

B11: Magneto-optischer Kerr-Effekt und magnetische Anisotropien

1. Übersicht zum Thema und Zusammenfassung der Ziele

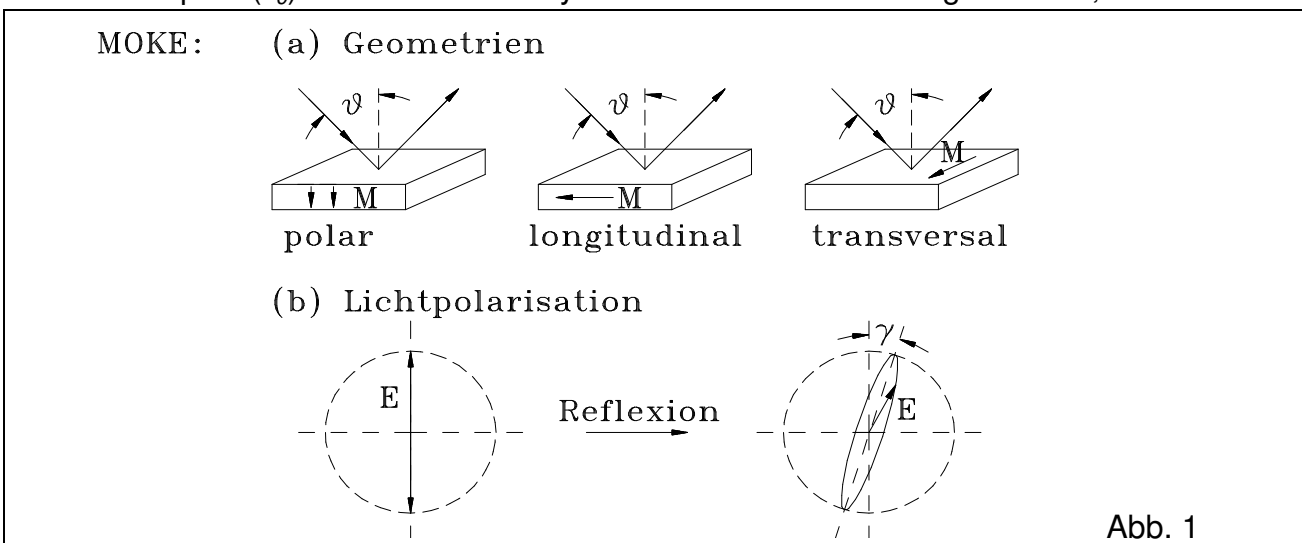
Der **magneto-optische Kerreffekt (MOKE)*** ermöglicht es, aus optischen Polarisationsmessungen Aussagen über magnetische Eigenschaften von **Ferromagneten** zu gewinnen. Er ermöglicht das Ausmessen von **Magnetisierungskurven (Hystereseschleifen)**, aus denen wichtige Größen wie **Koerzitivfeldstärke, Remanenzmagnetisierung** und **Anisotropiekonstanten** abgelesen werden können. Eine bedeutende Anwendung findet MOKE bei der magneto-optischen Datenspeicherung, wo es zum Auslesen der magnetisch codierten Bits verwendet wird. In Kombination mit einem optischen Mikroskop lassen sich magnetische Domänen sichtbar machen [1].

Im Praktikumsversuch soll zunächst die MOKE-Technik kennengelernt und die optimale Versuchsanordnung zur Messung von Hystereseschleifen gefunden werden. Dann soll mit **longitudinalem MOKE** das magnetische Verhalten eines dünnen Fe-Films untersucht werden, der epitaktisch auf die (001)-Oberfläche eines MgO-Kristalls aufgewachsen wurde. Anhand von Hystereseschleifen der **leichten und schweren Magnetisierungsrichtungen** können Aussagen zur **Form- und Kristallanisotropie** gemacht werden. Schließlich soll mit einem **Kerrmikroskop** das Domänenmuster eines Seltenerd-Eisen-Granatfilms abgebildet und in äusseren Magnetfeldern untersucht werden.

