

Ferromagnetische Resonanz FMR

Christian Derricks

30.11.2011

Was ist ein Ferromagnet?

- Ohne externes Feld existieren aneinander gekoppelte magnetische Dipolmomente
 - > Eine Probe ist deshalb magnetisiert
- Ursache: Austauschwechselwirkung
 - Coulombwechselwirkung
 - Pauliprinzip
- Nur stabil bis zu einer gewissen Temperatur T_C
 - > Danach Verhalten wie beim Paramagnet
- Hystereseverhalten bei äußerem Feld

Magnetische Suszeptibilität

- Magnetisierung über magnetische Suszeptibilität mit der Feldstärke verknüpft

$$\chi_{lm} = \frac{\partial M_l}{\partial H_m}$$

- Allgemein feld- und temperaturabhängiger Tensor
- Wegen der Hystereseeigenschaft abhängig von der Vorgeschichte der Magnetisierung

Magnetische Anisotropie

- freie Energiedichte enthält verschiedene Beiträge die charakteristisch für jedes Material sind

$$dF = \cancel{-SdT - pdV + \mu dN - \vec{P}d\vec{E}} + \boxed{\vec{B}d\vec{M}}$$

- Richtung der Magnetisierung
 - leichte Richtung -> minimale freie Energiedichte
-> Energieaufwand um Magnetisierung zu drehen
 - schwere Richtung -> maximale freie Energiedichte
-> Energiegewinn bei Drehung in leichte Richtung
 - mittelschwere Richtung

Anisotropiebeiträge

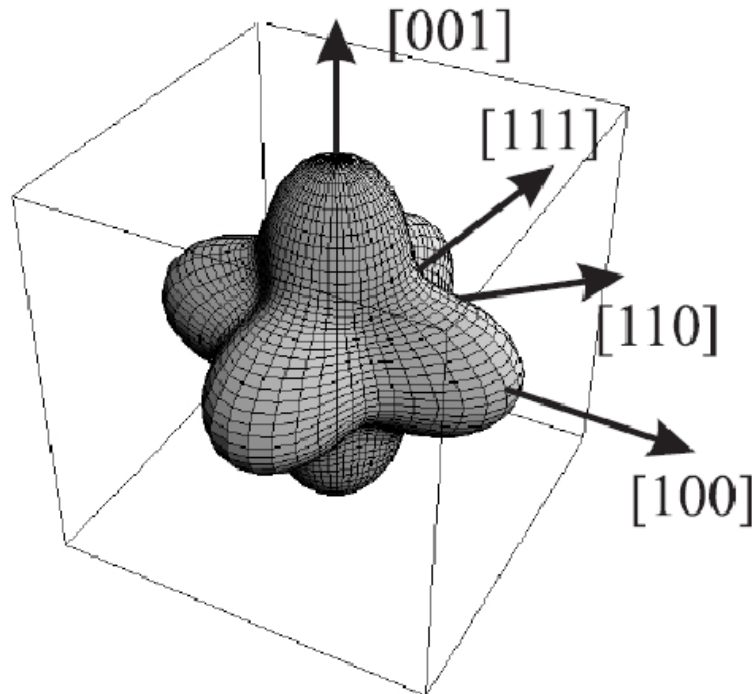
- Zeemanbeitrag
- Kristallanisotropie
- Formanisotropie
- Uniachsialer Oberflächenbeitrag
- Uniachsialer Verspannungsbeitrag

