

UNIVERSITÄT REGENSBURG

F-Praktikum

VERSUCH:

MAGNETO-OPTIK UND MAGNETISCHE ANISOTROPIE



03.12.2021

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	3
2	Versuchsaufbau und Funktionsweise	3
3	Fragen und Aufgaben zur Vorbereitung	5
4	Versuchsdurchführung	7
4.1	Justieren der Probe und erste Hysteresekurven	8
4.2	Bestimmung von leichter und schwerer Richtung	8
4.3	Stoner-Wohlfarth-Modell - Messung vs. Theorie	9
4.4	Abhängigkeit des Koerzitivfeldes H_C in leichter Richtung von der Änderungsrate des angelegten Wechselfeldes	10

1 Einführung

Die magnetische Speicherung von Daten ist aus unserer modernen Informationsgesellschaft nicht mehr wegzudenken. Mit der Entwicklung der ersten Computer Mitte des letzten Jahrhunderts wurden plötzlich neue Speichermedien mit großen Kapazitäten notwendig. Schnell haben sich hierbei ferromagnetische, dünne Schichten als ideale Speicherelemente herausgestellt und die bis dahin üblichen Lochkarten abgelöst. Neben klassischen Magnetspeichermedien wie der Diskette und der Musikkassette ist in diesem Zusammenhang insbesondere auf das Festplattenlaufwerk in PCs zu verweisen. Das Auslesen der Informationen erfolgt in diesen Fällen üblicherweise induktiv bzw. im Falle der Festplatte mit einem GMR-Lesekopf. Eine gänzlich andere Art auf die Informationen in einer magnetisierten, dünnen Schicht zuzugreifen, bietet der magneto-optische Kerr-Effekt. Die Magnetisierung der Oberfläche wird hierbei mithilfe eines linear polarisierten Laserstrahls ausgelesen. Dieses rein optische Verfahren fand bis vor wenigen Jahren in Form von MiniDiscs und MO-Disks sogar eine kommerzielle Anwendung.

Dieser Versuch soll einen ersten Einblick in magneto-optische Messmethoden liefern. Es werden Magnetisierungskurven eines dünnen, ferromagnetischen Films mithilfe des longitudinalen Kerr-Effekts gemessen und im Hinblick auf die uniaxiale Anisotropie der Probe mit einem einfachen Modell interpretiert. Desweiteren lässt sich aus der Abhängigkeit des Koerzitivfelds in leichter Richtung von Amplitude und Frequenz des angelegten Wechselfeldes auf eine endliche Domänenwandgeschwindigkeit schließen.

Erforderliche Kenntnisse

- Ursachen des Ferromagnetismus
- Magnetische Anisotropien
- Bereichsstruktur (magn. Domänen, Domänenwände, ...)
- Ummagnetisierungsprozesse in Eindomänenteilchen
- Polarisation elektromagnetischer Wellen
- Magneto-optischer Kerr-Effekt (speziell: longitudinaler Kerr-Effekt)
- Funktionsweise der optischen Komponenten (Glan-Thompson-Prisma, Wollaston-Prisma, ...)

2 Versuchsaufbau und Funktionsweise

Abbildung 1 zeigt eine Schemazeichnung des verwendeten Versuchsaufbaus. Das Licht eines HeNe-Lasers ($\lambda = 633 \text{ nm}$, $P = 1,8 \text{ mW}$) wird durch ein Glan-Thompson-Prisma senkrecht zur Einfallsebene der Probe polarisiert und fällt unter einem Winkel von ca. 4° auf eine dünne, ferromagnetische Schicht (Durchmesser des Laserspots ca. 1 mm). Eine longitudinale Magnetisierungskomponente der Probe (d.h. parallel zu Einfallsebene und Probenoberfläche) verursacht eine Drehung der Polarisationsrichtung und eine

Elliptisierung des Polarisationszustands des reflektierten Lichts. Sowohl Kerr-Rotation Θ_K als auch Kerr-Elliptizität ε_K sind in guter Näherung lineare Funktionen dieser Magnetisierungskomponente:

$$\Theta_K \propto M_{\text{long}} \quad ; \quad \varepsilon_K \propto M_{\text{long}}.$$

