

Übersicht über Kapitel 7

7. Oberflächenmagnetismus

7.1 Magnetokristalline Anisotropie

7.2 Exchange-Bias-Effekt

7.3 Magnetismus in verschiedenen Dimensionen

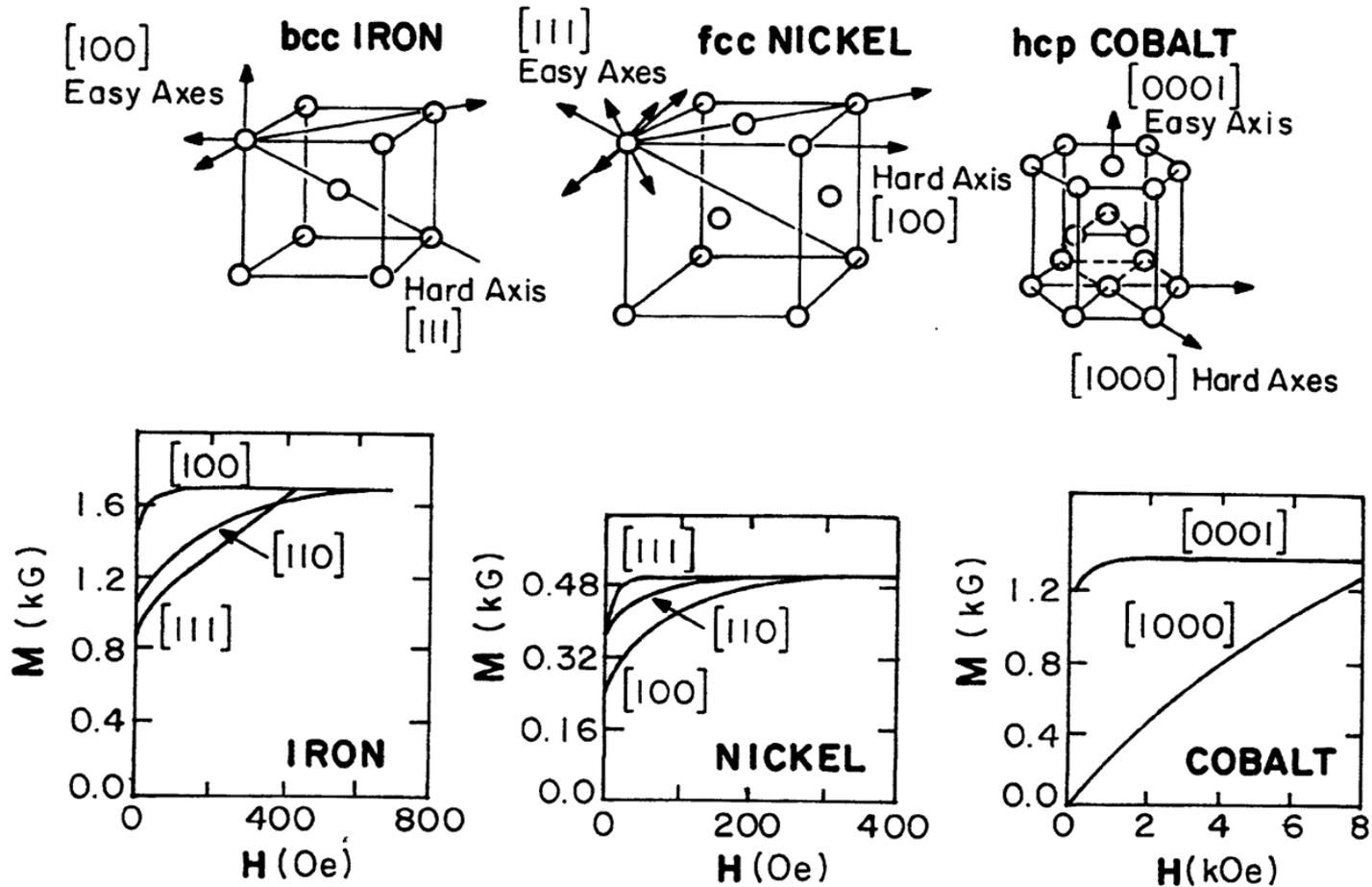
7.4 Ferromagnetische Domänen

7.5 Spinpolarisierte Rastertunnelmikroskopie

7.6 Magnetische Anregungen

7.1 Magnetokristalline Anisotropie

Leichte und harte Richtungen der Magnetisierung

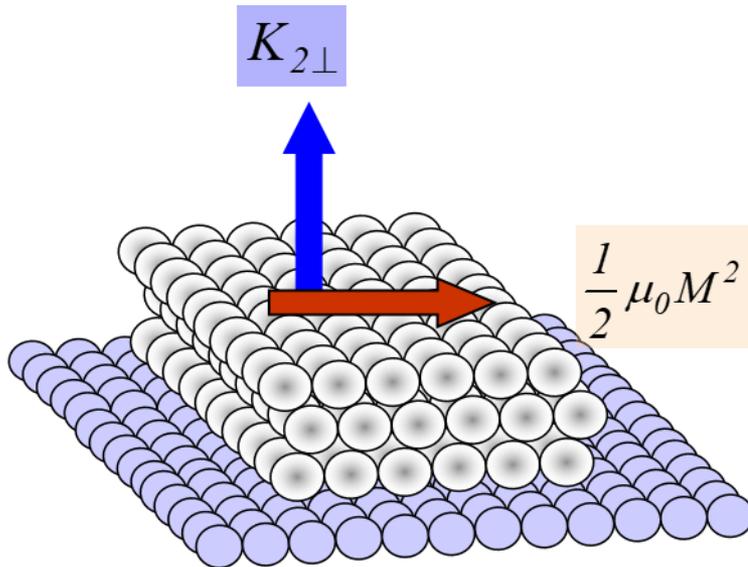


- Magnetisierungskurven zeigen Anisotropie.
- Leichte Richtung: Magnetisierung wird durch Anlegen eines kleinen Feldes ausgerichtet.
- Harte Richtung: Es wird ein großes Feld zur Sättigen der Probe benötigt.

7.1 Magnetokristalline Anisotropie

dünne Filme (quasi 2D-Systeme)

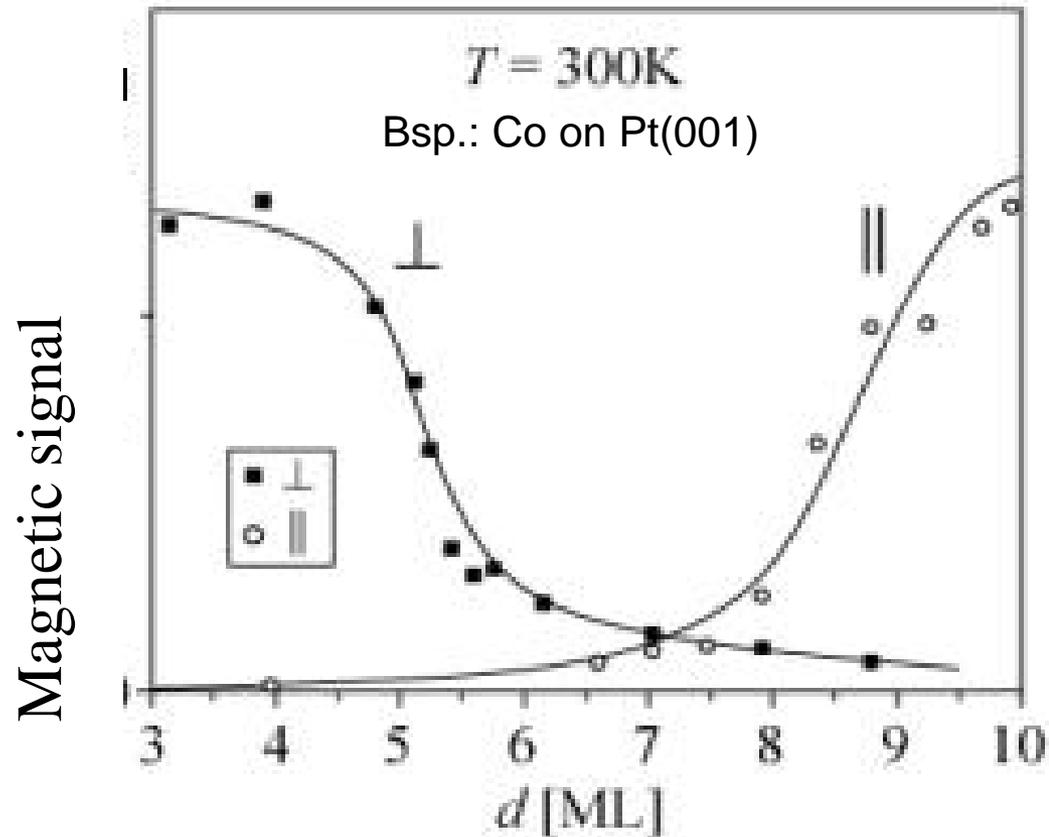
Einschränkung senkrecht zur Filmebene



$$\frac{1}{2}\mu_0 M^2 < K_{2\perp} \Rightarrow \text{out-of-plane}$$

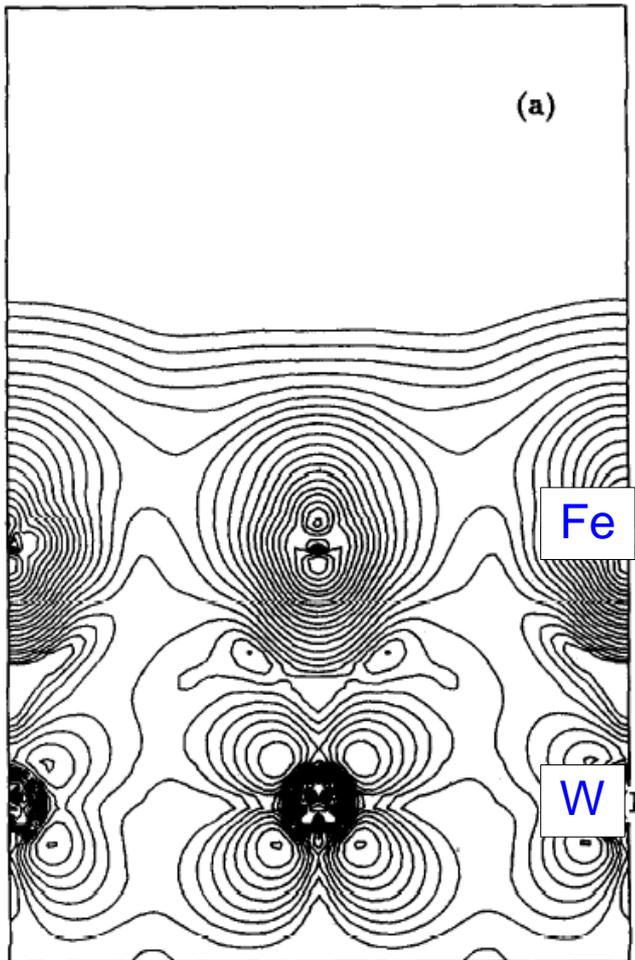
$$\frac{1}{2}\mu_0 M^2 > K_{2\perp} \Rightarrow \text{in-plane}$$

