



Offen im Denken

Aufbau und Test eines Mikroskops zur Messung der
photothermisch modulierten ferromagnetischen
Resonanz

Bachelorarbeit
zur Erlangung des Grades eines Bachelor of Science
geschrieben von

Carola Lottis

aus

Mülheim an der Ruhr

durchgeführt an der Fakultät für Physik
in der Arbeitsgruppe Farle

September 2012

Zusammenfassung

In dieser Bachelorarbeit wurde ein Versuchsaufbau zur Messung der photothermisch modulierten ferromagnetischen Resonanz (PM-FMR) erstellt. Für die photothermische Modulation wurde ein Laser in den Aufbau integriert und mit verschiedenen Frequenzen amplitudenmoduliert. Die zu untersuchende ferromagnetische Probe befand sich in einem lithographisch hergestellten Mikroresonator.

Die zur Durchführung des Experiments benötigten Bauteile wurden entworfen und angefertigt. Nach dem Aufbau des Versuches wurden die einzelnen Elemente erfolgreich auf ihre Funktionstüchtigkeit getestet. Anschließend wurde auf einem Siliziumsubstrat ein Mikroresonator auf Cu Basis hergestellt. Dazu benutzte man das Verfahren der Elektronenstrahlolithographie. In einem zweiten Lithographieprozess wurde die ferromagnetische Probe (Permalloy) in den Resonator eingebaut. Zur Vorbereitung wurde die Permalloy-Probe mittels ferromagnetischer Resonanz untersucht. Die Messung des reflektierten Mikrowellensignals des Resonators erfolgte durch eine Feldmodulation. Das gefundene Signal sollte mit der PM-FMR Messung ebenfalls lasermoduliert gemessen werden.

Anhand der verschiedenen Messungen konnte das gefundene FMR-Signal verifiziert werden. Es konnte jedoch nicht mit dem vorher gemessenen FMR-Signal verglichen werden. Gründe bzw. Verbesserungen im Aufbau wurden im weiteren Verlauf der Arbeit diskutiert.

Construction and testing of a microscope for measuring photothermally modulated ferromagnetic resonance

In this work, a construction to measure photothermically modulated ferromagnetic resonance (PM-FMR) was designed. To measure through photothermal modulation, a laser was included in the setup and was with different frequencies amplitude-modulated. The ferromagnetic sample was placed in a lithographically made micro resonator.

The different parts for the setup were designed and built. After finishing the setup, the different parts were inspected and deemed working properly. In the next step, a micro resonator, based on copper, was made on a silicon substrate through electron beam lithography. In a second lithography process a ferromagnetic sample (permalloy) was built in the micro resonator.

In preparation the permalloy-sample was examined by ferromagnetic resonance (FMR). By field modulation the reflected microwave signal of the micro resonator was measured. Through PM-FMR, the located signal should also be measured by laser modulation.

Through different measurements, the located FMR-signal could be verified, but a comparison between this signal and the signal before was not possible. Reasons and suggestions for improvement of the setup were discussed.

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	1
2 Theoretische Grundlagen	2
2.1 Einführung in die ferromagnetische Resonanz	2
2.1.1 Eigenschaften eines Ferromagneten	2
2.1.2 Ferromagnetische Resonanz	2
2.1.3 Komponenten des effektiven Magnetfeldes	3
2.1.4 Anisotropiebeiträge zur freien Energiedichte	4
2.1.5 Lösung der Bewegungsgleichung	6
2.1.6 Messverfahren der konventionellen ferromagnetischen Resonanz	7
2.2 Einführung in die photothermisch modulierte ferromagnetische Resonanz	9
2.2.1 Unterschied zwischen der konventionellen und der photothermisch modulierten ferromagnetischen Resonanz	9
2.2.2 Die Temperaturabhängigkeit der Hochfrequenzsuszeptibilität	9
2.2.3 Eigenschaften der thermischen Welle	10
3 Aufbau	11
3.1 Experimenteller Versuchsaufbau	11
3.2 Preparation des Mikroresonators mit einem Permalloy-Streifen	15
3.2.1 Herstellung und Funktion eines Mikroresonators	15
3.2.2 Einbau der Permalloy-Probe	16
3.2.3 Begutachtung des Mikroresonators mit der eingebauten Permalloy-Probe	16
4 Messungen	18
4.1 Vorbereitungen	18
4.1.1 Testmessungen der Verschiebeeinheit des Lasers ("NanoCube")	18
4.1.2 Messung eines konventionellen FMR-Spektrums	19
4.2 PM-FMR	23
5 Diskussion und Ausblick	27
Abbildungsverzeichnis	29
Literaturverzeichnis	31
Anhang	33

1 Einführung

Die Motivation für diese Bachelorarbeit liegt darin, einen Aufbau zu entwerfen und zu testen, der durch passende Erweiterungen in der Lage wäre, Nanopartikel zu untersuchen. Mit Hilfe der Nanopartikel haben Mediziner einen Möglichkeit gefunden, die Heilungschancen für Krebskranke zu verbessern. Erste Tests zeigten, dass Nanopartikel, die in ein Substrat eingearbeitet wurden, welches sich nur an Tumorzellen anlagert, bei einem schnell wechselnden Magnetfeld so viel Wärme erzeugen, dass die Krebszellen sterben. Bei diesen Versuchen wurden vor allem Eisenoxid-Partikel eingesetzt [1]. Da die Partikel aufgrund des Substrates, in dem sie eingearbeitet worden sind, nur an den Tumorzellen haften, ist dies gegenüber der Chemotherapie eine körperschonendere Art, den Krebs zu bekämpfen. [2]. Daher kann es von großem Nutzen sein, mehr über die Eigenschaften von Nanopartikeln zu erfahren.

Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, einen Aufbau zu entwickeln und zu testen, mit dem ferromagnetische Proben durch die photothermisch modulierte ferromagnetische Resonanz (kurz: PM-FMR) angeregt werden können und dies durch Messungen zu zeigen. Da das Projekt nach der Bachelorarbeit weitergeführt werden soll, werden bereits Bauelemente integriert, um später Proben lokal untersuchen zu können.

Die konventionelle ferromagnetische Resonanz (kurz: konventionelle FMR) wird benutzt, um ganze Proben auf ihre ferromagnetischen Eigenschaften zu untersuchen. Hierbei wird die Reaktion der gesamten Probe auf ein externes Magnetfeld beobachtet. Bei der PM-FMR wird eine neue Komponente hinzugefügt, ein Laser. Durch eine Modulation dieses Lasers kann bei der PM-FMR die Oberfläche der Probe lokal erwärmt werden. Da das Messsignal temperaturabhängig ist, kann das Messverfahren bzw. der Aufbau so entwickelt werden, dass die Reaktion des erwärmten Bereichs auf das Magnetfeld gemessen wird.

Der Versuchsaufbau wird aus einem Versuchsaufbau für die konventionelle FMR bestehen und mit einem modulierten Laser kombiniert werden. Gleichzeitig wird ein LabVIEW[©]-Programm entwickelt, um das Experiment steuern und die Messdaten aufnehmen zu können. Ein "NanoCube" wird als Vorbereitung für eine lokale Untersuchung der Probe in den Versuchsaufbau integriert. Dieser "NanoCube" ist in der Lage, sich einen Bereich von 100 μm in alle drei Raumrichtungen zu bewegen. Er besitzt eine Halterung, an welcher der Laser befestigt werden könnte.

Diese Arbeit ist in Abschnitte unterteilt. Zu Beginn werden die relevanten theoretischen Hintergründe und Messverfahren für diese Arbeit vorgestellt. Folgen wird eine Erläuterung des gesamten Versuchsaufbaus. Dies schließt die Beschreibung der einzelnen Komponenten sowie den Verlauf des Messens mit ein. Danach werden die erzielten Ergebnisse präsentiert und diskutiert. Abschließend folgt ein Ausblick, wie das Projekt weitergeführt werden könnte, sodass das Ziel, Nanopartikel zu untersuchen, erreicht werden kann.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Einführung in die ferromagnetische Resonanz

2.1.1 Eigenschaften eines Ferromagneten

Ein Ferromagnet ist ein Material, welches ohne ein extern angelegtes Feld eine spontane Magnetisierung aufweist. Diese Magnetisierung (\vec{M}) ist die Summe der einzelnen magnetischen Momente (\vec{m}) pro Volumen (V) [8].

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{m}}{V} \quad (1)$$

Die Spins sind in einem Ferromagneten gekoppelt, zwischen ihnen herrscht die Austauschwechselwirkung. Die Austauschenergie zwischen zwei Elektronen (i und j) kann folgendermaßen beschrieben werden [4]:

$$U = -2J\vec{S}_i \cdot \vec{S}_j \quad (2)$$

J ist das sogenannte Austauschintegral und beschreibt die Stärke der Kopplung. Für Ferromagneten ist dies eine positive Größe. Der genaue Wert ist von dem jeweiligen Material abhängig. Die spontane Ausrichtung der Spins bleibt zum größten Teil bestehen, so lange die Temperatur unterhalb der Curie-Temperatur liegt. Oberhalb dieser Temperatur wird der Ferromagnet zum Paramagneten. Die Curie-Temperatur ist materialabhängig [9].

2.1.2 Ferromagnetische Resonanz

Bei der FMR kann mit einem externen Magnetfeld kein einzelner Spin, sondern nur das gesamte Spin System angeregt werden. Alle magnetischen Momente werden zu einer Magnetisierung zusammengefasst.

Solange auf die Magnetisierung kein externes Magnetfeld wirkt, zeigt sie in Richtung ihrer Ruhelage. Wenn der Ferromagnet in einem eindomänen Zustand ist, liegt die Ruhelage in der sogenannten leichten Richtung. Beim Anlegen eines externen Feldes, beginnt der Magnetisierungsvektor um die Richtung des effektiven Magnetfeldes (\vec{B}_{eff}) zu präzidieren. Das effektive Feld umfasst das externe und innere magnetische Feld (siehe Abschnitt 2.1.3). Diese Bewegung wird mit der folgenden Gleichung und in Abbildung 1 dargestellt [15]:

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma (\vec{M} \times \vec{B}_{\text{eff}}) + \frac{\alpha}{M} \left(\vec{M} \times \frac{d\vec{M}}{dt} \right) \quad (3)$$

Die linke Seite der Gleichung 3 beschreibt die zeitliche Entwicklung des Magnetisierungsvektors. Die rechte Seite beinhaltet das Drehmoment, welches auf die Magnetisierung

wirkt. Hierbei steht γ für das gyromagnetische Verhältnis. Der zusätzliche Summand auf der rechten Seite ist der Dämpfungsterm. Für α gilt:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\gamma M} \quad (4)$$

Hier bezeichnet λ die Relaxationsfrequenz. Dieser Term sorgt dafür, dass mit verstreichender Zeit die Magnetisierung in die Richtung des effektiven Magnetfeldes zeigt.

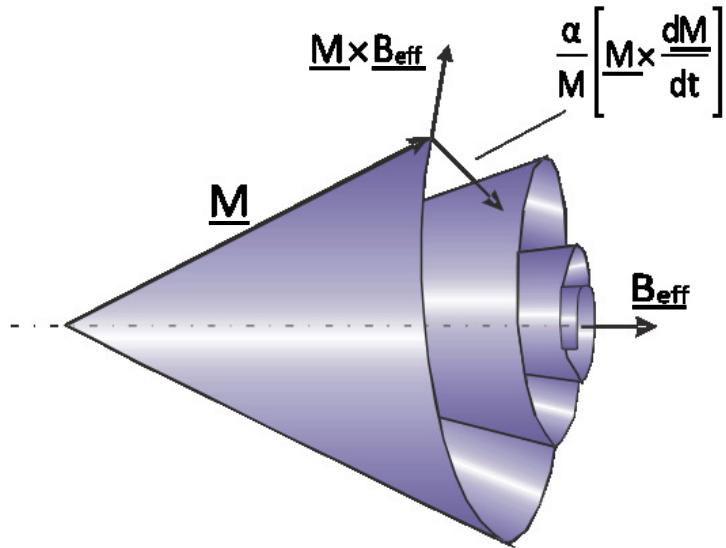


Abbildung 1: Bildliche Beschreibung der Gleichung 3 [16].

Um Resonanz zu erreichen, wird nun eine Mikrowelle mit einer vorher experimentell bestimmten Frequenz in den Resonator eingekoppelt. Wenn die Frequenz der Mikrowelle mit der Frequenz der Präzession der Magnetisierung übereinstimmt, kann die Magnetisierung die Energie der Mikrowelle absorbieren und präzidiert um die Richtung des effektiven Magnetfeldes.

2.1.3 Komponenten des effektiven Magnetfeldes

In Abschnitt 2.1.2 wurde das effektive Magnetfeld eingeführt. Dieses besteht aus folgenden Komponenten [12]:

$$\vec{B}_{\text{eff}} = \begin{pmatrix} b_{\text{Hf}} e^{i\omega t} \\ 0 \\ B \end{pmatrix} + \vec{B}_{\text{Anisotropie}} \quad (5)$$

Hierbei besteht die Konvention, dass das externe Magnetfeld in z-Richtung zeigt, während das Feld, welches durch die eingestrahlte Mikrowelle erzeugt wird, in x-Richtung zeigt.

Der zweite Summand des effektiven Feldes entsteht durch die verschiedenen Anisotropiebeiträge. Diese Beiträge werden in Abschnitt 2.1.4 erläutert. Der Gesamtbeitrag ist definiert durch Gleichung 6.

$$\vec{B}_{\text{Anisotropie}} = \frac{dF_{\text{Anisotropie}}}{d\vec{M}} \quad (6)$$

Die freie Energiedichte $F_{\text{Anisotropie}}$ ist gleich der Summe der freien Energiedichtebeiträge aus den Anisotropien.

