

# Bachelorarbeit

## Entwicklung einer Software zur Analyse von magnetooptischen Daten

Fachbereich Physik



Robin Schubert

Abgabe: 15. September 2009



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Theorie des magnetooptischen KERR-Effekts</b>	<b>3</b>
2.1	Der magnetooptische KERR-Effekt . . . . .	3
2.2	Magnetisierungskurven . . . . .	5
2.3	Der Magnetisierungsvektor $\vec{M}$ . . . . .	6
2.3.1	MOKE-Arten . . . . .	7
2.3.2	Magnetische Richtungen und Anisotropie . . . . .	7
2.4	QMOKE . . . . .	9
2.5	Vektor-MOKE . . . . .	11
2.5.1	Die $m_x$ - und $m_z$ -Komponente . . . . .	11
2.5.2	Die $m_y$ -Komponente . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Experimentelle Gegebenheiten</b>	<b>13</b>
3.1	Der Versuchsaufbau . . . . .	13
3.2	Messtechniken . . . . .	14
3.3	Eisen auf Magnesiumoxid . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Die Auswertungssoftware</b>	<b>17</b>
4.1	Die Grafische Benutzeroberfläche (GUI) . . . . .	17
4.1.1	Die Klasse GraphCanvas . . . . .	18
4.1.2	Die Klasse DataTab . . . . .	19
4.1.3	Die Klasse MainFrame . . . . .	22
4.1.4	Die Menü-Funktionen . . . . .	23
4.2	Die „unsichtbaren“ Klassen . . . . .	24
4.2.1	Die Klasse Data . . . . .	25
4.2.2	Die Klasse IO . . . . .	25
4.3	Handhabung des Programms . . . . .	25
4.4	Auftretende Probleme . . . . .	25
4.4.1	Geschwindigkeit und Speicherverbrauch . . . . .	25
4.4.2	Arbeiten mit Referenzen . . . . .	26
<b>5</b>	<b>Auswertung eines Datensatzes am Beispiel „Eisen auf Magnesiumoxid“</b>	<b>27</b>
5.1	Linearer und quadratischer MOKE . . . . .	27
5.2	Richtige Verschiebung der Kurven . . . . .	29
5.3	Anisotropiebetrachtungen . . . . .	30
5.4	Vektor-MOKE . . . . .	34
5.4.1	Die Raumkomponenten des Magnetisierungsvektors . . . . .	34
5.4.2	Betrag und Ausrichtung des Magnetisierungsvektors . . . . .	36
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>39</b>
	<b>Literatur</b>	<b>40</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>41</b>



### **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet und zuvor noch keine Bachelorprüfung der Fachrichtung „Physik“ abgelegt habe.

Osnabrück, den 15. September 2009.



## 1 Einleitung

Ein Material zeigt unterschiedliche physikalische Eigenschaften, wenn es in einer dünnen Schicht vorliegt, im Vergleich zu dem gleichen Material in einem Festkörper.

Die Dünnschichttechnologie hat sich bereits als mächtiges Werkzeug etabliert, wie zum Beispiel in der Solar- und Photovoltaiktechnik. In der Optik werden dünne Schichten unter anderem dazu verwendet, das Reflexionsverhalten an Oberflächen gegenüber dem an massiven Körpern stark zu verändern.

Auch an magnetischen dünnen Schichten ist das Interesse groß, vor allem seit Entwicklung von magnetischen Speichermedien, zum Beispiel durch Nutzung des GMR<sup>1</sup>, der in Leseköpfen von Computerfestplatten zum Einsatz kommt, oder des TMR<sup>2</sup>, der für die Entwicklung des MRAM<sup>3</sup> eine große Rolle spielt [1] [2].

Magnetooptische Effekte sind bereits seit über 150 Jahren bekannt. Michael FARADAY beobachtete 1845 erstmals eine Drehung der Polarisation eines durch paramagnetisches Glas transmittierenden Lichtstrahls. Über dreißig Jahre später entdeckte John KERR diesen Effekt an polarisierten Lichtstrahlen, die von magnetischen Oberflächen reflektieren. Die Magnetisierung des Materials bewirkt die zu ihr proportionale Drehung der Polarisationsebene, genannt KERR-Drehung [3].

Der magnetooptische KERR-Effekt hat sich als geeignete Methode erwiesen, um solche magnetischen Schichten näher zu erforschen, da schon wenige Monolagen eines Materials diesen Effekt erzeugen. Form- und Kristallanisotropien eines Materials können unter anderem auf diese Weise sichtbar gemacht werden. Sie äußern sich in magnetisch „schweren“ und „leichten“ Richtungen.

In der Arbeitsgruppe „Dünne Schichten und Grenzflächen“ an der Universität Osnabrück werden seit 2007 verschiedene Materialien mit dem magnetooptischen KERR-Effekt untersucht.

Die Anisotropiebetrachtungen setzen die Auswertung vieler Magnetisierungskurven voraus. Dies nimmt viel Zeit in Anspruch, wenn es manuell gemacht wird, weshalb eine Software hilfreich ist, welche die Messdaten lesen, verändern, miteinander verrechnen und wieder abspeichern kann.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde ein Programm entwickelt, das den Prozess der Auswertung der aufgenommenen Daten erheblich vereinfachen und beschleunigen soll.

Dazu werden in Kapitel 2 die theoretischen Grundlagen des magnetooptischen KERR-Effekts erläutert, die für das Programm eine Rolle spielen. Kapitel 3 beschreibt den Versuchsaufbau, sowie einige Messtechniken und Materialien an der Universität Osnabrück. Die eigentliche Software, ihre Struktur und Funktionen werden in Kapitel 4 erklärt. Kapitel 5 führt die Ergebnisse einer Auswertung von Datensätzen vor, die an einer Eisen-Probe aufgenommen wurden.

Der letzte Abschnitt gibt neben einer Zusammenfassung noch einen Ausblick auf mögliche Erweiterungen und Änderungen des Programms.

---

<sup>1</sup>Giant Magneto Resistance

<sup>2</sup>Tunnel Magneto Resistance

<sup>3</sup>Magnetoresistive Random Access Memory



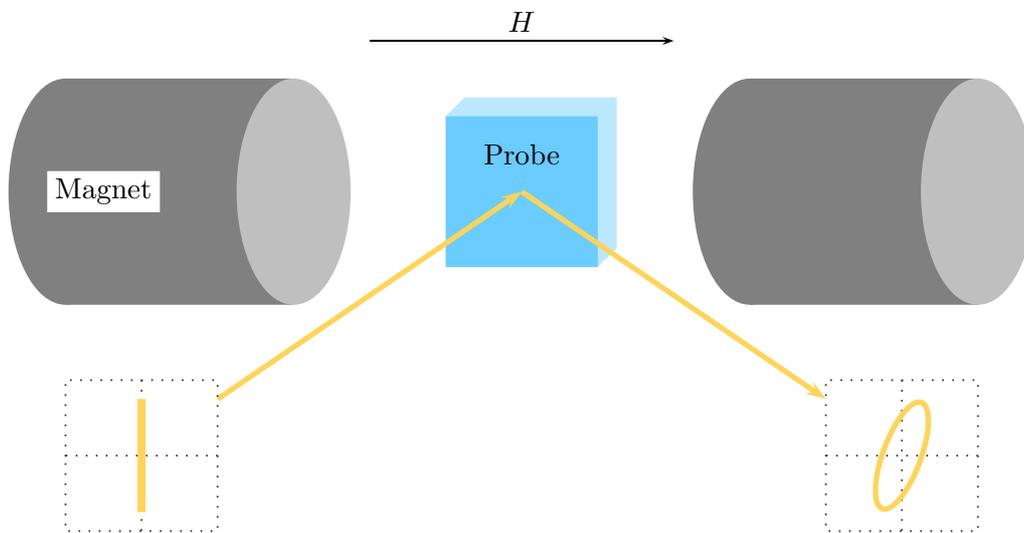
## 2 Theorie des magnetooptischen KERR-Effekts

In diesem Kapitel wird zunächst die Theorie des magnetooptischen KERR-Effekts erläutert. Weitere Schwerpunkte bilden der Magnetisierungsvektor, Magnetisierungskurven und magnetische Anisotropien.

### 2.1 Der magnetooptische KERR-Effekt

1876 entdeckte der schottische Physiker John KERR den magnetooptischen KERR-Effekt (MOKE). Wird linear polarisiertes Licht von einer magnetisierten Oberfläche reflektiert, so ist das reflektierte Licht elliptisch polarisiert und die Polarisations Ebene ist gedreht. Der Drehwinkel sowie die Elliptizität sind proportional zur Magnetisierung der Oberfläche.

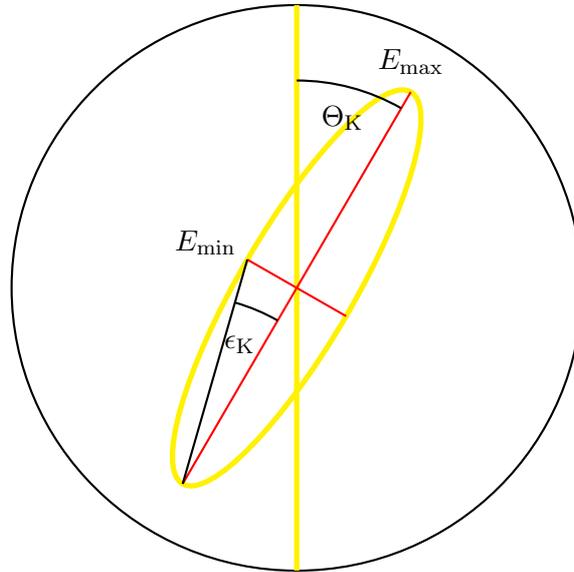
Abbildung 2.1 veranschaulicht den Effekt.



**Abbildung (2.1):** Skizze des magnetooptischen KERR-Effekts. Wird ein linear polarisierter Lichtstrahl an einer magnetisierten Oberfläche reflektiert, dreht sich die Polarisations Ebene des Lichts und es bildet sich eine elliptische Polarisation. Beides ist proportional zur Magnetisierung der Probe.

Die zwei bedeutenden Größen bei der Untersuchung dieses Effekts sind der KERR-Winkel  $\Theta_K$  sowie die KERR-Elliptizität  $e_K$ , die in Abbildung 2.2 dargestellt werden.

Der Grund für das Auftreten dieses Effektes liegt in unterschiedlichen komplexen Brechungsindizes eines magnetisierten Materials für parallel und senkrecht zur Einfallsebene polarisiertes Licht. Ein komplexer Brechungsindex setzt sich unter anderem aus Brechungsindex und Absorptionskoeffizient zusammen. Ein Unterschied der Indizes und Koeffizienten bewirkt, dass sich Amplitude und Phase der senkrecht und parallel polarisierten Licht-Komponenten nicht in gleicher Weise ändern. Für linear polarisiertes Licht sind KERR-Drehung und KERR-Elliptizität die Folgen.



**Abbildung (2.2):** Einfallender linear polarisierter und reflektierter elliptisch polarisierter Lichtstrahl. Differenz zwischen den Polarisationswinkeln des einfallenden und reflektierten Lichts, KERR-Winkel:  $\Theta_K$ ; KERR-Elliptizität:  $e_K = \frac{E_{\min}}{E_{\max}}$ ; Elliptizitätswinkel:  $\epsilon_K = \tan(e_K)$ .

Die Reflexionskoeffizienten können nach [4] durch JONES-Matrizen dargestellt werden, als

$$\hat{R} = \begin{pmatrix} r_{ss} & r_{sp} \\ r_{ps} & r_{pp} \end{pmatrix} . \quad (2.1)$$

Der KERR-Winkel lässt sich für parallel und senkrecht zur Einfallsebene polarisiertes Licht aus den Reflexionskoeffizienten berechnen zu

$$\Phi_K^s = -\frac{r_{ps}}{r_{ss}} \quad (2.2)$$

$$\Phi_K^p = \frac{r_{sp}}{r_{pp}} . \quad (2.3)$$

$\Phi_K$  ist dabei der komplexe KERR-Winkel, nach [5] eine Größe die KERR-Winkel und KERR-Elliptizität zusammenfasst zu

$$\Phi_K = \Theta_K + ie_K . \quad (2.4)$$

Die Elemente der Reflexionsmatrix 2.1 werden durch die Nichtdiagonalelemente des Dielektrizitätstensors

$$\hat{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

bestimmt [6]. Die Existenz für Nichtdiagonalelemente im Dielektrizitätstensors setzt eine Magnetisierung des Materials voraus. Diese Elemente sind dann proportional zum magnetischen Fluss  $\vec{B}$  der Probe [7].

Der Zusammenhang zwischen Magnetisierung  $\vec{M}$  und der magnetischen Flussdichte ist gegeben durch

$$\begin{aligned}\vec{B} &= \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \\ &= \mu_0(\vec{H} + \chi\vec{H}) \\ &= \mu_0(1 + \chi)\vec{H} \quad .\end{aligned}$$

mit  $\vec{H}$ : magnetische Feldstärke;  $\chi$ : magnetische Suszeptibilität;  $\mu_0$ : magnetische Feldkonstante.

Für Ferromagneten ist die magnetische Suszeptibilität so hoch, dass  $B \propto M$  angenommen werden kann. Es ergibt sich eine Proportionalitätskette

$$\Phi_K = \frac{r_{\text{sp}}}{r_{\text{pp}}} \left( \text{bzw.} - \frac{r_{\text{ps}}}{r_{\text{ss}}} \right) \propto \epsilon_{ij} \propto \vec{B} \propto \vec{M} \quad , \quad (2.6)$$

mit  $i \neq j$ . Mit Hilfe des komplexen KERR-Winkels können wir also qualitativ den Magnetisierungsvektor einer Probe darstellen. Absolute Werte können dagegen nicht direkt bestimmt werden.

