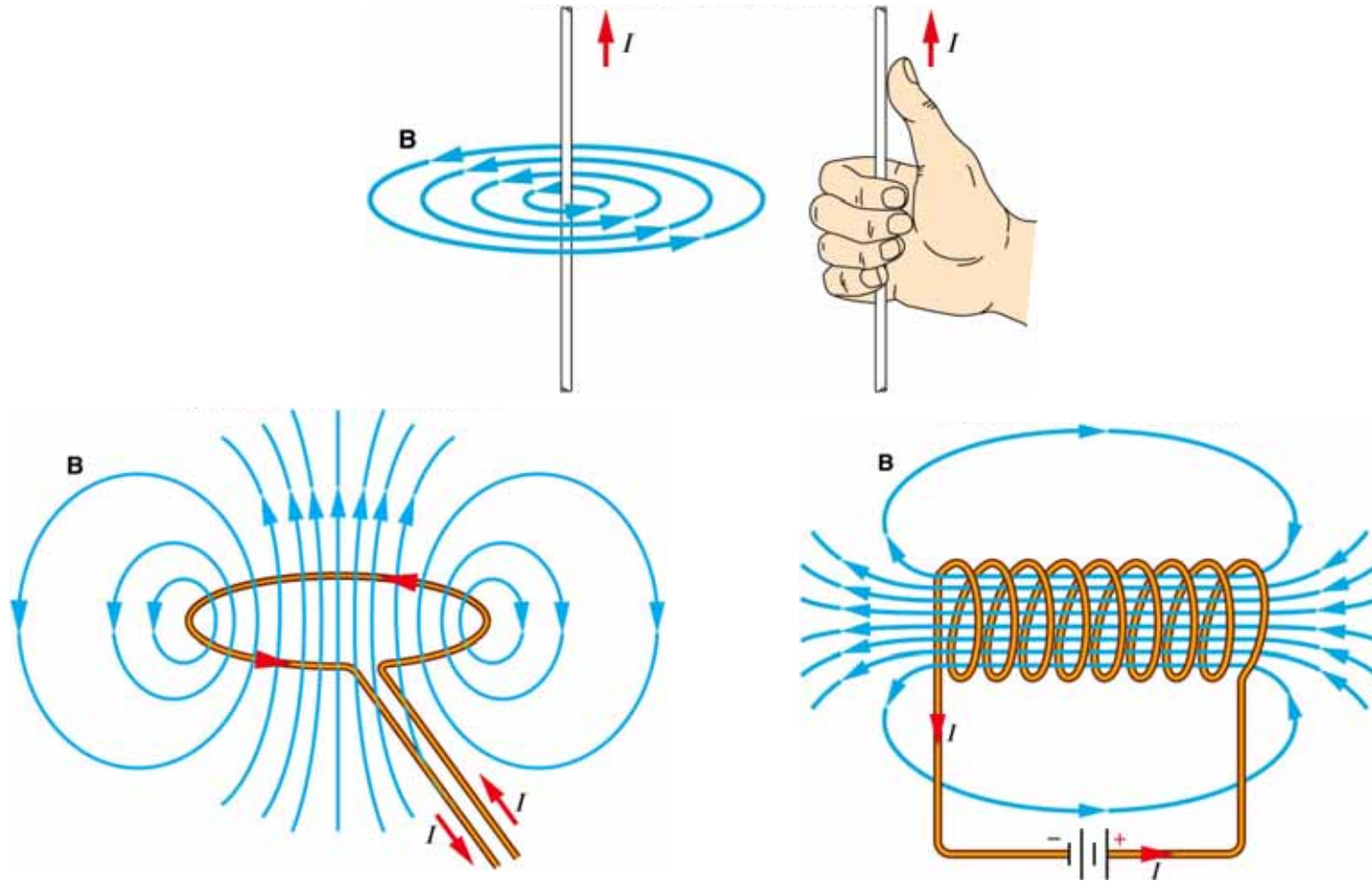




Woher kommt ein magnetisches Moments

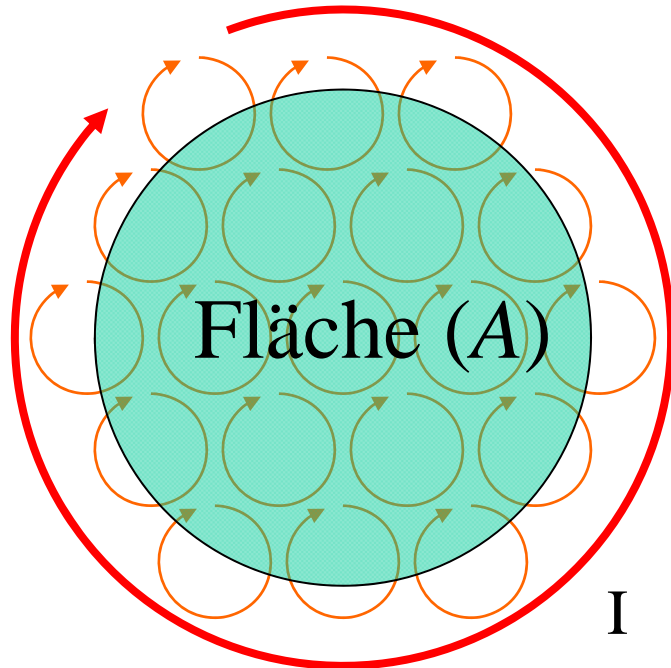
wir erinnern uns...



Elektrische Ladungen in Bewegung erzeugen ein Magnetfeld

Ein paar magnetische Definitionen

Ein Stromkreis ersetzt viele kleinere



Magnetisches Moment (m)

$$m = I \cdot A \quad (\text{Am}^2) \quad 1 \text{ Am}^2 = 10^3 \text{ emu}$$

Magnetisches Feld H (A/m) = $m/\text{Volumen}$

$$\text{Örstedt} \frac{1000}{4 \cdot \pi} = \text{A/m}$$

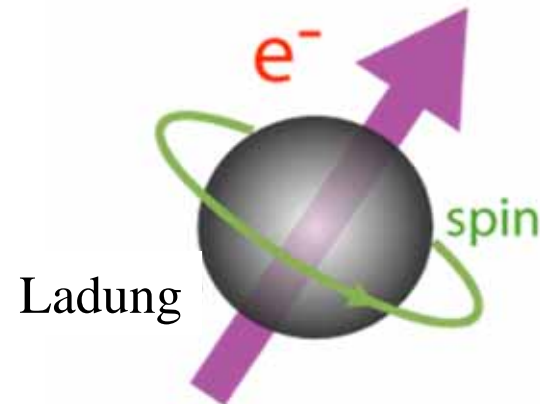
Magnetische Induktion B (was die Probe sieht)

$$10^4 \text{ Gauss} = 1 \text{ Tesla}$$

Das magnetische Moment eines Elektrons:

$$\mu_B = 9.274078 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2 \text{ (J/T)}$$

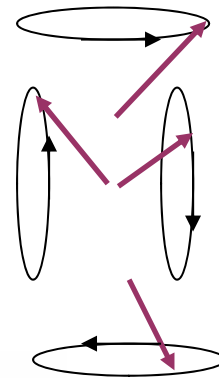
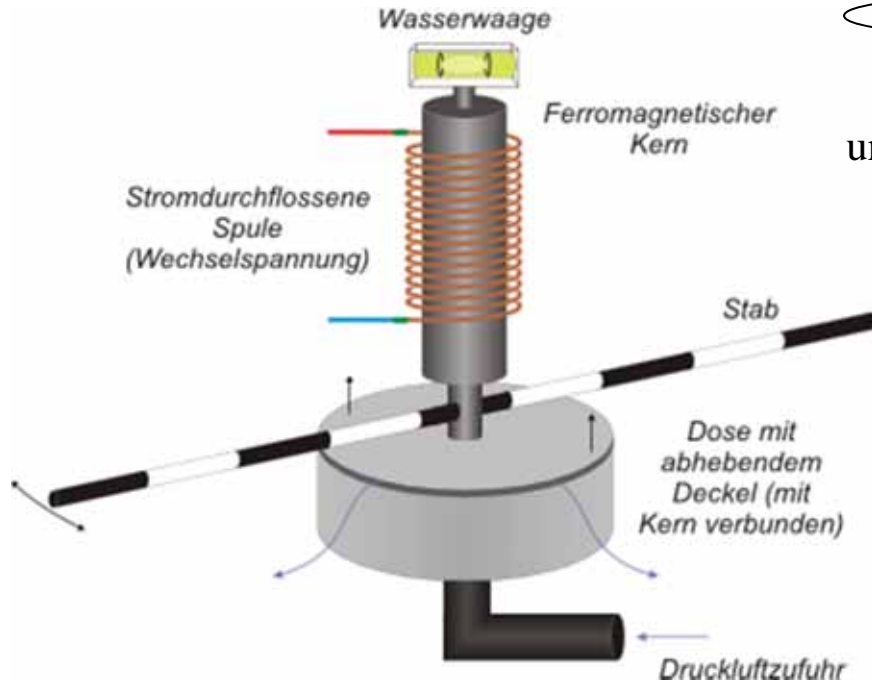
Herleitung...



