

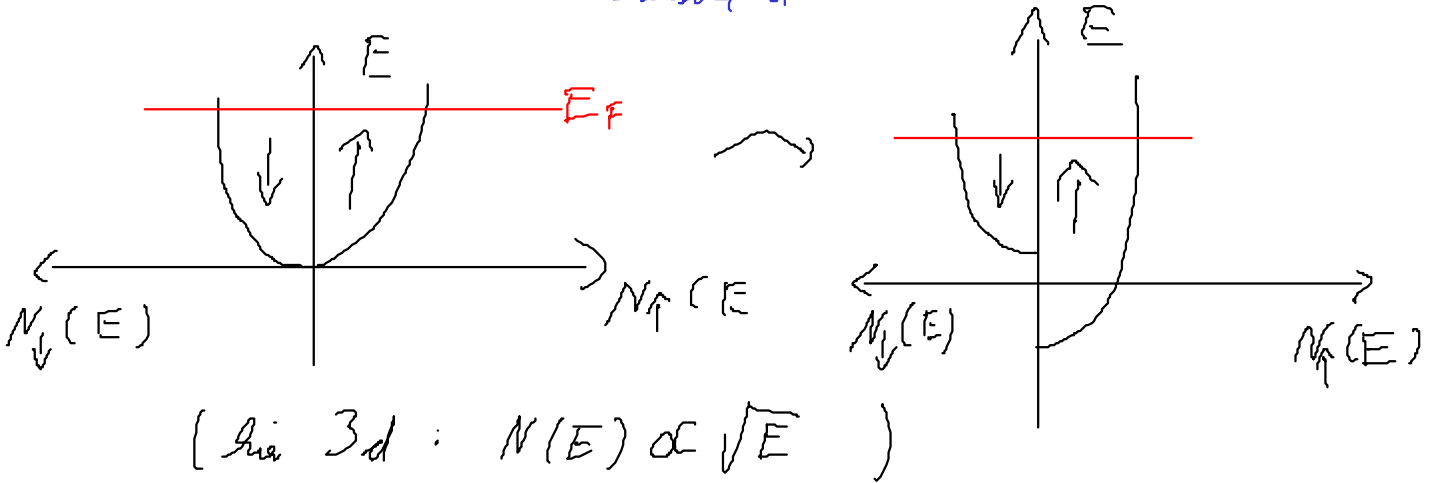
# Spinnelektronik / Spintronik

Bandmagnetismus Fe, Co, Ni

$$H = \frac{p^2}{2m} + V(\vec{r}) - \mu_B \vec{S} \cdot \vec{s}$$

magn. Moment / Austauschfeld

$$\vec{s} = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{pmatrix}$$

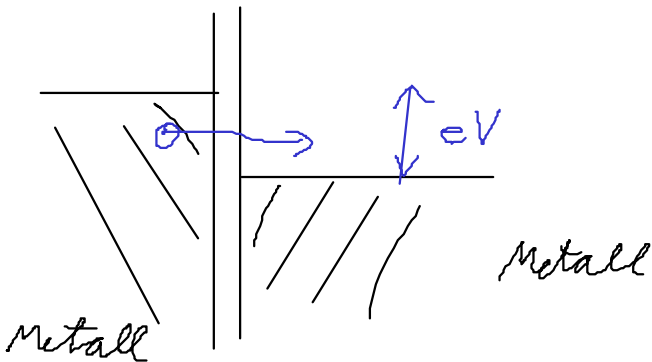


höherer Majoritäts- und Minoritäts-Ladungsträger

$$N_m(E) = N(E + \frac{\mu_B}{2})$$

$$N_m(E) = N(E - \frac{\mu_B}{2})$$

## Tunnelhamilton - Formalismus



$$H = H_L + H_R + H_T$$

links      rechts      Tunnel

$$H_L = \sum_{k \in L, \sigma} \epsilon_{k, \sigma} c_{k, \sigma}^+ c_{k, \sigma}$$

$$H_R = \sum_{q \in R, \sigma} (\epsilon_{q, \sigma} - eV) c_{q, \sigma}^+ c_{q, \sigma}$$