2. Theoretische Grundlagen

2.1 Magneto-optischer Kerr-Effekt

Magneto-optische Effekte treten sowohl bei Transmission von Licht durch Materie (Faraday-Effekt und Voigt-Effekt) als auch bei Reflexion von Licht an der Probenoberfläche (Kerr-Effekt) auf (siehe Abb. 1a). Dabei ändert sich in Abhängigkeit von der Polarisation des einfallenden Lichtes und der Magnetisierung der Probe die **Polarisationsrichtung (Kerr-Rotation)** und **Elliptizität** des transmittierten bzw. reflektierten Lichtstrahls (siehe Abb. 1b). Die magneto-optischen Effekte sind quantenmechanischer Natur und lassen sich nur mit Hilfe der Spin-Bahn-Wechselwirkung verstehen [2]. Phänomenologisch kann man sie durch Nebendiagonalelemente im **dielektrischen Tensor ϵ** beschreiben [3]. Unter der Voraussetzung, daß keine weiteren optischen Anisotropien auftreten, kann ϵ in einen isotropen (ϵ_0) und einen anti-symmetrischen Anteil zerlegt werden, so daß das



* Die fett gedruckten Begriffe sollen vor Versuchsbeginn beherrscht werden

dielektrische Gesetz in folgende Form gebracht werden kann:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} - i \varepsilon_0 Q \mathbf{j} \times \mathbf{E}.$$

Hier bezeichnet \mathbf{E} das elektrische Feld, \mathbf{D} die dielektrische Verschiebung, \mathbf{j} den Richtungsvektor der Magnetisierung und Q eine komplexe Materialkonstante, die die Stärke der magneto-optischen Kopplung beschreibt und in guter Näherung proportional zur Probenmagnetisierung ist. Auf die Interpretation des Kreuzproduktes $\mathbf{j} \times \mathbf{E}$ stützt sich eine anschauliche klassische Deutung des Kerr-Effektes: Auf die im elektrischen Wechselfeld schwingenden Festkörperelektronen wirkt die Lorentzkraft, wodurch die Schwingungsrichtung und damit die Polarisation des emittierten Lichtes verändert wird. In dem Spezialfall, daß die Lichtpolarisation parallel zur Magnetisierung ist, verschwindet das Kreuzprodukt, und die Polarisation des Lichtes bleibt unverändert. (Vorsicht: Das die Lorentzkraft verursachende effektive Magnetfeld, welches proportional zur Magnetisierung ist, ist um Größenordnungen größer als das tatsächlich physikalisch messbare Magnetfeld. Die klassische Beschreibung wird hier überstrapaziert [2]).

2.2 Magnetische Anisotropie

Die spontane Magnetisierung in einem Ferromagneten beruht auf der **Austauschwechselwirkung**, welche isotrop ist. Aufgrund der **magnetischen Dipol-Dipol-Wechselwirkung** und der **Spin-Bahn-Kopplung** gibt es jedoch Vorzugsrichtungen für die spontane Magnetisierung (**leichte Magnetisierungsrichtung**). Die magnetische Anisotropie bezeichnet die energetischen Unterschiede für die spontane Magnetisierung in unterschiedliche Richtungen. Es werden insbesondere **Formanisotropie** und **Kristallanisotropie** unterschieden:

Die Formanisotropie E_{shape} beschreibt die magnetische Streufeldenergie pro Probenvolumen in Abhängigkeit der Magnetisierungsrichtung. Sie hängt damit von der Form der magnetischen Probe ab. Für ellipsoidförmige Proben gilt:

$$E_{shape} = \frac{\mu_0}{2} H_D M_S = \frac{\mu_0}{2} N M_S^2,$$

wobei M_S die Sättigungsmagnetisierung (Fe: $\mu_0 M_S = 2,1$ Tesla) und N der Entmagnetisierungsfaktor ist, der von der Magnetisierungsrichtung abhängt [8,9] (der hier verwendete dünne Fe-Film kann näherungsweise als Ellipsoid beschrieben werden). $H_D = N M_S$ ist das Entmagnetisierungsfeld, das sich dem angelegten äußeren Magnetfeld überlagert (die Richtung von H_D ist der Magnetisierung entgegengesetzt).

Die Kristallanisotropie $E_{cryst.}$ beschreibt die Energieunterschiede (pro Volumen) für die Ausrichtung der spontanen Magnetisierung entlang verschiedener Kristallrichtungen. Die Richtung, für die sie den kleinsten Wert annimmt, wird leichte Magnetisierungsrichtung genannt. In bcc-Fe sind die [100]-Richtungen leichte, [110] und [111] schwere Magnetisierungsrichtungen. Im Versuch wird der dünne Fe-Film innerhalb der (001)-Ebene magnetisiert. Berücksichtigt man nur Terme niedrigster Ordnung, so gilt für die Kristallanisotropie innerhalb dieser Ebene (in einem kubischen Kristall):

$$E_{cryst.} = K_1 (\cos^2 \phi \cdot \sin^2 \phi),$$

wobei K_1 die Anisotropiekonstante niedrigster Ordnung (vierzähliger Symmetrie) und ϕ der Winkel zur [100]-Richtung ist [7,8,9].

