

UNIVERSITÄT STUTTGART

FORTGESCHRITTENEN PRAKTIKUM
SOMMERSEMESTER 2019

Magnetooptischer Kerr-Effekt

Gruppe: M20

Alexander Sattler

Michael Marquardt

Versuchsdatum: Montag 8. Juli 2019

Betreuer: Dr. Bruno Gompf

Inhaltsverzeichnis

1 Grundlagen	3
1.1 Magnetooptischer Kerr-Effekt	3
1.2 Optische Speichermedien	3
1.3 Stabilität Magnetooptischer Discs	5
1.4 Magnetisch Induzierte Super Auflösung (MSR)	5
2 Versuchsaufbau und Durchführung	7
2.1 Kalibrierung der Magnetfeldmessung	7
2.2 Temperaturabhängigkeit der Hysteresekurve	7
3 Auswertung	9
3.1 Kalibrierkurve	9
3.2 Temperaturabhängigkeit der Hysteresekurven	9
4 Zusammenfassung	16

1 Grundlagen

1.1 Magnetooptischer Kerr-Effekt

Der magneto-optische Kerr-Effekt (MOKE) beschreibt den Einfluss magnetischer Momente bei der Reflexion von Licht. Er manifestiert sich in einer Drehung/Änderung der Polarisation und Intensität des reflektierten Lichts. Man unterscheidet prinzipiell zwischen drei Arten des MOKE, polarer, longitudinaler und transversaler MOKE. Diese sind in Abbildung 1 gezeigt.

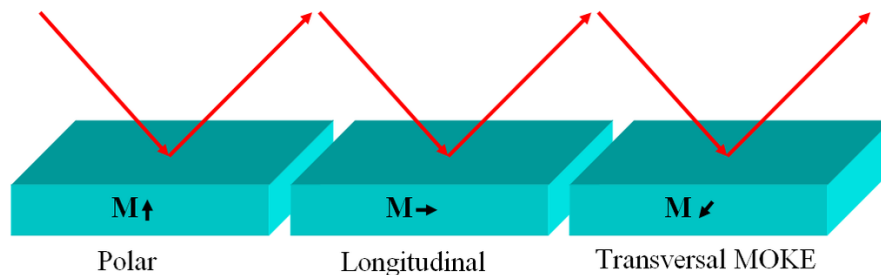


Abb. 1: Die drei MOKE Arten: polar, longitudinal und transversal. Der Pfeil beschreibt die Richtung der magnetischen Polarisierung M des Materials. Der blaue Pfeil zeigt Einfall und Reflexion des Lichts.

Bild von: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b2/MOKE.PNG/1024px-MOKE.PNG>

Für die Anwendung bei optischen Speichermedien ist der polare MOKE (PMOKE) interessant. Bei diesem ist die Magnetisierung senkrecht zur Oberfläche. Bei diesem Effekt wird linear polarisiertes in elliptisch polarisiertes Licht umgewandelt und die Hauptachse wird um einen Winkel θ gedreht. Erzeugt wird diese Drehung durch den sogenannten magnetisch zirkularen Dichroismus des Materials nach der Magnetisierung. Dies bedeutet, dass es für links und rechts zirkular polarisiertes Licht einen anderen Brechungsindex und Absorptionskoeffizienten hat. Die beiden zirkularen Polarisierungen erhalten daher eine andere Phasendifferenz und eine unterschiedliche Amplitude nach der Reflexion. [3]

1.2 Optische Speichermedien

In optischen Speichermedien sind die Informationen auf einem Datenträger gespeichert, von dem sie mit Hilfe eines Lasers ausgelesen werden.

Ein Beispiel ist die CD oder CD-ROM, wo die Information binär in Form von kleinen Buckeln auf einer reflektierenden Oberfläche gespeichert wird. Ein Laser (Wellenlänge $\lambda = 780 \text{ nm}$) rastert die Oberfläche der CD ab. Wie in Abbildung 2 auf der nächsten Seite gezeigt, trifft er dabei eine Fläche, die größer ist, als ein Buckel. Trifft er nur auf Land (das ist der Bereich wo kein Buckel ist) so haben alle reflektierten Strahlen die gleiche Phase. Trifft er aber auf einen Buckel, so legt der Laserstrahl eine kürzere Strecke

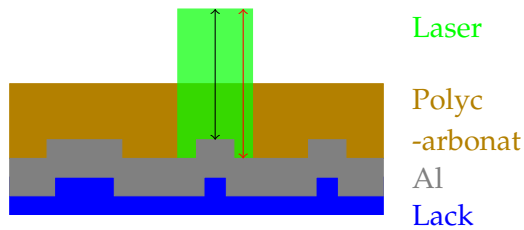


Abb. 2: Schematische Zeichnung einer CD. Die reflektierende Aluminium Oberfläche enthält kleine Buckel ($0.38\text{ }\mu\text{m}$ breit). Geschützt wird sie durch eine Lackschicht und eine Polycarbonat-Schicht. Der Laser erfasst ein Gebiet welches größer ist, als der Buckel.

