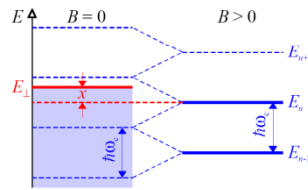


## Landau-Diamagnetismus

### Landau-Niveaus



### freie Elektronen

$$\hat{H} = \frac{1}{2m} (\mathbf{p} + e\mathbf{A})^2 \pm \mu_B B$$

(NUR ZUSTÄNDE @  $E_F$ )

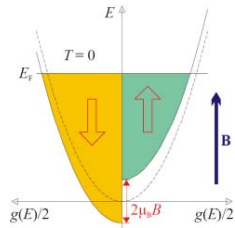
Fermi-Verteilung !

$$E_F \sim 10\text{eV}, T_F \sim 10^5\text{K}, \mu_B B \sim 100\mu\text{eV}$$

300 K  $\ll$   $T_F$ , also

„T=0K gute Näherung“

### Pauli-Paramagnetismus



$$\chi_{\text{Metall}} = \chi_{\text{Metall}} \left( 1 - \frac{1}{3} \left( \frac{m}{m^*} \right)^2 \right)$$

### nicht-WW Momente

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \sum \frac{(\mathbf{p}_i + e\mathbf{A})^2}{2m} + g\mu_B \mathbf{S} \cdot \mathbf{B}$$

+ 1. / 2. Ordg. Störungstheorie

Symmetrie / Kristallfeld

Aufhebung der Entartung

d-Orbitale in oktaedrischem

Kristallfeld:  $e_g$

$t_{2g}$

Hundsche Regeln

(1) S maximal

(2) L maximal

(3)  $J = |L - S|$  weniger halbvoll,  $J = L + S$  sonst

### lokalisierte Momente

(ALLE MOMENTE)

Paramagnetismus

„ausrichten vorhandener Momente“

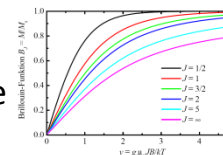
$$\chi_L \propto C/T$$

Curie-Gesetz

$$M = M_{\text{sat}} B_J(y)$$

Brillouin-Funktion

$$M_{\text{sat}} = \text{Zahl aller Momente}$$



van-Vleck Paramagnetismus ( $J=0$ )

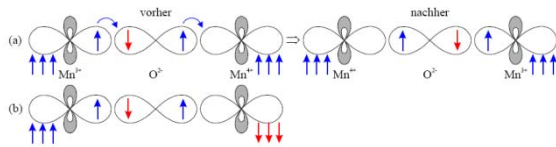
„Beimischung angeregter Zustände“

$$\chi_{\text{v.v.}} \neq f(T)$$

## indirect exchange

### double exchange

„reales Hüpfen“  
 Sauerstoff als shift register  
 Leitfähigkeit  $\leftrightarrow$  FM  
 Colossal Magnetoresistance



**Bild 6.9:** Doppelaustausch zwischen  $Mn^{2+}$  und einem  $Mn^{3+}$  über ein Sauerstoffion. Die Dreier-Pfeilgruppe symbolisiert den lokalisierten Rumpfspin. Bei paralleler Ausrichtung (a) kann der itinerante Spin real von  $Mn^{3+}$  zu  $Mn^{2+}$  hüpfen und einen elektrischen Strom transportieren.

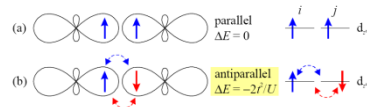
### superexchange

„virtuelles Hüpfen“  
 Hüpfen ( $t$ ) & Coulomb ( $U$ )

$$H^{SE} = -J^{SE} \sum \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j$$

$$J^{SE} = -\frac{2t^2}{U}$$

entartete Niveaus  
 GKA-Regeln



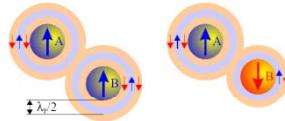
**Bild 6.3:** Schema zum Ein-Niveau-Super Austausch am Beispiel zweier zueinander gerichteter d-Orbitale. Die antiparallele Spinorientierung (b) wird energetisch bevorzugt.

### anisotropic exchange

$$H^{DM} = -J^{DM} \mathbf{S}_1 \times \mathbf{S}_2$$

## RKKY

Friedel Oszillationen  
 q-abhängige Suszeptibilität  
 oszillierende Austauschkopplung

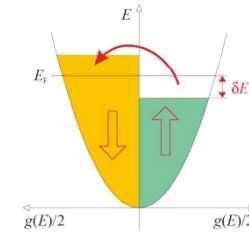


**Bild 6.15:** RKKY-Wechselwirkung. Je nach Abstand der magnetischen Störstellen A und B ergibt sich ferromagnetische (links) oder antiferromagnetische Ordnung (rechts).