Starke Abhängigkeit von der Richtung der Magnetisierung zur Kristallachse

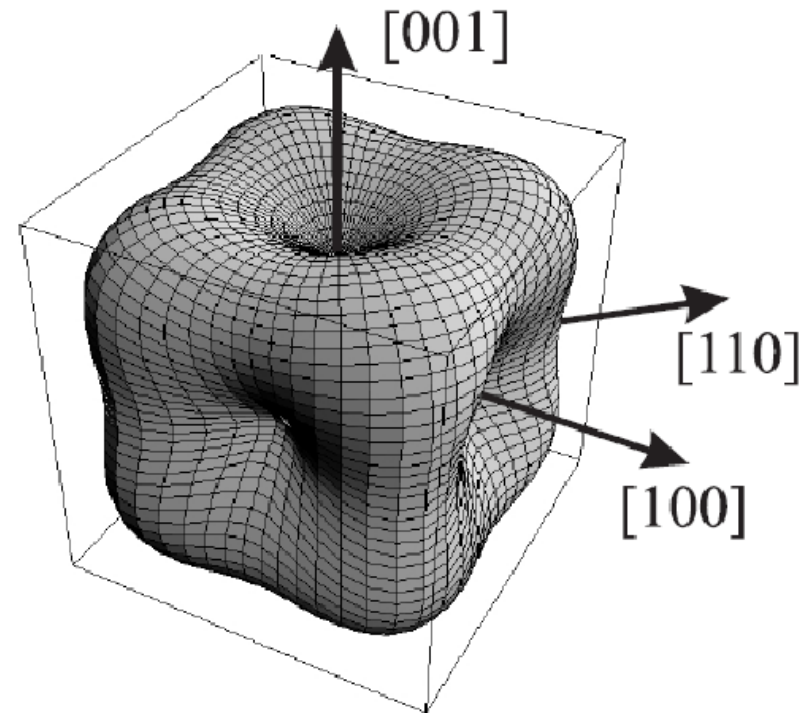


$$F_{Anisotropie} = F_{Zeeman} + F_{Kristall} + F_{Form} + F_{Uniachsial,\perp} + F_{Uniachsial,\parallel}$$

Kristallanisotropie



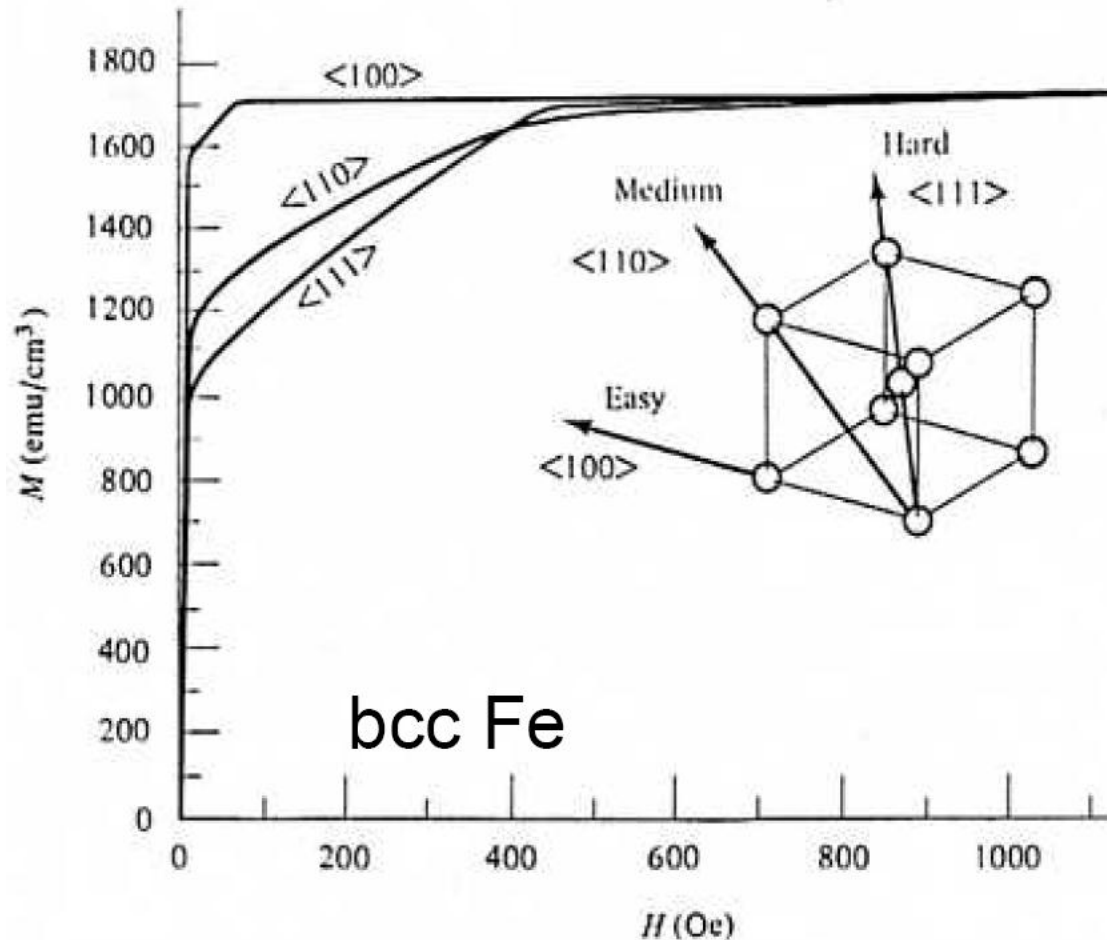
- Leichte Richtung [111], [110]
- Schwere Richtung [100], [001]



