

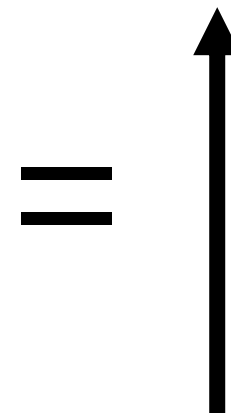
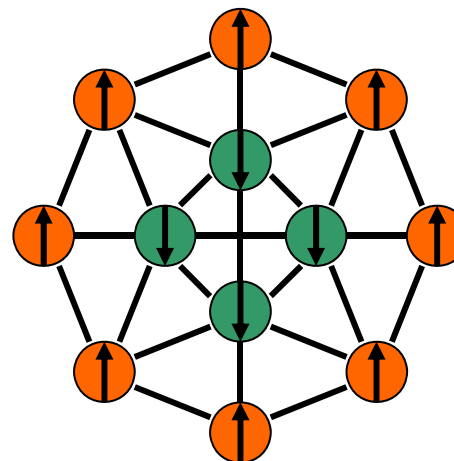
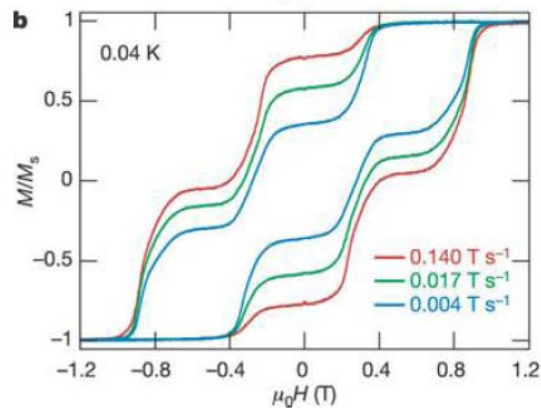
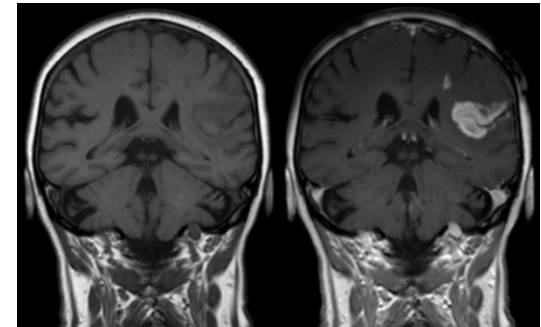
29.6.2016

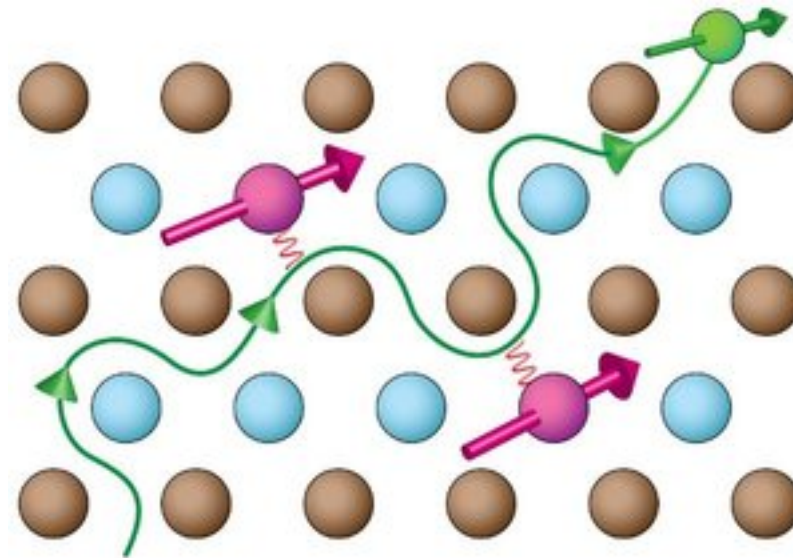


# Rückblick

auf flüssige und molekulare Magnete

- MM lassen sich mit einem Gesamt-Spin pro Cluster gut beschreiben.
- In MM können die Zustände der Clusters thermisch oder durch Tunneln ineinander überführt werden. Tunneln überwiegt bei tiefen Temperaturen.
- MM könnten in der Zukunft als Speichermedium benutzt werden – ein Bit pro Cluster.
- FF können öfter eingesetzt werden und wird bereits für Krebsterapie, Schlösser, Lautsprechen und als Kontrastmittel bei MRI benutzt.



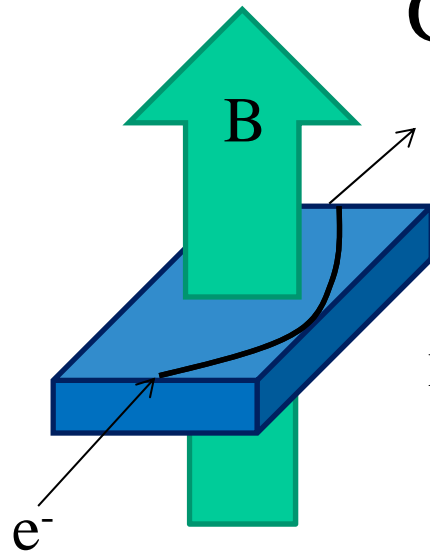


# Spin-Leitfähigkeit

ein Spinstrom

Die Gesichter des Elektrons  
Lokalisiert – Magnetismus  
Beweglich – Leitfähigkeit  
...und die Mischungen

# Grundlage: die Lorenzkraft



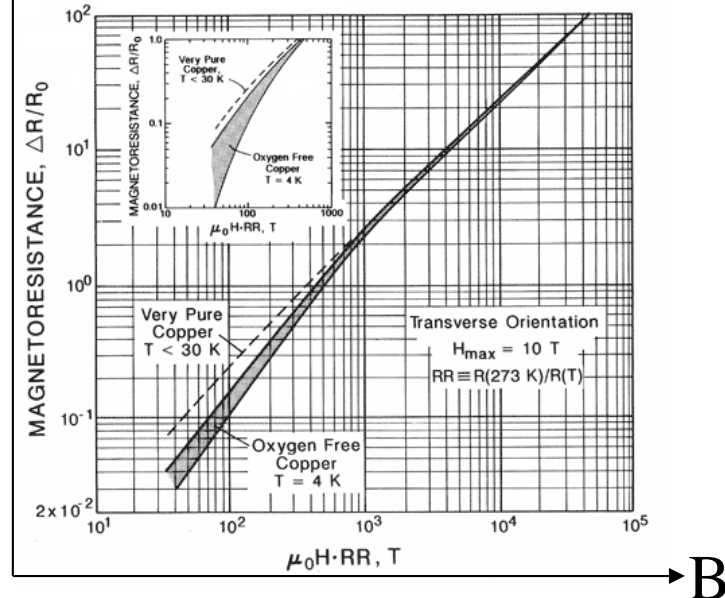
Im Metall koppelt der Spin vom Elektron ans Feld und wird dadurch abgelenkt.

Die Auslenkung vom Elektron führt zu einem grösseren Widerstand.

Elektronische Beweglichkeit  $\searrow$   $\swarrow$  Feld

In Halbleitern, mit nur einer Art Ladungsträger, MR ist:  $(1 + (\mu B)^2)$

MR

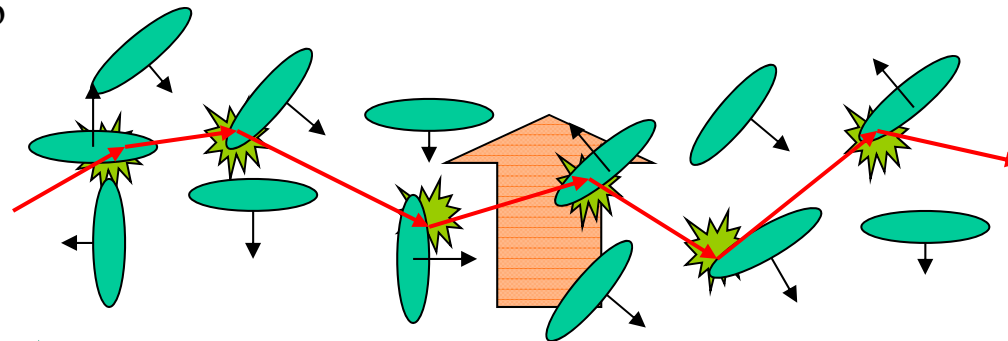
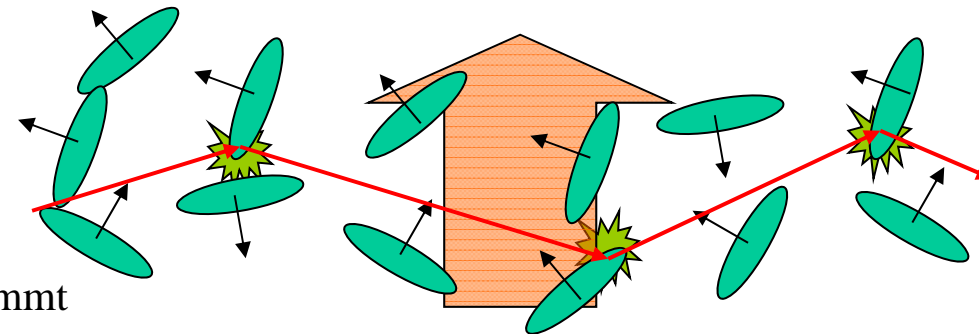
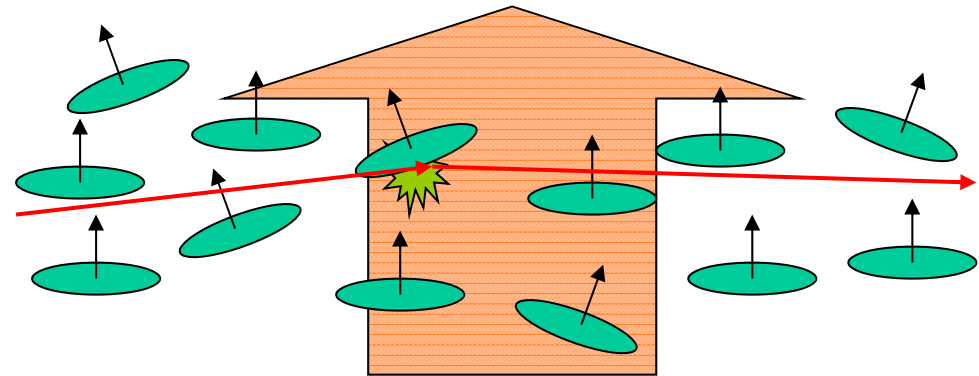
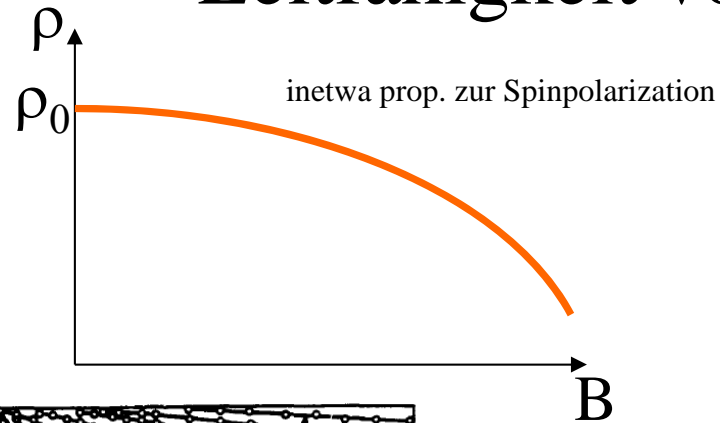


