

## Der magnetooptische Kerr-Effekt als Praktikums- und Schulversuch

Daniel Laumann

Institut für Didaktik der Physik  
Westfälische Wilhelms-Universität  
Wilhelm-Klemm-Str. 10  
48149 Münster

### Kurzfassung

Der magnetooptische Kerr-Effekt wird an vielen Hochschulen als Versuch im physikalischen Fortgeschrittenen-Praktikum eingesetzt. Das Experiment ermöglicht den Nachweis kleiner Winkeländerungen der Polarisationssebene durch Reflexion eines linear polarisierten Laserstrahls an einer magnetisierten Oberfläche. Für den Nachweis des Phänomens wird auf Grund der geringen Effektstärke häufig ein technisch anspruchsvoller Versuchsaufbau verwendet. Auf Grund der resultierenden Komplexität des Versuchsaufbaus wird jedoch aus Perspektive der Lernenden der direkte Weg zum zentralen Effekt erschwert.

Der nachfolgende Beitrag stellt eine technisch stark reduzierte Umsetzung eines Experiments zum magnetooptischen Kerr-Effekt dar. Das verwendete Messsystem ist dabei ohne Verwendung eines Lock-In-Verstärkers oder photoelastischen Modulators mit Hilfe einer einzelnen Messung in der Lage qualitativ angemessene und quantitativ aussagekräftige Materialhysteresen (Bsp. CoPt) aufzunehmen. Mit dem hier beschriebenen Versuchsaufbau eröffnet sich erstmals die Möglichkeit zum Einsatz in der Schule. Der Beitrag stellt weiterhin einen möglichen Modellansatz für den Übergang von einer makroskopischen zu einer mikroskopischen Beschreibung von Ferromagnetismus über den magnetooptischen Kerr-Effekt vor.

### 1. Einleitung

Im Jahr 1876 entdeckte John Kerr den nach ihm benannten magnetooptischen Kerr-Effekt. Dieser beschreibt zum einen die Drehung der Polarisationssebene und zum anderen die Änderung der Intensität von polarisiertem Licht bei der Reflexion an einer magnetisierten Oberfläche beschreibt. Der nachfolgende Beitrag wird dabei ausschließlich den Einfluss der Drehung der Polarisationssebene betrachten, da die Effektstärke dieses Phänomens bereits gering ist, aber durch die Intensitätsänderung erzielter Effekt noch um ein Vielfaches geringer ausfällt [1].

Der magnetooptische Kerr-Effekt stellt eine zentrale Grundlage in der Erforschung ferromagnetischer Domänenstrukturen in der Festkörper- und Materialphysik dar. Er ermöglicht insbesondere die Bestimmung verschiedener Materialparameter (Remanenz, Koerzitivfeldstärke, etc.). Im Bereich der Datenspeicherung findet der magnetooptische Kerr-Effekt in Form magnetooptischer Disks mit Speicherkapazitäten von bis zu ca. 10 GB Anwendung [2]. In der Physik wird die MOKE- bzw. Kerr-Mikroskopie als Standard-Verfahren zur Abbildung ferromagnetischer Domänen und Ummagnetisierungsprozesse eben solcher eingesetzt und bildet somit eine Alternative zur ebenfalls häufig verwendeten MFM-Mikroskopie [3].

In der Lehre wird der magnetooptische Kerr-Effekt an Hochschulen häufig als Versuch im Fortgeschrittenenpraktikum durchgeführt [4], [5], [6], [7].

Die verwendeten Versuchsaufbauten weisen i. d. R. einen hohen technischen Aufwand auf. Mit Hilfe der verwendeten Geräte zur Messung und Analyse soll dem Problem kleiner Effektstärken entgegengewirkt und die Genauigkeit der Messung optimiert werden. Häufig kommen im Praktikum zum Nachweis der Drehung der Polarisationssebene Lock-in-Verstärker, polarisierende Strahlteilerwürfel, photoelastische Modulatoren zur Modulation des Polarisationszustands oder eine spezielle MOKE-Software zum Einsatz. Zudem verwenden die existierenden Praktikumsversuche häufig Vielfachmessungen ( $n \gg 10$ ) mit automatisierter Analyse.

Ein typisches Ziel der Praktikumsversuche ist die Messung einer materialcharakteristischen Hysteresekurve durch Variation der Magnetisierung. Diese erlaubt u. a. die Charakterisierung hart- und weichmagnetischer Stoffe und gibt Aufschluss über die bereits beschriebenen Materialparameter. Als Probenmaterial wird häufig ein Schichtsystem aus Cobalt und Platin auf Silizium (nf. Co/Pt) verwendet. Mit Blick auf dieses Versuchsziel stellen die existierenden Praktikumsversuche effektive Lösungen dar.