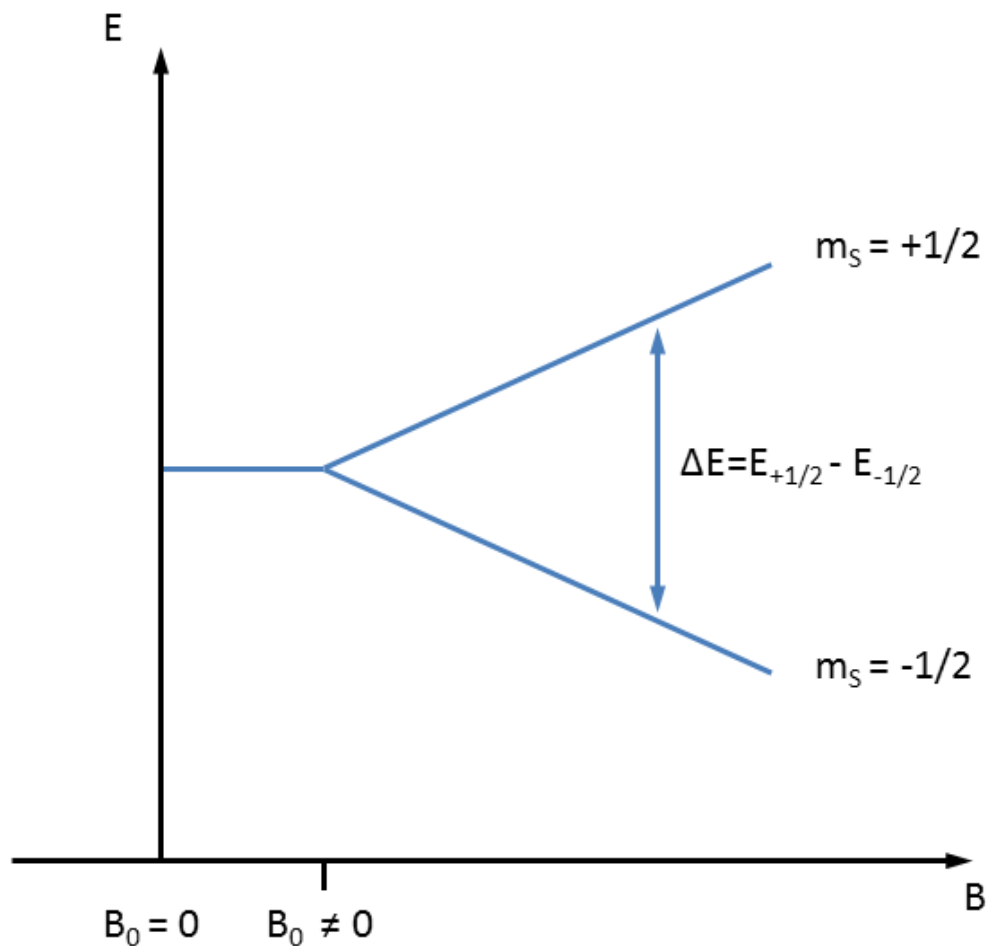
- Leichte Richtung [001], [100]
- Mittelschwere Richtung [110]
- Schwere Richtung [111]

Die freie Energie entspricht dem Abstand zwischen Ursprung und Oberfläche.

Messung der Anisotropie



Elektronenspinresonanz (ESR)



Ferromagnetische Resonanz

- Kollektive Anregung von magnetischen Momenten
- Gedämpfte Präzession der Magnetisierung
- Externes hochfrequentes Magnetfeld senkrecht zum statischen Feld verursacht Auslenkung um die Gleichgewichtslage
- Präzession nicht zwangsläufig um äußeres Feld sondern um ein effektives Magnetfeld B_{eff}
 - Berücksichtigung des äußeren Feldes B , der magnetischen Anisotropie und das hochfrequente Magnetfeld
- Ferromagnetische Resonanz bedeutet eine maximale Absorption vom eingestrahlten hochfrequenten Magnetfeld

Ferromagnetische Resonanz

- Maximale Absorption von eingestrahlten Mikrowellen durch die Probe wird als ferromagnetische Resonanz bezeichnet

$$\vec{B}_{eff} = \begin{pmatrix} b_{hf} \cdot e^{i\omega t} \\ 0 \\ B_{ext} \end{pmatrix} + \vec{B}_{ani}$$