d.h. bei InSb ( $\mu = 4$ ) und 0.25 T ist MR 100 %

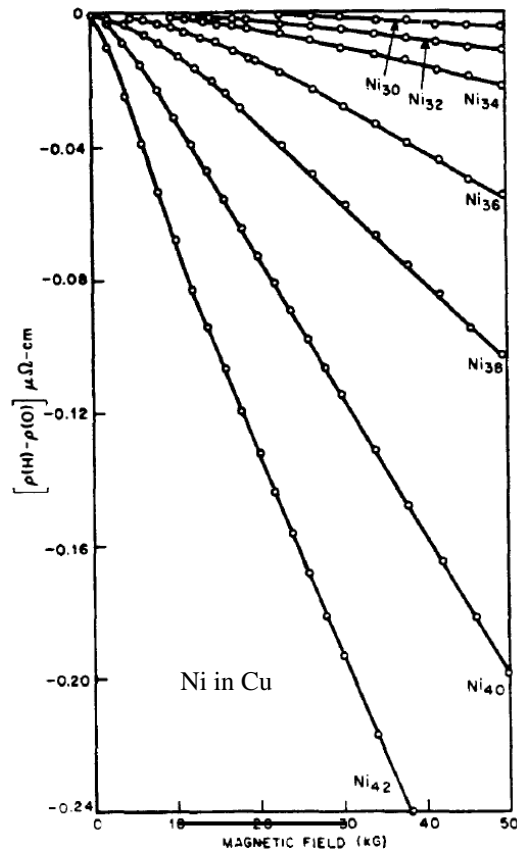


Positiver Magnetowiderstand

# Leitfähigkeit vom Paramagnet im Feld

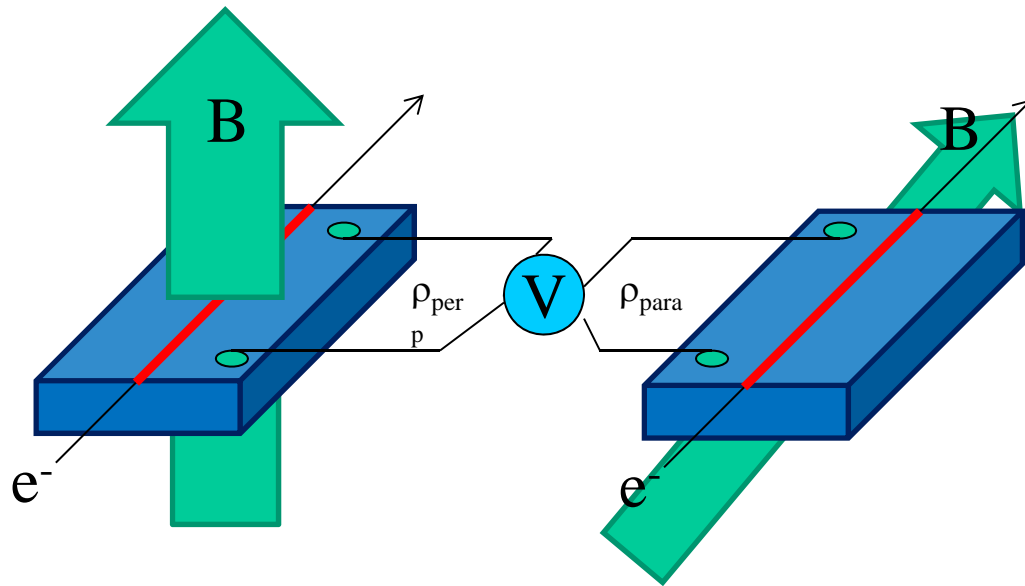


Der widerstand nimmt mit mehr Feld ab

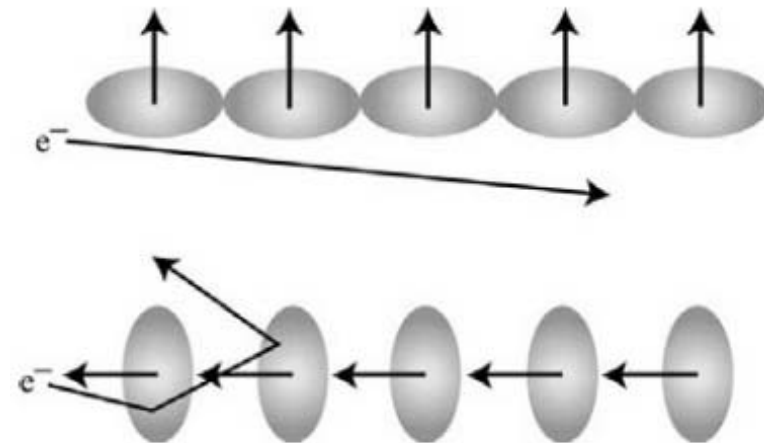
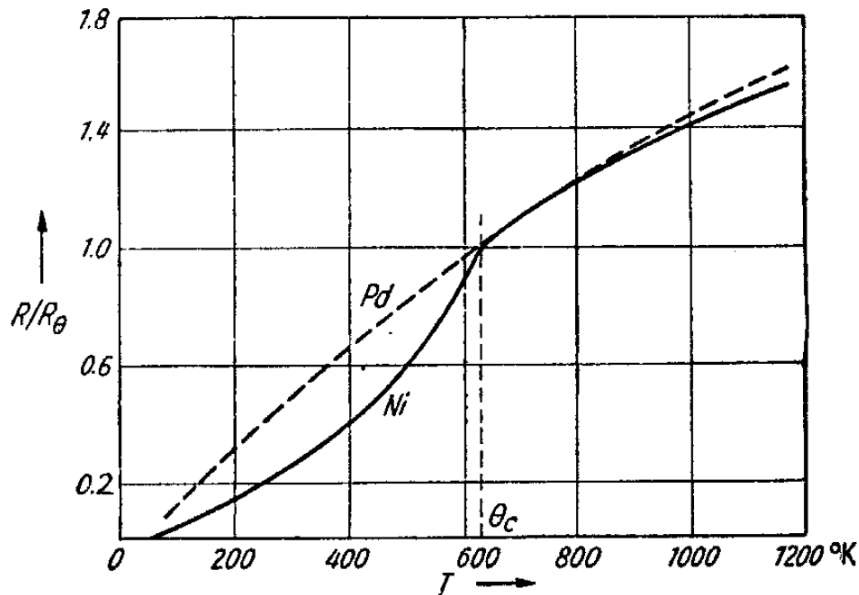
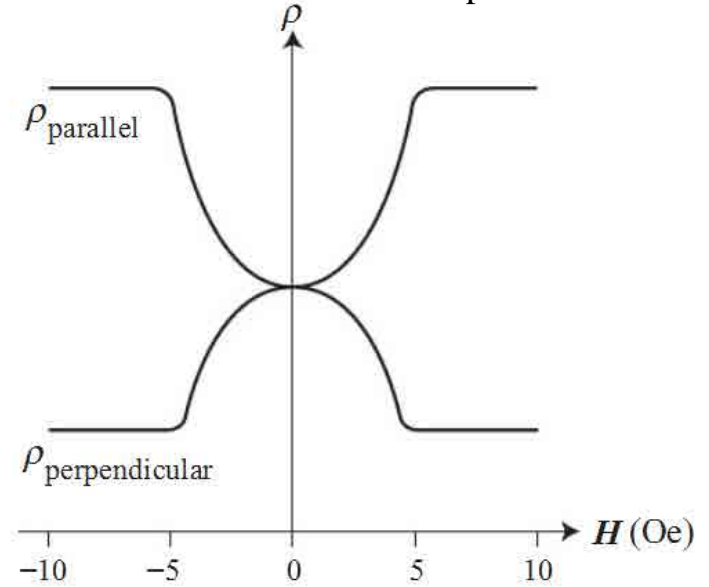


Negativer Magnetowiderstand

# Leitfähigkeit im Feld mit Spinordnung



Bei Ferromagnete nimmt der Widerstand ab mit dem Feld  
- Ist aber ein Anisotroper Effekt.

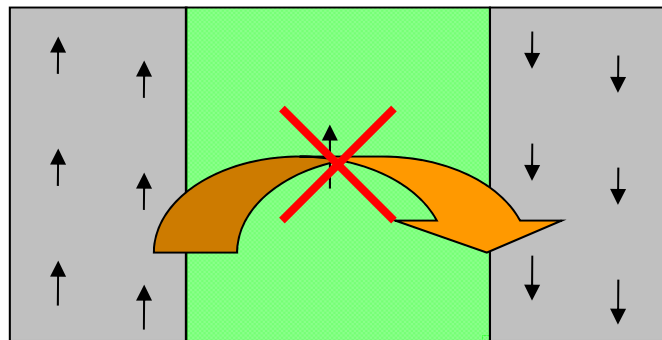
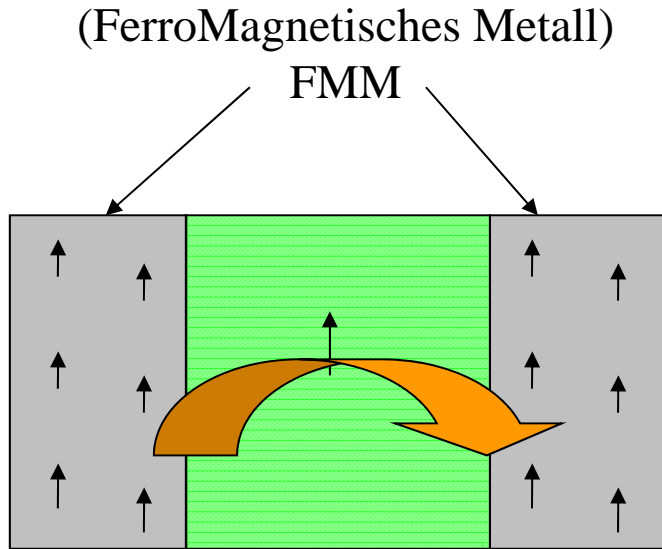


# Giant Magneto Resistance (GMR)

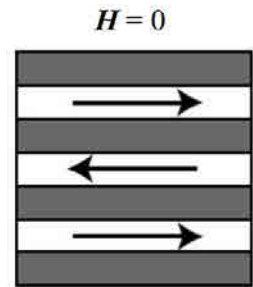
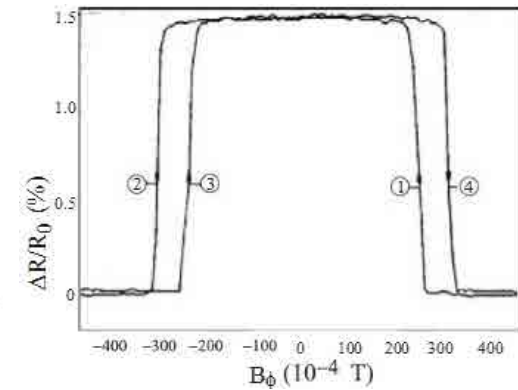
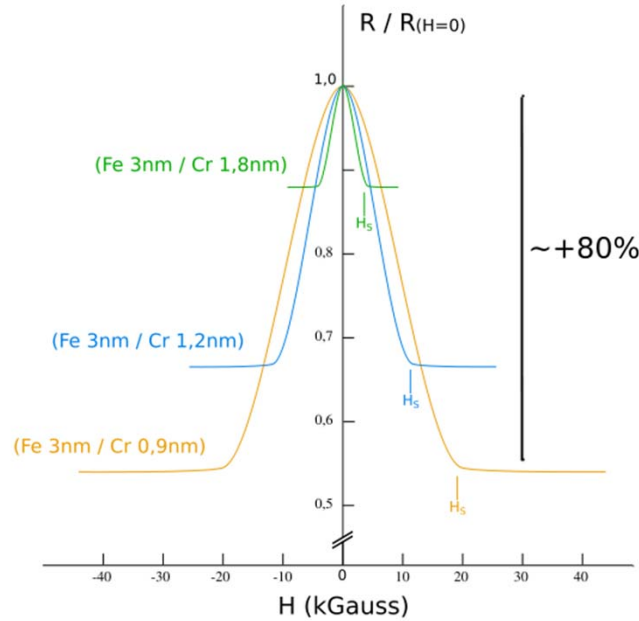
eine Frage der Topologie