## 2.2 Magnetisierungskurven

Innerhalb von Ferromagneten existieren magnetische Dipole. Eine aneinanderliegende Gruppe von magnetischen Dipolen, deren magnetische Momente in dieselbe Raumrichtung zeigen, nennt man magnetische Domäne. Die vektorielle Summe der magnetischen Momente der einzelnen Domänen bildet den Magnetisierungsvektor des Materials. Mit Hilfe von Magnetisierungskurven lässt sich qualitativ darstellen, wie groß der Anteil des Magnetisierungsvektors in eine bestimmte Raumrichtung ist.

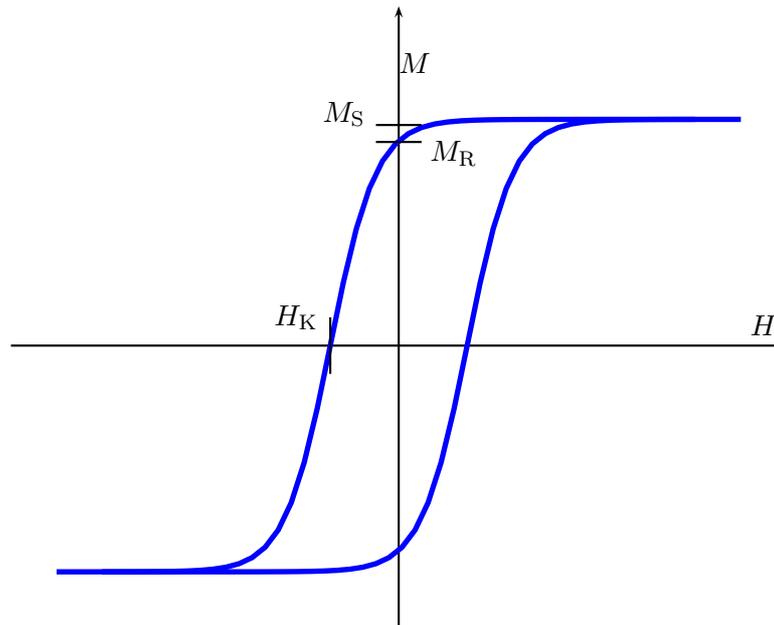
Magnetisierungskurven nennt man im Allgemeinen die magnetische Flussdichte aufgetragen gegen Magnetfeldstärken. Für ferro- und ferrimagnetische Materialien ergeben sich Hystereseschleifen, das heißt die Magnetisierung des Materials ist nicht nur abhängig von der äußeren Magnetfeldstärke, sondern auch von seiner vorherigen Magnetisierung. Abbildung 2.3 zeigt einen möglichen Verlauf einer Magnetisierungskurve. Anstatt der magnetischen Flussdichte  $\vec{B}$  wurde in dieser Abbildung der Magnetisierungsvektor  $\vec{M}$  aufgetragen, der proportional zu  $\vec{B}$  ist.

Damit eine vollständige Magnetisierungskurve aufgenommen werden kann, beginnt die Messung mit einer Magnetfeldstärke  $H$ , die groß genug ist, um die Probe in magnetische Sättigung zu bringen. Das Magnetfeld wird während der Messung langsam reduziert. Erreicht es den Nullwert, wird es in entgegengesetzter Richtung langsam wieder erhöht, bis die entgegengesetzte Sättigung erreicht ist. Die Prozedur wird in entgegengesetzter Richtung wiederholt. Die Magnetisierungskurve ist vollständig, wenn das Magnetfeld seine ursprüngliche Stärke und Richtung wieder angenommen hat.

Die wichtigsten Merkmale einer Magnetisierungskurve sind:

### Sättigung

Bedingt durch die Magnetfeldstärke  $H$  drehen sich die magnetischen Dipole der Probe in eine Ausrichtung parallel zu  $H$ . Ein Material befindet sich in magnetischer Sättigung, wenn all seine magnetischen Dipole in dieselbe Richtung weisen. In diesem Zustand existiert im Idealfall nur eine große Domäne.



**Abbildung (2.3):** Beispiel einer Magnetisierungskurve.  $M_S$ : Magnetische Sättigung;  $M_R$ : Remanenz (Restmagnetisierung);  $H_K$ : Koerzitivfeldstärke;  $H$ : Magnetfeldstärke;  $M$ : Magnetisierungsanteil der Probe in gemessener Raumrichtung.

### Remanenz

Wird nach Erreichen der Sättigung das äußere Magnetfeld wieder abgeschaltet, so wird der Magnetisierungsvektor nicht mehr in die vorgegebene Raumrichtung gezwungen. In einer Magnetisierungskurve sehen wir immer nur Anteile des Magnetisierungsvektors in bestimmte Richtungen. Eine Abnahme des Signals kann also entweder bedeuten, dass die große magnetische Domäne, die während der Sättigung existierte, wieder in kleinere Domänen zerfallen ist, oder aber dass sich der Magnetisierungsvektor aus der gemessenen Richtung herausdreht.

Die Remanenz ist die gemessene Restmagnetisierung ohne angelegtes Magnetfeld.

### Koerzitivfeldstärke

Koerzitivfeldstärke nennt man die Feldstärke, die ein äußeres Magnetfeld haben muss, damit die Magnetisierung der Probe in der gemessenen Richtung vollständig verschwindet. Die magnetischen Dipole haben Domänen gebildet, deren vektorielle Summe für diese Richtung null ergibt.

## 2.3 Der Magnetisierungsvektor $\vec{M}$

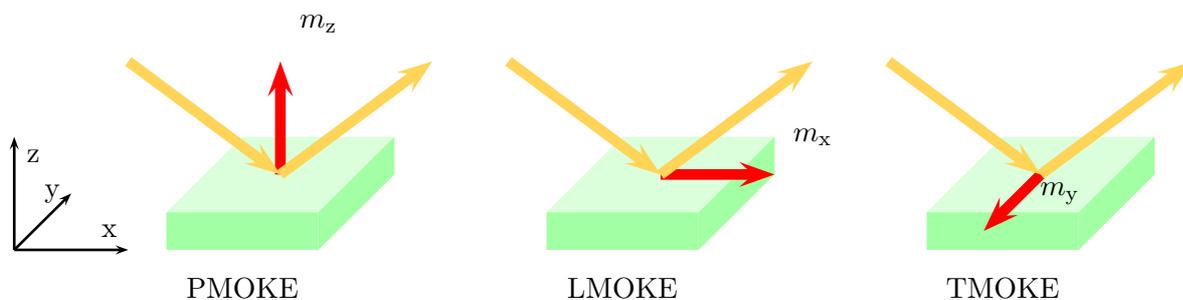
Die Magnetisierung einer Probe kann als Vektor aufgefasst werden, der in die drei Raumkomponenten  $m_x$ ,  $m_y$  und  $m_z$  aufgeteilt werden kann. Jede dieser Komponenten verursacht einen anderen MOKE.

### 2.3.1 MOKE-Arten

Man unterscheidet ursprünglich drei Arten des MOKE: polarer-, linearer- und transversaler MOKE (auch genannt PMOKE, LMOKE und TMOKE). Die unterschiedlichen Effekte sind abhängig von der Ausrichtung der Magnetisierung zur Einfallsebene des Lichts und zur Probenoberfläche.

Wir definieren unser Koordinatensystem so, dass die  $m_z$ -Komponente des Magnetisierungsvektors  $\vec{M}$  senkrecht zur Probenoberfläche liegt (*out-of-plane*).  $m_x$  und  $m_y$  bilden die Richtungen parallel zur Probenoberfläche (*in-plane*), wobei  $m_x$  parallel zum äußeren Magnetfeld definiert wird.  $m_y$  steht senkrecht zur Richtung des angelegten Magnetfeldes.

Abb. 2.4 zeigt, welchen Effekt die Komponenten des Magnetisierungsvektors hervorrufen.



**Abbildung (2.4):** Die verschiedenen MOKE-Arten. Der PMOKE (polarer MOKE) wird verursacht durch die Komponente des Magnetisierungsvektors parallel zur Einfallsebene des Lichts und senkrecht zur Probenoberfläche. LMOKE (longitudinaler MOKE) ist der Effekt, den die Komponente parallel zur Einfallsebene des Lichts und parallel zur Probenoberfläche bewirkt. TMOKE (transversaler MOKE) ist der Effekt der Magnetisierungsvektorkomponente senkrecht zur Einfallsebene des Lichts. TMOKE verursacht weder eine KERR-Drehung noch eine KERR-Elliptizität, sondern lediglich eine Intensitätsänderung des Lichts.

Da TMOKE keine KERR-Drehung und KERR-Elliptizität zur Folge hat, werden immer nur zwei Komponenten des Magnetisierungsvektors bei einer Messung erfasst. Die Signale dieser zwei Komponenten überlagern sich und müssen getrennt werden.

### 2.3.2 Magnetische Richtungen und Anisotropie

Je nach Form, Beschaffenheit und Kristallstruktur besitzen Materialien eine magnetische Vorzugsrichtung. Diese wird bestimmt durch die freie Energie  $F$ , denn der Magnetisierungsvektor  $\vec{M}$  wird sich in die für ihn energetisch günstigste Richtung ausrichten. Für isotrope Materialien gilt

$$F = -\vec{B} \cdot \vec{M} \quad . \quad (2.7)$$

Die freie Energie wäre also am kleinsten, wenn  $\vec{M}$  sich parallel zu  $\vec{B}$  ausrichtete. Für magnetisch anisotrope Materialien muss die Gleichung 2.7 durch die Anisotropiebeiträge  $F_i$  erweitert werden zu

$$F = -\vec{B} \cdot \vec{M} + \sum_i F_i \quad . \quad (2.8)$$

Je nach Ausrichtung des Materials zum Magnetfeld variieren die Anisotropiebeiträge, und der Magnetisierungsvektor kann unterschiedliche Richtungen annehmen. Es existieren unterschiedliche Ursachen für Anisotropien. Zwei dieser Ursachen sind für uns von Bedeutung:

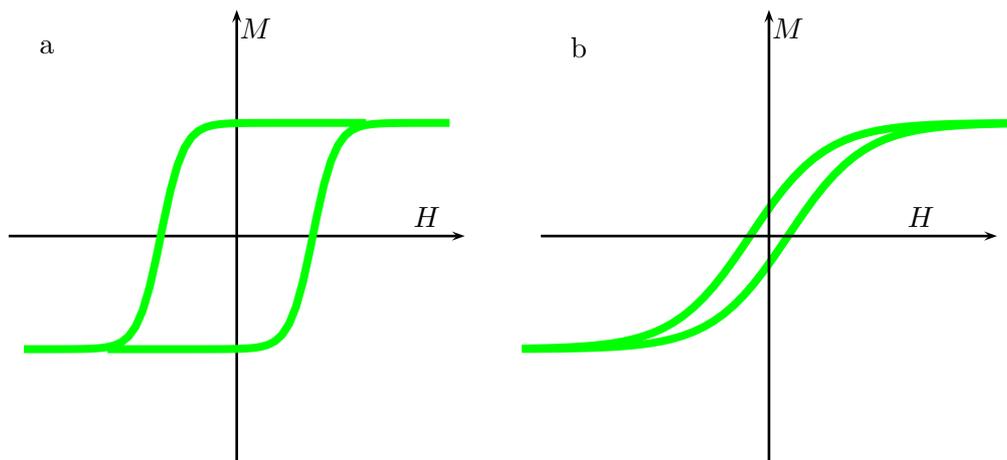
### Kristallanisotropie

Die Anisotropiebeiträge sind abhängig von der Form des Kristallgitters eines Materials. So sind beispielsweise für kubisches Eisen die Anisotropiebeiträge am kleinsten in Richtungen entlang der Kristallachsen [100], [010] und [001].

### Formanisotropie

Die Anisotropiebeiträge sind kleiner für Richtungen, die entlang der größten räumlichen Ausdehnung des Materials verlaufen. Für dünne Schichten wären diese Beiträge also am größten in Richtung senkrecht zur Schicht, klein für *in-plane* Richtungen.

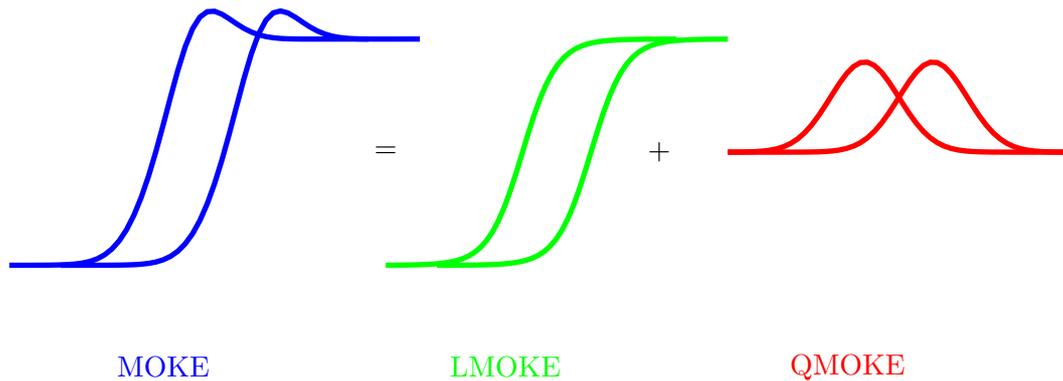
Man spricht von einer magnetisch „leichten“ Richtung, wenn die Anisotropiebeiträge am kleinsten sind und der Magnetisierungsvektor bevorzugt in diese Richtungen zeigt. In magnetisch „schweren“ Richtungen sind dagegen die Anisotropiebeiträge groß, so dass ein Magnetfeld angelegt werden muss, um den Magnetisierungsvektor in diese Richtung zu bewegen.