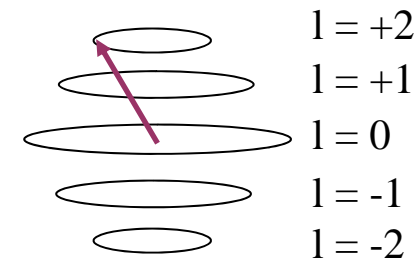
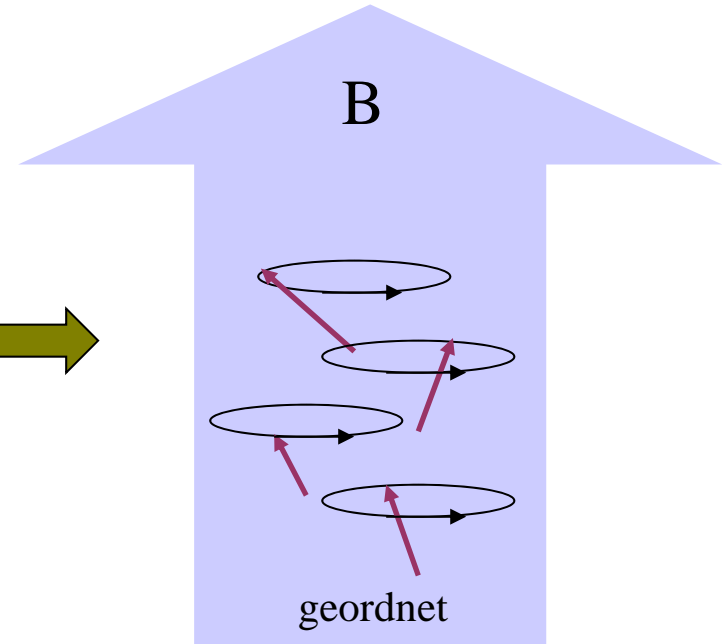
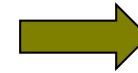
Orbitales (Bahn) Moment

Das Elektron hat nicht nur eine
Ladung
sondern auch eine
Masse

Einstein-de Haas-Effekt



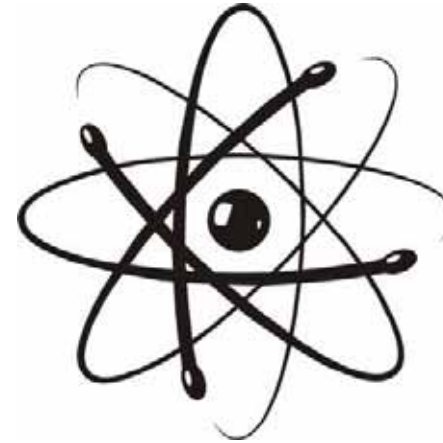
ungeordnet



Die Präzision vom Spin
– Larmor frequenz (ω)

Elektronische Quantenzahlen

$n =$ Prinzip-QZ	welche "Schale"
$l =$ Bahn-QZ	0 bis $(n-1)$
$m_l =$ Magnet-QZ	-1 bis +1
$m_s =$ Spin-QZ	$+1/2$ oder $-1/2$

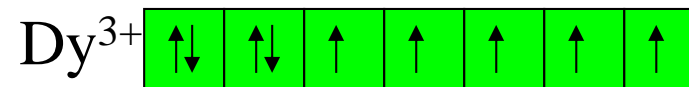
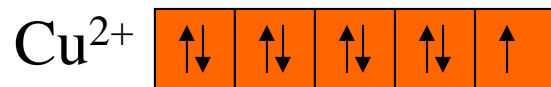
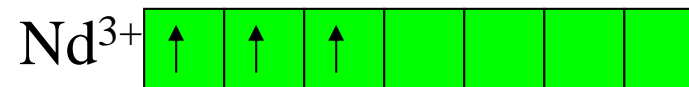
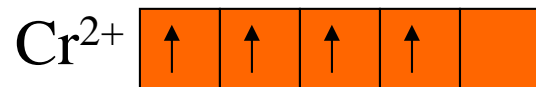


$S =$ Gesamt-Spinmoment
 $L =$ Gesamt-Bahnmoment
 $J =$ Gesamt-Winkelmoment = $S+L$ bis $S-L$

Pauli-Prinzip – keine zwei Elektronen können dieselbe QZ haben

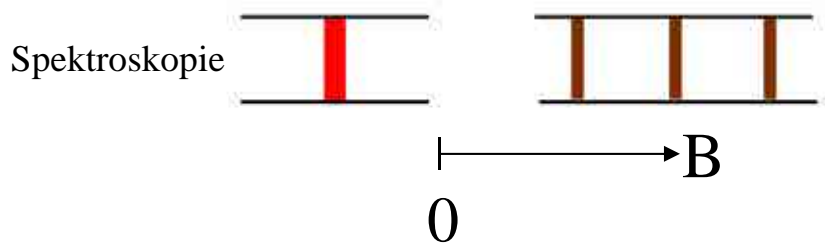
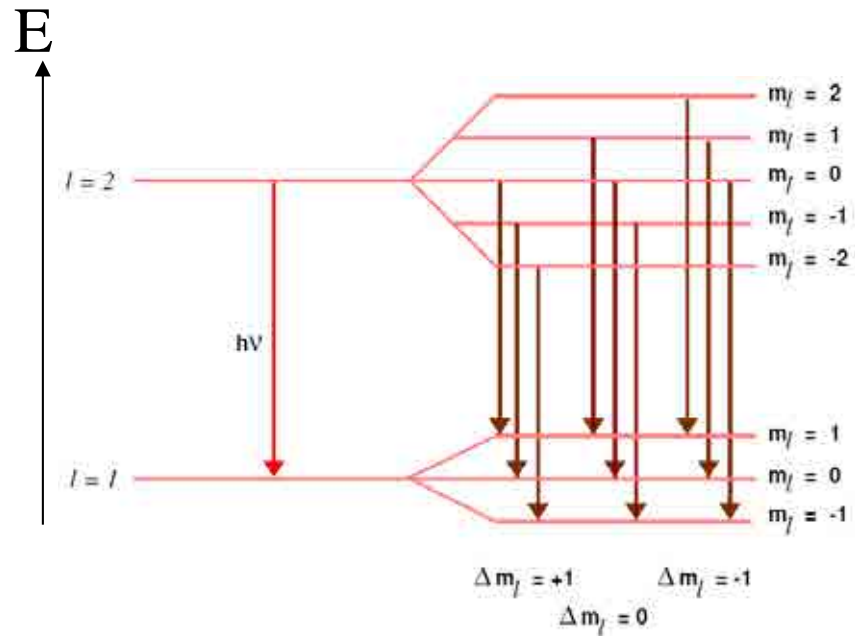
Hunds-Regel: Max S, Max L, Max J

Kleine Übung:



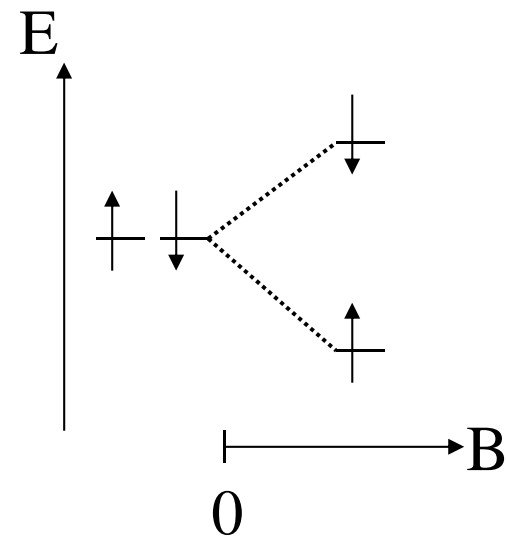
Zeeman-Effekt

Elektronen im B-Feld



Bahnmoment (l) aufspaltung

Diamagnete

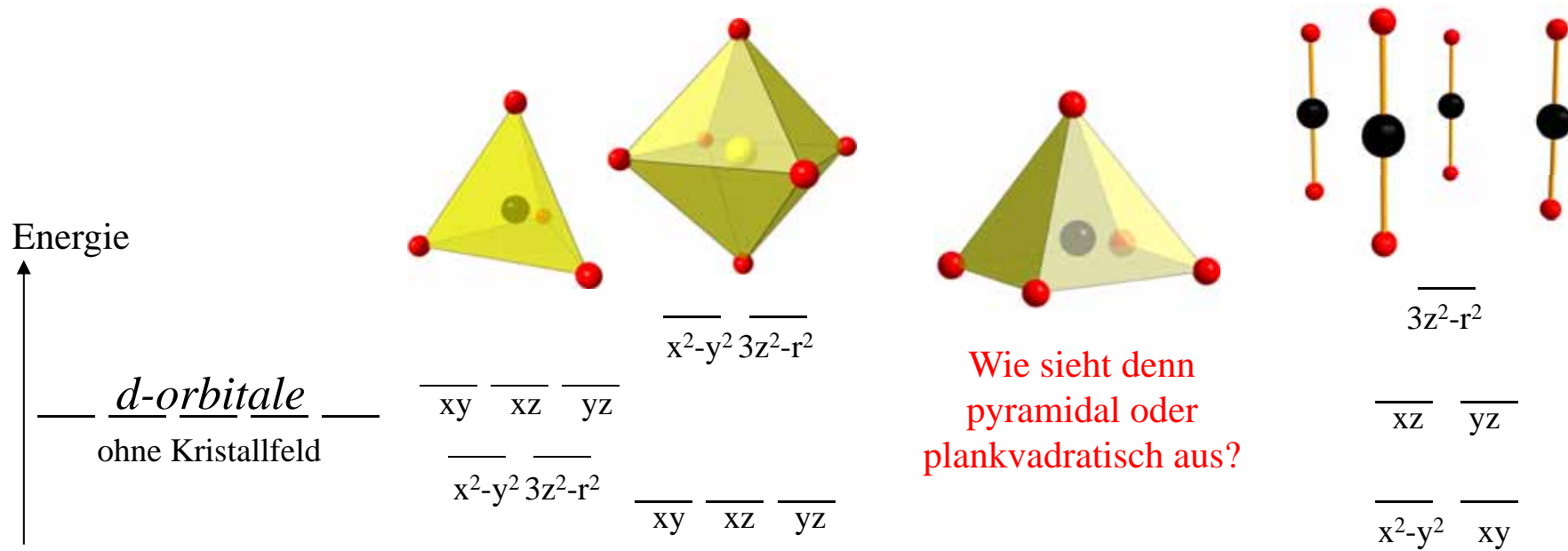


Gesamtmoment (j) aufspaltung

Paramagnete

Kristallfeld

hebt die Entartung auf und löscht teilweise orbitales Moment aus



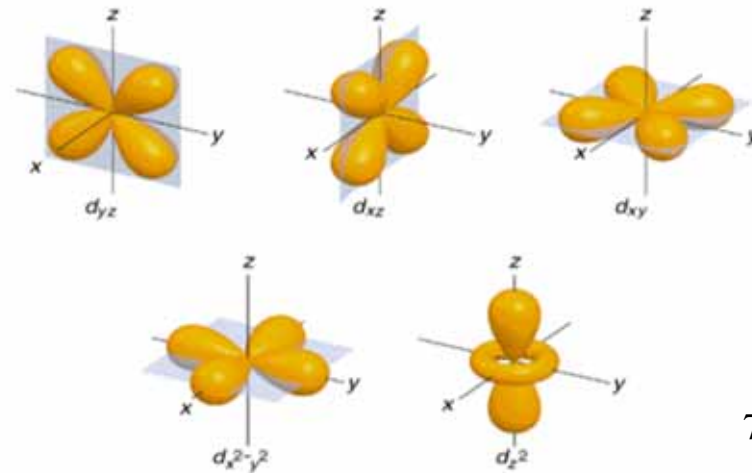
Wie sieht denn pyramidal oder plankvadratisch aus?

