

Grundlagenforschung und Anwendungskonzepte im Bereich der Synthese und Charakterisierung hochfrequenztauglicher ferromagnetischer Nanokompositschichten

K. Seemann, H. Leiste, K. Krüger

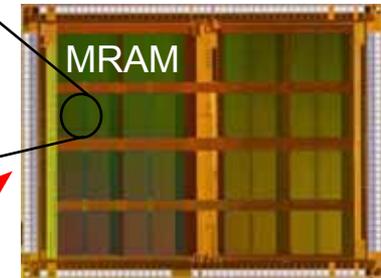
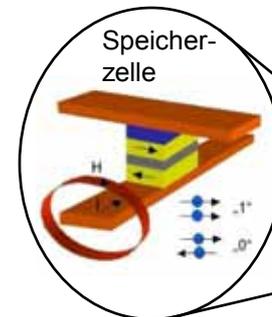
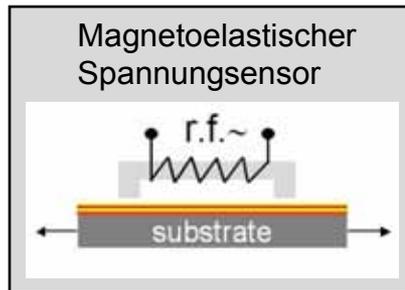
Institute for Applied Materials IAM-AWP



00095760

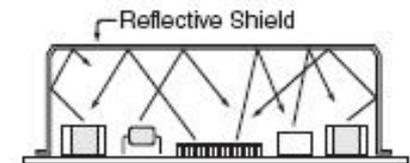
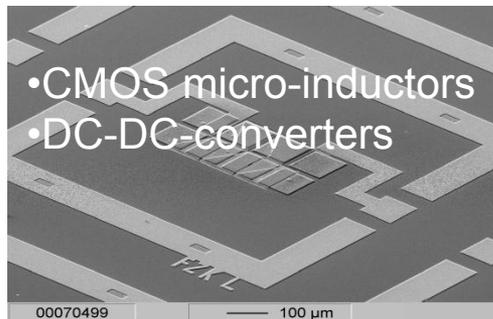
100 μm

- **Motivation**
- **Grundlagen**
 - Modelle der ferromagnetischen Resonanz (FMR)
 - Hypothese - Schicht-Materialdesign für hohe FMR
- **Prinzip der Schichtherstellung und Schichtkonditionierung**
 - Phasendiagramme Fe-Co und Hf-N als Grundlage der Dünnschichtsynthese von Fe-Co-Hf-N- Nanokompositschichten
- **Ergebnisse der Schichtstruktur**
 - Transmissionselektronenmikroskop- Beugungsuntersuchungen (TEM)
 - Nanostruktur und Kristallitgrößen
- **Uniaxiale Anisotropie und Präzession magn. Momente in Schichten**
 - Entstehung der uniaxialen Anisotropie (min. der magnetokristallinen Anisotropie)
 - Modell der Spinpräzession und dessen indirekte Messung
 - Dämpfung der Präzession
- **Anwendungsbeispiele**
- **Zusammenfassung**

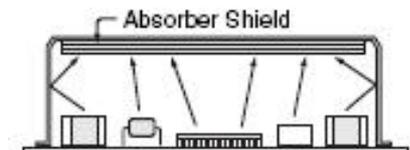


Grundlagen des Hochfrequenzverhaltens ferromagnetischer Schichten

- Ferromagnetische Resonanz (f_{FMR})
 - Komplexe Permeabilität ($\mu_r(f)$)
- HF- Verluste (Dämpfung $\alpha_{eff} \rightarrow \Delta f_{eff}$)
- Lebensdauer des Resonanzzustands
 - Magn. Schaltzeiten



Typical shielding approach allows reflected radiation to affect neighboring components.



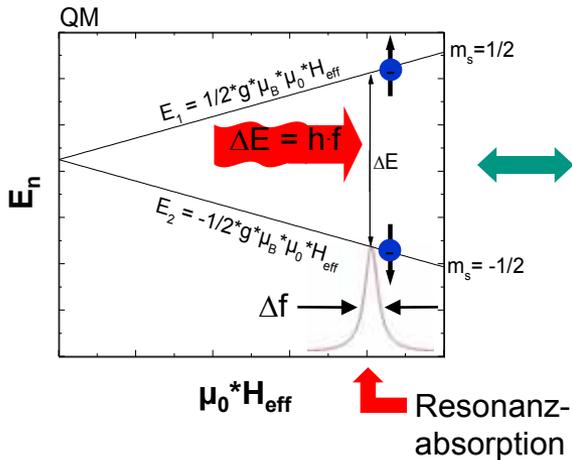
Noise absorber approach assimilates radiated frequencies and converts to imperceptible heat energy.

Quelle: LEADER TECH

- **Motivation**
- **Grundlagen**
 - Modelle der ferromagnetischen Resonanz (FMR)
 - Hypothese - Schicht-Materialdesign für hohe FMR
- **Prinzip der Schichtherstellung und Schichtkonditionierung**
 - Phasendiagramme Fe-Co und Hf-N als Grundlage der Dünnschichtsynthese von Fe-Co-Hf-N- Nanokompositschichten
- **Ergebnisse der Schichtstruktur**
 - TEM- Beugungsuntersuchungen
 - Nanostruktur und Kristallitgrößen
- **Uniaxiale Anisotropie und Präzession magn. Momente in Schichten**
 - Entstehung der uniaxialen Anisotropie (Min. der magnetokristallinen Anisotropie)
 - Modell der Spinpräzession und dessen indirekte Messung
 - Dämpfung der Präzession
- **Anwendungsbeispiele**
- **Zusammenfassung**

Quantenmechanik der Resonanzabsorption

Aufhebung der e⁻ Spinentartung im H- Feld (Spin-1/2-Magnetismus):



$$\mathbf{H} \cdot \boldsymbol{\varphi}_{ms} = E_n \cdot \varphi_{ms}$$

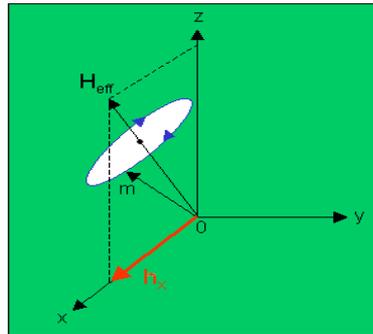
$$\Delta E = E_1 - E_2 = \hbar \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_r = g \cdot \mu_B \cdot \mu_0 \cdot H_{\text{eff}}$$

$$\Rightarrow f_r = \frac{\gamma}{2 \cdot \pi} \cdot \mu_0 \cdot H_{\text{eff}}$$