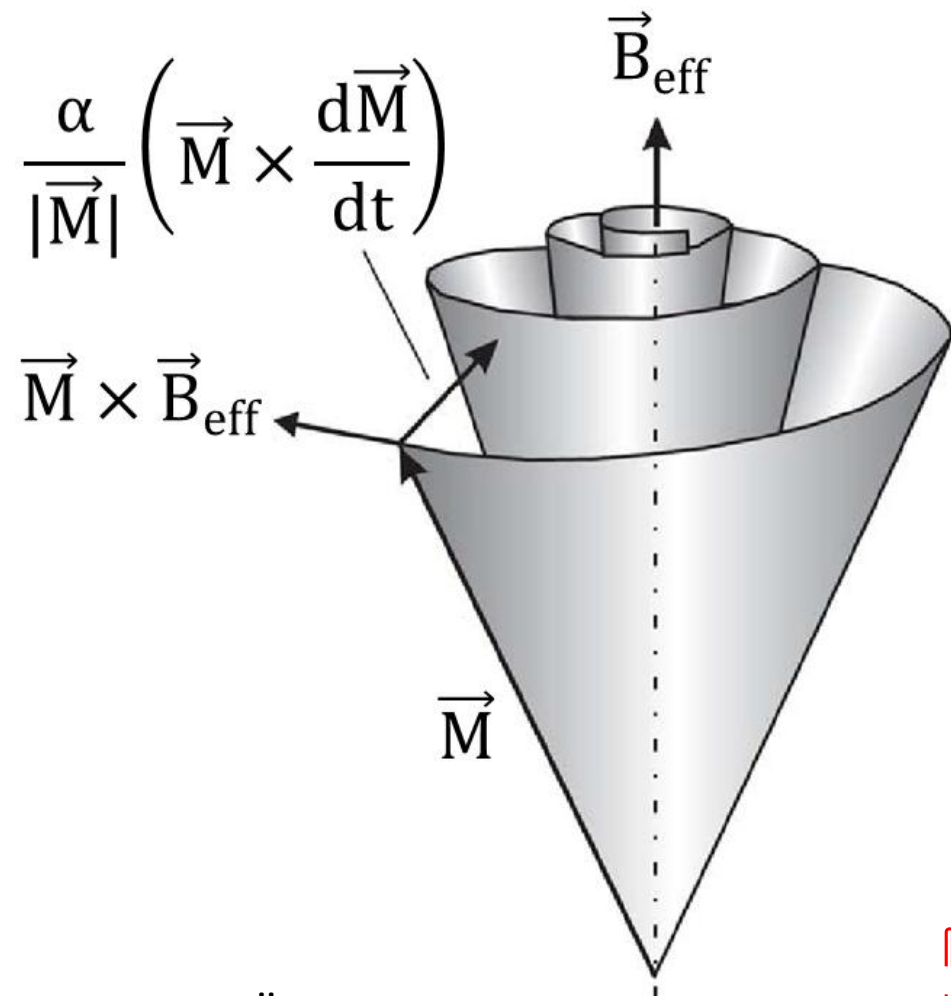
b_{hf} : hochfrequentes Mikrowellenfeld

B_{ext} : externes Feld

B_{ani} : intrinsische Anisotropie

B_{eff} : ist nicht parallel zu B_{ext}

Landau-Lifshitz-Gilbert-Gleichung LLGG



Bei kleiner Änderung

$$\vec{B}_{eff} = \begin{pmatrix} b_{hf} \cdot e^{i\omega t} \\ 0 \\ B_{ext} \end{pmatrix} + \vec{B}_{ani}$$

klassisch

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma(\vec{M} \times \vec{B}_{eff})$$

