

Jullière 1975

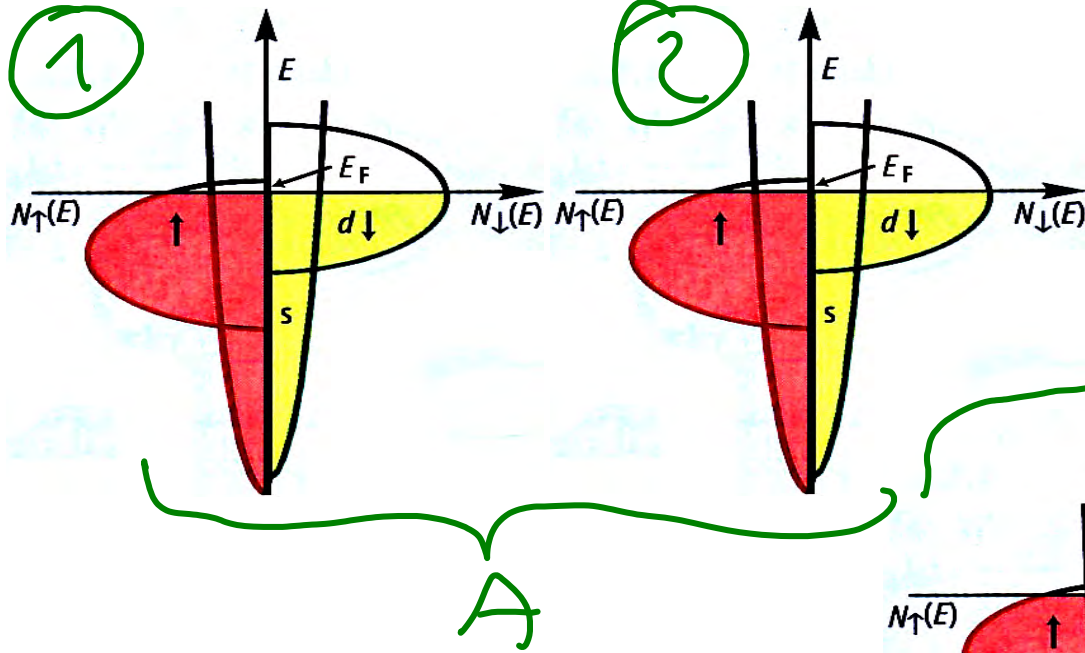
Tunneln zwischen 2 Ferromagneten über Barriere

Resultat: R hängt von Orientierung der Magnetisierungen ab.

$$TMR := \frac{R_{AP} - R_P}{R_P}$$

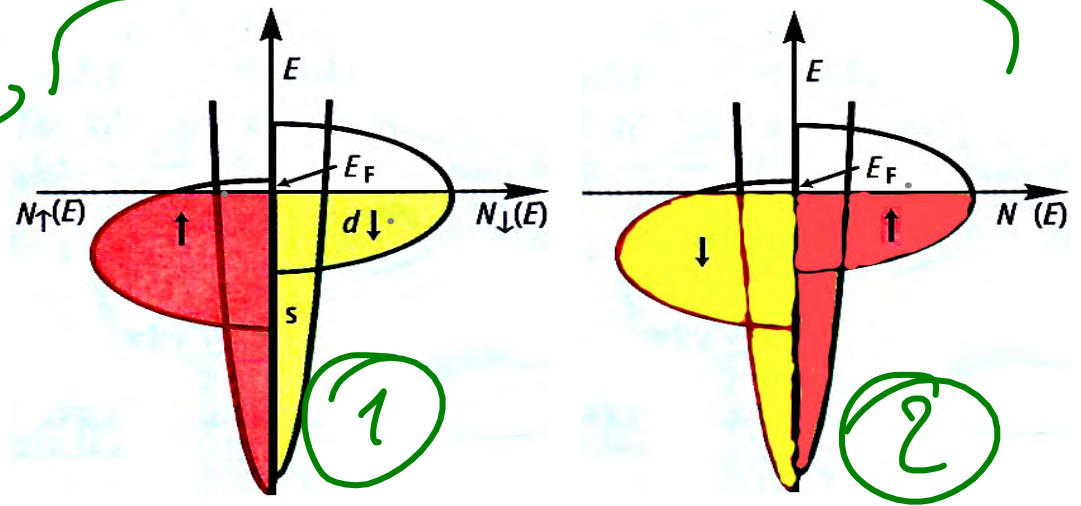
tunneling magneto resistance (ratio)