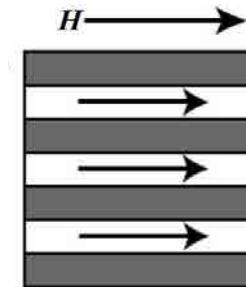
Peter Grünberg  
1939-  
Nobelpreis 2007



Nicht magnetisch



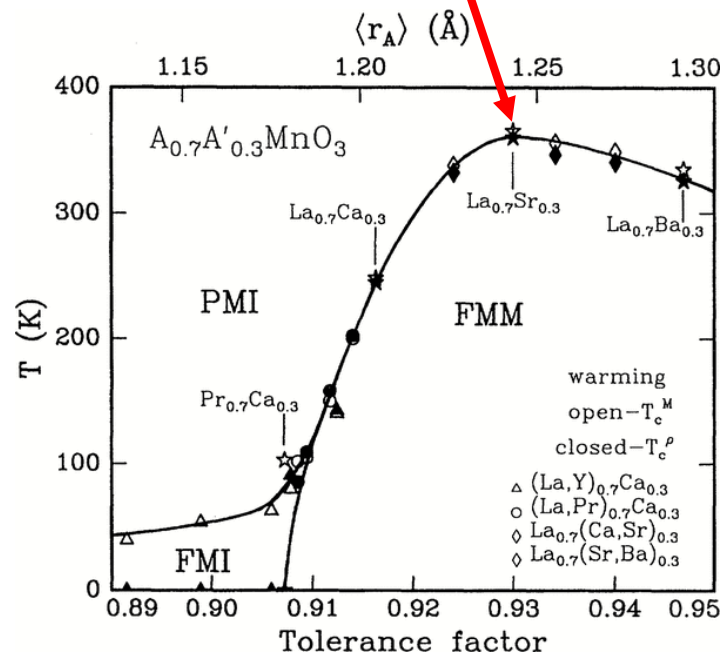
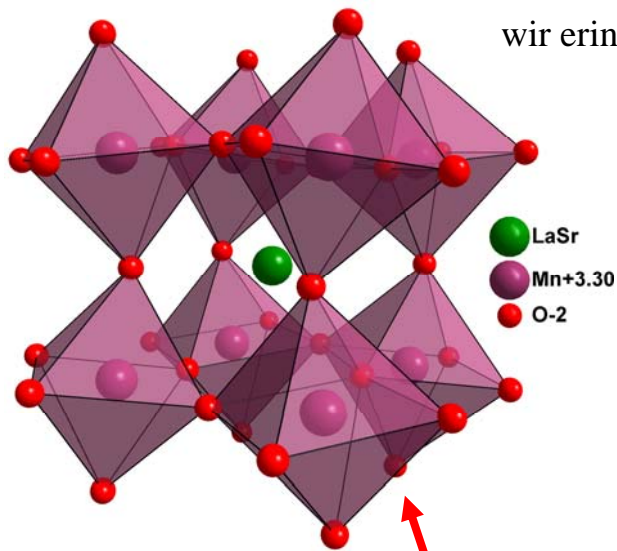
grosser Widerstand



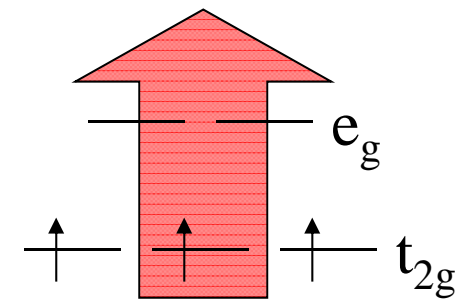
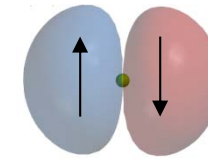
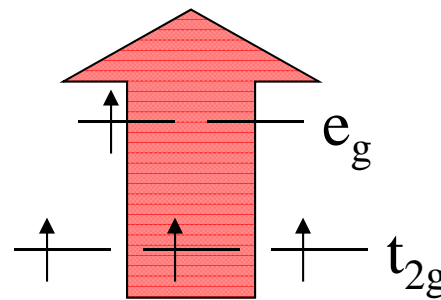
kleiner Widerstand

# Colossal Magneto Resistance (CMR)

wir erinnern uns an den Doppelaustausch – ein Rückblick

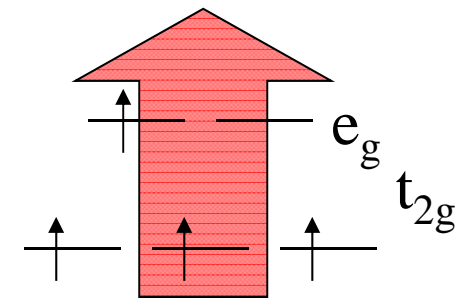
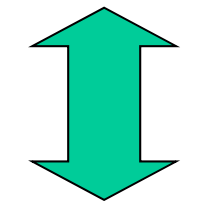
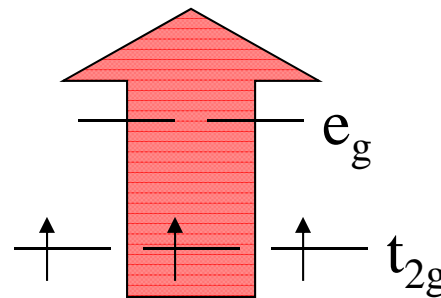