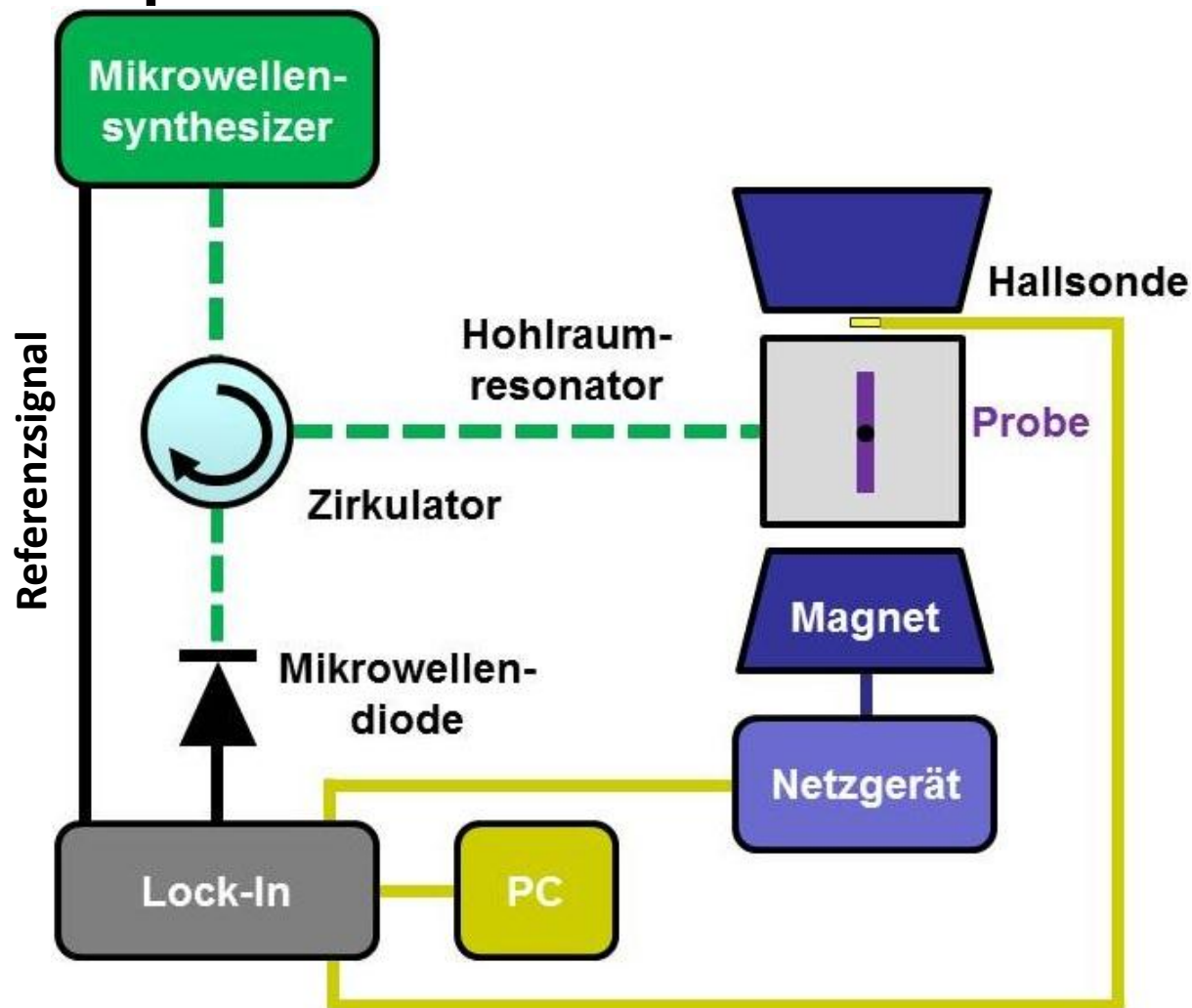
$$\gamma = g \frac{\mu_B}{\hbar} \quad g_{Elektron} \approx 2$$

$$\vec{M} = \vec{M}_{Gleichgewicht} + \underline{\chi}_{hf} \cdot \frac{\vec{b}_{hf}}{\mu_0} \cdot e^{i\omega t}$$