Jullièremodell



$$I \sim \rho_2^{\uparrow} \rho_2^{\uparrow} + \rho_1^{\downarrow} \rho_2^{\downarrow}$$

$\Rightarrow I(A) \gg I(B)$



wenig beachtet, weil Effekt klein
und schwer reproduzierbar

70er:

Kopplung über leitende Zwischenschichten

- Metalle: RKKY, oszillatorisch
- auch für HL wie Si

aber: wenig TMR

(vermutete Ursache: Defektzustände)

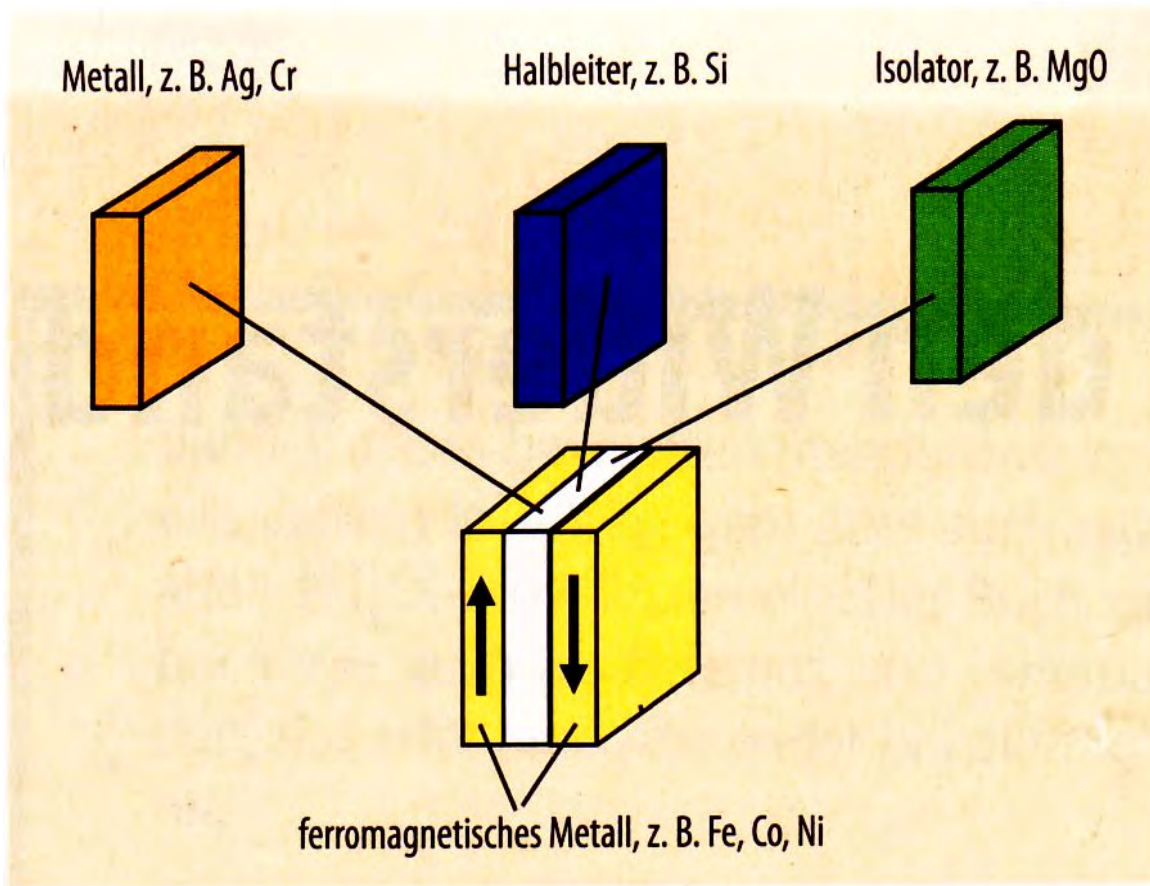
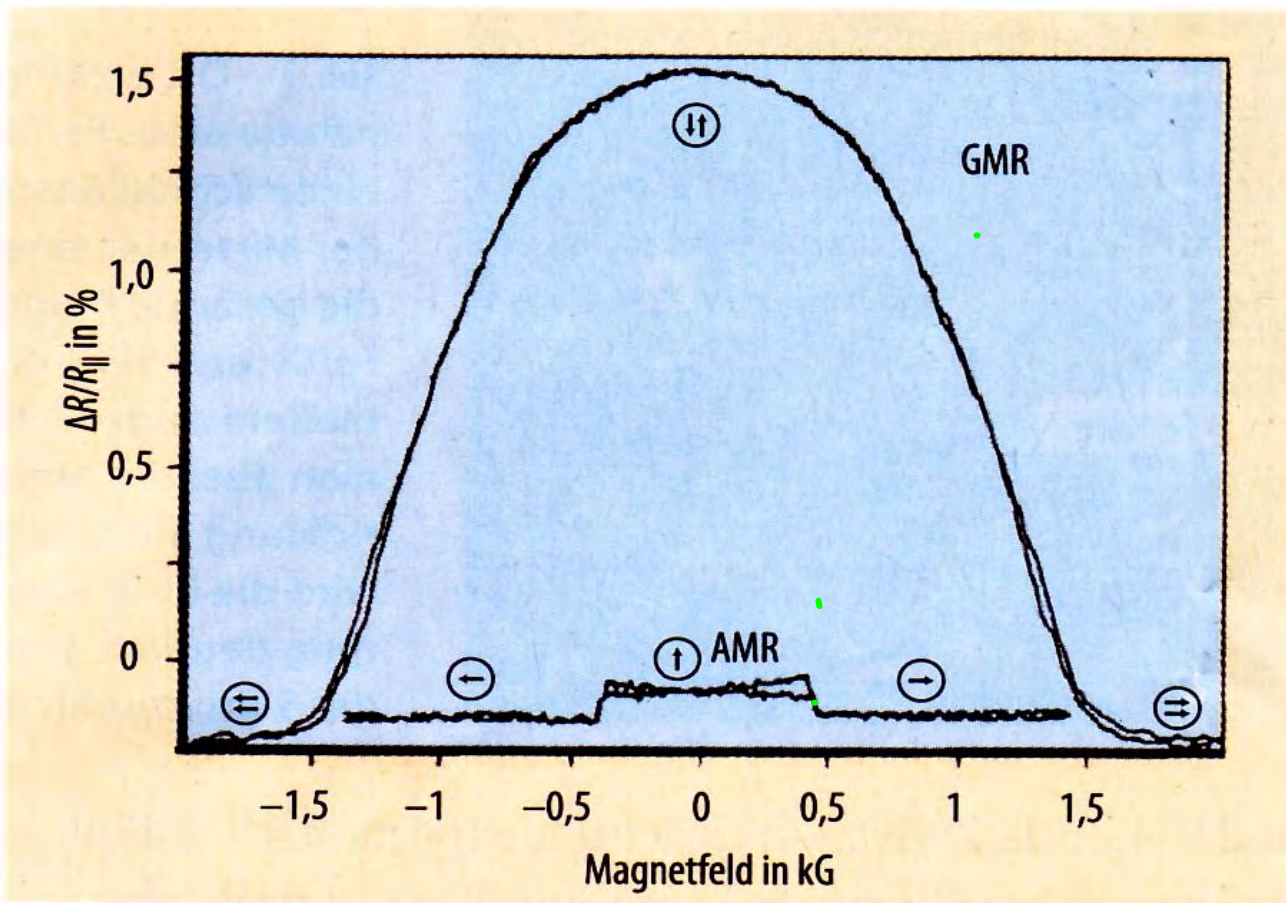


