

Magnetismus (Zusammenfassung)

Magnetismus ist grundsätzlich nur quantenmechanisch verstehbar. Bei einem freien Atom tragen drei Effekte zum magnetischen Moment bei: Der Elektronenspin, der Bahndrehimpuls und die Änderung des Bahndrehimpulses im äußeren Magnetfeld.

Diamagnetismus

Die freien Elektronen in Metallen tragen auch zum Diamagnetismus bei, da sie sich auf Spiralbahnen (siehe Landau-Zylinder Kapitel 3.4.2) bewegen.

Dabei steht $\mu_B = e\hbar/2m_e$ für das **Bohrsche Magneton**. Es entspricht dem magnetischen Moment, das ein Elektron auf einem Orbit mit $l = 1$ durch seinen Bahndrehimpuls erzeugt. Es entspricht fast genau dem magnetischen Spin-Moment eines freien Elektrons.

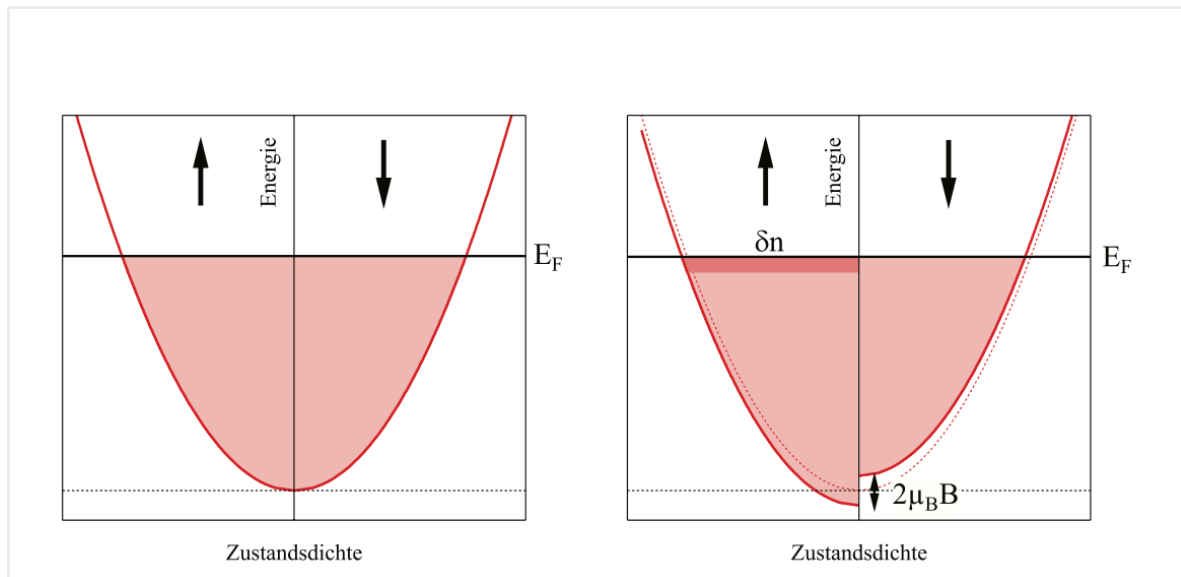
Auch der Landau-Diamagnetismus hängt nicht von der Temperatur ab.

Langevin-Paramagnetismus freier Atome

Der Paramagnetismus basiert auf der Existenz permanenter magnetischer Dipolmomente.

Diese treten bei Atomen mit nicht abgeschlossenen Orbitalen auf. Gitterdefekte tragen oft ein magnetisches Moment.

Pauli-Paramagnetismus des Elektronengases



Paulischer Paramagnetismus durch Verschiebung der Zustandsdichten von Elektronen mit magnetischem Moment parallel zum äußeren Magnetfeld (↑) und antiparallel zum äußeren Magnetfeld (↓). Links: Elektronengas ohne Magnetfeld. Rechts: Elektronengas mit B-Feld.

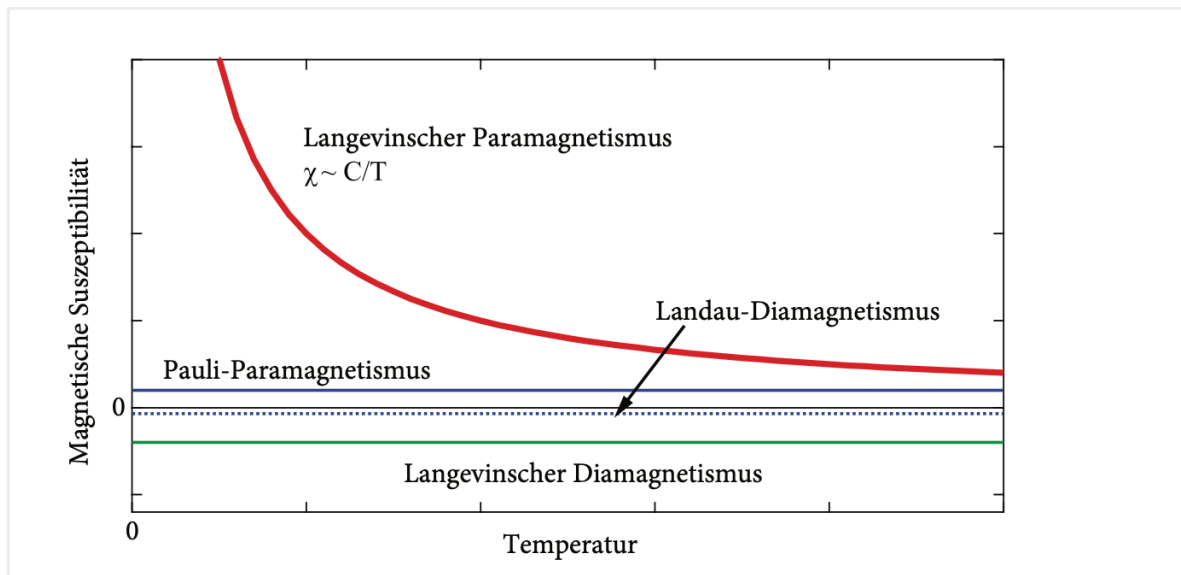
Die Zustandsdichten für Majoritäts- bzw. Minoritäts Elektronen (↑ bzw. ↓) werden um $\delta E = g\mu_B B \approx 2\mu_B B$ gegeneinander verschoben. Die Fermienergie bleibt gleich, daher werden Elektronen von antiparallel nach parallel umsortiert. Die Differenz der Elektronenzahlen ist