Starker Effekt für 3d-Elemente
Schwächer für 4d... 5d... 4f... 5f

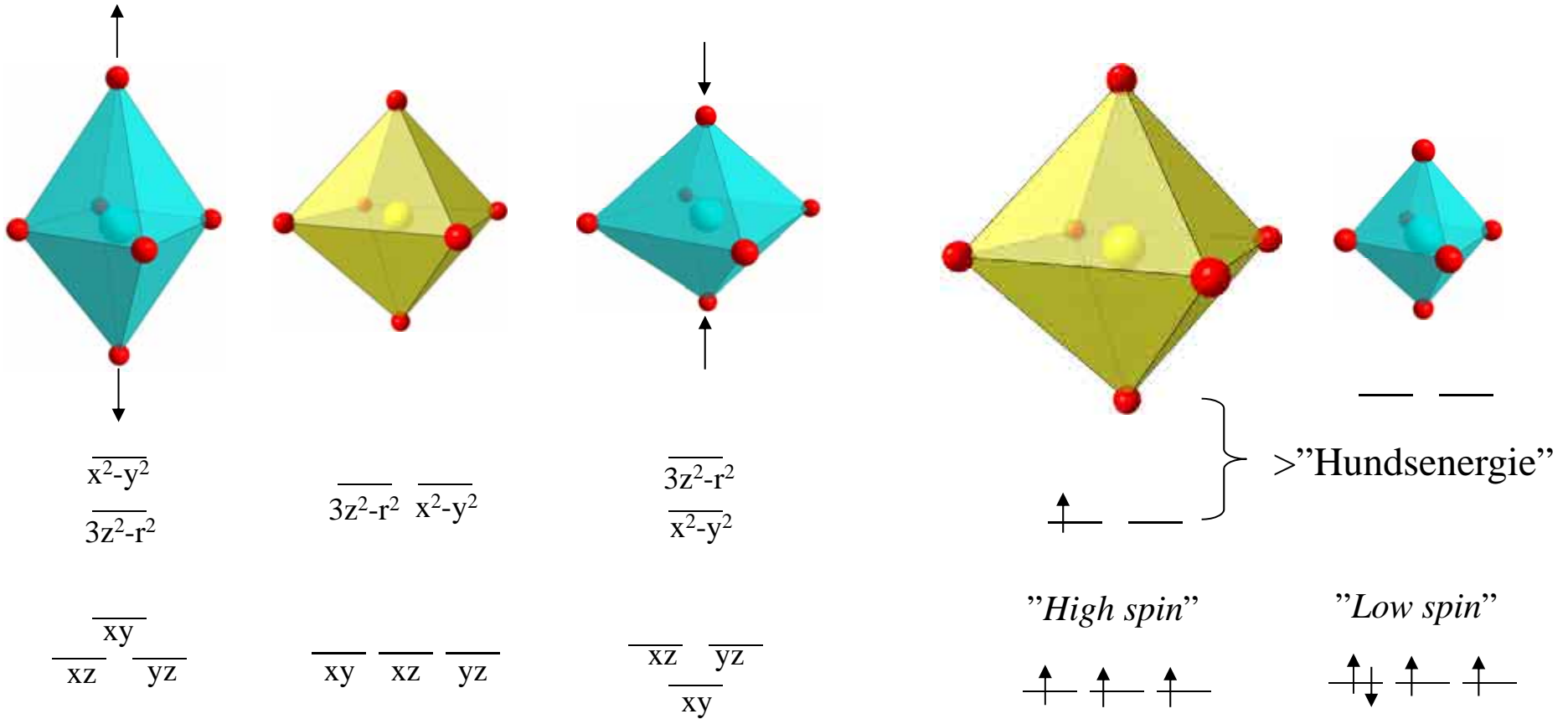
Warum ist dieser Effekt verschwindend klein für die 4f (5f) Elemente?

Was erwartet man dann bezüglich S, L und J?

”Isotropes Ion” [Eg], d^5 , d^{10} , f^7 , f^{14}



Kristallfeld-Effekte



Jahn-Teller-Effekt

Was könnte der Grund für eine derart Verzerrung sein?

Spin-Zustandsänderung

Was ändert sich dadurch?

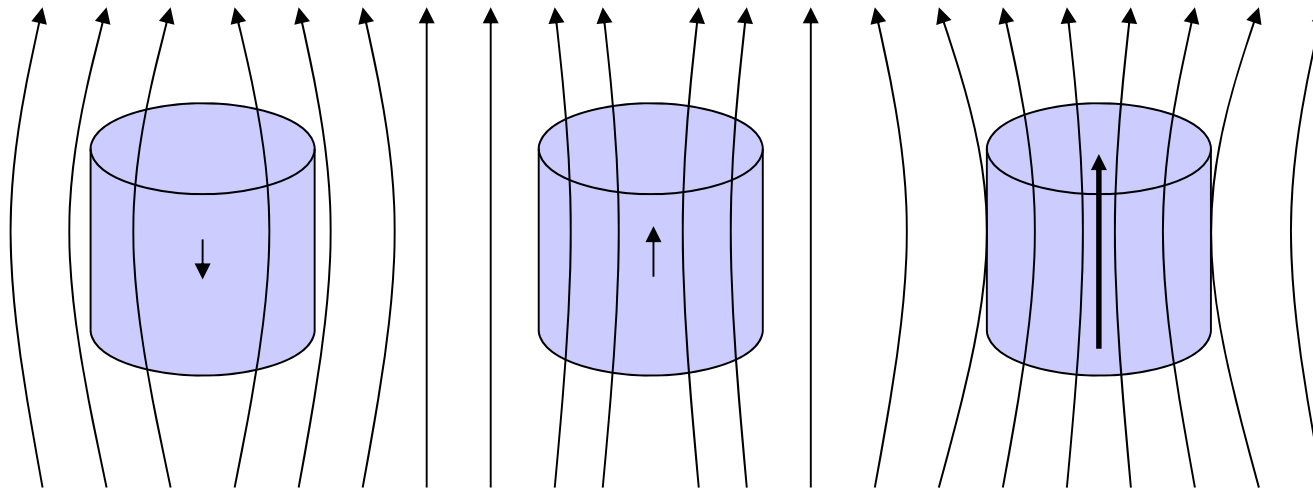
Magnetische Suszeptibilität χ

$$\chi = M/H$$

$$0 > \chi$$

$$1 > \chi > 0$$

$$\chi > 1$$



Diamagnetismus
z.B. Sn, Pb, Bi

Paramagnetismus
z.B. Al, Na, Ti, V

Ferromagnetismus
z.B. Fe, Co, Ni

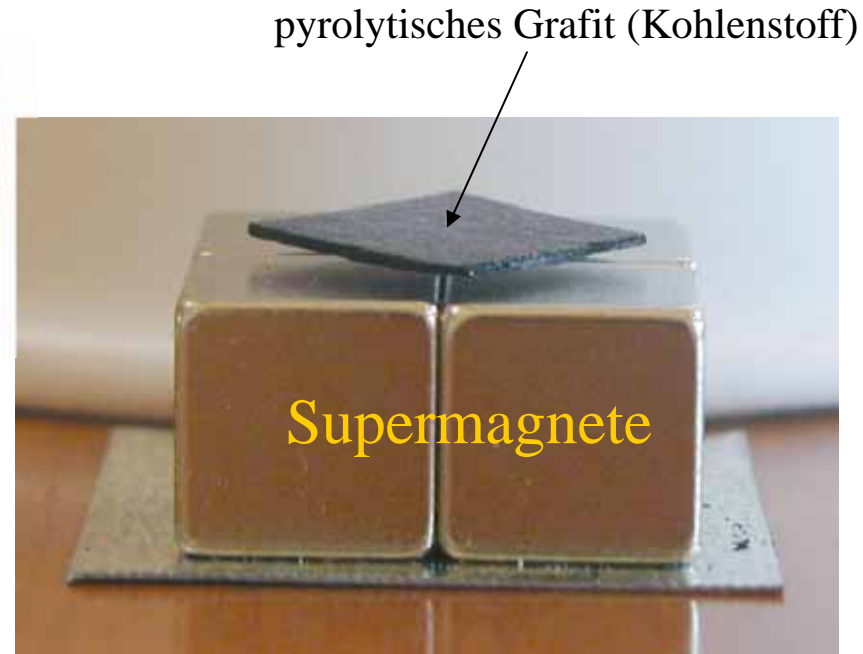
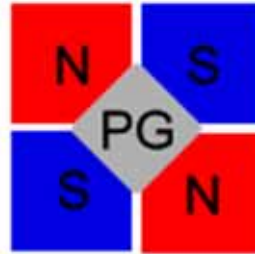
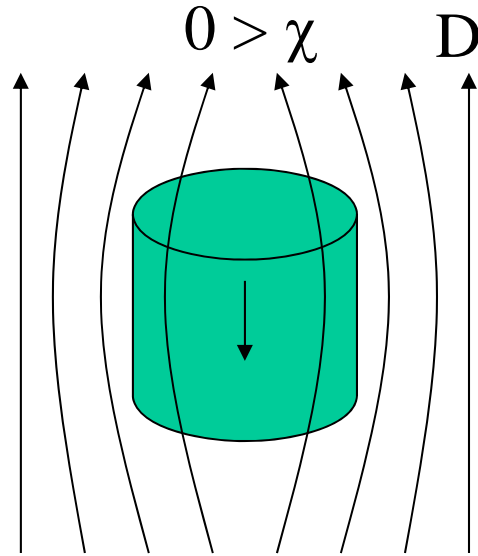
Aufbau der Vorlesung

<ul style="list-style-type: none">• Diamagnetismus• Paramagnetismus	lokale Effekte
<ul style="list-style-type: none">• Ferro- / Antiferro- Magnetismus• Clustermagnetismus• Spin-Dynamik• Kristallstruktur-Wirkungen auf Magnetismus• Magnetische Strukturen	globale Effekte
<ul style="list-style-type: none">• Magneto-optische Effekte• Spin-Leitfähigkeit Effekte• Quantum-Magnete - Ferroflüssigkeiten	WW Effekte