(Impulse auf rechte Seite)

$$H_T = \sum_{\substack{k \in L \\ q \in R \\ \sigma}} \left[ T_{k \rightarrow q} c_{q\sigma}^\dagger c_{k\sigma} + T_{k \rightarrow q}^* c_{k\sigma}^\dagger c_{q\sigma} \right]$$

kein Spin-Flip - sollte beim Tunneln nicht verändert werden

Zustände sind charakterisiert durch Besetzung

$$| \{n_{q\sigma}\}, \{n_{k\sigma}\} \rangle$$

Tunnelrate  $|i\rangle \rightarrow |f\rangle$

$$|i\rangle = | \dots 1 \dots i \dots 0 \dots \rangle$$

$$|f\rangle = | \dots 0 \dots j \dots 1 \dots \rangle$$

Fermi Goldene Regel

$$\begin{aligned} \Gamma_{i \rightarrow f} &= \frac{2\pi}{\hbar} | \langle f | H | i \rangle |^2 \delta(E_f - E_i) \\ &= \frac{2\pi}{\hbar} | T_{q \leftarrow k} |^2 \delta(E_{k\sigma} - (E_{q\sigma} - eV)) \end{aligned}$$

gesamte Übergangrate (makroskop.)

$$\Gamma_{L \rightarrow R} = \sum_{\substack{k \in L \\ q \in R \\ \sigma}} \frac{2\pi}{\hbar} | T_{q \leftarrow k} |^2 \cdot f(E_k) (1 - f(E_q)) \delta(E_k - E_q + eV)$$

Typische Näherung  $| T_{q \leftarrow k} |^2 = | T |^2 = \text{const}$

$$\sum_{k \in L} = \int dE N_L(E) \approx N_L(E_F) \int dE$$

$$\Gamma_{L \rightarrow R} = \frac{2 \cdot 2\pi}{\hbar} | T |^2 D_L(E_F) D_R(E_F) \int dE \int dE' f(E) (1 - f(E')) \delta(E - E' + eV)$$

Spin

$$= \frac{1}{e^2 R_T} \int d\varepsilon \frac{1}{e^{\beta\varepsilon+1}} \left( 1 - \frac{1}{e^{\beta\varepsilon+1}} \right) \quad \beta = \frac{1}{kT}$$

$L$  Tunnelwidthband

$$x = e^{\beta\varepsilon}, \quad dx = \beta x d\varepsilon, \quad \frac{1}{y} = e^{\beta eV}$$

$$\int_0^\infty dx \frac{1}{\beta x} \frac{1}{x+1} \left( 1 - \frac{x}{\frac{x}{y}+1} \right) = \frac{1}{\beta} \frac{1}{y-1} \int_0^\infty \left( \frac{1}{x+1} - \frac{1}{x+y} \right) dx$$

$$= \frac{1}{\beta} \frac{1}{y-1} \ln \left( \frac{x+1}{x+y} \right) \Big|_0^\infty = \frac{1}{\beta} \frac{1}{y-1} \ln(y)$$

$$= -\frac{eV}{e^{-\beta eV} - 1} \propto \Gamma_{L \rightarrow R} \quad \text{Tunnelrate}$$

$$\Gamma_{L \rightarrow R} = \frac{1}{e R_T} \frac{(-V)}{e^{-\beta eV} - 1}$$

$$\text{analog } \Gamma_{R \rightarrow L} = \frac{1}{e R_T} \frac{V}{e^{\beta eV} - 1}$$

Differenz ist Tunnelstrom

$$I = e(\Gamma_{L \rightarrow R} - \Gamma_{R \rightarrow L}) = \frac{V}{R_T}$$

Leitwert

$$G = \left. \frac{\partial I}{\partial V} \right|_{V=0} = \frac{1}{R_T} = \frac{4\pi e^2}{h^2} |\pi|^2 D_L(E_F) D_R(E_F)$$