2.1.4 Anisotropiebeiträge zur freien Energiedichte

Wenn ein externes Magnetfeld auf die Magnetisierung wirkt, wird diese aus ihrer leichten Richtung ausgelenkt. Wie viel Energie dafür aufgewendet werden muss, kann mit Hilfe der einzelnen freien Energiedichtebeiträge bestimmt werden. Die Voraussetzung für die folgenden Beiträge ist, dass die Dicke der Proben im Bereich von Nanometern liegt. Für die Symmetrie der Proben wird folgendes Koordinatensystem gewählt:

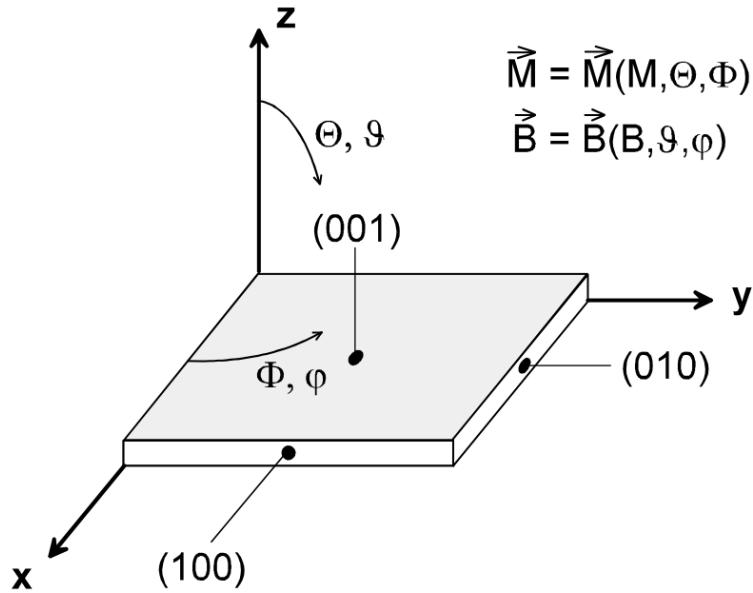


Abbildung 2: Definition der in dieser Arbeit verwendeten Kugelkoordinaten für Magnetisierung und externes Magnetfeld und der Probengeometrie bzgl. des Koordinatensystems. [12].

Der Zeeman-Beitrag

Der Zeeman-Beitrag zur freien Energiedichte ist der einzige Beitrag, der abhängig von dem externen Magnetfeld ist. Die freie Energiedichte für diesen Beitrag ist definiert durch [12]:

$$F_{\text{Zeeman}} = -\vec{M} \cdot \vec{B} \quad (7)$$

Magnetokristalline Anisotropie

Die Ursache für die magnetokristalline Anisotropie liegt in der Spin-Bahn-Kopplung. Die Spin-Bahn-Kopplung beschreibt die Wechselwirkung zwischen Spin und Bahndrehimpuls. Aufgrund der vorhanden Kristallstruktur gibt es keine isotrope Elektronenverteilung. Daher zeigt der Bahndrehimpuls in eine bevorzugte Richtung und durch die Spin-Bahn-Kopplung richten sich Spins ebenfalls in die energetisch günstigere Richtung aus. Für einen Kristall mit kubischer Symmetrie ist beispielsweise $\langle 100 \rangle$ die leichte, $\langle 110 \rangle$ die mittelschwere und $\langle 111 \rangle$ die schwere Richtung.

Für die Berechnung des freien Energiedichtebeitrages für einen kubischen Kristall gilt [12]:

$$F_{\text{Kristall}} = K_4(\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2) + K_6(\alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2) \quad (8)$$

In Gleichung 8 sind K_4 und K_6 die kubischen Kristallanisotropiekonstanten. α_i sind die sogenannten Richtungskosinusse. Sie beschreiben die Projektionen der Magnetisierung auf die i-ten Kristallachsen.

Oberflächenanisotropie

Aufgrund von Symmetrieverlusten an der Oberfläche, unterscheidet sich die Struktur des Materials an der Oberfläche von der Struktur im Inneren der Probe. Da die Anisotropien abhängig von der Struktur der Probe sind, beeinflussen diese Symmetrieverluste das Magnetfeld. Der zugehörige freie Energiedichtebeitrag sieht wie folgt aus [15]:

$$F_{\text{Oberfl.}} = \frac{K_{\text{Oberfl.,U}} + K_{\text{Oberfl.,O}}}{t_{\text{FM}}} \cos^2 \Theta \quad (9)$$

t_{FM} in Gleichung 9 beschreibt die reziproke Schichtdicke der Probe. Der Winkel Θ steht zur Probenoberfläche, wie es in Abbildung 2 dargestellt ist. Die Konstanten $K_{\text{Oberfl.,O}}$ und $K_{\text{Oberfl.,U}}$ sind die Anisotropiekonstanten der oberen bzw. der unteren Grenzschicht.

Entmagnetisierungsfeld

Dieser Anisotropiebeitrag entsteht durch die langreichweite Dipol-Dipol-Wechselwirkung. Im Inneren des Kristalls können die magnetischen Momente miteinander wechselwirken. An den Grenzflächen entstehen aufgrund der fehlenden Partner nicht wechselwirkende Momente. Um diese zu kompensieren, bildet sich ein Entmagnetisierungsfeld. Die Größe des Feldes ist abhängig von einem Entmagnetierungstensor, der Magnetisierung des Kristalls und der magnetischen Feldkonstanten [15]:

$$\vec{B}_{\text{dem}} = \underline{\underline{N}} \cdot \mu_0 \vec{M} \quad (10)$$

Bei dem Entmagnetierungstensor handelt es sich um einen Tensor zweiter Stufe. Bei

dünnen Scheiben hat nur die N_{zz} -Komponente einen Beitrag. Da die Spur dieses Tensors immer eins sein muss, ist der N_{zz} -Wert in diesem Fall ebenfalls eins [12].

2.1.5 Lösung der Bewegungsgleichung

Um die Gleichung 3 zu lösen, wird sie mit Kugelkoordinaten ausgedrückt. Als Bedingung wird gefordert, dass

$$\frac{\partial F}{\partial \Theta} = 0 \text{ und } \frac{\partial F}{\partial \Phi} = 0 \quad (11)$$

gilt [15]. Dies sind die Gleichgewichtsbedingungen der Magnetisierung.

Wenn nun das effektive Magnetfeld eingesetzt wird, ergibt sich als Lösung (Rechenschritte können in [17] nachvollzogen werden):

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = \frac{1 + \alpha^2}{M^2 \sin^2(\Theta)} \left(\frac{\partial^2 F}{\partial \Theta^2} \frac{\partial^2 F}{\partial \Phi^2} - \left(\frac{\partial^2 F}{\partial \Theta \partial \Phi} \right)^2 \right) \quad (12)$$

Um Gleichung 12 zu erhalten wird der Magnetisierungsvektor in einen konstanten und einen frequenzabhängigen Anteil aufgeteilt [12].

$$\vec{M} = \vec{M}_{\text{stat}} + \vec{m} e^{i\omega t} \quad (13)$$

Dieser Ansatz kann wiederum in die Bewegungsgleichung eingesetzt werden, sodass sich folgender Zusammenhang ergibt:

$$\vec{m} e^{i\omega t} = \underline{\underline{\chi}} \cdot \vec{b} e^{i\omega t} \quad (14)$$

\vec{m} bzw. $\underline{\underline{\chi}} \cdot \vec{b} e^{i\omega t}$ stammt aus dem Mikrowellenbeitrag. Das $\underline{\underline{\chi}}$ wird als Hochfrequenzsuszeptibilitätstensor bezeichnet. Dieser Tensor lässt sich in einen Real- und Imaginärteil aufteilen.

$$\underline{\underline{\chi}} = \underline{\underline{\chi}}' - i \underline{\underline{\chi}}'' \quad (15)$$

Der Realteil beschreibt den dispersiven und der Imaginärteil den dissipativen Anteil. Das FMR-Signal wird durch den dissipativen Anteil beschrieben. Durch Einsetzen von Gleichung 14 in Gleichung 3 kann das $\underline{\underline{\chi}}$ berechnet werden (Rechenschritte können in [12] nachvollzogen werden). In den Experimenten wird das χ''_{xx} die Messgröße sein. Diese Messgröße ist abhängig von der Frequenz der Mikrowelle, der Magnetisierung, dem externen Magnetfeld sowie den Anisotropiekonstanten.

2.1.6 Messverfahren der konventionellen ferromagnetischen Resonanz

Bei der konventionellen FMR-Messung befindet sich die Probe in einem Hohlraumresonator. Dieser wird von einem Elektromagneten umgeben. Um messen zu können, wird eine Mikrowelle in den Resonator eingekoppelt.

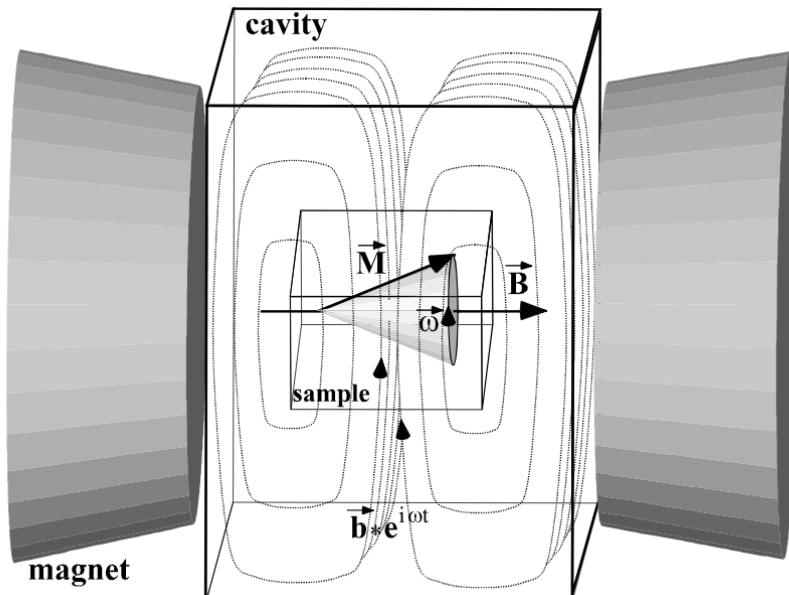


Abbildung 3: Prinzip der ferromagnetischen Resonanz Messung: Ein Hohlraumresonator (Cavity) befindet sich zwischen einem Magneten. In der Cavity befindet sich die Probe. Das externe Magnetfeld geht vom linken zum rechten Pohlschuh, dies wird durch \vec{B} gekennzeichnet. Senkrecht zu dem Feld steht die Mikrowelle [12].

Die Mikrowellenfrequenz wird aus praktischen Gründen meist konstant gehalten. Wie schon in Kapitel 2.1.5 erwähnt wurde, ist das χ''_{xx} die zu bestimmende Größe. Sie ist abhängig von der eingestrahlten Frequenz, der Magnetisierung, dem externen Magnetfeld, den Anisotropiekonstanten und der Temperatur. Um ein Signal messen zu können, wird ein moduliertes externes Magnetfeld hinzugefügt. In dieser Arbeit betrugen die Modulationsamplitude und -frequenz 4 Gp-p und 12.5 kHz. Die reflektierte Mikrowelle wird an einen Lock-In Verstärker weitergegeben. Als Referenzfrequenz bekommt der Lock-In Verstärker die Modulationsfrequenz des Magnetfeldes. Der Lock-In Verstärker vergleicht das eingehende Mikrowellensignal mit der Modulationsfrequenz. Dadurch gibt er als Messsignal nicht χ''_{xx} , sondern die Ableitung von χ''_{xx} nach dem Magnetfeld aus, wie Abbildung 4 zeigt. Die Resonanz ist der Nulldurchgang zwischen den beiden Extrema. Der Abstand zwischen diesen Extrema ist die Linienbreite [12].

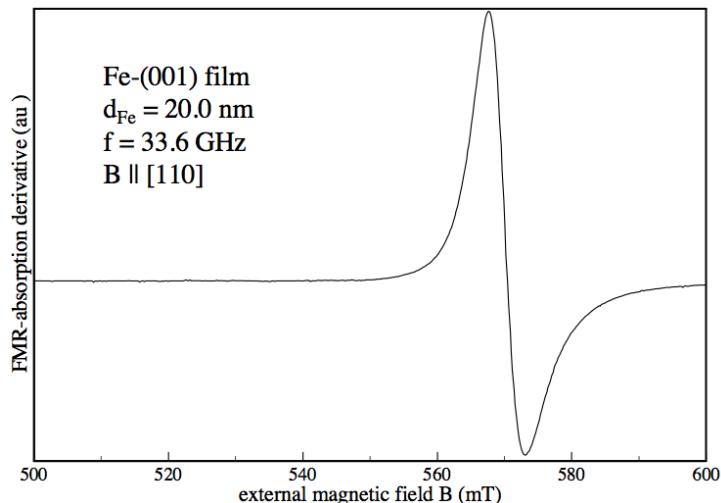


Abbildung 4: Beispiel für ein konventionelles FMR-Spektrum. Aufgetragen ist die Ableitung der FMR-Absorption nach dem Magnetfeld über das externe Feld. Bei der Messung wurde ein Eisenfilm von 20 nm Dicke benutzt [12]. Gemessen wurde bei 302.5° Kelvin. Die Modulationsfrequenz und -amplitude betrugen 100 kHz und 4 mT.

2.2 Einführung in die photothermisch modulierte ferromagnetische Resonanz

2.2.1 Unterschied zwischen der konventionellen und der photothermisch modulierten ferromagnetischen Resonanz

Bei der photothermisch modulierten ferromagnetischen Resonanz (PM-FMR) breitet sich in der Probe eine thermische Welle aus. Die thermische Welle entsteht durch die Modulation eines Lasers, welcher auf die Probe fokussiert wird. Mit einer gewählten Frequenz wird der Laser an- und ausgeschaltet, dadurch ändert sich die Temperatur der Probe an der fokussierten Stelle mit der gleichen Frequenz. Diese kontinuierliche Temperaturänderung hat einen Einfluss auf die Magnetisierung und die Anisotropiekonstanten. Da die Hochfrequenzsuszeptibilität von der Magnetisierung und den Anisotropiekonstanten abhängt, beeinflusst die Temperaturänderung die Hochfrequenzsuszeptibilität ebenfalls. Dadurch können Proben mit diesem Verfahren – im Gegensatz zur konventionellen FMR – lokal untersucht werden [12].

2.2.2 Die Temperaturabhängigkeit der Hochfrequenzsuszeptibilität

Es gilt [12]:

$$\chi''_{xx}(T) = \chi''_{xx}(f, M(T), K_4(T), K_6(T), B) \quad (16)$$

Die Temperaturabhängigkeit dieser Parameter ist für einkristallines Eisen in Abbildung 5 dargestellt werden.

