

GMR

Gigantischer Magnetwiderstand

Oberseminar am II. Physikalischen
Institut der Universität zu Köln

Vorgetragen am 21.1.2008 von Jan Kai Hutzenlaub

Überblick

Inhalt:

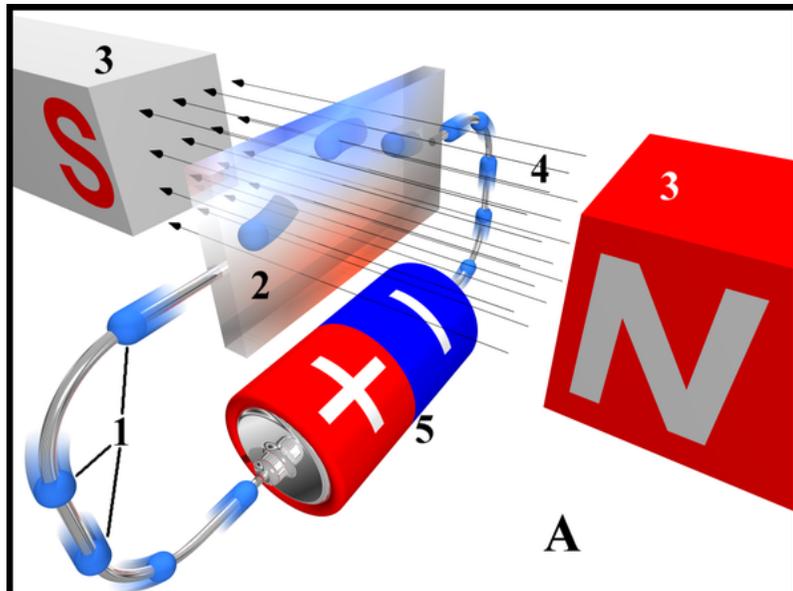
- Einstieg:
 - PMR (Positive Magnetoresistance)
- Leitungsmechanismen in 3d Übergangsmetallen
- Magnetwiderstandseffekte:
 - NMR (Negative Magnetoresistance)
 - AMR (Anisotropic Magnetoresistance)
 - GMR (Giant Magnetoresistance)
- Fazit

Was macht einen Magnetwiderstand aus?

...Als **magnetoresistiven Effekt** bezeichnet man Änderungen im Widerstandsverhalten von Proben durch Anlegen eines äußeren Magnetfeldes...

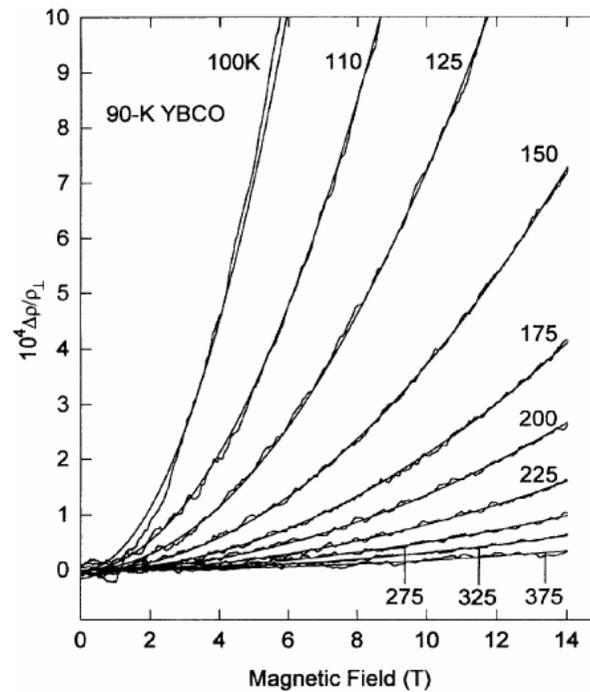
$$\rho (T, p) \rightarrow \rho (T, p, H)$$

Positiver Magnetwiderstand



Wikipedia: Hall-Effekt

- Magnetfeld zwingt Ladungsträger auf Kreisbahnen
- verkürzte effektive freie Weglänge
- erhöhter Widerstand



Leitung und Widerstand in 3d Übergangsmetallen

Gruppe	Hauptgruppen-Elemente		Nebengruppen-Elemente (d-Elemente)										Hauptgruppen-Elemente					Edelgase
	IA 1	IIA 2	IIIB 3	IVB 4	VB 5	VIB 6	VII B 7	VIII B 8 9 10		IB 11	IIB 12	IIIA 13	IVA 14	VA 15	VIA 16	VIIA 17	VIIIA 18	
1	H 1.0079																2 He 4.0026	
3	Li 6.941	4 Be 9.0122										5 B 10.81	6 C 12.01115	7 N 14.0067	8 O 15.9994	9 F 18.9984	10 Ne 20.179	
11	Na 22.9898	12 Mg 24.305										13 Al 26.9815	14 Si 28.086	15 P 30.9738	16 S 32.08	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948	
19	K 39.09	20 Ca 40.08	21 Sc 44.956	22 Ti 47.90	23 V 50.941	24 Cr 51.996	25 Mn 54.9380	26 Fe 55.847	27 Co 58.9332	28 Ni 58.71	29 Cu 63.546	30 Zn 65.37	31 Ga 69.72	32 Ge 75.59	33 As 74.9216	34 Se 78.96	35 Br 79.909	36 Kr 83.80
37	Rb 85.467	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.22	41 Nb 92.9064	42 Mo 95.94	43 Tc 98.906	44 Ru 101.07	45 Rh 102.905	46 Pd 106.4	47 Ag 107.868	48 Cd 112.40	49 In 114.82	50 Sn 118.69	51 Sb 121.75	52 Te 127.60	53 I 126.904	54 Xe 131.30
55	Cs 132.905	56 Ba 137.33	57 La 138.905	72 Hf 178.49	73 Ta 180.947	74 W 183.85	75 Re 186.2	76 Os 190.2	77 Ir 192.2	78 Pt 195.09	79 Au 196.967	80 Hg 200.59	81 Tl 204.37	82 Pb 207.2	83 Bi 208.980	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)
87	Fr (223)	88 Ra 226.025	89 Ac (227)	104 Rf 261.109	105 Db 262.114	106 Sg 263.118	107 Bh 262.123	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Uuu	112 Uub	113	114 Uuq	115	116	117	118

3d-Übergangsmetalle

f-Elemente (Seltene Erden)

Lanthaniden	58 Ce 140.12	59 Pr 140.907	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.4	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.925	66 Dy 162.50	67 Ho 164.930	68 Er 167.26	69 Tm 168.934	70 Yb 173.04	71 Lu 174.97
Actiniden	90 Th 232.038	91 Pa 231.036	92 U 238.029	93 Np 237.05	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (254)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (260)

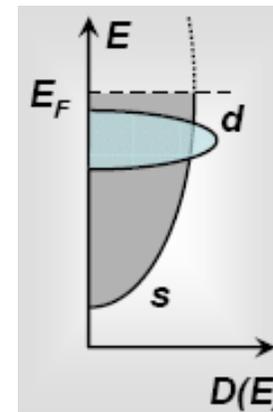
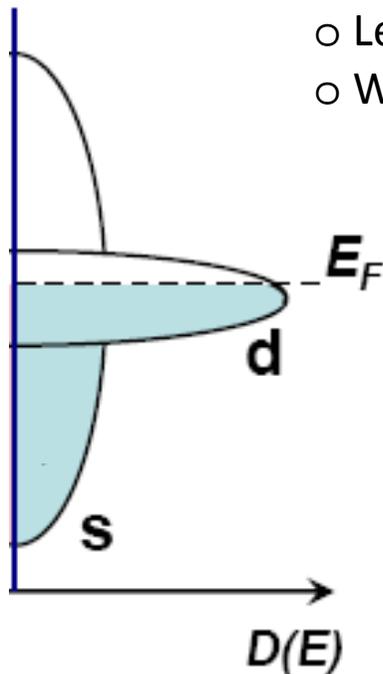
Die jeweils aktuellen Namen sowie weitere Daten zu den Elementen findet man unter www.webelements.com

- Metalle
- Metalloide
- Nichtmetalle

Leitung und Widerstand in 3d Übergangsmetallen

NM 3d-Metall

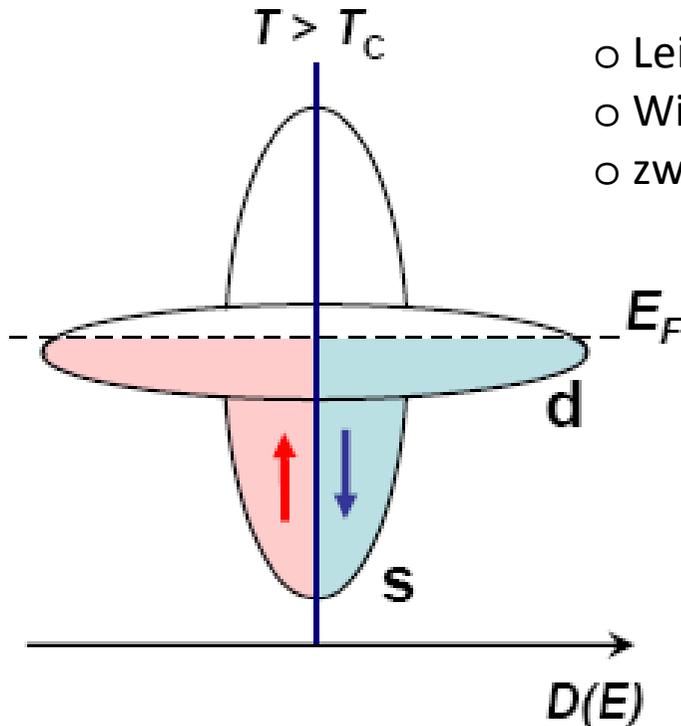
- Leitung überwiegend durch s-Elektronen
- Widerstand durch Streuung in unbesetzte d-Zustände



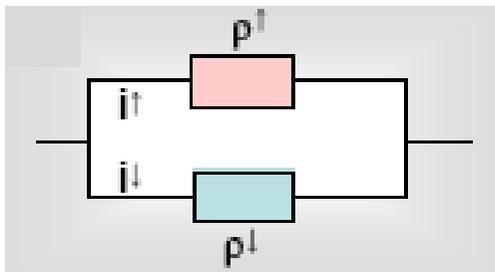
Zum Vergleich:
Cu 3d¹⁰
→ volles d-Orbital
→ keine Streuung
→ geringerer Widerstand

V: 25.6 $\mu\Omega\text{cm}$
Zr: 41.8 $\mu\Omega\text{cm}$ > Cu: 1.98 $\mu\Omega\text{cm}$