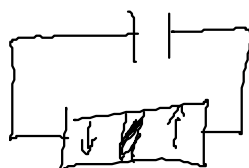
! Zustandsdichte links  
und rechts

6.1

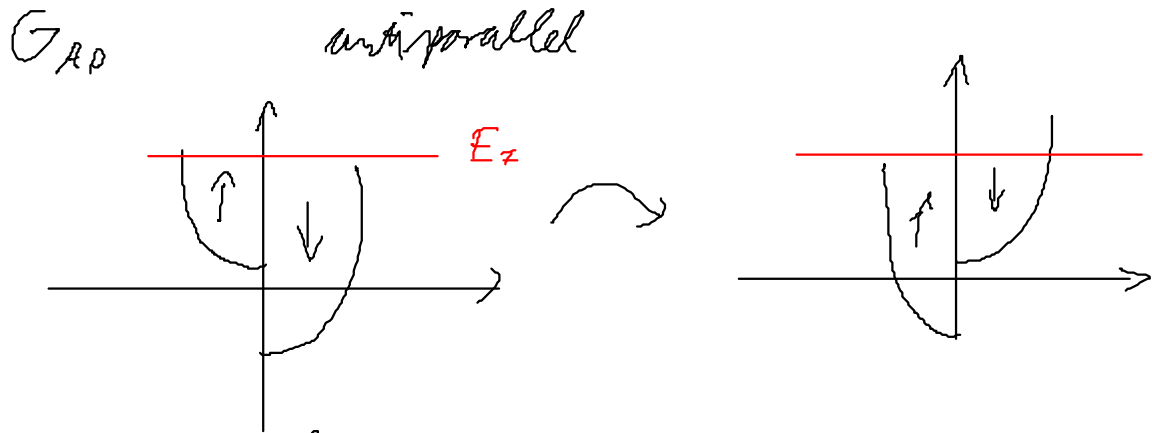
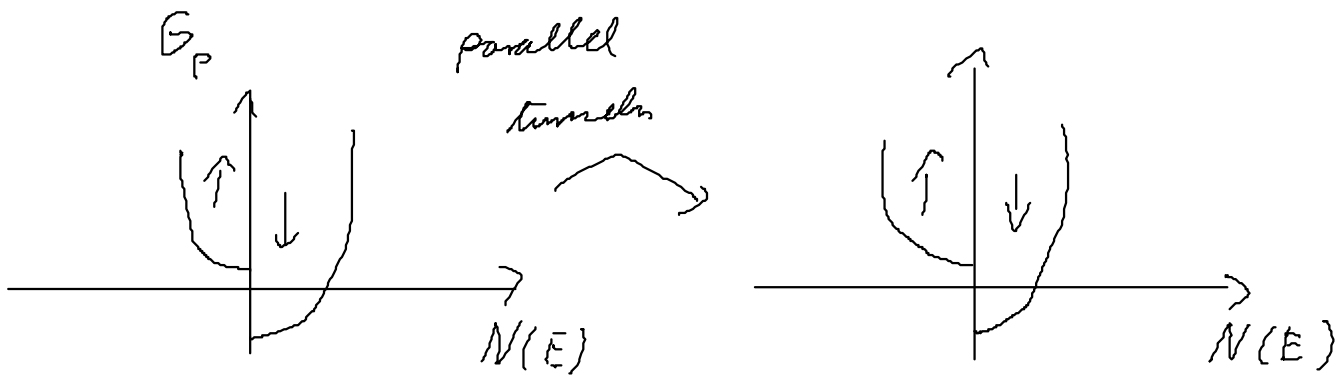
Tunneln zwischen ferromagnetischen

Elektroden

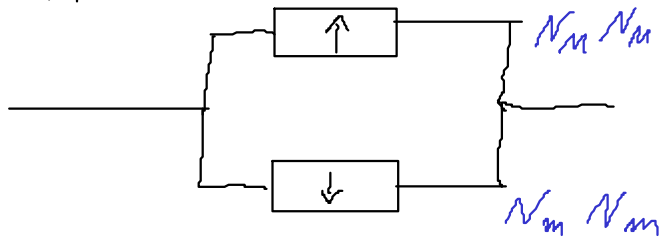
(Julliere '75)