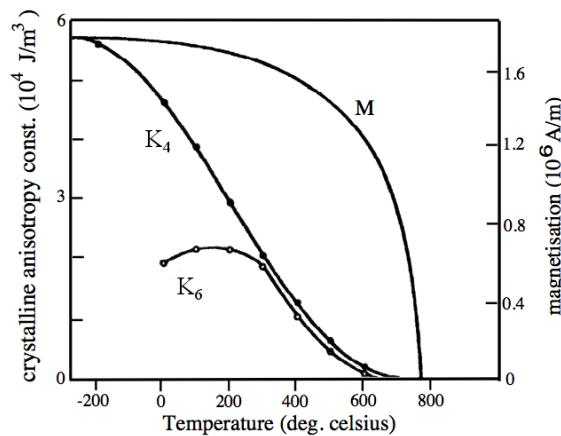


Abbildung 5: Temperaturabhängigkeit von der Magnetisierung M und der Kristallanisotropiekonstanten K_4 und K_6 für ein einkristallines Eisen [3]

In Abbildung 5 wird deutlich, dass der Wert für K_4 stark von der Temperatur im Bereich von Raumtemperatur abhängt und somit auch das χ''_{xx} stark beeinflusst.

2.2.3 Eigenschaften der thermischen Welle

Bei der PM-FMR wird wie bei der konventionellen FMR mit einem Lock-In Verstärkers gemessen. Als Referenzfrequenz wird die Modulationsfrequenz des Lasers an den Lock-In Verstärker gegeben, daher misst dieser nur das Verhalten der Probe an der erwärmten Stelle. Bei der Messkurve wird die Ableitung von $\chi''_{xx}(T)$ nach der Temperatur über das externe Magnetfeld aufgetragen.

Mit Hilfe der Wärmediffusionsgleichung kann die Temperaturverteilung in der Probe bestimmt werden.

$$\rho c \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} - \nabla \cdot (\lambda \nabla T(\vec{r}, t)) = W(\vec{r}, t) \quad (17)$$

Hierbei ist ρ die Dichte, c die spezifische Wärmekapazität, λ der Wärmeleitkoeffizient und $W(\vec{r}, t)$ die Heizquelle (bzw. der Laser) [7].

Die thermische Welle wird in einen konstanten und einen oszillierenden Teil aufgeteilt:

$$T(\vec{r}, t) = T_0(\vec{r}) + \theta(\vec{r}, t) \quad (18)$$

Um nun $\theta(\vec{r}, t)$ bestimmen zu können, wird angenommen, dass es sich bei der Probe um ein halbunendliches homogenes Material handelt und dass nur an der Oberfläche periodisch geheizt wird. Für eine eindimensionale thermische Welle ergibt sich damit als Lösung der Gleichung 17:

$$\theta(d, t) = \theta_0 e^{\frac{d}{\mu}} e^{i(\omega_{\text{mod}} t - \frac{d}{\mu})} \quad (19)$$

In Gleichung 19 bezeichnet d den Abstand zur Oberfläche und μ wird als thermische Diffusionslänge bezeichnet. Die Diffusionslänge beschreibt, nach welcher Strecke die Welle auf $1/e$ abgefallen ist [12]. Definiert ist die Diffusionslänge durch

$$\mu = \sqrt{2\lambda/\rho c \omega_{\text{mod}}} \quad (20)$$

Für homogenes Silizium ergibt sich bei einer Modulation von 5 kHz eine Diffusionslänge von $39 \mu\text{m}$.

Diese Gleichung gilt, solange der Radius der Heizquelle größer als die Diffusionslänge ist. Bei einem geringeren Radius verringert sich die Diffusionslänge proportional mit dem Radius [13], die thermische Welle breitet sich im Material immer weniger aus. Damit wird auch nur ein geringerer Teil der Probe thermisch moduliert und somit kann die Probe lokal untersucht werden.

3 Aufbau

3.1 Experimenteller Versuchsaufbau

Für die PM-FMR Messung ist ein neuer Aufbau auf einem schwingungsgeämpften optischen Tisch konstruiert worden. Bei den folgenden Abbildungen (Abb. 6, Abb. 7 und Abb. 8), welche den Aufbau beschreiben, ist zu beachten, dass sie zur besseren Übersicht nicht maßstabsgetreu angefertigt worden sind.

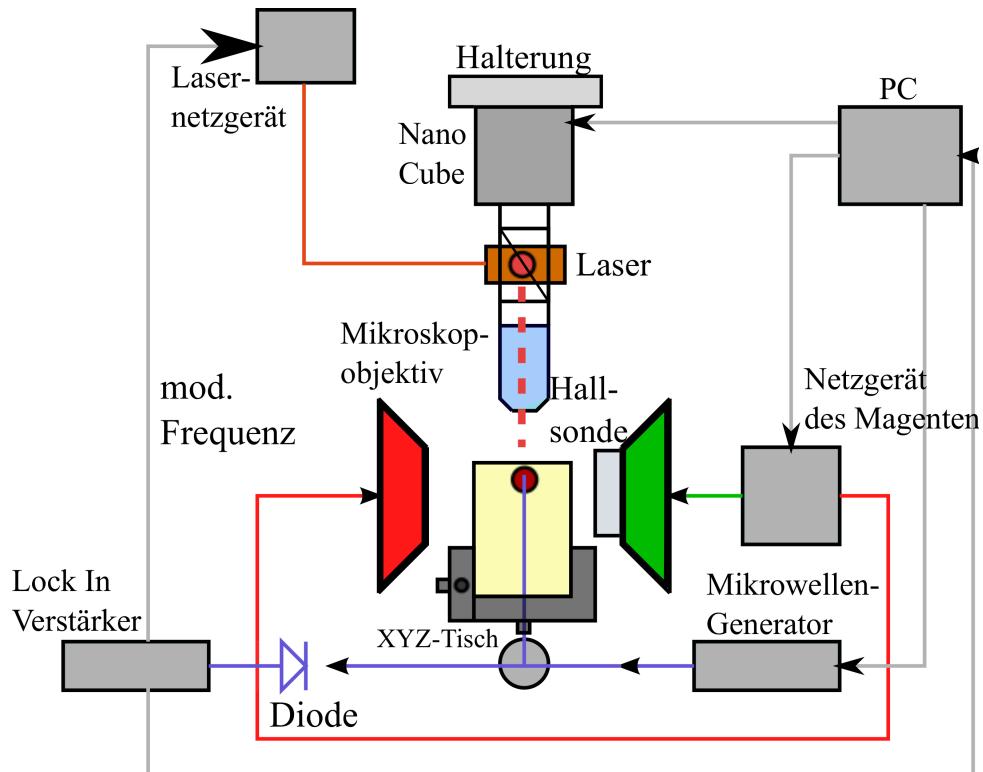


Abbildung 6: Diese Abbildung zeigt eine schematische Skizze des Versuchsaufbaus. Die optischen Komponenten sowie der Probenhalter werden in Abbildung 7 bzw. in Abbildung 8 dargestellt.

In Abbildung 6 wird der gesamte Versuchsaufbau schematisch dargestellt. Über den PC werden das Magnetfeld, die Position des "NanoCubes" sowie der Mikrowellengenerator eingestellt. Am Lasernetzgerät kann die Intensität des Lasers per Hand variiert werden. Der Lock-In Verstärker erzeugt die Modulation des Lasers. Der Laser befindet sich in der Vertikalen und der Laserstrahl wird mit Hilfe eines Spiegels durch ein Mikroskopobjektiv gelenkt und trifft anschließend auf die Probe. Für die Ausrichtung der Probe dient ein XYZ-Tisch. An ihm befinden sich drei Verstellschrauben, mit denen der Tisch und damit auch die Probe in alle drei Raumrichtungen verschoben werden können. Der Zirkulator schleust die Mikrowelle in das Mikrowellenkabel ein und gibt die reflektierte Mikrowelle an eine Mikrowellendiode weiter. Der Lock-In Verstärker erhält das Signal der Mikrowel-

lendiode. Dieses wird vom Lock-In Verstärker verarbeitet und an den PC weitergeleitet. Um den Aufbau des Lasers und den Strahlengang besser nachvollziehen zu können, wurde ein zweites Schaubild erstellt (siehe Abbildung 7).

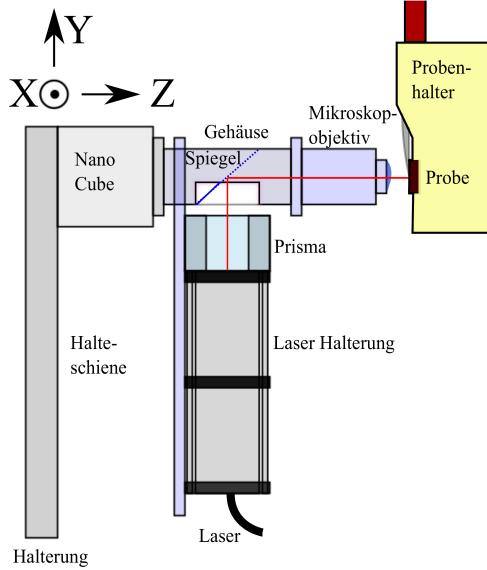


Abbildung 7: Ausschnitt aus dem Versuchsaufbau: Hier werden die optischen Komponenten des Versuchsaufbaus dargestellt.

In Abschnitt 2.2.1 wurde das Messprinzip für die PM-FMR beschrieben. Der Laser in diesem Versuchsaufbau hat eine Wellenlänge von 677 nm (rot) und besitzt eine maximale Leistung von 1 W. Das Lasernetzgerät ist die Spannungsversorgung des Lasers (Firma: Opto Power Corporation (OPC); Modell: PS03-A). Es besitzt einen Eingang, mit dem der Laser moduliert werden kann.

Der Laser befindet sich in einer angefertigten Halterung (Abb. 7). Diese Halterung besteht aus einem Metallrohr, welches durch die 3 schwarzen Rahmen festgehalten wird. Diese Rahmen sind über Metallstäbe an jeder Ecke (4 insgesamt) miteinander verbunden. Der Laser kann durch Feststellschrauben in diesem Eisenrohr ausgerichtet und befestigt werden. Die bisher beschriebene Konstruktion wird an der Halteschiene angeschraubt. Damit ist der Laser in seiner Höhe verstellbar. Oberhalb der Lasers befindet sich ein Prisma. Es besteht aus zwei zusammengefügten Prismen, die einen halbdurchlässigen Spiegel bilden. Der Laserstrahl (in Abb. 7 durchgezogene Linie in Abb. 6 gestrichelte rote Linie) wird beim Durchlaufen des halbdurchlässigen Spiegels geteilt. Wichtig ist hier der Laserstrahlenanteil, der nicht um 90 Grad abgelenkt wird, sondern geradeaus durchgeht.

In dem Gehäuse befindet sich eine Öffnung in Richtung des Lasers, in der ein Spiegel eingebaut worden ist. Dieser Spiegel sorgt dafür, dass der Laserstrahl umgelenkt wird und durch eine weitere Öffnung im Gehäuse durch ein Mikroskopobjektiv gelangt. Dieses Objektiv ist von der Firma Helmut Hund GmbH. Es hat eine Tubuslänge von 160mm,

einen Abbildungsmaßstab von 63:1. Die numerische Apertur beträgt 0.85 und die Fokuslänge ist 288 μm lang. Die letzte Größe wurde experimentell bestimmt. Dafür wurde das Mikroskopobjektiv an ein Mikroskop angebracht und auf das sich unter dem Mikroskop befindende Objekt (hier: Pappe) scharf gestellt. Anschließend wurde der Spalt zwischen Objektiv und Pappe fotografiert. Da die Größe des Objektivs bekannt ist, konnten durch die Anzahl der Pixel und Umrechnungen der Abstand und damit auch die Fokuslänge bestimmt werden.

Nach dem Verlassen des Mikroskopobjektivs gelangt der Strahl auf die Probe, die in dem Probenhalter eingebaut worden ist. Um die maximale Leistung des Lasers ausnutzen zu können, sollte sich die Probe im Bereich des Fokus befinden. Die Reflexion des Laserstrahls von der Probe kann detektiert werden. Der Strahl gelangt durch das Objektiv über den Spiegel zurück in das Prisma und ein Teil des reflektierten Lichts wird durch den halbdurchlässigen Spiegel um 90 Grad abgelenkt. Durch Anbringen einer Photodiode auf der passenden Seite neben dem Prisma kann die Intensität des reflektierten Signals gemessen werden.

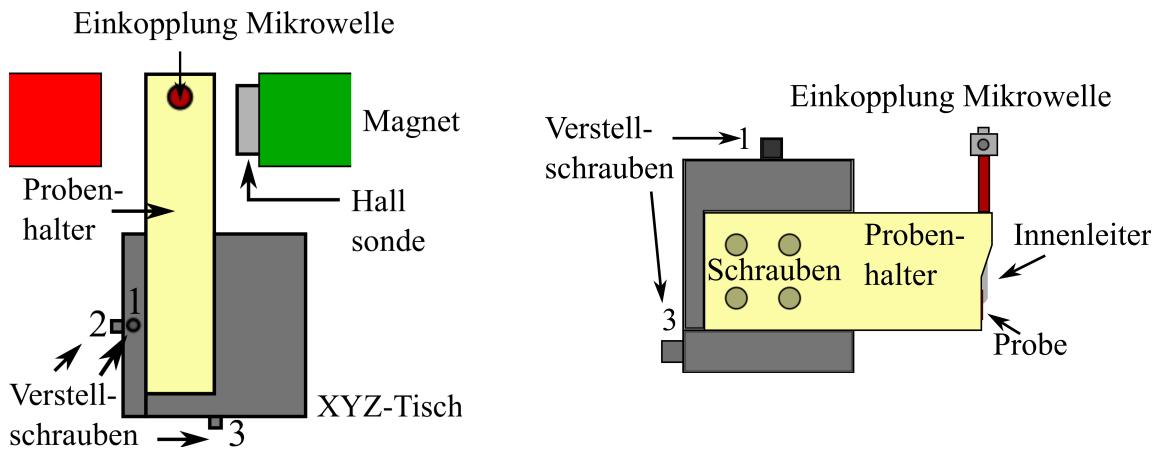


Abbildung 8: Ausschnitt aus dem Versuchsaufbau: Ansicht des Probenhalters aus der Vogelperspektive (links) und aus der Seitenansicht (rechts).

Um die Probe kontrolliert in ihrer Position verschieben zu können, ist der Probenhalter auf einem XYZ-Lineartisch (Firma: Owis; Modell: MVT-40B-XYZ-UM) befestigt (siehe Abb. 8). Dieser Tisch ermöglicht es, den Probenhalter und damit die Probe über Verstellschrauben in alle drei Raumrichtungen zu bewegen. Die Stelllänge beträgt in jede Richtung 6 mm, hat eine Skaleneinteilung von 5 μm und eine Einstellgenauigkeit von 1 μm .