Die Detektion des Kerr-Signals erfolgt mithilfe einer Detektoreinheit bestehend aus einem Wollaston-Prisma, zwei Photodioden und einem Differenzverstärker. Das Prisma spaltet den Lichtstrahl in zwei senkrecht zueinander polarisierte Teilstrahlen auf, welche es in unterschiedliche Richtungen verlassen. Eine Sammellinse (Brennweite 50 mm) fokussiert die beiden Strahlen auf zwei Photodioden, die separat deren Intensitäten messen. Um die durch den Kerr-Effekt bedingten, geringfügigen Änderungen des Polarisationszustands mit hoher Genauigkeit nachweisen zu können, müssen die Intensitäten der beiden Teilstrahlen ungefähr gleich sein. Aus diesem Grund muss die Polarisationsrichtung des von der Probe reflektierten Lichts bezüglich der optischen Achse des Wollaston-Prismas einen Winkel von etwa 45° einnehmen.

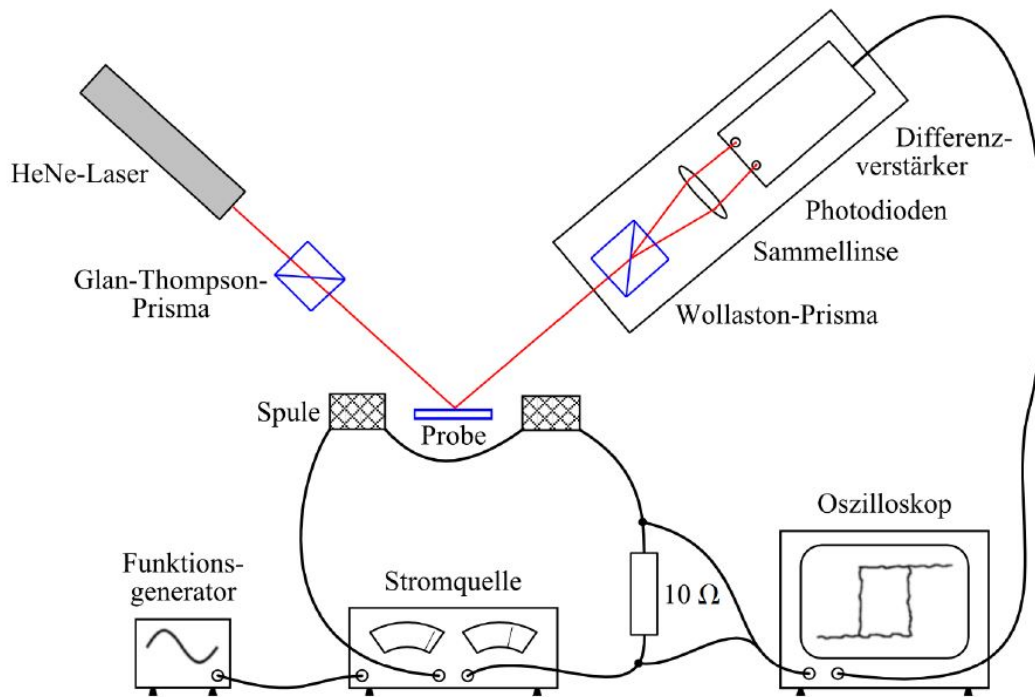


Abbildung 1: Schematische Skizze der Messapparatur.

Eine Korrektur der Lage der optischen Achse des Prismas relativ zur Polarisationsrichtung des reflektierten Lichts erfolgt durch Neigen der gesamten Detektoreinheit, die aus diesem Grund um die Strahlachse drehbar gelagert ist. Die Elektronik des Differenzverstärkers subtrahiert nun die beiden Photodiodensignale und liefert eine dem Intensitätsunterschied proportionale Ausgangsspannung zwischen -11 V und $+11\text{ V}$. Da der Intensitätsunterschied in guter Näherung proportional zur Kerr-Rotation Θ_K ist, liefert

der Differenzverstärker somit ein Signal, das als Maß für die longitudinale Magnetisierungs-komponente der Probe verwendet werden kann. Dieses Signal legt man an den Y-Eingang eines Oszilloskops.