$$F = \left(\frac{1}{2}\mu_0 M^2 - K_{2\perp} \right) \cos^2 \theta$$



7.1 Magnetokristalline Anisotropie

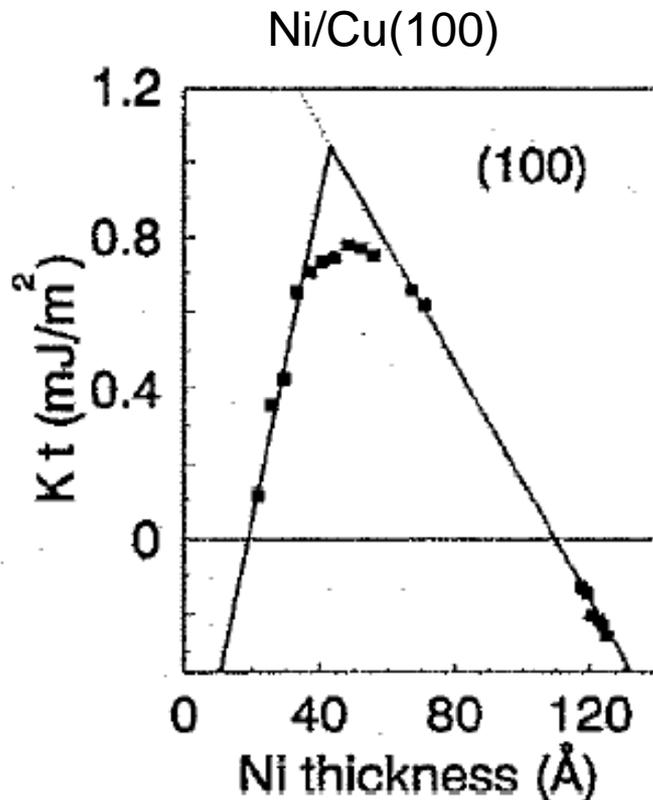
Oberflächen- und Grenzflächenanisotropie



- Lokale Zustandsdichte von Fe Atomen auf W zeigt Verzerrungen senkrecht zur Oberfläche.
- Über die Spin-Bahn Wechselwirkung koppelt das Spinnmoment an die Asymmetrie.
- Eine starke magnetische Oberflächenanisotropie resultiert.

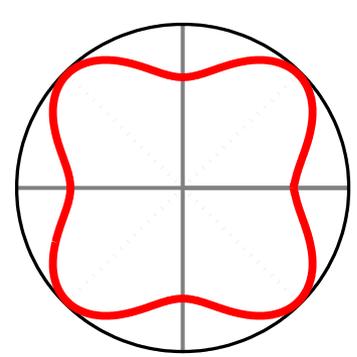
7.1 Magnetokristalline Anisotropie

Wechselspiel zwischen Oberflächen- und Volumenanisotropie

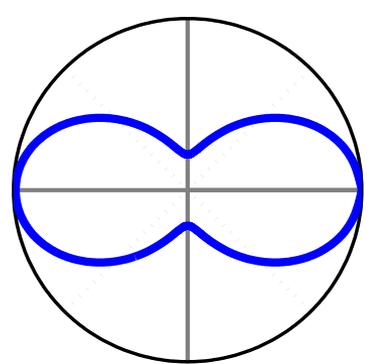


- Bei kleinen Schichtdicken dominiert die Oberflächenanisotropie.
- Oberhalb einer ersten kritischen Dicke von 2 nm dreht die leichte Richtung senkrecht zum Film aufgrund der magnetoelastischen Anisotropie.
- Ab 4 nm kommt es zur Versetzungsbildung und die magnetoelastische Anisotropie nimmt ab, bis schließlich die Form- und die Oberflächenanisotropie die Magnetisierung zurück in die Ebene ziehen.

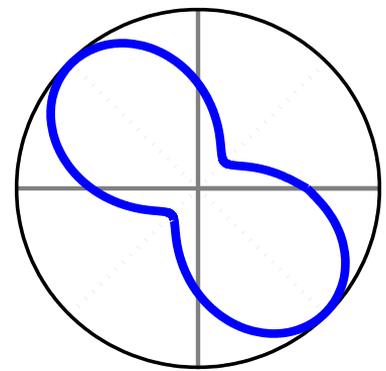
7.1 Magnetokristalline Anisotropie



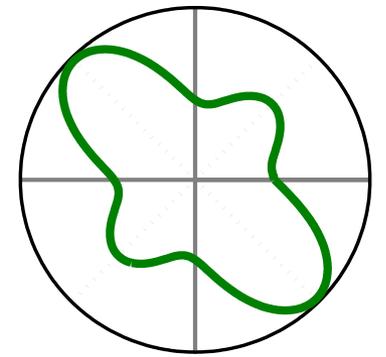
Kubisch Anisotropie



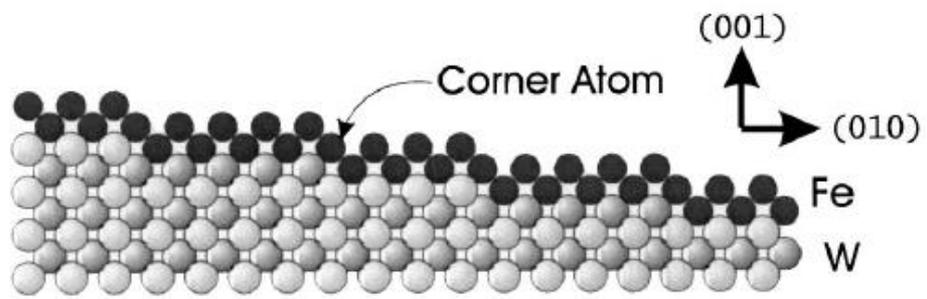
Uniaxial Anisotropie
Leichte Richtung \parallel $[010]$



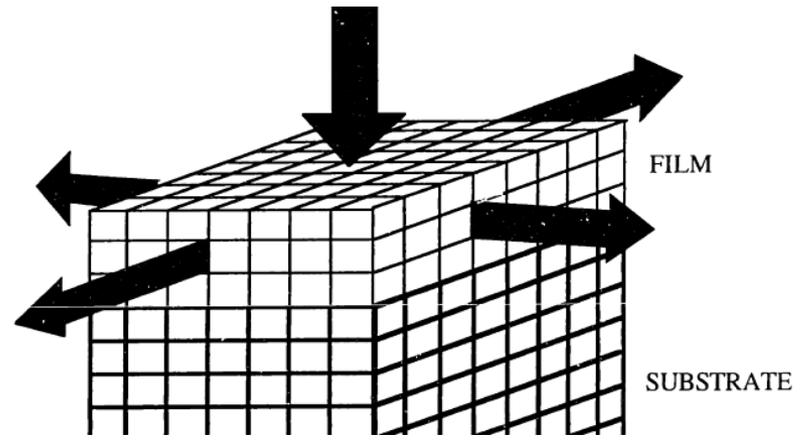
Uniaxial Anisotropie
Leichte Richtung \parallel $[110]$



Kubisch Anisotropie
+ Uniaxial Anisotropie



Step induced anisotropy

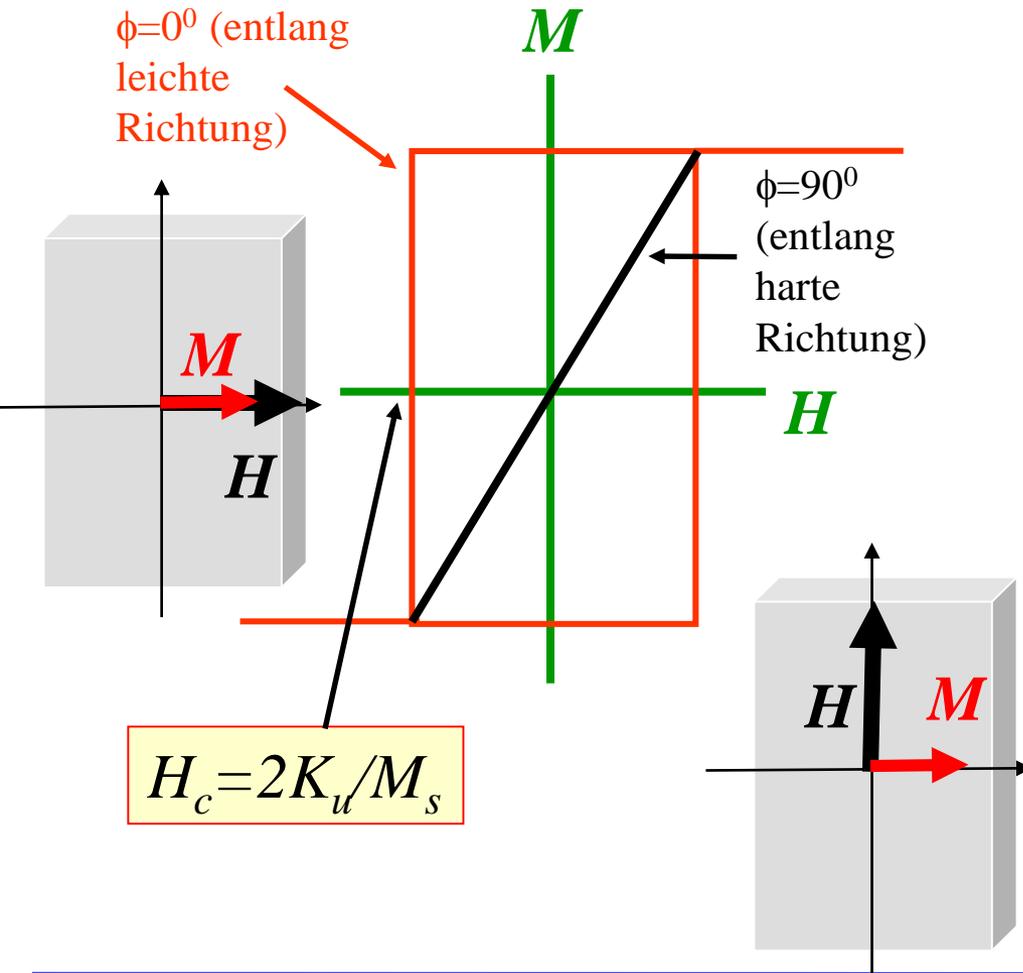


Strain induced anisotropy

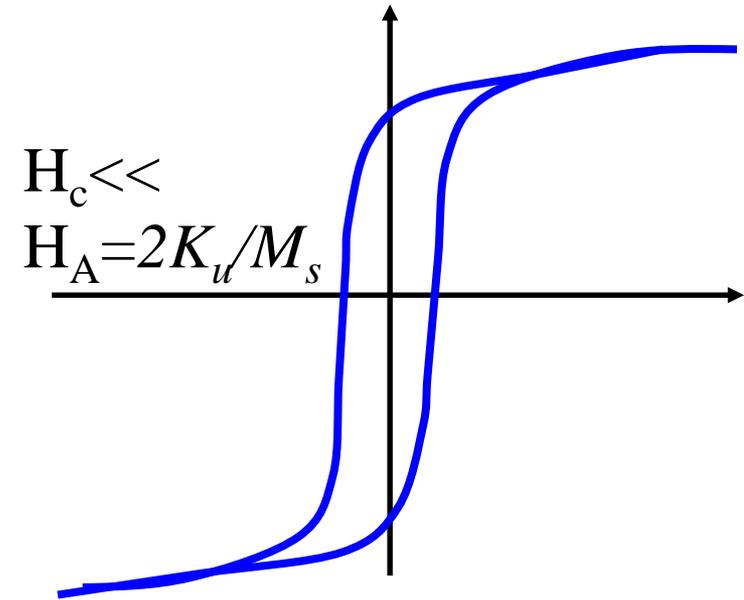
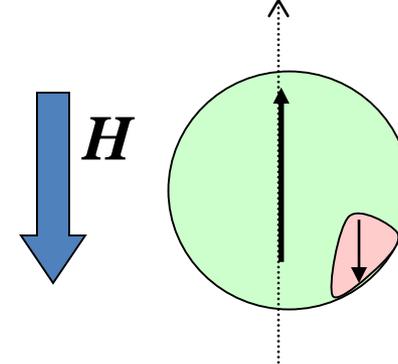
7.1 Magnetokristalline Anisotropie

Wie misst man die Magnetokristalline Anisotropie?