Abb. 1 Die hier betrachteten Strukturen bestehen aus mindestens zwei ferromagnetischen Schichten mit einer typischen Dicke von rund 10 nm, die durch eine nichtferromagnetische, etwa 1 nm dicke Zwischenschicht getrennt sind.



anisotropic
magneto
resistance

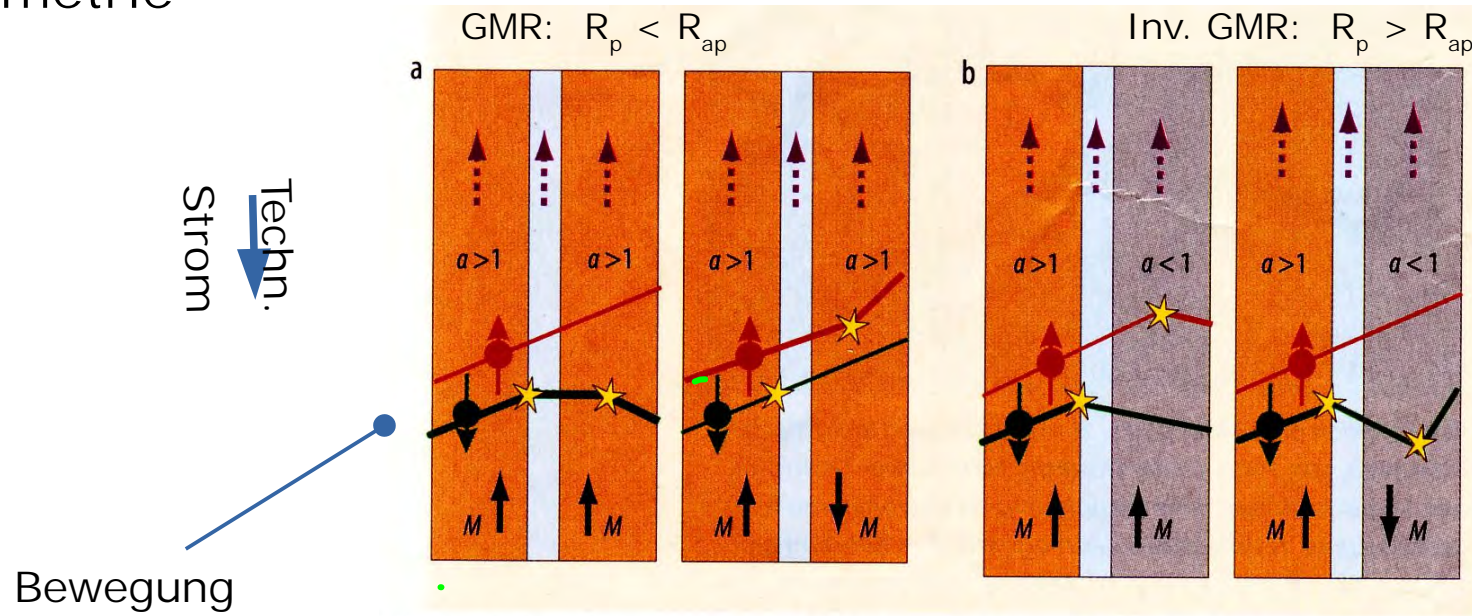
Abb. 4 Der GMR-Effekt im Dreilagensystem Fe/Cr/Fe (Schichtdicke des Eisens: 12 nm) ist im Vergleich zum AMR-Effekt eines 25 nm dicken Fe-Films deutlich ausgeprägter.

