

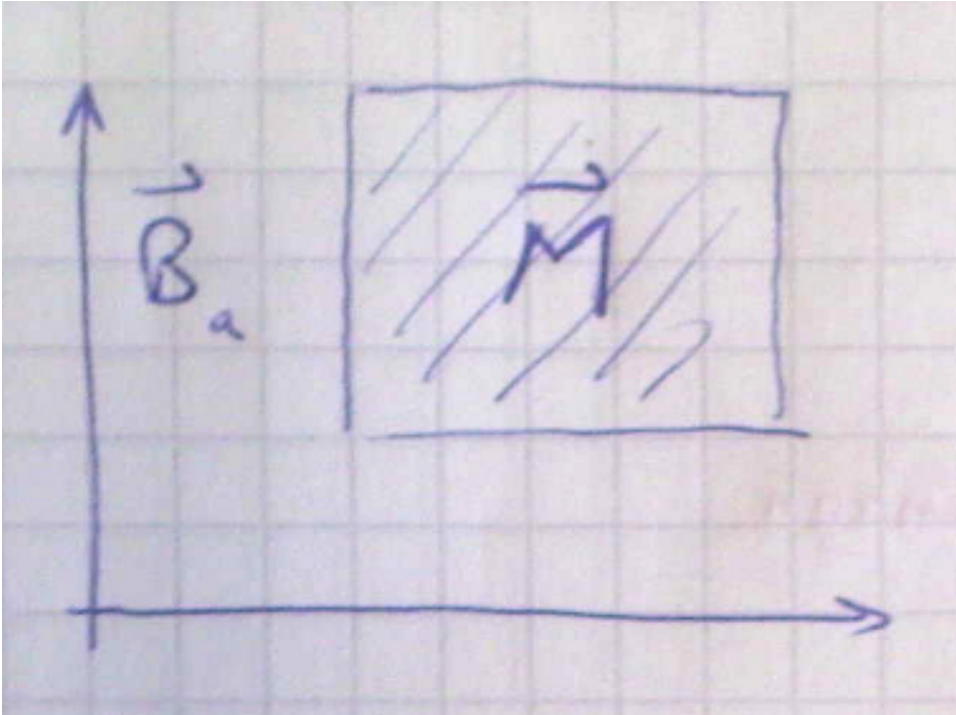
# Contents

<b>12 Magnetismus</b>	<b>2</b>
12.1 Diamagnetismus . . . . .	2
12.1.1 Diamagnetismus freier Elektronen: Landau-Diamagnetismus . . . . .	2
12.2 Paramagnetismus . . . . .	2
12.2.1 Paramagnetismus von Ionen . . . . .	3
12.3 Kühlung durch adiabatische Entmagnetisierung . . . . .	3