**Abbildung (2.5):** Darstellung von magnetisch leichter und schwerer Richtung. In magnetisch leichter Richtung (a) ist die Probe schnell in Sättigung gebracht. Die Remanenz und das Koerzitivfeld sind groß. In magnetisch schwerer Richtung (b) dagegen ist die Sättigung nur mit einer größeren Magnetfeldstärke zu erreichen. Remanenz und Koerzitivfeld sind klein.

Durch wiederholtes Aufnehmen von Magnetisierungskurven in unterschiedlichen Richtungen der Probe lassen sich die magnetisch leichten und schweren Richtungen detektieren. Abbildung 2.5 zeigt, wie sich Magnetisierungskurven magnetisch „leichter“ und „schwerer“ Richtungen unterscheiden können.

## 2.4 QMOKE



**Abbildung (2.6):** Im MOKE-Signal können sich linear von der Magnetisierung abhängige Anteile (LMOKE) mit quadratisch von ihr abhängigen Anteilen (QMOKE) überlagern.

Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, sollte eine Probe in einem genügend großen Magnetfeld in Sättigung sein. Vorausgesetzt, das Magnetfeld liegt parallel zur Einfallsebene des Lichtes, ist die Magnetisierung in der gemessenen Richtung dann maximal. Trotzdem werden Kurven aufgenommen wie in Abbildung 2.6, die Magnetisierungspicks höher als die Sättigung anzeigen.

Hier überlagern sich lineare und quadratische MOKE-Signale. Der lineare Anteil des MOKE-Signals wird im Folgenden auch LMOKE genannt, ist aber nicht zu verwechseln mit dem longitudinalen MOKE.

Der MOKE ist nicht nur linear von der Magnetisierung der Probe abhängig, sondern auch mit Termen zweiter und höherer Ordnungen. Dies lässt sich anhand des Dielektrizitätstensors zeigen.

Der Dielektrizitätstensor  $\hat{\epsilon}$  eines Materials bestimmt die Elemente der Reflektionsmatrix. Für magnetische Materialien sind die Nichtdiagonalelemente dieses Tensors ungleich null, und haben direkten Einfluss auf den KERR-Winkel  $\Theta_K$ . Die Form des Dielektrizitätstensors ist unterschiedlich, je nach Kristallstruktur des Materials. Die folgenden Abschnitte werden sich auf kubische Kristallstrukturen beschränken, da die Auswertung aus Kapitel 5 mit kubischem Eisen vorgenommen wurde. Da wir mit dünnen Schichten arbeiten, kann außerdem die  $m_z$ -Komponente des Magnetisierungsvektors auf Grund der Formanisotropie größtenteils vernachlässigt werden.

Der vereinfachte Dielektrizitätstensor für kubische Kristallgitter unter Vernachlässigung der  $m_z$ -Komponente lautet nach [6]

$$\hat{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_{11}^{(0)} + G_{11}m_x^2 + G_{12}m_y^2 & 2G_{44}m_xm_y & -Km_y \\ 2G_{44}m_xm_y & \epsilon_{11}^{(0)} + G_{12}m_x^2 + G_{11}m_y^2 & Km_x \\ Km_y & -Km_x & \epsilon_{11}^{(0)} + G_{12}m_x^2 + G_{12}m_y^2 \end{pmatrix}. \quad (2.9)$$

Dabei sind  $\epsilon_{11}^{(0)}$  Elemente aus dem Dielektrizitätsvektor nullter Ordnung.  $G$  und  $K$  sind unterschiedliche Koeffizienten für lineare und quadratische Anteile. Eine ausführliche Herleitung des Tensors befindet sich in [6].

Der Dielektrizitätstensor enthält bereits Terme zweiter Ordnung. Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, kann der komplexe KERR-Winkel  $\Phi_K$  durch die Elemente des Dielektrizitätstensors beschrieben werden. Um die Abhängigkeit zu den Elementen des Dielektrizitätstensors zu berechnen reicht der JONES-Formalismus nicht aus. Diese Abhängigkeit kann jedoch unter Verwendung des 4x4 Matrix Formalismus berechnet werden [8] [9] [10]. Die Gleichungen 2.2 und 2.3 erweitern sich zu

$$\Phi_K^s = -\frac{r_{ps}}{r_{ss}} = A_s \left( \epsilon_{21} - \frac{\epsilon_{13}\epsilon_{23}}{\epsilon_{11}^{(0)}} \right) + B_s \epsilon_{23} \quad (2.10)$$

$$\text{und } \Phi_K^p = \frac{r_{sp}}{r_{pp}} = -A_p \left( \epsilon_{12} - \frac{\epsilon_{32}\epsilon_{31}}{\epsilon_{11}^{(0)}} \right) + B_p \epsilon_{32}. \quad (2.11)$$

Dabei sind  $A$  und  $B$  Faktoren abhängig vom Einfallswinkel des Lichts.

Einsetzen der Elemente des Tensors 2.9 in die Gleichungen 2.10 und 2.11 liefert, unter Berücksichtigung des Drehwinkels der Probe, für die komplexen KERR-Winkel

$$\begin{aligned} \Phi_K^{s/p} = & \mp B_{s/p} Km_x \\ & \pm A_{s/p} \left[ 2G_{44} + \frac{\Delta G}{2} \left( 1 - \cos(4\alpha) + \frac{K^2}{\epsilon_{11}^{(0)}} \right) \right] m_x m_y \\ & \mp A_{s/p} \frac{\Delta G}{4} \sin(4\alpha) (m_x^2 - m_y^2). \end{aligned} \quad (2.12)$$

In den KERR-Winkel gehen Terme von  $m_x$  und  $m_y$  zweiter Ordnung ein. Diese sind verantwortlich für den quadratischen Anteil im MOKE.  $\Delta G$  bildet hier die Anisotropiekonstante des Materials. Entstehende Terme dritter und höherer Ordnungen können vernachlässigt werden, da sie klein gegenüber den Termen erster und zweiter Ordnung sind.

Um linearen und quadratischen Anteil des MOKE-Signals voneinander zu trennen, nutzt man den Umstand, dass der lineare Anteil ursprungssymmetrisch sein muss, was aus Gleichung 2.12 hervor geht. Durch das Verrechnen beider Laufrichtungen untereinander können symmetrische und asymmetrische Anteile voneinander getrennt werden.

Weitere Verrechnungen der MOKE-Signale werden stets mit dem linearen Anteil (LMOKE) vorgenommen, da sich Gleichung 2.12 nach dem Subtrahieren aller quadratischen Anteile, und dem Vernachlässigen aller weiteren höheren Ordnungen stark vereinfachen lässt.

## 2.5 Vektor-MOKE

Vektor-MOKE wird das Verfahren genannt, die Raumkomponenten des Magnetisierungsvektors einzeln zu bestimmen. In den folgenden Abschnitten wird gezeigt, wie aus unterschiedlichen MOKE-Messungen diese Komponenten gewonnen werden können.

### 2.5.1 Die $m_x$ - und $m_z$ -Komponente

Im Kapitel 2.3.1 wurde bereits beschrieben, auf welche Weise der Magnetisierungsvektor Einfluss auf die KERR-Drehung nimmt. Da TMOKE keine KERR-Drehung zur Folge hat, beeinflussen also lediglich  $m_x$  (durch LMOKE) und  $m_z$  (durch PMOKE) den gemessenen KERR-Winkel.

Da wir die quadratischen Anteile des MOKE-Signals von den linearen Anteilen trennen können, und alle Terme noch höherer Ordnung vernachlässigbar klein sind, können quadratische Terme und Terme höherer Ordnung aus den Gleichungen 2.10 und 2.11 gestrichen werden. Für kubisches Eisen ergibt sich mit [6] in diesem Fall

$$\begin{aligned}\Phi^s &= A_s K m_z - B_s K m_x \\ \Phi^p &= -A_p K m_z + B_p K m_x \quad .\end{aligned}$$

Für die Näherung, dass der Einfallswinkel des Lichts senkrecht zur Probenoberfläche ist, gilt  $A_s = A_p$  und  $B_s = B_p$ , so dass sich die Zusammenhänge nach [11] zu

$$m_x \propto \Phi^s - \Phi^p \quad (2.13)$$

$$m_z \propto -(\Phi^s + \Phi^p) \quad (2.14)$$

ergeben.

Diese Proportionalitäten besagen, dass  $m_x$ - und  $m_z$ -Komponente des Magnetisierungsvektors durch Verrechnung der MOKE-Signale für parallel und senkrecht zur Einfallsebene polarisiertes Licht hervorgehen.

Der Unterschied der Koeffizienten  $A_p$  und  $A_s$ , sowie  $B_p$  und  $B_s$  vergrößert sich mit dem Einfallswinkel des Lichts auf die Probe.

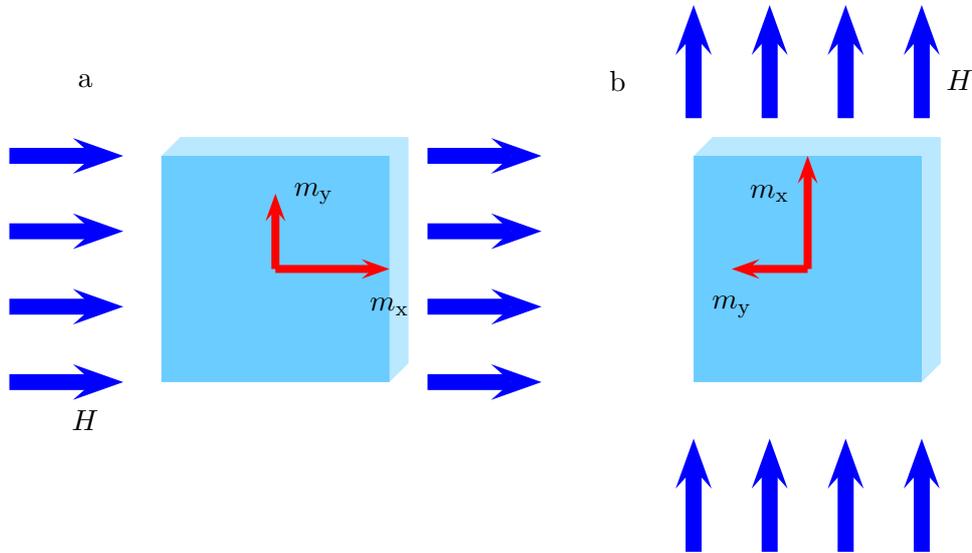
In der Arbeitsgruppe „Dünne Schichten und Grenzflächen“ beläuft sich der Einfallswinkel auf  $45^\circ$ . Um den dadurch entstehenden Fehler möglichst klein zu halten, werden die Kurven vor dem Verrechnen normiert [12].

### 2.5.2 Die $m_y$ -Komponente

Um die  $m_y$ -Komponente des Magnetisierungsvektors zu messen, muss der Versuchsaufbau abgeändert werden. Wie in Abbildung 2.4 gezeigt, würde mit dem alten Versuchsaufbau die  $m_y$ -Komponente lediglich den für uns nicht messbaren TMOKE erzeugen. Durch Drehen der Probe und des Magnetfeldes um je  $90^\circ$  erhalten wir ein äquivalentes Verhalten des Magnetisierungsvektors, und messen gleichzeitig mit dem LMOKE die  $m_y$ -Komponente.

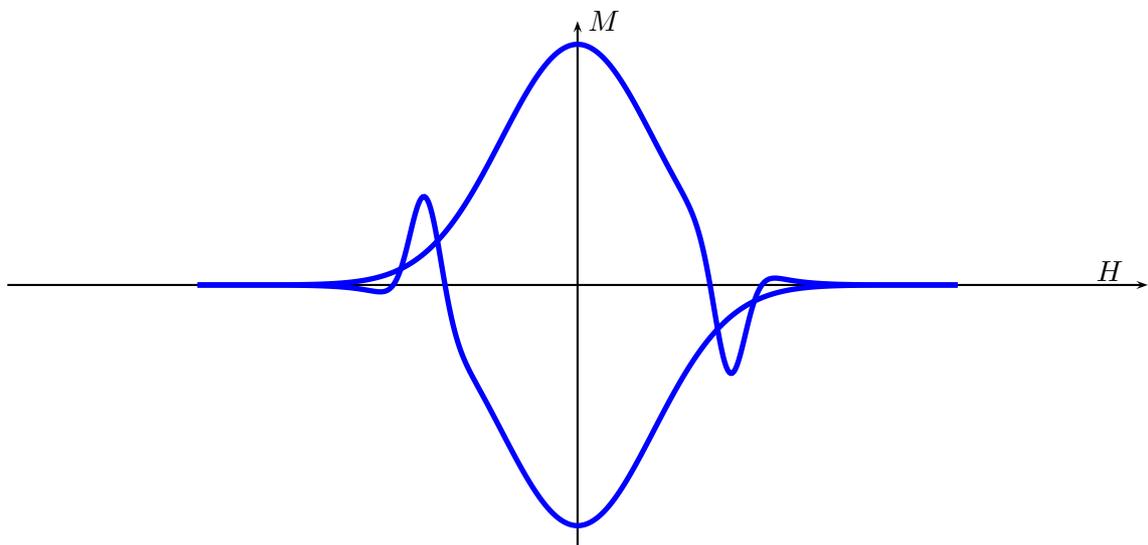
Natürlich sind auch hier wieder LMOKE- und PMOKE-Signal, durch den  $m_z$ -Anteil verursacht, überlagert, und müssen mit dem Verfahren aus Kapitel 2.5.1 getrennt werden.