Magnetisierung



$$G^P = \frac{2\pi e^2}{A} |T|^2 (N_M N_M + N_m N_m)$$

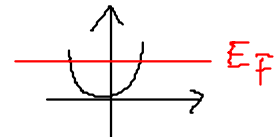


$$G^{AP} = \frac{2\pi e^2}{A} |T|^2 \cdot 2 \cdot N_M N_m$$

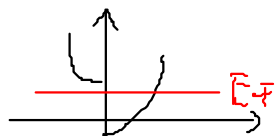
Polarisierung  $P = \frac{N_M - N_m}{N_M + N_m} \neq \frac{\int dE N_\uparrow(E) - \int dE N_\downarrow(E)}{\int dE N_\uparrow(E) + \int dE N_\downarrow(E)}$

Zustände an Fermi-Energie

$P=0$  normales Metall



$P=1$  "half metall"



$$G^{P/AP} = \frac{2e^2}{A} |T|^2 \frac{(N_M + N_m)^2 \pm (N_M - N_m)^2}{2} = \bar{G} (1 \pm P^2)$$

$$G = \frac{2e^2}{h} (N_M + N_m)^2$$

$$TMR = \frac{G^P - G^{AP}}{G^{AP}} = \frac{R^{AP} - R^P}{R^P} = \frac{2P^2}{1-P^2} \quad (0 \leq P \leq 1)$$

quellere

Verallgemeinerungen

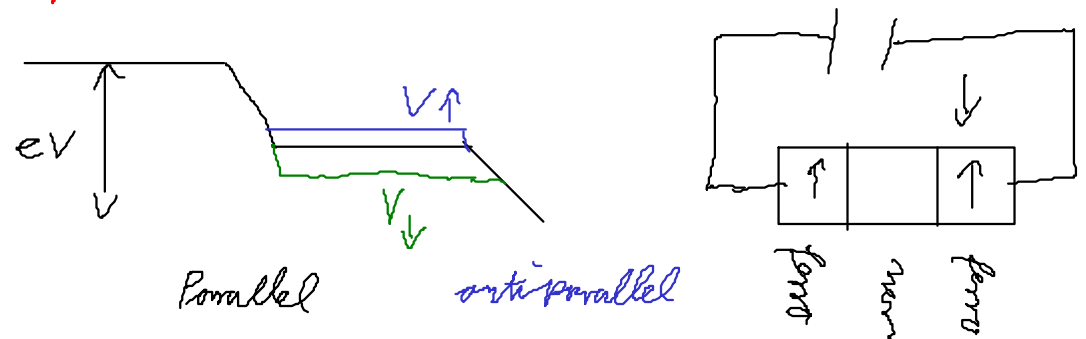
- bel. Polarisationswinkel (nicht nur parallel/antiparallel)

$$G^{P/AP} = \bar{G} (1 \pm P^2 \cos \theta)$$

↳ Winkel zw. Polarisationsrichtungen

- endl. Barrierehöhe
- unterschiedl. Transmissionsamplitude je nach Spin
- endl. Temperaturen (Spinwellen)

Spinalekumulation



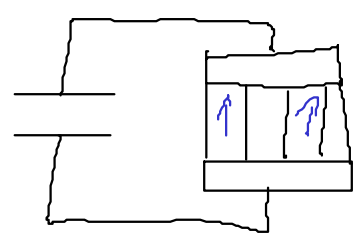
Spin-flip

6.2

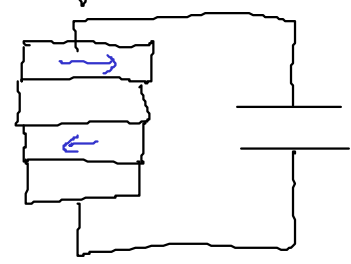
GM R Giant magneto resistance

(Eert, Grünberg NP 2007)