## Stoner-Kriterium

$$U \cdot g(E_F) \geq 1$$

$$U = \mu_0 \mu_B^2 \lambda$$



FM Metalle  
 Fe: 2,2  $\mu_B$ /atom  
 „rigid band behavior“  
 Bandmagnetismus  
 itinerant exchange

## WW Momente

Dipol-Dipol  $\sim 100 \mu\text{eV}$   
 zu klein, um FM @RT zu erklären

## direct exchange

- 2 Fermionen a, b mit  $S=1/2$  und
- Quantenmechanik** (Pauli-Prinzip):  
 Symmetrie Gesamt-WF  $\rightarrow$   
 Orts-WF für Spin-Singulett  
 und Spin-Triplett verschieden
  - Coulomb-WW:**

räumliche Symmetrie  $\leftrightarrow$  pot. Energie  
 liefert Austauschintegral

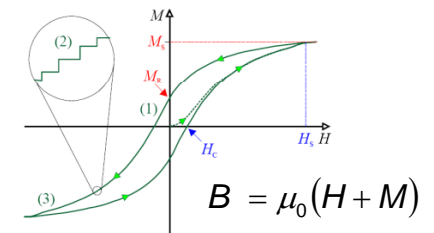
$$E_S - E_T = 2 \int \Psi_a^*(\mathbf{r}_1) \Psi_b^*(\mathbf{r}_2) H \Psi_a(\mathbf{r}_2) \Psi_b(\mathbf{r}_1) dV_1 dV_2$$

mit Austauschkonstante  $J = \frac{E_S - E_T}{2}$

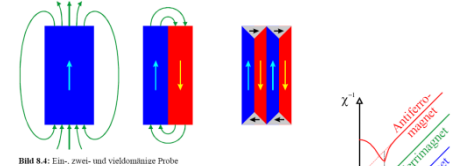
## Molekularfeld

$$B_{MF} = \mu_0 \lambda M \text{ nicht real!}$$

$$H_{\text{Heisenberg}} = -2J \mathbf{S}^a \cdot \mathbf{S}^b$$



**Bild 8.6:** Ferromagnetische Hystereseschleife



**Bild 8.4:** Ein-, zwei- und vielmagnetische Probe

Hysterese  
 Domänen  
 magn. Anisotropie  
 Phasenübergang

**Bild 2.19:** Inverse Suszeptibilitäten für Ferro-, Ferri- und Antiferromagneten

# Landau-Theorie der Phasenübergänge

Magnetisierung=Ordnungsparameter

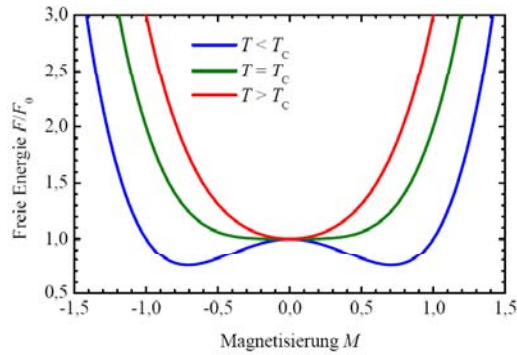


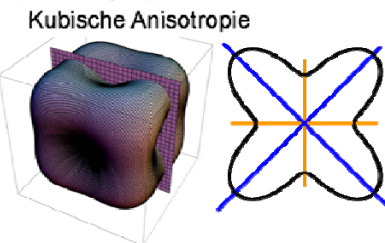
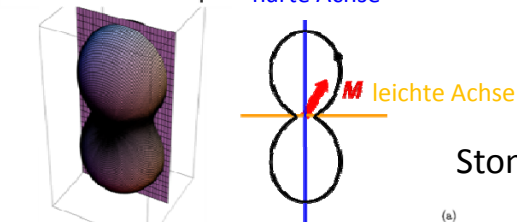
Bild 7.14: Freie Energie in der Landau-Theorie

## Magnetische Anisotropie

( $M$  zeigt „lieber“ in bestimmte Richtungen)  
leichte Achsen = Minima in freier Energie

freie Energie als Funktion von  $M$ -Orientierung

Uniaxiale Anisotropie harte Achse



in dünnen Filmen:  $M \parallel$  Film wegen Formanisotropie

from: S. Blundell, Magnetism in Condensed Matter, Oxford University Press (2001)