Ferromagnetism  
gleich  
Leitfähigkeit



O  $2p_z$

$Mn^{4+} (d^3)$



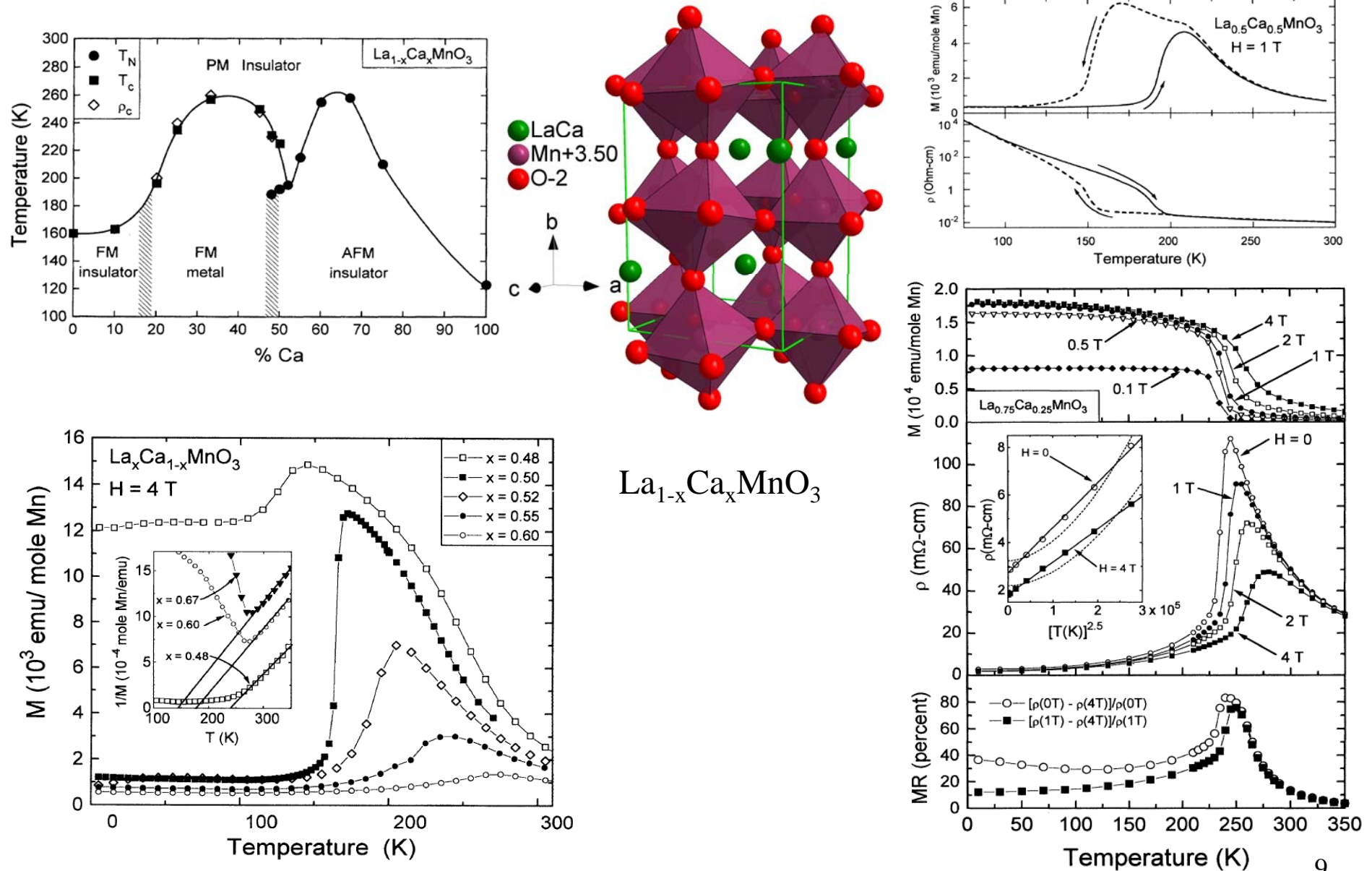
O  $2p_z$

$Mn^{3+} (d^4)$

8

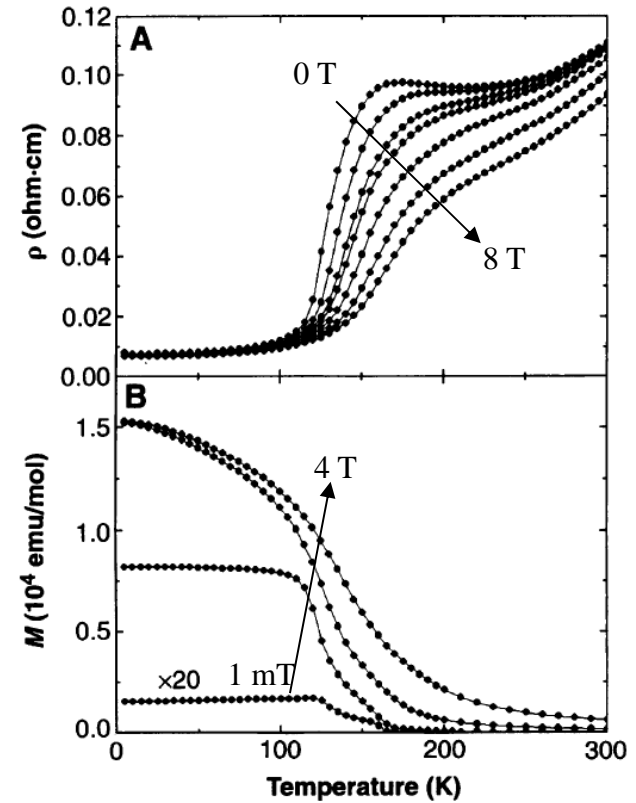
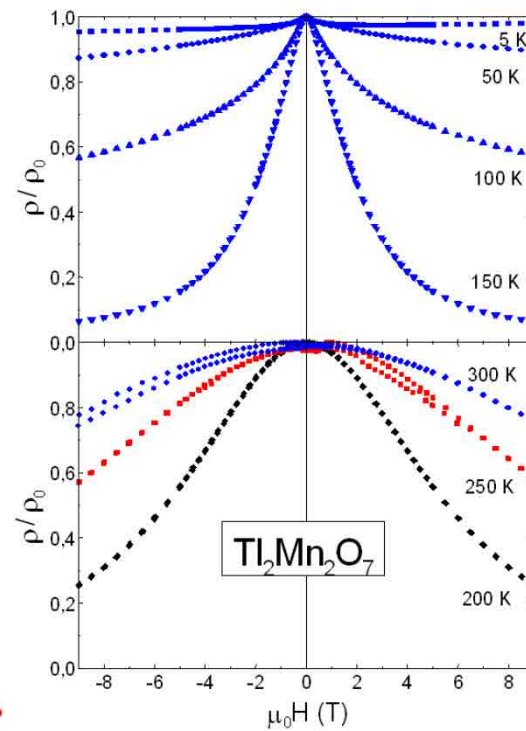
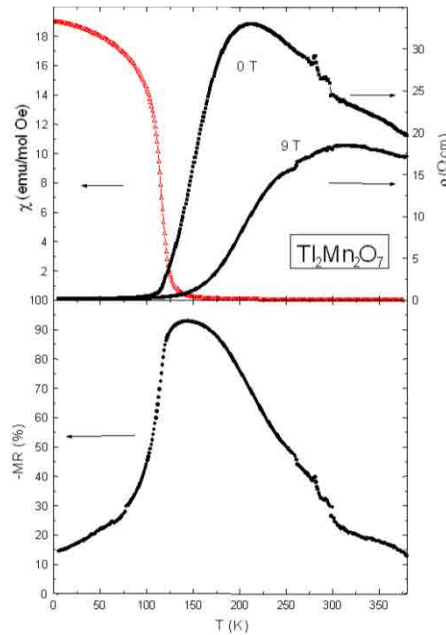


# Colossal Magneto Resistance (CMR)

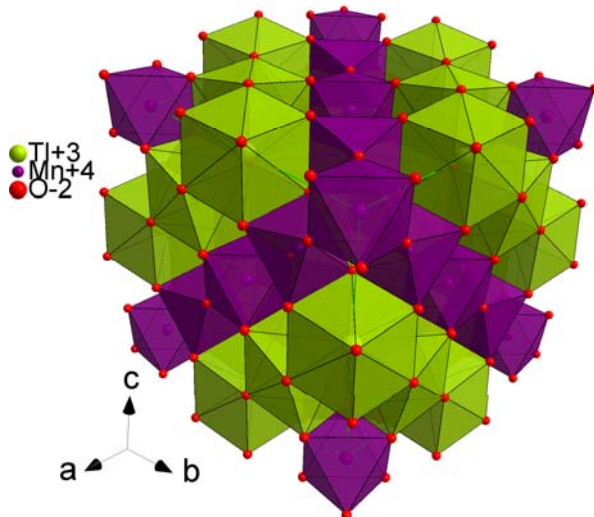


# Colossal Magneto Resistance (CMR)

ohne Doppelaustausch



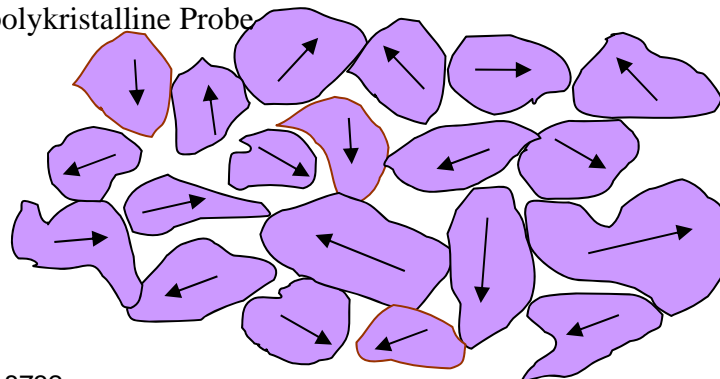
M. A. Subramanian, *et al.* Science 273 (1996) 81



pyrochlore -  $Tl_2Mn_2O_7$  (nur  $Mn^{4+}$ )

halb-Metall-FM-Modell

polykristalline Probe



Welcher magnetischer Zustand beschreibt die Körner?

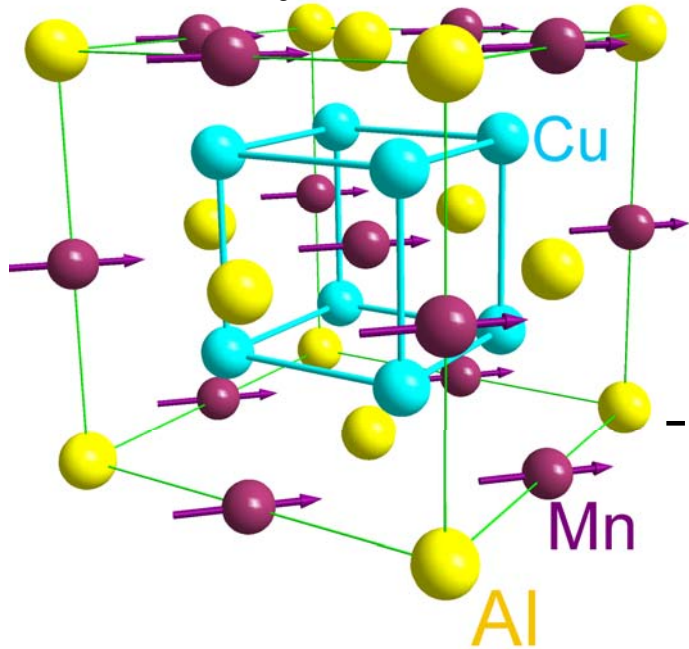
Wie kann man dann den CMR Effekt dann erklären?

# *Spintronic*

# Heusler-Legierungen

Friedrich Heusler  
(1866 – 1947)

Die Legierung ist Ferromagnetisch  
obwohl Mn ist antiferromagnetisch  
und Cu und Al diamagnetisch



$\text{Cu}_2\text{MnAl}$ . Geordnetes *fcc*-Gitter.

F. Heusler, Verh. Dtsch. Ges. 5, 219 (1903)

Andere Zusammensetzungen:

$\text{Cu}_2\text{MnAl}$ ,  $\text{Cu}_2\text{MnIn}$ ,  $\text{Cu}_2\text{MnSn}$ ,

$\text{Ni}_2\text{MnAl}$ ,  $\text{Ni}_2\text{MnIn}$ ,  $\text{Ni}_2\text{MnSn}$ ,  $\text{Ni}_2\text{MnSb}$

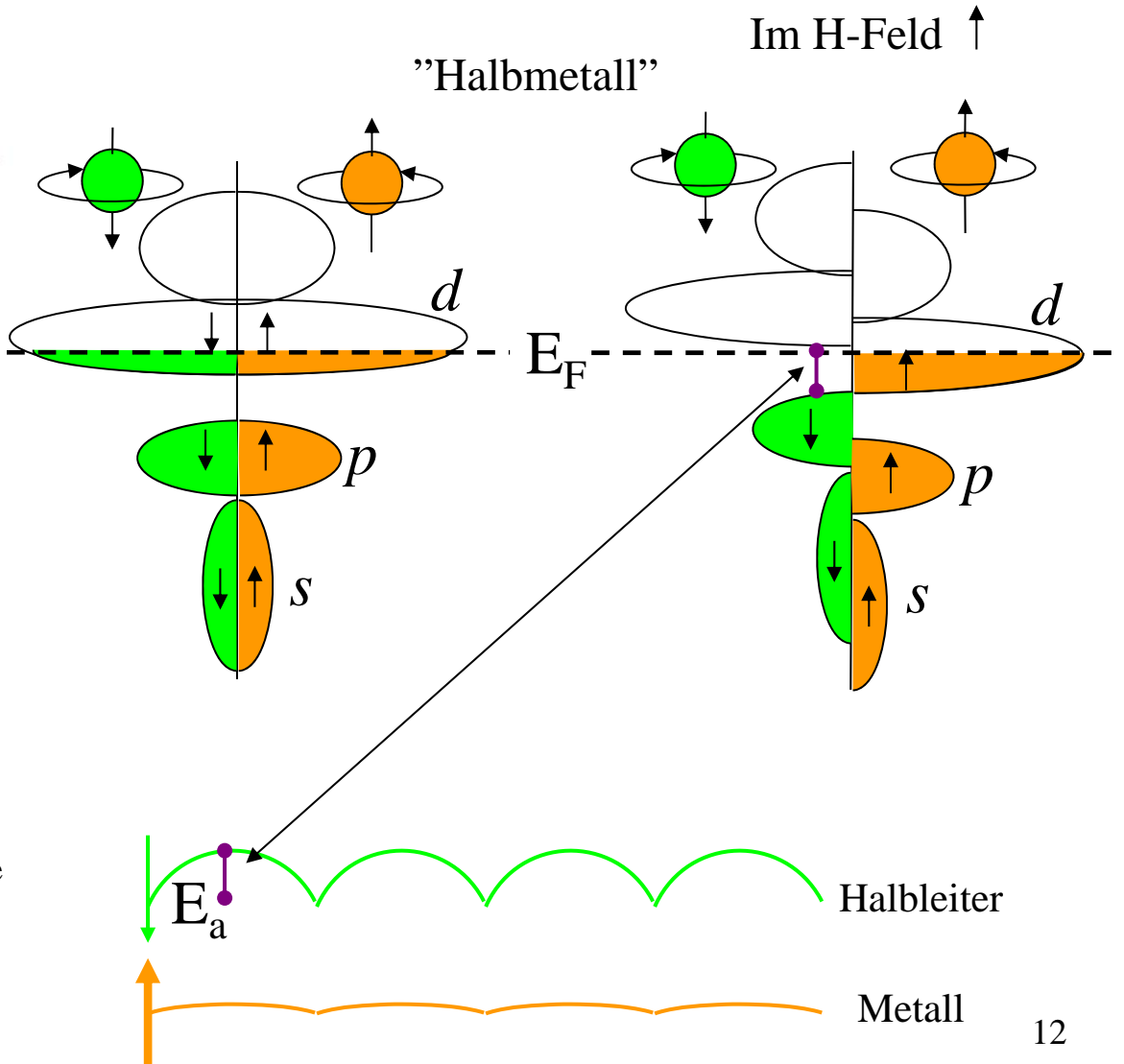
$\text{Co}_2\text{MnAl}$ ,  $\text{Co}_2\text{MnSi}$ ,  $\text{Co}_2\text{MnGa}$ ,  $\text{Co}_2\text{MnGe}$

$\text{Pd}_2\text{MnAl}$ ,  $\text{Pd}_2\text{MnIn}$ ,  $\text{Pd}_2\text{MnSn}$ ,  $\text{Pd}_2\text{MnSb}$