- befestigt in metallischen Mehrschichtsystemen
- alternierend magnetisch / nichtmagnetische Schichten



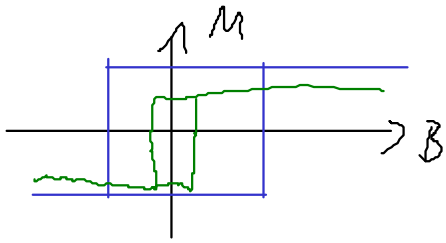
CIP  
current in plane



CPP  
perpendicular

Wie wird gehalten?

(i) zwei magn. Materialien mit unterschiedlichem  $B_c$

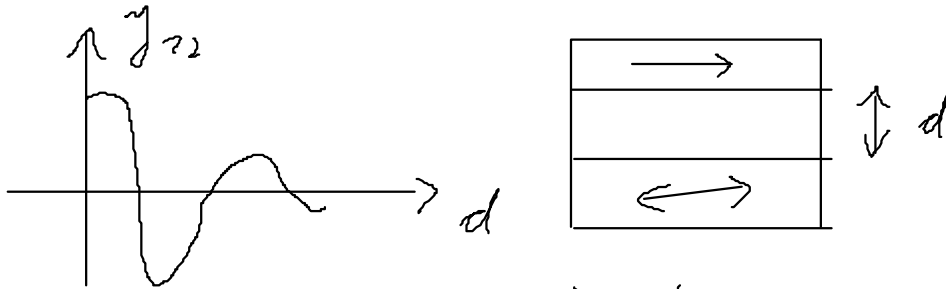


Hysteresis - Kurve

(ii) Spinventil



(iii) oszillierende Austauschkopplung zw. ferromagn. Schichten, die durch dünne nicht magnet. Materialien getrennt sind.



$$E = \gamma_{12} \vec{M}_1 \cdot \vec{M}_2$$

$\left. \begin{matrix} AF \\ F \end{matrix} \right\}$  Konfiguration für  $\gamma_{12} \begin{cases} > \\ < \end{cases}$

Antiferromagnet.  
 0  
 Ferromagnet.

$$\sigma_{\uparrow\downarrow} \propto N_{\uparrow\downarrow}(E_F) v_{F,\uparrow\downarrow} \ell_{imp\uparrow\downarrow}$$

durch Bandstruktur bestimmt, intrinsische  
 GMR

mikroskop. Störstellen-  
 verteilung  
 extrinsische  
 GMR

## 6.2 Spin - Bahn - Kopplung

Wasserstoff-Atom

nichtrelativist.

Zusätzliche Korrekturen zu  $H_0$

W entsteht durch Entwicklung des relativistischen  $H$   
in Dirac-Gleichung nach  $\frac{v}{c}$ -Potenzen

erhält Spin - Orbit - Term

$$H_{SO} = \alpha_{SO} \vec{\nabla} V (\vec{\sigma} \times \vec{p})$$

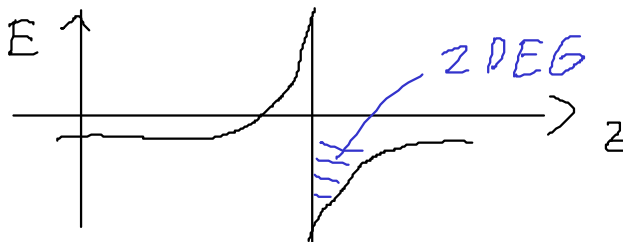
$$\vec{\nabla} V \propto \vec{r}$$

$$\Rightarrow H_{SO} \propto \vec{L} \cdot \vec{S}$$

Zentralpotential

### Übertragung auf Festkörper

Rashba - Term in Halbleiter - Nanostrukturen



$$V(z) \propto \tau \cdot z$$

$$H_{SO} \rightarrow H_R = \frac{\alpha_R}{A} (\sigma_x p_y - \sigma_y p_x)$$

Für  $\alpha_R \neq 0$  asymmetrisches Potential  $V(z) \propto \tau z$   
erforderlich