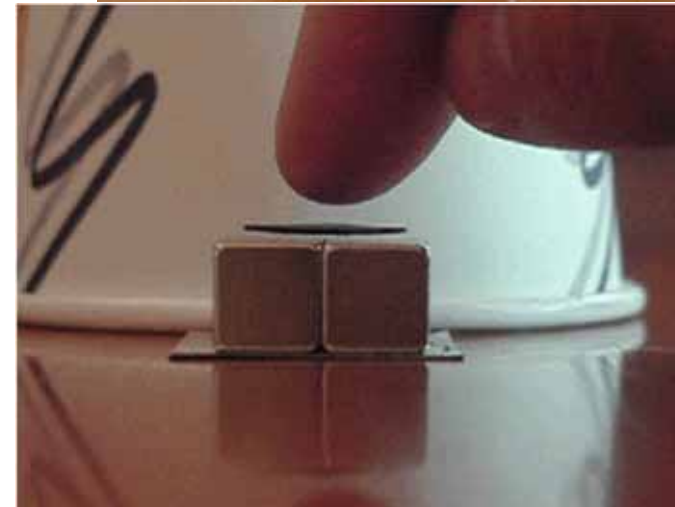
Diamagnetismus

Alles ist auch diamagnetisch

Diamagnetismus - Anschaulich



Metall	Elektr.Konfig.	$\chi_{\text{diam.}}$ (cgs)
Cu	[Ar]3d ¹⁰ 4s ¹	-1.1×10 ⁻⁶
Ag	[Kr]4d ¹⁰ 5s ¹	-2.4×10 ⁻⁶
Bi	[Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 5p ³	-192×10 ⁻⁶



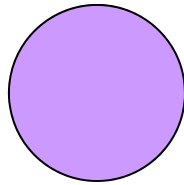
<http://sci-toys.com/>

Wie erklärt man Diamagnetismus?

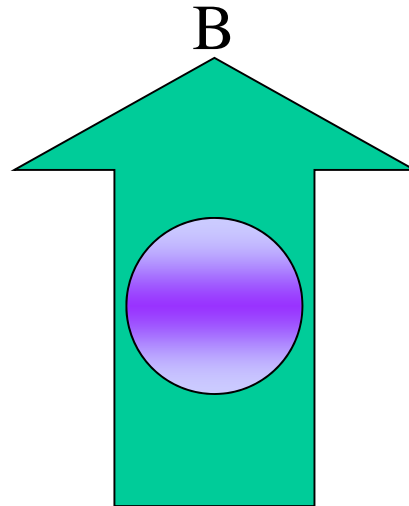
3. Maxwell Gl.

$$\nabla \times E = -\frac{\delta B}{\delta t}$$

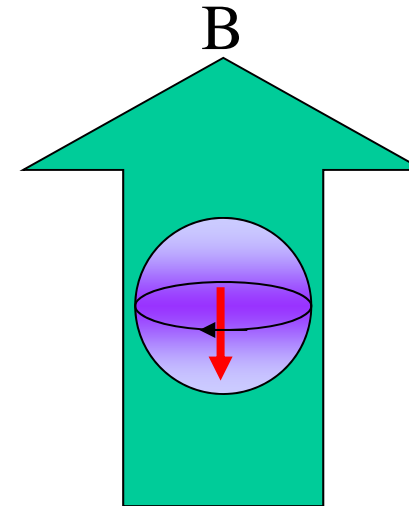
nach Langevin:



Atom oder Ion ohne ungepaarte Elektronen



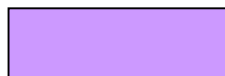
Die Freiheit der Elektronen wird durch das B Feld beschränkt:
Larmor präzission



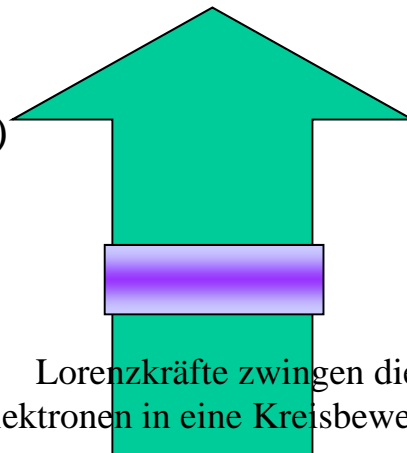
Das erzeugte B-Feld der Elektronen ist dem äusseren entgegengesetzt

Dies gilt für all Materie mit Atomen, die eine geschlossene E-Schale haben

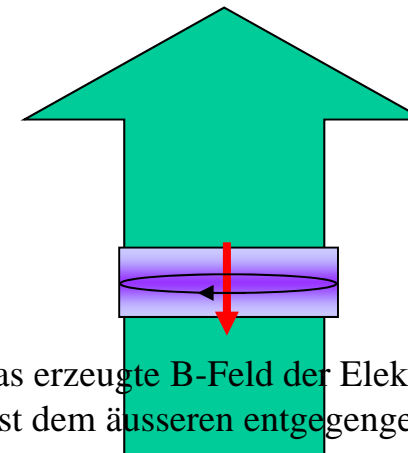
Nach Landau:
(Wir erinnern uns an Lenz Regel)



Metallstück

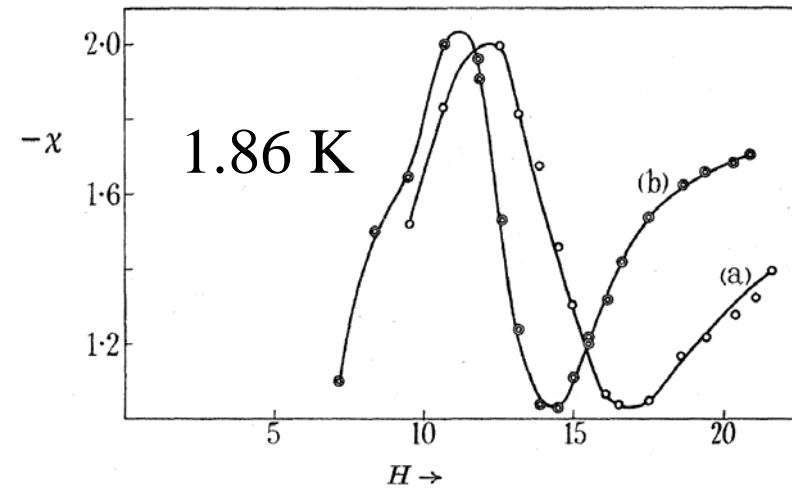
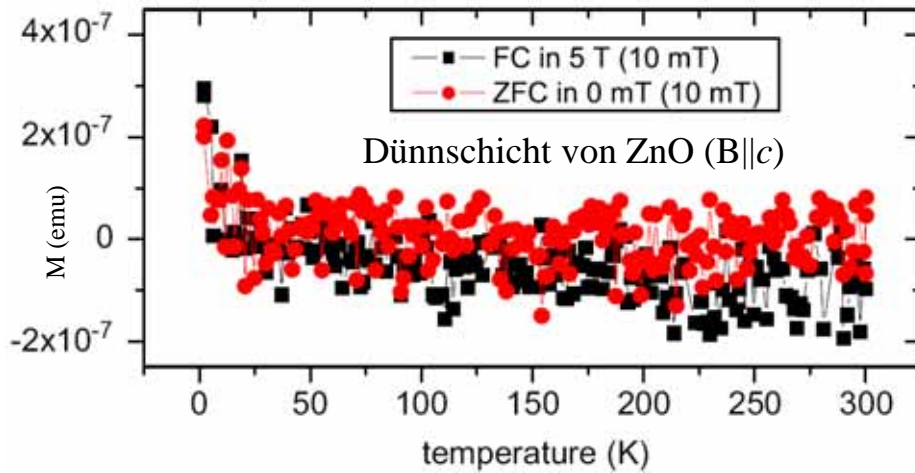
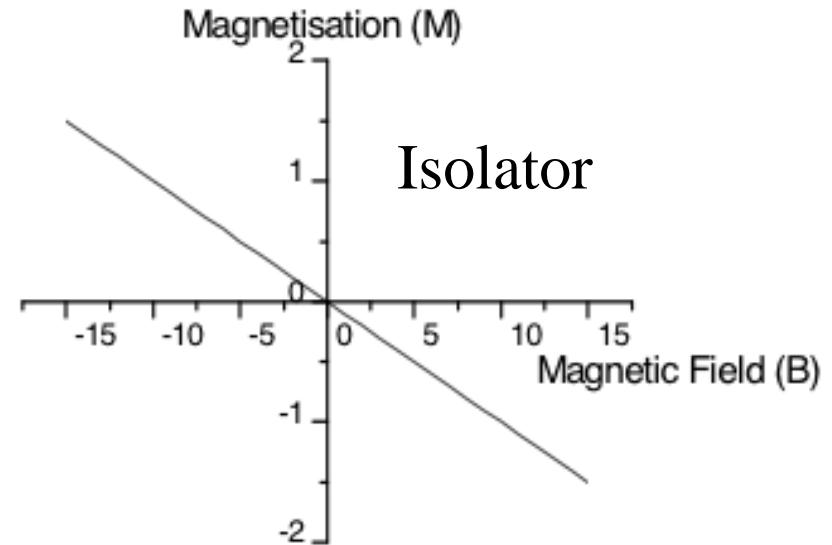
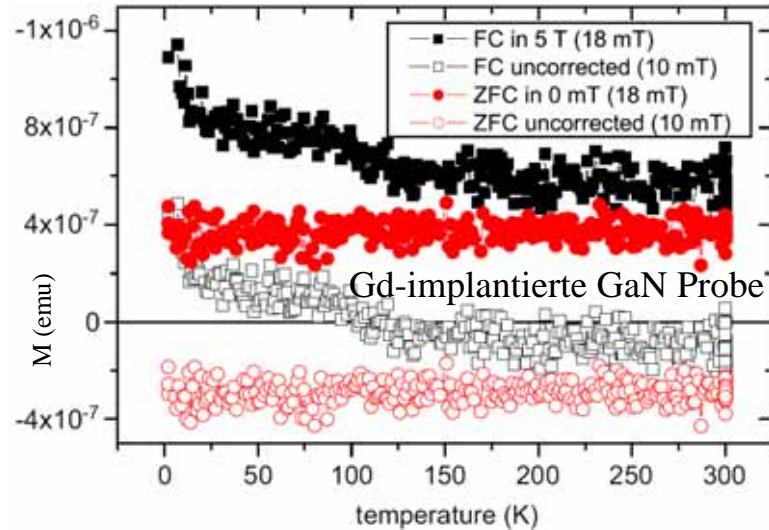