Leitung und Widerstand in 3d Übergangsmetallen

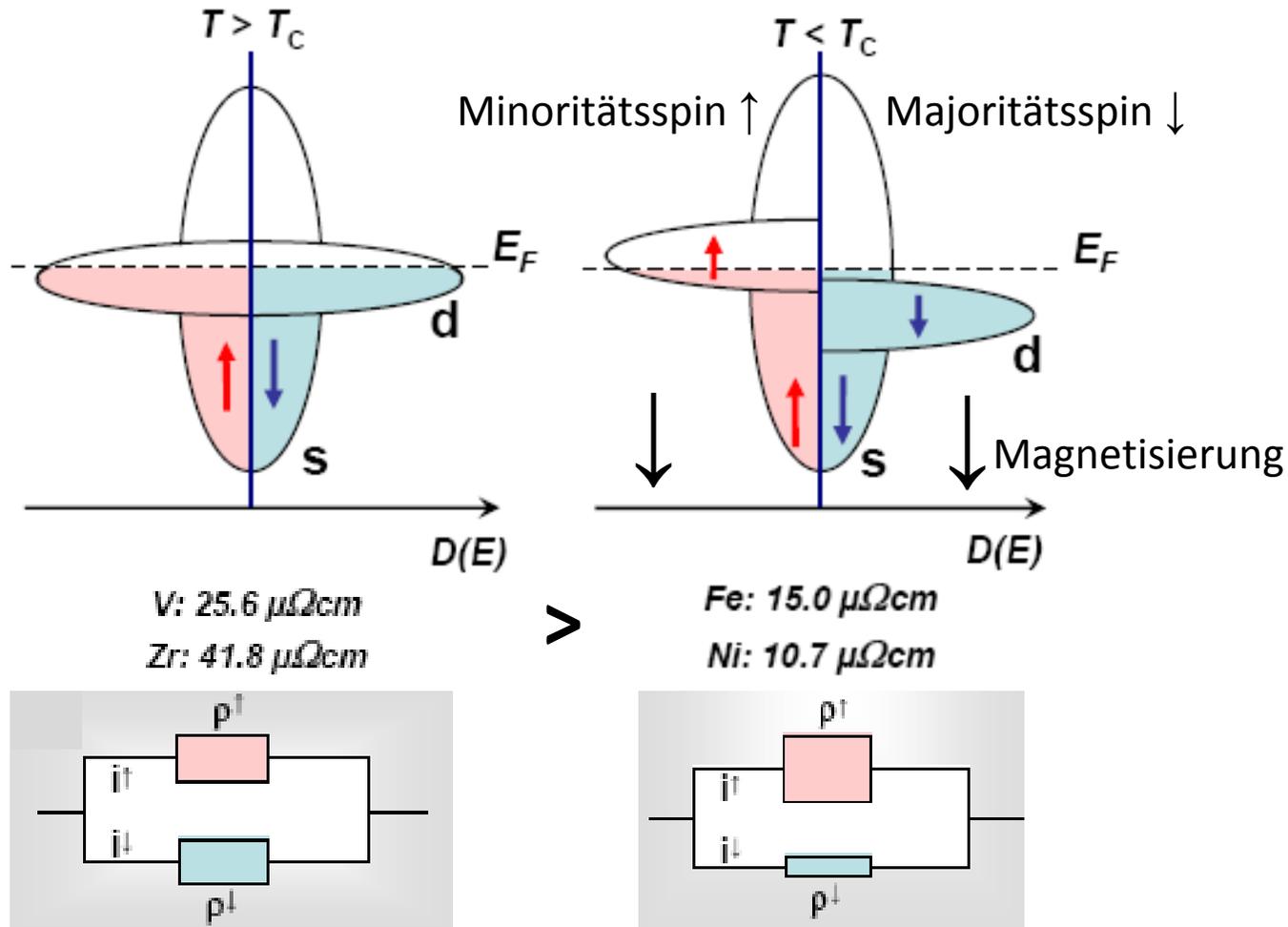


- Leitung überwiegend durch s-Elektronen
- Widerstand durch Streuung in unbesetzte d-Zustände
- zwei Sorten Ladungsträger (Mott'sches Zweistrommodell)



- Parallele Leitungskanäle

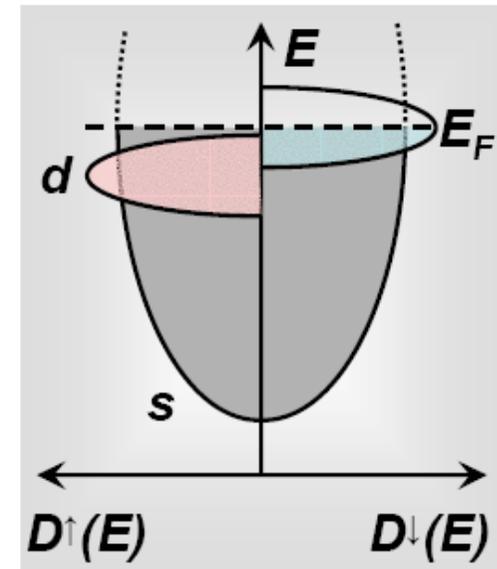
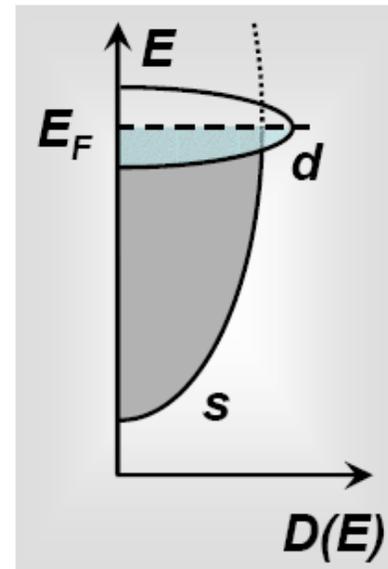
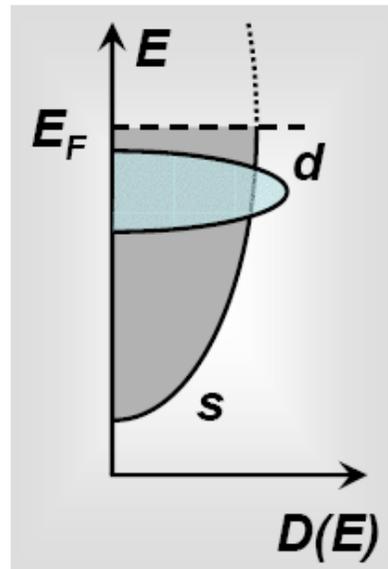
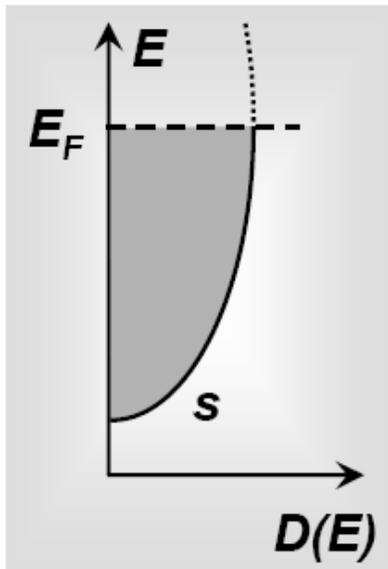
Leitung und Widerstand in 3d Übergangsmetallen



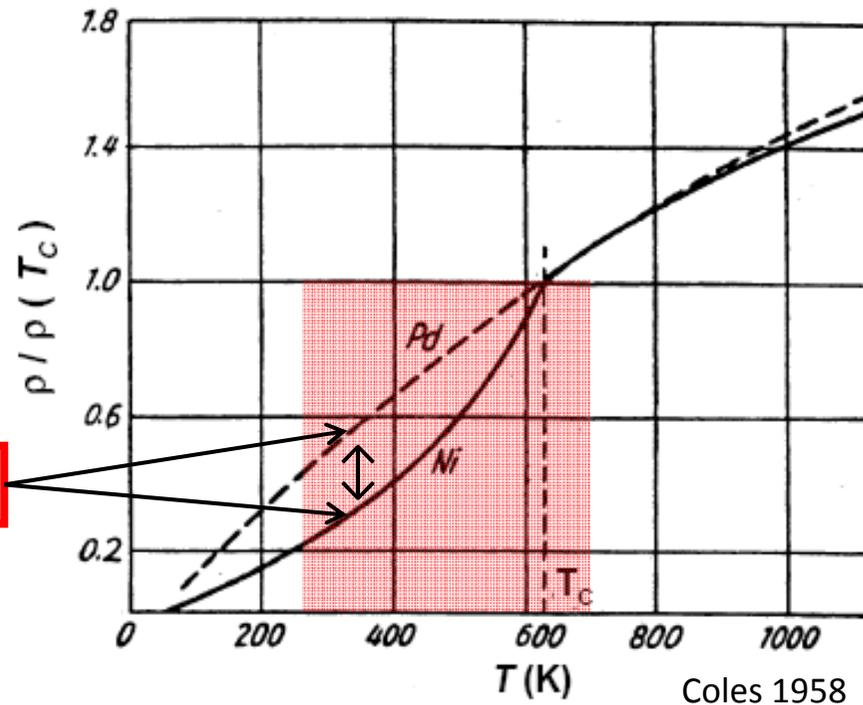
- Verschiebung der Besetzungsniveaus
- unterschiedliche Widerstände für die Ladungsträgersorten

Vergleich: Spezifische Widerstände von Metallen

<i>Alkalimetalle</i>	<i>Edelmetalle</i>	<i>nicht-magnetische Übergangsmetalle</i>	<i>magnetische Übergangsmetalle</i>
<i>Na: 2.54 $\mu\Omega\text{cm}$</i> <i>Cs: 2.58 $\mu\Omega\text{cm}$</i>	<i>Cu: 1.98 $\mu\Omega\text{cm}$</i> <i>Ag: 1.23 $\mu\Omega\text{cm}$</i>	<i>V: 25.6 $\mu\Omega\text{cm}$</i> <i>Zr: 41.8 $\mu\Omega\text{cm}$</i>	<i>Fe: 15.0 $\mu\Omega\text{cm}$</i> <i>Ni: 10.7 $\mu\Omega\text{cm}$</i>



(Kein) Negativer Magnetwiderstand



Hier findet sich der NMR!