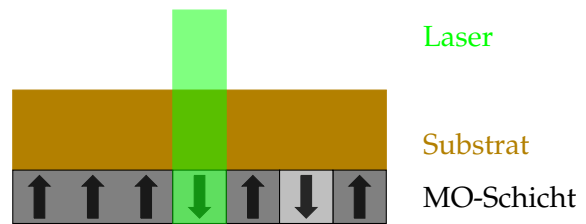


Abb. 3: Magneto Optical device (MO). Die Information ist in der MO-Schicht in Form von Spins gespeichert. Durch den Kerr-Effekt wird die Polarisation des reflektierten Lasers um den Winkel θ gedreht.

zurück. Diese ist so gestaltet, das die Phasendifferenz zwischen schwarzem und rotem Lichtweg $\lambda/2$ beträgt. Durch destruktive Interferenz wird die reflektierte Intensität verringert. [2]

Eine weitere Form von optischen Speichermedien sind Magnetooptische Discs (MO). Bei diesen wird die Information, wie in Abbildung 3 dargestellt, in der lokalen Magnetisierung gespeichert. Ausgelesen wird wiederum mit einem Laser, nur dass diesmal nicht Interferenz, sondern die Drehung der Polarisation um den Kerr-Winkel benutzt wird, um ein Bit zu speichern. Eine MO kann beschrieben werden, indem ein Laser benutzt wird, um eine bestimmte Speicherposition aufzuheizen. Dies senkt die magnetische Feldstärke, die nötig ist, um die Spins umzuklappen (Koerzitivfeldstärke). Durch anlegen eben jenes Magnetfeldes kann das Bit neu beschrieben werden. Der Aufbau der Materialschichten einer MO ist in Abbildung 4 gezeigt. [1]

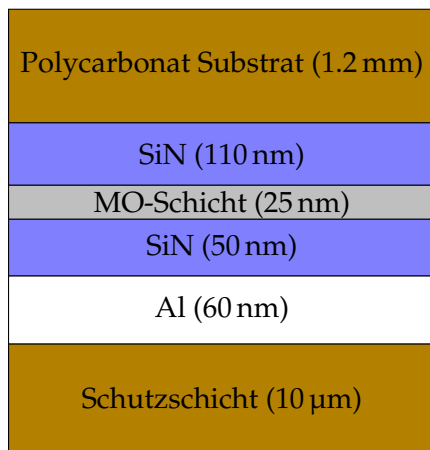


Abb. 4: Aufbau einer MO. Das Zentrum bildet eine sehr dünne magnetooptische Schicht, die von beiden Seiten durch SiN Schichten gegen Korrosion und Oxidation geschützt wird. Die MO-Schicht ist typischerweise aus TbFeCo. Das Signal wird durch die reflektive Aluminiumschicht verstärkt. Zusätzlich wird die Disc noch durch eine Polycarbonat Schicht vor Beschädigungen geschützt. [1]

1.3 Stabilität Magnetooptischer Discs

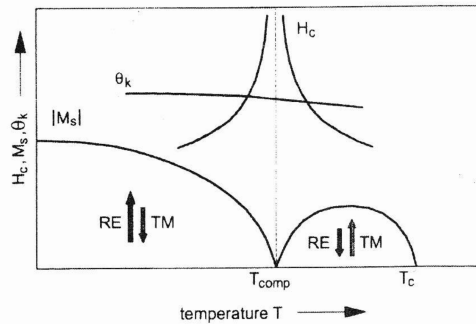


Abb. 5: Eigenschaften einer MO in Abhängigkeit der Temperatur T . RE steht für die seltenen Erde und TM für das Übergangsmetall. Dabei ist H_c die Koerzitivfeldstärke, M_s die totale Magnetisierung in Sätturierung und θ_K der Kerr-Winkel. Zusätzlich sind die Kompensationstemperatur T_{comp} und die Curie Temperatur T_c eingezeichnet. [1]

Wie funktioniert es eigentlich, dass eine MO bei Raumtemperatur nicht ummagnetisiert wird, wenn ein starker Magnet in die Nähe kommt? Die Antwort liegt im Material. Es besteht aus zwei magnetischen Metallen, eine seltene Erde (RE) und ein Übergangsmetall (TM), die zusammen ein ferrimagnetisches Gitter bilden. Zum Beispiel Tb und Fe. Bei der Kompensationstemperatur T_{comp} werden die Polarisierungen der beiden Metalle gleich stark und das Material antiferromagnetisch. Wie in Abbildung 5 zu sehen ist, divergiert für diese Temperatur die Koerzitivfeldstärke H_c und das Material lässt sich nicht mehr ummagnetisieren. Nahe der kritischen Temperatur verhält sich die Koerzitivfeldstärke wie

$$H_c = \frac{H_0 \cdot T}{T - T_{comp}}, \quad (1.1)$$

wobei H_0 ein Proportionalitätsfaktor ist. Die gesamte Magnetisierung lässt sich als die Summe zweier ferromagnetischer Magnetisierungskurven mit entgegengesetztem Vorzeichen und unterschiedlicher Curie Temperatur beschreiben. Wie zu erkennen ist, ändert sich der Kerr-Winkel etwa linear mit der Temperatur, aber nur schwach.