Bsp. Energie bei 2,4 GHz:

$$\Delta E = 1,59 \cdot 10^{-24} \text{ J} = 9,92 \cdot 10^{-6} \text{ eV}$$

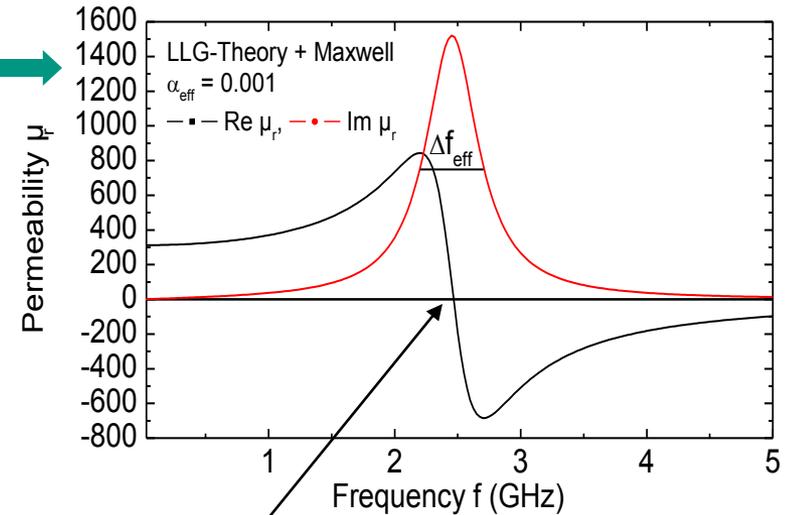
Präzession des Spinmoments bei H_{eff}



Quasiklassische Beschreibung der Resonanzabsorption

⇒ Landau-Lifschitz-Gilbert DGL & Maxwell-Gleichung [1,2]

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} + \frac{\alpha_{\text{eff}}}{M_s} \left(\mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \right)$$



$$f_{\text{FMR}} (\alpha_{\text{eff}} \rightarrow 0) = \frac{\gamma}{2 \cdot \pi} \cdot \mu_0 \cdot H_{\text{eff}}$$

[1] T.L. Gilbert, IEEE Trans. Mag. 40, (2004) 3443

[2] K. Seemann*, H. Leiste, V. Bekker, J. Magn. Magn. Mater. 278, (2004) 200

Hypothese – Schicht-Materialdesign für hohe, (verlustarme) ferromagnetische Resonanz (FMR)

• Ferromagnetische Phase mit hohem magnetischem Moment und Sättigungsmagnetisierung



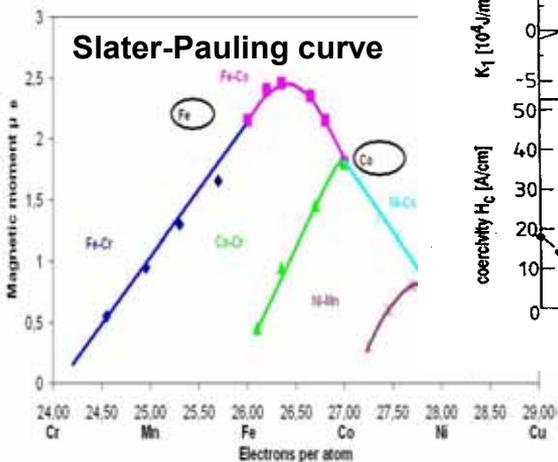
• Hohe Sättigung durch Wahl des Fe-Co Verhältnisses
• Aber Verluste durch H_c (K_1 , λ_s)



• Einschränkung des Kornwachstums (Fe-Co) durch refraktäres Element-Nitrid-Phase

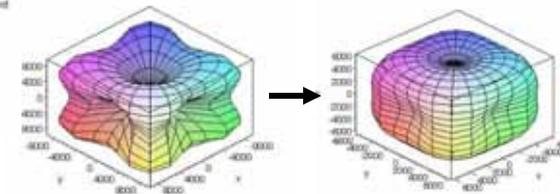
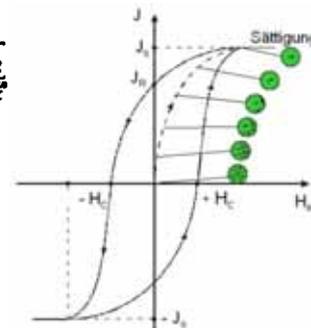
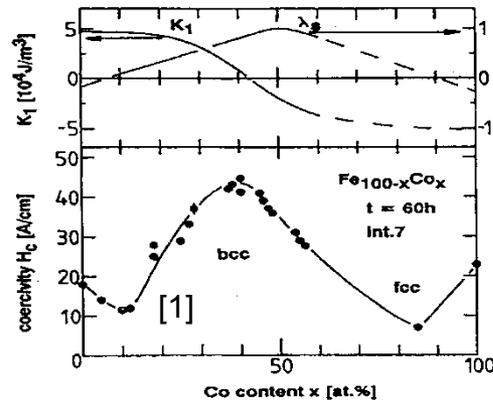
⇒ Min. von H_c , d.h., von $H_a(K_1, \lambda_s)$ [2,3]

⇒ Min. magnetokristalline Anisotropieenergie F_a



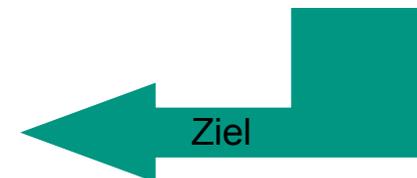
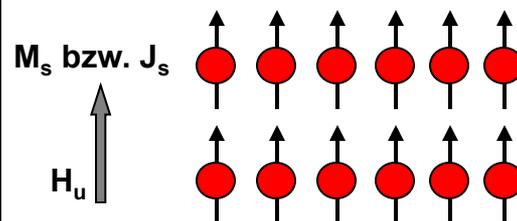
$$\mu_z = -g_J \cdot \mu_B \cdot m_J$$

$$g_J \approx 2 \text{ (Spinmagnetismus)}$$



$K_1 \gg 0$ (bcc) → K_1 klein

- Magnetische Vorzugsrichtung (uniaxiales Anisotropiefeld H_u)
- Weichmagnetisches Verhalten



[1] Ch. Kuhrt, L. Schultz, J. Appl. Phys. 71 (1992) 1896

[2] G. Herzer, IEEE Trans. Magn. 26 (1990) 1397

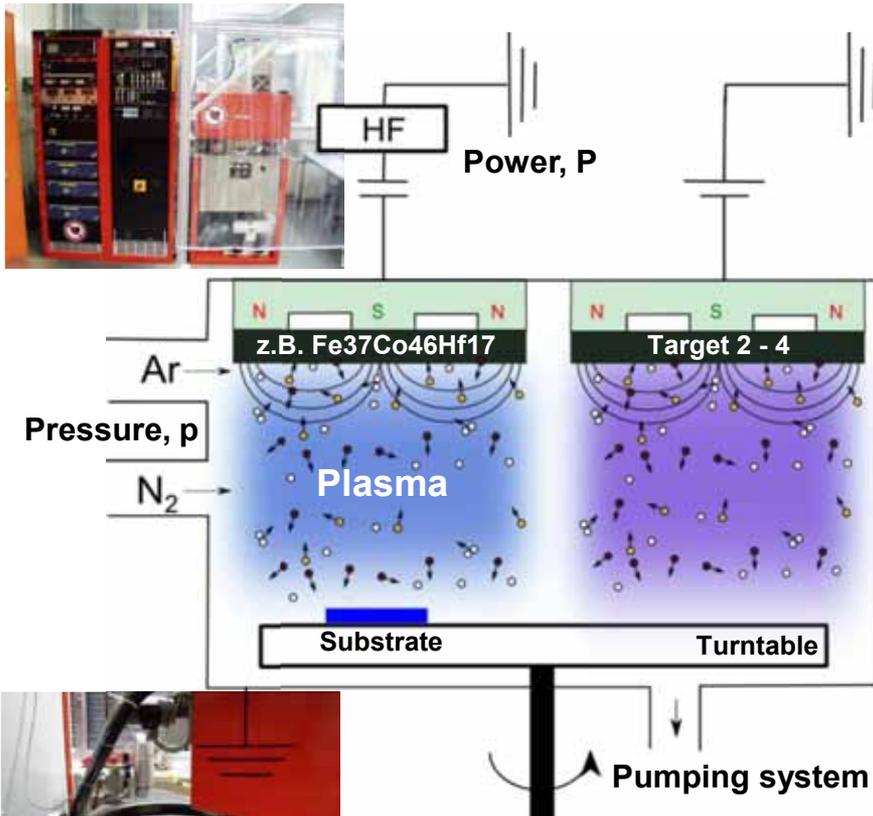
[3] G. Herzer, J. Magn. Magn. Mater. 294 (2005) 99