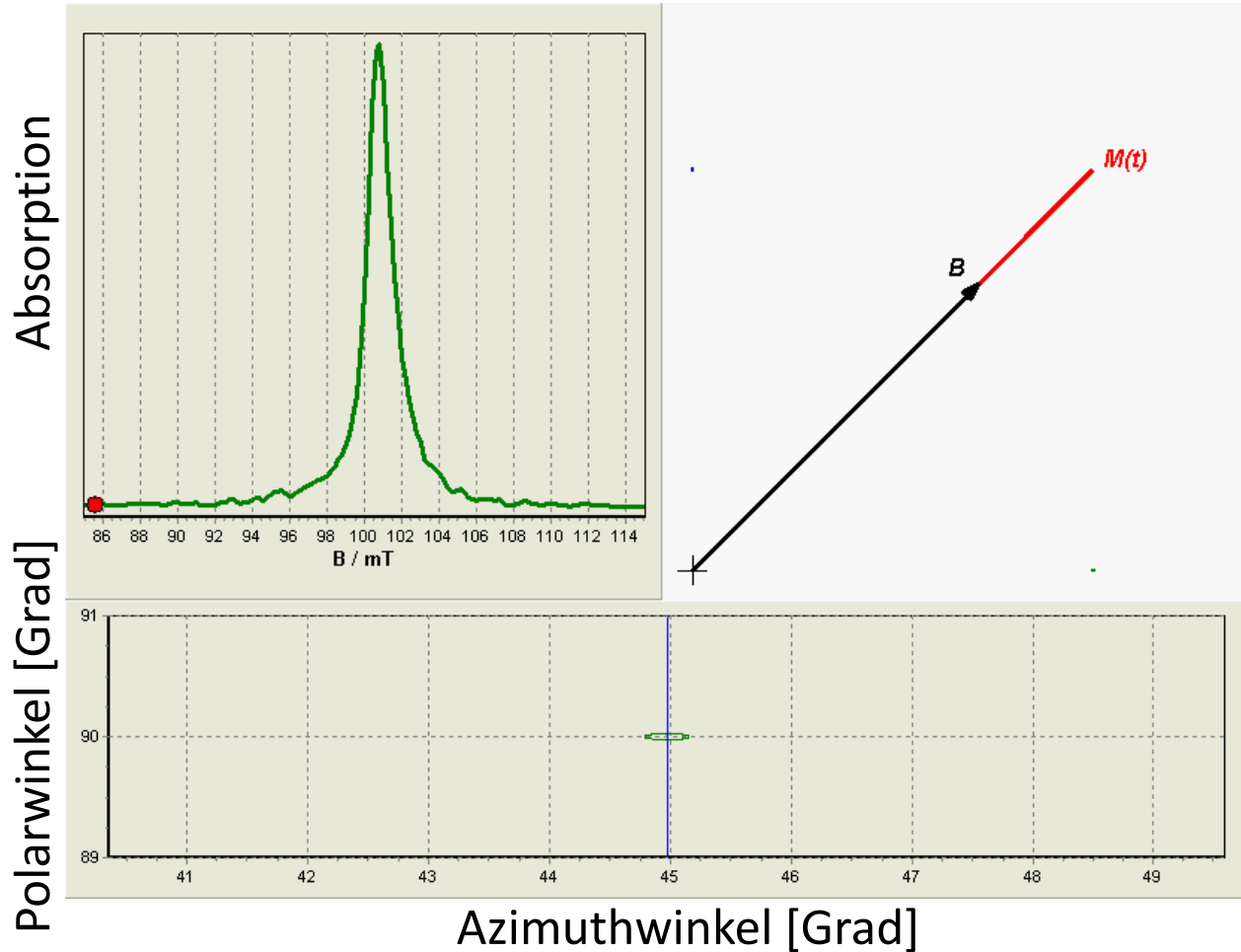
Hochfrequenzsuszeptibilitätstensor

$\llbracket P \sim \underline{\chi}_{hf} \rrbracket$ Absorbierte Mikrowellenleistung ist PROPORTIONAL zu $\underline{\chi}_{hf}$