Vorsicht:

Im Bild: $\rho = \rho(T)$ \leftrightarrow

Magnetwiderstandseffekt: $\rho = \rho(H)$

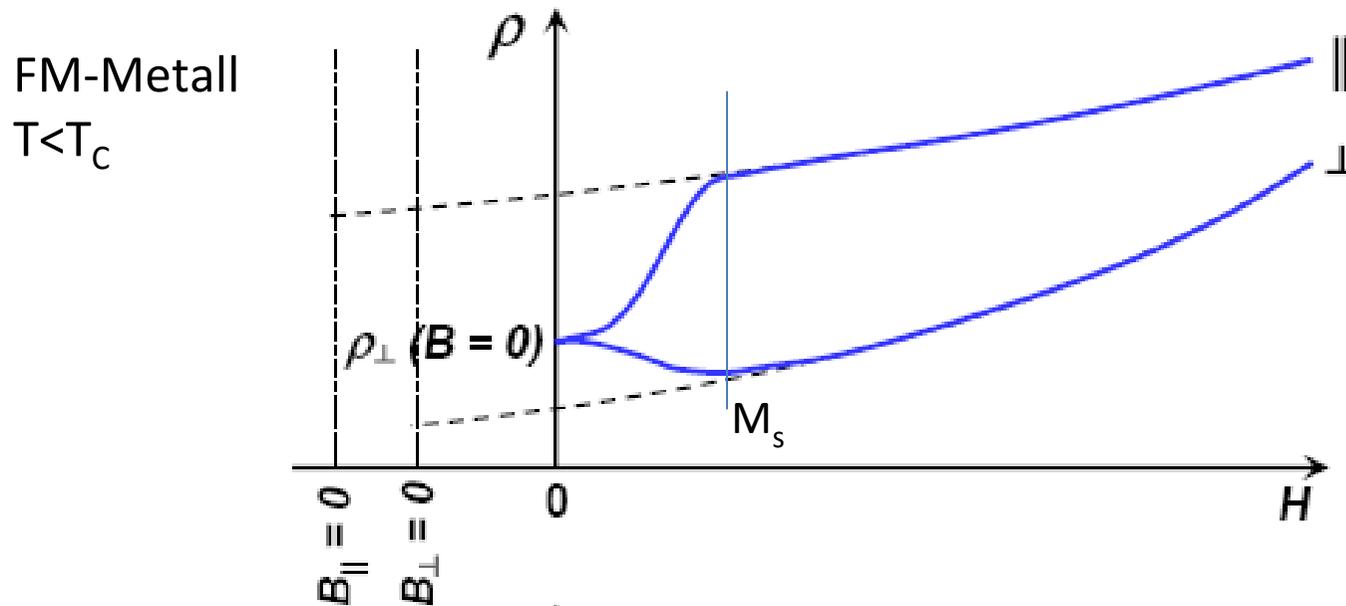
- Oberhalb T_c : identischer Verlauf
- Unterhalb T_c : geringerer spezifischer Widerstand des FM-Metalls

Zwischenstand

Inhalt:

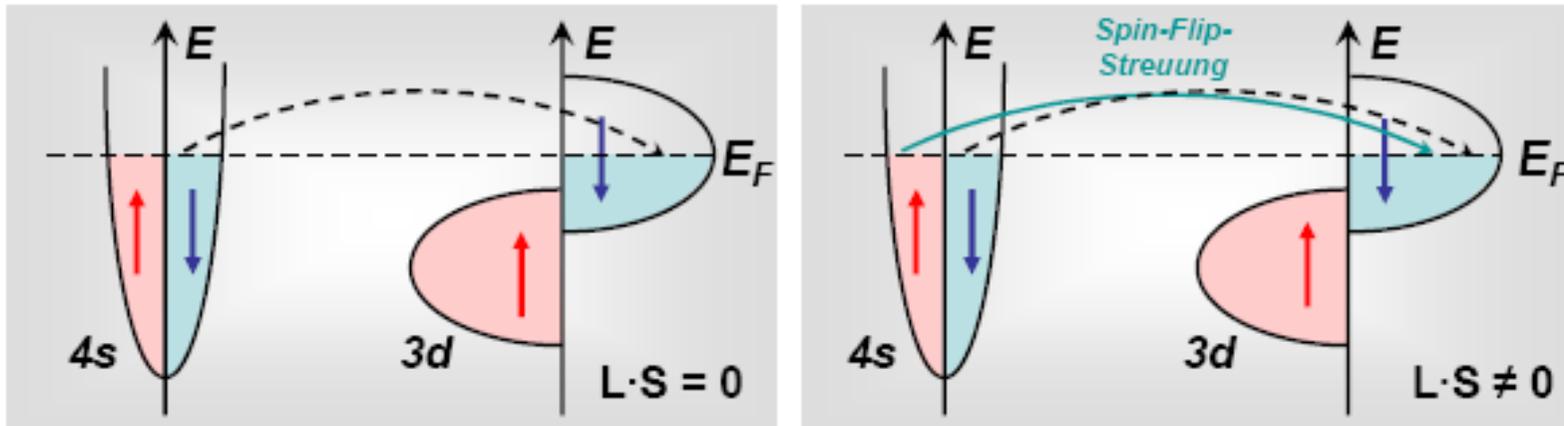
- ✓ Einstieg:
 - ✓ PMR (Positive MagnetoResistance)
- ✓ Leitungsmechanismen in 3d Übergangsmetallen
- ✓ Magnetwiderstandseffekte:
 - ✓ NMR (Negative MagnetoResistance)
 - AMR (Anisotropic MagnetoResistance)
 - GMR (Giant MagnetoResistance)
- Fazit

AMR – Anisotropic Magnetoresistance



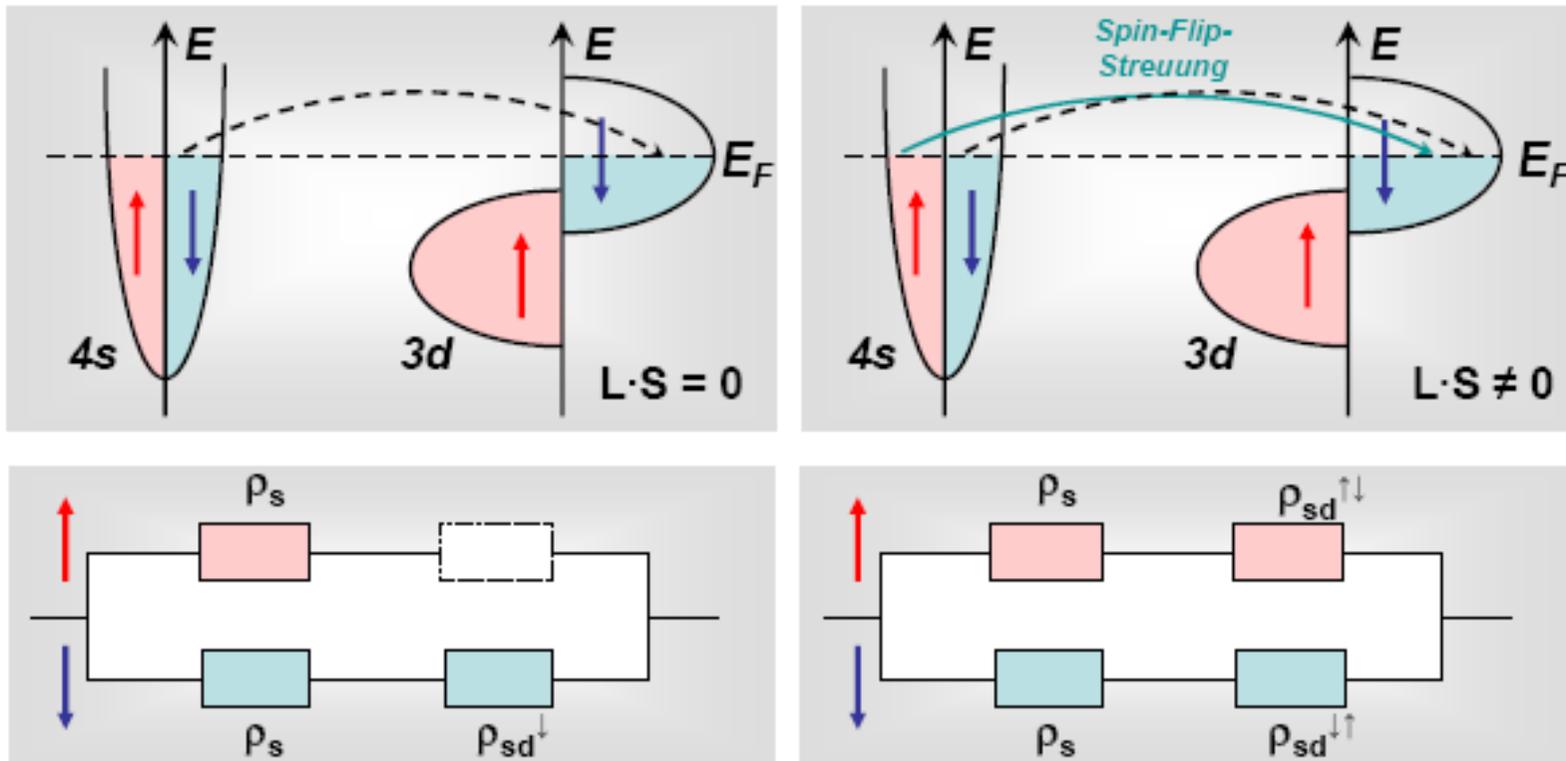
- Symmetriebrechung durch Magnetisierung → Anisotropie
- Erhöhung des Widerstandes parallel zur Magnetisierung
- Absinken des Widerstandes senkrecht zur Magnetisierung

AMR – Anisotropic Magnetoresistance



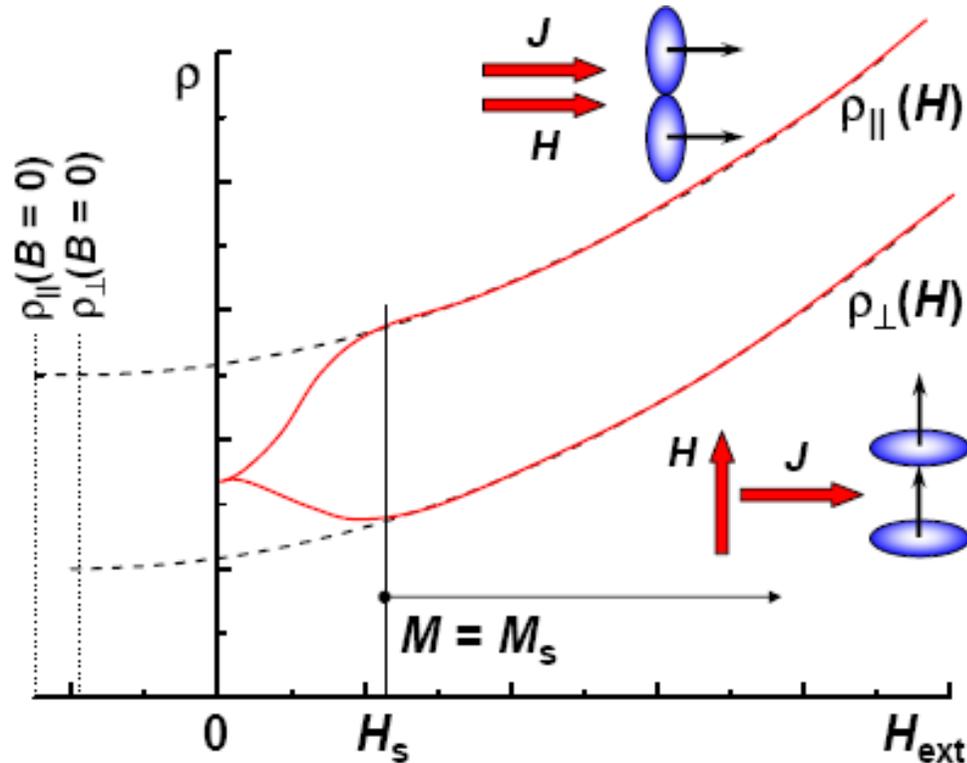
- Spin-Bahn-Kopplung:
 - orbitaler Beitrag zum Bahnmoment $\rightarrow L \neq 0$
 - QM: Störungstheorie
 - endliche Wahrscheinlichkeit von Spinflips
 - zusätzliche Möglichkeit der Streuung
 - erhöhter Widerstand