Die gesamte Suszeptibilität des Elektronengases ist von der Temperatur unabhängig.

Die dia- und paramagnetische Suszeptibilität in Metallen sind ähnlich groß, daher können Metalle insgesamt para- oder diamagnetisch sein. Beispiele:

- Paramagnetisch: Alkalimetalle, fast alle Übergangsmetalle, Al.
- Diamagnetisch: Cu, Ag, Au, Zn, Cd, Hg, Be, Ga, In, Bi, Pb

Störstellenfreie Isolatoren bei denen die Atome abgeschlossene Schalen haben sind immer diamagnetisch.

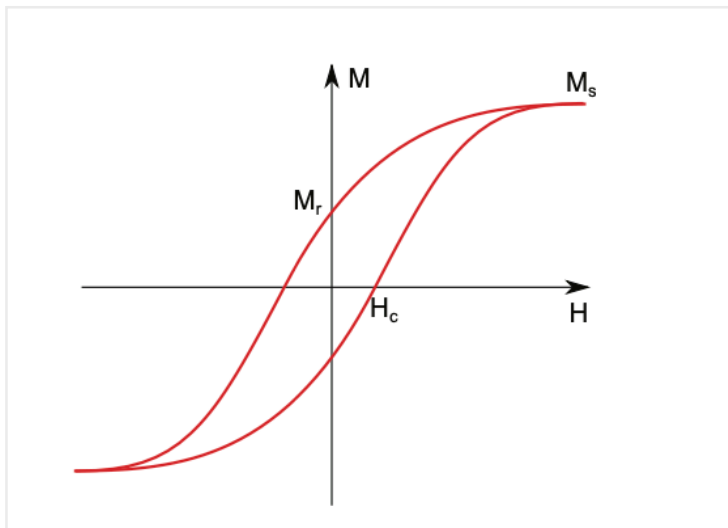


Ferromagnetismus und Antiferromagnetismus

Ferromagnetische Materialien haben eine **spontane Magnetisierung** $M_s(T)$, die auch ohne äußeres Magnetfeld vorhanden ist. Sie verschwindet oberhalb der charakteristischen **Curie-Temperatur** T_C , bei der das Material paramagnetisch wird. Der Übergang ist ein Phasenübergang zweiter Ordnung. Beispiele ferromagnetischer Elemente: Fe, Co, Ni, Gd, Dy, Tb, Ho.

Für die spontane Magnetisierung muss es eine Kopplung zwischen den magnetischen Momenten geben. Erste Idee: Magnetische Dipol-Dipol-Wechselwirkung. Typische Dipol-Feldstärke $B_{\text{dip}} \approx \mu_0 \mu_B / (4\pi a^3) \approx 0,05 \text{ T}$. Magnetische Energie $E_{\text{dip}} = |-\mu_B B_{\text{dip}}| \approx 10^{-6} \text{ eV} \approx 0,01 \text{ K} \cdot k_B$. Die Wechselwirkung ist viel zu schwach um die großen T_C von 1000 K und mehr zu erklären.

Das Ummagnetisieren eines Ferromagneten erfordert Energie und ist irreversibel. Domänen-wände werden bewegt und die Magnetisierung innerhalb der Domänen gedreht. Dies führt zur magnetischen **Hysterese**



Hysteresekurve eines Ferromagneten mit den Kenngrößen M_s , M_r , H_c .
 Die Kennzahlen einer Hystereseschleife (M – H-Diagramm) sind • M_s : Sättigungsmagnetisierung bei großem H,
 • M_r : remanente Magnetisierung bei $H = 0$,
 • H_c : Koerzitivfeld; Feldstärke bei der $M = 0$ ist,
 • $S = M_r/M_s$: Squareness.

Spinwellen (Magnonen)

Ähnlich wie bei Phononen, können auch magnetische Momente zu Schwingungen angeregt werden. Dabei handelt es sich um kollektive Präzessionsschwingungen. Wie Phononen auch, können sie als Quasiteilchen behandelt werden und heißen **Magnonen**.