Da dieser Aufbau in der Lage sein soll, verschiedene Positionen auf der Probe zu untersuchen, ohne dass die Probe bewegt werden muss, sind der Laser, das Gehäuse und das Objektiv mit einer Halterung an einen "NanoCube" (Firma: Physik Instrument; Modell: P-611.3 NanoCube XYZ Piezo Stage) angebracht worden. Der "NanoCube" seinerseits ist an einer eigens dafür gebauten Halterung befestigt. Diese Halterung ist so konstruiert,

dass sie variabel auf den gedämpften Tisch mit mehreren Schrauben zur besseren Stabilität angeschraubt werden kann. Der "NanoCube" hat eine Bewegungsfreiheit von $100 \mu\text{m}$ in jede der drei Raumrichtungen und kann auf 1 nm genau eingestellt werden. Zu dem "NanoCube" gehört ein Servo Controller (Firma: Physik Instrument; Modell: E-503 Piezoverstaerker Modul). Er erzeugt einen Schwingkreis, welcher die Position des "NanoCubes" kontrolliert. Dieser wird durch einen Lock-In Verstärker (Firma: Stanford Research; Modell: SR- 830) gesteuert. Der Lock-In Verstärker wird seinerseits über einen Laptop mit Hilfe eines eigens für diesen Aufbau entwickelten LabVIEW[©] (LabView 2011) Programms gesteuert. Durch das Programm kann der "NanoCube" verschiedene Positionen einnehmen und seine Position in variablen Schrittweiten verändern.

Bei dem Magneten handelt es sich um einen Elektromagneten. Dieser hat eine Öffnung von 17 mm. In dem Spalt befindet sich der Probenhalter mit der Probe. Zusätzlich wird noch eine Hallsonde an einem der beiden Magnetenden befestigt, um das Magnetfeld messen zu können. Der Magnet wird wie der "NanoCube" über den PC gesteuert. Während das Magnetfeld variiert wird, wird eine Mikrowelle eingestrahlt. Diese wird vom Mikrowellengenerator (Firma: Rhode & Schwarz; Modell: SMR20) erzeugt. Die Mikrowelle wird über einen Zirkulator (Firma: Aerotek; Modell: K70-IFFF) an ein Kabel weitergegeben. Durch ein Loch im Probenhalter (siehe Abb. 8) kann das Kabel den Beginn des Substrates erreichen. Das Ende des Kabels zeigt nur noch den Innenleiter. Der Innenleiter hat einen Durchmesser von ca. einem Millimeter. Als Befestigung des Kabels dient in dem Probenhalter in einer entsprechenden Höhe ein Schraube.

Das reflektierte Signal gibt der Zirkulator an eine Mikrowellendiode (Firma: Herotek; Modell: DZM 265AB) weiter. Von dort aus wird das Signal an den Lock-In Verstärker geleitet. Da der Lock-In Verstärker als Referenzfrequenz die Frequenz des modulierten Lasers erhält, verarbeitet er die Informationen der Diode und gibt die Messwerte an den PC weiter.

3.2 Preparation des Mikroresonators mit einem Permalloy-Streifen

3.2.1 Herstellung und Funktion eines Mikroresonators

In Abbildung 9 ist schematisch das Substrat dargestellt, auf dem sich der Mikroresonator mit einer Permalloy-Probe befindet. Permalloy ist eine Nickel-Eisen-Legierung und besteht zu 80 % aus Nickel und zu 20% aus Eisen.

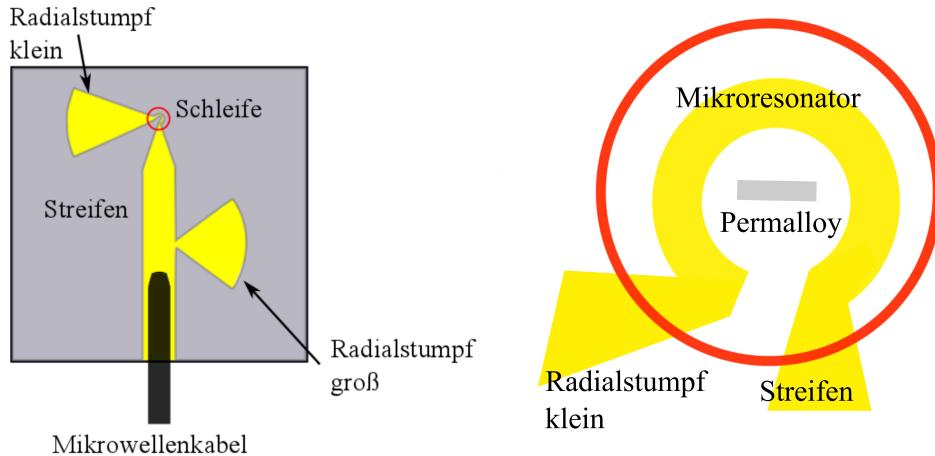


Abbildung 9: Links: Schematische Zeichnung des gesamten Substrat mit Mikrowellenkabel; rechts: Schematische Zeichnung der Probe mit dem Mikroresonator.

Das Verfahren zur Herstellung des Mikroresonators auf dem Substrat wird Elektronenstrahlolithographie genannt. Die sechs Schritte der Elektronenstrahlolithographie können in [5] im Detail nachgelesen werden. Der Resonator wurde von Herrn Dipl. Phys. Christian Schöppner hergestellt. Die Grundlage des Substrates bildet leitfähiges Silizium mit den Maßen $4 \times 4 \times 0.525 \text{ mm}^3$. Der Resonator besteht aus 5 nm Titan, 10 nm Gold und 600 nm Kupfer. Das Kupfer ist der wesentliche Bestandteil des Resonators. Als Abdeckschicht dienen 40 nm Gold. Der Resonator besitzt somit eine Gesamthöhe von 655 nm. Während der Herstellung wurden Justiermarken in die Resonatorstruktur geschrieben, um in einem weiteren Lithographieverfahren die Probe innerhalb der Resonatorstruktur schreiben zu können.

Bei einer eingekoppelten Mikrowelle, bildet sich durch die Anordnung der beiden Radialstümpfe eine stehende Mikrowelle. An den Enden der Radialstümpfe ist der elektrische Feldanteil am größten. Im Mikroresonator ist das geringste elektrische Feld, da das meiste Feld durch die Schleife abgeschirmt wird. Durch diese Schleife wird nun ein Strom induziert, der ein magnetisches Feld im Inneren der Schleife erzeugt. Das Feld fällt im Inneren mit $\frac{1}{r}$ ab und bildet an der Probenposition ein homogenes magnetisches Feld, welches senkrecht zur Substratebene gerichtet ist [14].

3.2.2 Einbau der Permalloy-Probe

Die Permalloy-Probe wurde in einem zweiten Lithographieschritt in die bestehende Resonatorstruktur eingebracht.

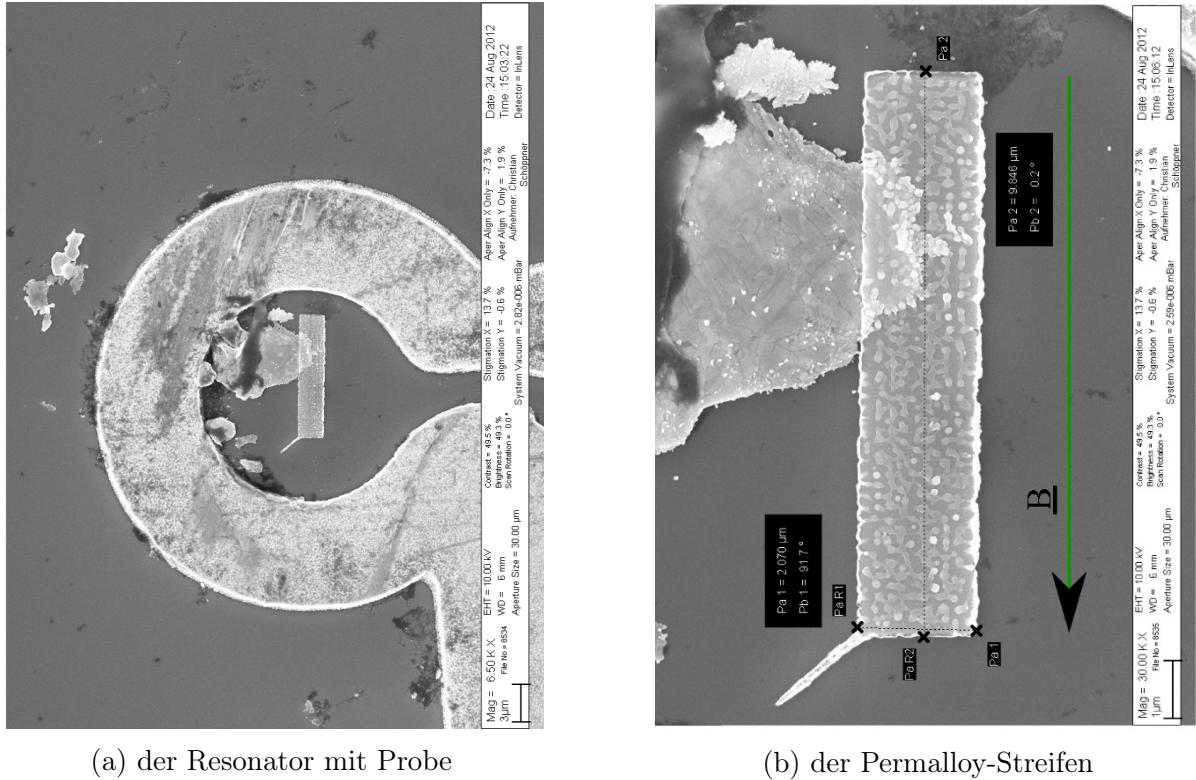


Abbildung 10: Das linke Bild zeigt die Probe im Resonator. Auf dem rechten Bild ist der Permalloy-Streifen zusehen, die Richtung des externen Magnetfeldes ist eingezeichnet. In beiden Bildern sind die Verunreinigungen zu sehen.

Der erstellte Permalloy-Streifen (siehe Abbildung 10a) ist $2 \times 10 \mu\text{m}^2$ groß und seine Dicke beträgt 50 nm. Die Permalloy-Probe ist so eingebaut worden, dass ihre leichte Richtung in Richtung des angelegten Magnetfeldes zeigt. Sie zeigt entlang der horizontalen Achse (vergleiche Abb. 10b).

3.2.3 Begutachtung des Mikroresonators mit der eingebauten Permalloy-Probe

In Abbildung 10a konnte bereits erkannt werden, dass die Probe nicht rein ist. Um genau zu wissen, um welche Verunreinigungen es sich handelt, wurden der Mikroresonator sowie die Probe mit dem EDX-Messverfahren untersucht. EDX ist die Abkürzung für "energy dispersive X-ray spectroscopy" [11]. Bei diesem Verfahren wird das Substrat in das REM eingebaut und mit Elektronen beschossen. Diese Elektronen wechselwirken mit den Elektronen aus dem Substrat. Durch diese Wechselwirkung werden Elektronen aus tiefliegenden Schalen ausgelöst und Elektronen aus höheren Schalen besetzen die freigewordenen

energetisch günstigeren Niveaus. Die Energiedifferenz wird in Form von Photonen ausgesendet. Diese werden detektiert und der Betrag ihrer Energien definiert das Material in der Probe [10] [6].

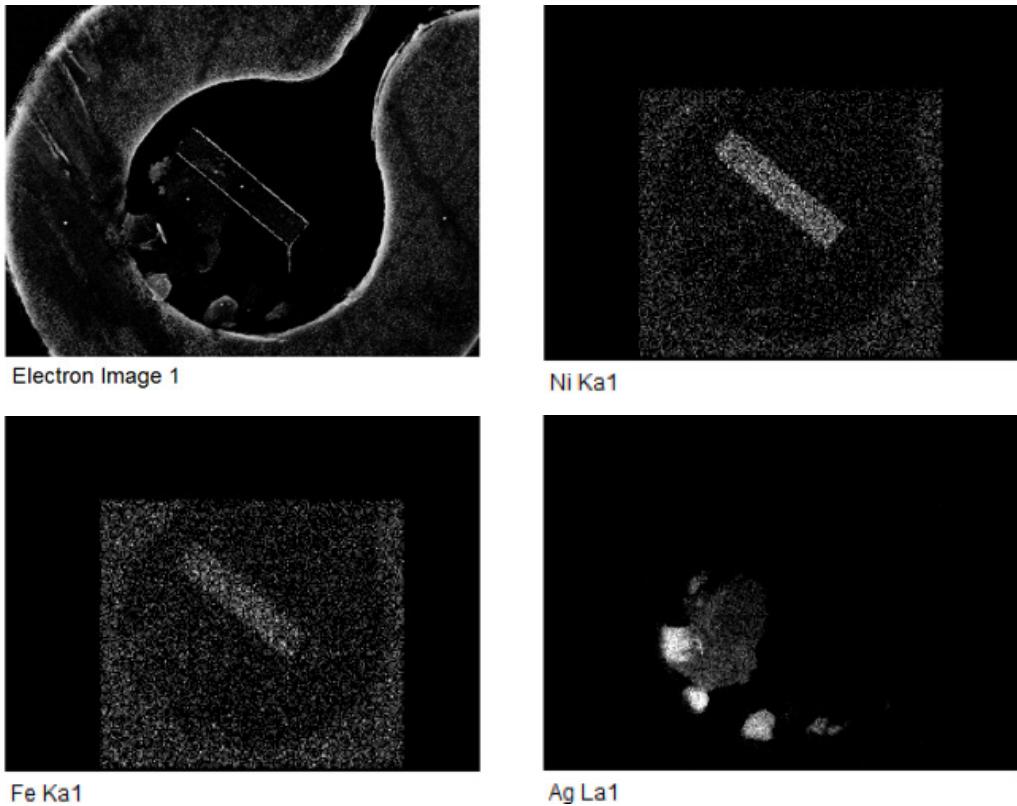


Abbildung 11: Der Mikroresonator sowie die Probe wurden mit dem EDX-Messverfahren untersucht. Das Bild oben links zeigt den untersuchten Bereich, das Bild oben rechts die Nickelverteilung, das Bild unten links die Eisenverteilung und unten rechts die Silberverteilung.