Lorenzkraft zwingen die Elektronen in eine Kreisbewegung



Das erzeugte B-Feld der Elektronen ist dem äusseren entgegengesetzt

Wie verhält sich ein Diamagnet



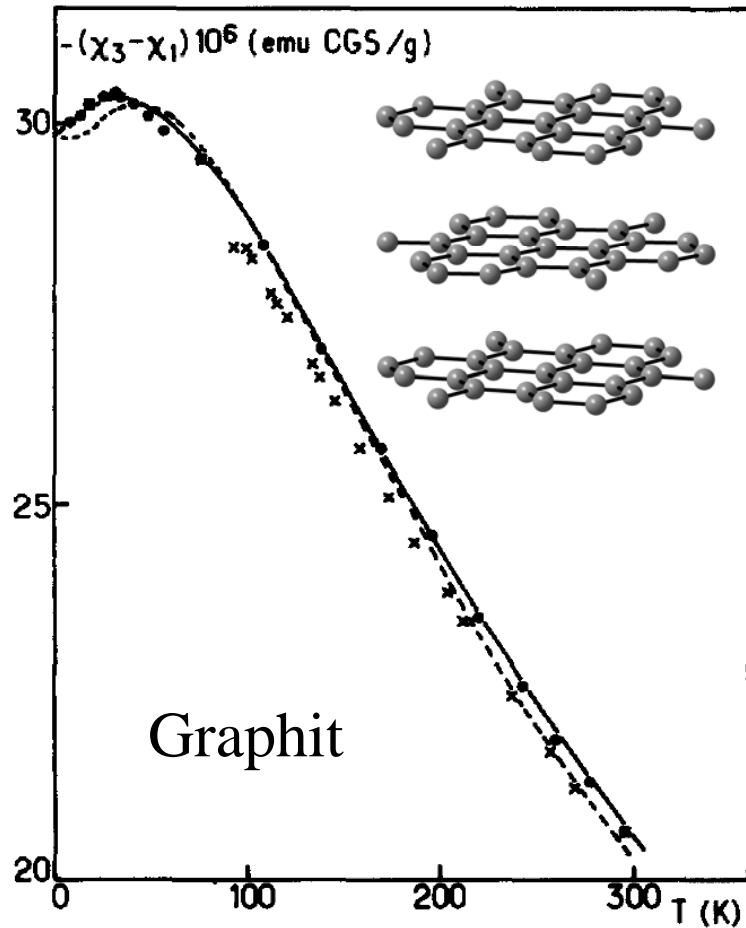
Diamagnetismus von Bi

temperaturUNabhängiger Effekt

aber Feldabhängiger Effekt, oder?

Diamagnetismus - Anisotropie

Abgeschlossene Elektronenschale heisst nicht isotropie



Graphit

sp^2 - Hybridisierung

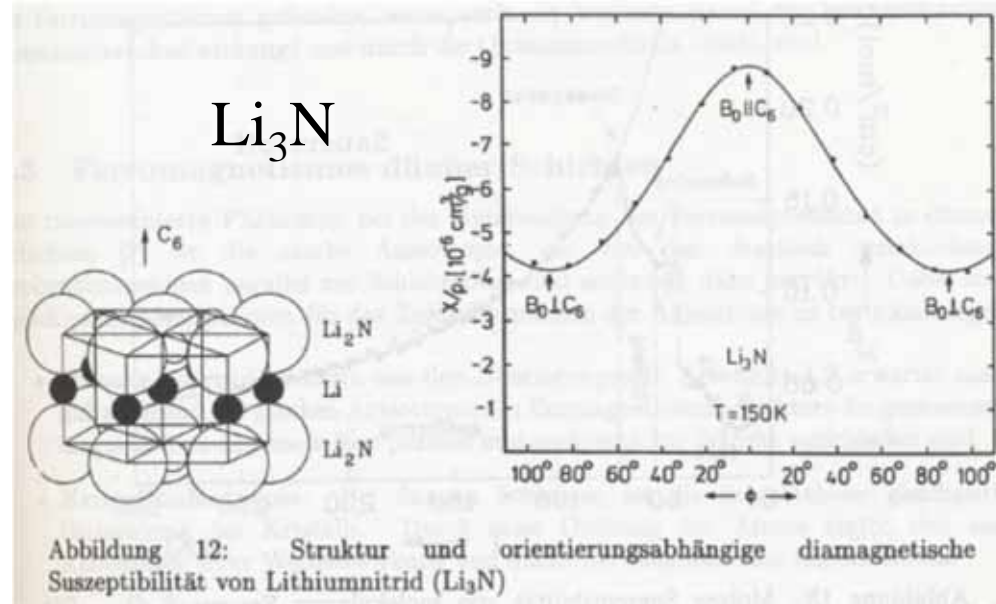
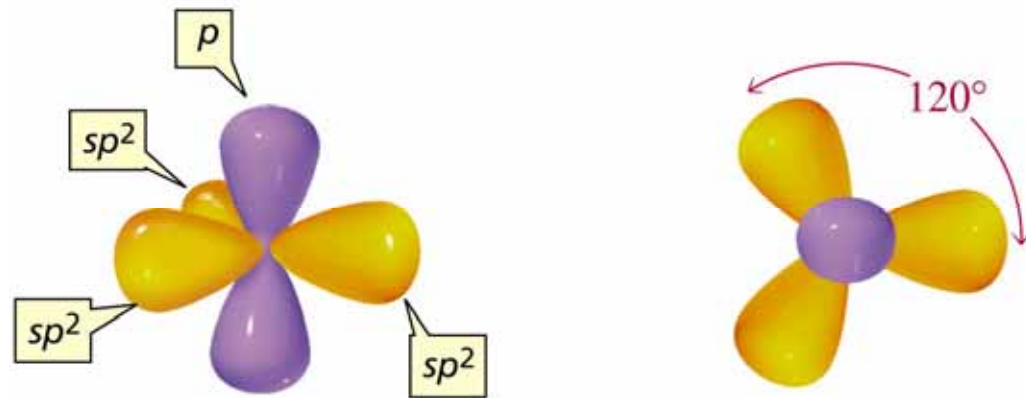


Abbildung 12: Struktur und orientierungsabhängige diamagnetische Suszeptibilität von Lithiumnitrid (Li_3N)

Stephen Blundell, Magnetism in Condensed Matter, Oxford University Press 2001



Welche Probe könnte Anisotropie zeigen?

Diamagnetismus berechnen

Elektronenladung

Bahnenradius

magnetische Induktion

$$M = - \frac{e^2 \langle r^2 \rangle}{6m_e} B_0$$

Elektronenmasse

$$\chi = \frac{M}{H}, B = \mu_0 H$$

Typische Zahlen:

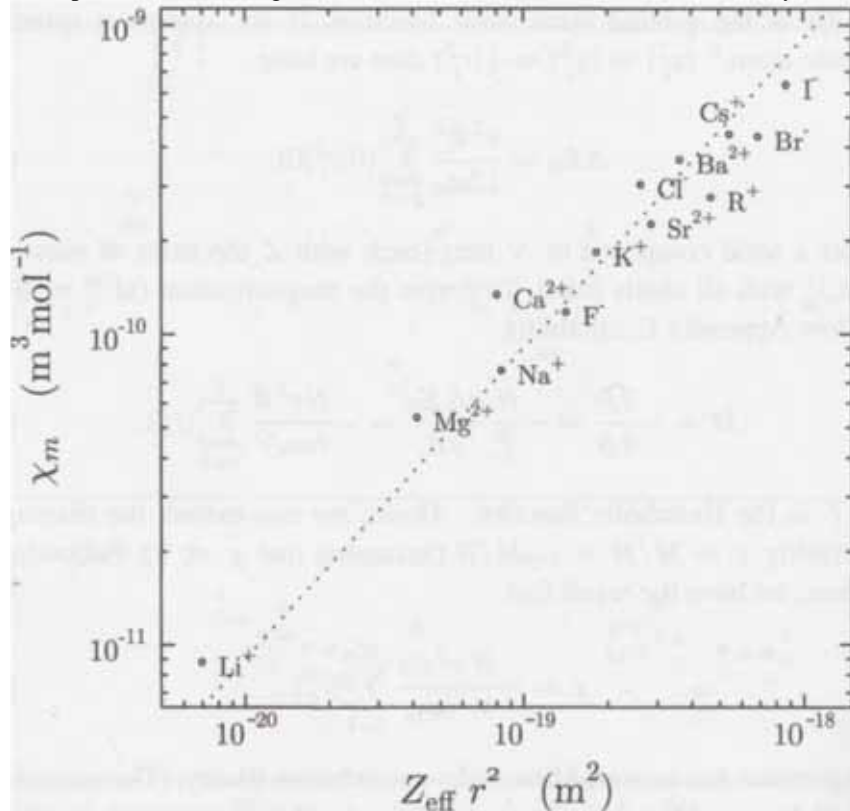
$$r = 0.5 \text{ \AA}$$

$$n_e = 2.7 \cdot 10^{23} \text{ e} \cdot \text{g}^{-1}$$

ergeben:

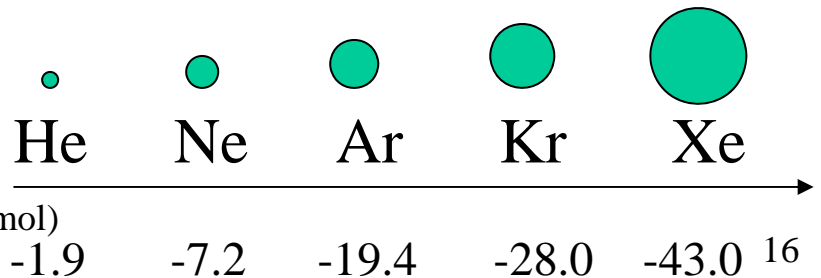
$$\chi = 4 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$$