2.3 Magnetisierungskurven (Hystereseschleifen)

Die magnetischen Hystereseschleifen sind in ihrer Form relativ komplex. Dies liegt daran, dass aufgrund des Entmagnetisierungsfeldes sich in Abhängigkeit vom äußeren Magnetfeld verschiedene Domänenzustände ausbilden und daher der Kristall bei kleineren äußeren Magnetfeldern nicht einheitlich magnetisiert ist, wie das z.B. bei sehr dünnen Filmen oder kleinen Teilchen der Fall ist. Die Remanenz ist demzufolge auch im Fall der Magnetisierung entlang einer leichten Richtung in der Regel kleiner als die Sättigungsmagnetisierung. Auch wenn es schwer ist, die Hystereseschleifen für leichte und schwere Magnetisierungsrichtungen quantitativ zu beschreiben, so läßt sich aus letzterer die Anisotropiekonstante abschätzen: Aus der Kristallanisotropie E_{cryst} läßt sich das Magnetfeld H_0 berechnen, welches notwendig ist, um die Magnetisierung in die schwere Richtung zu drehen. Berücksichtigt man, daß das im Kristall anliegende Feld um das Entmagnetisierungsfeld reduziert ist, so ergibt sich bei Magnetisierung des Fe-Films entlang der [110]-Richtung:

$$H_0 = \frac{1}{2 - \sqrt{2}} K_1 / \mu_0 M_s + H_D .$$

2.4 Magnetische Domänen

Eine magnetische Probe bildet infolge der langreichweitigen Dipolwechselwirkung in Remanenz ein Domänenmuster aus. Die von der Austauschwechselwirkung favorisierte rein parallele Ausrichtung der magnetischen Momente wäre mit dem Auftreten energetisch ungünstiger Streufelder verbunden. Aber auch der Aufbau von Domänenwänden (**Néelwände**, **Blochwände**) kostet Energie, weil die magnetischen Momente darin ihre Ausrichtung ändern und ungünstige Orientierungen einnehmen. Das Domänenmuster wird durch das Minimum von Austauschenergie, Streufeldenergie, Kristallanisotropie und **Zeeman-Energie** bestimmt [10]. Die hier betrachteten Seltenerd-Eisen-Granatfilme [11] zeichnen sich durch eine senkrechte leichte Magnetisierungsrichtung und aus und erzeugen eine große Kerrdrehung ($>1^\circ$). Die Domänen sind mädnerförmig und haben in Remanenz eine feste Breite.

3. Experimenteller Aufbau

Der Versuchsaufbau ist schematisch in Abb. 2 gezeigt. Als Lichtquelle für die MOKE-Mes-