Aber wenn die gesamte Magnetisierung bei Raumtemperatur null ist, wie wird dann gemessen. Hier macht man sich zunutze, dass die Elektronenhüllen der seltenen Erde, die die Magnetisierung tragen, weiter innen liegen, also durch äußere Hüllen abgeschirmt werden. Das Licht wird also an nicht-magnetisierbaren Elektronenhüllen gestreut. Bei einem Übergangsmetall hingegen tragen die äußeren Hüllen die Magnetisierung; diese streuen das Licht und die Magnetisierung wird wahrgenommen. Der Laser sieht also nur das ferromagnetische Untergitter des Übergangsmetalls. [1]

1.4 Magnetisch Induzierte Super Auflösung (MSR)

Der Laser trifft ein bestimmtes Gebiet, was die Größe eines Bits definiert. Um die Auflösung zu erhöhen kann ein zweites magnetooptisches Material über die MO-Schicht gelegt werden, wie in Abbildung 6 auf der nächsten Seite gezeigt wird. Dieses wird durch den Laser aufgeheizt und dadurch magnetisierbar. Allerdings geschieht dies nur im Strahlzentrum, also auf einem Bereich, der kleiner ist, als der Laser. Dieser kleine

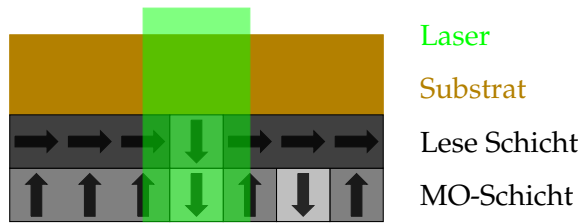


Abb. 6: Magnetisch induzierte super Auflösung (MSR). Zusätzlich zur MO-Schicht gibt es jetzt auch noch eine Lese Schicht. Diese gleicht sich nur im AStrahlzentrum der MO-Schicht an.

Bereich der Lese Schicht passt sich dann der Magnetisierung der MO-Schicht an und kann ausgelesen werden. [1]

2 Versuchsaufbau und Durchführung

2.1 Kalibrierung der Magnetfeldmessung

Die Spule wird mit einer bekannten Spannung betrieben. Um den Zusammenhang dieser Spannung mit der erzeugten Magnetfeldstärke zu bestimmen wird zunächst das Magnetfeld für mehrere Spannung mit einer Hall-Sonde anstelle der Probe in Abbildung 7 auf der nächsten Seite gemessen. Die Spannung kann dabei am Computer durchgefahen, und die Kurve aufgenommen werden.

2.2 Temperaturabhängigkeit der Hysteresekurve

In der eigentlichen Messung wird die Hysteresekurve für verschiedene Temperaturen aufgenommen. Zunächst wird die Hall-Sonde wieder entfernt, da diese nicht für höhere Temperaturen verwendet werden darf. Anschließend wird die MO als Probe eingebracht. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 7 geschildert. Um die Hysteresekurve aufzunehmen wird die Spannung, die die Spule treibt, kontinuierlich von 0 zum Maximum, dann zum Minimum und wieder zu 0 durchgefahen. Dies wird am Computer erledigt, und auch die resultierende Signalspannung wird am Computer direkt aufgetragen. Die Kalibrierungskurve wird vom Programm verwendet um die Spulen-Spannung direkt in eine Magnetfeldstärke umzurechnen. Aus der Hysteresekurve kann die Koerzitivfeldstärke, also die zur Ummagnetisierung nötige Feldstärke direkt abgelesen werden. Sie entspricht der halben Breite der Hysteresekurve.

Der Kerr-Winkel kann ebenfalls abgelesen werden. Für eine total in eine Richtung Magnetisierte MO ist die Signalstärke maximal oder minimal. Die halbe Differenz zwischen maximaler und minimaler Signalstärke kann also zu einem Kerr-Winkel umgerechnet werden. Hierfür ist es nötig, zu wissen, um wie stark sich die Signalspannung bei einer Drehung der Polarisation um einen bestimmten Winkel ändert. Dies kann ermittelt werden, indem man den Polarisationsfilter mithilfe einer Mikrometerschraube fein verstellt und auf die Änderung des Signals achtet. Es ist entscheidend, danach die Differenz-Verstärkung entweder nicht mehr zu ändern, oder eine Änderung mit dem Signal zu verrechnen.

Die Messung der Hysterese kann nun für verschiedene Temperaturen durchgeführt werden, indem die MO in der Spule aufgeheizt wird. Dies geschieht manuell, indem die Eingangsspannung der Heizung variiert wird. Ein Thermometer zeigt die Aktuelle Temperatur an.