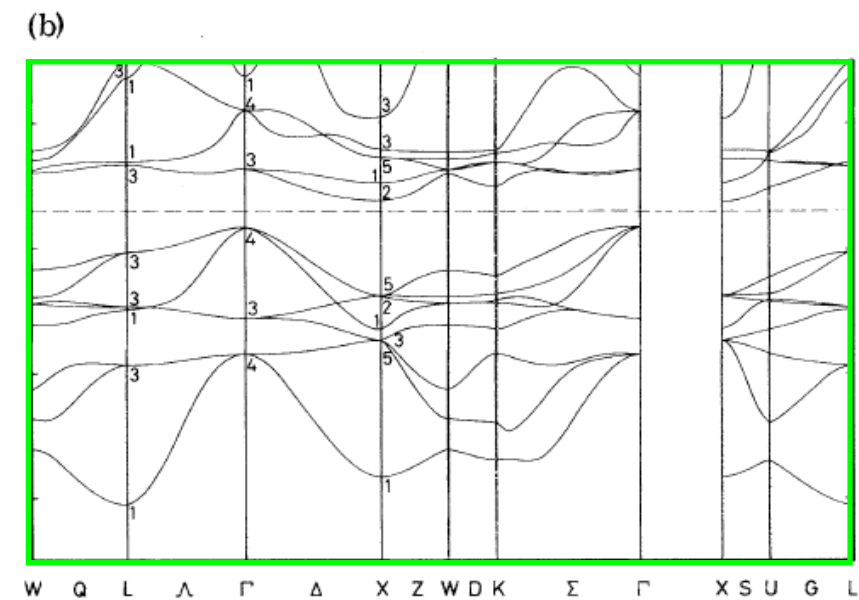
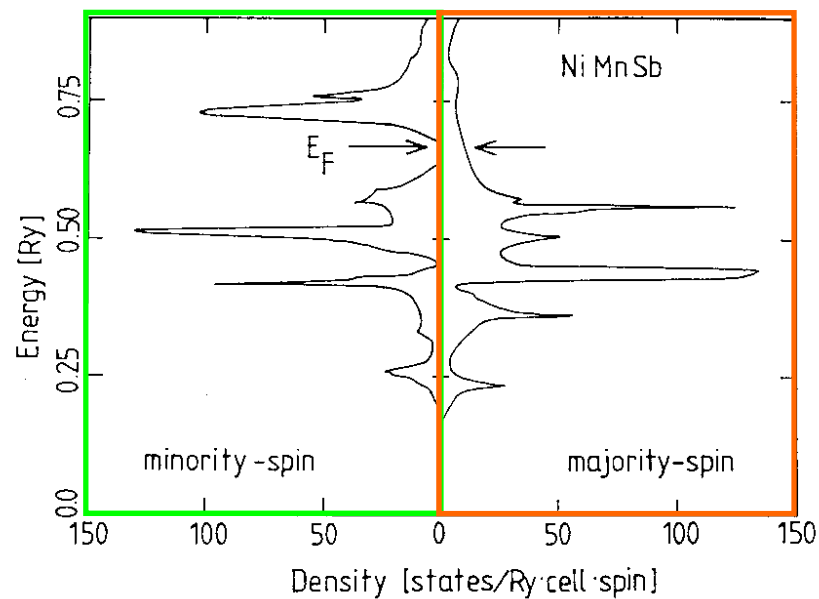
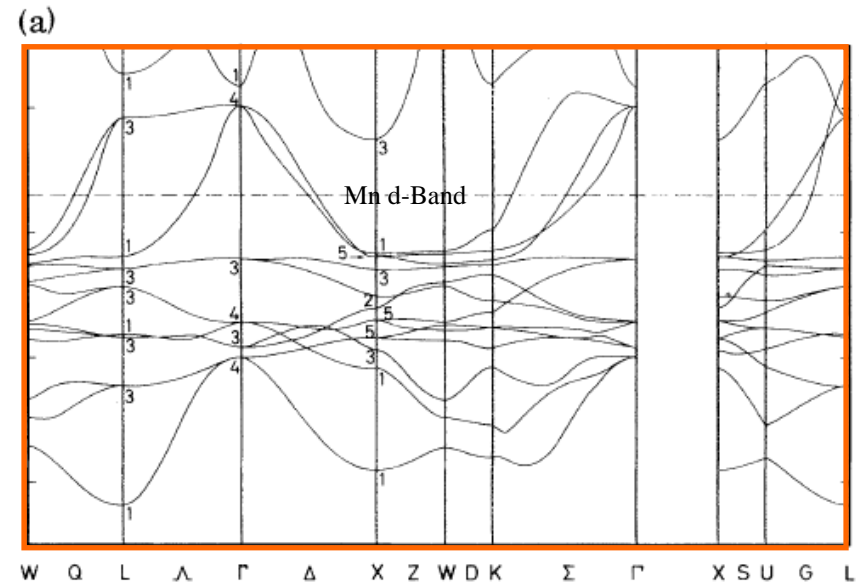
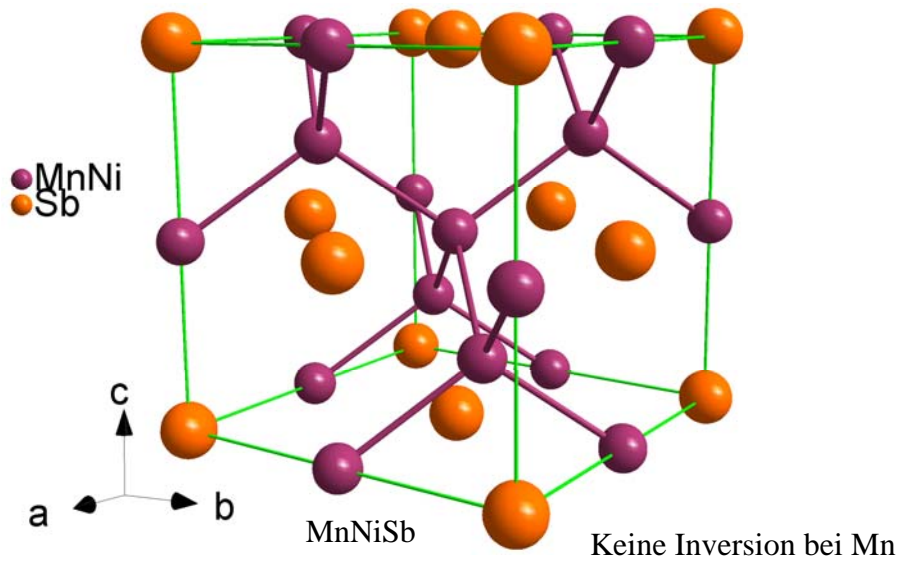
$\text{Cu}_{2.2}\text{MnAl}_{0.8}$

”nicht stöchiometrie”

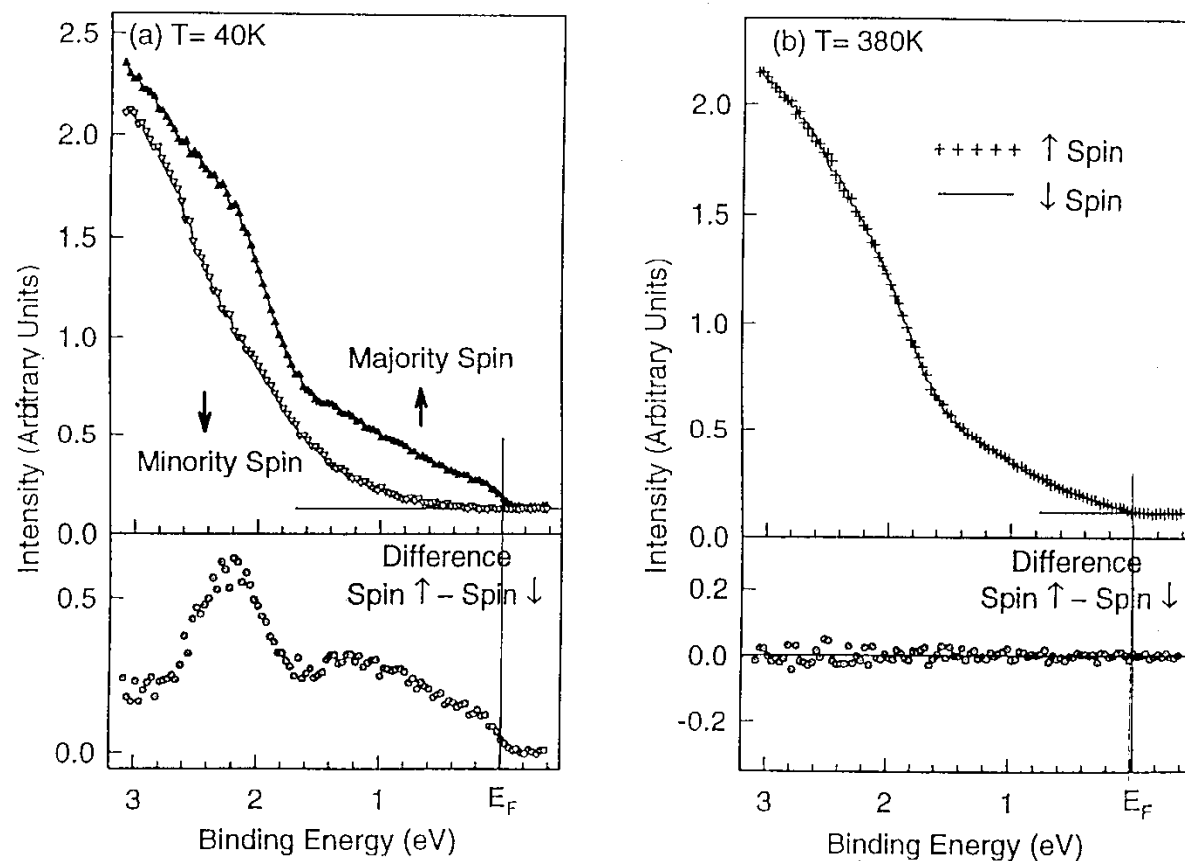
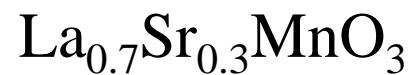
verursacht antiferromagnetismus



# Halb-Heusler-Legierungen



# CMR-Verbindungen neigen auch zu *Spintronic*



# (de)lokalisierte Spins

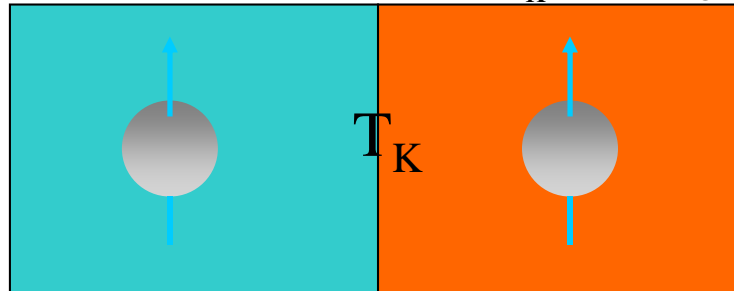
# Der Spin im Elektronensee

## Kondoeffekt

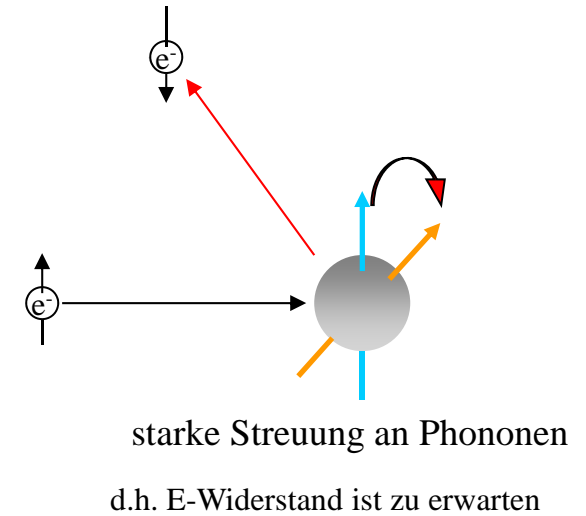
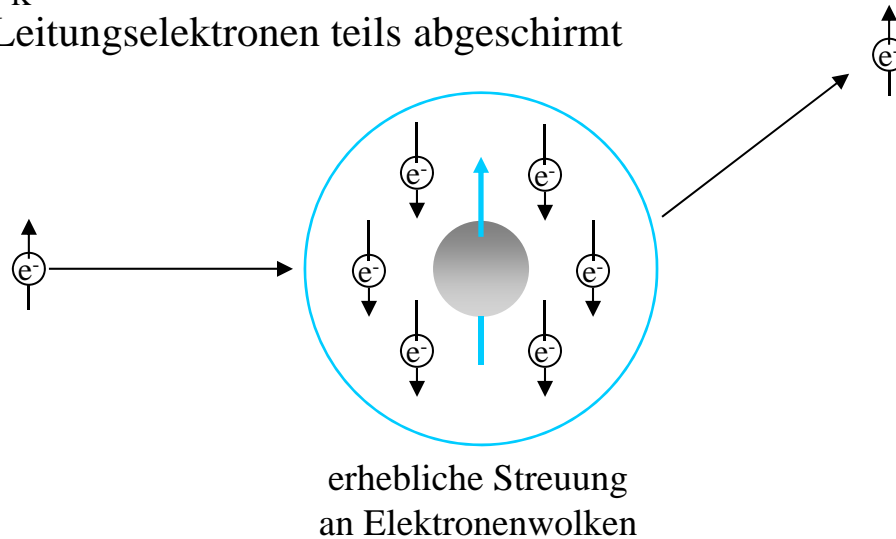