Stephen Blundell, Magnetism in Condensed Matter, Oxford University Press 2001



$$\chi_{dia} = \frac{M}{H} = - \frac{N}{V} \frac{\mu_0 e^2}{6m_e} Z_{eff} r^2$$

Molvolumen
Avogadros Konstante
”Effektive Ladung”
in der Valenzschale



Empirischer Diamagnetismus

LiF

CaBr₂

SiO₂

Ion/Atom $\chi / 10^{-6}$ (emu/mol)

Li = +14.2

Li⁺ = -4.2

F = -6.3

F⁻ = -11

LiF = -10.1

Ion/Atom $\chi / 10^{-6}$ (emu/mol)

Ca = +40

Ca²⁺ = -15.6

Br₂(l) = -56.4

2Br = 2*(-36)

CaBr₂ = -73.8

Ion/Atom $\chi / 10^{-6}$ (emu/mol)

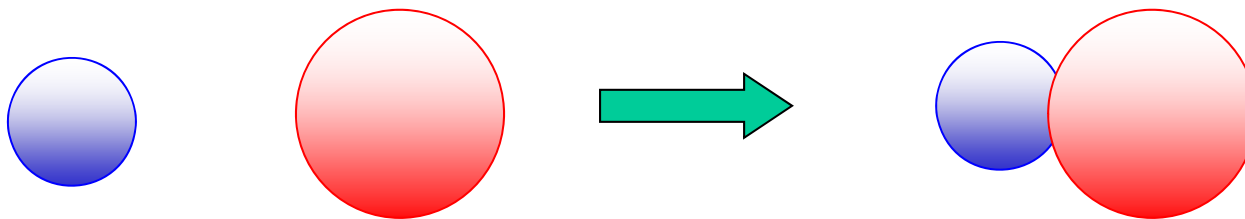
Si = -13.5

Si⁴⁺ = -15.6

O₂ = +3449

2*O²⁻ = 2*(-12)

SiO₂ = -29.6



$$\chi_A + \chi_B = \chi_{AB} \quad ?$$

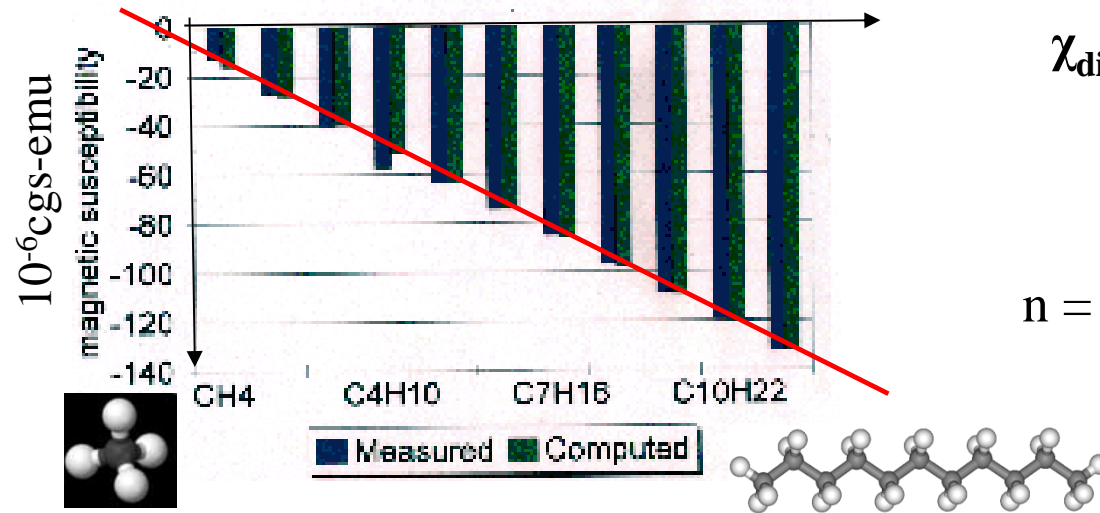
$$\chi_A^+ + \chi_B^- =$$

Es ist **NICHT** möglich einfach die individuellen Dia(/Para-)magneten zusammen zu rechnen.

Empirischer Diamagnetismus

Alkanes

methane to undecane

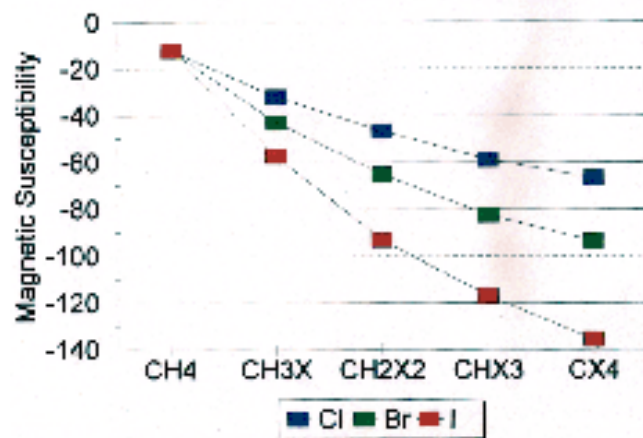


$$\chi_{\text{diam}} = -4.80 - 11.56n$$

$$\chi_{\text{diag}}(\text{H}_2) = -3.96$$

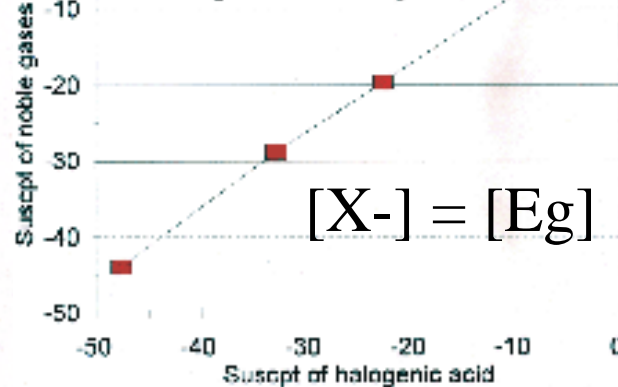
n = Anzahl von C in der Kette

Halogenation of Methane



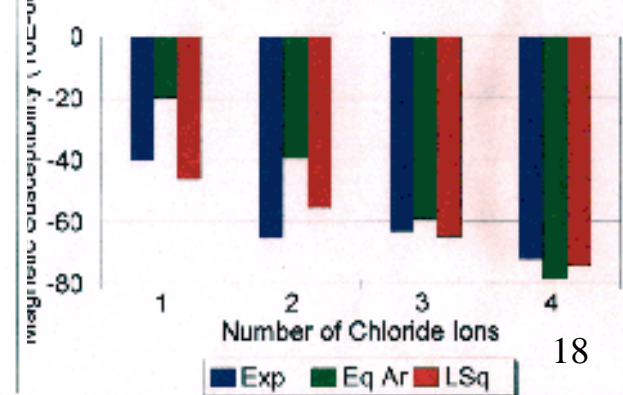
Halide Ion Suscpt.

Noble gases & halogenic acids



Magnetic Susceptibility

CuCl-ZnCl₂-GaCl₃-GeCl₄



Empirischer Diamagnetismus

Principal Axes	$10^6 \chi_{XL}$	$10^6 \chi_{XM}$	$10^6 \chi_{XN}$
	-34.9	-34.9	-94.6
	-77.3	-82.4	-143.9
	-101.1	-102.7	-163.8
	-165.0	-165.0	-231.0
	-78.3	-50.3	-120.2
	-128.0	-128.0	-182.0
	-97.1	-70.5	-136.7
	-122.5	-122.5	-170.0
	-87.6	-59.9	-129.0
	-49.2	-49.2	-103.2
	-83.1	-84.1	-120.2