## Chapter 12

# Magnetismus

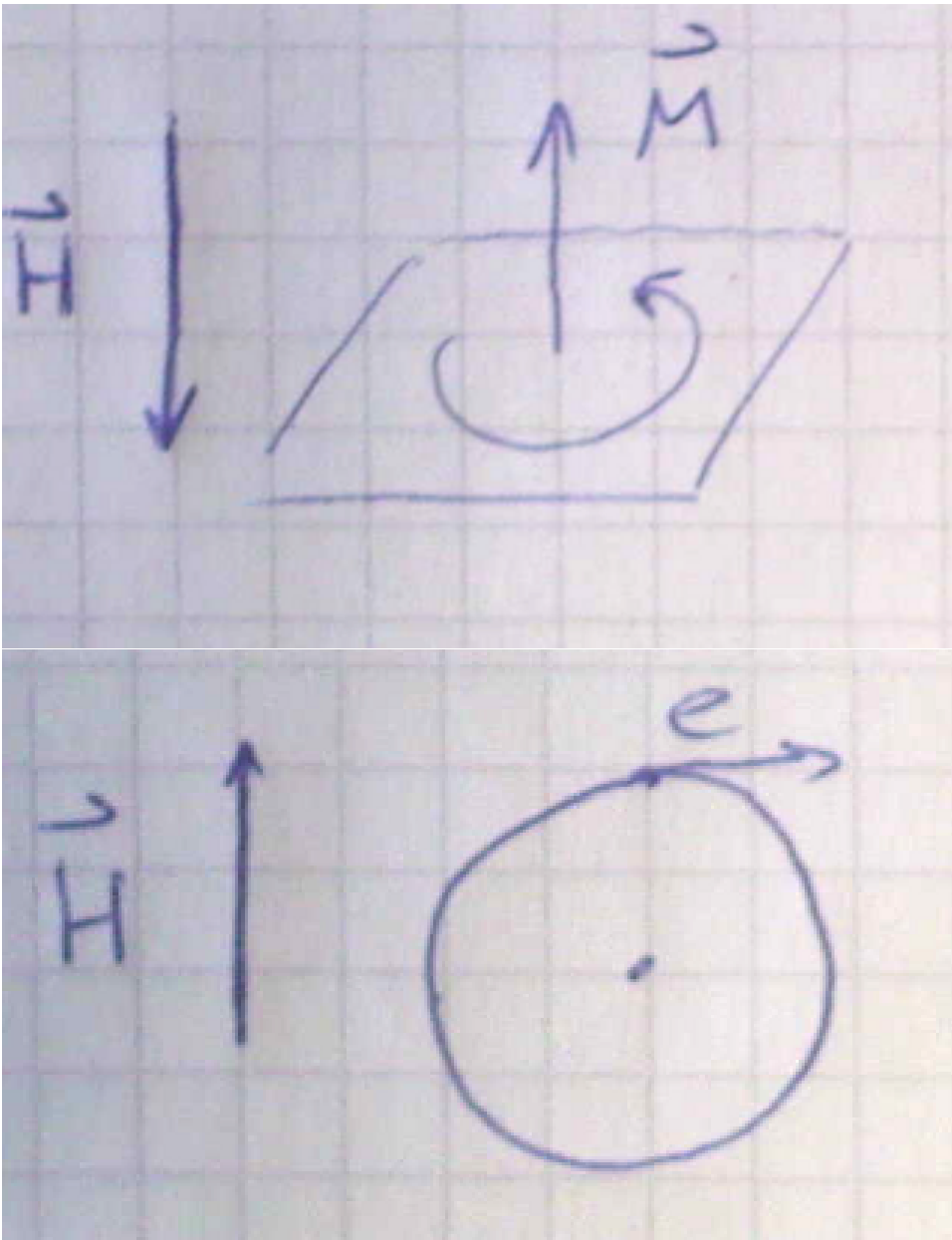
Die Magnetisierung  $\vec{M}$  ist das magnetische Moment pro Volumen.  $\vec{M} = n\vec{\mu}$ ;  $\mu$  ist mittleres Dipolmoment.



Magnetische Suszeptibilität:  $[\chi]$  Tensor

$$[\chi] \equiv \chi = \frac{\vec{M}}{\vec{H}} = \mu_0 \frac{\vec{M}}{\vec{B}}$$

Skalar (Vereinfacht)  $\chi = \frac{M}{H}$ ;  $\chi < 0$ : diamagnetische Festkörper;  $\chi > 0$ : paramagnetische Festkörper



Lenz-Regel  $I \propto \frac{d\phi}{dt}$

## 12.1 Diamagnetismus

Diamagnetismus ist eine Schwächung des äußeren Feldes. Klassische (Langevin) und quantenmechanische Behandlung. Beide kommen zu gleichen Resultaten.

$$\chi_a|_{\text{Atome}} \propto 10^{-6} \text{ bis } 10^{-7}$$

$$\chi_a|_{\text{Atome}} = -\frac{h\mu_0 e^2}{6m_e} Z \langle r^2 \rangle$$

mit  $Z$  Elektronenzahl und  $\langle r^2 \rangle$  mittlerer abstandsquadrat der e-nen