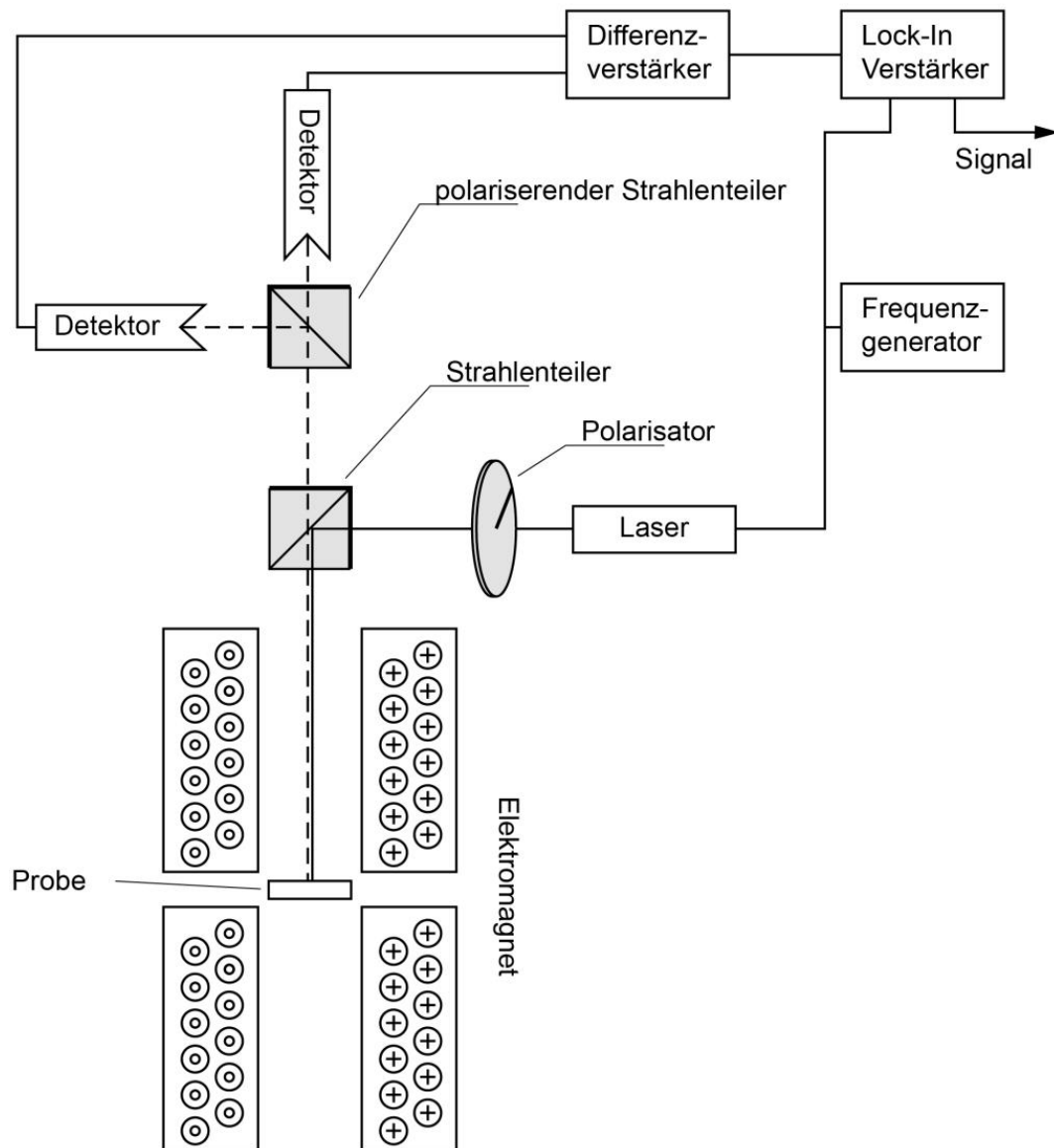


Abb. 7: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus. Die Probe, eine magnetooptische Speicherdisc (MO), befindet sich in einer Spule, in der ein Magnetfeld erzeugt werden kann. Mit einem Laser wird durch einen Polarisator auf die Probe geschossen, wo dieser reflektiert wird und, abhängig von der lokalen Magnetisierung, um den Kerrwinkel in der Polarisation gedreht wird. Der reflektierte Strahl wird am polarisierenden Strahlteiler in zwei orthogonale Polarisationen aufgeteilt, welche von separaten Detektoren erfasst werden. Die erzeugten Signale werden durch einen Differenzverstärker verstärkt und in einen Lock-In Verstärker geleitet. Dieser wirkt als schmalbandiger Filter, der nur die Frequenz durchlässt, mit der der Laser, über den Frequenzgenerator, moduliert ist. Dies ist nötig um das Rausche zu filtern, das durch den Differenzverstärker mit verstärkt wird. Das Signal aus dem Lock-In Verstärker wird an einem Computer ausgelesen. Der Polarisator sollte etwa so eingestellt sein, dass die beiden Detektoren etwa gleich starke Signale empfangen, wodurch das Verhältnis von Signaländerung zu Signal maximiert wird.

3 Auswertung

3.1 Kalibrierkurve

Vor der eigentlichen Messung der Hysteresekurven, soll die Kalibrierkurve für das Magnetfeld gemessen werden. Dazu wird mittels einer Hall-Sonde das Magnetfeld gemessen. Die gemessenen Daten sind in der Abbildung 8 dargestellt. Die gemessene Kalibrierkurve ist nicht linear. Die Ursache für die Nichtlinearität ist die Sättigung des Eisenkerns.