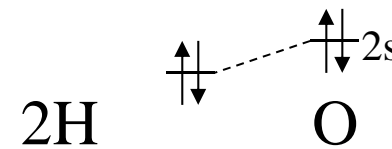
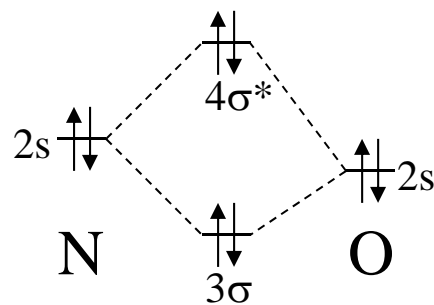
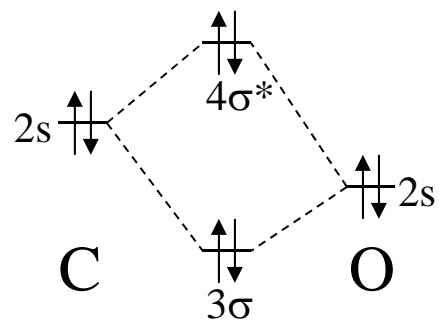
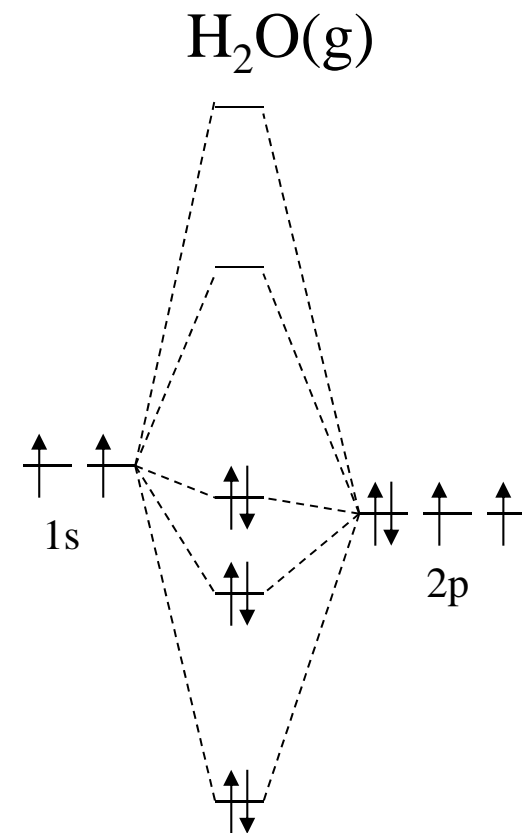
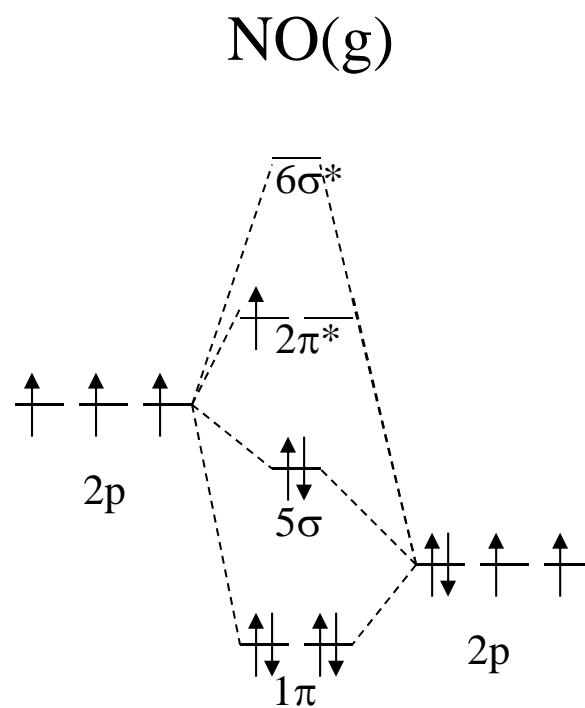
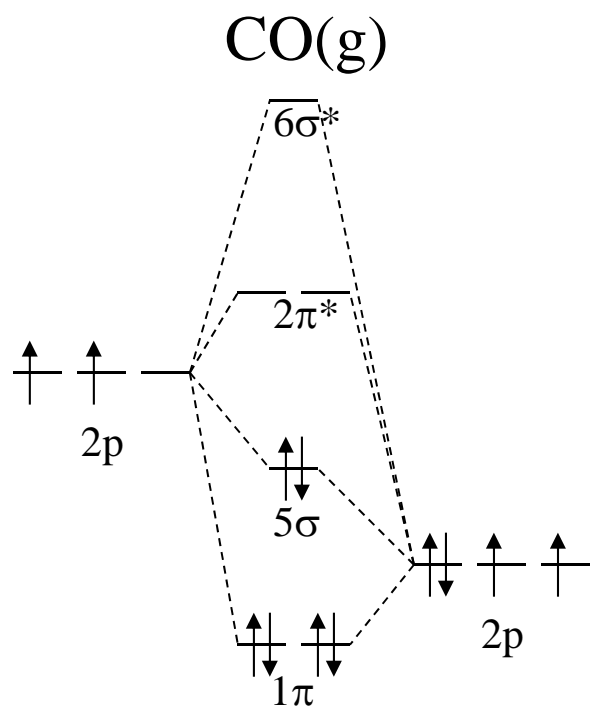
Principal Axes	$10^6 \chi_{XL}$	$10^6 \chi_{XM}$	$10^6 \chi_{XN}$
	-64.0	-38.0	-106.0
	(-57.0)	(-45.0)	(-106.0)
	-52.0	-43.0	-104.8
	-57.7	-58.8	-120.5
	-23.0	-27.0	-65.2
	-84.4	-98.5	-138.5
	-103.0	-114.3	-144.9
	-55.8	-44.3	-116.9
	-67.7	-61.7	-183.8
	-76.0	-76.0	-184.0
	-96.8	-88.1	-271.3
	-122.0	-110.0	-372.0
	-90.8	-90.8	-202.3
	-85.8	-50.1	-209.6
	-81.5	-67.8	-198.3

Aussagen:
Senkrecht zu Aromaten
ist χ relativ grösser

Parallel zu Konjugierten
Systemen ist χ relativ grösser

„Elektronreiche Säulen“
erhöhen χ

In der Literatur - Moleküle

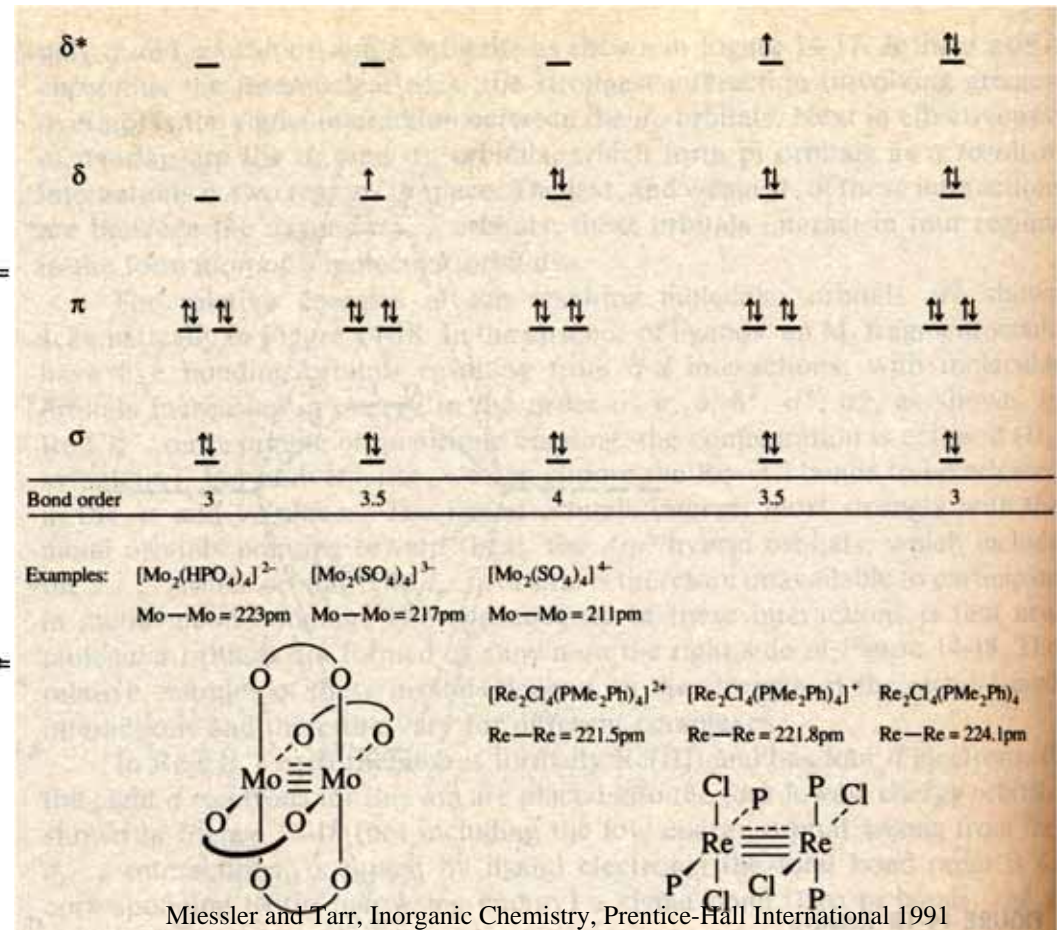
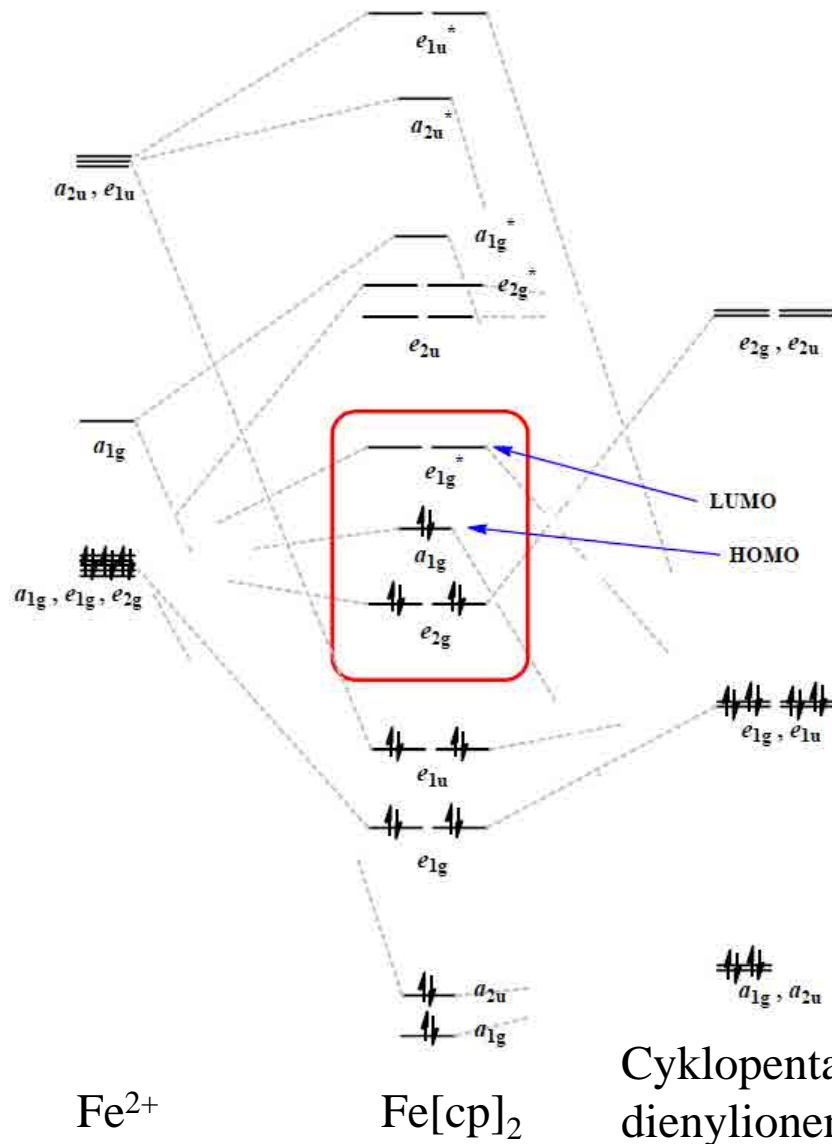