## 12.1 Diamagnetismus freier Elektronen: Landau-Diamagnetismus

1930 Landau-Quantisierung  $\frac{\hbar(k_x^2 + k_y^2)}{2m_e} = (l + \frac{1}{2})\hbar\omega_c$ ;  $l = 0, 1, 2, 3, \dots$  B-Feld in z-Richtung.

mit  $\chi = -\frac{\partial^2 F}{\partial H^2}$

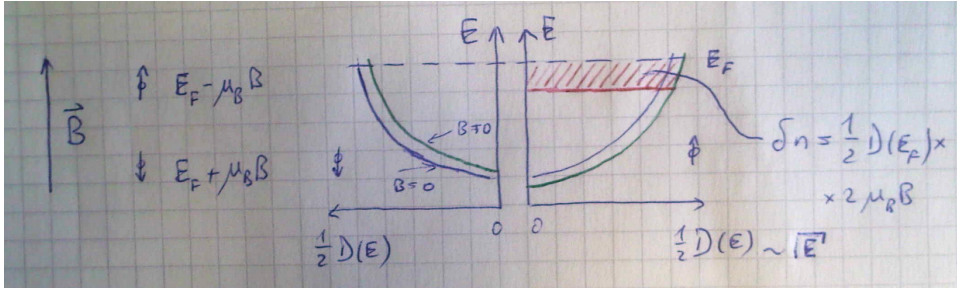
$$F = k_B T \ln \sum_{\text{alle Zustände}} e^{-\frac{\epsilon}{k_B T}}$$

$$\chi_d|_{\text{Landau}} = -\frac{1}{3}\mu_B^2\mu_0 D(E_F) = -\frac{1}{3}\mu_B^2\mu_0 \frac{3}{2} \frac{n}{E_F} = -\frac{n}{2E_F} \mu_0 \mu_B^2 \propto 2 \cdot 10^{-7}$$

mit dem Borsches Magneton  $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$  und Zustandsdichte  $D(E_F)$

## 12.2 Paramagnetismus

Paramagnetismus freier e-nen ist allgemein bekannt als Paulische Spin Suszeptibilität.



Roter Bereich  $\delta n$  kommt dazu, es gibt insgesamt mehr Elektronen

$$\delta n = \frac{1}{2} D(E_F) 2\mu_B B$$

$$M = \delta n \mu_B = \mu_B^2 B D(E_F)$$

$$\chi_P|_{\text{Pauli}} = \mu_B \frac{M}{B} = \mu_0 \mu_B^2 d(E_F) = -3\chi_d|_{\text{Landau}}$$