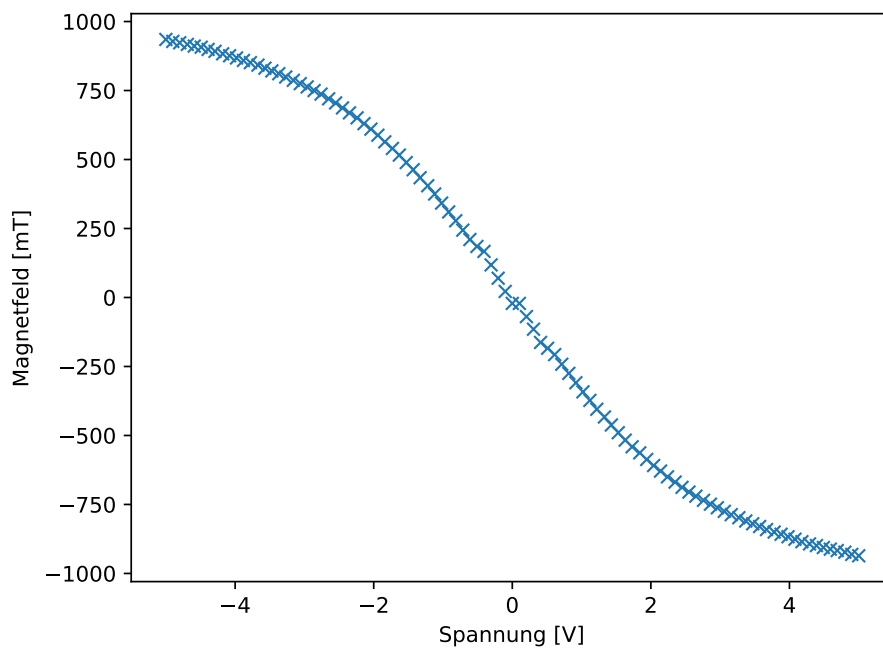


Abb. 8: Das Magnetfeld für unterschiedliche Spannungen an der Position der Probe innerhalb der Spule. Zu sehen ist ein nichtlinearer Zusammenhang der Kalibrierkurve.

3.2 Temperaturabhängigkeit der Hysteresekurven

Für die Berechnung des Kerr-Winkels wird der Zusammenhang zwischen der Drehung der Mikrometerschraube mit der gemessenen Spannung benötigt. Die gemessenen Werte sind in der Tabelle 1 dargestellt. Aus der Stellung der Mikrometerschraube kann der Winkel berechnet werden, wobei gilt $1\text{Tick} \hat{=} 0.024^\circ$. Gut erkennbar ist der erwartete lineare Zusammenhang zwischen Kerr-Winkel und Spannung. Ohne das ein Fit notwendig ist, kann aufgrund der Daten aus der Tabelle 1 eine Geradengleichung bestimmt werden. Es gilt für alle gemessenen Spannungen das Verhältnis

$$1\text{Tick} \hat{=} 0.01 \text{ V.} \quad (3.1)$$

Unter Berücksichtigung des Umrechnungsfaktors zwischen der Stellung der Mikrometerschraube und Winkel ϕ lautet die Geradengleichung

$$\phi = 2.4 \frac{^\circ}{V} \cdot U, \quad (3.2)$$

wobei U die Spannung ist.

Tab. 1: Zusammenhang zwischen Stellung der Mikrometerschraube des Polarisationsfilters und des Kerr-Winkels mit der Spannung.

Mikrometerschraube [ticks]	Kerr-Winkel [°]	Spannung [V]
0	0	0
10	0.24	0.1
20	0.48	0.2
30	0.72	0.3
40	0.96	0.4
50	1.2	0.5

Die unbearbeitete Hysteresekurve in der Abbildung 9 ist schräg und nicht gerade. Die Ursache dafür ist, dass in der Polymerschicht die sich auf der magnetooptischen Disk befindet es auch zu einer Polarisationsänderung kommt. Diese Polarisationsänderung gibt es zusätzlich zu der Polarisationsänderung durch den Kerr-Effekt. Dieser Einfluss der Polymerschicht wurde aus den Hysterekurven rausgerechnet. Die korrigierten Hysteresekurven für unterschiedliche Temperaturen sind in den Abbildungen 10 und 11 dargestellt.