Jun Kondo 近藤 淳 (1930-)

$T > T_K$ : Paramagnetische Einzelmomente



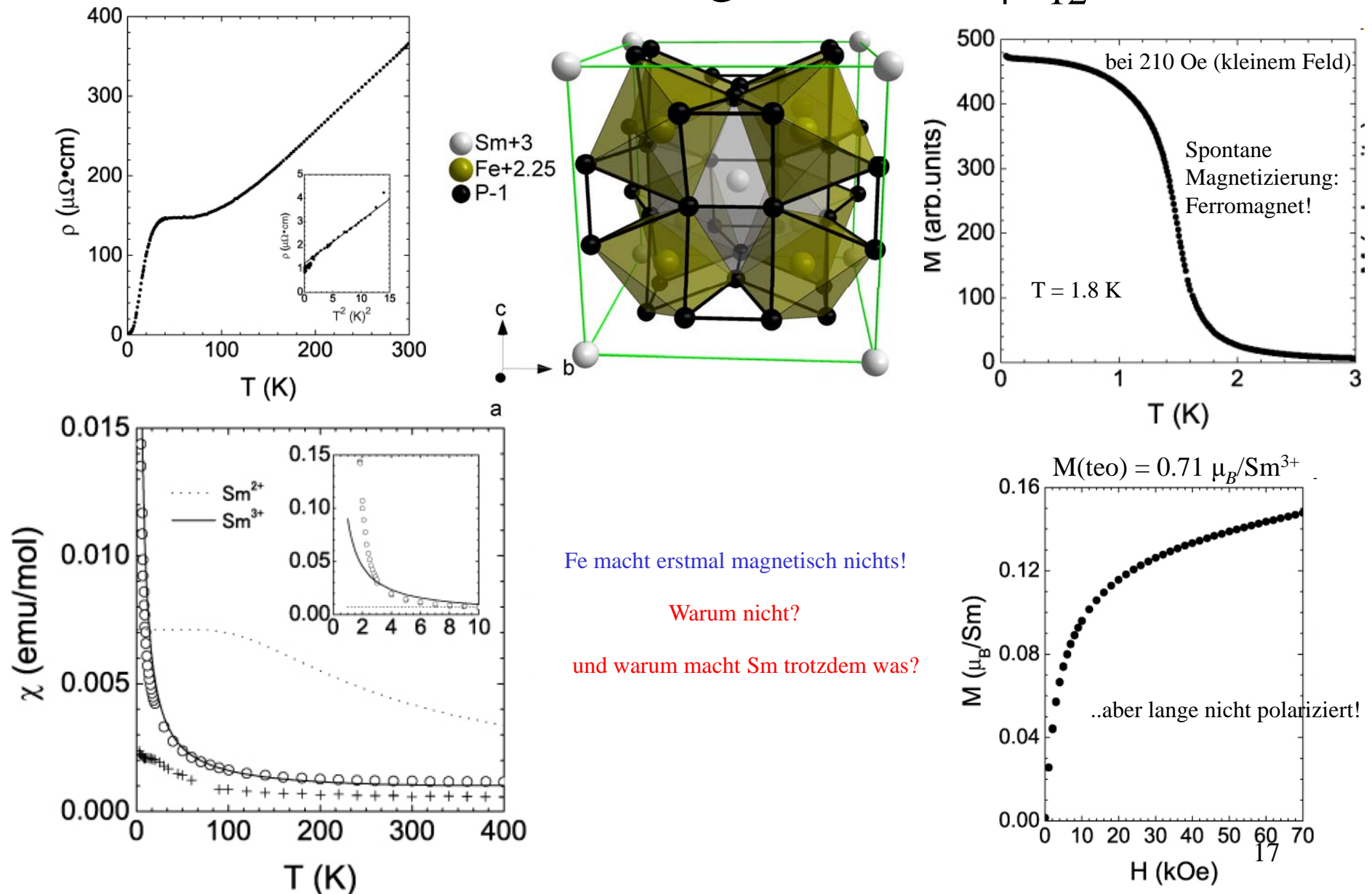
$T < T_K$ : Einzelmomente werden von Leitungselektronen teils abgeschirmt



Wirt\Magnet	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni
Cu	1000 K	2 K	10 mK	30 K	500 K	>1000K
Ag	-	10 mK	-	5 K	-	-
Au	300 K	1 mK	-	0.2 K	500 K	>1000 K



# Kondo Ferromagnet, $\text{SmFe}_4\text{P}_{12}$



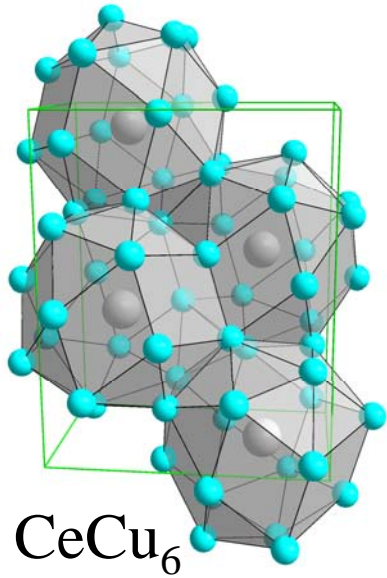
Fe macht erstmal magnetisch nichts!

Warum nicht?

und warum macht Sm trotzdem was?

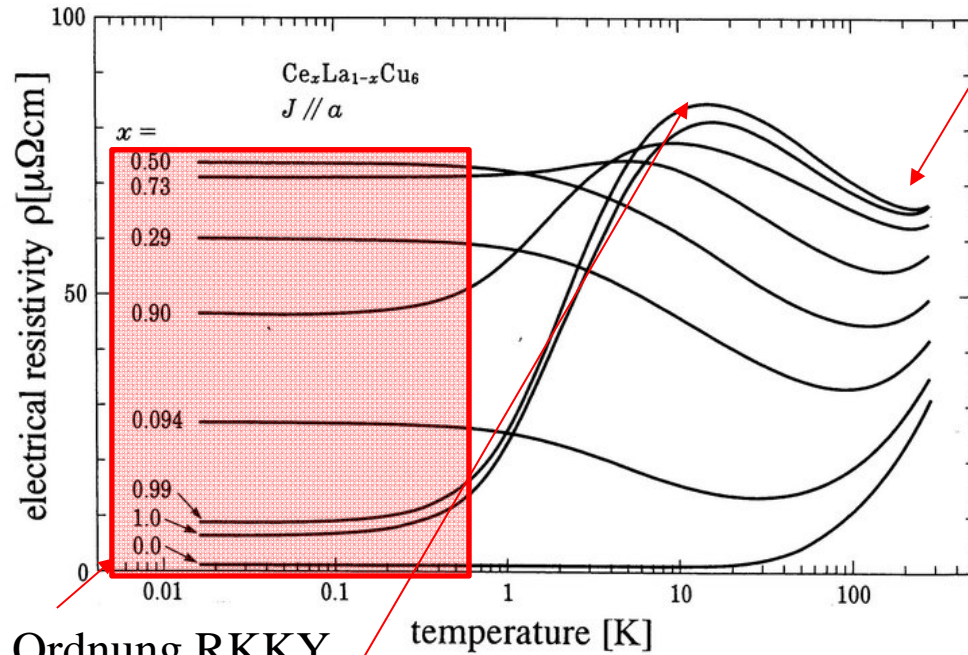
# Magnetsiche "Verunreinigungen" im Leiter