Im Rahmen dieses Beitrags soll zunächst analysiert werden, inwiefern die bisherigen Versuchsaufbauten

auch effizient sind, d. h. ist es notwendig vergleichsweise hohen technischen Aufwand zur Bestimmung der typischen Materialparameter und Aufnahme einer ferromagnetischen Hysterese zu treiben oder können ähnliche Resultate auch mit deutlich reduzierten Versuchsaufbauten erzielt werden?

Im Anschluss an die Darstellung eines stark reduzierten Versuchsaufbaus soll weiterhin gezeigt werden, dass sich der magnetooptische Kerr-Effekt mit Blick auf den Übergang von makroskopischen zu mikroskopischen Magnetisierungen über die Universität hinaus auch als Experiment für die Schule eignet und mit den dort verfügbaren Experimentiermaterialien untersucht werden kann. In diesem Rahmen wird ein begleitendes interaktives Widget zur Vermittlung der qualitativen Erkenntnisse des MOKE-Experiments dargestellt [8].

## 2. Theoretischer Hintergrund

Der magnetooptische Kerr-Effekt existiert in drei grundlegenden Geometrien (vgl. Abb.1). Da beim polaren magnetooptischen Kerr-Effekt die größten Effekte erwartet werden, soll dieser die Grundlage für die nachfolgende theoretische Beschreibung und die anschließende Analyse des experimentellen Aufbaus darstellen.

Klassisch wird gemäß der Elektronentheorie nach Lorentz die magnetisierbare Oberfläche als Anordnung gebundener Elektronen, deren Verhalten durch harmonische Oszillatoren beschrieben werden kann, betrachtet. Durch Einwirkung von linear polarisiertem Licht  $\vec{E}$  werden die Elektronen zu Schwingungen angeregt. Das linear polarisierte Licht kann dabei als Überlagerung von links- und rechts-zirkular polarisiertem Licht gleicher Amplitude betrachtet werden. Zusätzlich existiert ein magnetisches Feld  $\vec{B}$ , durch das die Elektronen beeinflusst werden [9]. Dieser Ansatz führt zu einer Bewegungsgleichung der schwingenden Oberflächenelektronen, deren Lösung in unterschiedlichen Reflexionsindices für das links- und rechts-zirkular polarisierte Licht resultiert.

Die klassische Herleitung, wie im obigen Ansatz ersichtlich, gelingt nur in Abhängigkeit von einem äußeren Magnetfeld  $\vec{B}$  und nicht mit Bezug auf die eigentlich notwendige Proben-Magnetisierung  $\vec{M}$ . Die letztlich notwendige quantenmechanische Herleitung mit Hilfe eines geeigneten Hamilton-Operators, auf deren explizite Ausführung an dieser Stelle verzichtet werden soll, ergibt wiederum unterschiedliche Brechungs- und Reflexionsindices des links- und rechts-zirkular polarisierten Lichts wodurch die Drehung der Polarisations Ebene bewirkt wird [10]. Eine entsprechende schematische Darstellung dieses Vorgangs ist in Abbildung 2 dargestellt.