Hystereseschleifen, Magnetometrie

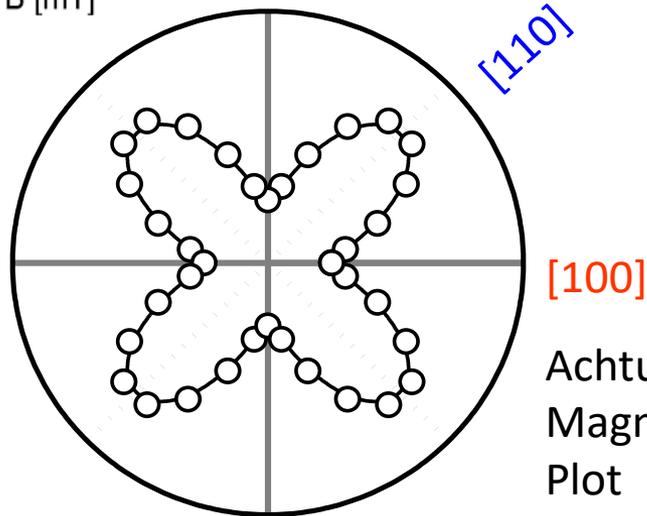
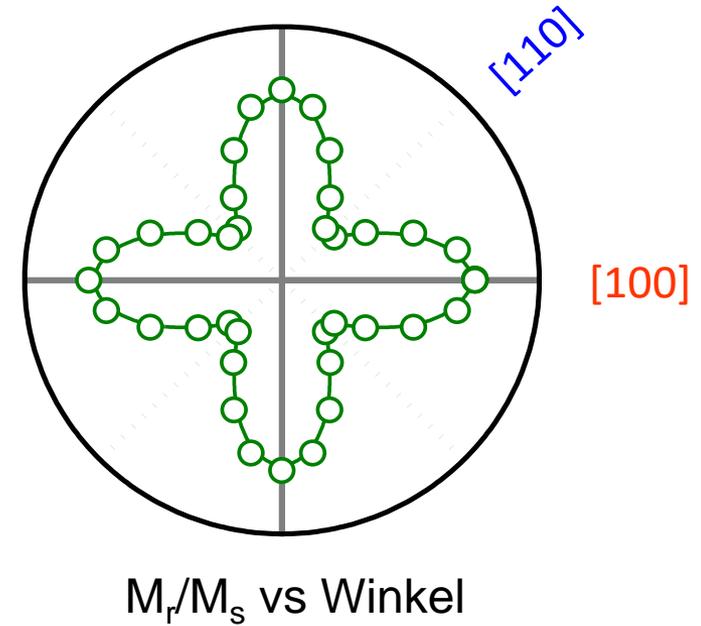
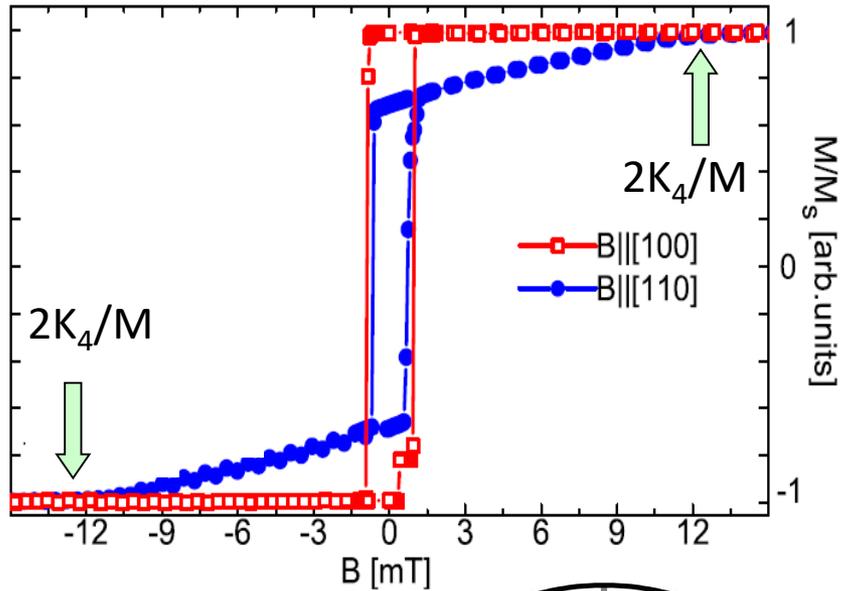


Achtung Defekte: Nukleation



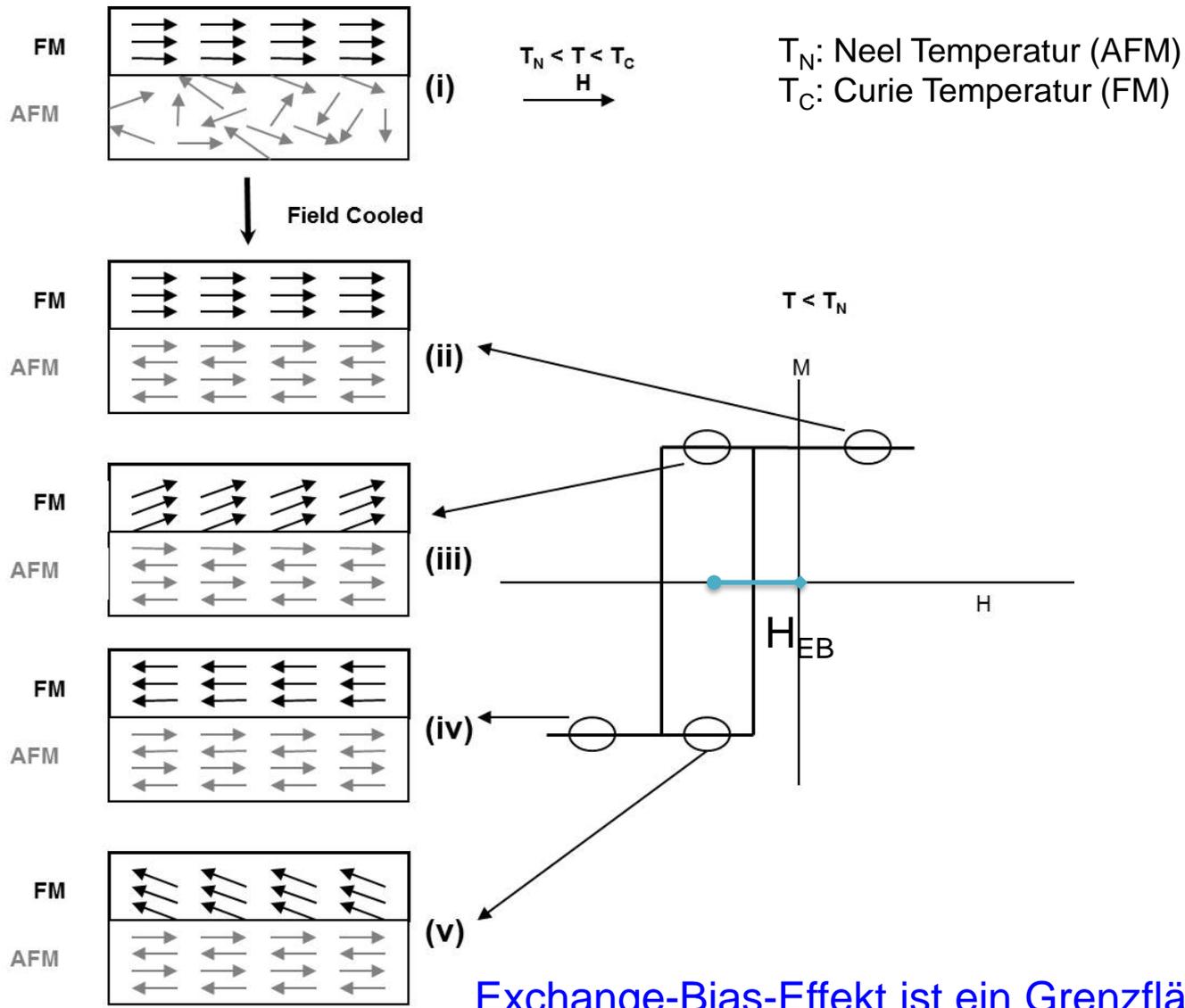
7.1 Magnetokristalline Anisotropie

Bsp.: Fe₃Si Schichten



Achtung!
Magnetokristalline Anisotropie
Plot

7.2 Exchange-Bias-Effekt

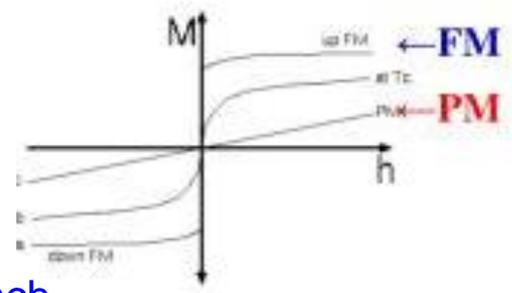
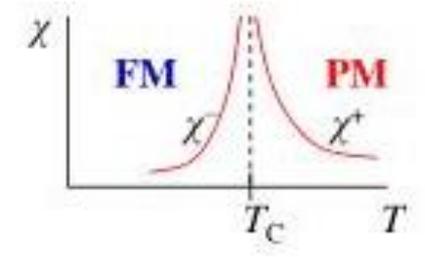
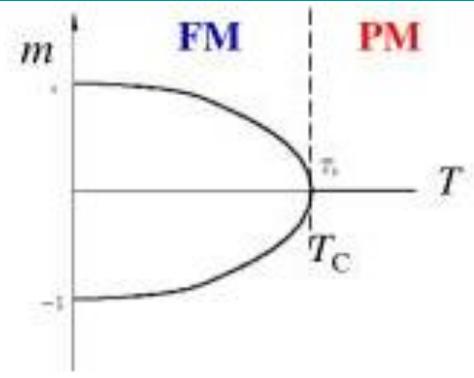


7.3 Magnetismus in verschiedenen Dimensionen

Thermodynamik der Ferromagnete

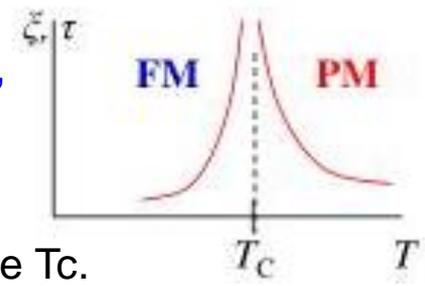
Kritische Exponent

- 1. Ordnungsparameter $m = t^\beta$ $t = T/T_C$
- 2. Suszeptibilität $\chi = t^\gamma$
- 3. Ordnungsparameter bei T_C $M_C = h^{1/\delta}$
- 1. Kohärenzlänge $\xi = t^{-\nu}$



Phasenübergang zwischen ferromagnetisch ($T < T_c$) und paramagnetisch ($T > T_c$).