Unter Vernachlässigung der  $m_z$ -Komponente kann aus  $m_x$ - und  $m_y$ -Komponente der Betrag sowie die Ausrichtung des Magnetisierungsvektors errechnet werden.



**Abbildung (2.7):** Messen der  $m_y$ -Komponente. (a): Magnetfeld parallel zur Einfallsebene des Lichts; (b): Magnetfeld senkrecht zur Einfallsebene des Lichts, Probe um  $90^\circ$  gedreht. Nach dem Drehen der Probe und des Magnetfeldes um  $90^\circ$  messen wir die  $m_y$ -Komponente anstatt der  $m_x$ -Komponente.

Abbildung 2.8 zeigt einen Beispielverlauf einer Kurve die im Magnetfeld senkrecht zur Einfallsebene des Lichts aufgenommen wurde.

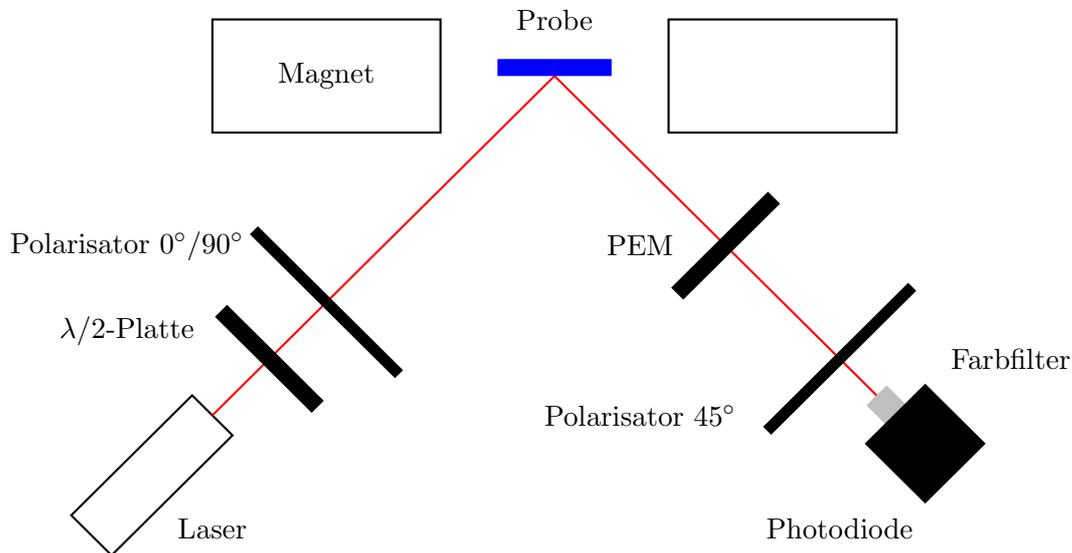


**Abbildung (2.8):** Beispielverlauf eines MOKE-Signals mit senkrechtem Magneten. Da die Ebene des einfallende Lichtstrahls nun senkrecht zum Magnetfeld ist, wird das größte MOKE-Signal gemessen, wenn kein Magnetfeld anliegt.

### 3 Experimentelle Gegebenheiten

In diesem Kapitel wird der Aufbau der MOKE-Apparatur, mit der die Testmessungen durchgeführt wurden beschrieben. In Abschnitt 3.2 werden verwendete Messtechniken erläutert, das verwendete Probenmaterial wird in Kapitel 3.3 erklärt.

#### 3.1 Der Versuchsaufbau



**Abbildung (3.1):** Schema des Versuchsaufbaus. Die Quelle des polarisierten Lichtstrahls stellt ein Helium-Neon Laser mit einer Wellenlänge von 632,8 nm dar. Als Detektor des reflektierten Strahls dient eine Silizium-Foto-Diode, da sie für die Wellenlänge des Lasers besonders empfindlich ist. Um fremden Lichteinfluss zu minimieren, ist vor der Diode ein Frequenzfilter installiert. Die Probe wird mit Hilfe einer Halterung auf einem Schrittmotor fixiert, und befindet sich in der Mitte des durch den Elektromagneten erzeugten Magnetfeldes. Die Stärke des Magnetfeldes wird mit einer HALL-Sonde gemessen. Der Reflektierte Lichtstrahl wird durch den PEM (photoelastischer Modulator) mit 50 kHz moduliert und von einem Lock-In-Verstärker ausgewertet.

Abbildung 3.1 zeigt eine Skizze des Versuchsaufbaus. Der Laserstrahl kann mit Hilfe eines Polarisators senkrecht oder parallel polarisiert werden. Die Intensität des Strahles kann nicht direkt am Laser geändert werden. Statt dessen kann sie durch Abstimmung der  $\lambda/2$ -Platte zusammen mit dem Polarisator eingestellt werden. Eine Silizium-Foto-Diode detektiert den reflektierten Laserstrahl, der eine Wellenlänge von 632,8 nm hat.

Durch die Modulation des Signals mit einem photoelastischen Modulator können im Lock-In-Verstärker KERR-Winkel und KERR-Elliptizität separiert werden. Außerdem minimiert der Lock-In-Verstärker das Rauschen des eingehenden Signals.

Die Magnetfeldstärke lässt sich direkt durch einen Strom  $I$  steuern, und wird mit Hilfe einer HALL-Sonde gemessen.

### 3.2 Messtechniken

Um alle magnetisch „leichten“ und „schweren“ Richtungen der Probe zu erfassen, wird die Probe auf dem Schrittmotor um  $360^\circ$  gedreht, während Magnetisierungskurven in allen Richtungen aufgenommen werden. Dabei gilt: je kleiner die Drehschritte, desto höher ist die Auflösung der magnetischen Richtungen. Dabei werden in Bereichen der „schweren“ Richtungen die Schritte kleiner gewählt, da hier die Veränderung des Effekts besonders groß ist.

Polarisatoren und  $\lambda/2$ -Platte helfen, das Licht senkrecht oder parallel zur Einfallsebene zu polarisieren, was für Vektor-MOKE nach Kapitel 2.5 notwendig ist.

Um die  $m_y$ -Komponente messen zu können muss der Magnet um  $90^\circ$  gedreht werden. Dies muss manuell und mit höchster Vorsicht geschehen.

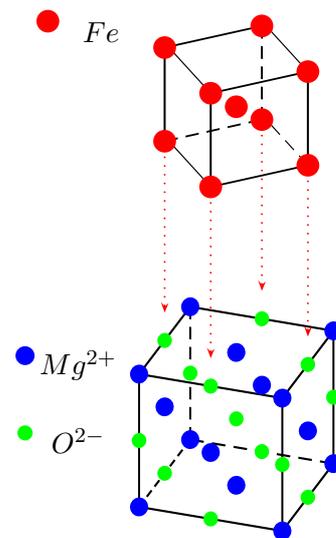
### 3.3 Eisen auf Magnesiumoxid

Bei den verwendeten Materialien handelt es sich um Eisenproben, aufgedampft auf einem Substrat (MgO), die in einer eigenen UHV-Kammer<sup>4</sup> hergestellt wurden. Die Gitterstrukturen der einzelnen Proben sind bekannt.

Eisen wächst unterhalb einer Temperatur von  $911^\circ\text{C}$  kubisch raumzentriert auf, und ist ferromagnetisch unterhalb seiner CURIE-Temperatur von  $766^\circ\text{C}$ . Magnesiumoxid wächst in der Natrium-Chlorid-Struktur auf.

Der Sauerstoff bildet im MgO-Kubus Oktaeder mit der Kantenlänge  $2,9781\text{ \AA}$ . Diese Kantenlänge ist annähernd so groß wie die Gitterkonstante des kubischen Eisens mit  $2,8665\text{ \AA}$ . Beim Aufwachsen von Eisen auf Magnesiumoxid werden sich die Eisenatome auf die Sauerstoffatome des Substrats platzieren (siehe Abbildung 3.2).

Anhand des kubischen Kristallgitters des Eisens erwarten wir sechs gleichberechtigte, magnetisch „leichte“ Richtungen, zwei für jede Kantenrichtung. Da unsere Probe jedoch als dünne Schicht vorliegt, können wir sie als dimensionsreduzierten Körper betrachten, müssten also vier „leichte“ Richtungen beobachten können. Diese entsprechen den Richtungen  $[100]$ ,  $[-100]$ ,  $[010]$  und  $[0-10]$ .



**Abbildung (3.2):** Skizze zum Aufwachsenverhalten von Fe auf MgO. unten: Kristallgitter von Magnesiumoxid; oben: Kubisches Eisen. Die Gitterkonstante des Eisen ist annähernd so groß wie die Kantenlänge des Sauerstoffoktaeders im MgO-Kristall.

<sup>4</sup>UHV: Ultrahochvakuum

Die „schweren“ Richtungen wären demnach bei  $[110]$ ,  $[-110]$ ,  $[1-10]$  und  $[-1-10]$  zu erwarten.

Die Dicke der verwendeten Probe beträgt 12 nm, was ca 80 Monolagen entspricht.

Um die Eisenprobe vor Oxidation zu schützen, bekommt sie ein Siliziumcap. Dies beeinflusst die MOKE-Messungen nicht, da Silizium ein diamagnetisches Material ist, und daher eine kleine Suszeptibilität gegenüber Ferromagneten besitzt.



## 4 Die Auswertungssoftware

In diesem Kapitel wird die entwickelte Auswertungssoftware, ihre Funktionsweise und ihr Aufbau vorgestellt. Die neueste stabile Version der Software befindet sich auf der CDROM welche dieser Arbeit beigelegt wurde.

Das Programm wurde in der Programmiersprache JAVA entwickelt. Es besteht aus ca 1800 Zeilen Quellcode, verteilt auf acht große Oberklassen, von denen hier die wichtigsten vorgestellt werden.

Die Software wurde nach dem Vorbild eines bereits bestehenden Programms geschrieben. Das vorherige Programm wurde in MATLAB verfasst und war noch unvollständig. Die neue Version sollte um einige Funktionen erweitert werden und außerdem komfortabler zu bedienen und zu erweitern sein. Die Funktionen werden in Kapitel 4.1.4 erklärt. Der Wechsel der Programmiersprache ist durch mehrere Faktoren begründet. Tabelle 1 zeigt die jeweiligen Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Programmiersprachen auf.

Pro MATLAB + Konzipiert für numerische Berechnungen + Ältere Sprache (* $\approx$ 1970) => Viele nützliche Klassen bereits vorhanden	Contra MATLAB - Nicht in erster Linie auf Graphische Benutzeroberflächen ausgelegt - Nicht Objektorientiert - Kostenpflichtig
Pro JAVA + Möglichkeit Threads zu benutzen + Weltweit kostenlos erhältlich + Einfache Einbindung ins <i>World Wide Web</i>	Contra JAVA - Junge Programmiersprache, d.h. viele Rechenalgorithmen müssen von Grund auf neu geschrieben werden - Such- und Rechenalgorithmen etwas langsamer

**Tabelle (1):** Vergleich der Vor- und Nachteile von JAVA und MATLAB. Im Vergleich bietet JAVA die bedeutenderen Vorteile.

### 4.1 Die Grafische Benutzeroberfläche (GUI)

Zunächst werden in diesem Abschnitt die wichtigsten Klassen vorgestellt, die mit der grafischen Benutzeroberfläche zu tun haben. Klassen die Routinen im Hintergrund und für den Benutzer unsichtbar ausführen werden in Kapitel 4.2 diskutiert. Die Benutzeroberfläche wurde mit Komponenten der JAVA-Packages Swing und AWT erstellt. Diese Pakete bieten bereits viele Optionen die für dieses Projekt benötigt werden. In den meisten Fällen werden bereits bestehende Klassen noch erweitert, wobei eine neue Klasse entsteht. Man spricht dabei von „Vererbung“.

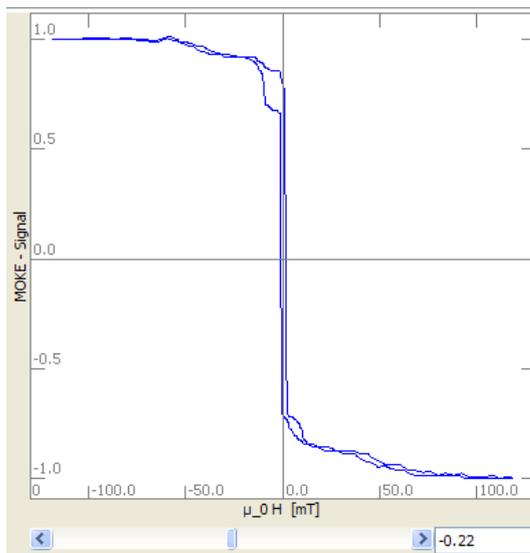
### 4.1.1 Die Klasse GraphCanvas

Die Klasse GraphPanel dient dazu, die Kurven und Daten graphisch darzustellen. Sie erbt von der bereits existierenden JAVA-Klasse Canvas, die für Zeichenoperationen bestimmt ist. Bei der Erweiterung der Klasse Canvas wurde hauptsächlich die paint-Methode überschrieben, welche aufgerufen wird um das Objekt auf den Bildschirm zu zeichnen. Weiter wurden einige Methoden und Variablen hinzugefügt, sodass jedem GraphCanvas individuell und unkompliziert zugewiesen werden kann, was es zu zeichnen hat.