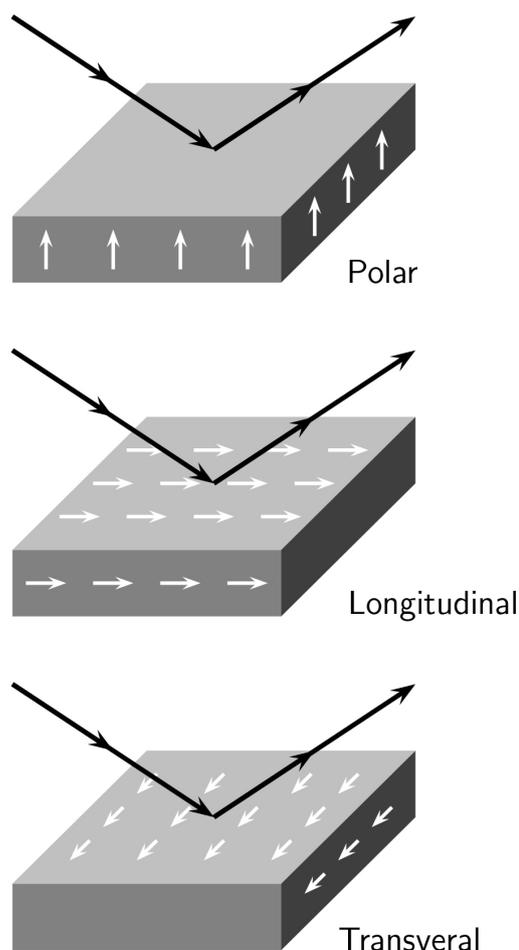
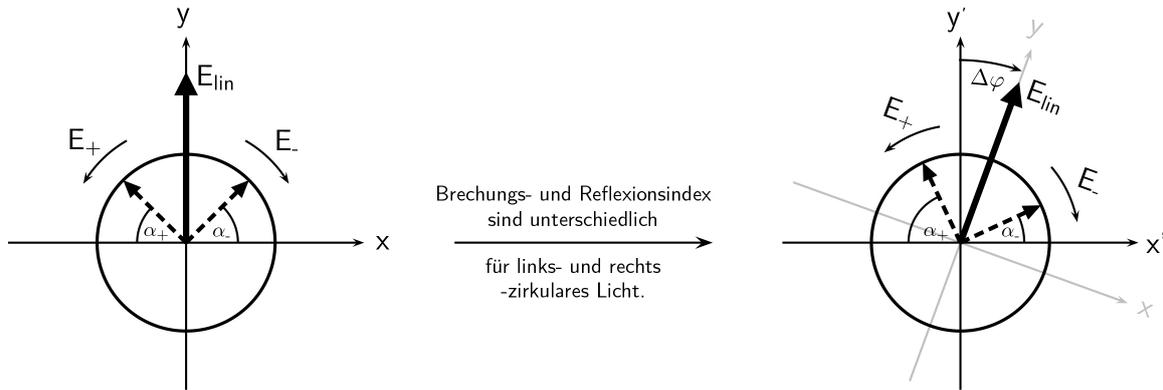


Abb.1: Grundlegende Geometrien des magnetooptischen Kerr-Effekts.

## 3. Experimentelle Umsetzung

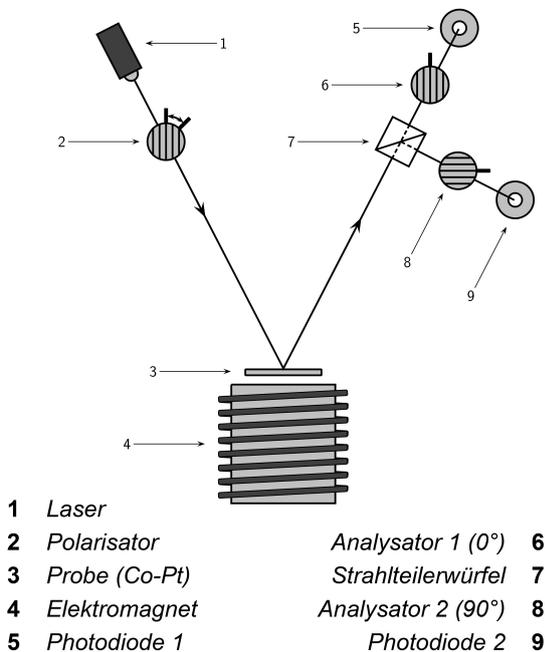
Für ferromagnetische Domänen ermöglicht der magnetooptische Kerr-Effekt somit eine Messung der zu Grunde liegenden Struktur in Abhängigkeit von der Magnetisierung mit Hilfe der Polarisation. Um einzelne Domänen lateral auflösen zu können ist jedoch ein entsprechend präziser Versuchsaufbau notwendig, wie er u. a. in einem Kerr-Mikroskop verwendet wird. Für die Lehre lässt sich der Effekt nutzen, um die Gesamtmagnetisierung  $\vec{M}$  einer Probe, als Summe der Einzelmagnetisierungen  $\vec{m}_i$  der einzelnen Domänen, über einen deutlich reduzierten Versuchsaufbau messen zu können. Diese Messung ermöglicht die Aufnahme einer materialspezifischen Hysteresekurve, aus der zentrale Materialparameter entnommen werden können.

Die im Rahmen dieses Beitrags durchgeführten Messungen untersuchen jeweils eine Co/Pt-Probe mit Hilfe des polaren magnetooptischen Kerr-Effekts. Analoge Messungen aus der Fachwissenschaft ergeben für die Koerzitivfeldstärke bzw. die entsprechende Flussdichte für eine out-of-plane-Messung (easy axis) einen Wert von  $B_{C,Lit} = 46 \text{ mT}$ .



**Abb.2:** Schematische Darstellung der Wirkung auf links- und rechts-zirkular polarisiertes Licht mit Folge gedrehter Polarisations Ebene von linear polarisiertem Licht nach [7].

Zur Reduktion der technischen Voraussetzungen des Versuchsaufbaus wurde der einfachst mögliche Aufbau gemäß Abbildung 3 (ohne die Elemente 7 bis 9) gewählt.