## Kondoeffekt



Ce CN18, Frank-Kasper Verbindung

Leitungselektronen fangen an das Moment am Ce zu "sehen"  
 $T_K!$

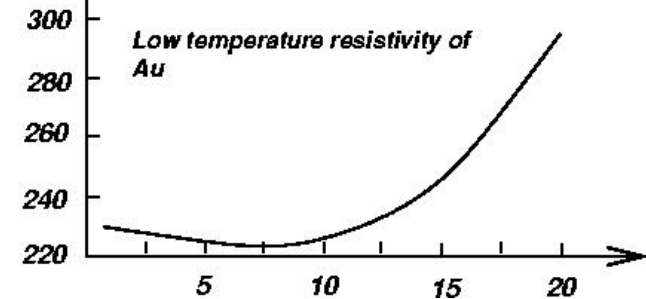


Spin Ordnung RKKY

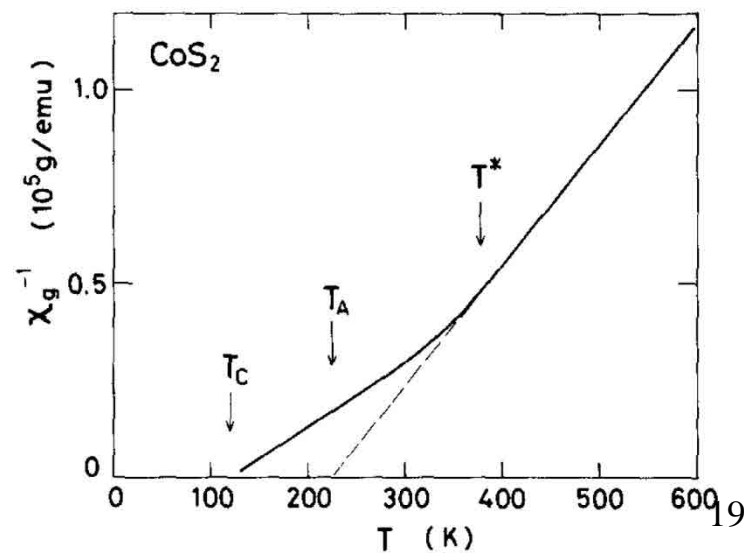
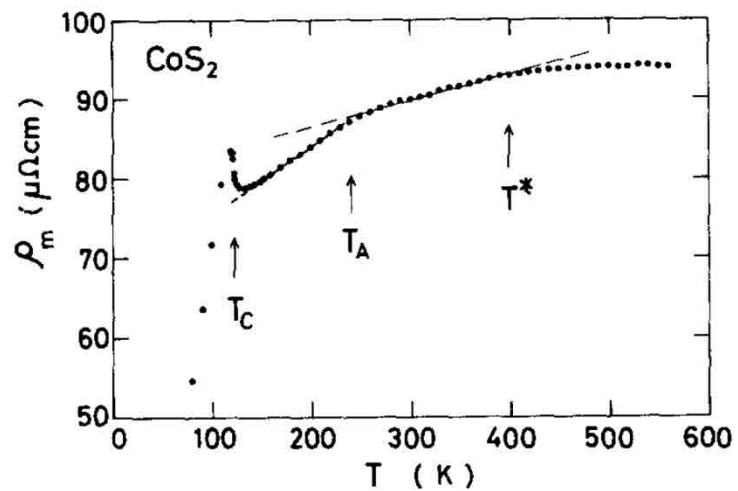
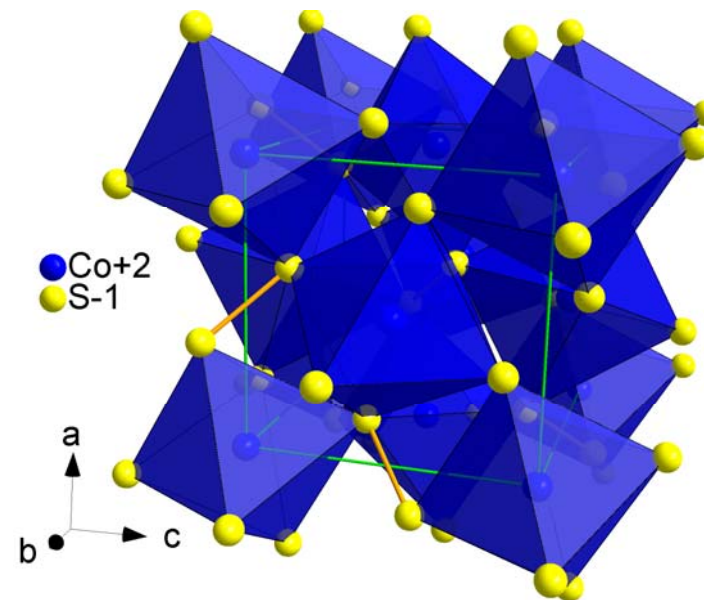
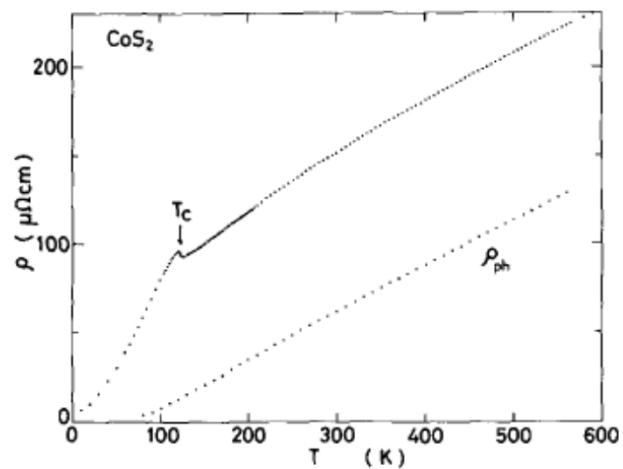
Maximale Elektronenstreuung an Ce

Resistance/Resistance(T=0 Celsius) x 10000

(from W.J. de Haas and G.J. van den Berg,  
 Physica vol. 3, page 440, 1936)

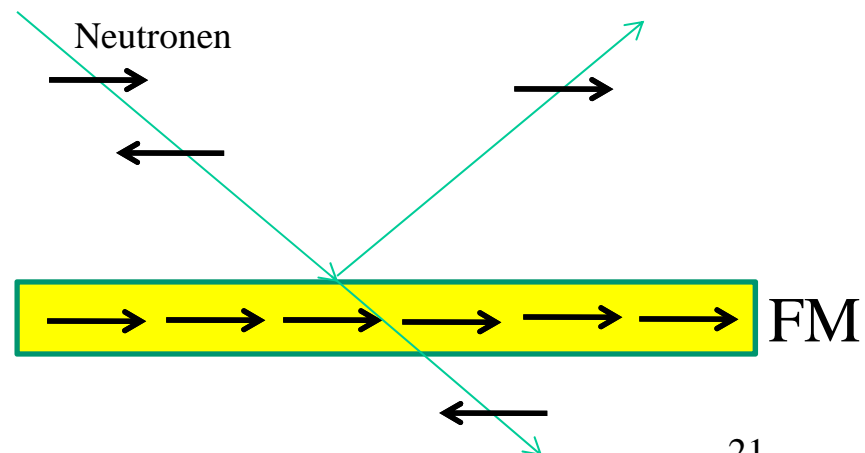
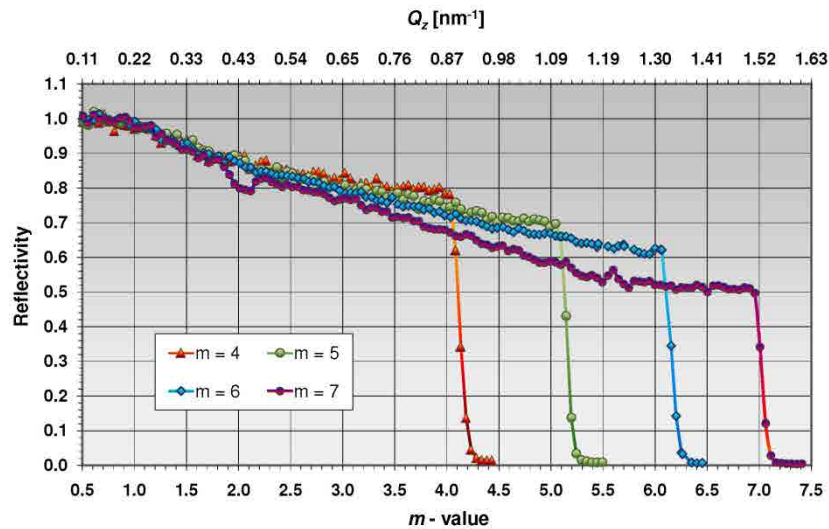
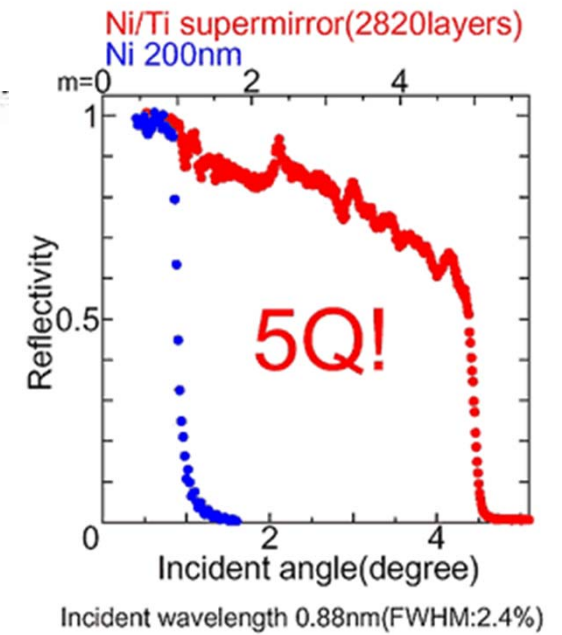
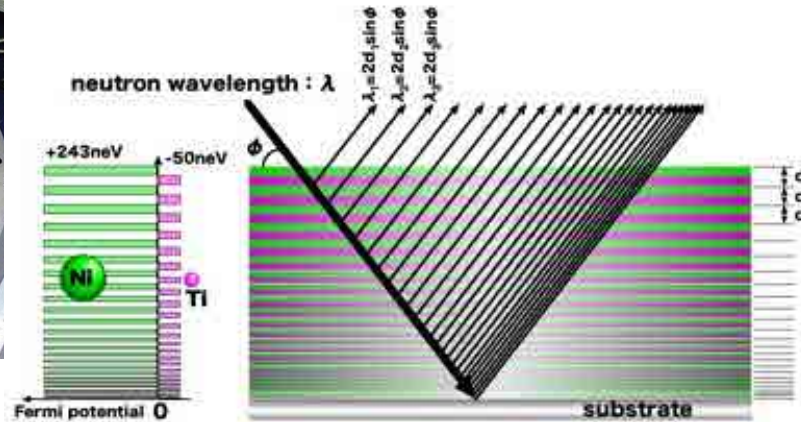
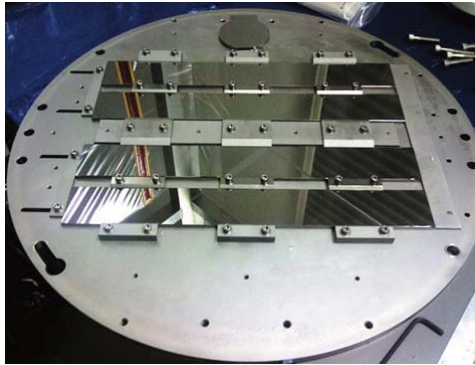


# Magnetoelktrische Wechselwirkungen in $\text{CoS}_2$

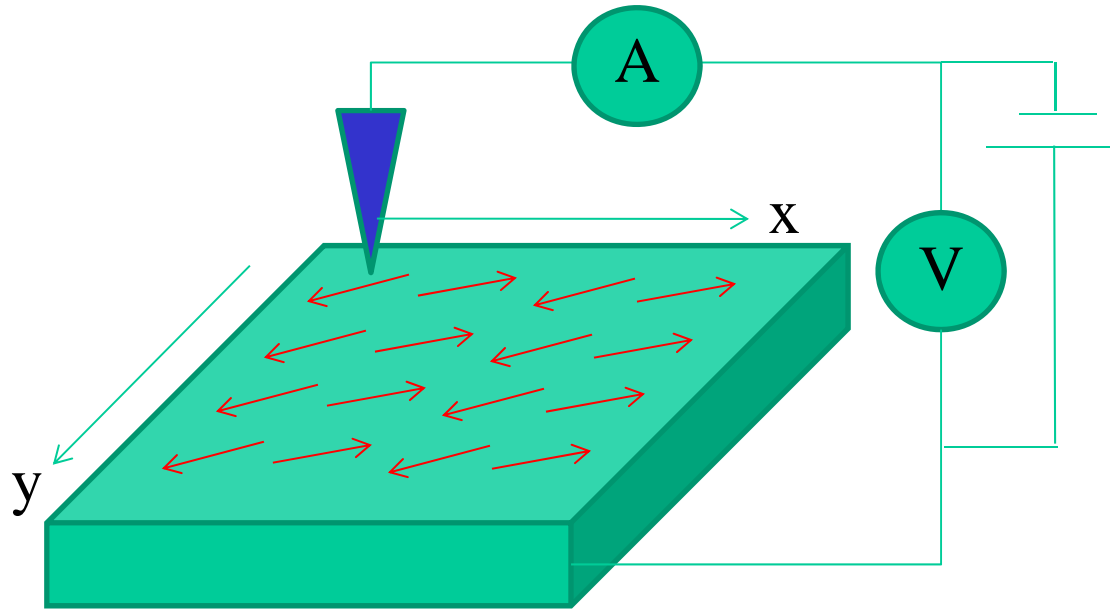


Wie kann man polarisierte  
Leitungselektronen benutzen?