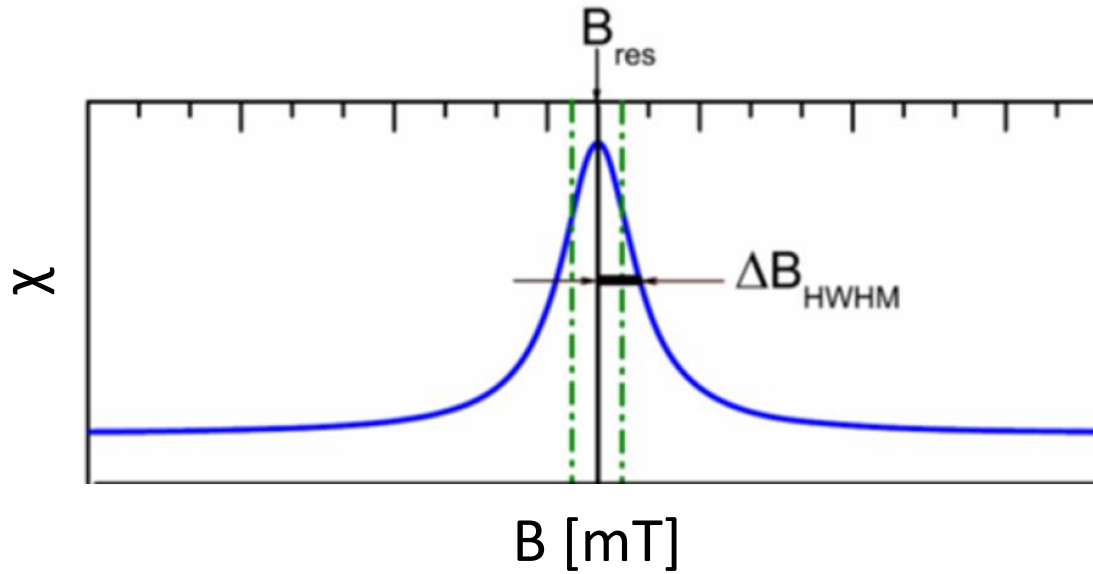
Experimenteller Aufbau



Experiment

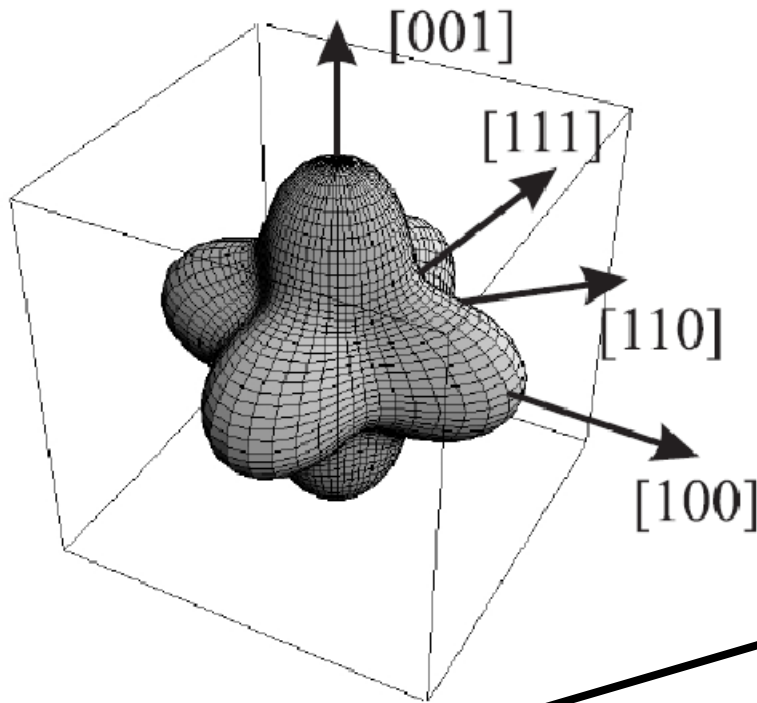


Messung von χ



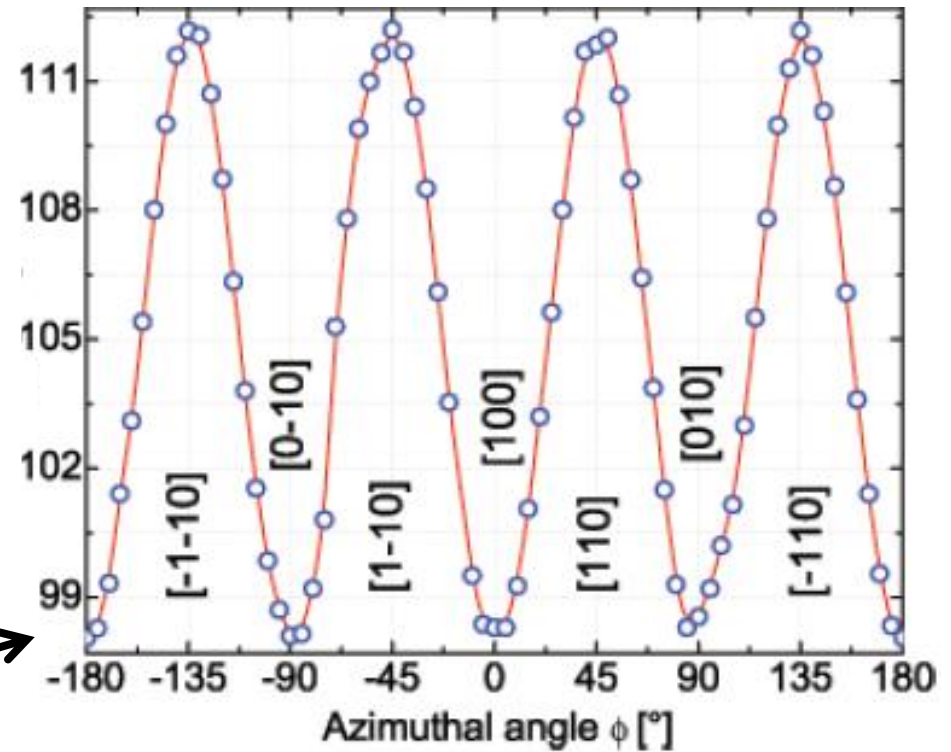
- FMR bei statischen Magnetfeld und Hochfrequenzfeld das senkrecht zu B steht bei Variation über B .
- Mikrowellenleistung ist proportional zu χ
- Durch Variation von B findet man ein Resonanzmaximum