**Abb.3:** Schematische Darstellung zum verwendeten Versuchsaufbau zur Messung des magnetooptischen Kerr-Effekts in polarer Geometrie (Draufsicht).

Von einem Laser ausgehendes Licht ( $\lambda = 635 \text{ nm}$ ) wird mit Hilfe eines Polarisationsfilters linear polarisiert. Das polarisierte Licht trifft auf eine ferromagnetische Oberfläche (Co/Pt) und wird von dieser reflektiert. Unmittelbar hinter der ferromagnetischen Probe befindet sich ein Elektromagnet, sodass die Magnetisierung der Probe durch Anlegen eines äußeren Magnetfelds variiert werden kann. Der reflektierte Lichtstrahl trifft auf einen Strahlteilerwürfel, der das Licht in zwei räumlich-orthogonale Anteile näherungsweise gleicher Intensität zerlegt. Jeder Anteil wird durch einen weiteren Polarisationsfilter analysiert und trifft zur Messung auf eine Photodiode. Der Aufbau lässt sich durch Entfernung des

Strahlteilerwürfels auf die tatsächlich simpelste Form der Messung mit Hilfe einer Photodiode und eines Analysators weiter reduzieren. Im nachfolgenden werden sowohl Messungen mit einer als auch mit zwei Photodioden dargestellt.

Im System mit einer Photodiode wurden der Polarisator und Analysator im Winkel von  $90^\circ$  zueinander ohne äußeres Magnetfeld positioniert, sodass das Signal der Photodiode zu Beginn bei Null liegt. Mit ansteigender Magnetisierung und damit einhergehender Drehung der Polarisations Ebene lässt sich somit ein entsprechender Anteil mit Hilfe der Photodiode detektieren. Die Null-Stellung hilft die im Vergleich zur Laserintensität kleinen Intensitätsänderungen nachweisen zu können. Die Messung des Dioden-Stroms bzw. der Dioden-Spannung wurde mit einem CASSY-Messwerterfassungssystem und vorgeschaltetem Verstärker durchgeführt. Mit Hilfe dieses Systems wurde auch das Magnetfeld im Bereich der Probe mit Hilfe einer Hall-Sonde vermessen.

Bei der Verwendung von 2 Photodioden zur Auswertung wurden die entsprechenden Analysatoren im Winkel von  $+45^\circ$  und  $-45^\circ$  bezüglich des Polarisators eingestellt, sodass auch hier ohne äußeres Magnetfeld bei Differenzmessung keine Intensität detektiert wird. Die Drehung der Kerr-Ebene bewirkt in diesem Fall jedoch eine betragsmäßig gleiche Spannung bzw. Stromstärke an beiden Photodioden mit umgekehrtem Vorzeichen, sodass der erwartete Effekt im Signal im Vergleich zum System mit einer Photodiode verdoppelt wird. Auf Grund der erwartbar kleinen Effekte erscheint dies als eine Möglichkeit der Signalverstärkung. Die Notwendigkeit der Verwendung einer zweiten Photodiode soll in Abschnitt 4 an Hand der durchgeführten Messungen und Hysteresen diskutiert werden. Die Diskussion beinhaltet weiterhin Hinweise für die Verwendung eines Tiefpassfilters zur Unterdrückung störender Einflüsse (Strahlung, etc.) auf die Photodioden.

Der vollständige Aufbau wurde auf einer mikrooptischen Bank montiert. Auf mechanische Abschirmungen gegenüber äußerer Strahlung wurde gänzlich verzichtet, da diese gemäß Probemessungen im

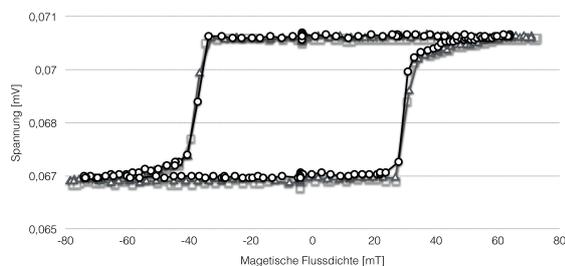
Vergleich zum elektronischen Rauschsignal des CASSY-Messwerterfassungssystems vernachlässigt werden kann.