Magnetische Phasenübergänge sind 2. Ordnung, d.h. M verschwindet kontinuierlich.



Kritische Exponenten beschreiben Verhalten nahe T_c .

7.3 Magnetismus in verschiedenen Dimensionen

Kritische Exponenten einiger Modellsysteme

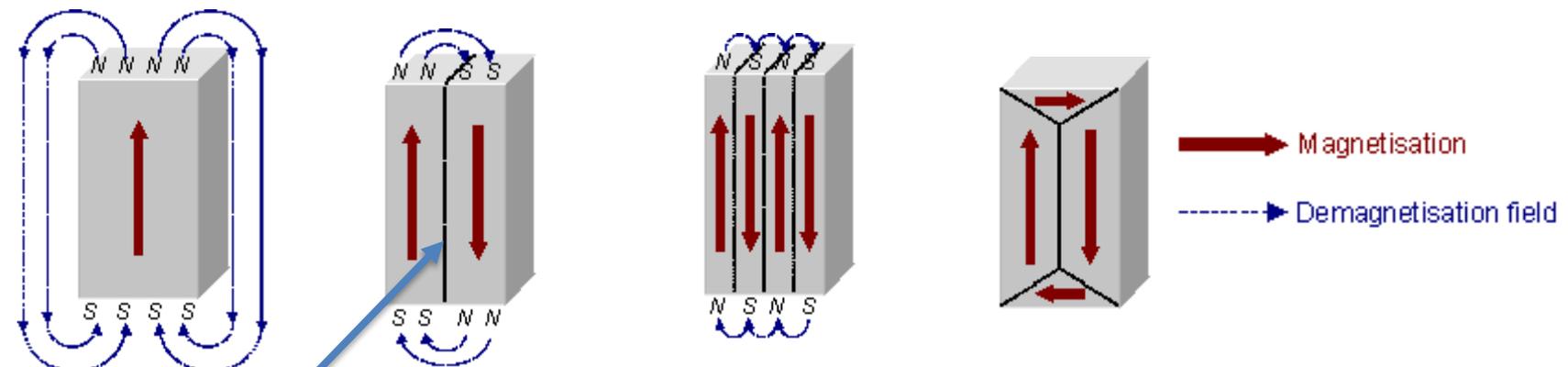
Ising : Spin entlang $\pm z$ Richtung
XY : Spin in der xy -Ebene
Heisenberg : Spin in jede Richtung
Landau : Klassische Theorie

Exponent	β	γ	δ	ν
Landau-Theory	0,5	1	3	0,5
2d-Ising	0,125	1,75	15	1
2d-XY	0,23	2,2	10,6	1,33
3d-Ising	0,325	1,240	4,816	0,630
3d-XY	0,345	1,316	4,810	0,669
3d-Heisenberg	0,365	1,387	4,803	0,705

7.4 Ferromagnetische Domänen

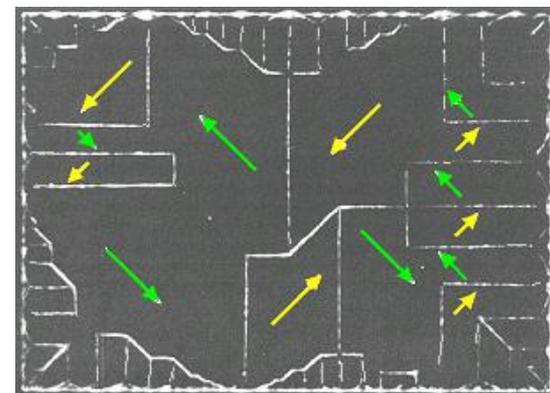
Obwohl ferromagnetische Materialien eine spontane Magnetisierung aufweisen, ist ohne äußeres Feld das Dipolmoment einer makroskopischen Probe in den meisten Fällen zu vernachlässigen.

Magnetische Domänen entstehen, weil sie die Streufelder außerhalb der Probe und damit die magnetische Feldenergie reduzieren.



Domain Wand

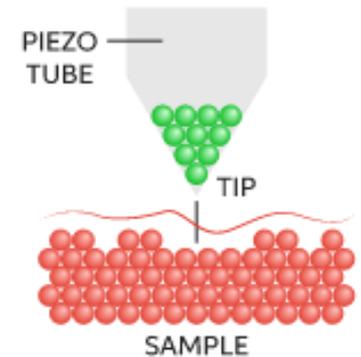
Ni Schicht



7.5 Spinpolarisierte Rastertunnelmikroskopie

- Die Elektronen tragen einen Spin S von $1/2$.
Sz bleibt beim Tunneln erhalten.
- Das magnetische Moment eines Atoms ist vom Bahn- und insbesondere vom Spinmoment des Atoms abhängig.

23V 50.94 3 + 3d ²	24Cr 52.00 3 + 3d ³ 312	25Mn 54.94 2 + 3d ⁵ 96	26Fe 55.85 3 + 3d ⁵ 1043	27Co 58.93 2 + 3d ⁷ 1390	28Ni 58.69 2 + 3d ⁸ 629	29Cu 63.55 2 + 3d ⁹	30Zn 65.38 2 + 3d ¹⁰
41Nb 92.91	42Mo 95.94	43Tc 97.90	44Ru 101.1	45Rh 102.9	46Pd 106.4	47Ag 107.9	48Cd 112.4



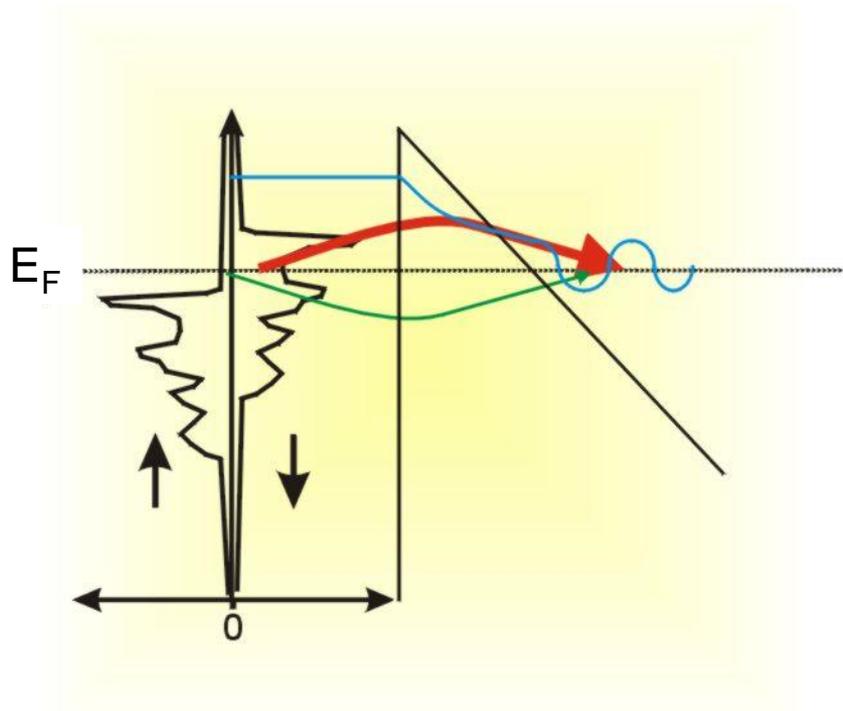
- In itineranten Ferromagneten und Antiferromagneten resultiert das magnetische Moment aus einem Überschuss von Majoritätselektronen.
- Die Atome sind spinpolarisiert.

Können die Zustandsdichte und die Spinpolarisation mittels RTM abgebildet werden?

- Dies würde eine magnetische Abbildung mit atomarer Auflösung ermöglichen.
- Ein solches spinpolarisiertes RTM könnte auch antiferromagnetische Strukturen abbilden.

7.5 Spinpolarisierte Rastertunnelmikroskopie

Feldemission aus einem Ferromagneten



- Zustandsdichte des Ferromagneten spaltet in Majoritäts- und Minoritätsladungsträger auf.
- Bei der Feldemission tunneln Elektronen nahe der Fermikante aus der Elektrode durch die Potentialbarriere der Austrittsarbeit in freie Vakuumzustände.
- Die Spinpolarisation der Zustandsdichte wird in der Spinpolarisation der emittierten Elektronen wiedergespiegelt.

7.5 Spinpolarisierte Rastertunnelmikroskopie

Jullière's Experiment

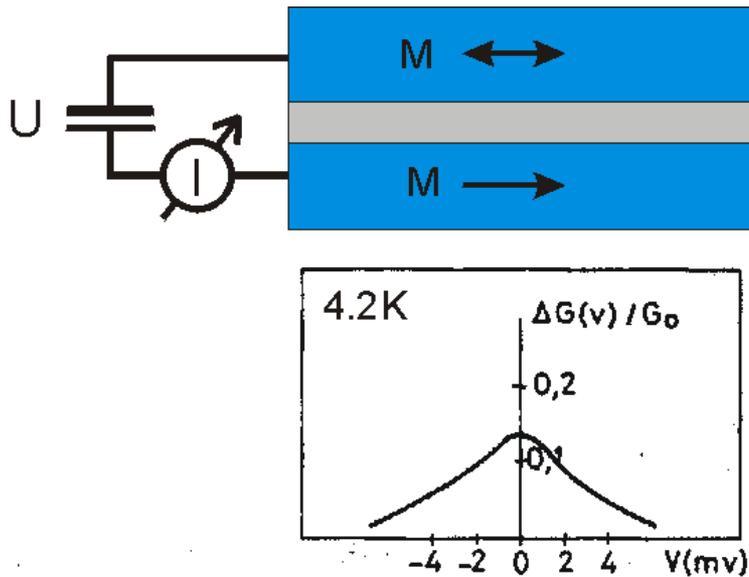


Fig. 2. Relative conductance $(\Delta G/G)_{V=0}$ of Fe-Ge-Co junctions at 4.2K. ΔG is the difference between the two conductance values corresponding to parallel and antiparallel magnetizations of the two ferromagnetic films.

- Der Widerstand des Tunnelkontakts ist nicht nur eine Funktion der Spannung sondern auch der relativen Ausrichtung der Magnetisierung beider Elektroden.
- Jullière fand einen 14% kleineren Widerstand für parallele Ausrichtung als für antiparallele.