Zur Erzeugung des Magnetfeldes steht eine torusförmige Ferritkernspule ($2 \times \text{ca. } 130$ Windungen entgegengesetzt gewickelt) zur Verfügung. Mithilfe eines Funktionsgenerators, der eine regelbare Stromquelle ansteuert, lässt sich damit ein Wechselmagnetfeld in der Probenebene generieren. Die Richtung des Magnetfeldes kann durch Drehen der Spule verändert werden. An den X-Eingang des Oszilloskops wird der Spannungsabfall über einen in Serie zur Spule geschalteten $10\ \Omega$ -Widerstand gelegt. Dieser Spannungsabfall ist direkt proportional zum fließenden Spulenstrom I , und somit auch zum momentan anliegenden Magnetfeld H . Infolgedessen werden auf dem im XY-Betrieb arbeitenden Oszilloskop die Magnetisierungskurven $M_{\text{long}}(H)$ der Probe in Echtzeit dargestellt.

Abbildung 2 zeigt eine Skizze des verwendeten Probenhalters. Dieser erlaubt eine Drehung der Probe im Magnetfeld um die Oberflächennormale (Ablesung mit Nonius auf $0,5^\circ$ genau) und eine Verschiebung des Messorts um $\pm 5\text{ mm}$. Dies ermöglicht es, magnetische Anisotropien innerhalb der Filmebene zu untersuchen.

Im Versuch werden zwei Arten von Hysteresekurven unterschieden, je nach Lage des angelegten Magnetfeldes zur beobachteten Magnetisierungs-komponente: „parallele Hysteresis“ bedeutet, dass das Magnetfeld $\vec{H}$ parallel zu $\vec{M}_{\text{long}}$ ausgerichtet ist; „senkrechte Hysteresis“ meint dagegen senkrechte Stellung von $\vec{H}$ zu $\vec{M}_{\text{long}}$.

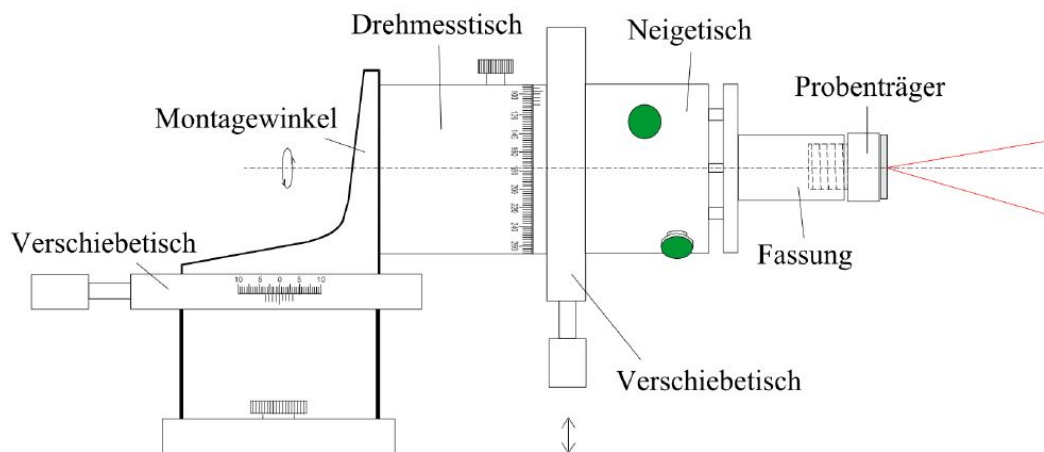


Abbildung 2: Skizze des Probenhalters.