- **Motivation**
- **Grundlagen**
 - Modelle der ferromagnetischen Resonanz (FMR)
 - Hypothese - Schicht-Materialdesign für hohe FMR
- **Prinzip der Schichtherstellung und Schichtkonditionierung**
 - Phasendiagramme Fe-Co und Hf-N als Grundlage der Dünnschichtsynthese von Fe-Co-Hf-N- Nanokompositschichten
- **Ergebnisse der Schichtstruktur**
 - TEM- Beugungsuntersuchungen
 - Nanostruktur und Kristallitgrößen
- **Uniaxiale Anisotropie und Präzession magn. Momente in Schichten**
 - Entstehung der uniaxialen Anisotropie (min. der magnetokristallinen Anisotropie)
 - Modell der Spinpräzession und dessen indirekte Messung
 - Dämpfung der Präzession
- **Anwendungsbeispiele**
- **Zusammenfassung**

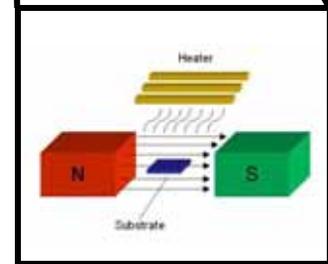
Prinzip der Schichtherstellung und Schichtkonditionierung im statischen Magnetfeld

PVD-magnetron sputtering
(Schichtabscheidung aus der Gasphase)

Wärmebehandlung: Nanostruktur & „magnetische“ Konditionierung



“Two step process”

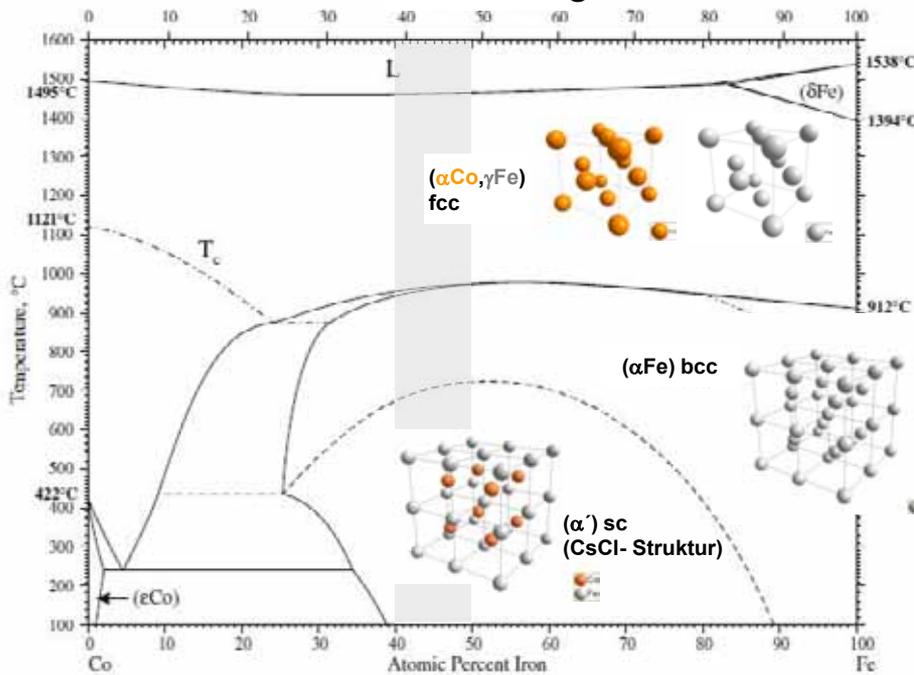


- „Rapid annealing“ bis 600° C
- Magnetfeld B bis ca. 50 mT

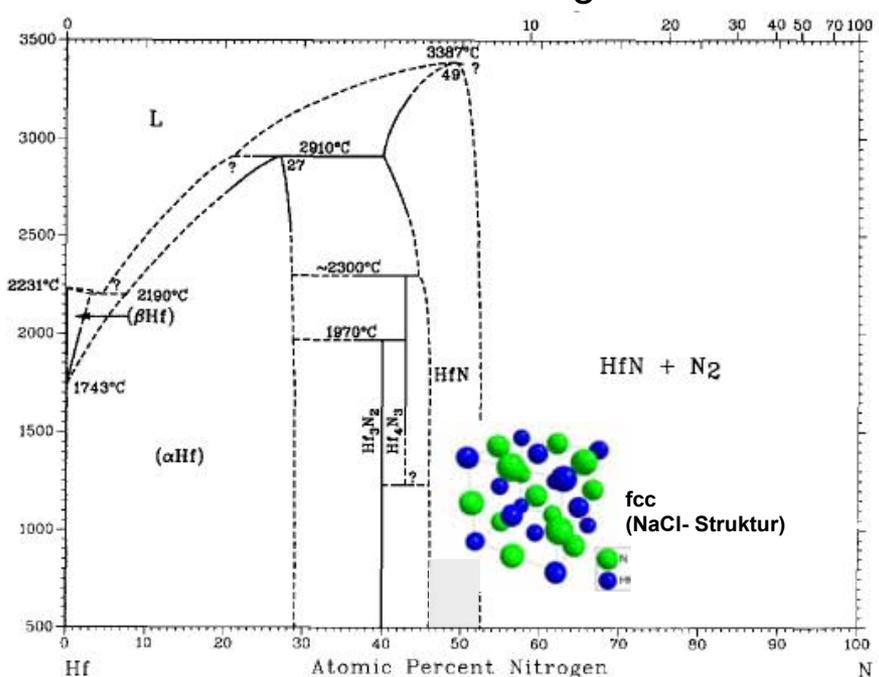


Die Phasendiagramme Fe-Co [1] und Hf-N [2] als Grundlage der Dünnschichtsynthese von Fe-Co-Hf-N- Schichten