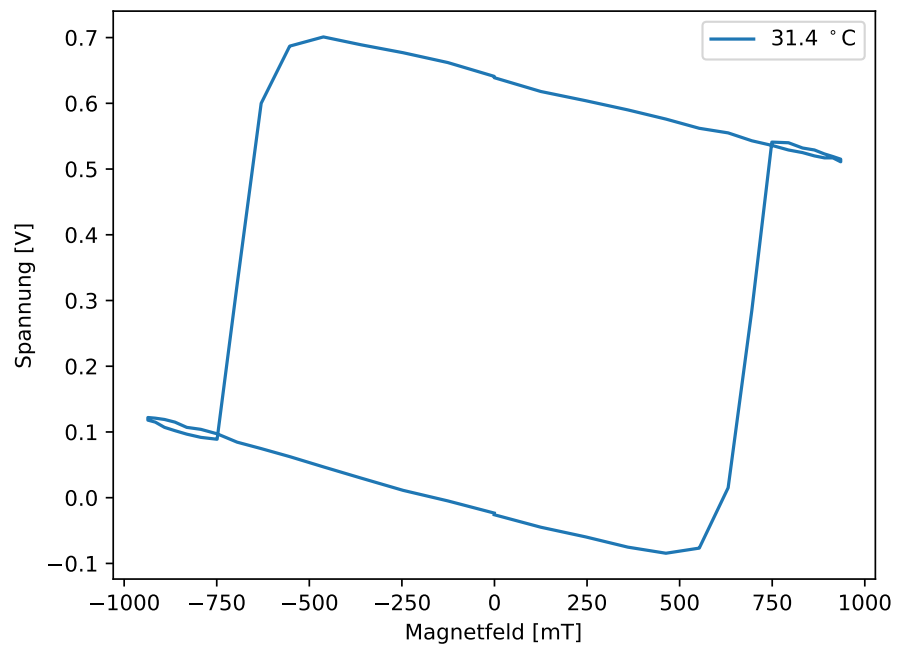
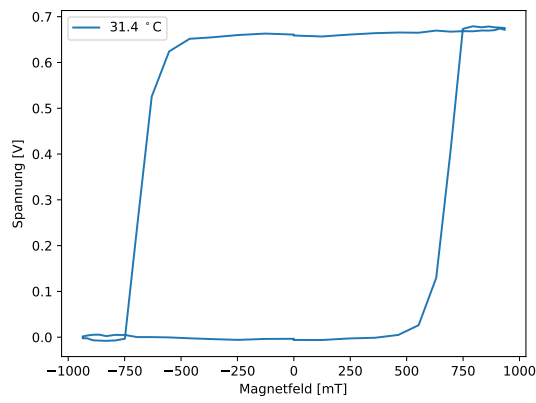
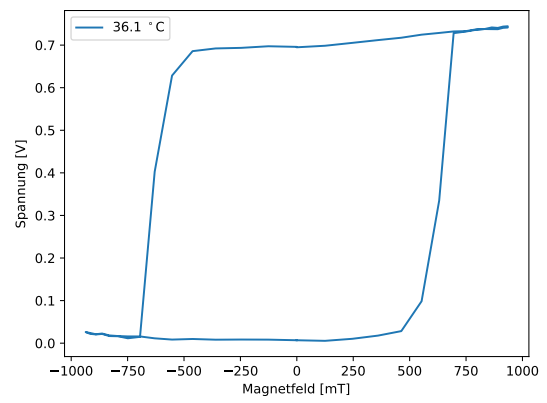


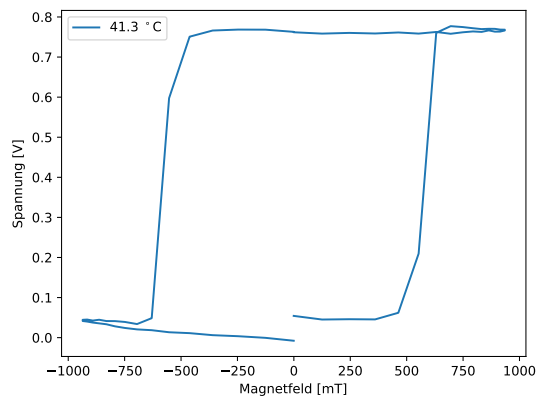
Abb. 9: Unbearbeitete Hysteresekurve bei einer Temperatur von 31,4 °C.



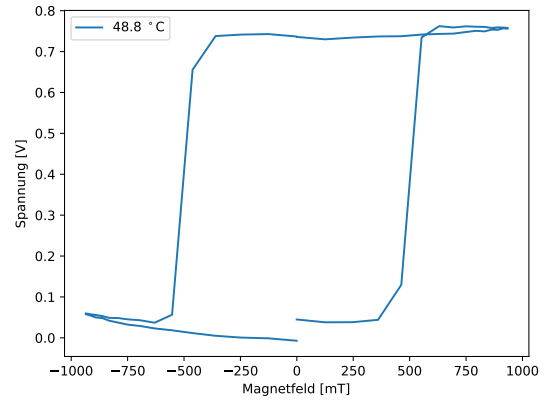
(a)



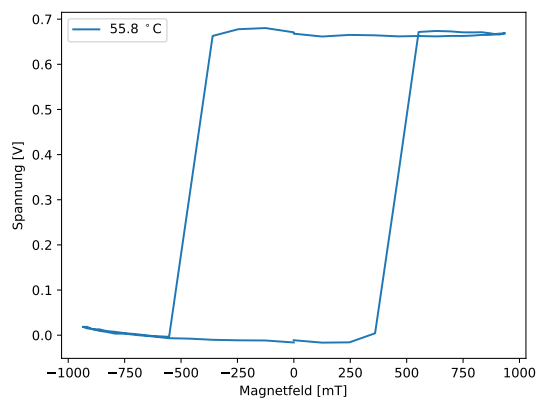
(b)



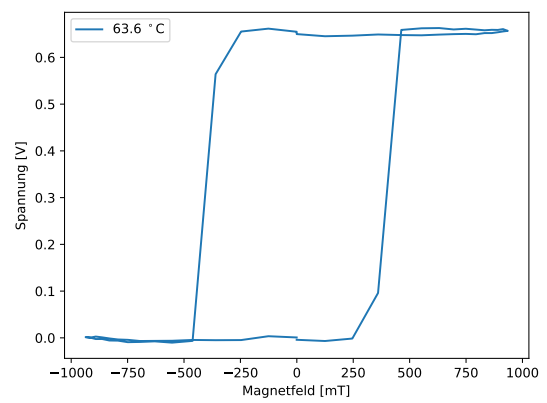
(c)



(d)