3 Fragen und Aufgaben zur Vorbereitung

1. Was ist Ferromagnetismus? Wie entsteht er? Was besagt die Molekularfeldnäherung? Welche Rolle spielt die Austauschwechselwirkung?
2. Was versteht man unter magnetischer Anisotropie? Welche Ursachen hat sie? Setzen Sie sich hierbei insbesondere mit Form-, Kristall- und magnetisierungsinduzierter

- ter Anisotropie auseinander. Welche Bedeutung hat das entmagnetisierende Feld bei dünnen Filmen?
3. Wieso zerfällt ein Ferromagnet in Domänen? Welche Rolle spielt hierbei das Streufeld? Was sind Domänenwände und was bestimmt ihre Breite?
 4. Was wird durch das Stoner-Wohlfarth-Modell beschrieben? Aus welchen Anteilen setzt sich die Energiedichte zusammen? Vollziehen Sie nach, wie man durch Minimierung der Energiedichte Magnetisierungskurven von ferromagnetischen Ein-domänenteilchen erhält! Wie gelangt man zu den Magnetisierungskurven in schwerer und leichter Richtung? Wie sehen sie aus? Was versteht man unter Koerzitivfeldstärke H_C und Anisotropiefeldstärke H_K ? Was sind remanente Magnetisierung M_R und Sättigungsmagnetisierung M_S ?
 5. Im Versuch verwenden wir einen dünnen ferromagnetischen Film mit uniaxialer Anisotropie in der Filmebene. Inwiefern lässt sich das Stoner-Wohlfarth-Modell auf diesen anwenden? Erarbeiten Sie anhand der realen Ummagnetisierungsvorgänge in schwerer bzw. leichter Richtung den Gültigkeitsbereich des Modells! Welche Rolle spielen hierbei Domänennukleation, Domänenwandverschiebung und Magnetisierungsripple?
 6. Welchen Einfluss haben bei dem verwendeten Versuchsaufbau Frequenz und Amplitude des magnetischen Wechselfeldes auf die Bestimmung von H_C ? Welche Rolle spielt hierbei eine endliche Domänenwandbeweglichkeit?
 7. Geben Sie mit dem einfachen Modell des freien Metallelektrons, das durch das elektrische Feld des einfallenden Lichts zu Schwingungen angeregt wird, eine klassische Erklärung für den longitudinalen Kerr-Effekt. Warum hat die transversale Magnetisierungskomponente keinen Einfluss auf das reflektierte Licht? Legen Sie für Ihre Berechnung die Geometrie von Abbildung 3 zugrunde. Das elektrische Feld schwingt in x -Richtung ($\vec{E}(t) = (E, 0, 0) \exp(-i\omega t)$) und die longitudinale Magnetisierung verursache eine effektive magnetische Flussdichte in y -Richtung ($\vec{B}_{\text{long}} = \lambda \vec{M}_{\text{long}}$). Berücksichtigen Sie beim Aufstellen der Bewegungsgleichung neben der Lorentz-Kraft noch einen geschwindigkeitsabhängigen Reibungsterm $\vec{F}_R = -\frac{m_e}{\tau} \vec{v}$ und erklären Sie die Polarisation des reflektierten Lichts aus der so berechneten Elektronenbewegung.

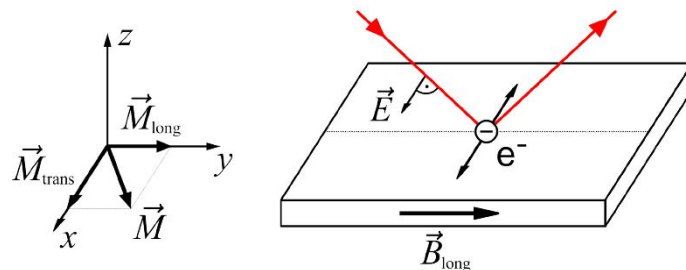


Abbildung 3: Strahlengang beim longitudinalen Kerr-Effekt.