$\chi / 10^{-6} \text{ (emu/mol)} = -9.8$

$\chi / 10^{-6} \text{ (emu/mol)} = +1461$

$\chi / 10^{-6} \text{ (emu/mol)} = -13.1$

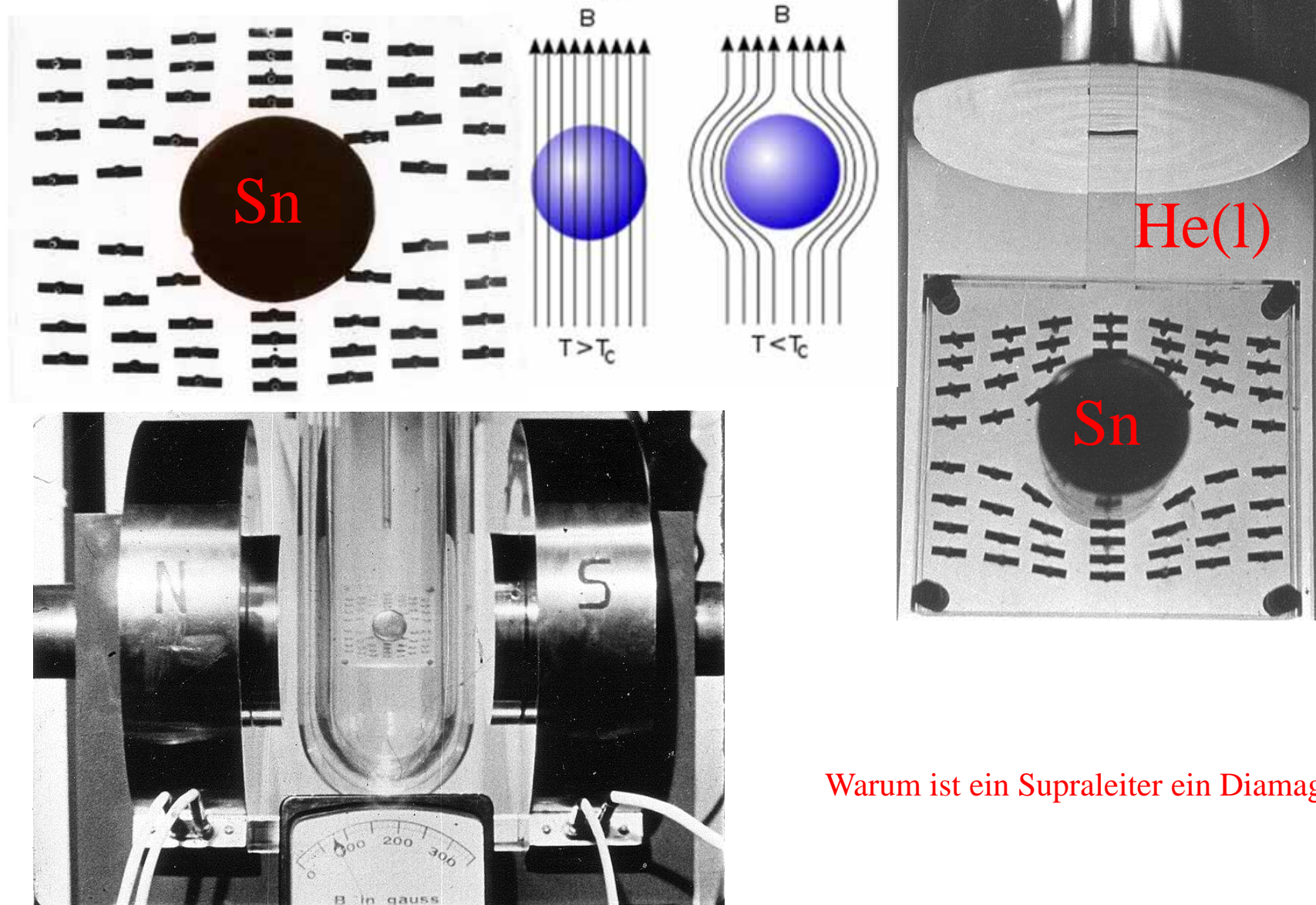
In der Literatur - Clusters



Ganzzahlige Bindungsordnungen
bedeuten Diamagnetismus

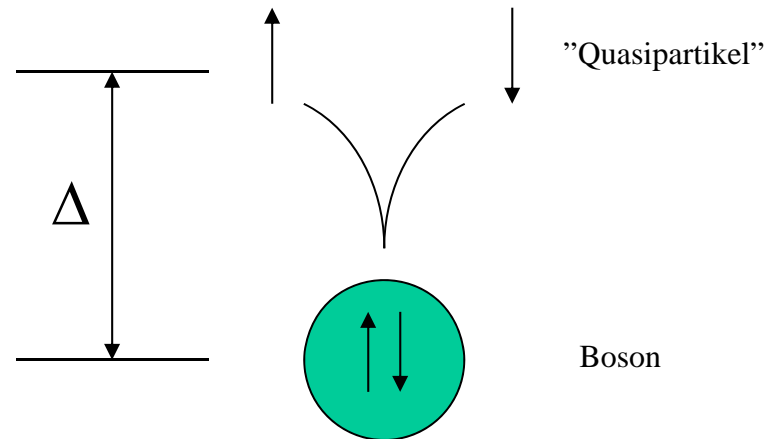
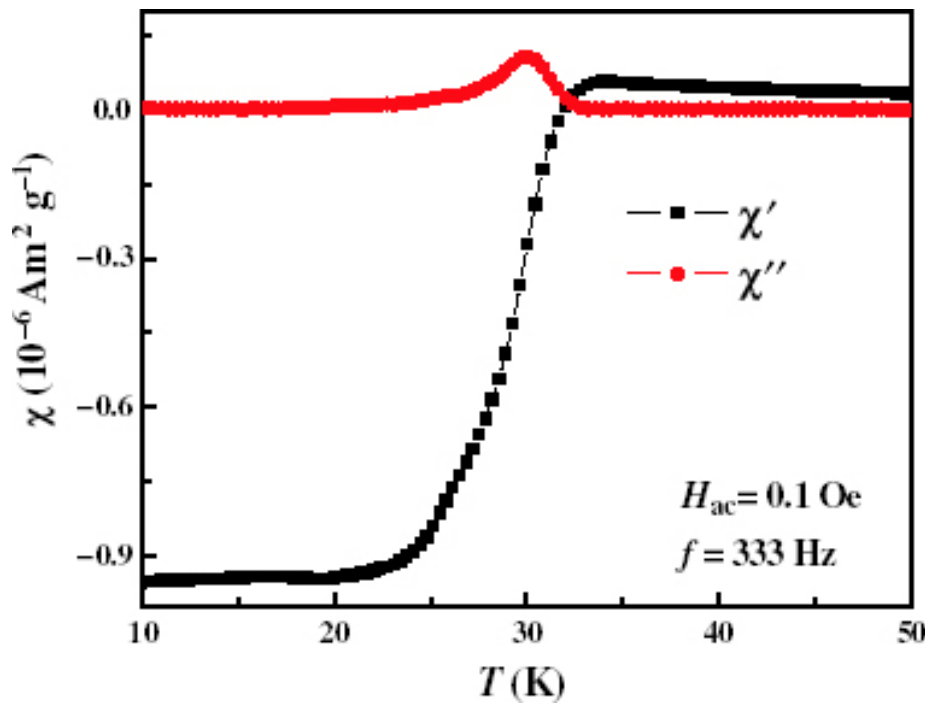
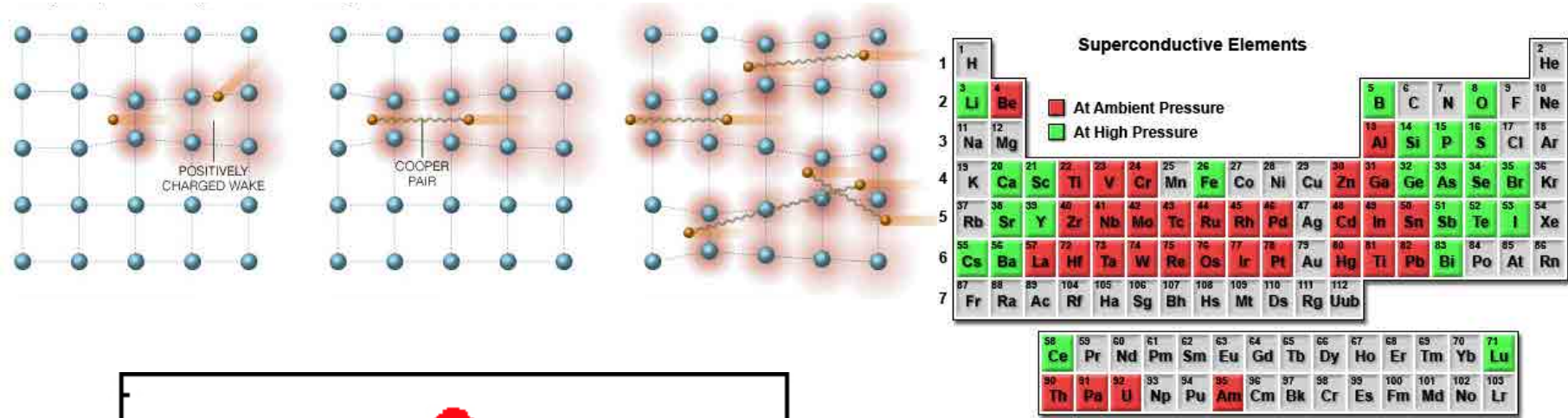
Wie kann ich dieses Molekül magnetisch machen?

”Perfekter” Diamagnetismus in Supraleitern



Warum ist ein Supraleiter ein Diamagnet?

”Perfekter” Diamagnetismus in Supraleitern



Zusammenfassung - Diamagnetismus

- Gepaarte Elektronen erzeugen im B-feld ein eigenes Magnetfeld was dem äusseren entgegengesetzt ist.
- Schwacher Effekt
- Der Effekt kann Anisotropie aufweisen
- Die diamagnetische Suszeptibilität (χ) ist bislang nicht möglich völlig vorherzusagen – nur empirische Daten stehen zur Verfügung.

Nächste Woche (20.4.2016) geht es um Paramagnetismus

Aus der Quantisierung der Energie

$$\hbar = m_e r v \Rightarrow r v = \frac{\hbar}{m_e}$$

$$I = \frac{(-e)}{\tau} = \frac{(-e)v}{2\pi r}$$

$$\mu = \pi r^2 I = \frac{\pi r^2 (-e)v}{2\pi r} = \frac{(-e)r v}{2} = \frac{(-e)\hbar}{2m_e} = -\mu_B$$

$$\mu_B = 9.274 \cdot 10^{-24} \text{ [Am}^2\text{]}$$