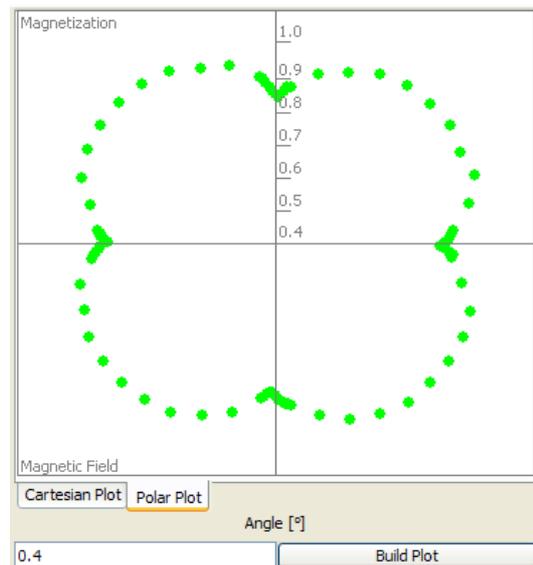
Die Klasse GraphCanvas dient dazu, Magnetisierungskurven zu plotten, kann aber auch andere Kurven darstellen die als x-y-Wertepaare vorliegen.

Methoden zum Zoomen und zum zeichnen einer intelligenten Skalierung und Beschriftungen sind ebenfalls in dieser Klasse untergebracht.

Von der Klasse GraphCanvas stammen auch die Klassen PolarGraphCanvas und CartesianGraphCanvas ab. Diese dienen dazu, in einem Bereich von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$  Polarplots und kartesische Plots von Daten wie der Remanenz, Koerzitivfelder usw. zu zeichnen. Die zu zeichnenden Daten werden dabei nicht innerhalb dieser Klasse errechnet, sondern von weiteren Daten-Objekten übergeben. In Boolean-Arrays<sup>5</sup> wird gespeichert welche der Daten gezeichnet werden müssen und welche nicht. Die Abbildungen 4.1 und 4.2 zeigen Beispiele für die Klasse GraphCanvas und PolarGraphCanvas.



**Abbildung (4.1):** Beispiel für die Klasse GraphCanvas. Die Beschriftungen passen sich automatisch den angezeigten Kurven an. Mit Hilfe eines Schiebereglers kann die Kurve in x-Richtung verschoben werden.

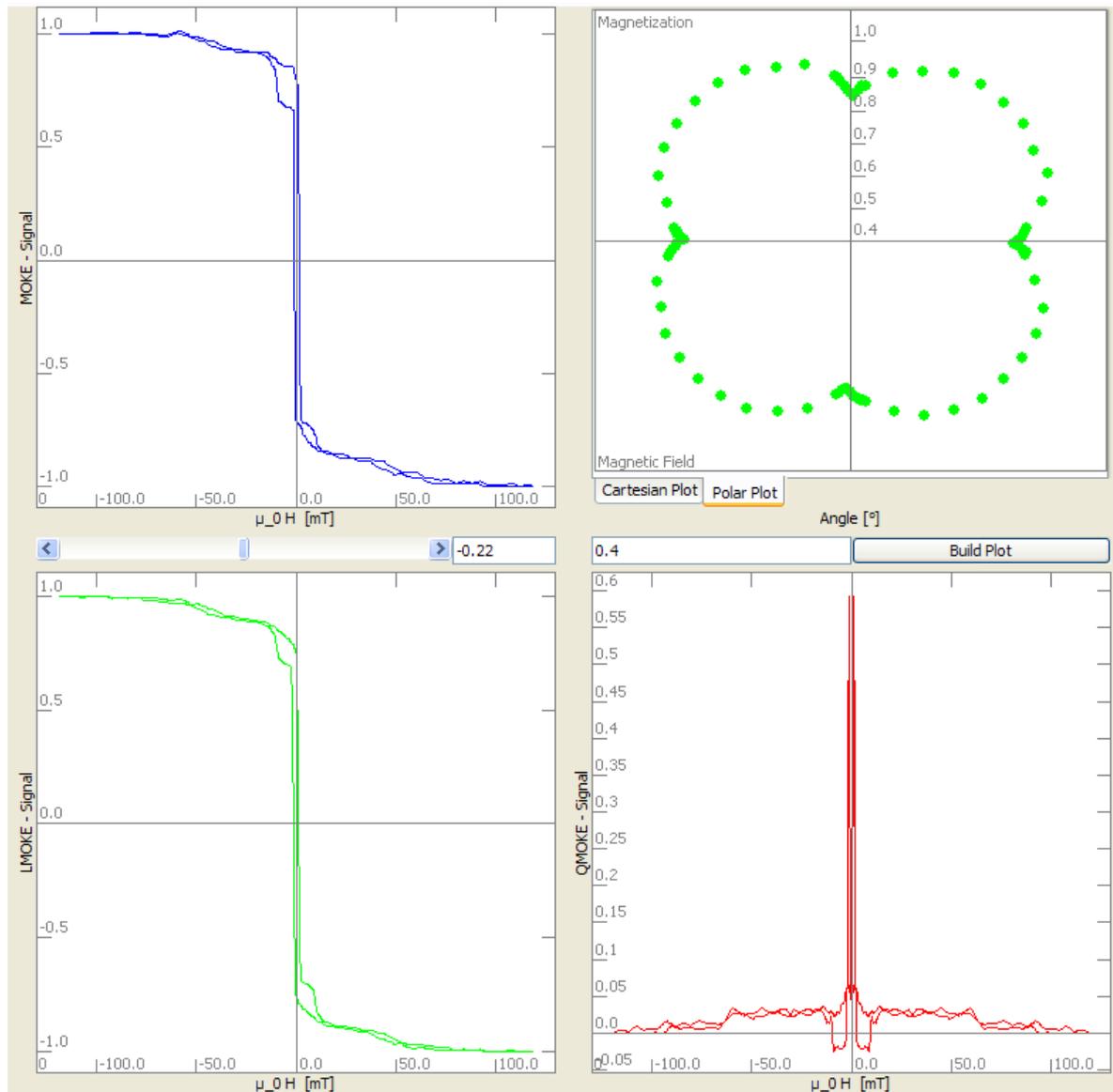


**Abbildung (4.2):** Beispiel für die Klasse PolarGraphCanvas. Werte wie Remanenzen, Koerzitivfelder usw. werden über  $0^\circ$  bis  $360^\circ$  aufgetragen. Der Nullpunkt des Polarplots kann verändert werden, um Regelmäßigkeiten besser sichtbar zu machen.

<sup>5</sup>Variabel-Felder die mit den Werten „wahr“ und „falsch“ gefüllt sind

### 4.1.2 Die Klasse DataTab

Die Klasse DataTab erbt von der Swing-Klasse JPanel, die als Container<sup>6</sup> für weitere Swing- und AWT-Objekte geeignet ist. Jeder DataTab wird als Registerkarte (Tab) in einem weiteren Kontainerelement der Klasse Mainframe untergebracht, und ist für die Bearbeitung von je einem Datensatz bestimmt. Graphisch ist jeder DataTab aufgeteilt in ein Control-Panel und ein Grafik-Panel, im Verhältnis 1:2.

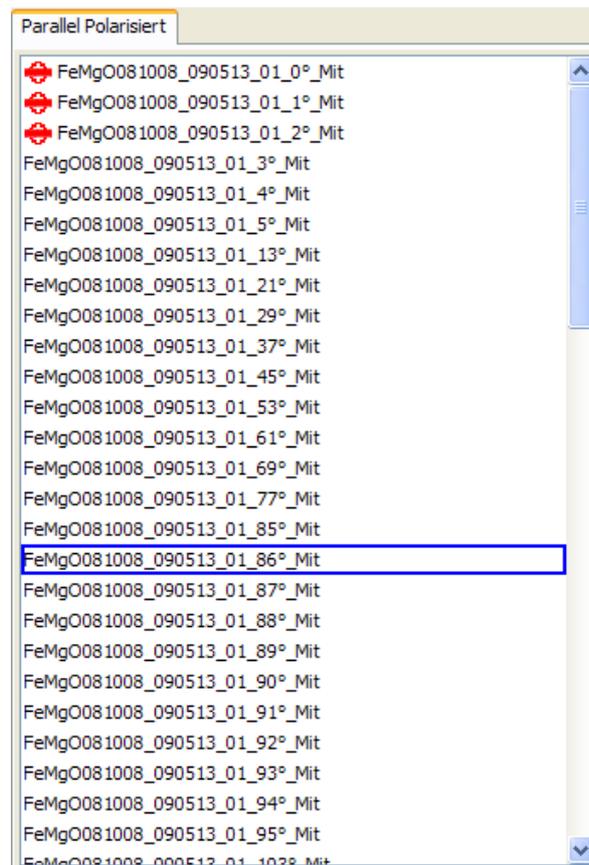


**Abbildung (4.3):** Darstellung des Grafik-Panels mit Beispielkurven. In der Standardansicht werden automatisch MOKE-, LMOKE- und QMOKE-Signal der markierten Daten angezeigt. Der Polarplot (oben rechts) kann auf kartesische Ansicht gewechselt werden.

<sup>6</sup>Graphische Elemente wie Buttons, Textfelder etc. müssen einem Container zugeordnet werden um dargestellt werden zu können.

Das Grafik-Panel beinhaltet vier GraphCanvas-Objekte, angeordnet wie in Abbildung 4.3 gezeigt. Polarplot und kartesischer Plot sind selbst als Registerkarten integriert, sodass immer nur eines von beiden angezeigt wird. In der Starteinstellung zeigen die GraphCanvas automatisch MOKE-, LMOKE- und QMOKE-Signal der ausgewählten Daten an. Ein Rechtsklick auf die Kurven öffnet ein Kontextmenü, in dem weitere zur Verfügung stehende Kurven zur Ansicht angeklickt werden können. Dieses Menü bietet außerdem die Möglichkeit diese einzelne Kurve im ASCII-Format zu exportieren.

Ein Schieberegler und ein Texteingabefeld ermöglichen die Verschiebung des MOKE-Signals, um einen Offset des gemessenen Magnetfeldes auszugleichen. Während einer Verschiebung des MOKE-Signals werden LMOKE- QMOKE- und alle dazugehörigen Signale direkt neu berechnet und angezeigt. Ein Button mit der Beschriftung „Build Plot“ befindet sich unterhalb des Polarplot-Canvas. Per Mausklick werden hier die LMOKE- und QMOKE-Signale aller Kurven des Datensatzes voneinander getrennt, sowie alle anzeigbaren Felder wie Remanenz, Koerzitivfeldstärke etc berechnet.



**Abbildung (4.4):** Beispiel einer gefüllten JList. Die Daten werden stets nach dem Drehwinkel der Probe sortiert. Das aktuell markierte Element wird blau umrahmt. Kurven die mit einem Shift-Lock (siehe Punkt „Lock/Unlock Shift“, Seite 22) versehen wurden, sind in der Liste mit roten Symbolen gekennzeichnet.

Das Control-Panel des DataTabs ist in drei Bereiche aufteilbar: Eine Liste mit allen aufge-

nommenen Kurven des jeweiligen Datensatzes, ein Bereich zur Steuerung des Polarplots bzw. kartesischen Plots, und ein Bereich mit Buttons, die verschiedene Funktionen und Tools zur Verfügung stellen.

Die aufgenommenen Kurven eines Datensatzes werden in einer TreeMap verwaltet, einem JAVA-Datentyp, der einen Such-Baum nachbildet. Graphisch dargestellt werden die Namen der Elemente in einer JList, welche alle Einträge automatisch nach dem Winkel sortiert in dem sie aufgenommen wurden. Das Anklicken eines Eintrages wählt die entsprechenden Daten zur Ansicht aus. Ein ausgewähltes Element wird in der JList blau umrahmt dargestellt. Ein Rechtsklick in die JList bietet die Option einen ausgewählten Eintrag aus der Liste zu entfernen. Abbildung 4.4 zeigt die implementierten JList, beispielhaft gefüllt mit einem Datensatz.

Welche Eigenschaften der Magnetisierungskurven im Polarplot und kartesischem Plot angezeigt werden sollen, wird mit Hilfe von Checkboxen geregelt. Die jeweilige Beschriftung zeigt an, welche Box welchen Wert anzeigt. Dabei werden Werte in der Einheit Mili-Degree ( $m^\circ$ ) und Werte in der Einheit Mili-Henry (mH) unterschieden. Abbildung 4.5 zeigt, wie die Auswahl der anzuzeigenden Werte im Programm realisiert wurden.

<input type="checkbox"/>	Positive	<input type="checkbox"/>	Negative	<input checked="" type="checkbox"/>	Average
<input type="checkbox"/>	MOKE Remanence	<input checked="" type="checkbox"/>	LMOKE Remanence	<input type="checkbox"/>	QMOKE Peak
<input type="checkbox"/>	QMOKE Peak	<input type="checkbox"/>	LMOKE Y-Difference	<input type="checkbox"/>	QMOKE Saturation
<input type="checkbox"/>	MOKE Coercive	<input type="checkbox"/>	LMOKE Coercive	<input type="checkbox"/>	MOKE Shift

**Abbildung (4.5):** Ansicht des Checkbox-Bereiches. Hier wird ausgewählt, welche Werte im polaren oder kartesischen Plot über den Drehwinkel der Probe aufgetragen werden sollen.

Werte die zur Zeit dargestellt werden können sind

- **MOKE Remanence:** Remanenz des MOKE-Signals.
- **MOKE Coercive:** Koerzitivfeldstärke des MOKE-Signals.
- **MOKE Shift:** Verschiebung des MOKE-Signals durch den Schieberegler.
- **LMOKE Remanence:** Remanenz des LMOKE-Signals.
- **LMOKE Coercive:** Koerzitivfeldstärke des LMOKE-Signals.
- **LMOKE Difference:** Differenz der Sättigungen des LMOKE-Signals.
- **QMOKE Peak:** Höhe des größten QMOKE-Peaks.
- **QMOKE Saturation:** Sättigung des QMOKE-Signals.