8. Setzen Sie sich mit der Funktionsweise des Versuchsaufbaus auseinander. Wie funktionieren die einzelnen Bauteile? Wie kann man mithilfe des Wollaston-Prismas und des Photo-Differenzverstärkers die geringen Abweichungen der Polarisationsrichtung (größenordnungsmäßig etwa 10°) in Folge des longitudinalen Kerr-Effekts detektieren?
9. Zur Erzeugung des Magnetfeldes wird eine torusförmige Ferritkernspule mit entgegengesetzt gewickelten Hälften benutzt (siehe Abbildung 4). Wie verlaufen die Feldlinien?
- Hinweis: Analoges Gedankenexperiment: Zwei Stabmagnete, die sich an den Polen immer weiter zusammenkrümmen.

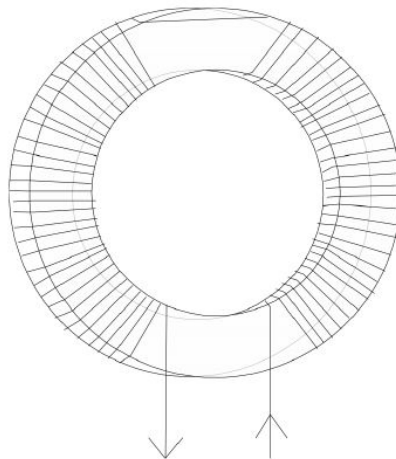


Abbildung 4: Schemazeichnung der torusförmigen Ferritkernspule.

4 Versuchsdurchführung

Achtung:

Benutzen Sie bei Einstellarbeiten während des Laserbetriebs stets die bereitgestellten Schutzbrillen und tragen Sie dabei niemals Uhren, Ringe, etc. Beachten Sie immer: **Keinesfalls in den Laserstrahl sehen! Gefahr für Ihr Augenlicht!** Justieren des Lasers und der Linse nur durch den Betreuer!

Die Magnetisierungskurven am Oszilloskop werden im Echtzeit-Betrieb beobachtet. Zur Dokumentation wählt man mit „MEM“ die digitale Speicherbetriebsart. Mit „Run/Stop“ kann der Bildschirminhalt eingefroren und mit „Utility“, „Hcpy“ und „Print“ auf den Drucker übertragen werden.

Zur systematischen Auswertung der Magnetisierungskurven müssen sowohl die Winkel zwischen den magnetischen Vorzugsrichtungen und dem angelegten Feld, als auch die Richtung des angelegten Feldes zur Einfallsebene des Lichts (parallele oder senkrechte Konfiguration) festgehalten werden. Notieren Sie deshalb zu jedem Ausdruck Winkel

und Konfiguration, sowie Frequenz und Stromstärke des Spulenstroms und die benutzte Empfindlichkeitseinstellung des Oszilloskops.

4.1 Justieren der Probe und erste Hysteresekurven

Für die Messungen kommt eine gesputterte, polykristalline Permalloy-Schicht zum Einsatz, bei deren Herstellung ein magnetisches Gleichfeld in der Filmebene angelegt wurde.

1. Stellen Sie zunächst fest, welcher Zusammenhang zwischen der am X-Eingang des Oszilloskops anliegenden Spannung und dem Strom durch die Magnetspule gilt. Eine Kalibrierung der Magnetfeldachse des Oszilloskops können Sie mithilfe der Beziehung

$$H = c \cdot I \quad \text{mit} \quad c = \frac{\text{Oe}}{\text{A}} = 4000 \text{ m}^{-1}$$

vornehmen (aus Messung mit Hallsonde mit einer Genauigkeit von $\pm 5\%$).

