Ni oder Co
HF-Übertrager	Linearität der $B(H)$ -Kennlinie Sehr geringe Leitfähigkeit	Ni-Zn-Ferrite
Abschirmungen	sehr hohe Anfangspermeabilität $\mu_{ra}$	Fe + 76...79 Ni oder Cu, Cr, Mo
Digitale Speicher	rechteckige $B(H)$ -Kennlinie ( $J_s \approx B_r$ )	Fe + 50 Ni, Mg-Zn-Ferrite, Granatschichten
Dauermagnete	Produkt $B \cdot H$ sehr groß	50 Fe + 24 Co + 14 Ni + 9 Al + 3 Cu BaO • 6Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub> , NdFeB

# Bauelemente der Elektrotechnik

Prof. Dr. rer. nat. Sebastian Kempf  
Wintersemester 2021/22