Zur Magnetisierung wurde ein Elektromagnet aus drei Spulen (je Leybold Typ 56213,  $N = 250$ ,  $I = 5$  A,  $R = 0,6 \Omega$ ) mit Eisenkern verwendet. Um die notwendige äußere Magnetfeldstärke zu erreichen ist es möglich die Stromstärke für kurze Zeit auf  $I = 10$  A einzustellen. Zur Aufnahme der Hysterese wurde die Stromstärke manuell zunächst kontinuierlich auf  $I = 10$  A und von dort auf  $I = 0$  A geregelt. Nach Umpolung erfolgt die Regelung auf  $I = -10$  A und wieder auf  $I = 0$  A. Durch dieses Vorgehen ist der Durchlauf einer vollständigen Hysterese gewährleistet, für die jeweils eine Messzeit näherungsweise  $t \approx 40$  s gilt.

Da das Messsystem vergleichsweise empfindlich ist, sollte die Apparatur während der Messung mechanisch nicht beeinflusst werden. Zudem sollte ein nicht-ferromagnetischer Probenhalter (ideal Kunststoff, Holz) zur Befestigung der Co/Pt-Probe verwendet werden, um Einflüsse des äußeren Magnetfelds auf die Position der Probe ausschließen zu können.

#### 4. Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der durchgeführten Experimente zeigen, dass der simpelste Versuchsaufbau, bestehend aus einer Photodiode und einem Analysator ohne Tiefpassfilter für die Messung einer aussagekräftigen Hysterese mit geringen Störungen ausreicht (vgl. Abb.4).



**Abb.4:** Messung der Hysterese einer Co/Pt-Probe (1 Photodiode, ohne Tiefpassfilter, Spannungsmessung) mit mikrooptischer Bank.

Ein Vergleich mit weiteren Messungen bei verändertem Versuchsaufbau, (vgl. Appendix, Abb.8 und 9) zeigt darüber hinaus, dass die Verwendung von Tiefpassfilter und zweiter Photodiode möglich ist, aber mit Blick auf die Qualität der Messergebnisse keinen signifikanten Vorteil besitzt.

Für jede Konstellation wurden direkt nacheinander drei Messungen durchgeführt, um die Reproduzierbarkeit nachweisen zu können.

Um Verzerrungen der Messwerte durch zu hohe Bestrahlungsstärken der Photodioden bei Spannungsmessung ausschließen zu können, wurden die ebenfalls im Appendix dargestellten Stromstärkemessungen durchgeführt. Auf Grund der Ergebnisse zeigt sich jedoch, dass sich die Bestrahlungsintensität der Photodioden im adäquaten Bereich für Spannungsmessungen befindet. Dies wurde zudem über die Aufnahme der Kennlinien der Photodioden bestätigt.

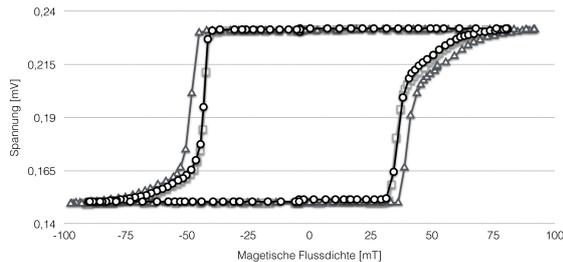
Eine quantitative Auswertung im Vergleich aller Messungen ergibt für die Probe eine Koerzitivfeldstärke bzw. -flussdichte von ca.  $B_C = 35 - 40$  mT. Da die Hallsonde verglichen mit der Probe etwa  $d = 2 - 3$  mm entfernt vom Magneten positioniert ist, liegt die tatsächliche Koerzitivfeldstärke leicht über diesem Wert. Das Messergebnis stimmt somit in Näherung mit dem in Abschnitt 3 angegebenen Literaturwert von  $B_{C,Lit} = 46$  mT überein [11].



**Abb.5:** Foto des Schulaufbaus zur Messung des polaren magnetooptischen Kerr-Effekts.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass für eine qualitative und sogar quantitative Messung im Rahmen eines Praktikumsversuchs der verwendete Aufbau im Vergleich zu technisch deutlich komplexeren Systemen ähnliche Ergebnisse erzielt. Durch die Reduktion des Aufbaus ist es jedoch im Rahmen einer Lehrveranstaltung möglich den Fokus stärker auf die tatsächlich zu untersuchenden Effekte zu legen ohne den Einfluss komplexer Analysensysteme etc. thematisieren zu müssen.

Auf Grund dieser Ergebnisse wurde der Aufbau mit Blick auf die Verwendung in der Schule zusätzlich mit den dort vorhandenen Mitteln, d. h. ohne mikrooptische Bank konstruiert (vgl. Abb. 5). Die mit diesem Aufbau erzielten Ergebnisse unter Verwendung einer Photodiode ohne Tiefpassfilter bei Spannungsmessung entsprechen den vorherigen Messergebnissen (vgl. Abb.6). Auf Grund des stark reduzierten technischen Aufwands erscheint der Einsatz in der Schule somit theoretisch möglich. Im nachfolgenden Abschnitt soll eine mögliche Verwendung des Experiments in der Schule kurz erläutert werden.