$\alpha_R$  lässt sich extern kontrollieren

$$H = H_0 + H_R$$

$$H = \begin{pmatrix} \frac{p_x^2 + p_y^2}{2m} & \frac{\alpha_R}{\hbar} (p_y + i p_x) \\ \frac{\alpha_R}{\hbar} (p_y - i p_x) & \frac{p_x^2 + p_y^2}{2m} \end{pmatrix}$$

$$\Psi(\vec{r}) = \begin{pmatrix} a_{\vec{k}} \\ b_{\vec{k}} \end{pmatrix} e^{i\vec{k}\vec{r}} = \begin{pmatrix} \psi_{\uparrow}(\vec{r}) \\ \psi_{\downarrow}(\vec{r}) \end{pmatrix}$$

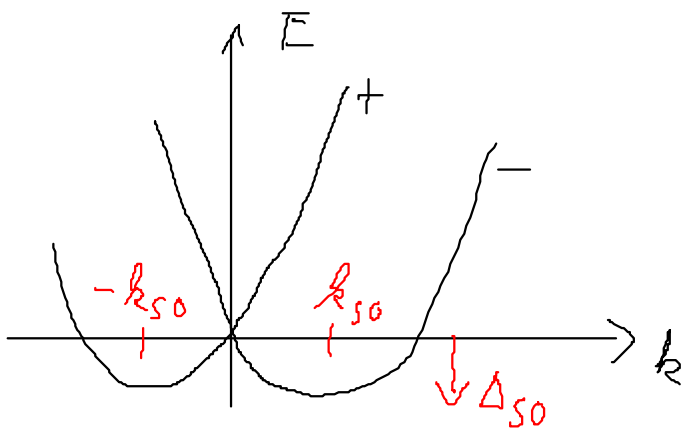
$$H\Psi = E\Psi$$

$$E_{\vec{k}, \pm} = \frac{\hbar^2}{2m} (k \pm k_{SO})^2 - \Delta_{SO}$$

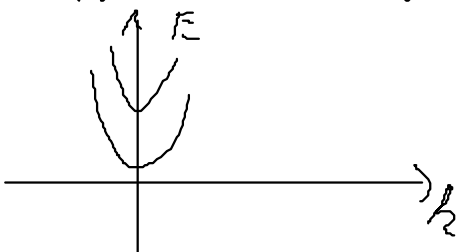
$$k_{SO} = \frac{m^* \alpha_R}{\hbar^2} \quad \Delta_{SO} = \frac{m \alpha_R^2}{2 \hbar^2}$$

$$\psi_{\vec{k}, \pm} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} i e^{-i\varphi} \\ \pm 1 \end{pmatrix} e^{i\vec{k}\vec{r}}$$

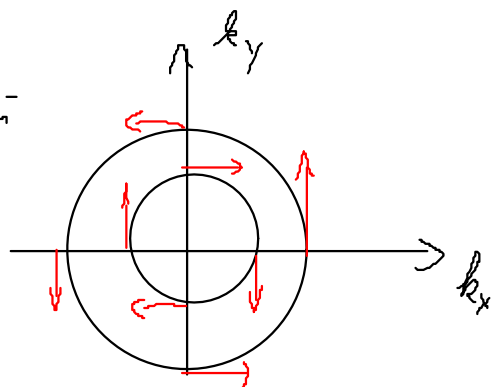
$$\tilde{\psi}_{\vec{k}, \pm} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} i e^{-i\varphi/2} \\ \pm e^{i\varphi/2} \end{pmatrix} = R_z(\varphi) \tilde{\psi}_{y, \mp}$$



$k$ -Abhängige Aufspaltung



Spin





⇒ Spin ⊥ Bewegungsrichtung im  
ZDEG

Anwendung



kontrolliert  $d_R$

⇒ Spin FET

Rotation

noch nicht realisiert