Mit Ausnahme des MOKE-Shifts und der LMOKE-Differenz ist jeder dieser Werte ein errechneter Durchschnitt von aus linker und rechter Seite der Kurve errechneter Werte, welche auch einzeln angezeigt werden können.

Die Button-Leiste des DataTabs bietet Werkzeuge zum Normieren, Zoomen und Verschieben der Graphen. Abbildung 4.6 zeigt wie dies im Programm aussieht.



**Abbildung (4.6):** Abbildung des Button-Menüs. Hier sind wichtige Funktionen die häufig genutzt werden zum schnellen Zugriff untergebracht.

In die Button-Leiste wurden Funktionen aufgenommen, die häufig gebraucht werden. Dazu gehören

- **Norm Graph:** Aktiviert den Normierungs-Modus. Durch Klicken kann eine Kurve auf zwei Y-Stellen eines Graphen normiert werden.
- **Undo Norm:** Stellt die originalen Y-Werte der Kurve wieder her.
- **Zoom:** Aktiviert den Zoom-Modus. Nun kann durch Drücken und halten der linken Maustaste in einem GraphCanvas ein beliebiger Ausschnitt der entsprechenden Kurve vergrößert dargestellt werden.
- **Undo Zoom:** Aktiviert den Un-Zoom-Modus. Ein Klick auf ein GraphCanvas stellt die ursprüngliche Ansicht wieder her.
- **Take Over Shift:** Für Alle Elemente des geöffneten Datensatzes wird der Shift der aktuellen Kurve übernommen. Ausgenommen sind dabei Kurven, die mit einem Shift-Lock versehen wurden.
- **Lock/Unlock Shift:** Blockiert den Shift der ausgewählten Kurve, oder hebt die Sperre wieder auf. Kurven mit blockiertem Shift sind in der JList mit einem roten Kreis gekennzeichnet. Sie können nicht verschoben werden bis die Sperre aufgehoben wird.

Alle aktivierbaren Modi werden automatisch beendet nach erfolgreichem Ausführen der gewünschten Operation, oder durch Aktivierung eines neuen Modus, oder auch durch erneutes Klicken des jeweiligen Buttons.

#### 4.1.3 Die Klasse MainFrame

Die Klasse MainFrame ist, ähnlich wie die Klasse DataTab, eine von JFrame abgeleitete Klasse. Sie bildet das Grundgerüst des Programms. Zur Hauptaufgabe der Klasse MainFrame gehört, die DataTabs zu verwalten. Damit diese als Registerkarten angezeigt werden können, werden sie als Elemente einem JTabbedPane hinzugefügt, ein Swing-Kontainer der extra für die Registerkartenansicht konzipiert wurde.

MainFrame verwaltet zusätzlich die Menüleiste und die Verrechnungen von Datensätzen untereinander.

#### 4.1.4 Die Menü-Funktionen

Die Menüleiste besteht aus zwei Menüs, dem Start-Menü und dem Tool-Menü.

**Im Start-Menü** sind alle Funktionen die zum Speichern, Laden und Exportieren der Daten benutzt werden, sowie Funktionen zum Laden von Daten und zum Öffnen und Schließen von Tabs (siehe Abbildung 4.7) untergebracht. Schreibe- und Lese-Algorithmen befinden sich dabei nicht in der Klasse MainFrame, sondern wurden in eine separate Klasse ausgelagert.



**Abbildung (4.7):** Abbildung des Start-Menüs der Software. Hier sind alle Lade-Speicher- und Exportierfunktionen untergebracht, sowie Funktionen zur Verwaltung der Tabs.

Bei Öffnen eines neuen DataTabs muss dieser benannt werden. Ein Name darf dabei nicht zwei mal vorkommen, und weder mit einem Leerzeichen beginnen noch enden.

Vor dem Schließen eines Tabs wird gefragt, ob Änderungen an den Kurven gespeichert werden sollen, die ansonsten verloren gehen würden.

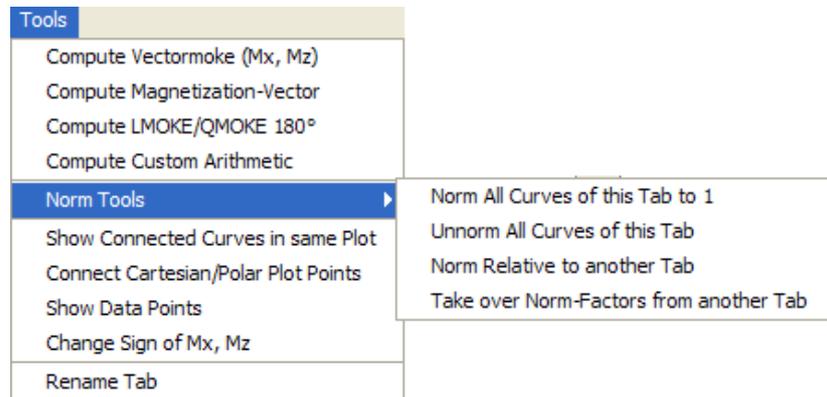
Es gibt zwei Wege, Datensätze auf die Festplatte zu schreiben, die Speicherfunktionen und die Exportierfunktionen. Die Speicherfunktionen schreiben die Daten mittels einem ObjectOutputStream als Objektdateien. Diese sind kodiert und für andere Programme nicht lesbar.

Die Exportieren-Option schreibt die Daten im ASCII-Format, also lesbaren Text und Zahlen, die von anderen Programmen wie z.B. MATLAB, importiert werden können. Da diese Methode gewöhnlich größere Dateien erzeugt und das Einlesen solcher Daten langsamer und mühseliger ist, wurden die ObjectOutputStreams als Standard-Speichermethode gewählt.

Es können einzelne Daten oder auch das gesamte Datenset auf einmal exportiert oder gespeichert werden.

Für den kartesischen oder polaren Plot hat die Speicherung in einem Dateninternen Format keinen Sinn.

Das **Tool-Menü** bietet Funktionen, die direkt mit den Messwerten zu tun haben. Neben einigen weiteren Normierungsfunktionen und ein paar Darstellungsoptionen sind hier auch die Methoden zur Verrechnung der DataTabs untereinander zu finden, wie in Abbildung 4.8 gezeigt.



**Abbildung (4.8):** Abbildung des Tool-Menüs der Software. Neben einem Untermenü für verschiedene Normierungen finden sich hier noch einige weitere Darstellungsoptionen, sowie die verschiedenen Optionen zur Verrechnung der Kurven.

Wenn der Winkel des auf die Probe einfallenden Lichtes deutlich größer als Null ist, müssen die Daten normiert werden, bevor Raumkomponenten des Magnetisierungsvektors durch Vektor-MOKE getrennt werden können. Die Normierungsfaktoren werden dabei mit Hilfe der magnetischen Sättigung ermittelt. Dies funktioniert nur mit Kurven, die mit parallel zum einfallenden Licht ausgerichtetem Magnetfeld aufgenommen wurden. Nach Ermittlung der Normierungsfaktoren einer solchen Messung, können diese für die gleiche Messung mit senkrechtem Magnetfeld übernommen werden.

Normierungsfunktionen wie diese sind im Untermenü Norm Tools zu finden.

Unter den Darstellungsfunktionen befinden sich Optionen mit denen beispielsweise die Messpunkte der Kurven angezeigt werden können, um eventuelle Artefakte zu finden, oder mit denen die Messpunkte im Polarplot und kartesischen Plot verbunden werden können.

Die wichtigsten Funktionen des Tool-Menüs sind wohl die Methoden zur Verrechnung der DataTabs untereinander. Zur Verfügung gestellt werden hier Methoden um Vektor-MOKE durchzuführen, sowie die Verrechnung eines Datensatzes mit sich selbst um  $180^\circ$  versetzt.

Unter dem Menüpunkt „Compute Custom Arithmetic“ können eigene Verrechnungsvorschriften angegeben werden.

Bei Verrechnung zweier DataTabs wird von der Klasse MainFrame ein neuer Tab generiert, und die für die Verrechnung in Frage kommenden Daten eingefügt.

## 4.2 Die „unsichtbaren“ Klassen

In diesem Abschnitt werden die zwei wichtigsten Klassen gesprochen, die für den User nicht direkt sichtbar sind.

### 4.2.1 Die Klasse Data

Die Klasse Data repräsentiert die Messkurve dar. Im Datentyp Vector<sup>7</sup> werden die Werte für Magnetfeldstärke und KERR-Drehung als Datenfelder gespeichert. Auch LMOKE-, QMOKE- und andere Signale werden in dieser Klasse berechnet und in Vectors verwaltet. Alle relevanten Daten, wie Name und Drehwinkel der Messung werden ebenfalls als Datenfelder aufgenommen.

Neben den Algorithmen zur Trennung von LMOKE- und QMOKE-Signal finden sich in dieser Klasse auch alle Methoden zur Ermittlung von Remanenzen, Koerzitivfeldern etc, sowie für Shift- und Normierungs-Operationen und für die Verrechnung mit anderen Kurven.

Die Klasse Data implementiert das Interface Serializable, sodass mittels eines ObjectOutputStreams alle relevanten Daten problemlos in eine Datei auf die Festplatte geschrieben werden können.

Um die Daten außerdem in einer TreeMap verwalten zu können, muss das Interface Comparable implementiert werden, um festzulegen nach welchem Charakteristikum die Daten zu sortieren sind.

### 4.2.2 Die Klasse IO

In die Klasse IO wurden alle Algorithmen ausgelagert, die sich mit dem Lesen und Schreiben von Daten auf der Festplatte befassen. Die Methoden wurden dabei als *static* deklariert. Das bedeutet, es muss kein Objekt von der Klasse IO erzeugt werden, um die Methoden nutzen zu können.

## 4.3 Handhabung des Programms

Das Programm startet nach dem Aufruf mit einer leeren Arbeitsfläche. Um mit einer Auswertung beginnen zu können, muss zunächst ein neuer Arbeitstab geöffnet werden. In einem Arbeitstab sind alle Funktionen solange ausgegraut, bis die ersten Daten geladen wurden.

Nach dem Laden der Daten können diese bearbeitet werden, in Form von Verschiebungen und Normierungen. Das Zoom-Tool kann bei der Verschiebung sehr hilfreich sein. Ein Polarplot kann an dieser Stelle bereits ausgewertet werden. Um Datensätze für zum Beispiel Vektor-MOKE zu verrechnen, muss ein weiterer Tab geöffnet und die Verrechnungsdaten geladen werden. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Daten vor oder nach dem Verrechnen geschoben und normiert werden.

## 4.4 Auftretende Probleme

Die Software hat mit einer nicht unerheblichen Datenmenge umzugehen, da zu Anisotropiebetrachtungen viele Messkurven nötig sind. Dabei gilt es den besten Weg zwischen geringem Speicherverbrauch und hoher Geschwindigkeit zu finden. Eine funktionierende Verwaltung der Daten bei Import und Export ist bei dieser Datenmenge ebenfalls wichtig.

### 4.4.1 Geschwindigkeit und Speicherverbrauch

Durch Erzeugung der LMOKE- und QMOKE-Signale und einiger anderen Werte, entsteht eine große Datenmenge, die im Arbeitsspeicher des Computers abgespeichert werden muss.

---

<sup>7</sup>Vector: Zur Laufzeit vergrößerbare Array

Eine Zwischenspeicherung dieser Daten auf die Festplatte wäre auch möglich, jedoch würden Operationen wie zum Beispiel eine Verschiebung des MOKE-Signals so viel Zeit in Anspruch nehmen, dass das Programm nicht mehr flüssig zu bedienen wäre.

Die „Virtual Machine“ weist jeder JAVA-Anwendung bei ihrem Start einen begrenzten Speicherplatz zu. Dieser musste erweitert werden, um mit der vorhandenen Datenmenge umgehen zu können.

Trotzdem sind gewisse Ladezeiten unumgänglich. Um diese für den Benutzer so erträglich wie möglich zu machen, werden Routinen die mehr Zeit in Anspruch nehmen von Threads ausgeführt, welche die Probleme im Hintergrund behandeln, während das Programm weiterhin benutzbar bleibt. Der Fortschritt des jeweiligem Threads wird in Ladebalken angezeigt.

#### 4.4.2 Arbeiten mit Referenzen

Bei Verrechnungen mit Datensätzen können die selben Daten häufig gleichzeitig in verschiedenen Tabs angezeigt werden. Hier werden keine Kopien der Daten erzeugt, da dies zu viel Zeit und Speicherplatz in Anspruch nehmen würde. Stattdessen existiert von allen Daten jeweils genau ein Objekt, die mit Hilfe von Referenzen in den Tabs angezeigt werden. Wird dieses Objekt verändert, ändert es sich in allen DataTabs die auf dieses Objekt referenzieren. Man spricht dabei von Seiteneffekten.

Einige dieser Seiteneffekte sind unerwünscht. Um die Veränderungen der Objekte kontrollieren zu können müssen einige Indizes eingeführt werden, welche dabei helfen, die Daten auseinander halten zu können.