Messung der Kristallanisotropie



Vierzählige Symmetrie der freien Energie in Messung erkennbar

B



kubische Anisotropie
(Kristallfeldanisotropie)

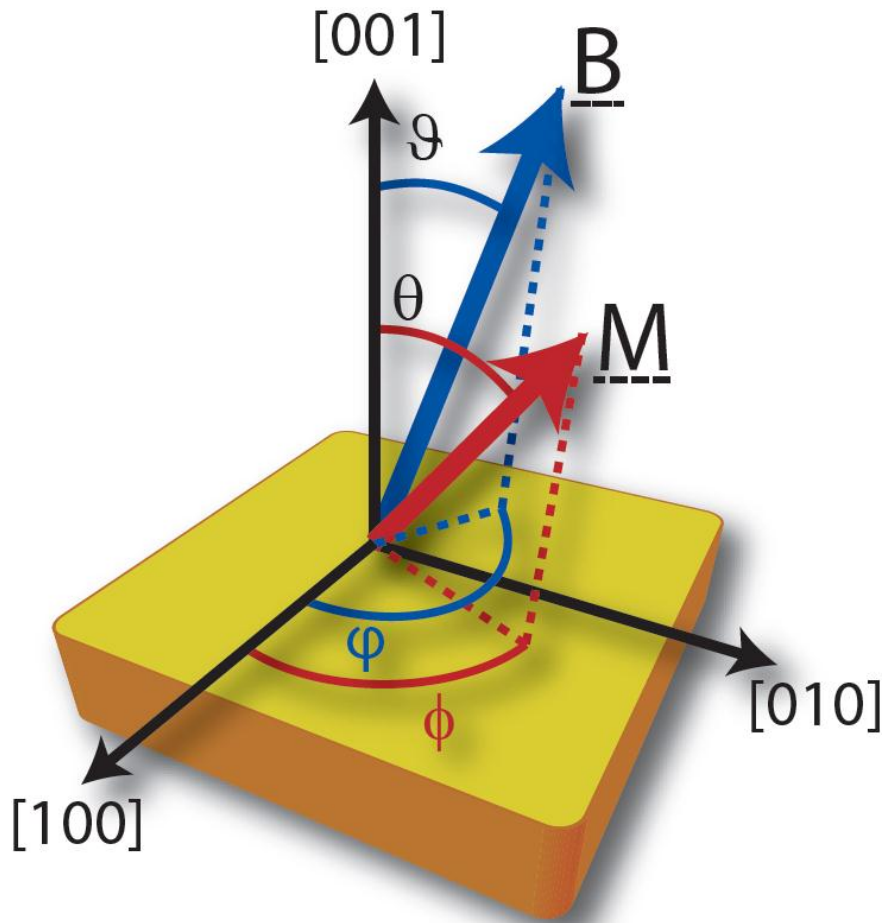
Zusammenfassung

- Magnetische Anisotropie gibt Aufschluss über Eigenschaften einer ferromagnetischen Probe.
- FMR bietet die Möglichkeit diese richtungsabhängige Eigenschaften zu untersuchen.
- Große Bedeutung der Ergebnisse für technische Entwicklungen

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit



Symmetrie und Koordinaten



$$\begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin(\theta)\cos(\phi) \\ \sin(\theta)\sin(\phi) \\ \cos(\theta) \end{pmatrix}$$

$$F_{kubisch} = K_4(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_1^2\alpha_3^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2)$$

- Kartesische Koordinaten fallen mit kristallographischen Hauptachsen zusammen
- Griechische Großbuchstaben stehen für Winkel des Magnetisierungsvektors
- Griechische Kleinbuchstaben stehen für den Winkel des angelegten äußeren Feldes