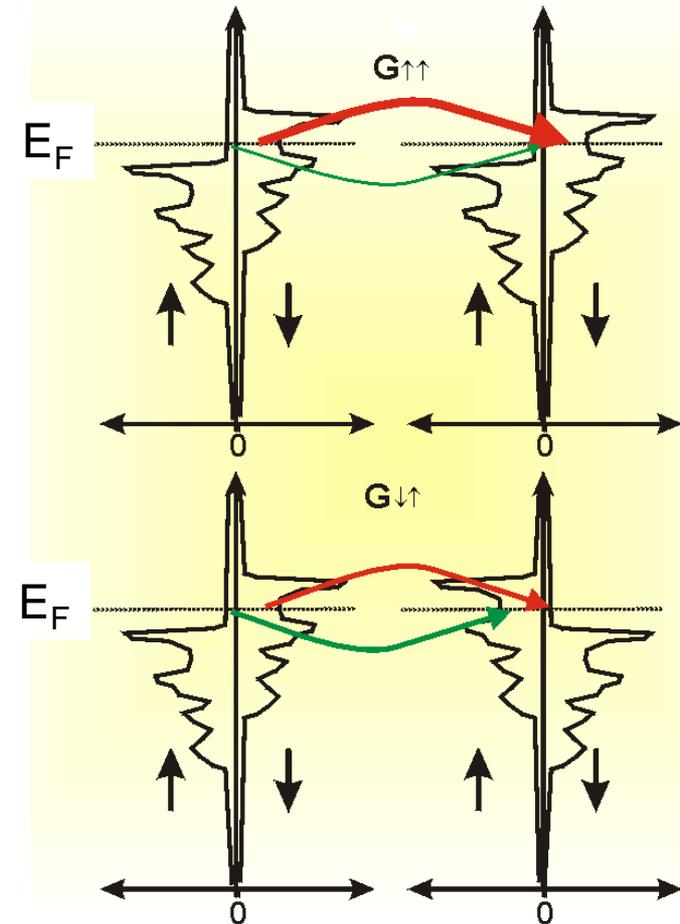
Das Jullière Modell

- Abhängig von der relativen Orientierung tunneln Majoritäts- bzw. Minoritätselektronen in unbesetzte Zustände gleichen (parallel) oder umgekehrten (antiparallel) Spins.
- Der TMR resultiert aus verschiedenen Zustandsdichten und Fermi's goldener Regel.

$$\text{Leitfähigkeit: } G = G_0 (1 + P_1 P_2 \cos\theta)$$

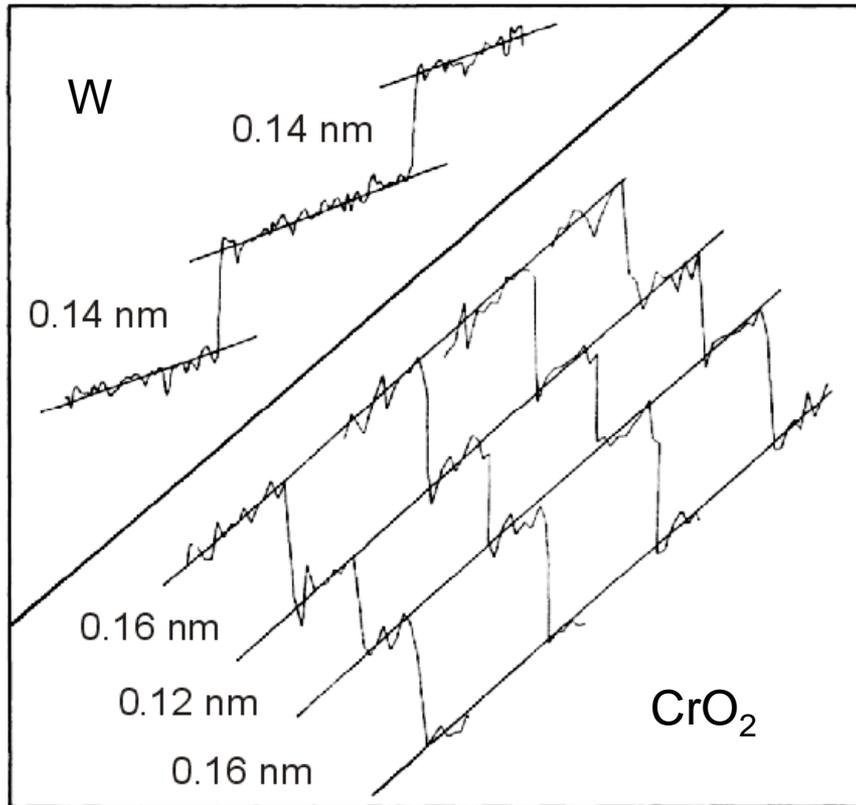
Theorie : J.C. Slonczewski, PRB 39, 6995 '95

Experiment : T. Miyazaki et al. JMMM 139, L231 '95

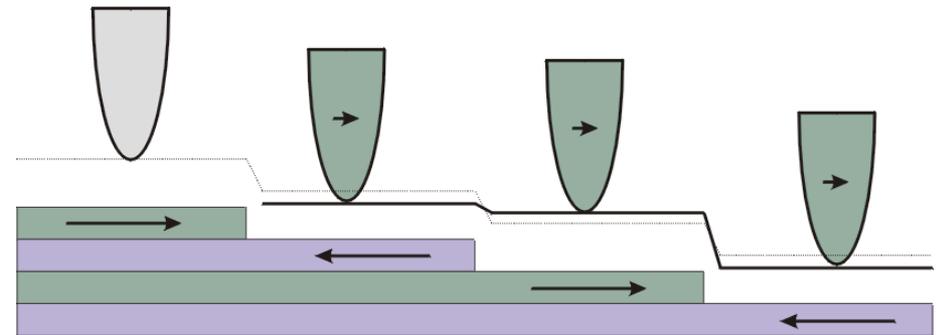


7.5 Spinpolarisierte Rastertunnelmikroskopie

Die Cr(001) Oberfläche



Cr(001) ist ein lagenweiser Antiferromagnet



Mit unmagnetischen W Spitzen wird eine Stufenhöhe von 1.4 Å beobachtet. Mit magnetischen CrO₂ Spitzen werden alternierend 1.6 und 1.2 Å hohe Stufen beobachtet.

Es entsteht ein zusätzlicher, topographischer Kontrast aufgrund der Spinpolarisation.

Wiesendanger et al., PRL 65, 247 (1990)

Vorteile

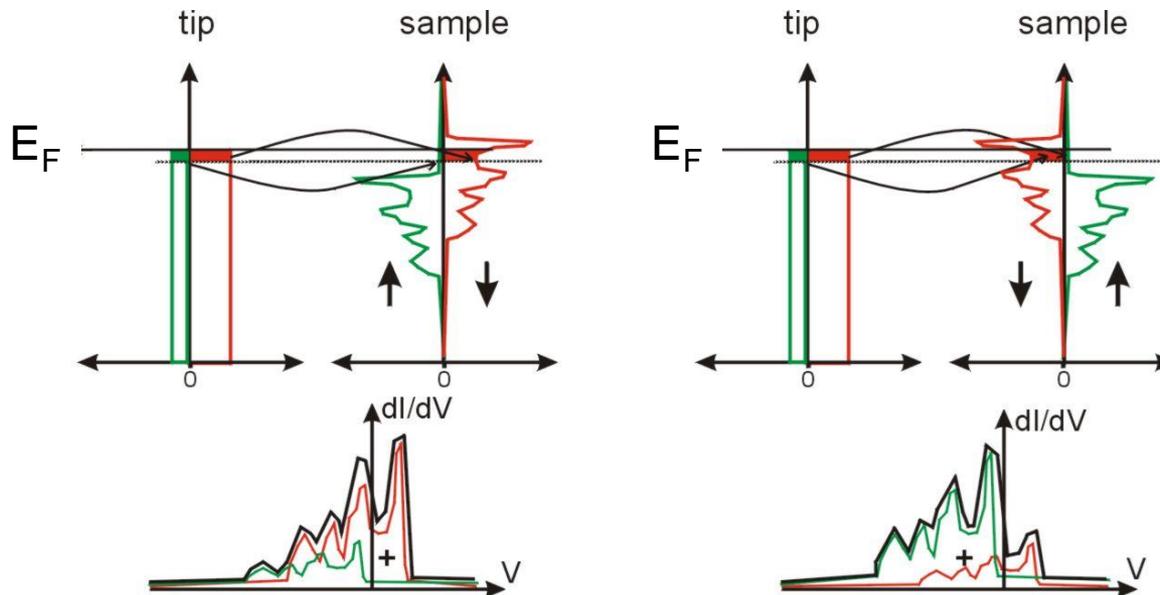
- einfacher Abbildungsmodus
- Braucht lediglich eine spinpolarisierte Spitze
- Atomare Auflösung wurde gezeigt
- Messung im Magnetfeld möglich

Nachteile

- keine Trennung von Spin und Topographie
- Nur kleine Variationen der Topographie aufgrund des Spins
- Hochstabiles RTM wird benötigt
- Abbildungsmodus wurde nur bei Antiferromagneten verwendet
- Wegen Benutzung einer bedampften Spitze ist die Richtung der Spitzenmagnetisierung und damit die sensitive Komponente des Spins unbekannt.

7.5 Spinpolarisierte Rastertunnelmikroskopie

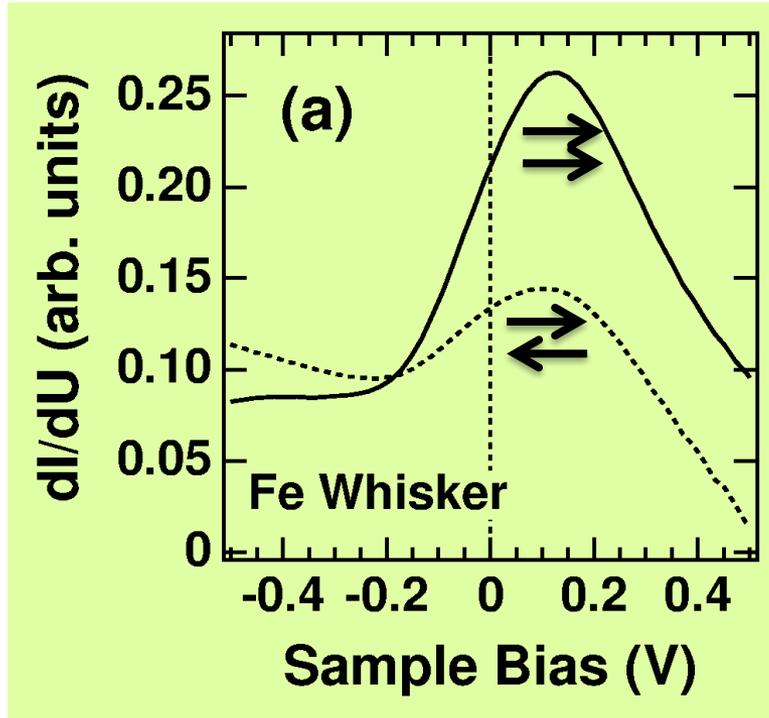
Spinpolarisierte Rastertunnelspektroskopie (Sp-STS)



- Im Tersoff-Hamman Modell hat die Spitze eine s-Wellenfunktion mit konstanter Zustandsdichte für beide Spins.
- In Abhängigkeit der relativen Orientierung der Magnetisierungen sind die gemessenen dI/dV Spektren eine Linearkombination aus Majoritäts- und Minoritätszustandsdichten der Probe.
- Eine Komponente der Probenmagnetisierung kann aus den Spektren konstruiert werden.

M. Bode et al. PRL 81, 4256 (1998)

Sp-STS mit Fe bedampften W Spitzen auf Fe(001)

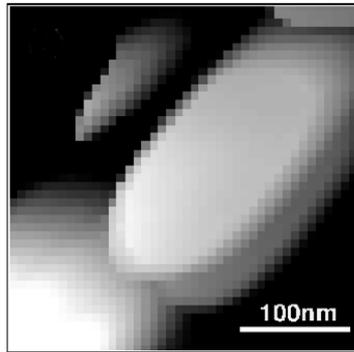


- Der Minoritätsoberflächenzustand von Fe(001) bei 130 mV wird als Maximum in der differentiellen Leitfähigkeit beobachtet.
- Sp-STS wurde auf beiden Seiten des Fe Kristalls durchgeführt, die durch eine 180° Domänenwand getrennt sind.
- Intensität des Maximums variiert aufgrund des TMR Effekts.