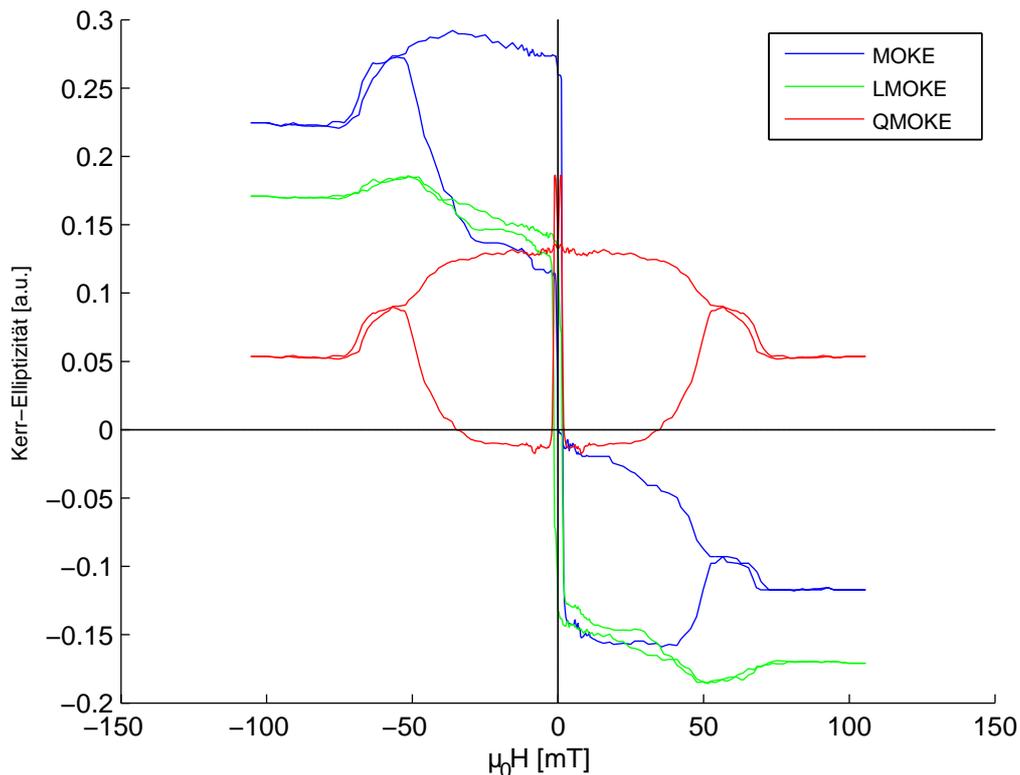
Ein Beispiel: Wird ein Datensatz mehr als ein mal zu einer Verrechnung benutzt, müssen die selben Daten in jedem Tab mit anderen Daten verrechnet werden. Referenzen auf die zu verrechnende Kurve sind in den Daten-Objekten gespeichert. Eine Änderung dieser Referenz verändert das Ergebnis in allen Tabs. Ein Verrechnungsindex hilft hier, in jedem DataTab die passenden Daten miteinander zu verrechnen.

## 5 Auswertung eines Datensatzes am Beispiel „Eisen auf Magnesiumoxid“

In diesem Kapitel werden Ergebnisse vorgestellt, die mit Hilfe der entwickelten Software ausgewertet wurden. Dabei standen einige Messreihen zur Verfügung, die an der in Kapitel 3.3 vorgestellten Probe aufgenommen wurden.

### 5.1 Linearer und quadratischer MOKE

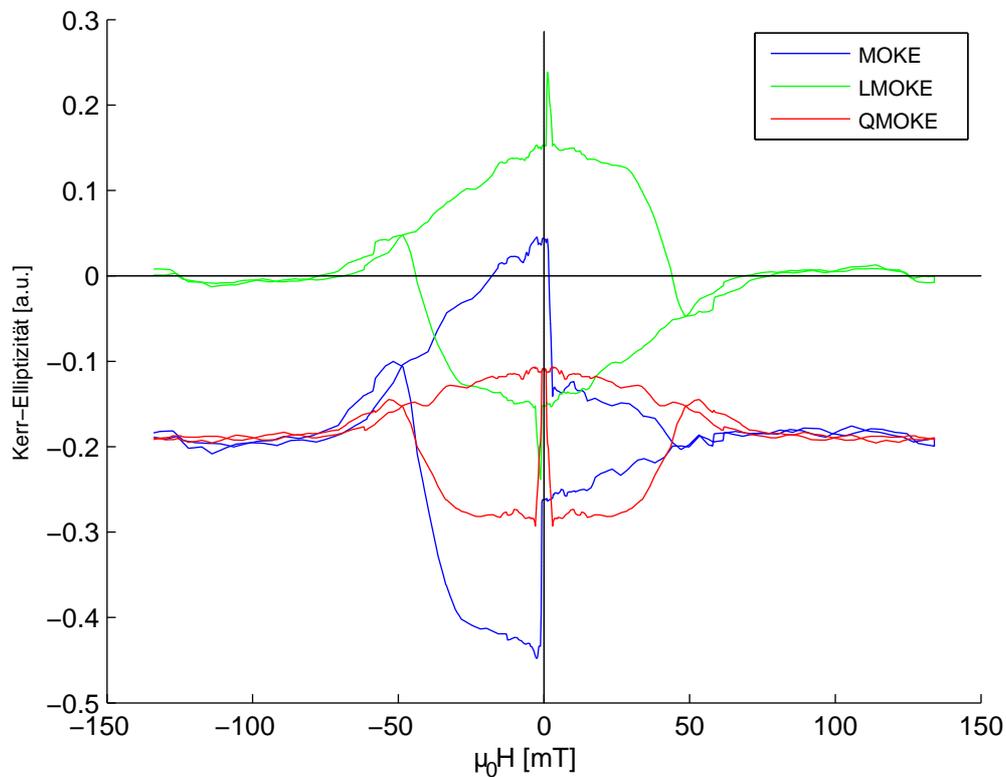
Um die MOKE-Signale weiter verrechnen zu können, besteht der erste Schritt immer darin, LMOKE- und QMOKE-Signale voneinander zu trennen. Dies wird von der Software automatisch beim Anwählen eines Signals getan. Abbildung 5.1 zeigt die drei Signale MOKE, LMOKE und QMOKE, zum Vergleich in einem Plot. Hier wurde die KERR-Elliptizität dargestellt, da die QMOKE-Signale hier ausgeprägter sind. Da die KERR-Elliptizität nicht kalibriert werden kann ist die Einheit als unbekannt angegeben. Aus diesem Grund wurde bei der weiteren Auswertung das Signal des KERR-Winkels ausgewertet, das wir kalibrieren können.



**Abbildung (5.1):** Auswertung von LMOKE- und QMOKE-Signal mit einem Magnetfeld parallel zur Einfallsebene des Lichts. Der Drehwinkel der Probe beträgt  $0^\circ$ . Es handelt sich um ein KERR-Elliptizität-Signal, da hier die QMOKE-Anteile ausgeprägter sind.

Wie in Abbildung 5.1 zu sehen ist, addieren sich LMOKE- und QMOKE-Signale zum MOKE-Signal. Es handelt sich um eine Messung mit parallel zur Einfallsebene polarisiertem Licht, waagrecht gestelltem Magneten und einem Drehwinkel von  $0^\circ$  der Probe. Die Verschiebung des Nullpunktes des MOKE-Signals ist nicht die tatsächliche Lage, sondern abhängig von den Einstellungen des Lock-In-Verstärkers.

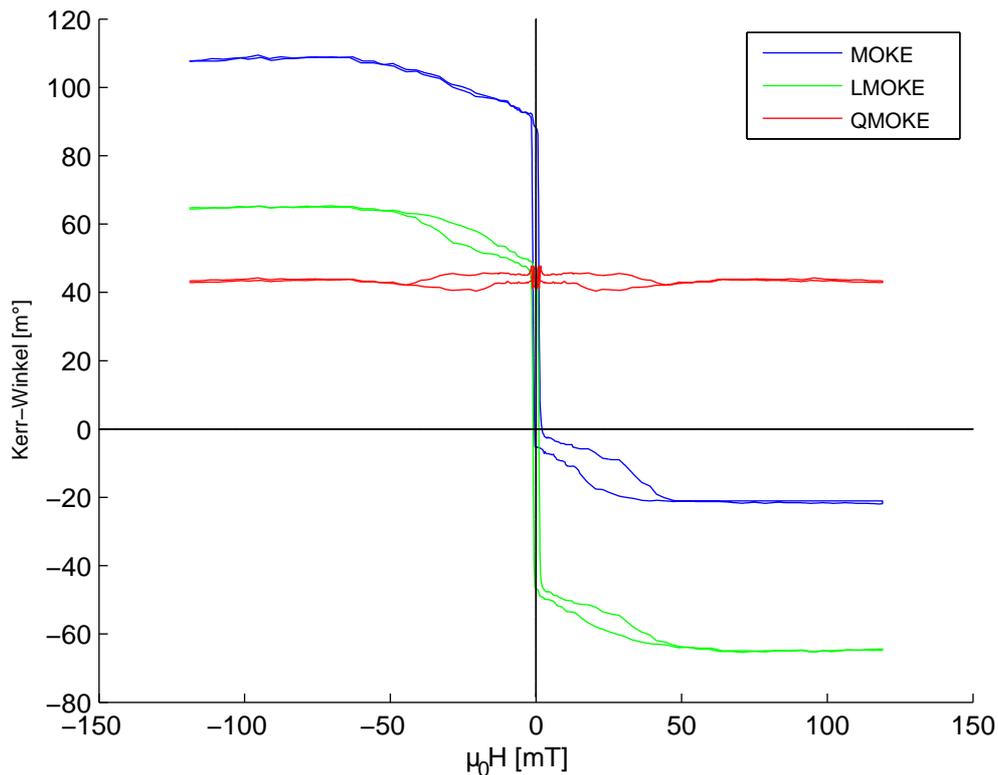
Abbildung 5.2 zeigt ein Beispiel für eine Messung der  $m_y$ - und  $m_z$ -Komponente des Magnetisierungsvektors, also eine Messung mit senkrecht zum einfallenden Licht gerichtetem Magnetfeld. Der Drehwinkel der Probe beträgt wie in Abbildung 5.1  $0^\circ$ . Vor der Trennung von LMOKE- und QMOKE-Signal ist das MOKE-Signal kaum als typische Magnetisierungskurve zu erkennen. Gut erkennbar ist, wie sehr sich die Formen der QMOKE-Signale aus den Plots 5.1 und 5.2 ähneln.



**Abbildung (5.2):** Auswertung von LMOKE- und QMOKE-Signal mit einem Magnetfeld parallel zur Einfallsebene des Lichts. Wie in Abbildung 5.1 beträgt der Drehwinkel der Probe  $0^\circ$  und es handelt sich um das Signal der KERR-Elliptizität.

## 5.2 Richtige Verschiebung der Kurven

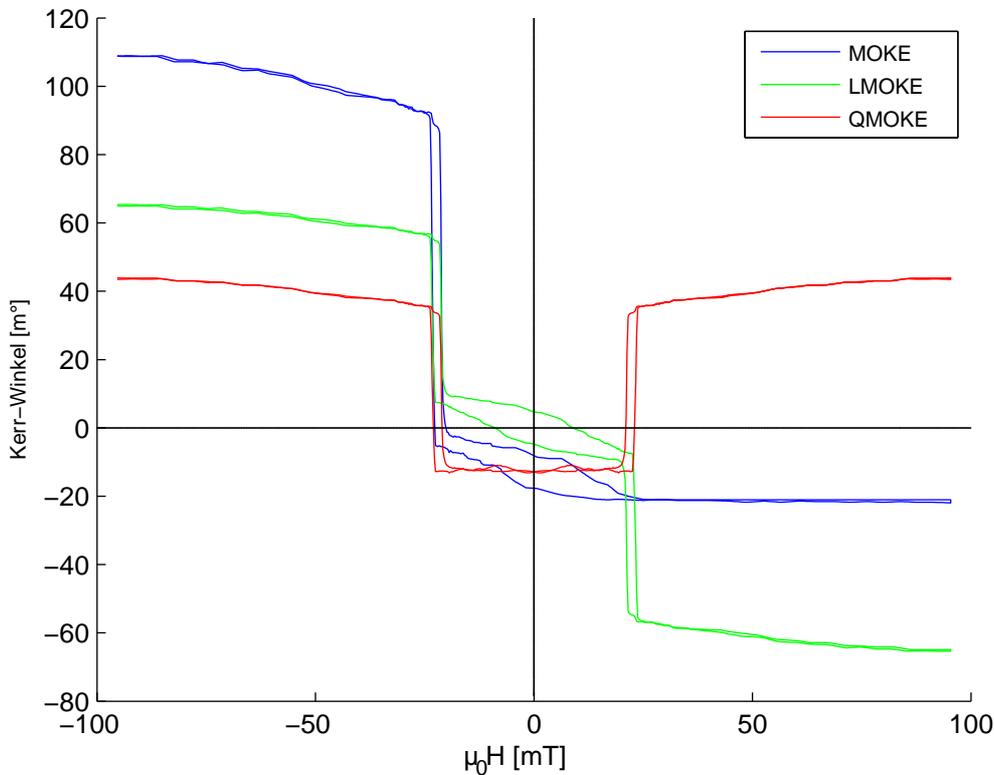
Die durch die HALL-Sonde bedingte Verschiebung der Kurven muss korrigiert werden, da sie durch die von uns angewandte Trennmethode von LMOKE- und QMOKE-Signal deutlichen Einfluss auf das Ergebnis nimmt. Abbildung 5.3 zeigt ein Beispiel für eine korrekt verschobene Kurve. Der Verschiebungswert (Shift) beträgt hier -0,55 mT.



**Abbildung (5.3):** Beispiel zur richtigen Verschiebung der Kurven. Es handelt sich um eine Kurve der Messreihe mit senkrecht zur Einfallsebene des Lichts polarisiertem Licht und waagrechttem Magnetfeld. Der Verschiebungswert beträgt -0,55 mT.