Fe-Co-Phasendiagramm



Hf-N-Phasendiagramm



Hypothese:
2 Phasen Fe-Co & Hf-N

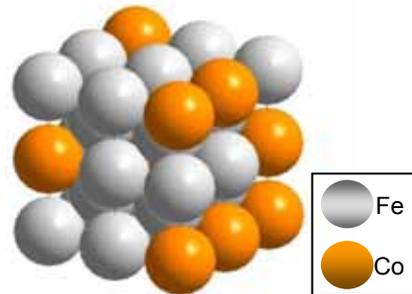
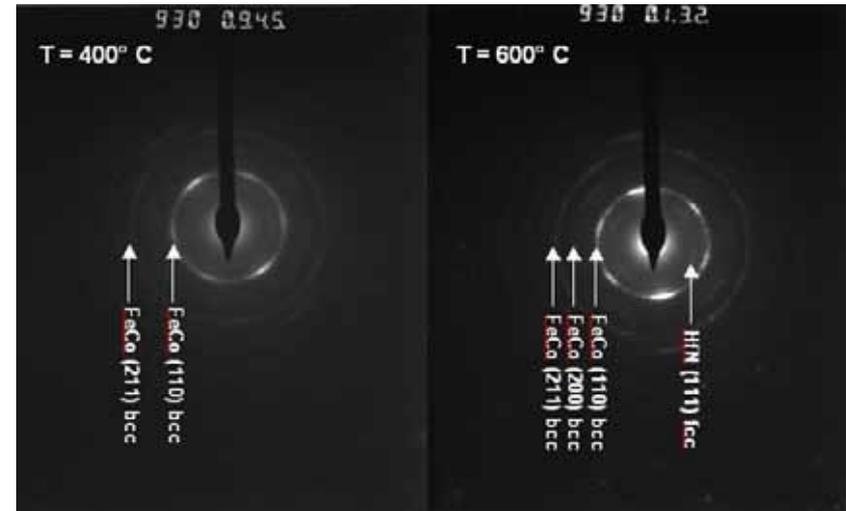
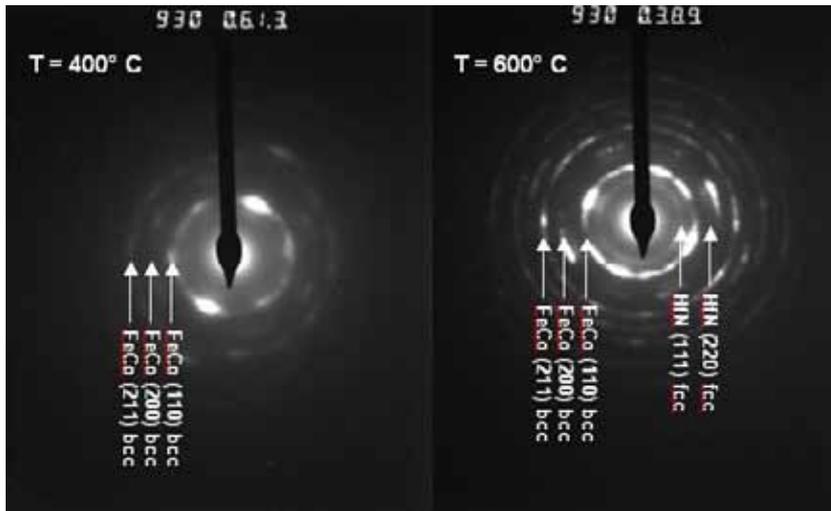
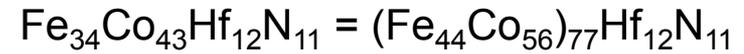
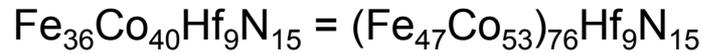


[1] I. Ohnuma et al., Acta Materialica 50 (2002) 379

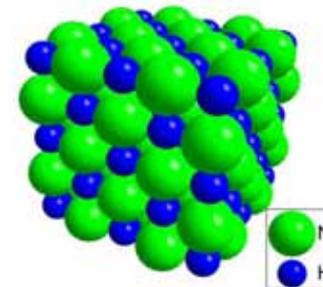
[2] H. Okamoto, Bulletin of Alloy Diagrams 11 (1990) 146

- **Motivation**
- **Grundlagen**
 - Modelle der ferromagnetischen Resonanz (FMR)
 - Hypothese - Schicht-Materialdesign für hohe FMR
- **Prinzip der Schichtherstellung und Schichtkonditionierung**
 - Phasendiagramme Fe-Co und Hf-N als Grundlage der Dünnschichtsynthese von Fe-Co-Hf-N- Nanokompositschichten
- **Ergebnisse der Schichtstruktur**
 - TEM- Beugungsuntersuchungen
 - Nanostruktur und Kristallitgrößen
- **Uniaxiale Anisotropie und Präzession magn. Momente in Schichten**
 - Entstehung der uniaxialen Anisotropie (min. der magnetokristallinen Anisotropie)
 - Modell der Spinpräzession und dessen indirekte Messung
 - Dämpfung der Präzession
- **Anwendungsbeispiele**
- **Zusammenfassung**

TEM- Beugungsuntersuchungen an Fe-Co-Hf-N- Schichten [1]



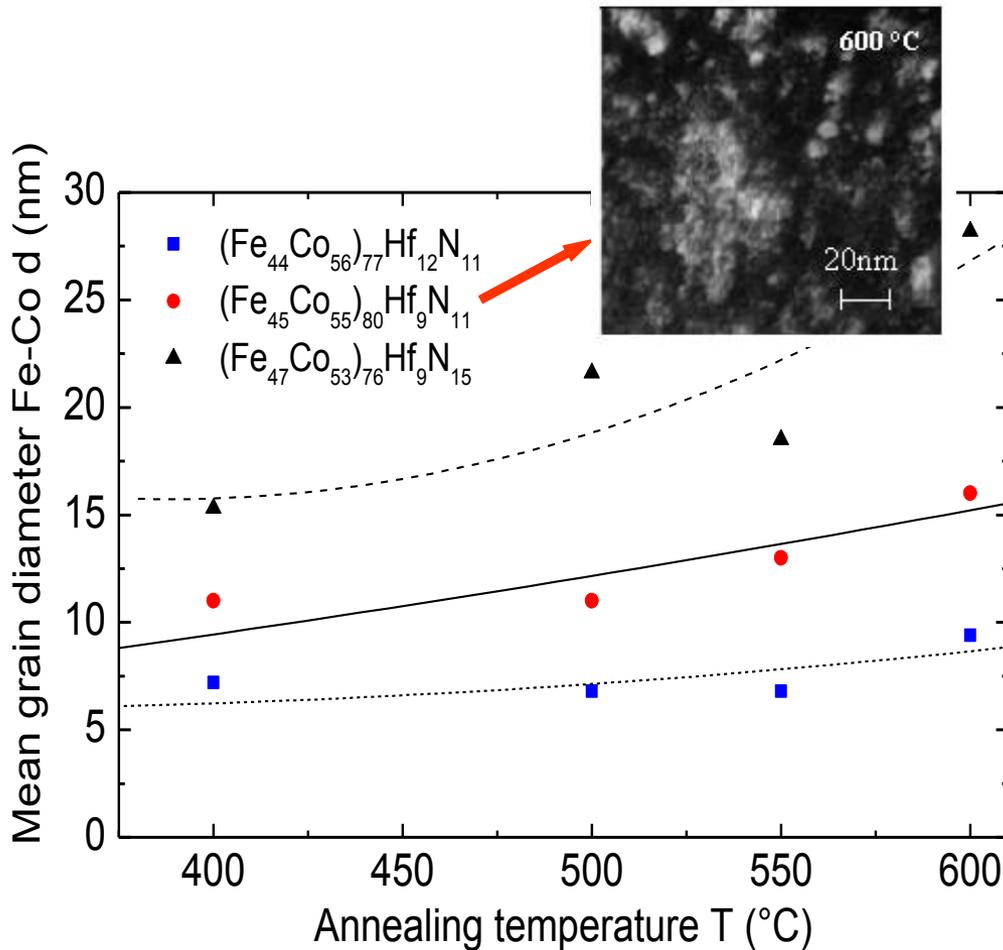
Fe-Co- Mischkristall:
 α Fe-Struktur (bcc)