2. Justieren Sie die Probe so, dass der reflektierte Strahl mittig auf das Wollaston-Prisma trifft und auch beim Drehen der Probe immer zentral bleibt. Benutzen Sie dazu die beiden grün markierten Neigeschrauben am Probenhalter (siehe Abbildung 2).
3. Jetzt sollten Sie beim Anlegen eines parallelen Feldes eine Hysteresekurve am Oszilloskop beobachten können (XY-Betrieb). Vermutlich sehen Sie aber nur eine Linie bei $+11\text{ V}$ oder -11 V , da die Intensitäten der beiden Teilstrahlen zueinander noch recht unterschiedlich sind und damit der Differenzverstärker übersteuert wird. Um dies zu verhindern, müssen die Intensitäten der beiden Teilstrahlen ungefähr gleich sein, was durch die 45° -Stellung des Wollaston-Prismas erreicht wird. Verwenden Sie die Feinstellschraube für die gemeinsame Drehung der Detektorelemente um die Strahlachse, um die Lage der Aufspaltungsebene des Prismas zum $\vec{E}$ -Vektor des reflektierten Lichts zu korrigieren. Beim Drehen der Probe im Probenhalter ist wegen geringfügiger Änderungen der Reflexionsrichtung meist eine Nachkorrektur dieser Lage nötig.
4. Drehen Sie die Probe um einen beliebigen Winkel und justieren Sie Strahlführung und Wollaston-Prisma ggf. neu, um wieder ein optimales Messsignal zu erhalten. Verändern sich die Magnetisierungskurven bei Rotation der Probe? Was folgern Sie daraus?

Nachdem Sie nunmehr mit dem Versuchsaufbau vertraut sind, können Sie mit den nachfolgenden, quantitativen Messaufgaben beginnen.

4.2 Bestimmung von leichter und schwerer Richtung

Arbeiten Sie bei den folgenden Messungen mit einer niedrigen Frequenz ($\approx 20\text{ Hz}$) und halten Sie die Amplitude des magnetischen Wechselfeldes gering!

1. Finden Sie in paralleler Messkonfiguration die Lage der leichten und schweren Richtung und drucken Sie die Magnetisierungskurven aus. Bestimmen Sie H_C und H_K . Stimmen die beiden Werte überein? Diskutieren Sie gegebenenfalls Abweichungen vom Stoner-Wohlfarth-Modell.
2. Wechseln Sie in die senkrechte Konfiguration. Drehen Sie hierzu die Spule um 90° , so dass die beobachtete Magnetisierungskomponente senkrecht zum Magnetfeld liegt. Beachten Sie, dass sich die abgelesenen Winkel für die Lage der Achsen zum Magnetfeld ebenfalls um 90° ändern. Nutzen Sie die Magnetisierungskurven in senkrechter Konfiguration, um erneut die Lage der leichten und schweren Richtung zu bestimmen. Geben Sie die entsprechenden Kurven am Drucker aus und erklären Sie die Kurvenformen.

4.3 Stoner-Wohlfarth-Modell - Messung vs. Theorie

1. Untersuchen Sie die magnetische Anisotropie der Probe näher, indem Sie Hysteresekurven unter verschiedenen Winkeln θ zwischen leichter Achse und Magnetfeld messen. Drucken Sie Kurven für $\theta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 25^\circ, 45^\circ, 65^\circ, 80^\circ, 85^\circ$ und 90° jeweils in paralleler und senkrechter Konfiguration aus.
2. Vergleichen Sie die gemessenen Kurven mit den theoretischen Erwartungen nach dem Stoner-Wohlfarth-Modell. Benutzen Sie hierzu das Programm „MLoop“, welches Magnetisierungskurven basierend auf der Stoner-Wohlfarth-Theorie simulieren kann. Es wurde 1997 von M. Brockmann für einkristalline Fe(001)-Schichten geschrieben, welche eine biaxiale Anisotropie aufweisen. Das Programm kann jedoch auch auf den hier betrachteten, uniaxialen Fall angewandt werden, wenn die entsprechende, vierzählige Anisotropiekonstante K_1 gleich Null gesetzt wird. Stellen Sie unter „Schichtparameter“ folgende Werte ein:

- $M_s = 750 \text{ emu/cm}^3$ (Sättigungsmagnetisierung von Permalloy)
- $K_1 = 0$
- $\phi_{11} = 0$
- $K_u = 5.6 \cdot 10^3 \text{ erg/cm}^3$ (ergibt ein Anisotropiefeld $H_K = \frac{2K_u}{M_s} \approx 15 \text{ Oe}$)
- $\phi_u = 0$ (Winkel zw. leichter Achse und Fe[100])