Die Bilder in Abbildung 11 zeigen die ortsaufgelösten Intensitäten des Röntgenspektrums. Zu sehen sind in Abbildung 11 nur die relevanten Bestandteile der Probe. Bei den Bildern für die Verteilung von Nickel und Eisen ist deutlich der Streifen der Probe auszumachen. Außerhalb des Streifens sind weitere Punkte zu erkennen, die durch das charakteristische Spektrum entstanden sind. Für die folgenden Messungen hat das Bild unten rechts in Abbildung 11 eine folgenschwere Bedeutung. Die Silberverunreinigungen überlappen mit dem Eisen und Nickel. Das Silber verändert die Struktur der Permalloy-Probe. Dies beeinflusst die Anisotropiekonstanten und somit die Resonanzlagen. Dadurch, dass das Silber nur an manchen Stellen mit der Probe überlappt, gibt es mehr als nur eine Resonanzlage. Zusätzlich sollte die Probe im Resonator so eingebaut sein, dass an ihrer Position ein homogenes Magnetfeld entsteht. Durch die Silberverunreinigungen wird dieses homogene Feld gestört, was die Messungen negativ beeinflusst.

4 Messungen

4.1 Vorbereitungen

4.1.1 Testmessungen der Verschiebeeinheit des Lasers ("NanoCube")

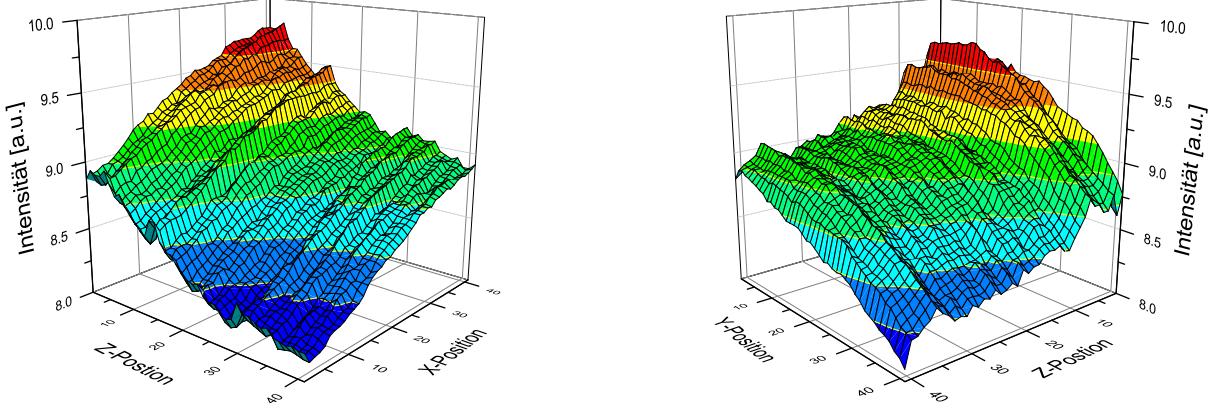
Bevor PM-FMR gemessen werden kann, soll erst überprüft werden, ob der eingebaute "NanoCube" bzw. das Steuergerät für den "NanoCube" funktionstüchtig ist. Der Servo Controller konnte erfolgreich getestet werden.

Des Weiteren wurde die Funktion des "NanoCube's untersucht. Ziel war es, mit dem "NanoCube" die Laserposition auf der Probe zu verändern und die Reaktionen der Probe zu messen. Dazu wurde eine Mikrowelle in den Resonator eingekoppelt. Die Frequenz und der Leistungspegel wurden auf 9.31 GHz und 7 dBm eingestellt. Das Messsignal war die reflektierte Mikrowelle. Die Reflexion entstand durch die Modulation (hier: 20 kHz) des Lasers, welcher auf die Probe gerichtet worden war. Das Laserlicht erzeugt im Resonator Elektronenlochpaare. Diese haben eine endliche Lebensdauer und verändern damit die dielektrischen Eigenschaften des Resonators. Da die dielektrischen Eigenschaften mit den magnetischen Eigenschaften gekoppelt sind, kann durch Finden des maximalen Signals die bestmögliche Position für die Probe in Bezug auf den Laser eingestellt werden.

Das Ende des Objektives wurde in einem Abstand von ca. einem Millimeter vor der Probe ausgerichtet. Um den Fokus zu erreichen, müsste das Objektiv näher an die Probe, dies verhindert jedoch die Dicke des Mikrowellenkabels. Zu beachten war auch, dass das Mikroskopobjektiv und das Mikrowellenkabel sich nicht berühren, da bei einem Kontakt das Signal zusammenbrechen würde. Bei der Ausrichtung des Lasers wurde der "NanoCube" in Z-Richtung die vollen $100 \mu\text{m}$ ausgefahren und in X- und Y-Richtung auf $50 \mu\text{m}$ eingestellt.

Über den Lock-In Verstärker konnte das reflektierte Signal von der Mikrowellendiode beobachtet werden. Ziel ist es nun, die Probe mit Hilfe der drei Verstellschrauben so zu positionieren, dass das reflektierte Signal maximal wird. Zu diesem Zeitpunkt war dies der einzige Weg die Probe auszurichten. Durch das Prisma kann später eine optische Ausrichtung erfolgen. Dies war aus Zeitgründen nicht möglich. Auch war der Abstand zwischen Mikroskopobjektiv und Substrat sehr gering und die Probe ohne Mikroskop nicht zu erkennen, so dass eine Justierung ausgeschlossenen war, die ausschließlich mit dem Auge durchgeführt werden müsste.

Mit Hilfe des "NanoCube" wurde die Probe auf einer $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ großen Ebene einmal in der X-Z-Richtung und in der Y-Z-Richtung abgerastert. Das reflektierte Mikrowellensignal wurde von einem LabVIEW[©]-Programm gespeichert und konnte anschließend ausgewertet werden.



(a) Verschiebung des "NanoCube's" in X- und Z-Richtung mit einer Schrittweite von $2.5 \mu\text{m}$.

(b) Verschiebung des "NanoCube's" in Y- und Z-Richtung mit einer Schrittweite von $2.5 \mu\text{m}$.

Abbildung 12: Das Reflexionssignal der Mikrowelle für verschiedene Positionen des Lasers auf der Probe.

Die Ergebnisse des Rasters sind in Abbildung 12 dargestellt. Aufgetragen ist die Intensität der reflektierten Mikrowelle über die Position des "NanoCube's". Die X-, Y- und Z-Achsen geben die Position des "NanoCube's" in Schritten an. Die Differenz jedes Schrittes beträgt $2.5 \mu\text{m}$, der "NanoCube" wurde in jede Richtung um $100 \mu\text{m}$ verschoben. In Abbildung 12a bzw. in Abbildung 12b war der "NanoCube" bei $(0,0)$ in X-Richtung bzw. Y-Richtung auf $0 \mu\text{m}$ und in Z-Richtung auf $100 \mu\text{m}$ ausgefahren. In der Endposition $(41,41)$ war der "NanoCube" in Z-Richtung auf $0 \mu\text{m}$ eingefahren und in X-Richtung bzw. Y-Richtung die vollen $100 \mu\text{m}$ ausgefahren. Während der gesamten Messungen stand der "NanoCube" in Y-Richtung (für Messung in Abb. 12a) bzw. in X-Richtung (für Messung in Abb. 12b) auf ausgefahrenen $50 \mu\text{m}$.

Durch die Veränderung der Z-Position vergrößerte sich der Abstand zwischen Mikroskopobjektiv und Probe. Dadurch verringerte sich die Intensität des Lichtes auf der Probe. Dies zeigt sich in dem Abfall der Intensität auf den Z-Position-Achsen. Der Intensitätsanstieg in X-Richtung und der Intensitätsabfall in Y-Richtung bedeuten, dass bei der Messung in X-Richtung der Laserspot auf die Oberfläche der Probe hinein und bei der Messung in Y-Richtung aus der Oberfläche der Probe herausgewandert ist. Diese Ergebnisse bestätigen die Funktionstüchtigkeit des "NanoCube's".

4.1.2 Messung eines konventionellen FMR-Spektrums

Um den Unterschied zwischen der konventionellen FMR und der PM-FMR zeigen zu können, wurde die Probe zunächst in einen konventionellen FMR-Aufbau eingebaut. Der benutzte FMR-Aufbau ist in der Lage, konventionelle FMR mit Mikroresonatoren zu messen. Bei einem Mikroresonator ist keine Koppelschraube angebracht. Diese Schraube wurde nun durch einen mechanischen "Slide Screw Tuning" ersetzt. An dem Slide

Screw Tuning befinden sich zwei Schrauben (vergleiche Abb. 20). Die Schraube 1 beeinflusst durch Eindrehen das elektrische Feld der Mikrowelle und vergrößert damit das reflektierte Signal. Die zweite Schraube dient zur Anpassung der Phase. Damit ist eine Impedanzanpassung mit dem Mikroresonator möglich. Dieses Bauelement wurde zwischen der Mikrowellenbrücke und dem Resonator eingebaut. Zusätzlich muss die Mikrowelle noch um 90° gedreht werden, um richtig in den Mikroresonator eingekoppelt werden zu können (vergleiche im Anhang Abbildung 20).

Vor der ersten Messung wurde die Probe mit dem Probenhalter so eingebaut, dass die Probe bei einem eingeschalteten Magnetfeld ein positives Feld erfahren würde. Im ersten Schritt wurde die Eigenresonanzfrequenz des Resonators gesucht. Diese wurde mit Hilfe einer frequenzabhängigen Mikrowellenreflexion bestimmt. Bei der Eigenresonanzmessung wird die Leistung der eingestrahlten Mikrowelle im Mikroresonator absorbiert. Das Signal der reflektierten Mikrowelle wurde an das Oszilloskop weitergegeben und auf dem Bildschirm war die Frequenz über die Amplitude aufgetragen. Die Eigenresonanzfrequenz ist der Tief- bzw. Hochpunkt der Kurve. In Abbildung 13 wird eine Beispieldmessung gezeigt, mit der eine Eigenresonanzfrequenz bestimmt werden kann.

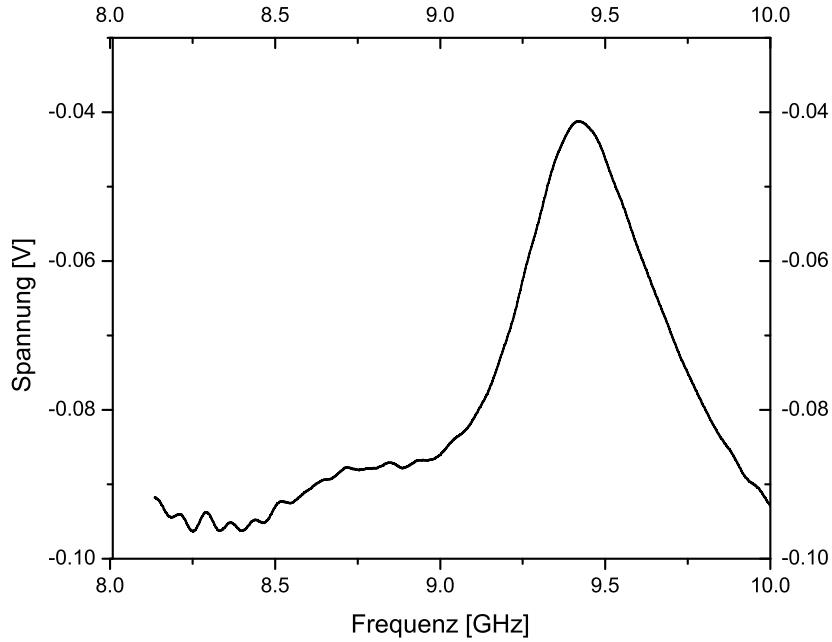


Abbildung 13: Beispieldmessung: Das Signal ist die Mikrowellenreflexion. Der Hochpunkt gibt die Eigenresonanzfrequenz an.

Der Maximum liegt bei 9.417 GHz und die Halbwertsbreite beträgt 0.42 GHz. Daraus ergibt sich eine Güte von 21.76. Die Güte ist der Quotient aus der Eigenresonanzfrequenz und der Halbwertsbreite der Messkurve. Je höher die Güte ist, desto größer wird das

Messsignal [12]. Um diese Messkurve zu zeigen, wurde nicht das Oszilloskop, sondern ein Labview-Programm benutzt, welches die Messwerte speichert.

Für die folgenden konventionellen FMR-Messungen wurde die Eigenresonanzfrequenz erneut bestimmt, sie lag bei 9.14 GHz. Nach dem Einkoppeln der Mikrowelle wurde das Magnetfeld eingeschaltet. Das Feld wurde mit einer Schrittweite von 0.2 mT von 4 mT bis zu 150 mT erhöht. Die Modulation des Feldes betrug 12.5 kHz und die Modulationsamplitude wurde auf 4 Gp-p eingestellt.

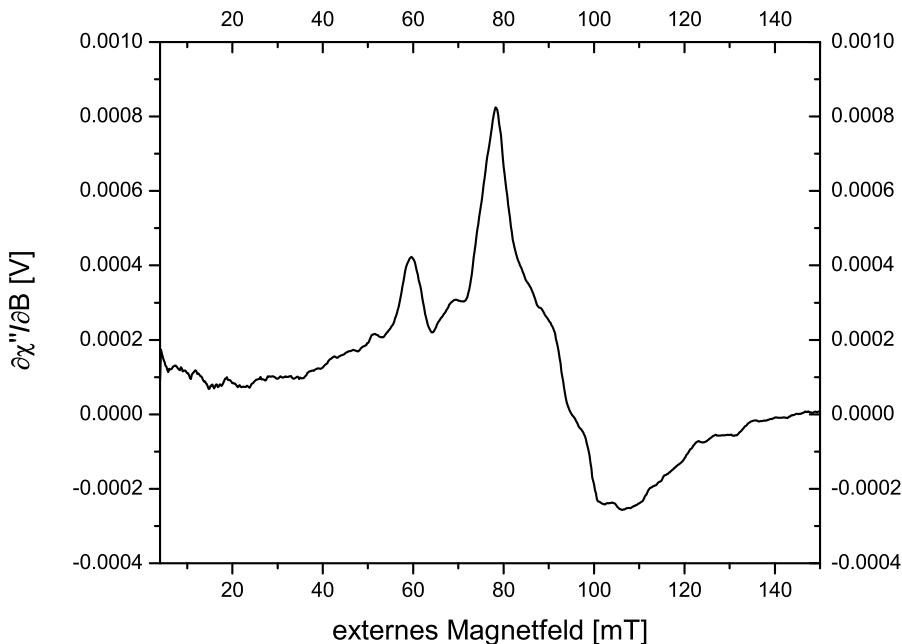


Abbildung 14: Messung der konventionellen FMR; aufgetragen ist die Ableitung der Hochfrequenzsuszeptibilität nach dem externen Magnetfeld über das externe Magnetfeld in mT. Die Mikrowellenfrequenz beträgt 9.14 GHz, die Modulationamplitude beträgt 4 Gp-p und die Modulationsfrequenz 12.5 kHz.