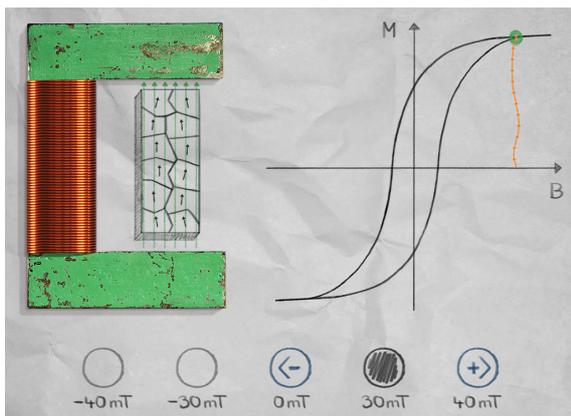


**Abb.6:** Messung der Hysterese einer Co/Pt-Probe (1 Photodiode, ohne Tiefpassfilter, Spannungsmessung) mit schulischen Mitteln.

### 5. Interaktive Modellierung des MOKE-Effekts

Die in Abschnitt 4 beschriebenen und diskutierten Ergebnisse zeigen, dass der magnetooptische Kerr-Effekt als Praktikumsversuch an Hochschulen mit stark reduziertem technischen Aufwand realisiert werden kann. Die Reduktion erscheint sinnvoll, da Durchführung und Verständnis somit stärker auf den eigentlichen Effekt bezogen werden können. Für das Verständnis der experimentellen Vorgänge wird somit kein vollständiges Wissen über die Funktion eines Lock-in-Verstärkers, photoelastischen Modulators, etc. vorausgesetzt. Weiterhin wird durch diese Variation die kognitive Belastung der Lernenden verringert.

Es zeigt sich weiterhin, dass die für den Versuch notwendigen technischen Voraussetzungen i. d. R. auch in der Schule erfüllt sind (vgl. Abb.5 und 6). An dieser Stelle stellt sich die Frage, inwiefern der physikalisch komplexe Effekt als Schulversuch sinnvoll eingesetzt werden kann.



**Abb.7:** Interaktives Widget zur Visualisierung der Magnetisierung als Vektorsumme der magnetischen Momente.

Die Messung einer ferromagnetischen Hysterese-Kurve mit Hilfe eines massiven Eisenkerns stellt einen gängigen Schulversuch dar [12]. In diesem Sinne wird das Experiment zur Messung der Hysterese massiver Eisenstücke verwendet und agiert

somit vollständig makroskopisch. Auf Grund der augenscheinlich geringen Schichtdicke der Co/Pt-Schicht (wenige Ångström), liefert das Experiment auf Grund der Dimensionen den Übergang zur mikroskopischen Ebene ferromagnetischer Phänomene. Auf dieser Ebene kann die Magnetisierung  $\vec{M}$  der Probe als Vektorsumme einzelner magnetischer Momente  $\vec{m}_i$  der Weißschen Bezirke (Domänen) betrachtet werden. Durch ein äußeres Magnetfeld werden die einzelnen magnetischen Momente immer stärker bis zur Sättigung ausgerichtet. Ohne äußeres Magnetfeld bleibt ein gewisser Teil der magnetischen Momente ausgerichtet, sodass der Ferromagnet eine Remanenzmagnetisierung aufweist. Somit lässt sich der Magnetisierungsvorgang entsprechend eines Domänenmodells (z. B. im Sinne des Eisen-Magnet-Modells [13]) auf Schulniveau beschreiben. Das Experiment stellt somit den Übergang von makroskopischer Magnetisierung zu den mikroskopischen magnetischen Momenten dar. In diesem Sinne lässt sich das Experiment einsetzen ohne die Vorgänge des magnetooptischen Kerr-Effekts zu explizieren. Um die Vorstellung mikroskopischer Magnetisierungen zu stützen wurde im Rahmen dieses Beitrags ein interaktives Widget erstellt, das die Ausrichtung dieser Momente in Abhängigkeit vom äußeren Magnetfeld visualisiert (vgl. Abb.7) [8].

### 6. Anmerkungen

Bei Interesse am Experiment zum Einsatz in der Schule können über das Institut für Didaktik der Physik der Westfälischen-Wilhelms-Universität Co/Pt-Proben zur Verfügung gestellt werden.