Wählen Sie folgende Messparameter:

- maximales angelegtes Feld = 0.05 kOe
- Winkel zw. Feld und Fe[100]: hier wird der Winkel θ eingegeben ($0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 25^\circ, 45^\circ, 65^\circ, 80^\circ, 85^\circ, 90^\circ$)
- Bias-Feld = 0

Bei „Methode“ kann zwischen „longitudinal“ und „transversal“ gewählt werden, was der parallelen bzw. senkrechten Messkonfiguration entspricht. Die Kurven sollen dem Stoner-Wohlfarth-Modell entsprechend ohne Domänen simuliert werden.

Um eine ausreichende Auflösung zu erreichen, muss unter „Anzahl der Punkte“ ein Wert von mindestens 5000 eingegeben werden. Die simulierten Messpunkte werden unter „loop.dat“ im Verzeichnis des Programms „MLoop“ abgespeichert.

3. Erstellen Sie einen Polarplot von $H_C(\theta)$ (Stoner-Wohlfarth-Astroid). Vergleichen Sie ihre Simulationsdaten mit dem Experiment. Welchen funktionalen Zusammenhang erwarten Sie nach dem Stoner-Wohlfarth-Modell?

4.4 Abhängigkeit des Koerzitivfeldes H_C in leichter Richtung von der Änderungsrate des angelegten Wechselfeldes

1. Variieren Sie nun Frequenz und Amplitude des angelegten Wechselfeldes. Untersuchen Sie die Frequenzabhängigkeit der Koerzitivfeldstärke H_C in leichter Richtung im Frequenzbereich bis 200 Hz. Wie verändert sich diese Frequenzabhängigkeit, wenn Sie die Amplitude des Magnetfeldes verändern? Erklären Sie Ihre Beobachtungen mit einem geeigneten Modell.
2. Bestimmen Sie ausgehend von Ihren Messdaten und der Annahme, dass $H_C \approx (H_W + H_E)/2$, einen Wert für die Wandverschiebungsfeldstärke H_W .

Literatur

Ferromagnetismus im Allgemeinen:

- 1 Kittel, Charles: Einführung in die Festkörperphysik. 14. Aufl. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2006.
- 2 Blundell, Stephen: Magnetism in Condensed Matter. New York: Oxford University Press, 2001.
- 3 Coey, J. M. D.: Magnetism and Magnetic Materials. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.

Stoner-Wohlfarth-Modell und realer Ummagnetisierungsprozess:

- 4 Chopra, Kasturi L.: Thin Film Phenomena. New York: McGraw-Hill, 1969.

Feld- und Frequenzabhängigkeit von H_C :

- 5 Bayreuther, G.; Hoffmann, H.: Field and Frequency Dependence of the Coercive Force in Magnetic Thin Films. In: Int. J. Magn. 3, 249-251 (1972).

Magneto-optischer Kerr-Effekt:

- 6 Schieber, Dieter: Untersuchung der mikromagnetischen Eigenschaften weichmagnetischer uniaxialer Schichten mittels hochempfindlicher magneto-optischer Meßverfahren. Universität Regensburg, Diplomarbeit, 1990.
- 7 Qiu, Z. Q.; Bader, S. D.: Surface magneto-optic Kerr effect. In: Rev. Sci. Instrum. 71, 1243-1255 (2000).
- 8 Bennett, H. S.; Stern, E. A.: Faraday Effect in Solids. In: Phys. Rev. 137, A448-A461 (1965).

Funktionsweise der optischen Komponenten:

- 9 Zinth, W.; Zinth, U.: Optik - Lichtstrahlen - Wellen - Photonen. 2. Aufl. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2009.
- 10 Bergmann, L.; Schaefer, C.: Lehrbuch der Experimentalphysik - Band 3 - Optik. 9. Aufl. Berlin: de Gruyter, 1993.