System	$\Delta R/R_p$ in %	t_{mag} in nm
Fe/Cr/Fe	1,5	12
Fe/Cr/Fe	2	5
[Fe/Cr(1,2 nm)]50	42	0,45
Co/Cu/Co	2,0	10
Co/Cu/Co	19	3
[Co/Cu(0,9 nm)]30	48	1,5
Co90Fe10/Cu/Co90Fe10	6	0,8
Co/Cu/Co	16	2,8
[Co/Cu(0,9 nm)]16	65	1

$$\alpha = \rho_{\downarrow} / \rho_{\uparrow}$$

Idee: Nur e- mit "falschem" Spin werden gestreut

Streuasymmetrie



Bewegung
eines Elektrons

Abb. 5 In dem hier gezeigten idealisier-
ten Modell werden je nach magne-
tischem Material und Grenzfläche nur
Elektronen mit Spin down ($a > 1$) oder
Spin up ($a < 1$) gestreut (Streu-
prozesse sind durch Sterne markiert). Ist a in
beiden Schichten kleiner bzw. größer als 1,
führt dies zum normalen GMR-Effekt (a).
Die Kombination von $a > 1$ und $a < 1$

führt zum inversen GMR-Effekt (b), bei
dem $R_p > R_{ap}$ ist. Spinabhängige Grenz-
flächenreflektivität ist nicht dargestellt,
da sie wegen der Translationssymmetrie
in der Schichtebene den Elektronen-
impuls in Stromrichtung nicht verändert.
Für Ströme senkrecht zur Schichtebene
trägt neben der Streuung auch die Refle-
xion zum GMR-Effekt bei.

Mittlerweile lassen sich bessere
Tunnelbarrieren herstellen.

insbesondere: MgO

zeigt viel TMR

⇒ jetzt TMR-Sensoren

Jullières
System

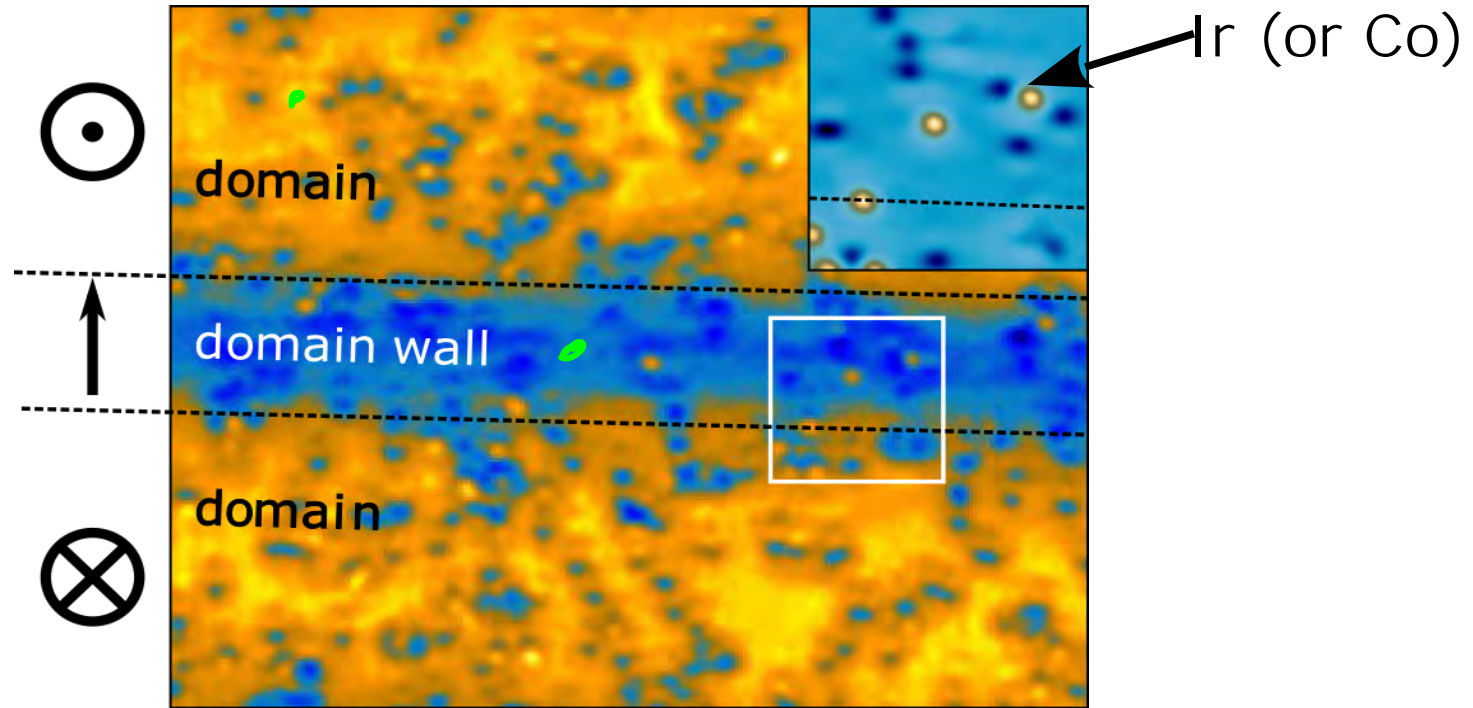
Struktur	$U - E_F$ in eV	$\Delta R/R_p$ in %
Co/Ge(10 nm)/Co		16 (4,2 K)
CoFe/ZnS/CoFe	0,580	5 (270 K)
	0,565	10 (6 K)
Fe/GaAs/Fe		1,55 (300 K)
CoFeB/Al ₂ O ₃ /CoFeB		70 (300 K)
CoFeB/MgO/CoFeB		472 (300 K)
		804 (5 K)
CoFe/MgO/CoFe	1,1 ... 1,7	220 (300 K)
		300 (4,2 K)
Fe/MgO/Fe	0,37... 0,40	180 (300 K)
Fe/Si/Fe	0,3 ... 0,8	≈ 0