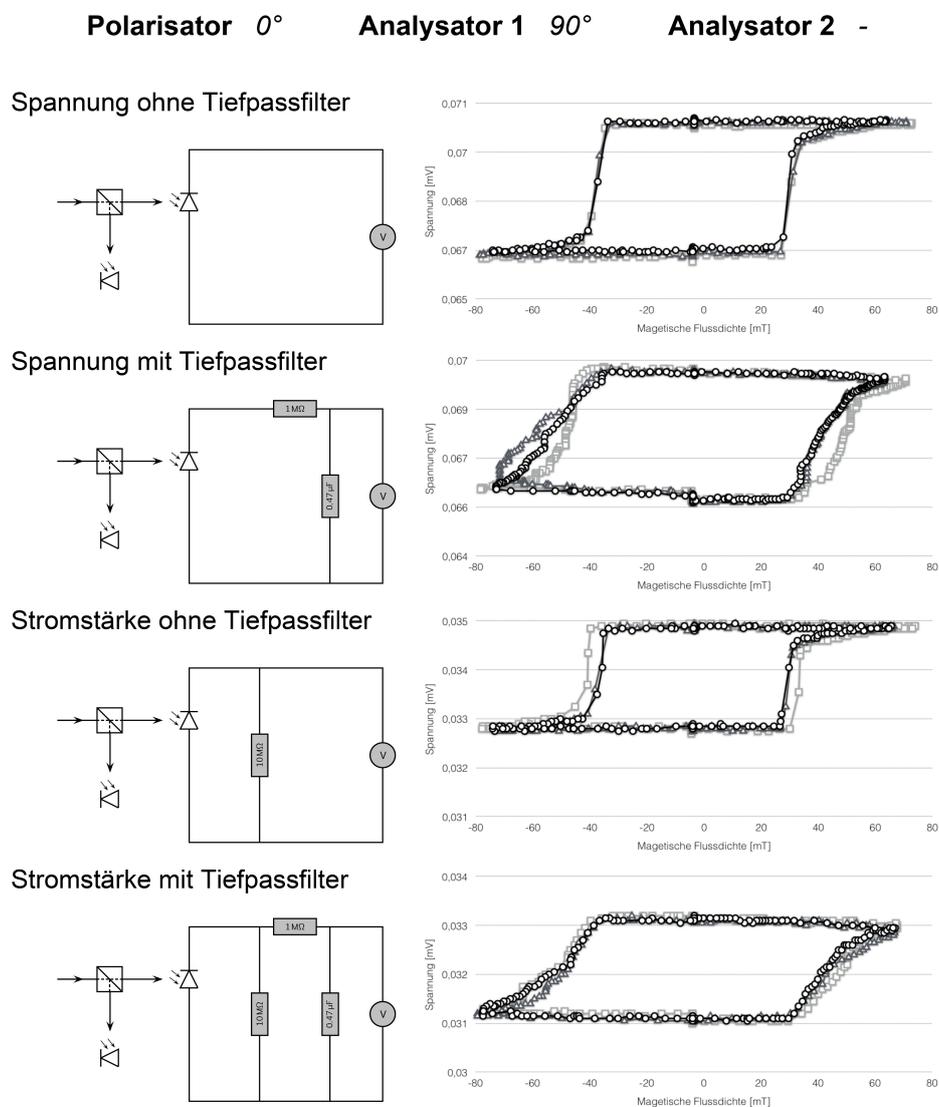
Das in Abschnitt 5 beschriebene Widget ist unter <http://www.uni-muenster.de/Physik.DP/> verfügbar.

### 7. Literatur

- [1] Jahns, J. (2001): *Photonik – Grundlagen, Komponenten und Systeme*. München: Oldenbourg.
- [2] Mansuripur, M. (1995): *The Physical Principles of Magneto-optical Recording*. Cambridge: University Press.
- [3] Kuch, W., Schäfer, R., Fischer, P. & Hillebrecht, F. U. (2015): *Magnetic Microscopy of Layered Structures*. Heidelberg: Springer.
- [4] F-Praktikumsversuch der Technischen Universität Kaiserslautern: <http://bit.ly/1PJ6VWK> (Stand: 3/2015).
- [5] F-Praktikumsversuch der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel: <http://bit.ly/1iEC96n> (Stand: 3/2015)
- [6] F-Praktikumsversuch des Karlsruher Instituts für Technologie: <http://bit.ly/1RbFCKj> (Stand: 3/2015)