AMR – Anisotropic Magnetoresistance



Ersatzschaltbild: Zusätzlicher Widerstand durch Spin-Flip-Streuung

AMR – Anisotropic Magnetoresistance



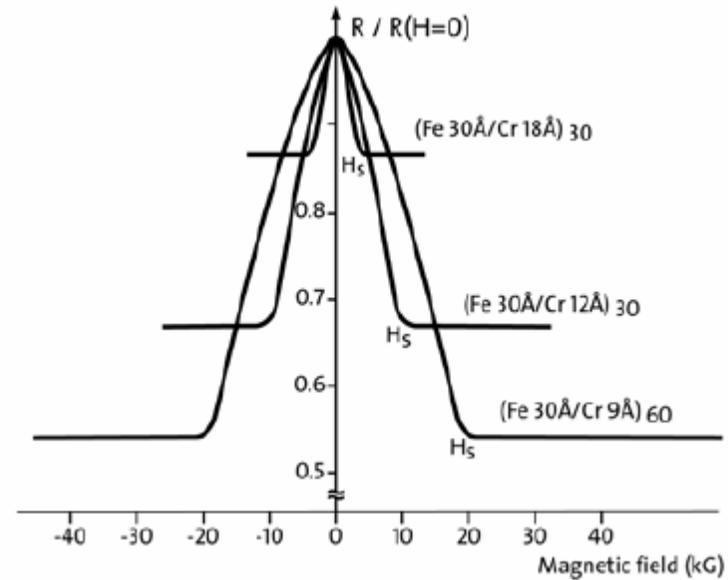
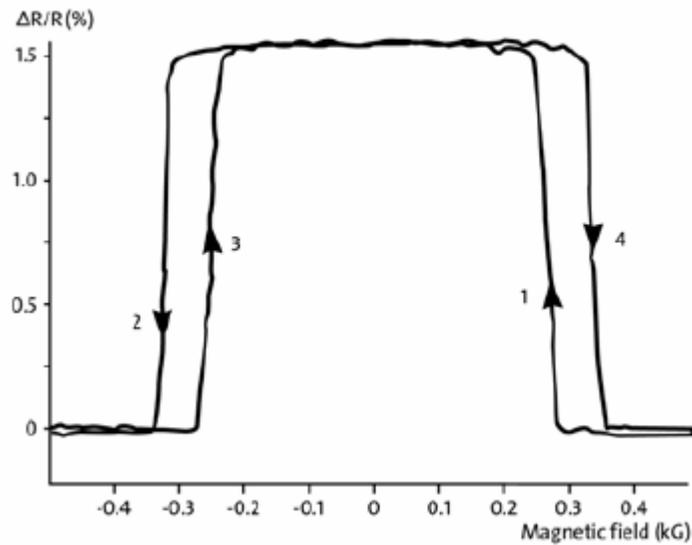
- Anisotropie durch Magnetisierung ($H_{\text{ext}} \rightarrow M \rightarrow$ Anisotropie)
- Ausrichtung „vergrößerter“ Streuquerschnitte parallel zur Magnetisierung
- vergrößerter Widerstand parallel zur Magnetisierungsrichtung

Zwischenstand

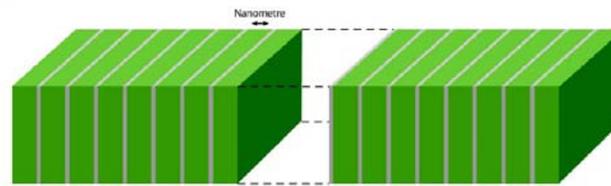
Inhalt:

- ✓ Einstieg:
 - ✓ PMR (Positive MagnetoResistance)
- ✓ Leitungsmechanismen in 3d Übergangsmetallen
- ✓ Magnetwiderstandseffekte:
 - ✓ NMR (Negative MagnetoResistance)
 - ✓ AMR (Anisotropic MagnetoResistance)
 - GMR (Giant MagnetoResistance)
 - GMR
 - Zwischenschichtkopplung
 - Spinventile/Anwendung
- Fazit

GMR – Giant Magnetoresistance



- 300 K
- Einfachschichtsystem



- 4,2 K
- Vielschichtsystem

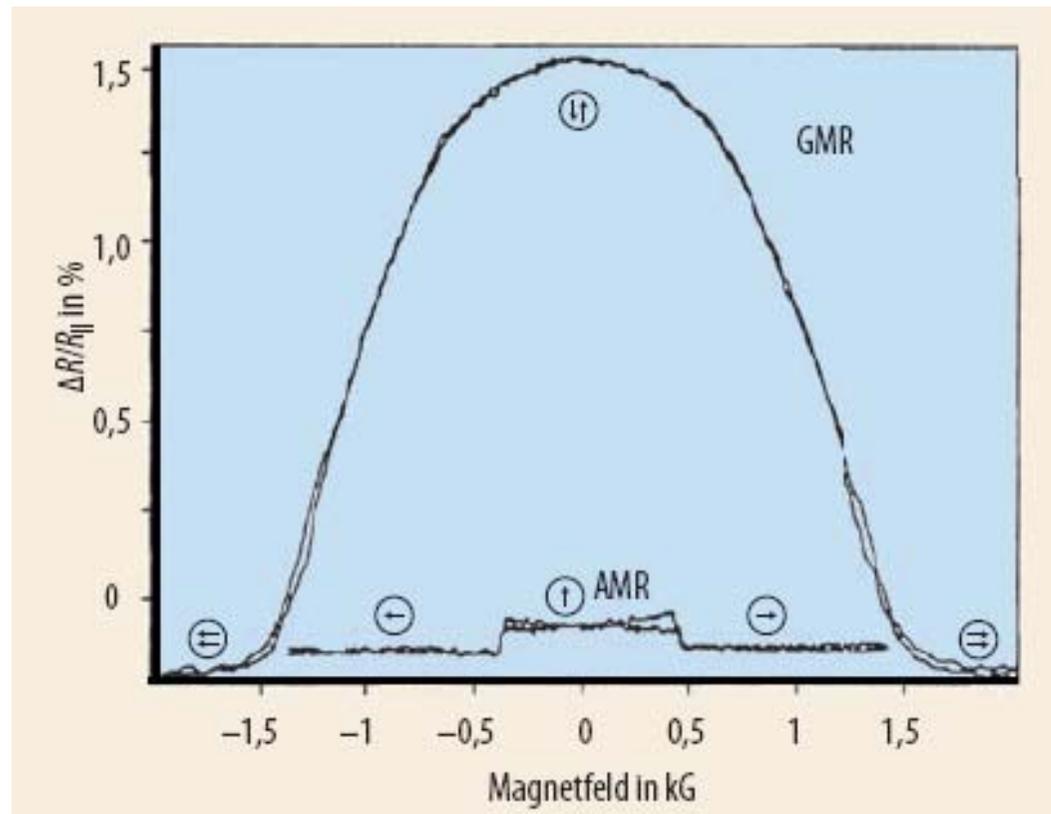


G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach, and W. Zinn, "Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange", *Phys. Rev. B* **39**, 4828 (1989).

M.N. Baibich, J.M. Broto, A. Fert, F. Nguyen van Dau, F. Petroff, P. Eitenne, G. Creuzet, A. Friederich, and J. Chazelas, "Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices", *Phys. Rev. Lett.* **61**, 2472 (1988).

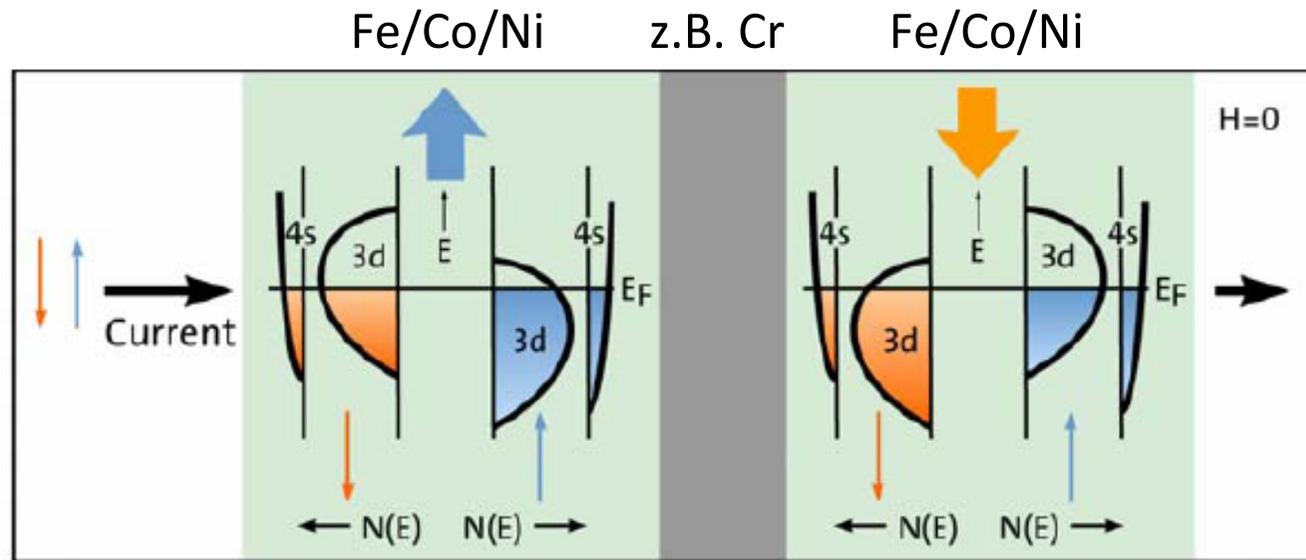
GMR – **Giant** Magnetoresistance

Definition: $GMR = (R_{ap} - R_p) / R_p = \Delta R / R_p$



$$GMR = (R_{ap} - R_p) / R_p = \Delta R / R_p > (R_{ap} - R_p) / R_{ap} > (R_{ap} - R_p) / (R_{ap} + R_p)$$