Der Verlauf der Kurve in Abbildung 14 zeigt mehrere Resonanzlagen. In Abschnitt 3.2.3 wurde bereits die Qualität der Probe diskutiert. Aufgrund der erwähnten Mängel war auch mehr als eine Resonanzlage zu erwarten.

Um mehr über die Probe zu erfahren, wurde diese im Magnet um 180° um die vertikale Achse gedreht. Diese Drehung ist gleichbedeutend mit einer Umpolung des Magneten, sprich als würde ein negatives Feld angelegt werden. Das externe Magnetfeld wurde hier ebenfalls zwischen 4 mT bis 150 mT variiert, um Vergleiche zwischen den beiden Probenpositionen ziehen zu können.

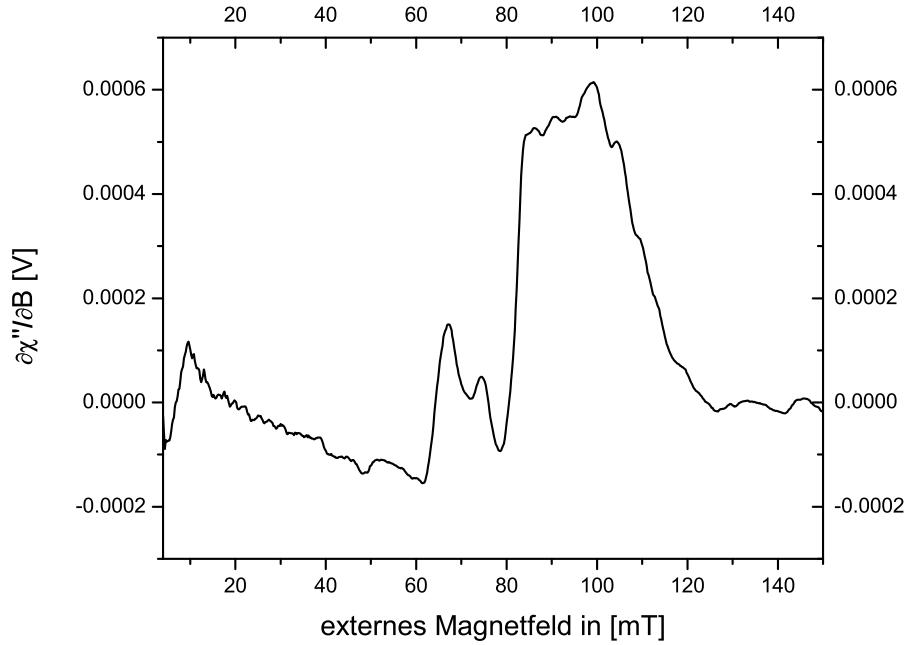


Abbildung 15: Messung der konventionellen FMR; hier wurde die Probe um 180° um die vertikale Achse gedreht. Aufgetragen ist die Ableitung der Hochfrequenzsuszeptibilität nach dem externen Magnetfeld über das externe Magnetfeld in mT. Die Mikrowellenfrequenz ist 9.34 GHz, die Modulationamplitude beträgt 4 Gp-p und die Modulationsfrequenz 12.5 kHz.

Zwischen den beiden Spektren (Abb. 14 und Abb. 15) ist ein deutlicher Unterschied im Kurvenverlauf zu erkennen. Bei einer fehlerfreien Probe sollte sich beim Drehen der Probe um 180° um die vertikale Achse kein Unterschied im Kurvenverlauf zeigen. Da die Probe aber fehlerhaft ist, gibt es – wie die Messungen zeigen – für die Probe eine bevorzugte Polung des Magneten. Die Anordnung, welche beim Messen vom Spektrum in Abb. 14 verwendet worden ist, ist die bevorzugte. Das Spektrum zeigt deutlichere Resonanzlagen in einem Bereich von 60 mT bis 100 mT als das Spektrum 15. Bei einem Vergleich zwischen Abbildung 14 und Abbildung 4 zeigt sich, dass der Verlauf der Messkurve nicht dem erwarteten Verlauf gleicht. Ursache dafür sind die Verunreinigungen der Probe.

Da nach der konventionellen FMR die PM-FMR mit der Probe gemessen werden soll, muss auch dort die Polung beachtet werden, um später das PM-FMR-Signal mit dem zugehörigen FMR-Spektrum vergleichen zu können. Die Richtung des Magnetfeldes kann mit Hilfe einer Hallsonde überprüft werden.

4.2 PM-FMR

Nach den Messungen der konventionellen FMR wurde die Probe in den PM-FMR-Aufbau eingebaut.

Da die Probe sich in einem neuen Aufbau befand, musste die Eigenresonanzfrequenz erneut bestimmt werden. Anschließend wurde die Optik des Lasers ausgerichtet, sodass der Laser sich auf dem Substrat befand. Die Probenposition konnte durch die Verstellschrauben optimiert werden, sodass der Laser auch die Probe traf.

Bei den ersten Messungen war in den aufgenommenen PM-FMR Signalen kein Signal zu erkennen, welches von der Probe stammen könnte. Gemessen wurde von 120 mT bis zu 4 mT. In diesem Bereich wurden 122 Messwerte gespeichert. Insgesamt wurden acht Messkurven aufgenommen und zeitlich hintereinander gehängt wie Abb. 16 zeigt.

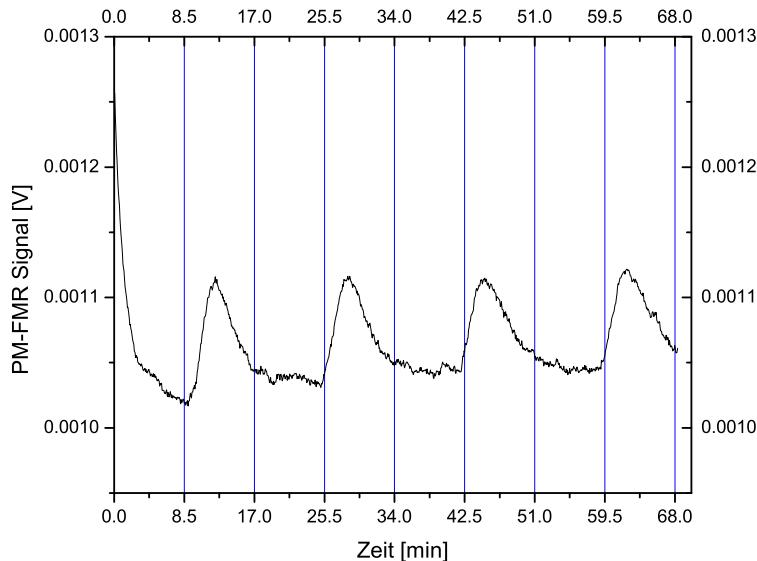


Abbildung 16: Aufgetragen ist ein PM-FMR Signal über die Zeit. Hier wurden acht hintereinander durchgeführte Messungen aneinandergehängt. Jede Messung dauerte 8.5 Minuten und die einzelnen Messungen wurden in der Abbildung durch die blauen Linien gekennzeichnet.

In Abbildung 16 werden die einzelnen Messungen durch vertikale Linien getrennt. Eine Messung dauerte acht Minuten und 30 Sekunden. Da das Signal sich nicht in diesem Takt wiederholt, kann es nicht von der Probe stammen. Die Quelle dieses Signals war die eingeschaltete Klimaanlage. Diese kühlt den Raum nicht konstant, sondern schaltet sich in zeitlichen Abständen an und aus. In dem Signal kann der zeitlich variierende Windzug der Anlage erkannt werden. Zwar kann mit diesem Diagramm keine Aussage über die Probe gemacht werden, jedoch zeigt dies, dass der Aufbau temperaturabhängig messen kann, da sonst die Oszillation in dem Signal nicht auftreten würde.

Nach dem Ausschalten der Klimaanlage wurde eine Leermessung (kein externes Magnetfeld) aufgenommen. Der Laser wurde mit 20 kHz moduliert und 461 mA betrieben. Die Frequenz der eingestrahlten Mikrowelle betrug 9.31 GHz und ihr Leistungspegel (L_P) lag bei 7 dBm. Der Leistungspegel gibt das Verhältnis einer Leistung (P) im Vergleich zur Bezugsleistung von 1 mW an.

$$L_P = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{1 \text{ mW}} \right) \quad (21)$$

Diese Messung soll Informationen über das Untergrundrauschen während den Messungen liefern und bestätigen, dass die Messungen magnetfeldabhängig sind.

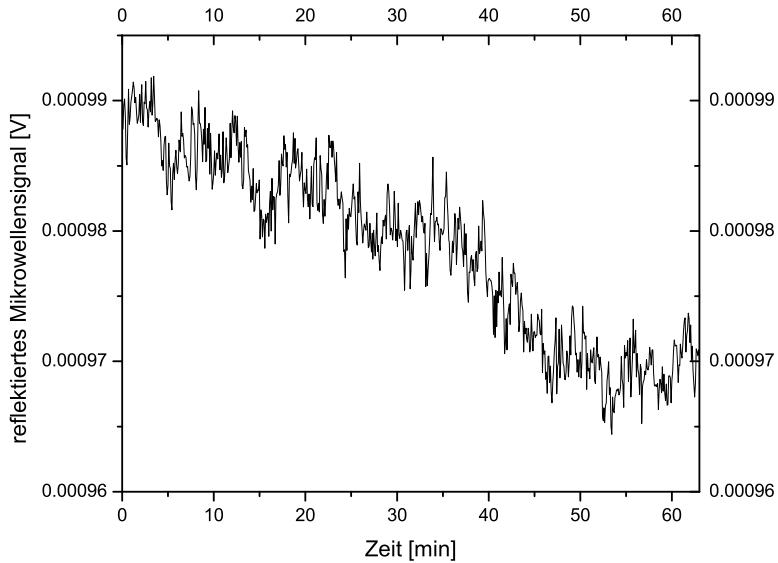
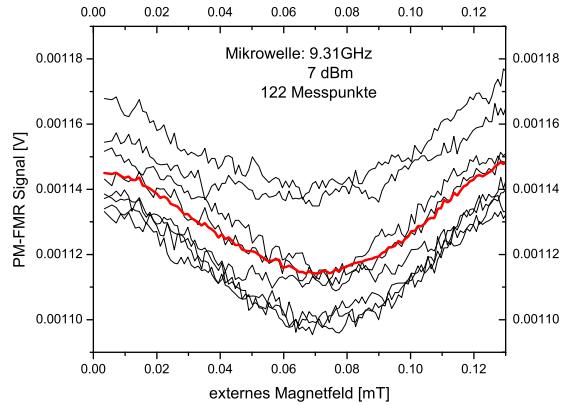


Abbildung 17: Aufgetragen ist das reflektierte Mikrowellensignal über die Zeit. Diese Messung sind insgesamt sechsmal hintereinander durchgeführt. Der Laser wurde moduliert, jedoch wurde kein Magnetfeld angelegt.

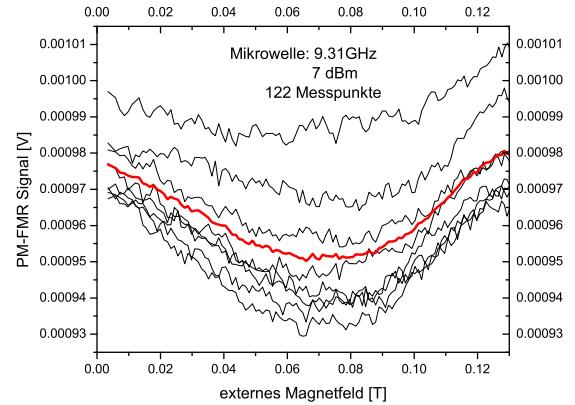
In Abbildung 17 ist das reflektierte Mikrowellensignal über der Zeit aufgetragen. Durch die Modulation des Lasers kann mit dem Lock-In Verstärker das Signal detektiert werden. Erwartet wurde eine Kurve mit einem Rauschsignal. Die Messkurve zeigt jedoch zusätzlich einen zeitlichen Abfall. Dieser Abfall stammt daher, dass vor der Leermessung der Magnet angeschaltet war. Nach dem Ausschalten des Magneten ist dieser trotzdem noch erwärmt. Da sich die Probe zwischen dem Magneten aufhielt, erfuhr sie dessen Wärme. Mit der Zeit glich sich der Magnet der Raumtemperatur an und somit fiel auch die Temperatur der Probe mit der Zeit ab. Diese zeitliche Temperaturveränderung schlug sich in dem bereits erwähnten Abfall nieder. Insgesamt hat das Signal während der gesamten Messung (Dauer der Messung 63 Minuten) um ungefähr 3 % abgenommen.

Nach diesen Tests wurden PM-FMR Messungen durchgeführt. Exemplarisch zeigt Ab-

bildung 18 zwei Messungen für verschiedene Modulationsfrequenzen.



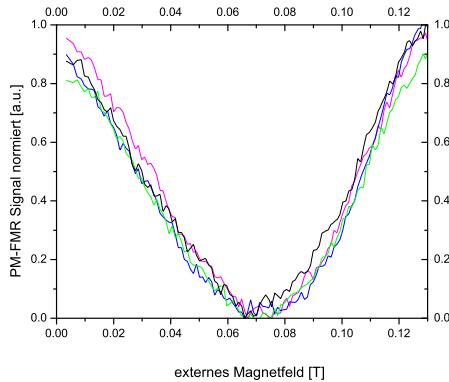
(a) Modulationsfrequenz des Lasers: 12.345 kHz.