- [7] F-Praktikumsversuch der RWTH Aachen: <http://bit.ly/1LXb2e5> (Stand: 3/2015)
- [8] Laumann, D. & Heusler, S. (2015): *Konzept für den Einsatz von Tablets zur multimedialen Visualisierung von Magnetismus*. In: MNU Themenspezial MINT – Unterricht mit Tablet-Computern lebendig gestalten, 3, 89-95.
- [9] Marutzky, M. (2006): *Elektronische Struktur von antiferromagnetischen UN und UPtGe Einkristallen aus optischer und magnetooptischer Spektroskopie*. Dissertation: Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig.
- [10] Argyres, P. N. (1955): *Theory of the Faraday and Kerr Effects in Ferromagnetics*. In: Physical Review, 97, 334-345.
- [11] Maat, S., Takano, K., Parkin, S. S. P. & Fullerton, E. E. (2001): *Perpendicular Exchange Bias of Co/Pt Multilayers*. In: Physical Review Letters 87, 8, 087202.
- [12] LD Didactic – Handblätter Physik P7.3.2.1, Aufzeichnung von Neu- und Hysteresekurve eines Ferromagneten: <http://www.ld-didactic.de/literatur/hb/d/p7/p7321cld.pdf> (Stand: 3/2015)
- [13] Rachel, A., Heran-Dörr, E., Waltner, C. & Wiesner, H. (2012): *Das Eisen-Magnet-Modell im Unterricht – Chancen und Grenzen*. In: Naturwissenschaft im Unterricht Physik/Chemie, 127, 10-15.

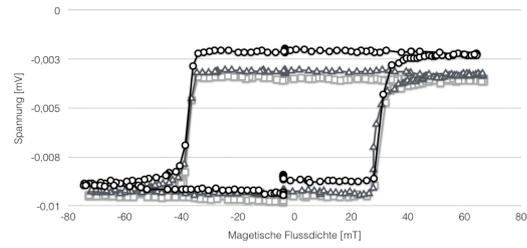
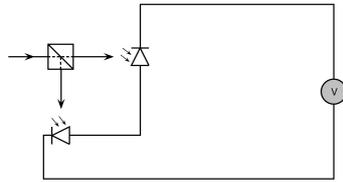
## 8. Appendix



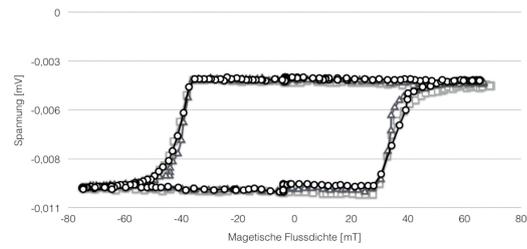
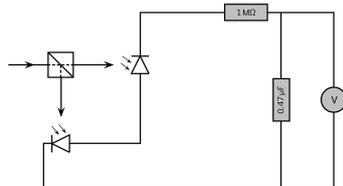
**Abb.8:** Messung der magnetischen Hysterese einer Co/Pt-Probe mit mikrooptischer Bank und einer Photodiode bei Variation des Aufbaus.

Polarisator  $45^\circ$     Analysator 1  $0^\circ$     Analysator 2  $90^\circ$

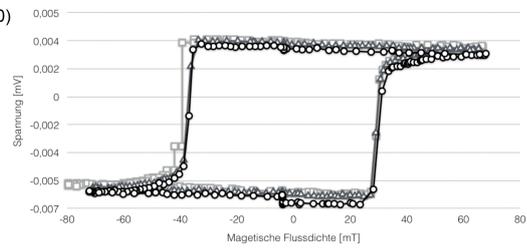
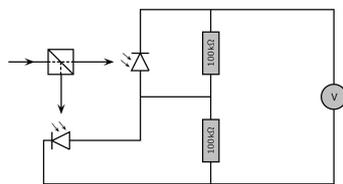
Spannung ohne Tiefpassfilter (x10)



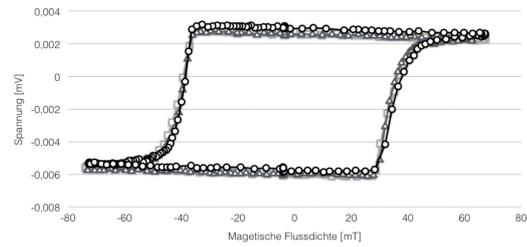
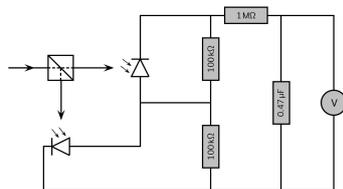
Spannung mit Tiefpassfilter (x10)



Stromstärke ohne Tiefpassfilter (x10)



Stromstärke mit Tiefpassfilter (x10)



**Abb.9:** Messung der magnetischen Hysterese einer Co/Pt-Probe mit mikrooptischer Bank und zwei Photodioden bei Variation des Aufbaus.