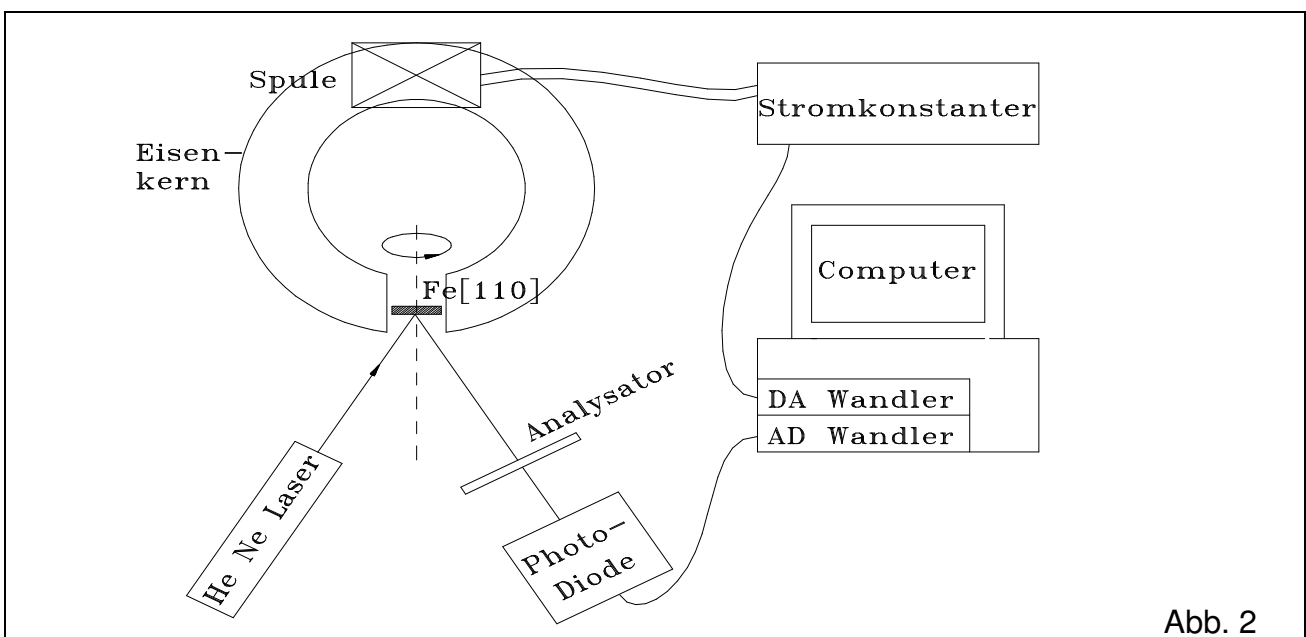


Abb. 2

sungen wird ein linear polarisierter He-Ne Laser mit einer Ausgangsleistung von 0.5 mW benutzt. Der Laserstrahl wird auf den zu untersuchenden Fe-Film gerichtet und von dort reflektiert. Der reflektierte Strahl passiert ein Polarisationsfilter (Analysator) und wird durch eine Linse auf eine **Photodiode** fokussiert. Um den Einfluss von Streulicht aus der Umgebung zu vermeiden, wird direkt vor die Photodiode ein Interferenzfilter gesetzt. Da die Kerr-Rotation relativ klein ist ($\ll 1^\circ$), kann sie nicht direkt (durch Nachdrehen des Analysators) ermittelt werden. Die wird indirekt detektiert, indem bei festem Analysatorwinkel die Intensitätsänderung mit der Photodiode gemessen wird. Das Signal der Photodiode wird verstärkt und über einen A/D-Wandler vom Computer eingelesen.

Die Eisenprobe befindet sich im Spalt eines ringförmigen Eisenkerns, der mit einer Spule umwickelt ist. Das Magnetfeld im Spalt ist proportional zum computergesteuerten Strom durch die Spule. Es kann mit Hilfe einer **Hallsonde** (ebenfalls computergesteuert) ausgemessen und kalibriert werden. Die Probe, deren Oberfläche parallel zum äußeren Magnetfeld liegt (longitudinaler MOKE-Aufbau), kann um die Symmetrieachse gedreht werden. Es ist somit möglich, die Probe entlang der leichten [100]- und schweren [110]-Richtung zu magnetisieren. Die 100 nm dicke Fe-Schicht ist auf MgO(001) epitaktisch aufgewachsen. MgO kristallisiert in NaCl-Struktur und bricht bevorzugt entlang [100]. Bcc-Fe(001) wächst wegen seiner Gitterkonstante lateral um 45° gedreht auf MgO(001) auf. Daher weisen die Bruchkanten des MgO-Substrats entlang Fe[110].

Zur Domänenabbildung steht ein Kerrmikroskop zur Verfügung, das einen Kontrast aufgrund des polaren Kerreffektes liefert und mit einer CCD-Kamera ausgestattet ist. Zum Anlegen äußerer Magnetfelder werden ein Elektromagnet und Stabmagneten verwendet. Der Polarisationswinkel des einfallenden Lichtes kann verändert werden.

4. Versuchsdurchführung

4.1 Magnetfeldkalibrierung:

Messen Sie mit Hilfe der Hallsonde das Magnetfeld im Spalt als Funktion des Spulenstroms (im Bereich von -3 bis 3 A). Es wird ein nahezu linearer Zusammenhang erwartet. Ermitteln Sie die Proportionalitätskonstante und benutzen Sie diese im folgenden als Kalibrierungsfaktor. Wie groß kann dieser Faktor nach einer einfachen theoretischen Abschätzung maximal sein? Wie läßt sich die Abweichung zum experimentellen Wert erklären? (Anzahl der Spulenwindungen: 300; Spaltbreite: 12 mm.)

4.2 MOKE-Aufbau:

Setzen Sie die Fe-Probe in den Spalt und bauen Sie den MOKE-Aufbau entsprechend der Versuchsskizze auf. Durch die systematische Variation einiger Parameter sollen Sie den optimalen Aufbau ermitteln. Bei einer optimalen Messeinstellung sollte das Signal-zu-Rausch-Verhältnis möglichst groß sein. Ein Maß dafür ist der Kontrast c , welcher als Verhältnis von Signalthöhe, $I_1 - I_2$, (Differenz der Signale für die beiden entgegengesetzten Sättigungsmagnetisierungen) zu Signaloffset I_0 (Mittelwert der beiden Signale) definiert wird: $c = (I_2 - I_1) / I_0$.