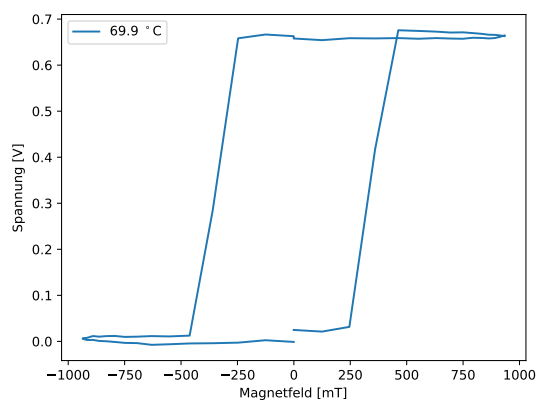


(e)

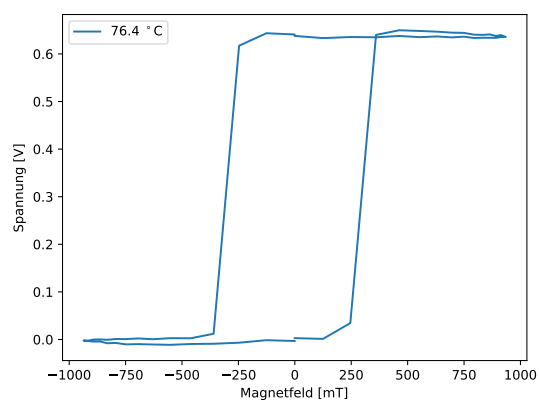


(f)

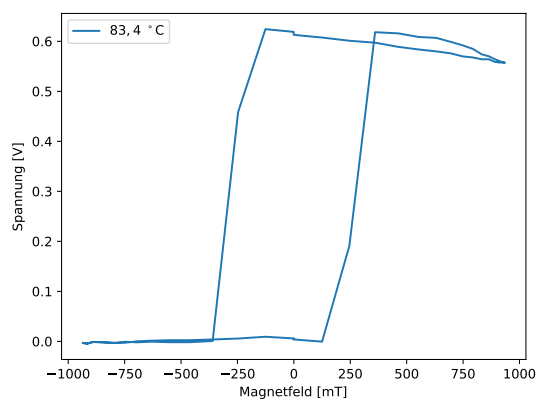
Abb. 10: Hysteresekurven für unterschiedliche Temperaturen.



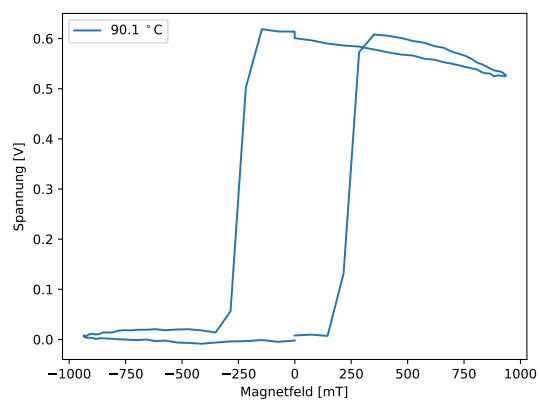
(a)



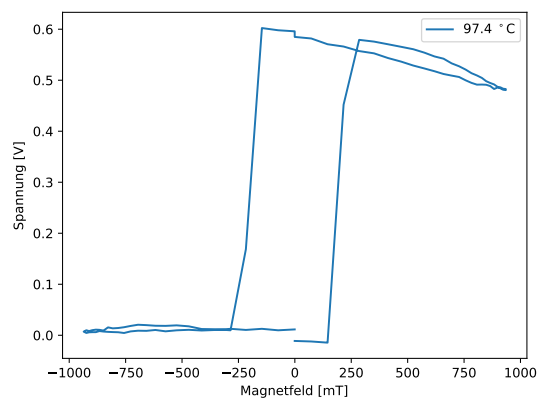
(b)



(c)



(d)



(e)

Abb. 11: Hysteresekurven für unterschiedliche Temperaturen.

Aus den Hysteresekurven kann der Kerr-Winkel für die Sättigung der Magnetisierung berechnet werden. Dazu wird aus den Hysteresekurven die Differenz zwischen minimaler und maximaler Spannung abgelesen. Die Hälfte dieser Differenz entspricht dem Kerr-Winkel. Die Spannung kann mittels der Gleichung (3.2) in den Winkel umgerechnet werden. Die berechneten Kerr-Winkel für unterschiedliche Temperaturen sind in der Abbildung 12 dargestellt. Wie zu erkennen ist, nimmt der Kerr-Winkel für steigende Temperaturen leicht ab, wie es aus Abbildung 5 auf Seite 5 erwartet wird.