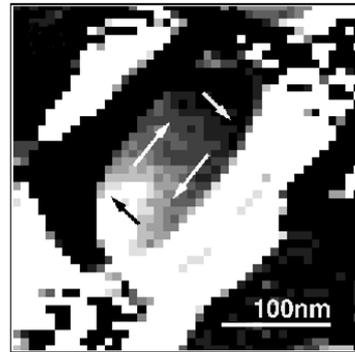
Höhe des Maximums bei 130mV kann zur magnetischen Abbildung von Domänen in Fe(001) genutzt werden.

7.5 Spinpolarisierte Rastertunnelmikroskopie

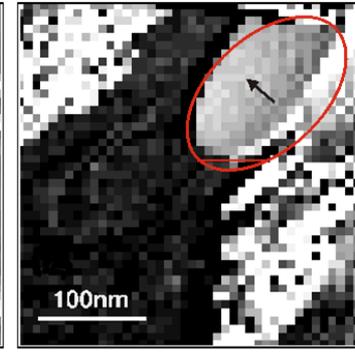
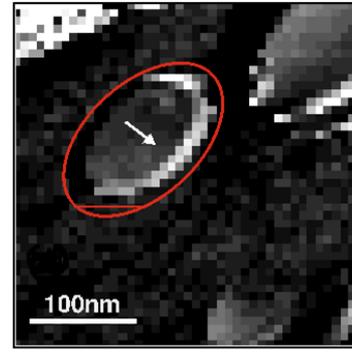
Topographie



Fe/W(100)
Spin



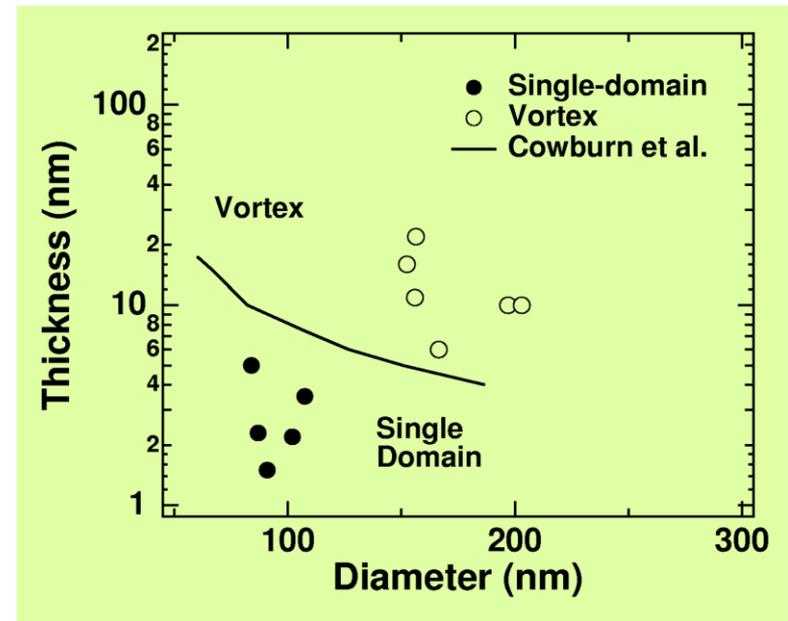
Spin in kleinen Inseln



- Große Inseln zeigen Domänen.
- Kleine Inseln sind eindomänig.

Experimentelles Phasendiagramm

- Erste direkte Beobachtung der Eindomänengrenze
- Gute Übereinstimmung mit analytischen Modellen



Yamasaki et al, PRL 91, 127201 (2003)

7.5 Spinpolarisierte Rastertunnelmikroskopie

Antiferromagnetische Spitzen

- Antiferromagnetische Spitzen haben praktisch kein Dipolstreufeld.
- Im Tersoff-Hamann Modell ist nur die Spinpolarisation des letzten Atom ausschlaggebend.

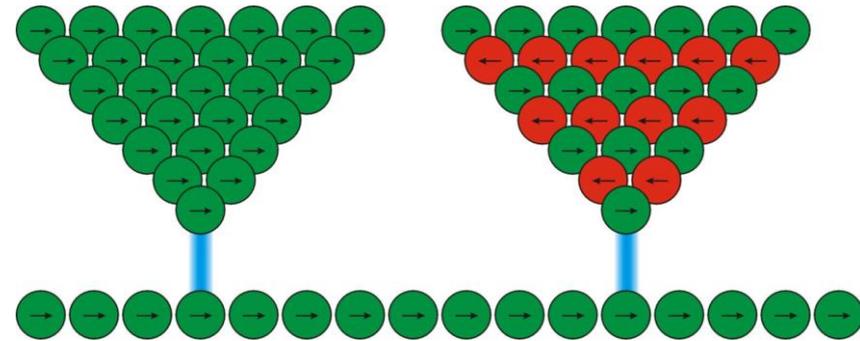
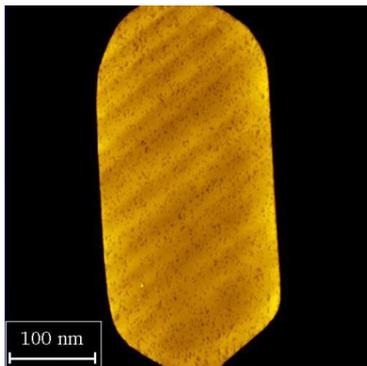
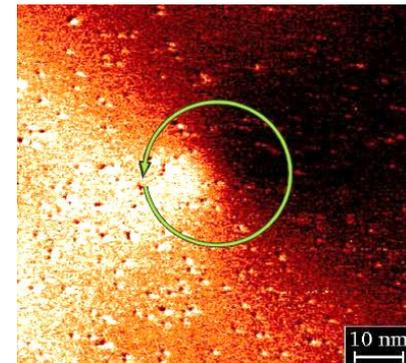
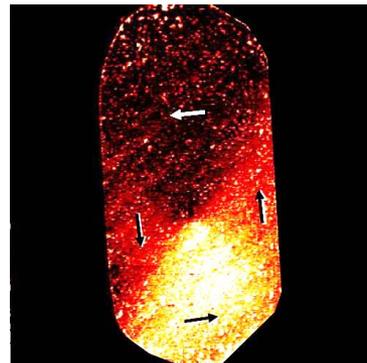


Abbildung des Vortexkerns mit antiferromagnetischen Spitzen

Fe/W(110)



Sp-STS mit Cr beschichteten Spitzen



- Hohe Auflösung ohne Streufeld der Spitze
- Struktur des Vortexkerns aufgelöst

Wachowiak et al. Science 298, 577 (2002)

Vorteile

- Beschichtete Spitzen (z.B. Fe für in der Ebene und Gd für senkrecht)
- Besser als 1nm Auflösung
- Kann im Magnetfeld verwendet werden
- Spininformation kann absepariert werden
- Antiferromagnetische Spitzen vermeiden ein Streufeld
- Methode findet bei Ferromagneten und Antiferromagneten Anwendung

Nachteile

- Topographie enthält Spininformation
- Homogene Zustandsdichte wird benötigt
- Referenzmessungen mit unmagnetischen Spitzen sind nötig
- Bilder zeigen auch Kontrast nicht magnetischen Ursprungs
- Beschichtete Spitzen erlauben nur eingeschränkte Kontrolle der Richtung der Spitzenmagnetisierung

7.6 Magnetische Anregungen

What makes the dynamics so important?



Time is one of the most important concepts in physics. Without dynamics we would have not been able to discover many effects.

Why excitations are important?

Ground state(s) → Some properties

Excited state(s) → Properties which are not accessible by investigating only the ground state

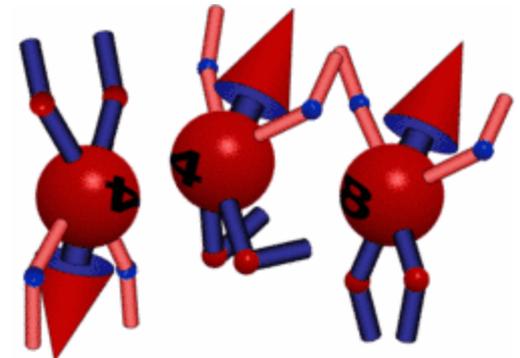
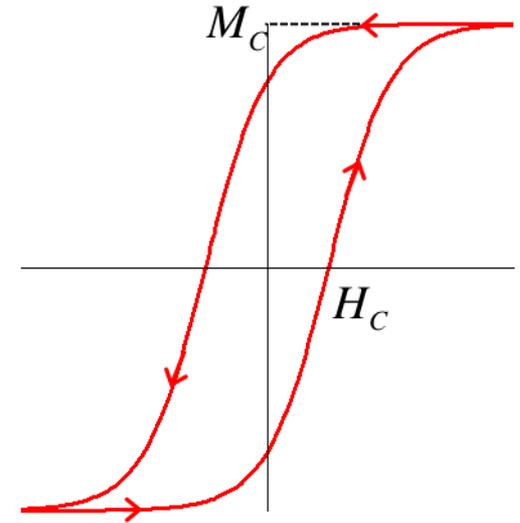
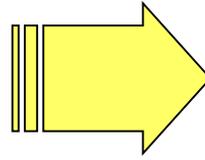
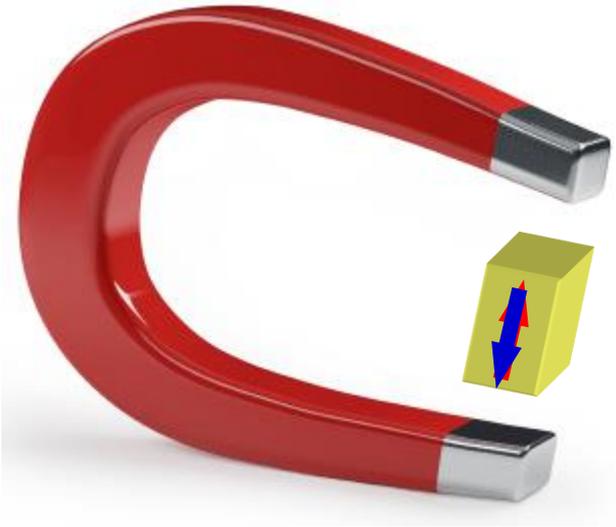


Figure source:

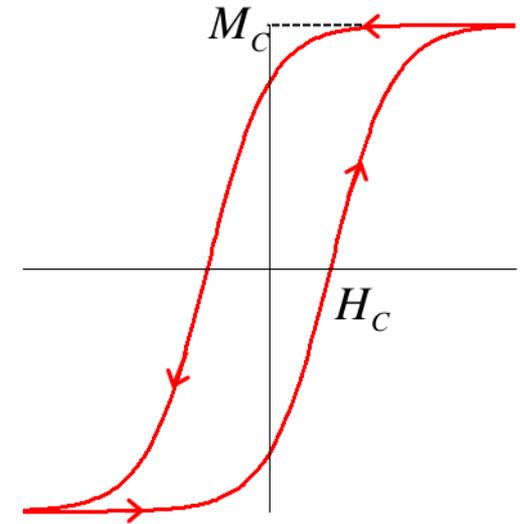
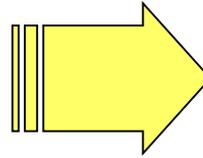
<http://www.mpie.de/index.php?id=2423>

What makes the dynamics so important?