GMR – Giant Magnetoresistance



ALT:

- FM-Metall
 - Zweistrommodell
 - Spinabhängige Streuung

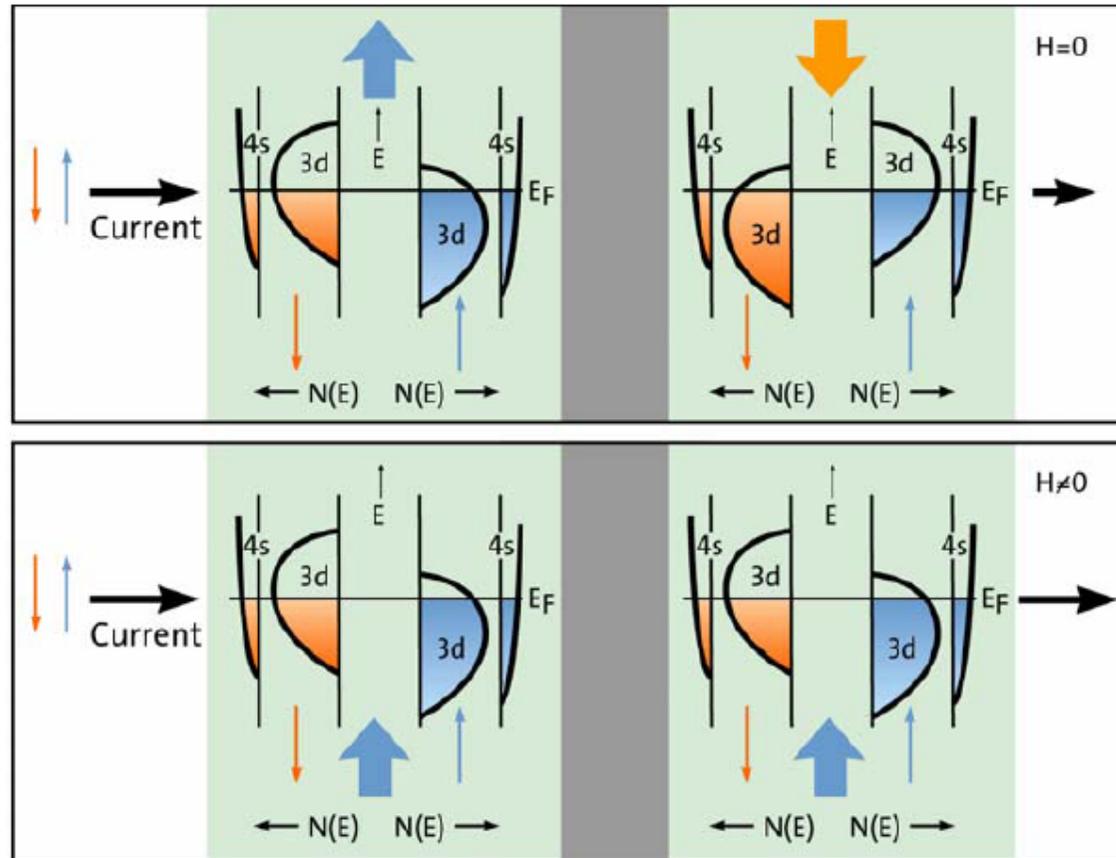


NEU:

- Zwischenschicht
 - leitend (metallisch)
 - nichtmagnetisch
 - dünn (typisch: einige Å)

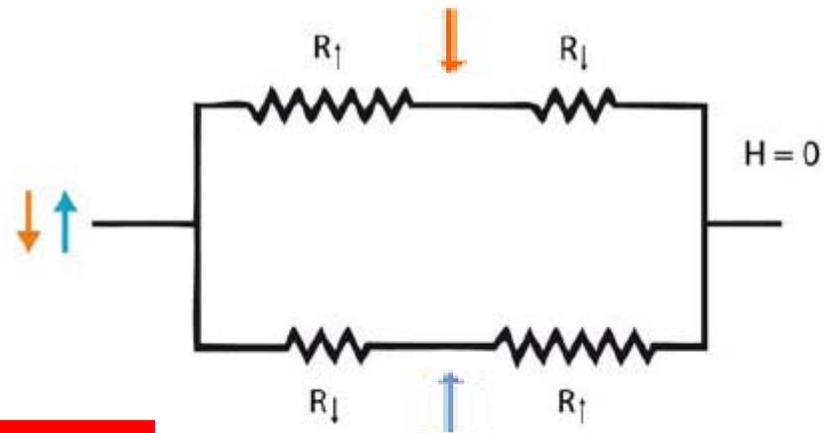
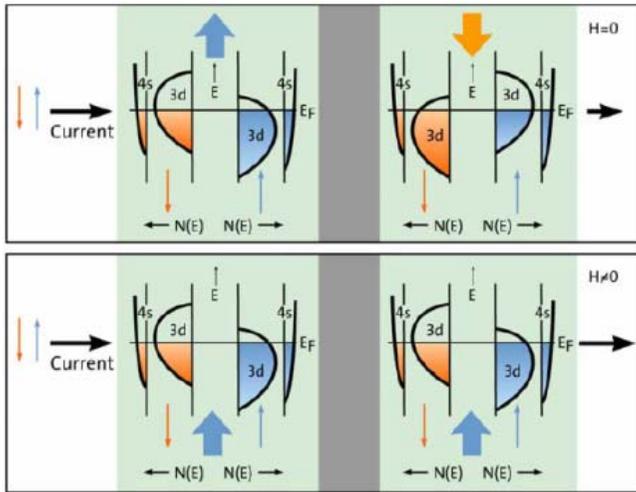
GMR – Giant Magnetoresistance

Antiparallele Magnetisierung der FM-Schichten



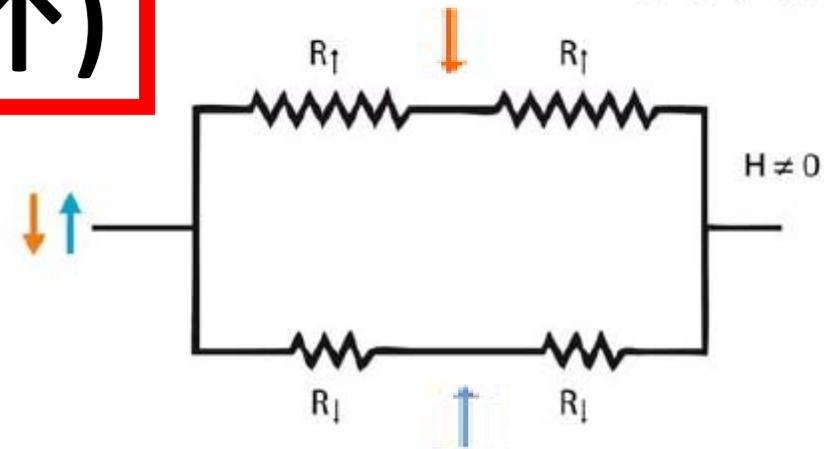
Parallele Magnetisierung der FM-Schichten

GMR – Giant Magnetoresistance



$$\Delta R = -(1/2)(R_{\uparrow} - R_{\downarrow})^2 / (R_{\uparrow} + R_{\downarrow})$$

$$R(\uparrow \downarrow) > R(\uparrow \uparrow)$$



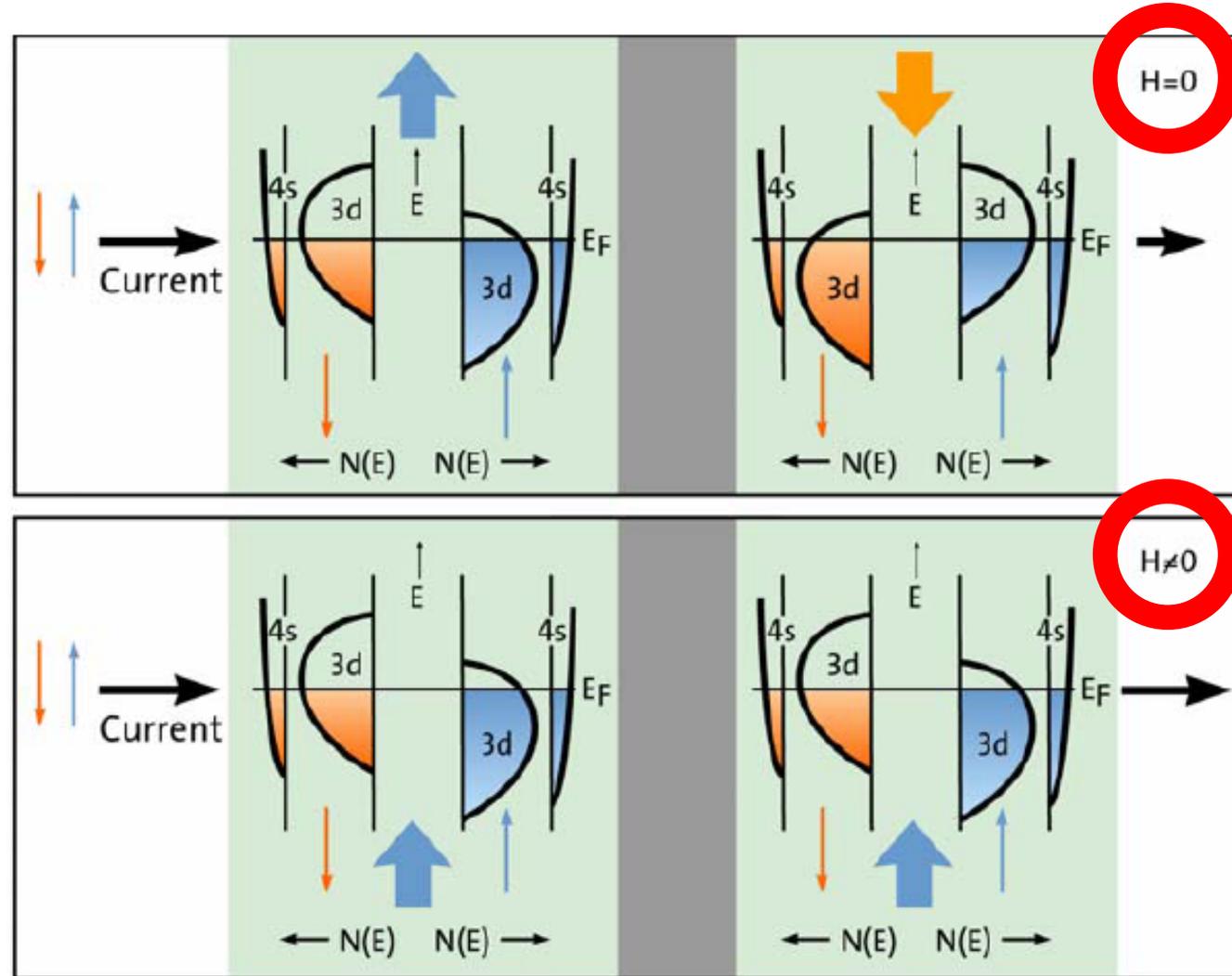
Zwischenstand

Inhalt:

- ✓ Leitungsmechanismen in 3d Übergangsmetallen
- Magnetwiderstandseffekte:
 - ✓ NMR (Negative MagnetoResistance)
 - ✓ AMR (Anisotropic MagnetoResistance)
 - GMR (**G**iant **M**agneto**R**esistance)
 - ✓ GMR
 - Zwischenschichtkopplung
 - Spinventile/Anwendung
- Fazit

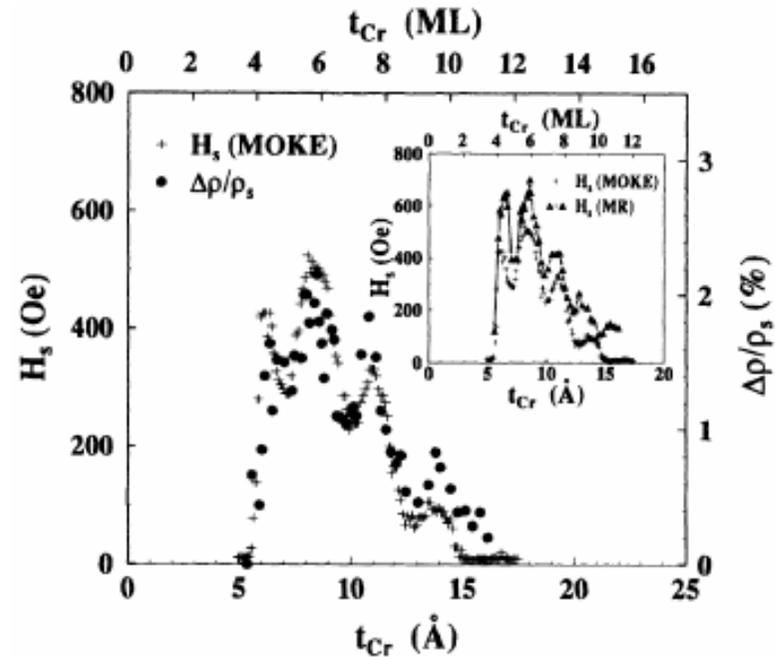
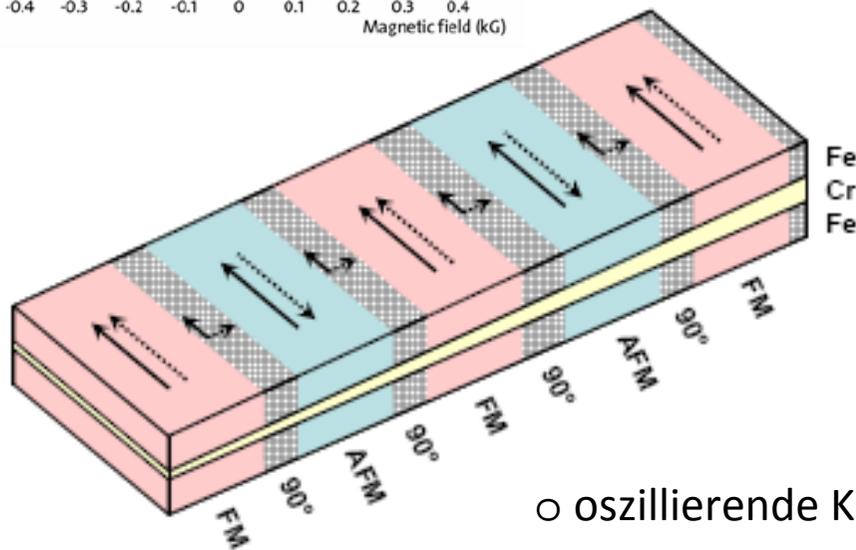
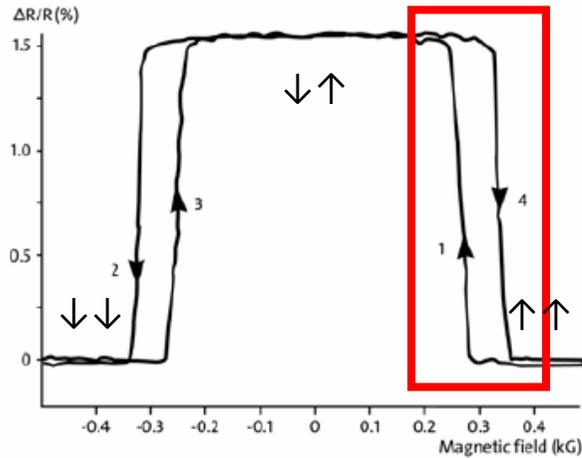
GMR – Giant Magnetoresistance

Zwischenschichtkopplung



GMR – Giant Magnetoresistance

Zwischenschichtkopplung



C. D. Potter et al., Phys. Rev. B 49, 16055 (1994)

- o oszillierende Kopplung der magnetischen Schichten
- o Abhängigkeit von der Schichtdicke der Zwischenschicht

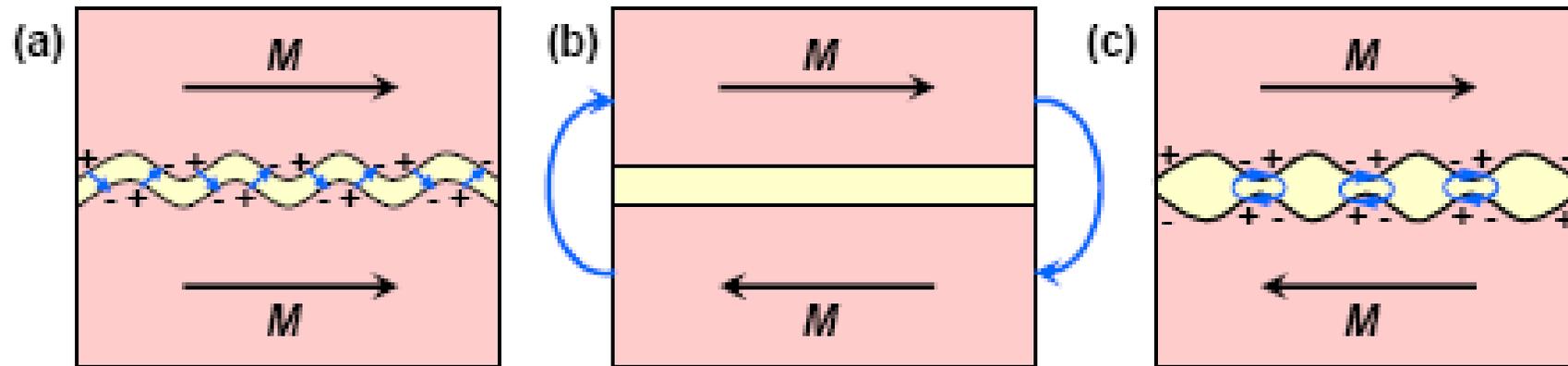
GMR – Giant Magnetoresistance

Zwischenschichtkopplung

- a) Orange-Peel-Kopplung
- b) Magnetostatische Kopplung
- c) Magnetische Dipolkopplung
- d) Pinhole-Kopplung
- e) Indirekte Austauschwechselwirkung
 - Quanteninterferenzen
 - RKKY Modell

GMR – Giant Magnetoresistance

Zwischenschichtkopplung



- a) Orange-Peel-Kopplung
- b) Magnetostatische Kopplung
- c) Magnetische Dipolkopplung
- d) Pinhole-Kopplung

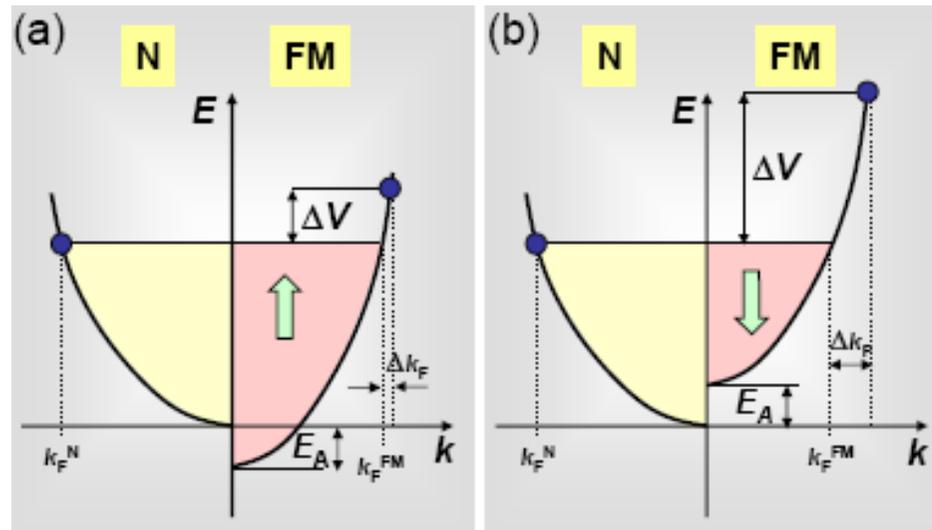
Extrinsische Kopplungsmechanismen!