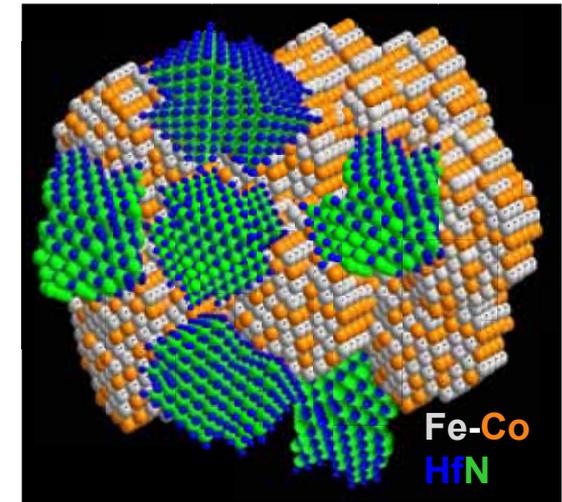
HfN: NaCl-Struktur (fcc)

[1] K. Seemann*, H. Leiste, Ch. Klever, J. of Magn. Magn. Mater. 321 (2009) 3149

Mikrostruktur [1] und Kristallitgrößen [2] von Fe-Co-Hf-N- Schichten



Modell: „stabilisiertes“
Nanogefüge



$$(d_{\text{HfN}} \approx 1/3 * d_{\text{Fe-Co}})$$

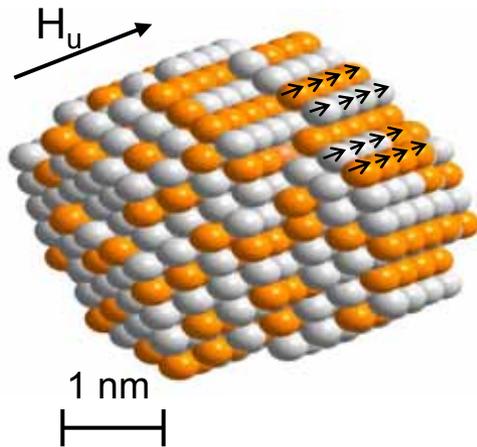
[1] K. Seemann*, H. Leiste, A. Kovács, J. Magn. Magn. Mater. 320 (2008) 1952

[2] K. Seemann*, H. Leiste, Ch. Klever, J. Magn. Magn. Mater. 321 (2009) 3149

- **Motivation**
- **Grundlagen**
 - Modelle der ferromagnetischen Resonanz (FMR)
 - Hypothese - Schicht-Materialdesign für hohe FMR
- **Prinzip der Schichtherstellung und Schichtkonditionierung**
 - Phasendiagramme Fe-Co und Hf-N als Grundlage der Dünnschichtsynthese von Fe-Co-Hf-N- Nanokompositschichten
- **Ergebnisse der Schichtstruktur**
 - TEM- Beugungsuntersuchungen
 - Nanostruktur und Kristallitgrößen
- **Uniaxiale Anisotropie und Präzession magn. Momente in Schichten**
 - Entstehung der uniaxialen Anisotropie (min. der magnetokristallinen Anisotropie)
 - Modell der Spinpräzession und dessen indirekte Messung
 - Dämpfung der Präzession
- **Anwendungsbeispiele**
- **Zusammenfassung**

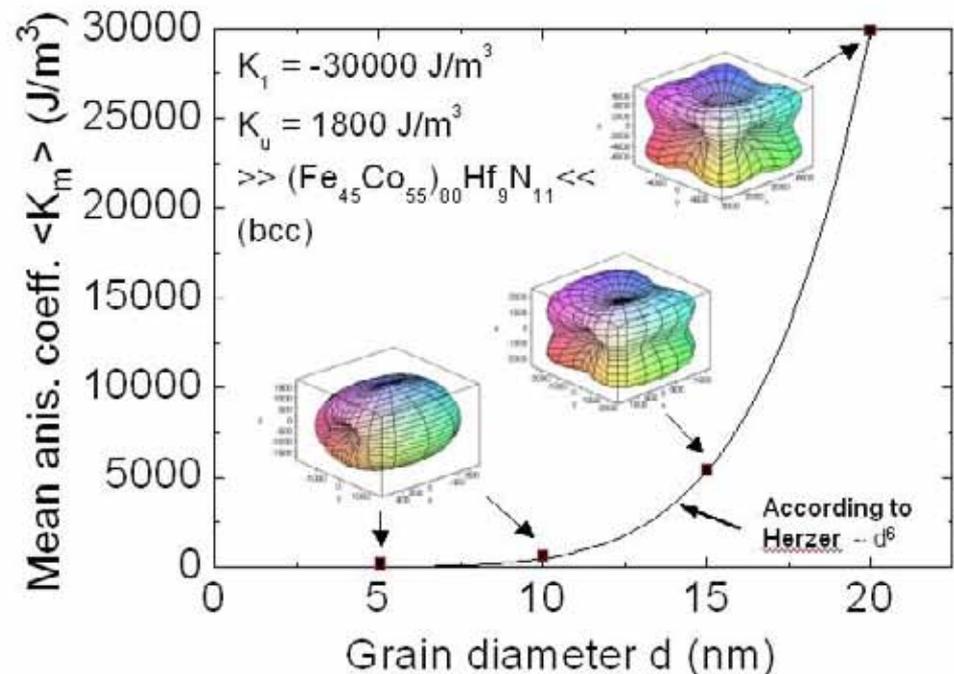
Uniaxiale Anisotropie (magn. Vorzugsrichtung) in der Schicht durch Tempern im statischen Magnetfeld

Diffusionanisotropie:
Änderung der Bindungsenergie
($\Delta w(\delta r_{\text{Fe-Co}}, T, \varphi) \neq 0$) durch
kettenförmige Anordnung von
Fe und Co bei Temperatur T im
Magnetfeld