Only the “static properties”

What makes the dynamics so important?



Only the “static properties”

How fast is this process?!

Can it be faster?

What is the ultimate time scale of this process?

How does the switching happen?

Is there any other way to make the switching faster?

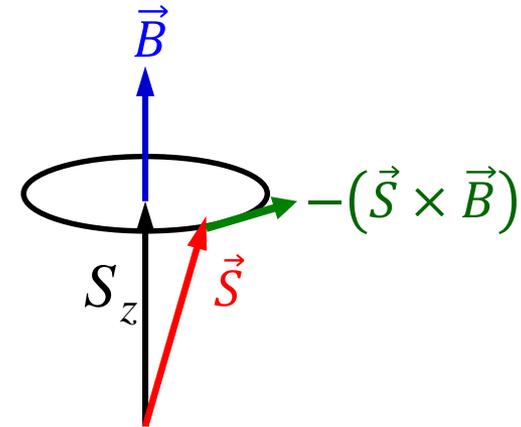
The magnetic recording and magneto-electronic technologies push toward operation in giga- or even tera-hertz regime.

Faster device performance needs reducing the device dimensions and understanding the processes in pico- or femto-second time scales.

$$\vec{\tau} = \vec{S} \times \vec{B}$$

$$\vec{\tau} = \frac{\partial \vec{L}}{\partial t}$$

$$\frac{\partial \vec{S}}{\partial t} = -\gamma(\vec{S} \times \vec{B})$$



- For NMR: nuclear spins, e.g. protons $\gamma = 43 \text{ MHz/T}$
- For ESR, FMR, AFMR: electronic spins, $\gamma = 28 \text{ GHz/T}$

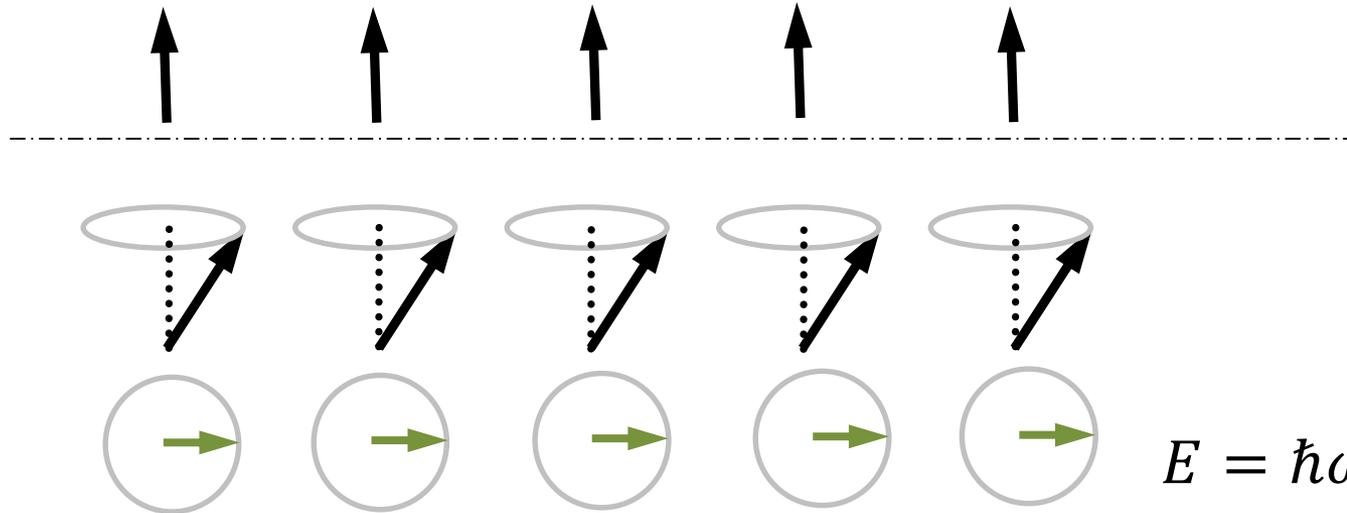
Equation of motion:

$$\frac{1}{\gamma} \frac{\partial \vec{S}}{\partial t} = -(\vec{S} \times \vec{B}) + \vec{R}$$

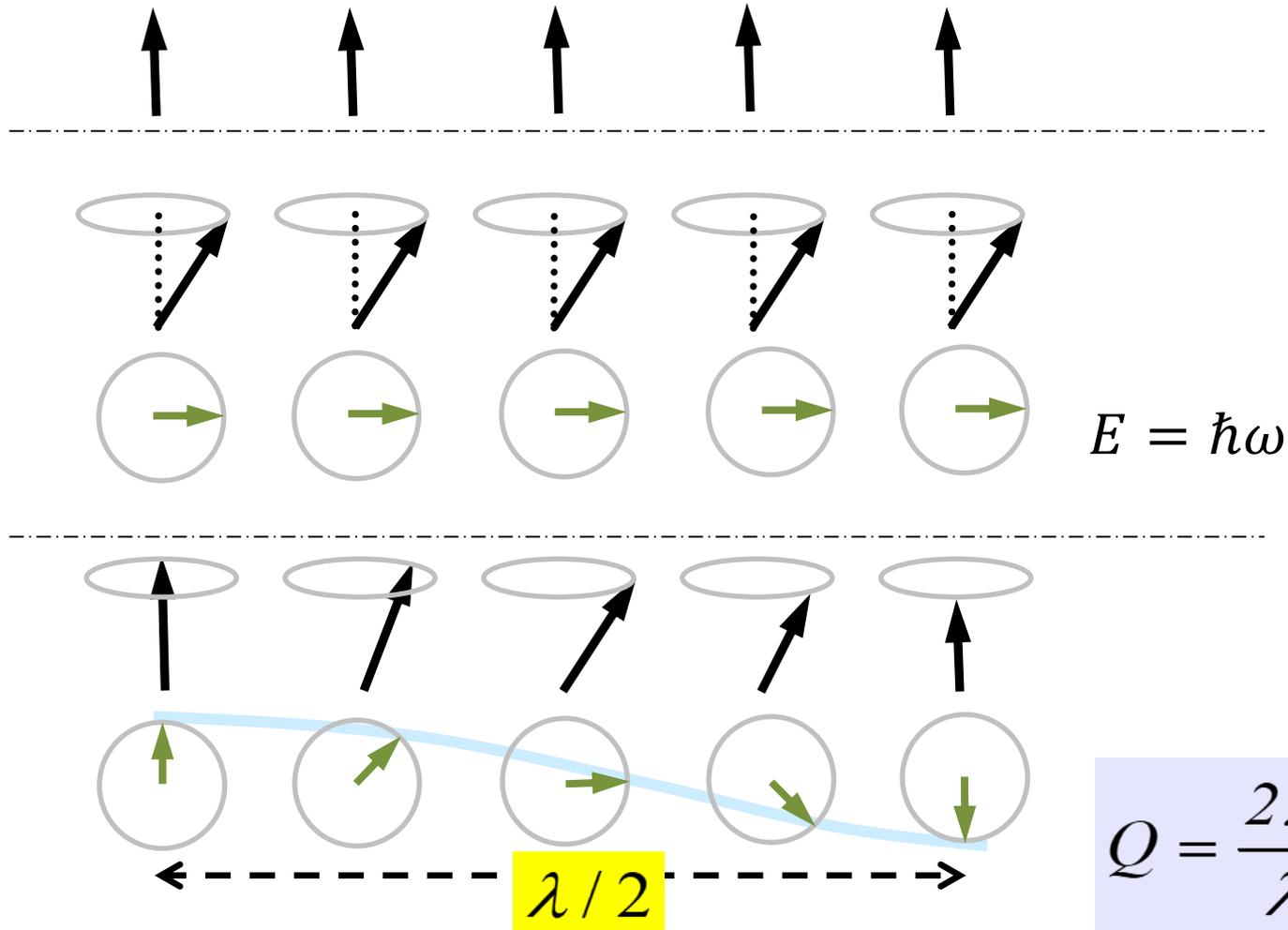
$$\mathcal{H} = -g\mu_B \vec{B} \cdot \vec{S}$$

Precession torque Damping torque

Magnetic excitations: Classical description



Magnetic excitations: Classical description

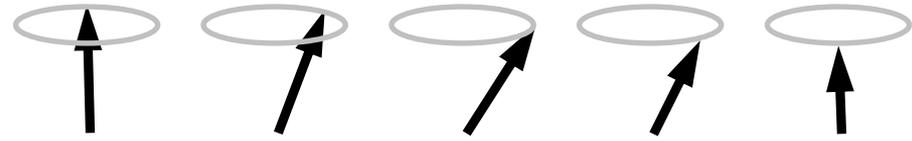
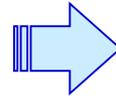


$$\mathcal{H} = \mathcal{H}_B + \mathcal{H}_{An} + \mathcal{H}_{Ex} + \mathcal{H}_{DM} + \mathcal{H}_{Dip}$$

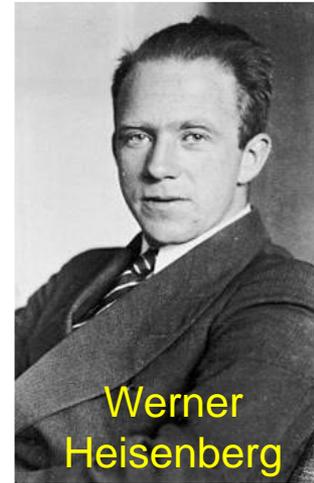
Spin waves: Classical explanation



Ground state



Excited state



Werner Heisenberg

Heisenberg Hamiltonian

$$-\sum_{i \neq j} J_{ij} \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j$$

J exchange coupling constant
 S magnitude of the spin

$$E = -g\mu_B \vec{B} \cdot \vec{S}$$

$$\vec{\tau} = \vec{S} \times \vec{B}$$

$$\vec{B}_{ij} = \sum_j \frac{2J}{g\mu_B} \vec{S}_j$$

nearest neighbor interaction (NNH)

dispersion law:

$$\hbar\omega = 4JS(1 - \cos Qa) \approx 2JSa^2 Q^2 = DQ^2$$

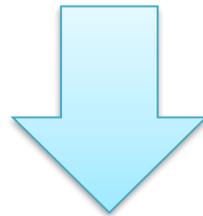
Q wave vector
 a lattice constant
 D spin-wave stiffness
 B external magnetic field

with external magnetic field:

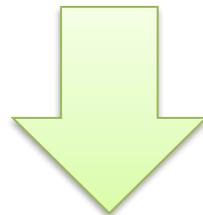
$$\hbar\omega \approx g\mu_B B + 2JSa^2 Q^2$$

- Spin-waves \rightarrow many particles collective excitations
- Magnon carries: energy $\hbar\omega$, momentum Q and spin $1\hbar$

How one can measure the dispersion of spin-waves experimentally?