## Stoner-Wohlfarth-Modell

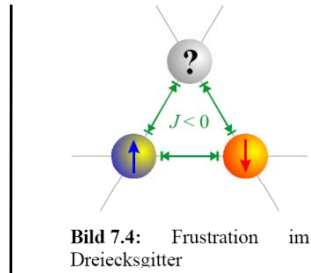
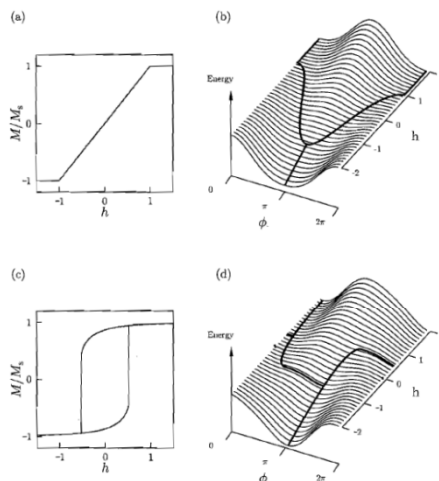


Bild 7.4: Frustration im Dreiecksgitter

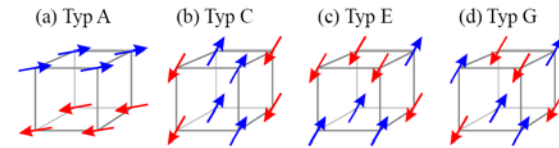


Bild 7.3: Mögliche antiferromagnetische Ordnungsstrukturen im einfachen kubischen Gitter: (a) Typ A: lagenartig; (b) Typ C: kettenartig; (c) Typ E; (d) Typ G

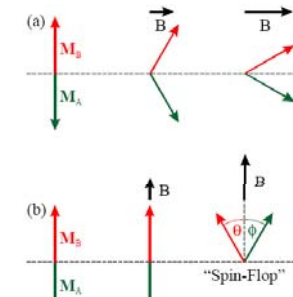


Bild 8.11: Die Magnetisierungen  $M_{A,B}$  der antiferromagnetischen Untergitter A und B im äußeren Magnetfeld  $B$  senkrecht (a) und parallel zu  $M$  (b). Für Details siehe Text.

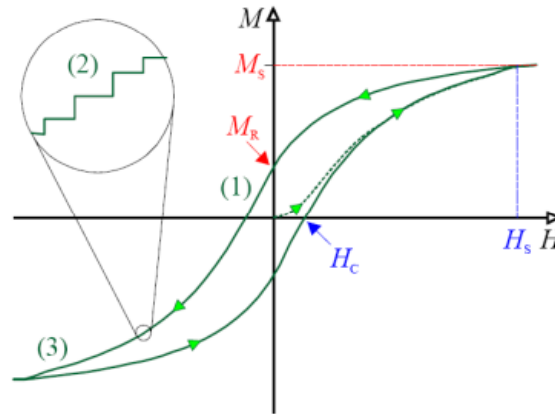


Bild 8.6: Ferromagnetische Hystereseschleife

$T_c \cong 1000$  K

$\mu_0 M_s \cong 1$  T

Weichmagnete (umschl. Fläche = Umwandlungs-E. klein)

z.B. Permalloy ( $Ni_{80}Fe_{20}$ )

$\mu_0 H_c \cong 10^{-7}$  T

Hartmagnete (umschl. Fläche = Umwandlungs-E. groß)

z.B.  $Nd_2Fe_{14}B$

$\mu_0 H_c \cong 1.2$  T

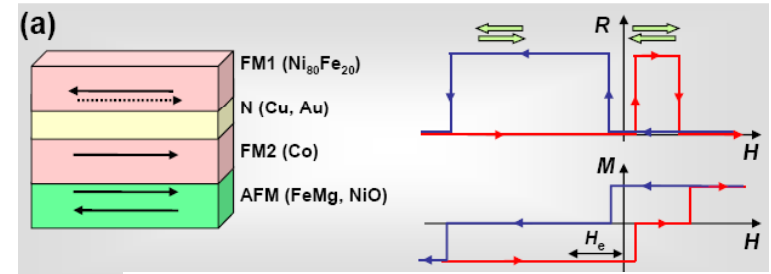


Abbildung 5.22: Prinzipieller Aufbau eines Spin-Valve Systems (a) mit antiferromagnetischer Pinningschicht und resultierende  $R(H)$ -Kurve. Zum Vergleich ist in (b) eine Spin-Valve Struktur ohne AFM-Pinningschicht gezeigt, bei der eine antiparallele Magnetisierungsausrichtung nur aufgrund unterschiedlicher Koerzitivfeldstärken erreicht werden kann. Die  $R(H)$ -Kurve der Struktur mit Pinningschicht ist gegenüber derjenigen ohne um das Austauschfeld  $H_e$  auf der Feldachse verschoben.

## Domänen

Bloch-Wand (Rotation  $\parallel$  Wand)

Neel-Wand (Rotation  $\perp$  Wand)

Domänengröße  $\cong$  nm...mm

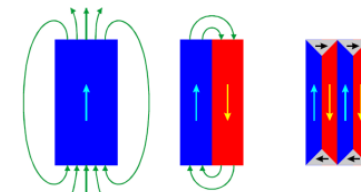


Bild 8.4: Ein-, zwei- und vieldomänige Probe