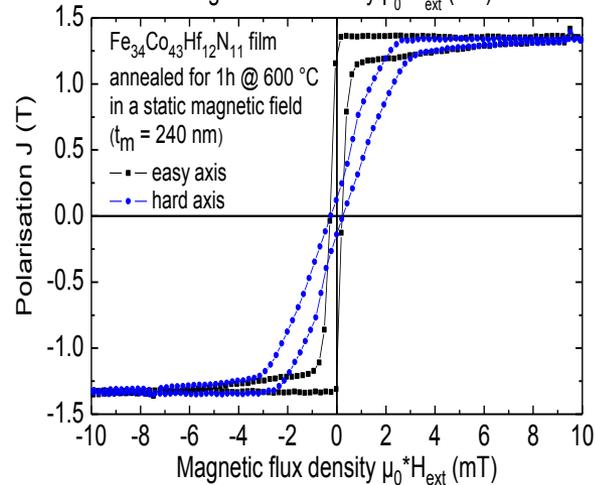
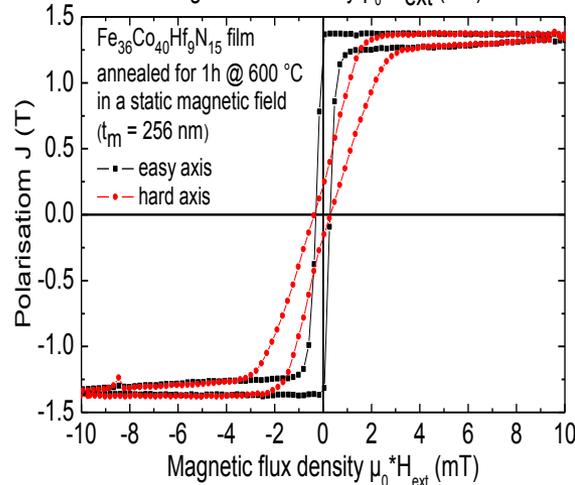
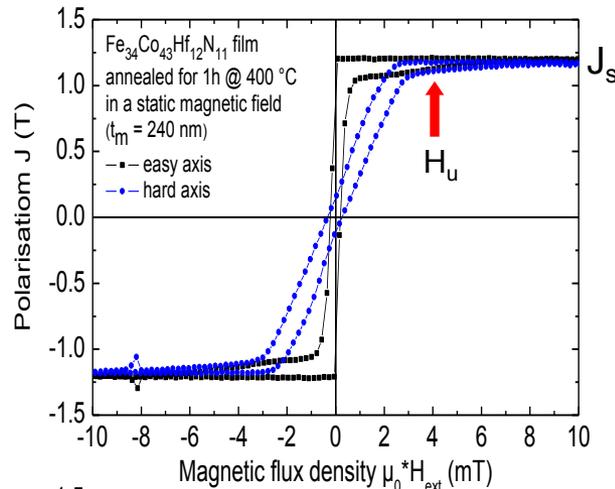
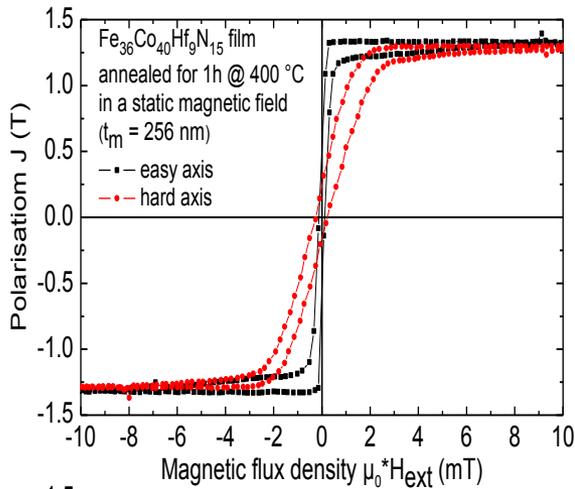
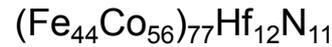
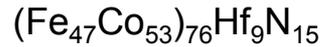
⇒ Anisotrope Nahordnung
bzw. uniaxiale Anisotropie H_u
in der Schichtebene

Theoretische Abschätzung der gegenseitigen
Beeinflussung der
uniaxialen ↔ magnetokristallinen Anisotropie:



Beweis der uniaxialen Anisotropie in der Schichtebene

Messung der Magnetisierung M bzw. Polarisation $J = \mu_0 \cdot M$:



Information über:

- Koerzitivfeld H_c
- Uniax. Anisotropiefeld H_u
- Sättigungspolarisation J_s



Statische Permeabilität:

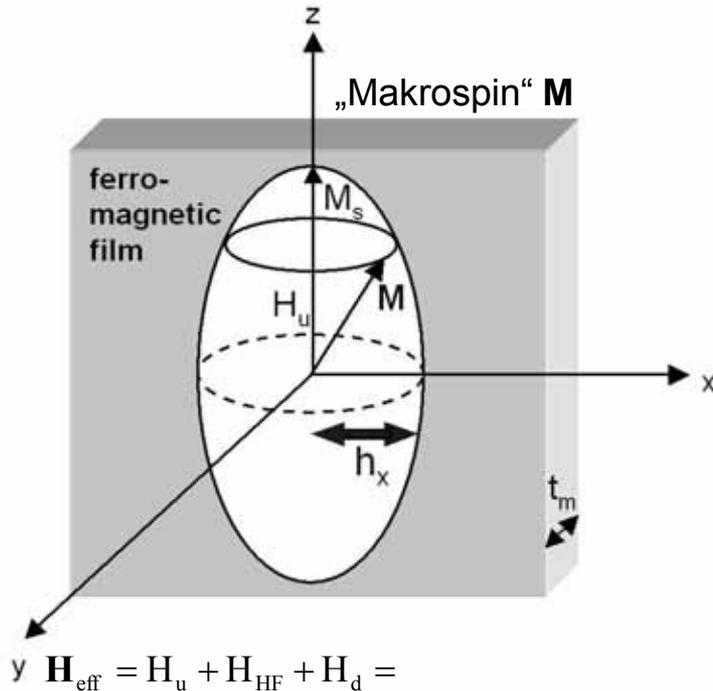
$$\mu_m(f \rightarrow 0) = \frac{J_s}{\mu_0 \cdot H_u} + 1$$

⇒ „gesättigter Zustand“

Quasiklassisches Modell der homogenen Spinpräzession in ferromagnetischen Schichten

Lösung der homogenen und inhomogenen Landau-Lifschitz-Gilbert DGL (LLG) unter Berücksichtigung der uniaxialen Anisotropie, Probenform und Wirbelstromcharakteristik [1]:

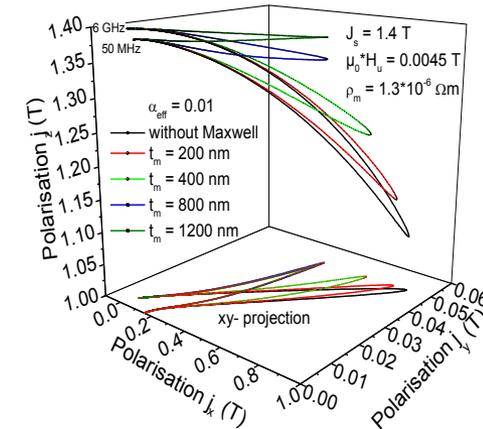
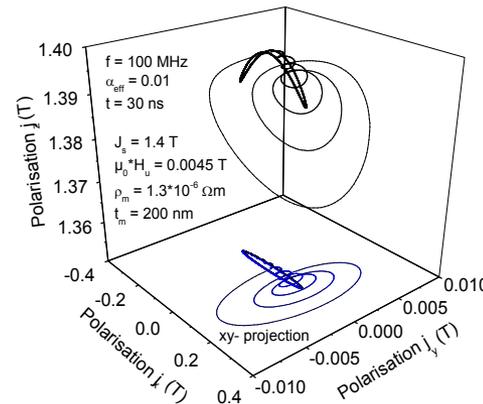
$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} + \frac{\alpha_{\text{eff}}}{M_s} \left(\mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \right)$$



$$= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ H_u \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} h_x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -N_x \cdot m_x \\ -N_y \cdot m_y \\ -N_z \cdot M_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_x - N_x \cdot m_x \\ -N_y \cdot m_y \\ H_u - N_z \cdot M_s \end{pmatrix}$$