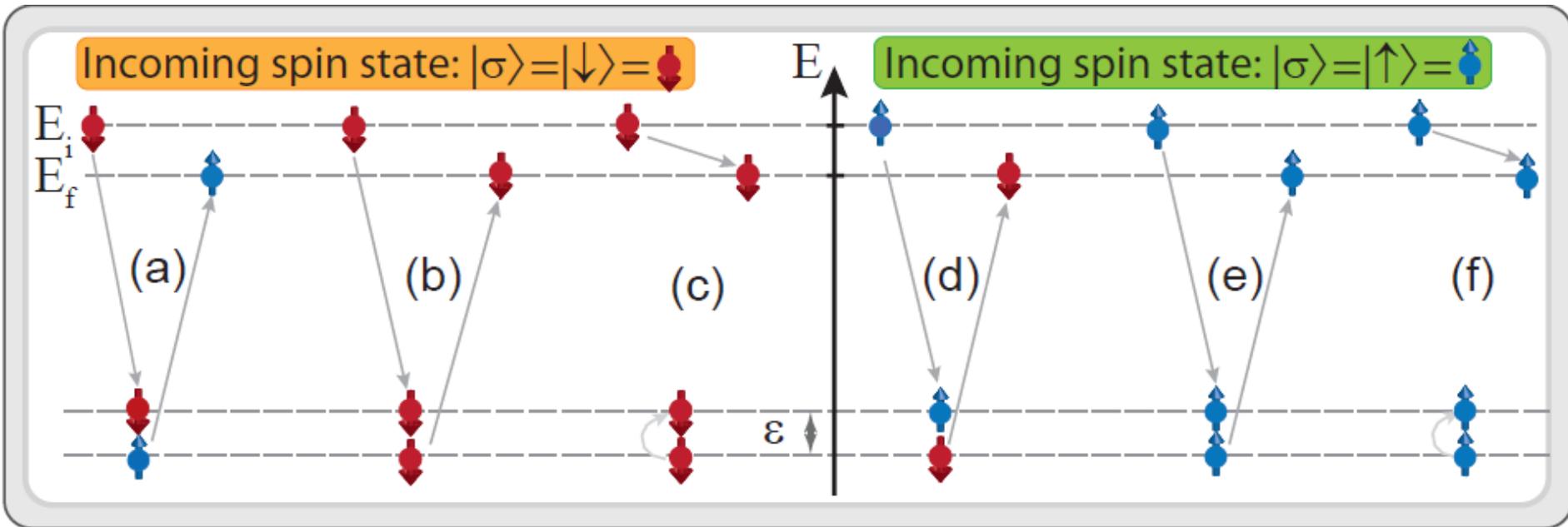
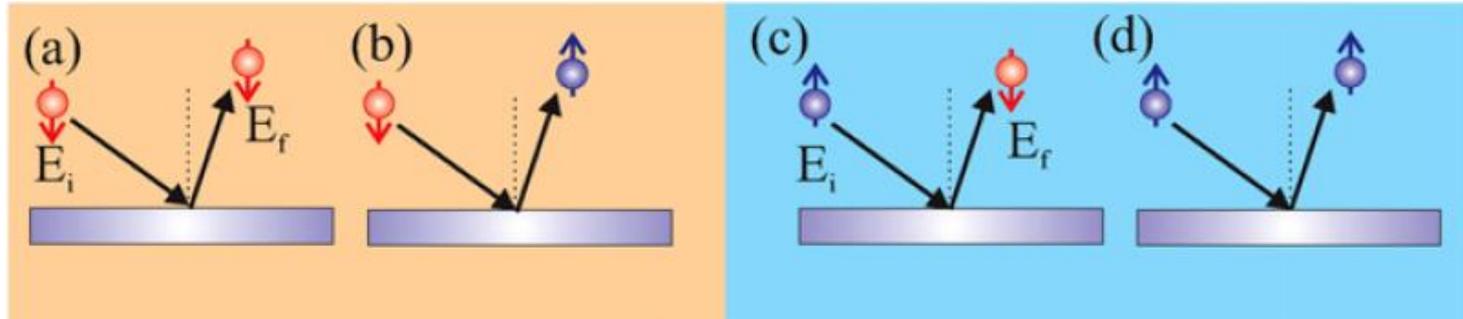
One may use spin-polarized electrons to excite and probe the surface spin-waves (inelastic scattering of spin-polarized electrons)



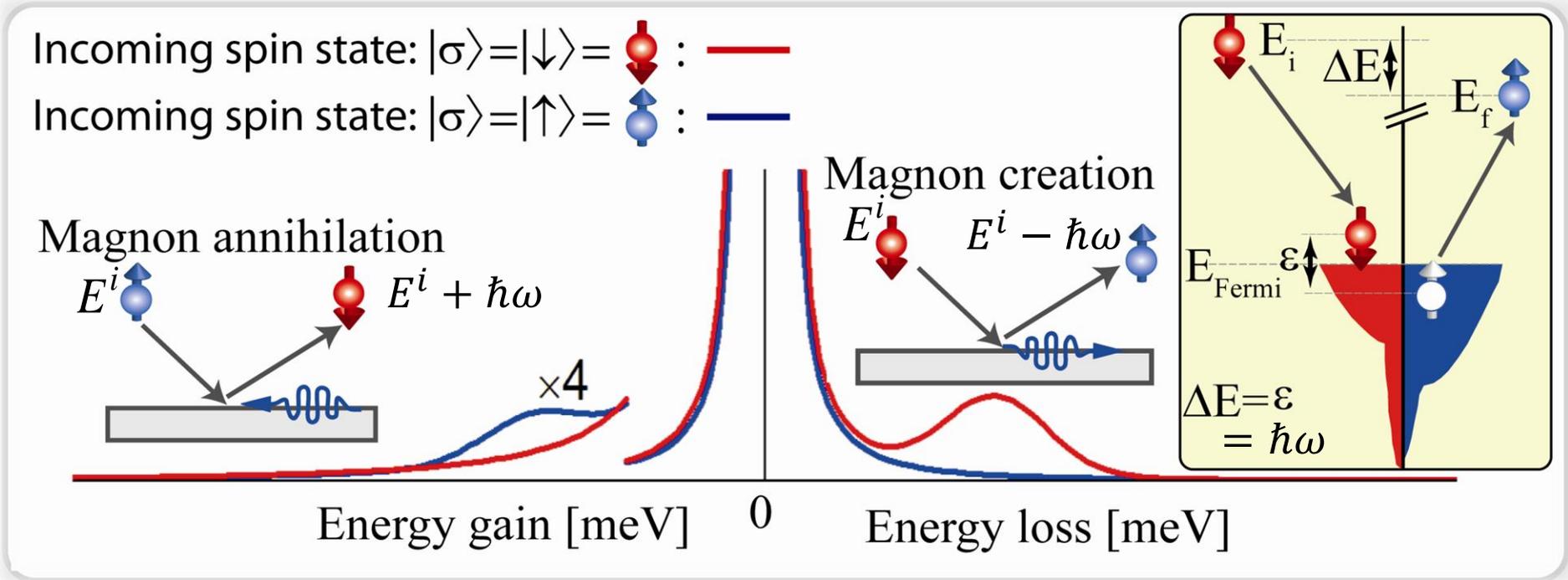
Spin-polarized electron energy-loss spectroscopy

Spin-dependent electron scattering

What are the possible scenarios?



Magnon excitation mechanism in SPEELS: Magnon creation & annihilation

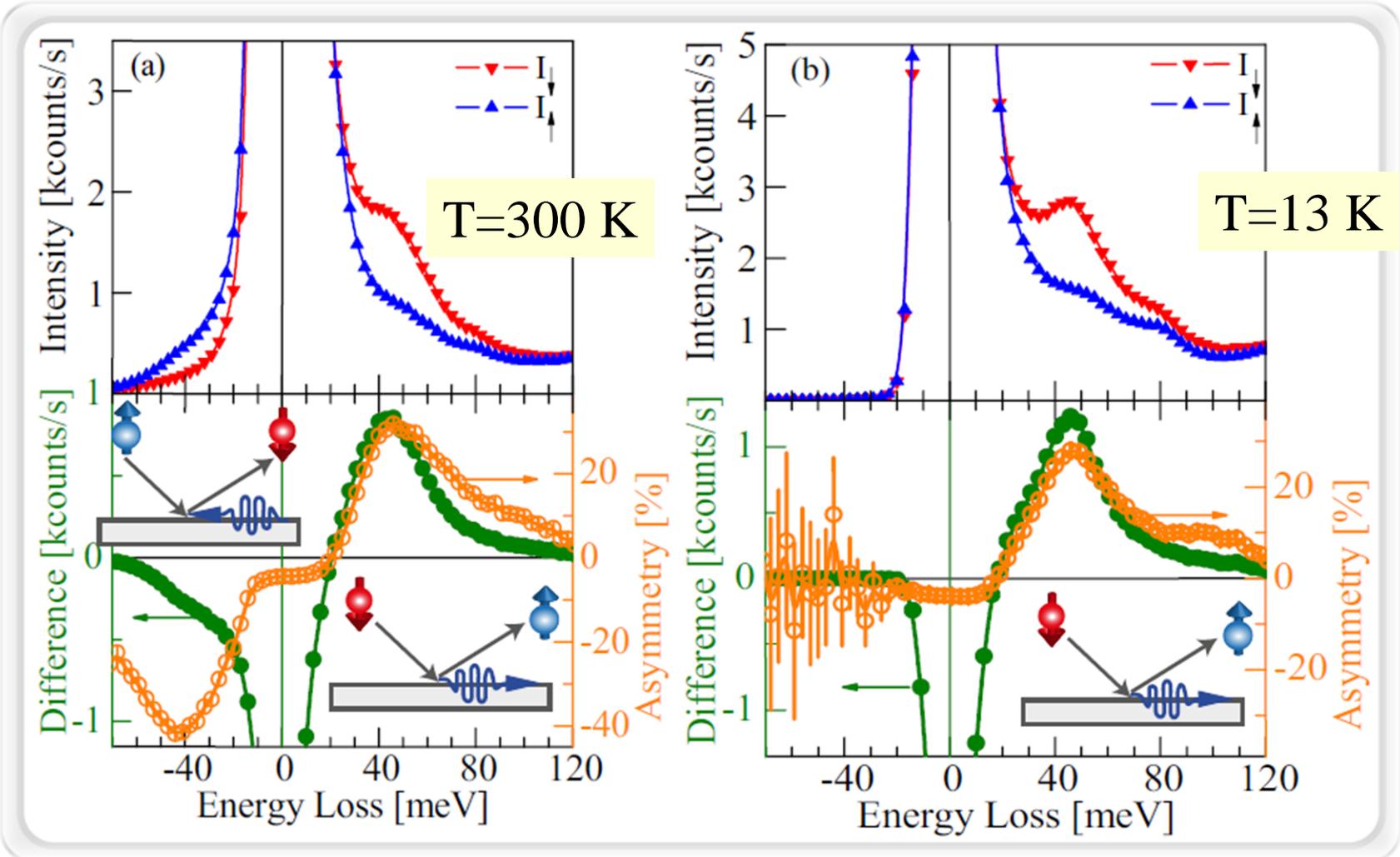


- The magnon annihilation process is allowed for incident electrons of majority character.

- The magnon creation process is allowed for incident electrons of minority character.

Kh. Zakeri and J. Kirschner, Magnonics, Eds. S. O. Demokritov & A. N. Slavin, Topics in Applied Physics, Vol. 125, pp. 83–99 (2013), Springer Berlin Heidelberg

Magnon excitation mechanism in SPEELS: Magnon creation & annihilation



Example: 2ML Fe on W(110)

$$Q_{||} = 0.5 \text{ \AA}^{-1}$$