- geometrische Effekte
- imperfekte Proben

GMR – Giant Magnetoresistance

Zwischenschichtkopplung

Quanteninterferenzen



Fehlanpassung des Fermi-Wellenvektors:

(a): Majoritätsband, geringe Fehlanpassung

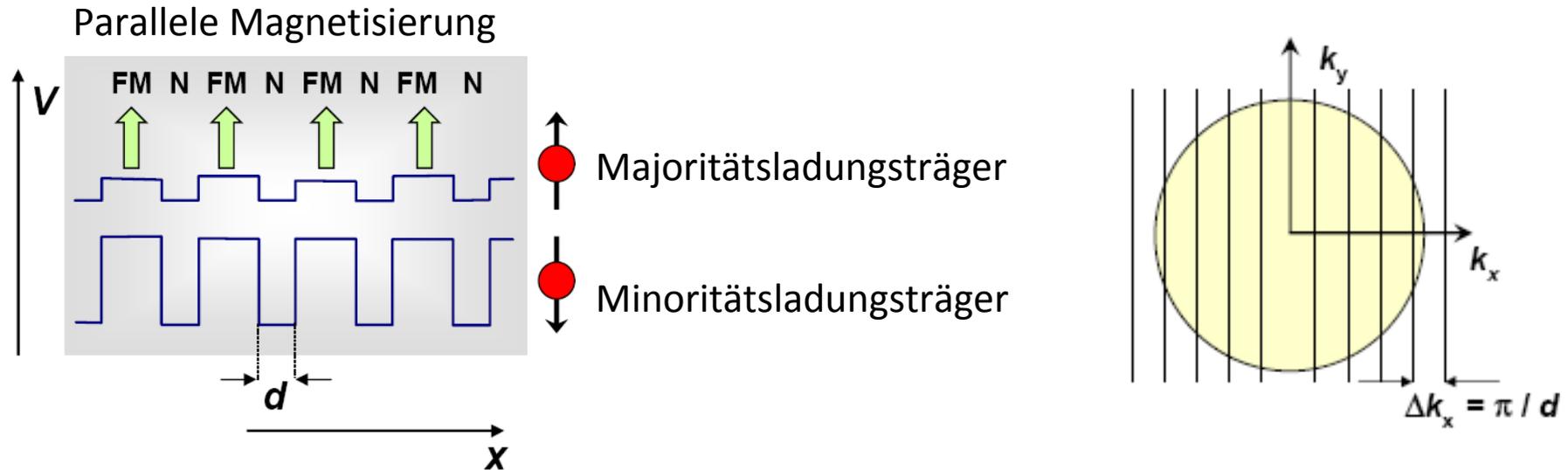
(b): Minoritätsband, stärkere Fehlanpassung

→ Teilreflexion der Ladungsträger an der Grenzfläche

GMR – Giant Magnetoresistance

Zwischenschichtkopplung

Quanteninterferenzen



- Stehende Wellen mit in x-Richtung quantisierten Wellenvektoren $k_x = n_x \pi / d$
- Energie eines \downarrow -Elektrons in der Zwischenschicht:

$$E = V + \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{n_x \pi}{d} \right)^2 + \frac{\hbar^2}{2m} \left(k_y^2 + k_z^2 \right)$$

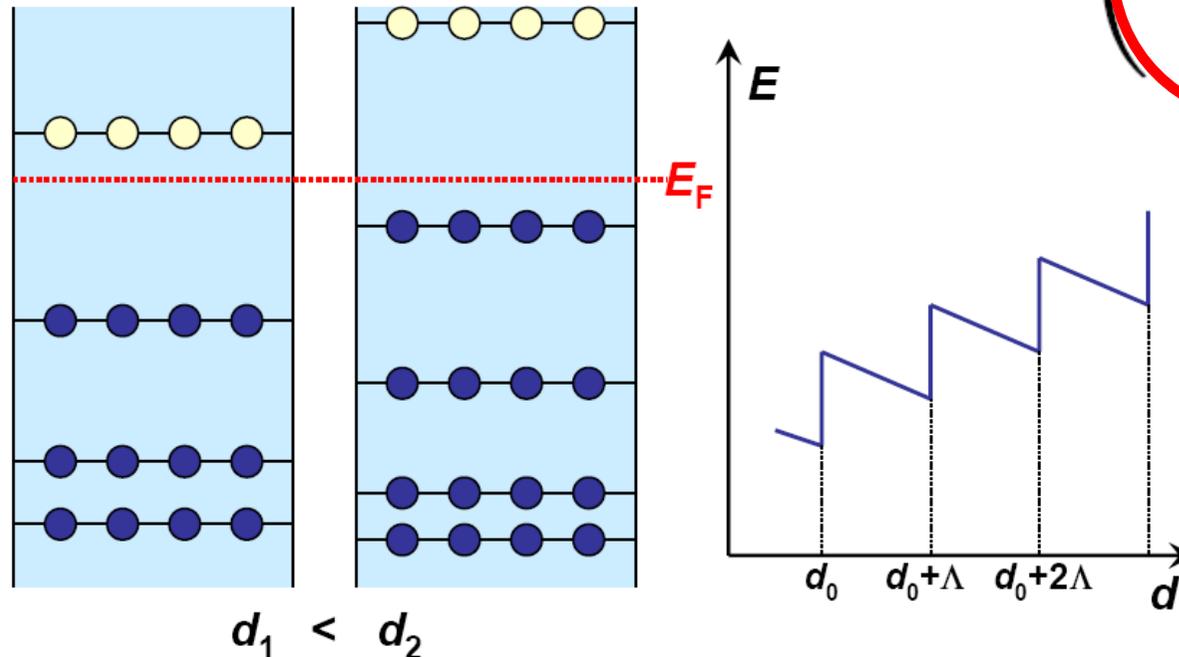
GMR – Giant Magnetoresistance

Zwischenschichtkopplung

Quanteninterferenzen

$$E = V + \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{n_x \pi}{d} \right)^2 + \frac{\hbar^2}{2m} (k_y^2 + k_z^2)$$

$$\frac{n_x \pi}{d}$$

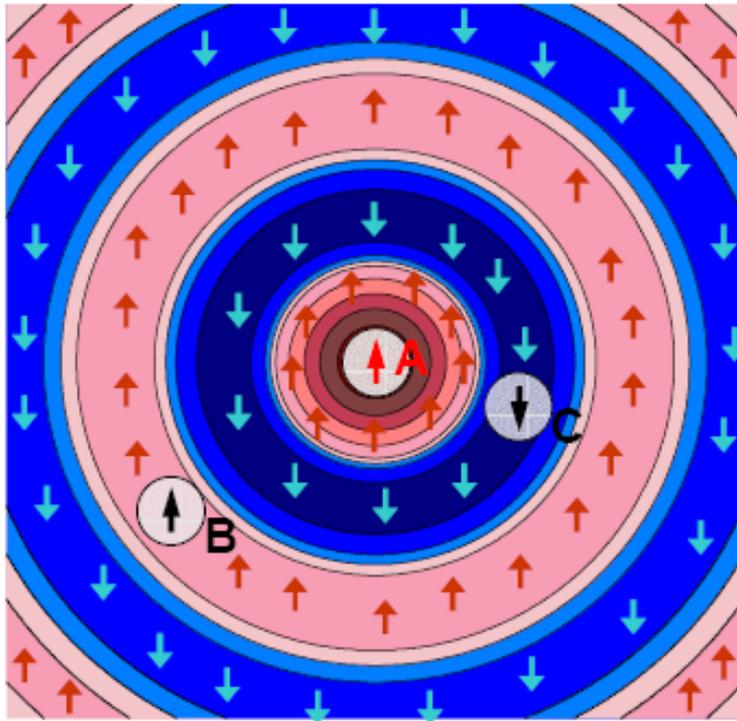


- Kontinuierlich abnehmende Energie mit wachsender Zwischenschichtdicke d
- Besetzung „neuer“ Niveaus bei Absinken unter Fermi-Energie
- energetische Bevorzugung der parallelen Magnetisierungsrichtung
- analoge Überlegungen → Bevorzugung doppelter Schichtdicke für $\uparrow \downarrow$ Magnetisierung

GMR – Giant Magnetoresistance

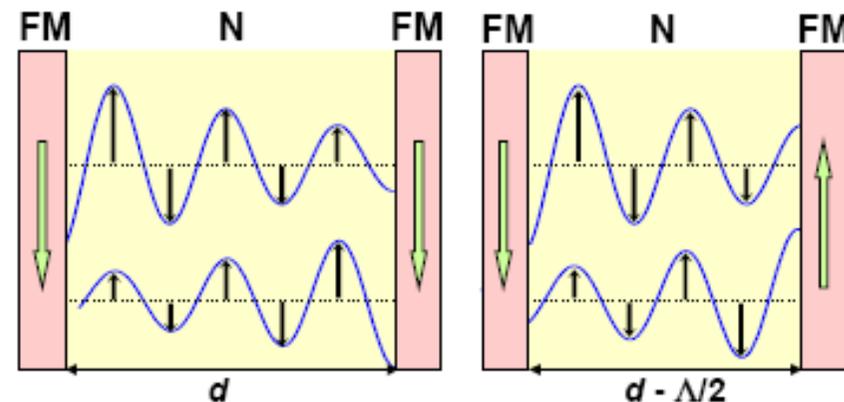
Zwischenschichtkopplung

RKKY Modell:



A: ferromagnetische Störstelle, Spin \uparrow
B: NM-Material, „induzierter“ Spin \uparrow
C: NM-Material, „induzierter“ Spin \downarrow

In GMR-Proben fungiert die gesamte FM-Schicht als „Störstelle“!



o Oszillationsperiode identisch zum Quanteninterferenzmodell

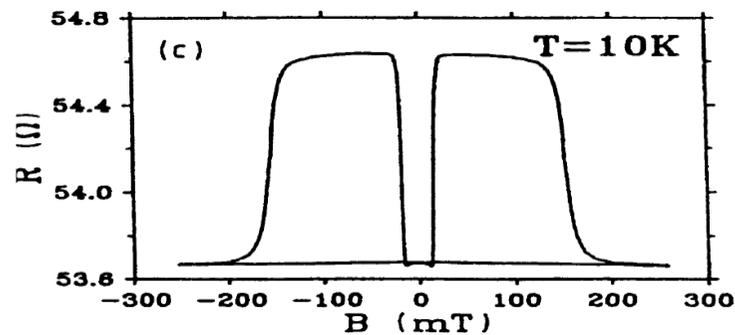
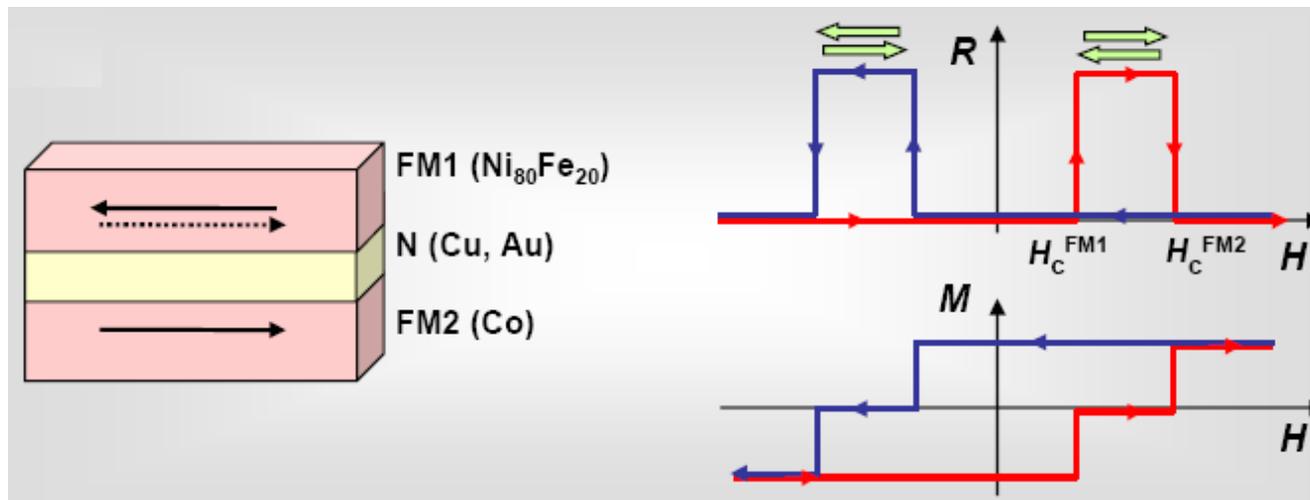
Zwischenstand