Entmagnetisierungsfaktoren: $N_{yy} = 1 \Rightarrow N_{xx} = N_{zz} = 0$

$$|\mathbf{H}_{\text{eff}}|^2 = H_u^2 + M_s \cdot H_u \quad (\text{für } h_x < H_u)$$



Resonanzfrequenz:

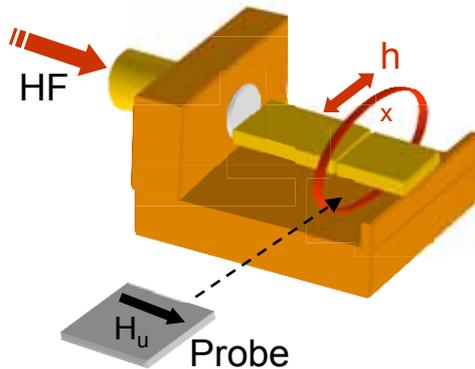
$$f_{\text{FMR}} = \frac{\gamma}{2 \cdot \pi \cdot (1 + \alpha_{\text{eff}}^2)^2} \cdot \mu_0 \cdot \sqrt{H_u^2 + H_u \cdot M_s - \frac{M_s^2 \cdot \alpha_{\text{eff}}^2}{4}}$$

Für $\alpha_{\text{eff}} \ll 1$: $f_{\text{FMR}} = \frac{\gamma}{2\pi} \cdot \mu_0 \cdot \sqrt{H_u^2 + M_s \cdot H_u}$

[1] K. Seemann*, H. Leiste, K. Krüger, J. Magn. Mater. 321 (2012) 3149

Messung des Frequenzverhaltens bzw. der Magnetisierungsdynamik (Permeabilitätsspektren)

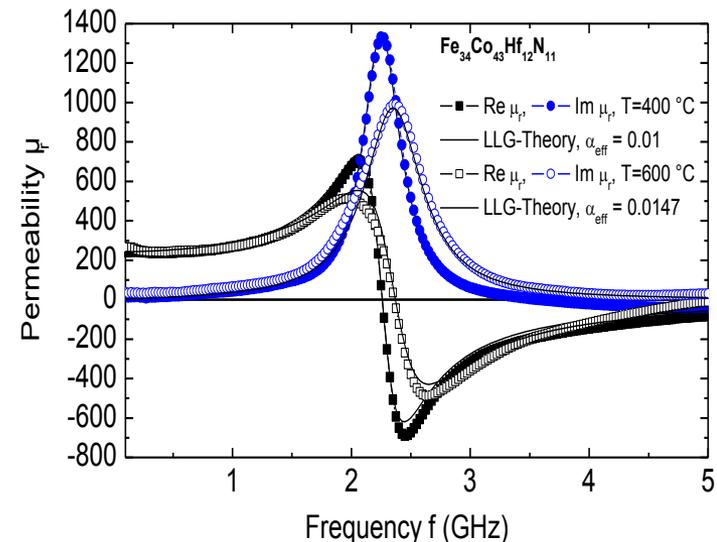
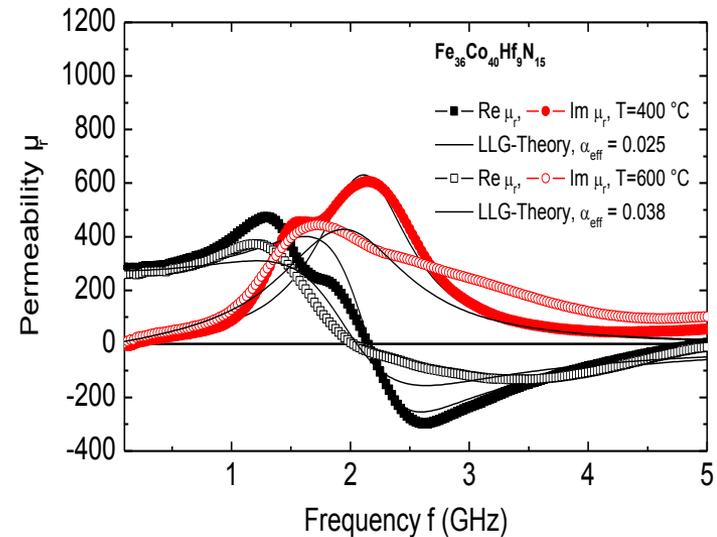
Messung mit $Z_0 = 50 \Omega$
 Strip-line-Permeameter bis 5 GHz
 und Netzwerkanalysator [1,2]:



S-Reflexionsparameter:
 (Strip-line Charakteristik)

$$S_{11} = S_0 \cdot e^{-\frac{i 4 \cdot \pi \cdot f \cdot \sqrt{\mu_{\text{eff}} \cdot \epsilon_{\text{eff}}}}{c_0} \cdot l}$$

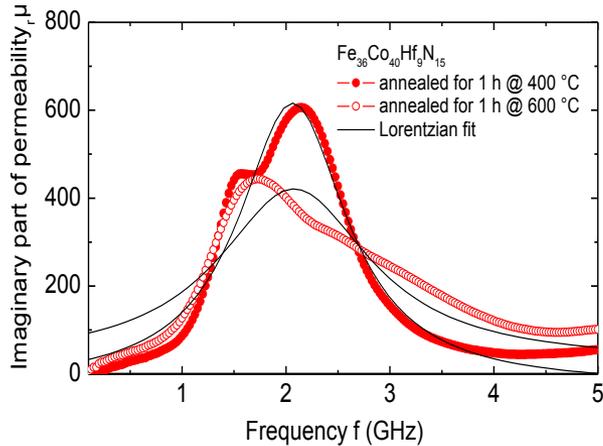
$$\mu_r(f) = \mu^l(f) + i\mu^ll(f)$$



[1] V. Bekker*, K. Seemann, H. Leiste, J. Magn. Magn. Mater. 270 (2004) 327

[2] Y. Liu et al., Ong, Rev. Sci. Instrum. 76 (2005) 063911

Resonanzlinienverbreiterung HF-Verluste (Dämpfung der Präzession magn. Momente)



Inhomogene Linienverbreiterung:

- Resonanzen anderer magn. Phasen oder einzelner Kristallite
- hohe Fluktuationen in H_u und J durch stärkeren Einfluss der Kristallanisotropie

Imaginärteil „lorentzförmig“ \Rightarrow homogene Linienverbreiterung:

$$\alpha_{\text{eff}} = \alpha_{\text{int}} + \alpha_{\text{ext}}$$

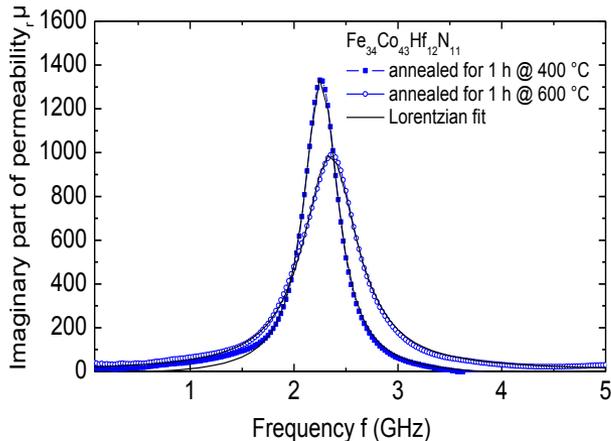
$$\Delta f_{\text{eff}} = \Delta f_{\text{int}} + \Delta f_{\text{ext}}$$