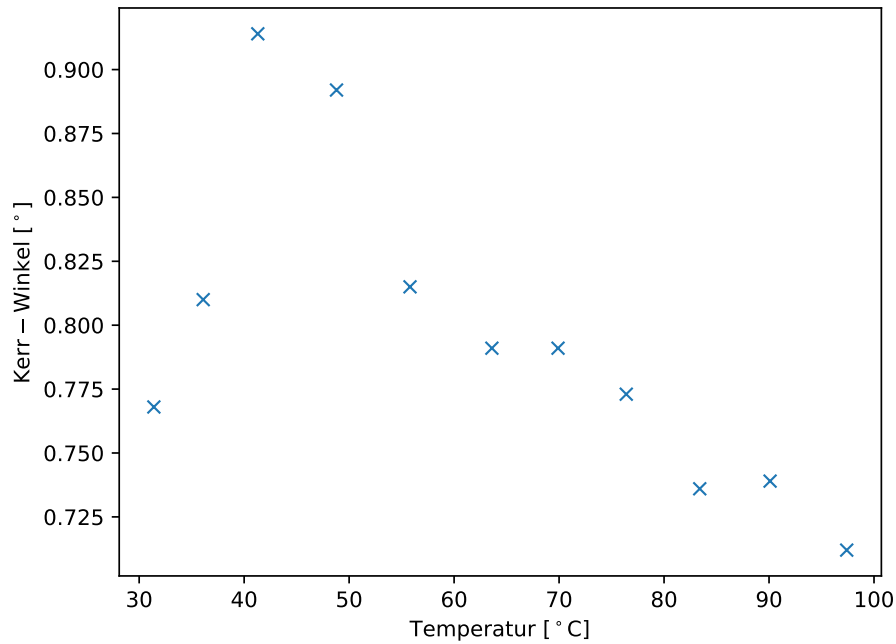


Abb. 12: Der Kerr-Winkel für die Sättigung der Magnetisierung für unterschiedliche Temperaturen ermittelt aus den Hysteresekurven.

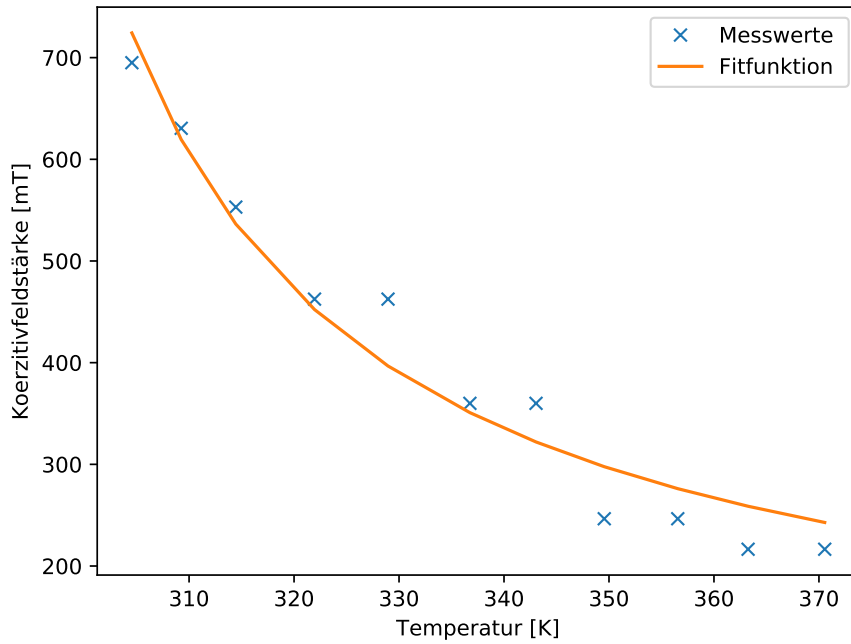


Abb. 13: Die aus den Hysteresekurven ermittelten Koerzitivfeldstärken für unterschiedliche Temperaturen und der Fit mit der Gleichung (3.3).

Die Koerzitivfeldstärke H_c , also die magnetische Feldstärke die für die vollständige Entmagnetisierung notwendig ist, kann den Hysterekurven entnommen werden. Die Koerzitivfeldstärke entspricht der Hälfte der Breite der Hysterekurven. Die Koerzitivfeldstärken in Abhängigkeit der Temperatur sind in der Abbildung 13 dargestellt. Aus den Koerzitivfeldstärken kann die Kompensationstemperatur T_{comp} bestimmt werden. Dazu muss die Funktion

$$H_c = \frac{H_0 \cdot T}{T - T_{\text{comp}}} \quad (3.3)$$

als Fitfunktion benutzt werden. Die Fitparameter sind

$$H_0 = 59.70 \pm 4.78 \text{ mT} \quad (3.4)$$

$$T_{\text{comp}} = 279.45 \pm 2.73 \text{ K}. \quad (3.5)$$

4 Zusammenfassung

In diesem Versuch sind die magnetischen Eigenschaften einer magnetooptischen Disk untersucht worden. Gemessen wurden Hysteresekurven für unterschiedliche Temperaturen. Die gemessene Kurven wurde um ihren Offset und den Einfluss der schützenden Polymerschicht korrigiert. Aus den gemessenen Daten ist die Koerzitivfeldstärke ermittelt worden, mit der die Kompensationstemperatur

$$T_{\text{comp}} = 279.45 \pm 2.73 \text{ K} \quad (4.1)$$

berechnet werden konnte. Der Kerr-Winkel nimmt bei steigenden Temperaturen leicht ab. Er bleibt dabei in einem Bereich von 0.7° bis 0.95° .

Literatur

- [1] K Röhl. „Magneto-optical Discs“. In: ().
- [2] Wikipedia. *Compact Disc*. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Compact_Disc.
- [3] Wikipedia. *Magnetooptischer Kerr-Effekt*. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Magnetooptischer_Kerr-Effekt.