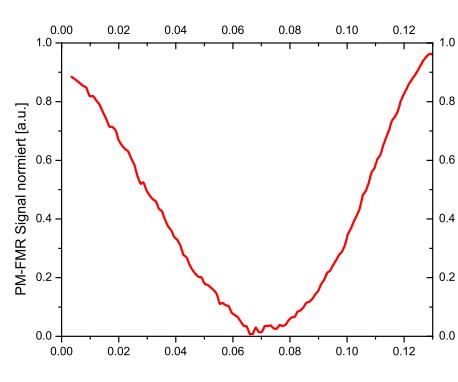
(b) Modulationsfrequenz des Lasers: 20 kHz

Abbildung 18: Zwei PM-FMR Messungen mit verschiedenen Modulationsfrequenzen: Es wurden in beiden Fällen acht Kurven aufgenommen (schwarze Kurven), die roten Kurven bilden den Mittelwert aus diesen Kurven.

Bei den Messungen wurden jeweils acht Kurven ohne zeitliche Verzögerung aufgenommen und bei der Auswertung gemittelt (Abb. 18 rote Kurve). Wie bereits durch die Leermessung und der Messung in Abbildung 16 deutlich wurde, reagiert das System stark auf Temperaturschwankungen. Um diese ausgleichen zu können, wurden mehrere Spektren aufgenommen und gemittelt. Zusätzlich wurden die Kurven normiert, um diese besser miteinander vergleichen zu können.



(a) Gemittelte und normierte Messkurven für vier verschiedene Messdurchläufe. Die Messparameter sind in Tabelle 1 aufgelistet.



(b) Mittelwert der vier gemittelten Messkurven aus Abbildung 19a

Abbildung 19: Messergebnisse für verschiedene Frequenzen und Anzahl an Durchläufen

Bei den vier Messungen in Abbildung 19a wurde die Mikrowellenfrequenz von 9.31 GHz sowie der Leistungspegel von 7 dBm nicht verändert. Die Messwerte für das externe Magnetfeld von 130 mT bis zu 4 mT wurden bei allen Messungen mit 122 Messpunkten

aufgenommen. Der Laser wurde mit 461 mA mit einer Amplitude von 1 V betrieben. Die veränderten Parameter werden in Tabelle 1 aufgelistet.

Farbe	Modulationsfrequenz [kHz]	Anzahl der aufgenommenen Durchläufe
Schwarz	12.345	10
Grün	12.345	8
Blau	20	8
Magenta	5	8

Tabelle 1: verschiedene Messparameter für Abbildung 19a

Die vier gemittelten Kurven in Abbildung 19a verlaufen trotz der variierten Parameter identisch. Anders als bei den Messkurven für die konventionelle FMR, sind keine feinen Peaks im Kurvenverlauf vorhanden, sondern die Kurve gleicht einer verzerrten Gaußkurve. Aufgrund der Messung in Abb. 17 kann man jedoch ausschließen, dass der Verlauf der Kurven durch ein Rauschen entstand. Die Messdauer einer Kurve betrug ungefähr 10 Minuten. Während dieser Messdauer variierten die Messwerte zwischen Maximum- und Minimumwert um 3% bis 4%. Bei der Rauschmessung (vergleiche Abb. 17) verringerte sich der Wert in 63 Minuten gerade nur um 3 %.

In den Graphen für die PM-FMR ist – im Gegensatz zur konventionellen FMR – kein differenziertes Messsignal zu erkennen. Laut [12] wäre aber dies ebenfalls für PM-FMR Messungen zu erwarten gewesen. Eine Vermutung wäre, dass durch die Verunreinigungen in der Probe sehr viele Resonanzlagen vorhanden sind, die sich überlappen und somit das Ausbleiben einer klaren Resonanzlinie bewirken. Aus Zeitmangel konnte im Rahmen dieser Bachelorarbeit jedoch keine Messung zur Klärung dieses Verhaltens durchgeführt werden. Daher kann die Vermutung für die ausbleibende differenzierte Form der Kurven nicht bestätigt werden.

Die Intensität sollte mit steigender Frequenz fallen. Dieses Verhalten spiegelt sich exemplarisch in Abbildung 18 wieder. Für die Modulationsfrequenz von 12.345 kHz beträgt die maximale Intensität $3.65869 \cdot 10^{-5}$ [V], für 20 kHz liegt sie bei $2.94771 \cdot 10^{-5}$ [V]. Da jedoch nur mit drei verschiedenen Frequenzen gemessen wurde, kann nicht überprüft werden, ob es sich bei dem Zusammenhang zwischen Intensität und Frequenz um einen 1/f-Abfall handelt. Dieses Verhalten wäre nach [12] zu erwarten.

Des Weiteren gibt es in dem Aufbau bis jetzt keine Möglichkeit, die genaue Größe des Laserspots auf der Probe zu messen. Die Größe des Spots und seine Intensität geben an, wie viel Wärme auf die Probe gebracht wird. Zusätzlich ist auch noch ungeklärt, ob der Laserstrahl die gesamte oder nur einen Teil der Probe trifft. Da jedoch ein reproduzierbares Signal bei den Messungen entstand, welches ohne ein externes Magnetfeld zusammenbrach, kann der Aufbau photothermsich moduliert messen.

5 Diskussion und Ausblick

Die Ziele dieser Bachelorarbeit konnten in den zehn Wochen erreicht werden. Der Grundaufbau für PM-FMR Messungen konnte erstellt und – wie die Messungen zeigen – erfolgreich getestet werden. Die Erfolge und Schwachstellen, die diese Messungen aufzeigen, werden nun diskutiert und Lösungsvorschläge werden präsentiert.

Wie bereits in den Durchführungen und Messungen erwähnt wurde, kann durch den Aufbau getestet werden, ob die Probe ferromagnetische Eigenschaften aufweist. Dies wird dadurch bewiesen, dass alle aufgenommenen PM-FMR Kurven (vergleiche Abb. 19a und Abb. 19b) bei der Probe das gleiche Verhalten zeigen und dass das Messsignal verschwindet, sobald kein Magnetfeld angelegt ist. Zu klären wäre noch die Ursache für die Form der aufgenommenen PM-FMR Messkurven. Wie Abbildung 19b zeigt, ist in dem Kurvenverlauf lediglich ein Minimum bei ungefähr 66 mT auszumachen. Ein möglicher Grund für das Ausbleiben des differenzierten Signals könnten verschiedene Resonanzlagen sein, die durch die Verunreinigungen entstanden sind und sich überlappen. Mit einer neuen und reinen Probe sollte die Ursache für den Verlauf der Messkurven geklärt werden können.

Es wurde bereits erwähnt, dass in den Aufbau Bauelemente integriert wurden, die bei den bisherigen PM-FMR Messungen nicht zum Einsatz kamen (siehe Abschnitt 3.1). Die Verwendung und Ausbaumöglichkeiten dieser Elemente werden nun erörtert.

In dem Versuchsaufbau befindet sich ein Prisma. Dieses Prisma wurde eingebaut, um später den Laser genauer auf der Probe ausrichten zu können. Durch den bereits erläuterten Strahlengang in Abschnitt 3.1 kann mit Hilfe des Spiegels im Gehäuse und des Prismas das vom Mikroskopobjektiv erzeugte und vergrößerte Bild von einer Kamera erfasst werden. Diese Kamera müsste dafür neben dem Prisma angebracht werden und sollte über einen Live-Modus verfügen. Damit kann das Substrat durch das Mikroskopobjektiv permanent beobachtet werden. Über die Schärfe des eingehenden Bildes kann überprüft werden, ob das Substrat sich im Bereich des Fokus befindet. Darüber hinaus kann festgestellt werden, ob das Mikroskopobjektiv auf die Probe ausgerichtet ist. Wenn nun der Laser hinzugeschaltet wird, soll die Größe und die Lichtintensität des Laserspots bestimmbar sein. Da mit der Kamera der Fokus des Mikroskopobjektivs immer wieder gefunden werden kann, kann vor einer PM-FMR Messung zunächst ein CCD-Chip im Fokusbereich vor dem Mikroskopobjektiv aufgebaut werden. Dieser kann sowohl die Größe und das Strahlenprofil als auch die Intensität des Spots messen. Wenn nun der Laser gezielt auf der Probe ausgerichtet worden ist, kann mit dem "NanoCube" und mit Hilfe der Kamera der Laser auf der Probe verschoben und damit die Probe lokal angeregt werden.

Um materialspezifische Aussagen über die Probe machen zu können, müssen mit dem Aufbau winkelabhängige Messungen durchführbar sein. Durch diese Messungen können die Anisotropiekonstanten bestimmt werden. Dazu muss sich der Bereich des Probenhalters, in dem die Probe eingebaut wird, zwischen den Magneten um die horizontale

Achse, welche senkrecht zur Oberfläche der Probe steht, drehen können. Um den Abstand zwischen Mikroskopobjektiv und Probe auf Fokuslänge zu verringern, muss das Mikrowellenkabel ausgetauscht werden. Der Durchmesser des neuen Kabels sollte im Bereich von ca. $100 \mu\text{m}$ liegen. Zusätzlich sollte mit dem Einbau des neuen Kabels die winkelabhängige Messung möglich sein. Um das Messsignal zu stabilisieren, muss zum Schluss dafür gesorgt werden, dass der komplette Aufbau vor Temperaturschwankungen geschützt wird. Dafür sollte der gesamte Aufbau in einen Raum mit konstanter Temperatur und ohne starke Luftzüge transferiert werden. Nach diesen Ergänzungen des Aufbaus könnten Resonanzlinien von Proben bzw. Nanopartikeln detektiert und Anisotropiekonstanten bestimmt werden.

Abbildungsverzeichnis

1	Bildliche Beschreibung der Gleichung 3 [16].	3
2	Definition der in dieser Arbeit verwendeten Kugelkoordinaten für Magnetisierung und externes Magnetfeld und der Probengeomtrie bzgl. des Koordinatensystems. [12].	4
3	Prinzip der ferromagnetischen Resonanz Messung: Ein Hohlraumresonator (Cavity) befindet sich zwischen einem Magneten. In der Cavity befindet sich die Probe. Das externe Magnetfeld geht vom linken zum rechten Pohlenschuh, dies wird durch \vec{B} gekennzeichnet. Senkrecht zu dem Feld steht die Mikrowelle [12].	7
4	Beispiel für ein konventionelles FMR-Spektrum. Aufgetragen ist die Ableitung der FMR-Absorption nach dem Magnetfeld über das externe Feld. Bei der Messung wurde ein Eisenfilm von 20 nm Dicke benutzt [12]. Gemessen wurde bei 302.5° Kelvin. Die Modulationsfrequenz und -amplitude betrugen 100 kHz und 4 mT.	8
5	Temperaturabhängigkeit von der Magnetisierung M und der Kristallanisotropiekonstanten K_4 und K_6 für ein einkristallines Eisen [3]	9
6	Diese Abbildung zeigt eine schematische Skizze des Versuchsaufbaus. Die optischen Komponenten sowie der Probenhalter werden in Abbildung 7 bzw. in Abbildung 8 dargestellt.	11
7	Ausschnitt aus dem Versuchsaufbau: Hier werden die optischen Komponenten des Versuchsaufbaus dargestellt.	12
8	Ausschnitt aus dem Versuchsaufbau: Ansicht des Probenhalters aus der Vogelperspektive (links) und aus der Seitenansicht (rechts).	13
9	Links: Schematische Zeichnung des gesamten Substrat mit Mikrowellenkabel; rechts: Schematische Zeichnung der Probe mit dem Mikroresonator.	15
10	Das linke Bild zeigt die Probe im Resonator. Auf dem rechten Bild ist der Permalloy-Streifen zusehen, die Richtung des externen Magnetfeldes ist eingezeichnet. In beiden Bildern sind die Verunreinigungen zu sehen.	16
11	Der Mikroresonator sowie die Probe wurden mit dem EDX-Messverfahren untersucht. Das Bild oben links zeigt den untersuchten Bereich, das Bild oben rechts die Nickelverteilung, das Bild unten links die Eisenverteilung und unten rechts die Silberverteilung.	17
12	Das Reflexionssignal der Mikrowelle für verschiedene Positionen des Lasers auf der Probe.	19
13	Beispieldmessung: Das Signal ist die Mikrowellenreflexion. Der Hochpunkt gibt die Eigenresonanzfrequenz an.	20

14	Messung der konventionellen FMR; aufgetragen ist die Ableitung der Hochfrequenzsuszeptibilität nach dem externen Magnetfeld über das externe Magnetfeld in mT. Die Mikrowellenfrequenz beträgt 9.14 GHz, die Modulationamplitude beträgt 4 Gp-p und die Modulationsfrequenz 12.5 kHz.	21
15	Messung der konventionellen FMR; hier wurde die Probe um 180° um die vertikale Achse gedreht. Aufgetragen ist die Ableitung der Hochfrequenzsuszeptibilität nach dem externen Magnetfeld über das externe Magnetfeld in mT. Die Mikrowellenfrequenz ist 9.34 GHz, die Modulationamplitude beträgt 4 Gp-p und die Modulationsfrequenz 12.5 kHz.	22
16	Aufgetragen ist ein PM-FMR Signal über die Zeit. Hier wurden acht hintereinander durchgeführte Messungen aneinandergehängt. Jede Messung dauerte 8.5 Minuten und die einzelnen Messungen wurden in der Abbildung durch die blauen Linien gekennzeichnet.	23
17	Aufgetragen ist das reflektierte Mikrowellensignal über die Zeit. Diese Messung sind insgesamt sechsmal hintereinander durchgeführt. Der Laser wurde moduliert, jedoch wurde kein Magnetfeld angelegt.	24
18	Zwei PM-FMR Messungen mit verschiedenen Modulationsfrequenzen: Es wurden in beiden Fällen acht Kurven aufgenommen (schwarze Kurven), die roten Kurven bilden den Mittelwert aus diesen Kurven.	25
19	Messergebnisse für verschiedene Frequenzen und Anzahl an Durchläufen . .	25
20	Versuchsaufbau zur Messung der konventionellen ferromagnetischen Resonanz	33
21	Versuchsaufbau: Die Probe ist im Probenhalter. Oben drauf liegt das Mikrowellenkabel. Rechts neben dem Probenhalter am Magneten befindet sich die Hallsonde.	33
22	Aufbau des Magneten: Hinter dem Magneten befindet sich der XYZ-Tisch.	34
23	Aufbau der Optik	34

Literatur

- [1] 3sat. *Mit heißen Nanopartikeln gegen Krebs.* <http://www.3sat.de/page/?source=nano/cstuecke/111197/index.html>, Mai 2011. abgerufen am 1.09.2012.
- [2] Axel Springer AG. *Nanopartikel-Mächtige Waffen gegen den Krebs.* <http://www.welt.de/gesundheit/article7175834/Nanopartikel-Maechtige-Waffen-gegen-den-Krebs.html>, April 2010. abgerufen am 01.09.2012.
- [3] R. M. Bozorth. *Directional Ferromagnetic Properties of Metals.* *Journal of Applied Physics*, 1937.
- [4] Soshin Chikazumi. *Physics of Ferromagnetism.* Oxford Science Publications, 1997.
- [5] Anja Bahnholzer; Diplomarbeit. *Mikroresonatoren zur Messung von ferromagnetischen Strukturen: Herstellung und Charaktersierung*, 2010.
- [6] Christian Schöppner; Diplomarbeit. *Untersuchung einkristalliner magnetischer Formgedächtnislegierung mittels Ferromagnetischer Resonanz*, 2011.
- [7] Robert Elsner. *Grundlagen der Technischen Thermodynamik.* Bertelsmann Universitätsverlag, 1973.
- [8] Dr. Thorsten Hartmann. *Experimentelle Untersuchung am magnetischen Hybrid system (Ga,Mn)As / MnAs.* PhD thesis, Philipps-Universität Marburg, 2003.
- [9] K.-H. Hellwege. *Einführung in die Festkörperphysik.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1976.
- [10] H. Bethge; J. Heydenreich. *Elektronenmikroskopie in der Festkörperphysik.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1982.
- [11] Joseph Goldstein; Dale Newbury; David Joy; Charles Lyman; Patrick Echlin; Eric Lifshin; Linda Sawyer; Joseph Micheal. *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis.* Springer, 2007.
- [12] Dr. Ralf Meckenstock. *Untersuchung der magnetischen Eigenschaften von Fe/Ag-Schichtsystemen mit der konventionellen und der ortsaufgelösten ferromagentischen Resonanz.* PhD thesis, Ruhr-Universität Bochum, 1997.
- [13] Dr. Ralf Meckenstock. *Invited Review Article: Microwave spectroscopy based on scanning thermal microscopy: Resolution in the nanometer range.* *Review Of Scientific Instrument* 79, pages 041101–1 bis 041101–4, 2008.