Intrinsische Eigenschaften:

- Zeeman- Übergang
- Streuung von itineranten Elektronen am Gitter (Phononen) durch Spin-Bahndrehimpuls Kopplung $\xi_s(R_{n,l})$ [1,2]

Extrinsische Eigenschaften:

- Entartete Spinwellen mit f_{FMR}
- 2- Magnonenstreuung an nichtmagn. Phasen, Poren, Gitterinhomogenitäten...[3,4] (stat. Mode $k \approx 0 \rightarrow k > 0$)



[1] V. Kamberský, Can. J. Phys. 48 (1970) 2906

[2] K. Seemann*, H. Leiste, Ch. Klever, J. of Magn. Magn. Mater. 322 (2010) 2979

[3] M.J. Hurben, D.R. Franklin, C.E. Patton, J. Appl. Phys. 81 (1997) 7458

[4] K. Seemann*, H. Leiste, J. of Magn. Magn. Mater. 321 (2009) 742

- **Motivation**
- **Grundlagen**
 - Modelle der ferromagnetischen Resonanz (FMR)
 - Hypothese - Schicht-Materialdesign für hohe FMR
- **Prinzip der Schichtherstellung und Schichtkonditionierung**
 - Phasendiagramme Fe-Co und Hf-N als Grundlage der Dünnschichtsynthese von Fe-Co-Hf-N- Nanokompositschichten
- **Ergebnisse der Schichtstruktur**
 - TEM- Beugungsuntersuchungen
 - Nanostruktur und Kristallitgrößen
- **Uniaxiale Anisotropie und Präzession magn. Momente in Schichten**
 - Entstehung der uniaxialen Anisotropie (Min. der magnetokristallinen Anisotropie)
 - Modell der Spinpräzession und dessen indirekte Messung
 - Dämpfung der Präzession
- **Anwendungsbeispiele**
- **Zusammenfassung**

Anwendungsbeispiele

Patent (Mikroinduktor):

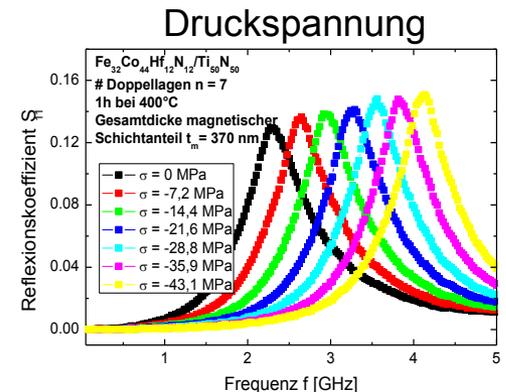
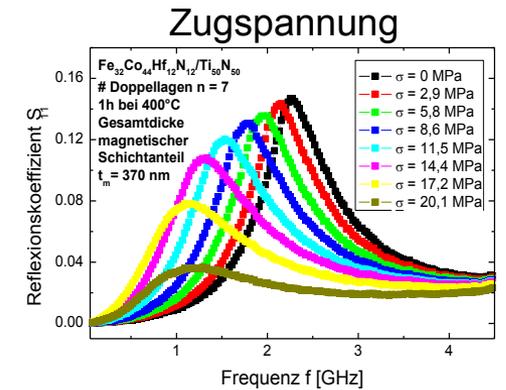
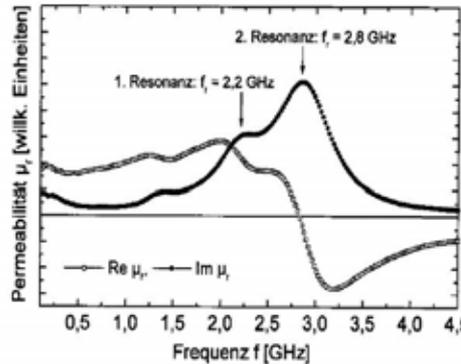
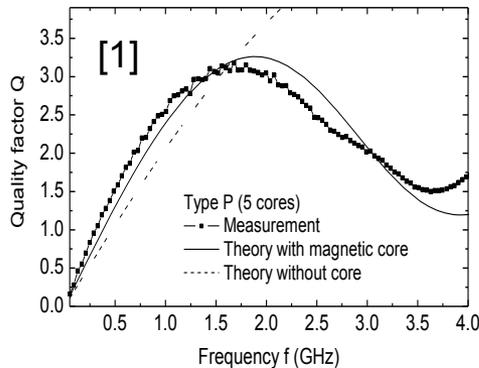
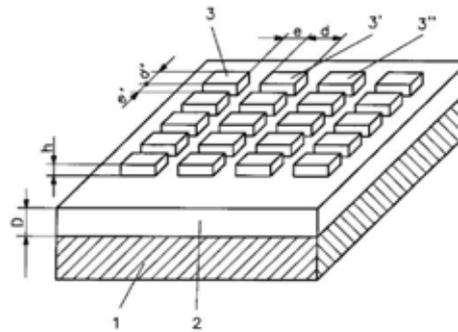
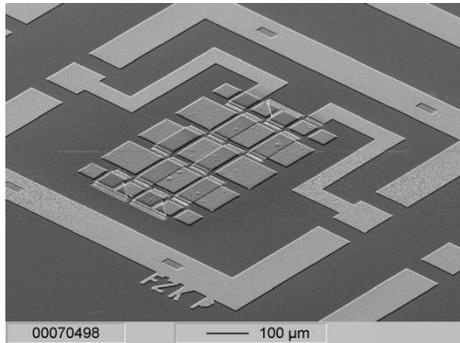
Nr. 101 04 648
 No. US 2003/0160675 A1
 A. v. d. Weth, K. Seemann,
 I. Fergen

Patent (Reflexionsdämpfung):

Nr. 10 2005 022 473
 No. US 7,834,818 B2
 K. Seemann, H. Leiste, V. Bekker,
 S. Zils

DFG Projekt: **SPP 1299 HAUT**

„Nanostrukturierte magnetische
 Dünnschicht-Komposite für
 Anwendungen in der
 Hochtemperatur-Sensorik“
 („Magnetoelastischer Effekt“)



[1] K. Seemann*, H. Leiste, V. Bekker, J. of Magn. Magn. Mater. 302 (2006) 321

Zusammenfassung

- **Ausarbeitung theoretischer Modelle zur Beschreibung der Wechselwirkung zw. TM- Wellen und ferromagnetischen Nanokompositschichten**
- **Voraussetzungen und Hypothesen für das Schichtdesign**
- **Ergebnisse der statischen und dynamischen Magnetisierung bzw. Schichteigenschaften**
- **Demonstration von Anwendungspotentialen in der Mikroelektronik, EMV- und Sensortechnik**