Messen Sie für eine feste Probeneinstellung den Kontrast als Funktion des Analysatorwinkels α für **s-** und **p-polarisiertes** Licht sowie als Funktion des Einfallswinkels ϑ nur für s-polarisiertes Licht (bei etwa $\alpha = 5^\circ$ relativ zur Auslöschung).

Erklären Sie die gemessene Abhängigkeit des Kontrastes vom Analysatorwinkel mit Hilfe einfacher theoretischer Überlegungen. Aus den Meßdaten kann der Kerr-Rotationswinkel bestimmt werden.

Vergleichen Sie die Abhängigkeit vom Einfallswinkel mit theoretischen Ergebnissen [4]. Diese Abhängigkeit läßt sich auch mit Hilfe der klassischen Deutung von MOKE leicht verstehen.

Hinweis: Für die Messung des Kontrastes in Abhängigkeit vom Einfallswinkel sollten Sie einen möglichst großen Einfallswinkelbereich ausmessen. Setzen Sie für diese Messreihe die Probe möglichst weit an den Rand des Spaltes, auch wenn das Magnetfeld dort schon inhomogen ist.

4.3 Magnetische Anisotropie:

Nehmen Sie (mit einem optimierten MOKE-Aufbau) mit s-polarisiertem Licht die Hystereseschleifen für unterschiedliche Probenorientierungen im Magnetfeld auf, und diskutieren Sie die Unterschiede. Finden Sie anhand der Form der Hysteresen die leichte und die schwere Magnetisierungsrichtung in der Probenoberfläche heraus.

Schätzen Sie den Entmagnetisierungsfaktor für Magnetisierungsrichtungen in der Filmebene ab (Probendicke 1000 Å). Welches Magnetfeld wäre allein von der Formanisotropie her nötig, um die Probe senkrecht zur Probenoberfläche zu magnetisieren? Lohnt es sich daher, mit dem vorhandenen Aufbau polare MOKE-Messungen durchzuführen?

Bestimmen Sie aus der Hysterese für die schwere Magnetisierungsrichtung die Anisotropiekonstante der Kristallanisotropie.

Wieso wird hier mit s-polarisiertem Licht gearbeitet ?

4.4 Kerrmikroskopie

Nehmen Sie mit dem Kerrmikroskop das Domänenmuster des Seltenerd-Eisen-Granatfilms auf. Kehren Sie den magneto-optischen Kontrast durch Verdrehen des Polarisators um und unterscheiden Sie so magnetische Domänen von nicht-magnetischem Hintergrund. Schätzen Sie die Breite der Domänen ab. Überführen Sie dann das Domänenmuster durch Anlegen eines äußeren Magnetfeldes in den eindomänigen Zustand und dokumentieren Sie die dabei auftretenden Veränderungsprozesse. Welche Form erwartet man für eine mit polarem MOKE an diesem Film aufgenommene Magnetisierungskurve ?

5. Literatur

- [1] J. Kranz und A. Hubert, Zeitschrift für angew. Physik **15**, 220 (1963).
- [2] P.N. Argyres, Phys. Rev. **97**, 334 (1955).
- [3] Diplomarbeit Klaus Bethke, RWTH Aachen (1988).
- [4] J. Zak, E.R. Moog, C. Liu, und S.D. Bader, Phys. Rev. B **43**, 6423 (1991).
- [5] S.D. Bader, *SMOKE*, J. Magn. Magn. Mater. **100**, 440(1989).
- [6] M.E. Brubaker, E.R. Moog, C.H. Sowers, J. Zak, and S.D. Bader, J. Magn. Mater. **103**, L7 (1992).
- [7] Ch. Kittel, *Festkörperphysik* (FBB Sign.: KM1 1).
- [8] E. Kneller, *Ferromagnetismus* (Springer, Berlin, 1962), Kap. 7, 8, 13, 19.
- [9] Manuskript zum 24. IFF-Ferienkurs Magnetismus (1993), Kap. 24, 34.
- [10] A. Hubert und R. Schäfer, *Magnetic Domains* (Springer, Berlin 1998), Kap. 3.7.3, 5.6.1.
- [11] A.K. Zvezdin und V.A. Kotov, *Modern Magneto-optics and Magneto-optical Materials* (Institute of Physics Publishing, Bristol 1997), Kap. 7.1-3, 9.3.