Tab. 1 Der TMR bei verschiedenen Materialkombinationen [7]. In Klammern steht die Temperatur, bei der der TMR gemessen wurde. Die Barrierenhöhe $U - E_F$, die dem Abstand der unteren Kante des Leitungsbandes U vom Fermi-Niveau E_F entspricht, ist ein Maß für die isolierenden Eigenschaften der Zwischenschicht.

Ir (& Co) on Fe bilayer on W(110)

Tunneling Anisotropic MR of Co: Néel et al., PRL 110, 037202 (2013)

Here: heavy Ir, contact, W tip, no magnetostriction



dI/dV map at 70 mV, 52 x 42 nm²

$$\text{AMR} = (G_{\text{domain}} - G_{\text{wall}}) / G_{\text{domain}}$$

Interface-induced phenomena in magnetism

Rev. Mod. Phys. 89, 025006 (2017)

Enthält auch sehr lesbare Zusammenfassung von 3d-Magnetismus

Relevante Energien:

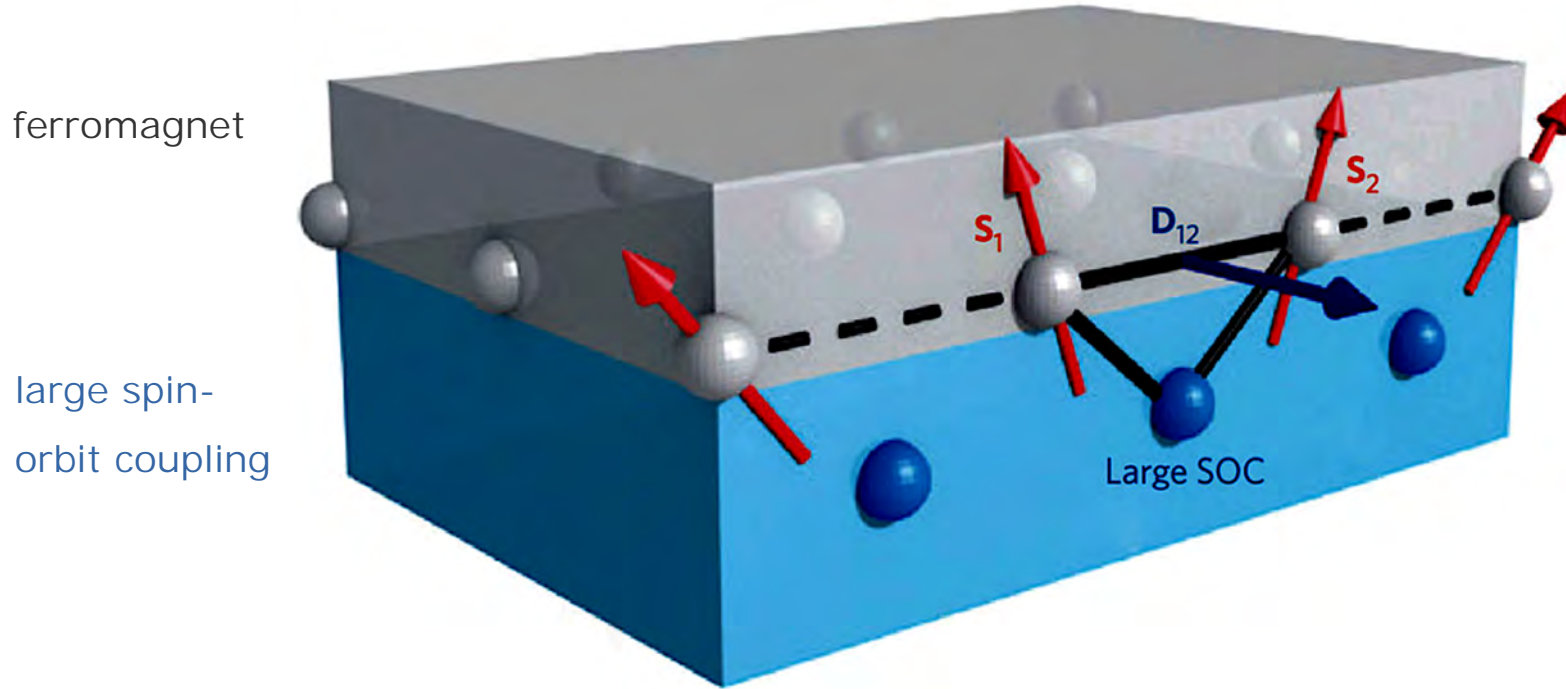
Austausch-WW (Pauli P. beeinflusst Coulomb-WW)

Kristallfeld-WW (lokales E beeinflusst Psi)

LS-Kopplung

Dipol-Dipol-WW

3-site mechanism generating an interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction



Spins S_1 & S_2 in the FM couple through wave function overlap with large SOC atom.