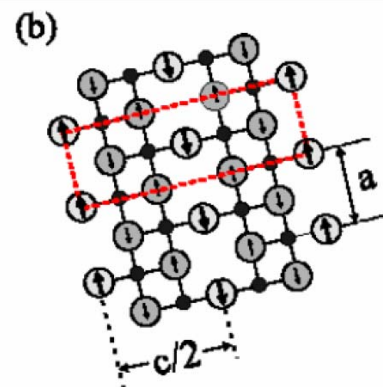
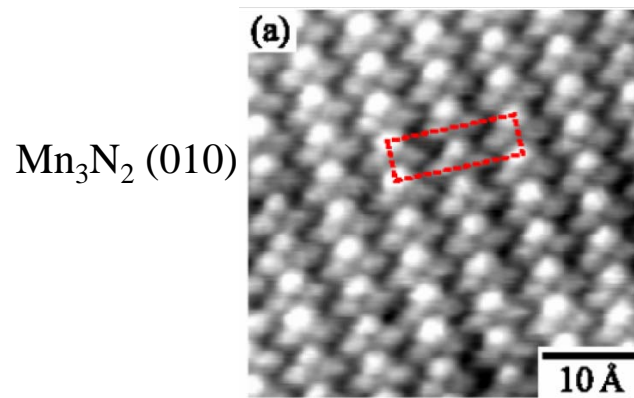
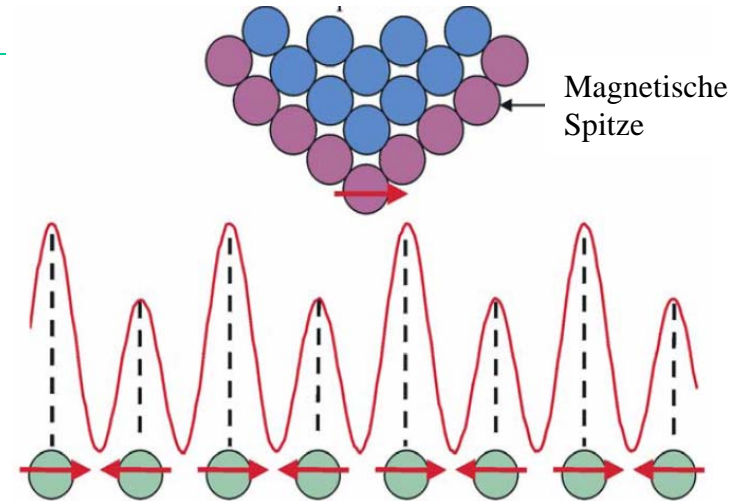
# Anwendung von Spin polarisierte Leitfähigkeit: Super-Spiegel



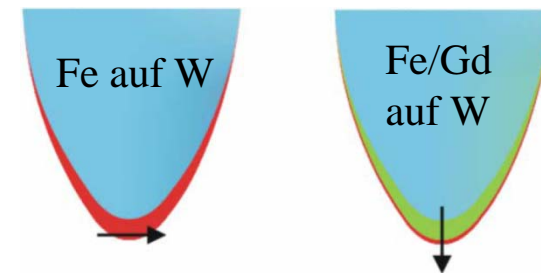
# Anwendung von Spin polarisierte Leitfähigkeit: Bilder von Magnetischen Flächen



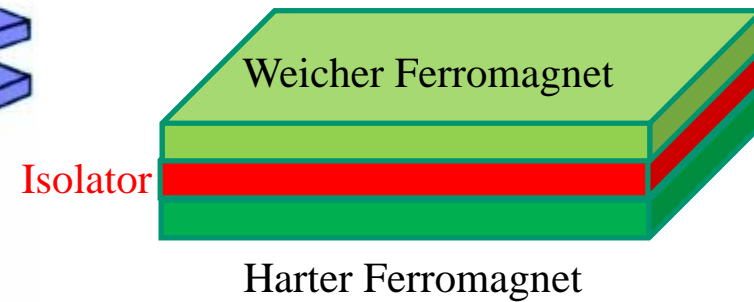
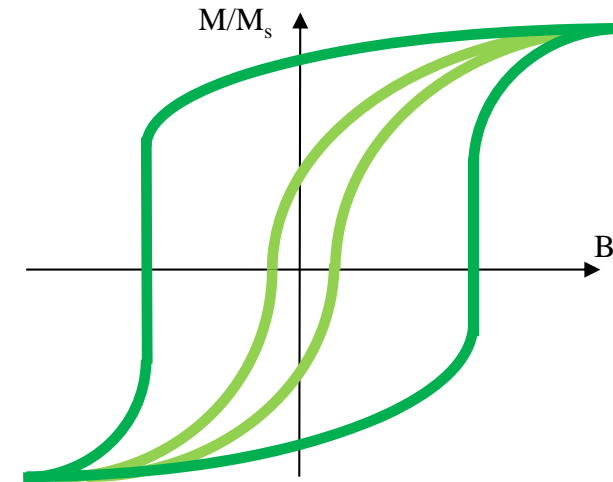
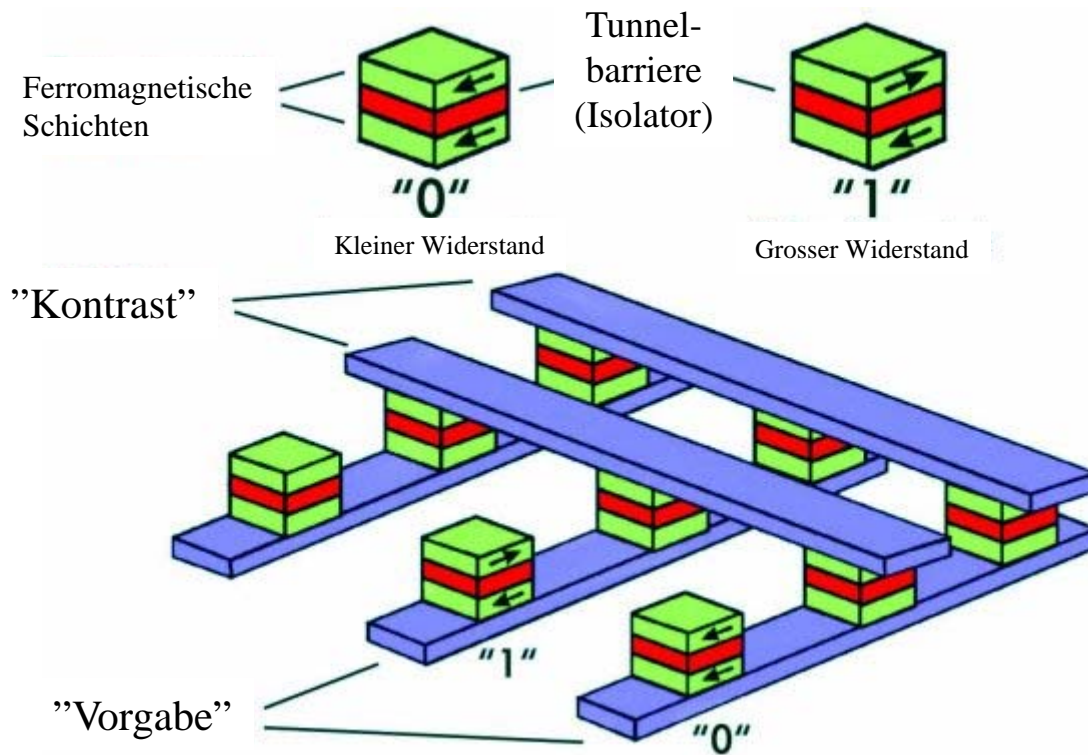
z.B. bei konstanter Spannung



$V_s = -0.3 \text{ V}$ ,  $I_t = 0.3 \text{ nA}$

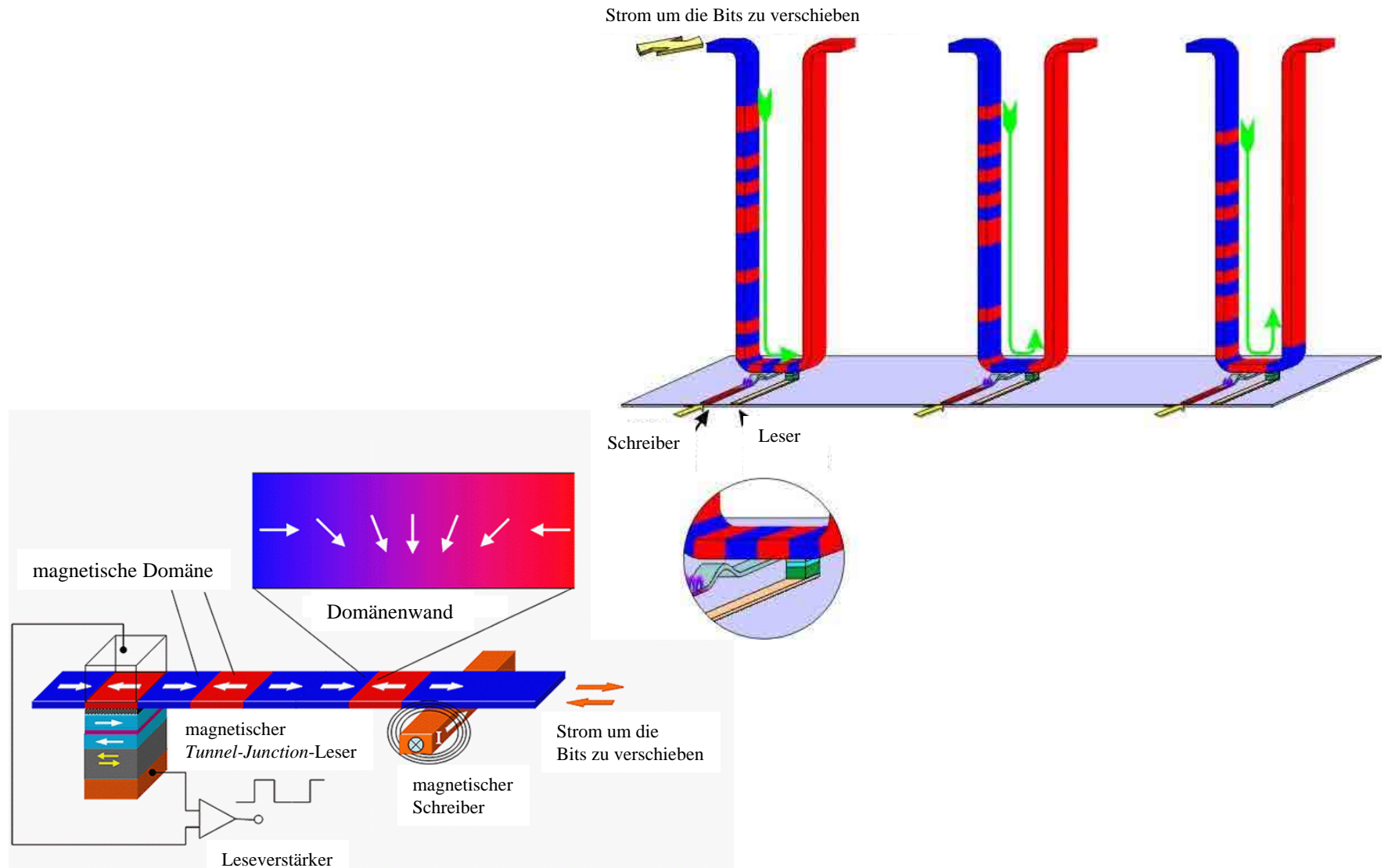


# Magnetoresistive Random Access Memory (MRAM)



Wie wird ein Bit geschrieben?  
und  
Wie wird ein Bit gelesen?

# Race-track-Speicher





# Zusammenfassung

- Der Spin vom Elektron ist der Grund dafür daß der elektrischer Widerstand vom magnetischen Feld abhängig ist – sogar auch anisotrop.
- Es gibt ferromagnetischen Materialien, die völlig polarisierte Elektronen auf der Fermi-Fläche haben d.h. die Leitungselektronen sind nur in eine Richtung polarisiert.
- Die Polarisation vom Elektron im Vergleich zur Umgebung ist der Grund für Unterschiede im elektrischen Widerstand.
- Kleine magnetische Verunreinigungen leisten Beiträge zum elektrischen Widerstand bei tiefen Temperaturen. Die magnetische Ionen werden mehr oder weniger von Leitungselektronen kompensiert (neutralisiert).
- Vorgeschriftene elektronische Bauteile werden mit dem magnetoresistiven Effekt verbessert.

Nächster Termin 6.7.2016  
Magneto–Elektricität und –Elasticität