- [14] R. Narkowicz. *Planar micro resonators for EPR experiments. Journal of Magnetic Resonance* 175, 2005.
- [15] Dr. Detlef Spoddig. *Untersuchung mittels Ferromagnetischer Resonanz an Kobalt-, Nickel- und Eisenfilmen aus elektrochemischer und molekular epitaktischer Abschiebung.* PhD thesis, Ruhr-Universität Bochum, 2004.
- [16] Dr. Anastasia Trunova. *Ferromagnetische Resonanz an oxidfreien magnetischen Fe und FeRh Nanopartikeln.* PhD thesis, Universität Duisburg-Essen, 2009.
- [17] S. V. Vonsovskii. *Ferromagnetic Resonance.* Pergamon Press, 1966.

Anhang

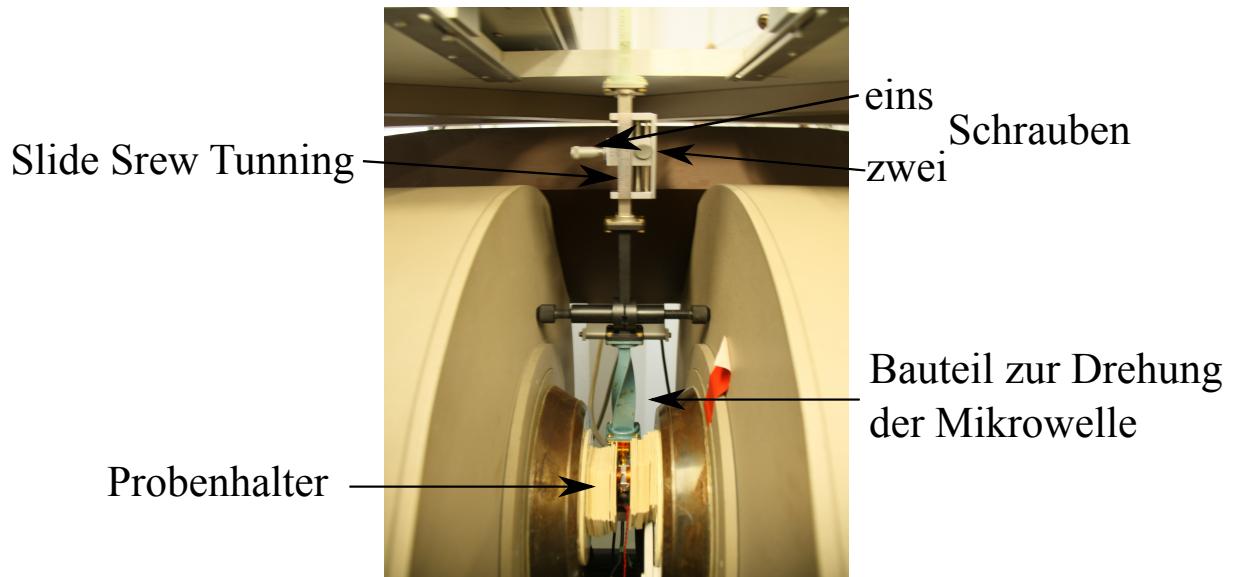


Abbildung 20: Versuchsaufbau zur Messung der konventionellen ferromagnetischen Resonanz

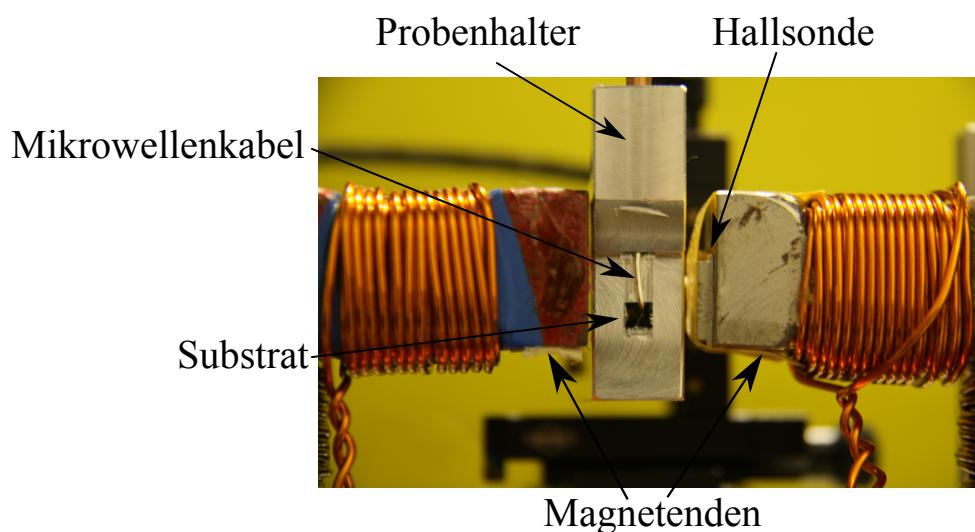


Abbildung 21: Versuchsaufbau: Die Probe ist im Probenhalter. Oben drauf liegt das Mikrowellenkabel. Rechts neben dem Probenhalter am Magneten befindet sich die Hallsonde.

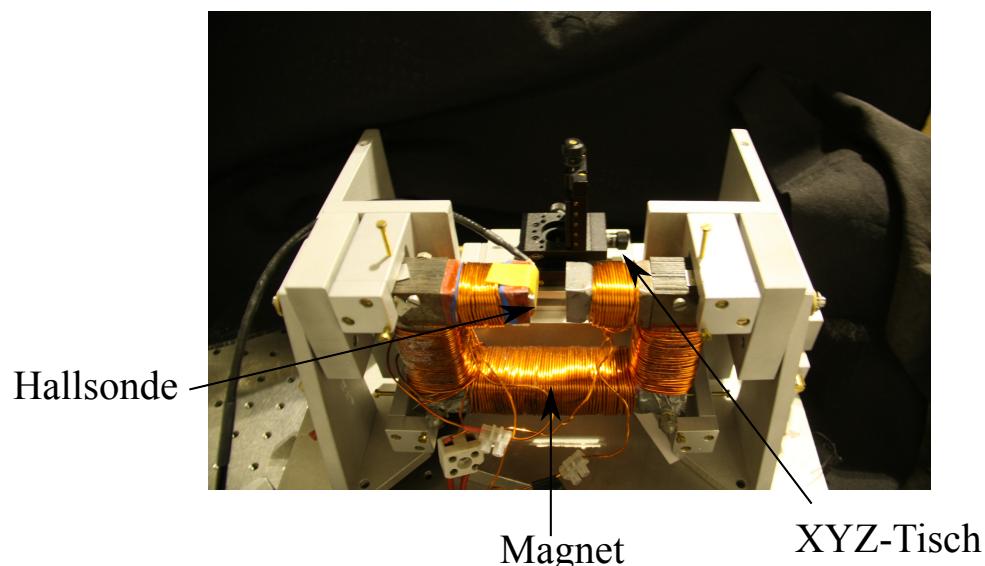


Abbildung 22: Aufbau des Magneten: Hinter dem Magneten befindet sich der XYZ-Tisch.

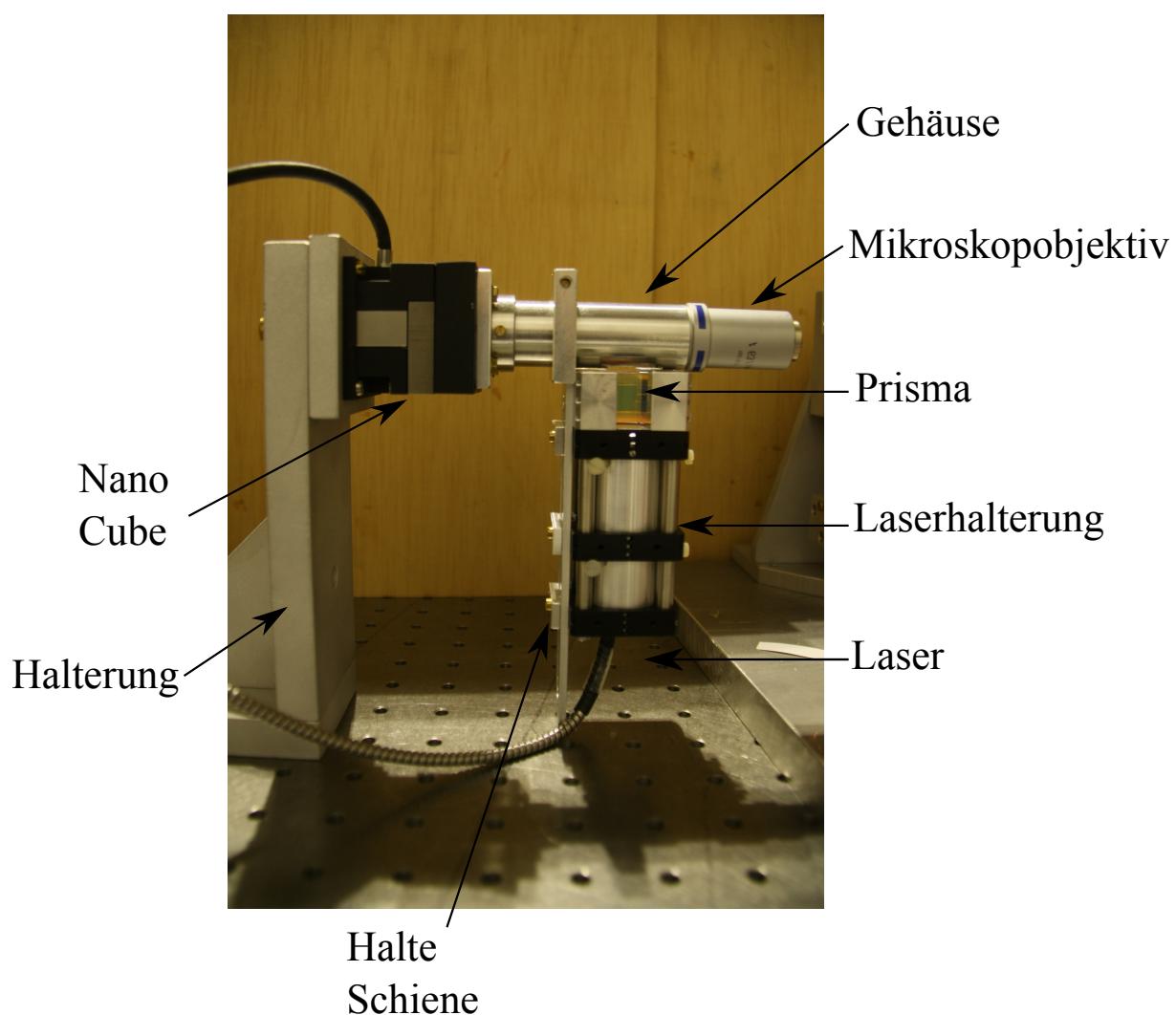


Abbildung 23: Aufbau der Optik

Danksagung

Ich möchte mich bei Herrn Prof. Dr. Michael Farle dafür bedanken, dass ich in seiner Arbeitsgruppe und mit seiner Unterstützung diese Bachelorarbeit durchführen konnte.

Desweiteren danke ich Herrn Dr. Detlef Spoddig und Herrn Dr. Ralf Meckenstock für ihre große Unterstützung, Betreuung und Hilfe während des gesamten Projekts.

Ebenso möchte ich mich bei Herrn Dipl. Phys. Puchong Kijamnajsuk für seine Unterstützung und Betreuung während meiner Messungen im Labor bedanken. Für viele Tips und Erklärungen bezüglich des praktischen Arbeitens im Labor danke ich Herrn Dr. Florian Römer, Herrn Dipl. Phys. Thomas Marzi sowie Herrn Kai Wagner.

Für die Einweisung in der Herstellung von Mikroresonatoren und der Fertigung meiner Probe gilt mein Dank Herrn Dipl. Phys. Christian Schöppner.

Für die Herstellung vieler Bauelemente für meinen Versuchsaufbau möchte ich mich bei Herrn Hans-Dieter Schädel bedanken.

Für die angenehme Arbeitsatmosphäre danke ich der gesamten Arbeitsgruppe Farle.

Für die Unterstützung außerhalb der Arbeitsgruppe danke ich meiner Mutter Heike, meiner Schwester Angela, meinem Bruder Fabian, Christian Schneider, seiner Familie Dirk und Maximilian sowie meinen Freunden.

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Duisburg, den 27.09.2012