Inhalt:

- ✓ Leitungsmechanismen in 3d Übergangsmetallen
- Magnetwiderstandseffekte:
 - ✓ NMR (Negative MagnetoResistance)
 - ✓ AMR (Anisotropic MagnetoResistance)
 - GMR (Giant MagnetoResistance)
 - ✓ GMR
 - ✓ Zwischenschichtkopplung
 - Spinventile/Anwendung
- Fazit

GMR – Giant Magnetoresistance

Spinventile/Anwendung



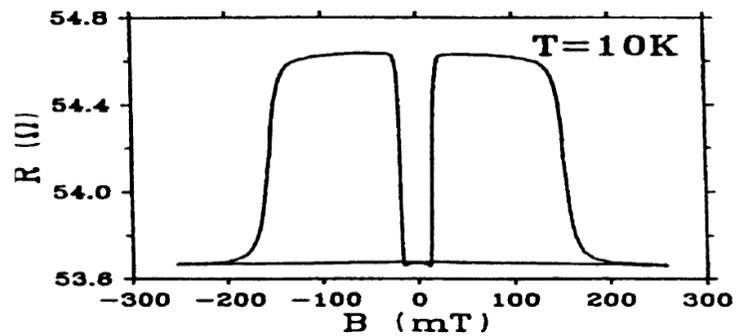
J. Barnas et al., Phys. Rev. B 42, 8110 (1990)

- Verzicht auf Zwischenschichtkopplung
- hier (einfachster Fall):
 - unterschiedliche Koerzitivfelder der FM-Schichten
- in Anwendungen:
 - „free“ und „pinned“-Layer
- Vorteile gegenüber GMR mit IEC:
 - bessere Reproduzierbarkeit
 - geringere Feldstärken

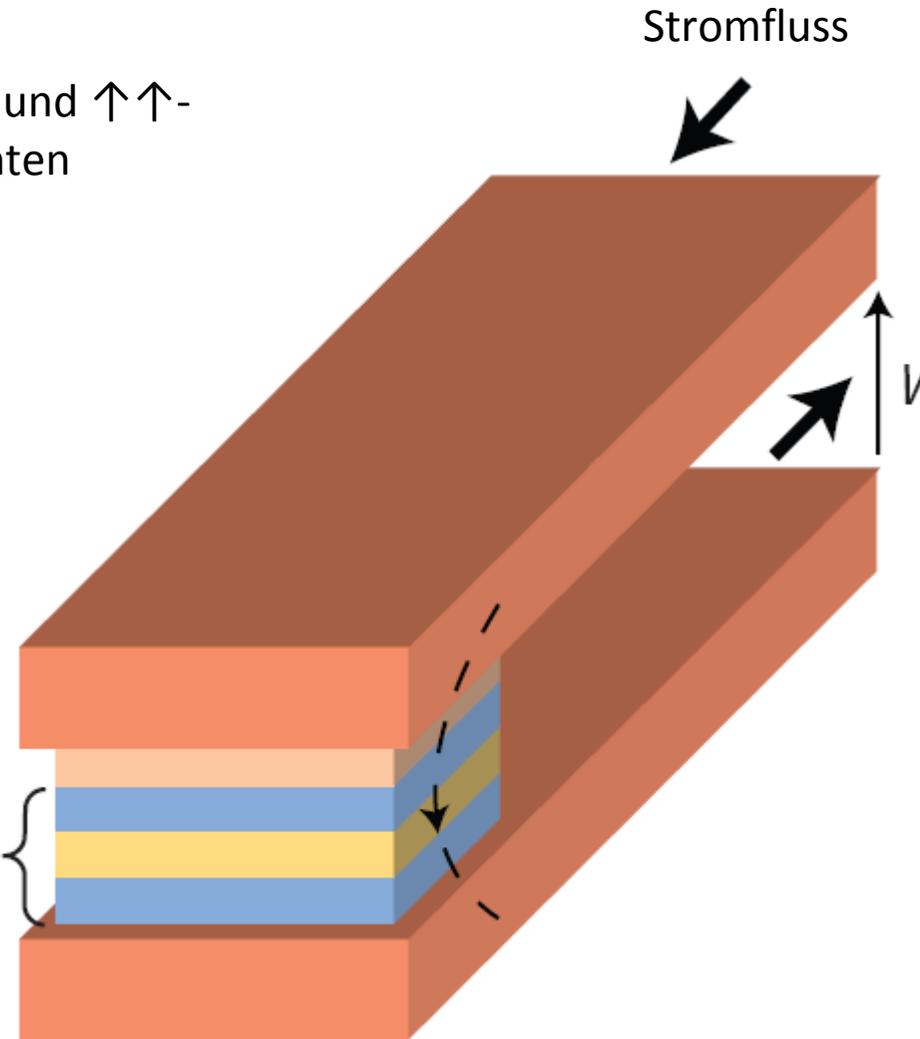
GMR – Giant Magnetoresistance

Spinventile/Anwendung

Widerstand ändert sich zwischen $\downarrow\uparrow$ - und $\uparrow\uparrow$ -Magnetisierung der (blauen) FM-Schichten

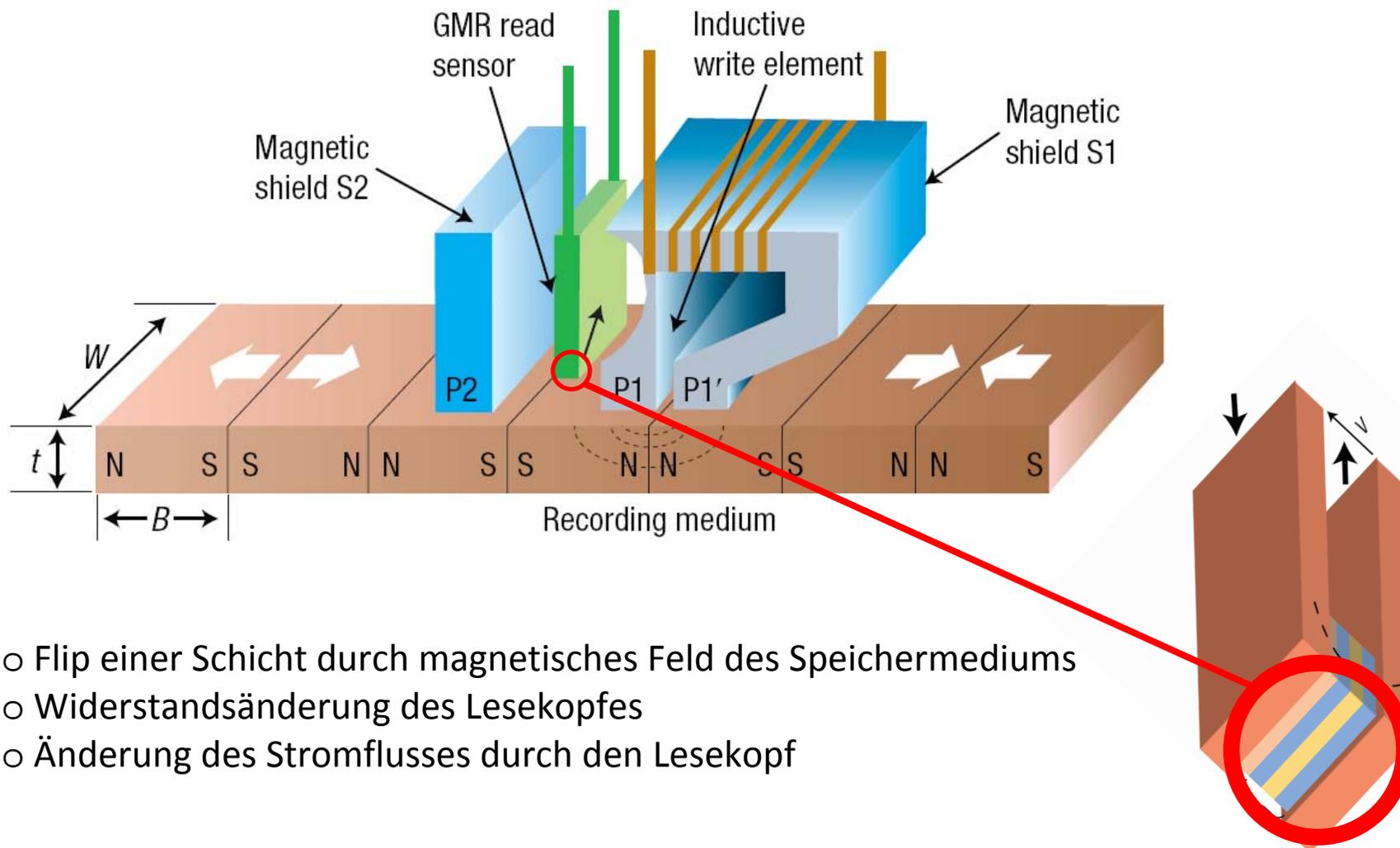


GMR-Schichtsystem



GMR – Giant Magnetoresistance

Spinventile/Anwendung



- Flip einer Schicht durch magnetisches Feld des Speichermediums
- Widerstandsänderung des Lesekopfes
- Änderung des Stromflusses durch den Lesekopf

Fazit

- Vielzahl magnetischer Widerstandseffekte
 - PMR, NMR, AMR
 - CMR (**C**olossal **M**agneto**R**esistance)
 - GMR
 - Zwischenschichtkopplung
 - Spinventile/Anwendung

Fazit

- Vielzahl magnetischer Widerstandseffekte
 - PMR, NMR, AMR
 - CMR (**C**olossal **M**agneto**R**esistance)
 - GMR
 - Zwischenschichtkopplung
 - Spinventile/Anwendung
- Ausblick:
 - GMR in granularen Materialien
 - TMR (**T**unneling **M**agneto**R**esistance)
 - EMR (**E**xtraordinary **M**agneto**R**esistance)