Result: energy term $D_{12} \cdot (S_1 \times S_2)$ with D_{12} lying in the interface plane & normal to the three-atom plane

Landau-Lifshitz-Gilbert-Gleichung

$$\begin{aligned} d\mathbf{M}/dt &= -\gamma_0 \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} + \frac{\alpha}{M_s} \mathbf{M} \times d\mathbf{M}/dt \\ &= -\gamma'_0 \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} - \frac{\alpha\gamma'_0}{M_s} \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}) \end{aligned}$$

$\gamma_0 = \mu_0 \gamma$, γ is the gyromagnetic ratio $g\mu_B/\hbar$

α is the Gilbert damping parameter

$H_{\text{eff}} = -(1/\mu_0) \nabla_{\mathbf{M}} E(\mathbf{M})$ effective field (has contributions from all terms that contribute to the energy density of the magnetization $E(\mathbf{M})$, including interaction with an applied field, interatomic exchange, magnetostatic dipole-dipole interaction, magnetocrystalline anisotropy, and Dzyaloshinskii-Moriya interaction)

1st part of Eq. is written with the damping in the Gilbert form (2004), 2nd is in the original Landau-Lifshitz form (1935). They are equivalent with the substitution $\gamma'_0 = \gamma_0 / (1 + \alpha^2)$.