$$\chi_P|_{\text{Landau}} = -\frac{1}{3}\chi_d|_{\text{Pauli}}$$

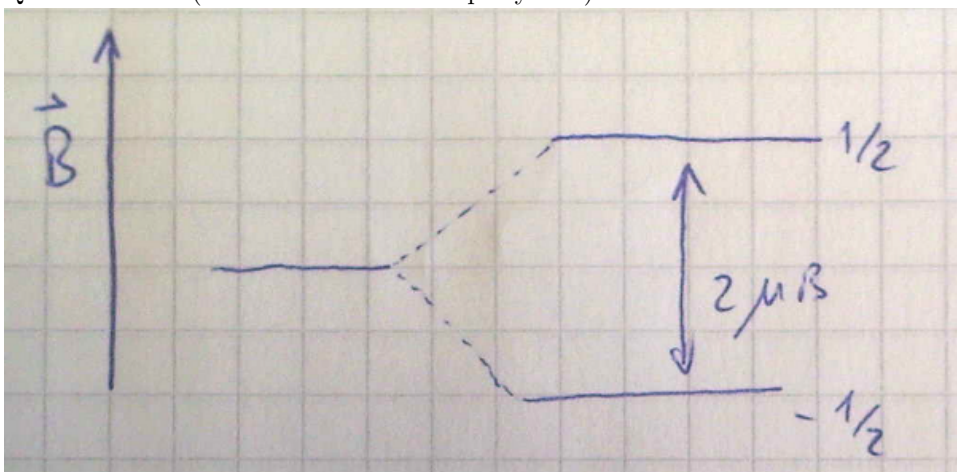
## 12.2 Paramagnetismus von Ionen

Aus der Atomphysik:  $\vec{\mu} = -g\mu_B \vec{J}'$  mit  $g$  Lande-Faktor  $\vec{J}'\hbar\vec{J}'$  Gesamtdrehimpuls des Atoms

$$\hat{J} = \hat{L} + \hat{S}$$

$$g = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}$$

$L$ -Bahndrehimpulsquantenzahl und  $S$ -Spinquantenzahl  
Quantentheorie ( nur für Zwei-Niveau-System)



$$V = -\vec{\mu}\vec{B} = \underbrace{m_J g \mu_B}_{\mu} B$$

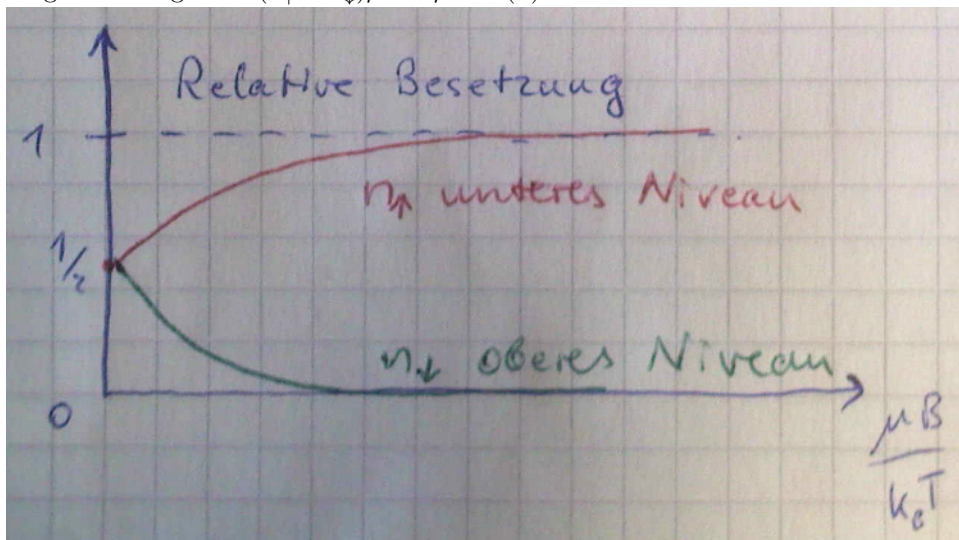
mit  $m_J = \pm \frac{1}{2}$ ;  $g = 2$ ;  $V = \pm \mu_B B$

Im Gleichgewicht für  $T \neq 0$ ; Faktor  $x = \frac{\mu_B}{k_B T}$

$$\frac{n_{\uparrow}}{n} = \frac{e^x}{e^x + e^{-x}}$$

$$\frac{n_{\downarrow}}{n} = \frac{e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$$

Magnetisierung  $M = (n_{\uparrow} - n_{\downarrow})\mu = n\mu \tanh(x)$



für  $x \ll 1$  (hohe T)  $\tanh(x) \propto x$

$$M \approx n\mu \frac{\mu_B}{k_B T}$$

Curie-Gesetz:

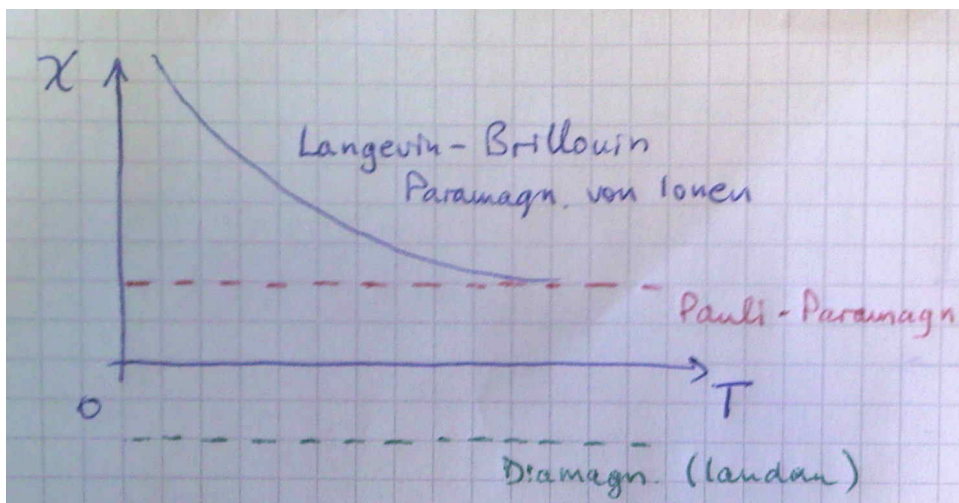
$$\chi_{pa} \approx \frac{n\mu^2}{k_B T} \mu_0 \approx \frac{1}{T}$$

Ein Atom mit Gesamtdrehimpulsquantenzahl  $J$  besitzt in einem Magnetfeld  $(2J+1)$  äquidistante Energieniveaus

$$M = n g J \mu_B B_J(x)$$

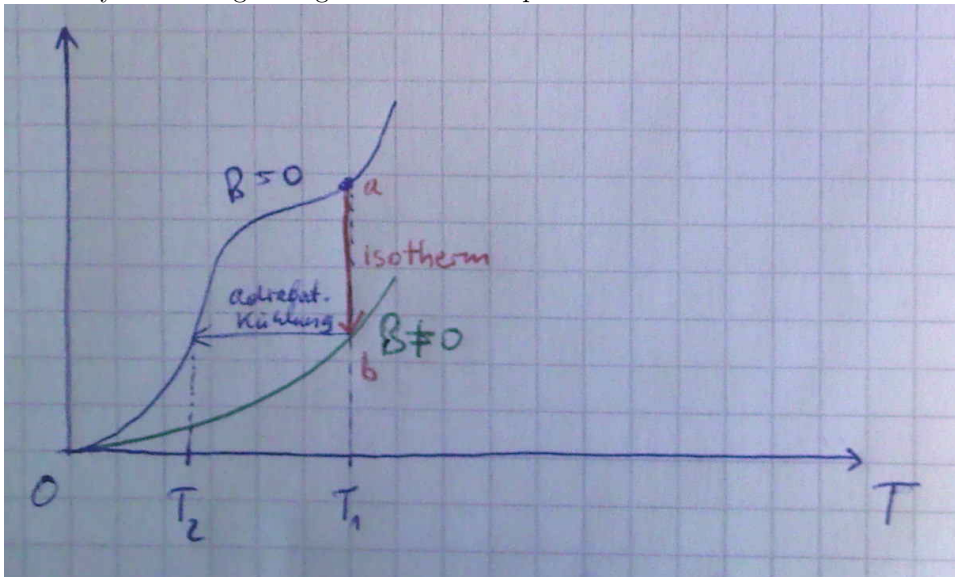
mit  $B_J(x)$  Brillouin-Funktion für  $x \ll 1$

$$\chi_{pi} = \mu_0 \frac{\mu}{B} = n J(J+1) \frac{g^2 \mu_B}{3 k_B T} \propto \frac{C}{T}$$



### 12.3 Kühlung durch adiabatische Entmagnetisierung

von Debye 1926 vorgeschlagen und 7 Jahre später realisiert.



a - gute Wärmekontakt bis  $mK$  b - Probe von Umgebung isoliert  $\approx 10\mu K$  Bei Cu Kernentmagnetisierung