In Abbildung 5.4 ist die selbe Kurve mit einem Shift von -7 mT dargestellt, um zu verdeutlichen wie sich die Verschiebung auf die Kurven auswirkt. Ab gewissen Abweichungen treten Kurven-Formen auf, deren Existenz eindeutig auszuschließen ist. Für eine vollständige Messreihe können die Verschiebungswerte der einzelnen Kurven in der Regel bis zu 0,5 mT auseinander liegen.

Der „richtige“ Shift ist vom Anwender optisch auf einen kleinen Bereich einschränkbar, jedoch nicht mit vollkommener Sicherheit festzulegen. Aus Mangel an Vergleichbaren Kriterien kann die Verschiebung noch nicht automatisch geschehen.

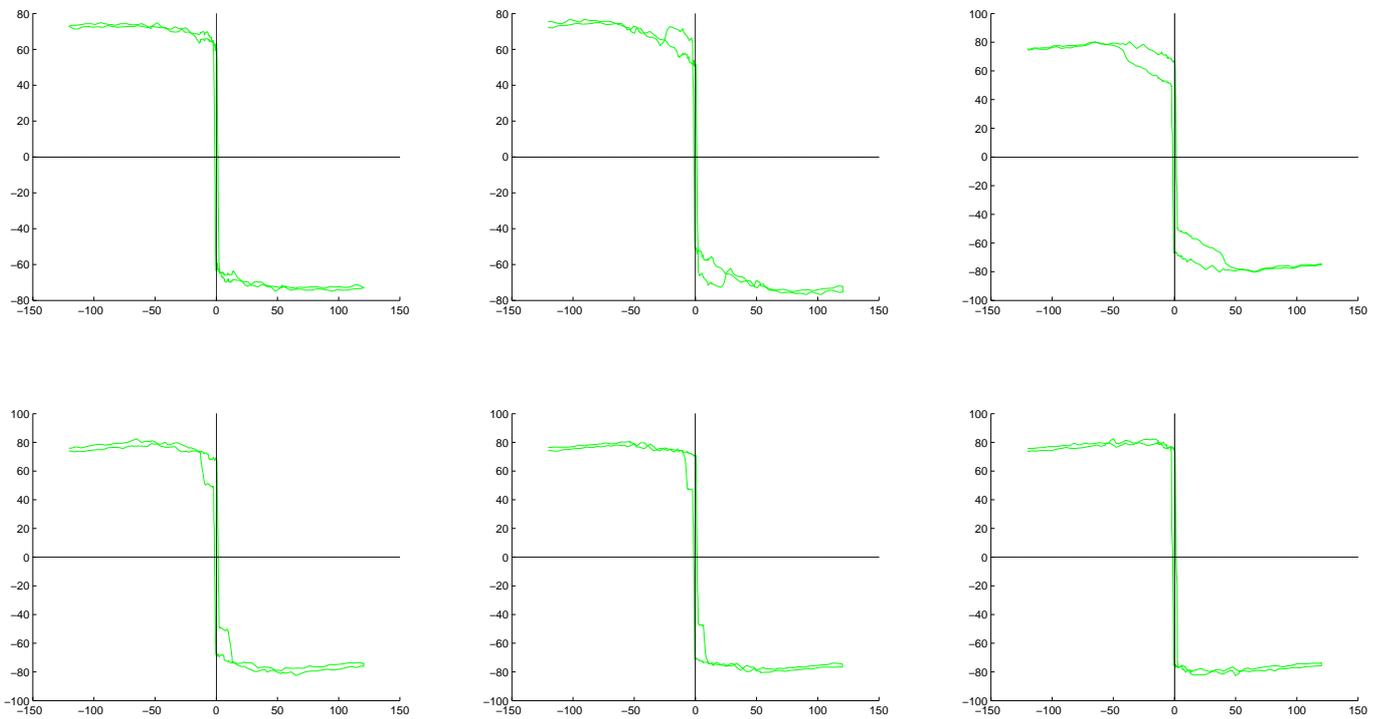


**Abbildung (5.4):** Beispiel zur falschen Verschiebung der Kurven. Der Shift beträgt hier  $-7\text{ mT}$ , was deutlich zu viel ist. Das LMOKE-Signal wird stets so gebildet, dass es punktsymmetrisch ist. Das bewirkt diese starke Veränderung von LMOKE- und QMOKE-Signal bei falscher Verschiebung des MOKE-Signals.

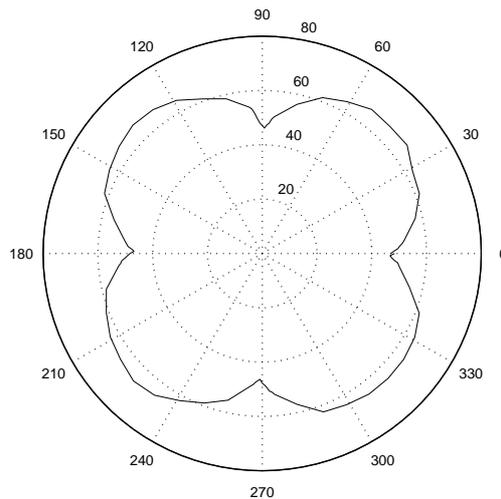
### 5.3 Anisotropiebetrachtungen

In diesem Abschnitt wird die Probe auf ihre magnetischen Anisotropien untersucht. Wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben, erwarten wir auf Grund der Form- und Kristallanisotropien eine Vierzähligkeit. Die  $m_z$ -Komponente sollte dazu sehr klein sein. In Abbildung 5.5 werden LMOKE-Signale dargestellt, von einem Drehwinkel der Probe kurz vor Erreichen der magnetisch schweren Richtung, bis kurz nach dem Verlassen der magnetisch schweren Richtung. Es handelt sich um Messungen mit senkrecht zur Einfallsebene des Lichts polarisiertem Licht und parallel zu ihr gerichtetem Magnetfeld. Die  $m_z$ -Komponente wurde in diesem Unterkapitel vernachlässigt.

Der Unterschied zwischen magnetisch schwerer und leichter Richtung ist nicht unbedingt offensichtlich. Erst im Polarplot wird deutlich wie sich die Anisotropie auswirkt. Abbildung 5.6 zeigt die Remanenzen der entsprechenden Messreihe als Polarplot aufgetragen. Die Vierzähligkeit ist gut erkennbar, die Remanenz wird klein in magnetisch schwerer Richtung.

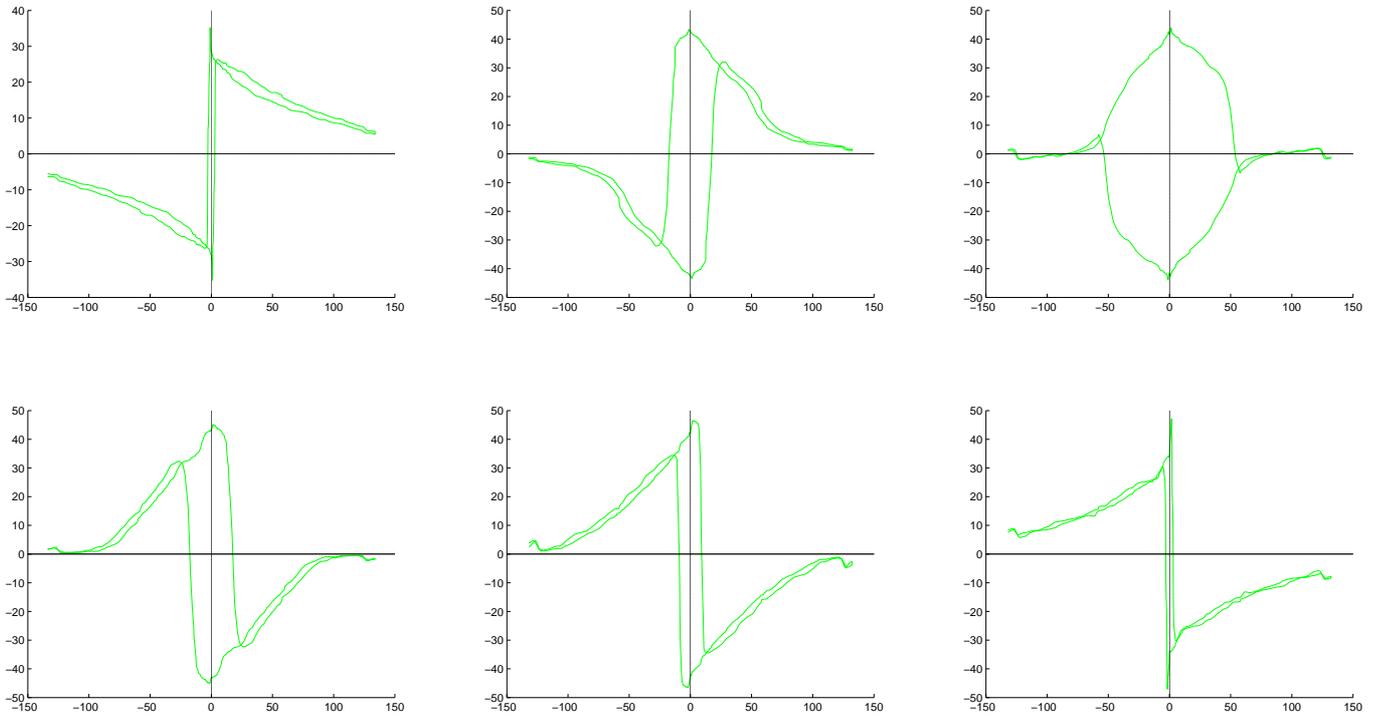


**Abbildung (5.5):** Anisotropiebetrachtung von  $m_x$ -Kurven. Der Drehwinkel der Probe beträgt bei den Kurven  $77^\circ$ ,  $88^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $92^\circ$ ,  $94^\circ$  und  $103^\circ$  (von links nach rechts, von oben nach unten).  $90^\circ$  ist eine magnetisch schwere Richtung für das Material.

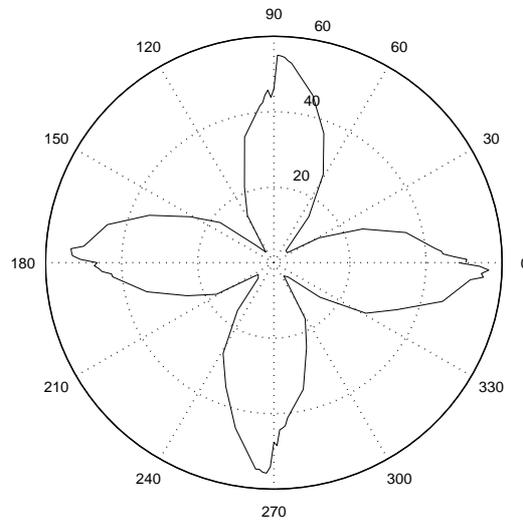


**Abbildung (5.6):** Polarplot der Remanenzen von  $m_x$ -Kurven. Die erwartete Vierzähligkeit ist gut erkennbar. Es formt sich ein Kleeblatt-artiges Gebilde, da die Remanenzen klein werden in magnetisch schweren Richtungen.

Einen deutlicheren Unterschied sieht man bei Betrachtung der  $m_y$ -Komponente, also Messungen mit senkrecht zur Einfallsebene des Lichts ausgerichtetem Magnetfeld (siehe Abbildung 5.7).

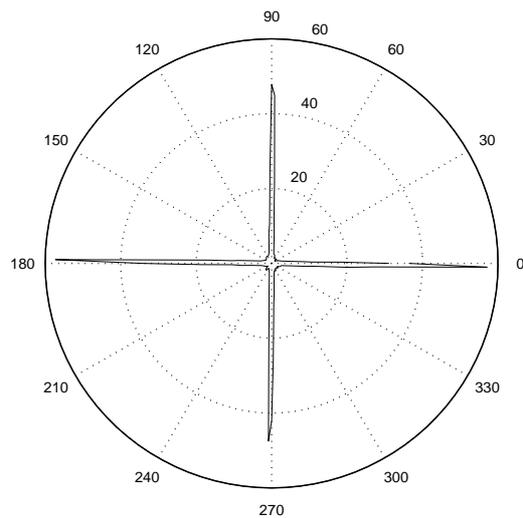


**Abbildung (5.7):** Anisotropiebetrachtung von  $m_y$ -Kurven. Der Drehwinkel der Probe beträgt bei den Kurven  $77^\circ$ ,  $88^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $92^\circ$ ,  $94^\circ$  und  $103^\circ$  (von links nach rechts, von oben nach unten). In diesem Fall ist  $90^\circ$  ist eine magnetisch leichte Richtung für das Material.

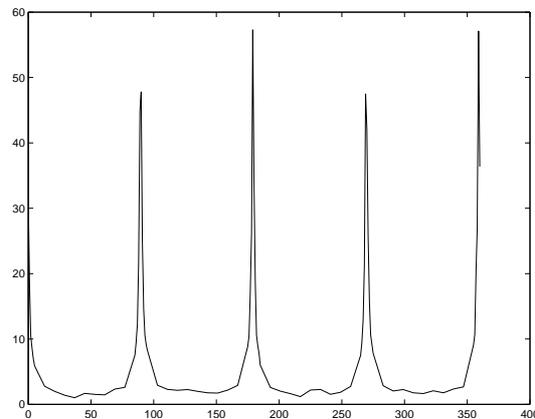


**Abbildung (5.8):** Polarplot der Remanenzen von  $m_r$ -Kurven. Da der Magnet um  $90^\circ$  gedreht wurde, befinden sich die magnetisch schweren Richtungen jetzt auf  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  und  $115^\circ$ .

Im Polarplot ist die Vierzähligkeit durch Betrachtung der Remanenz und der Koerzitivfeldstärken gut erkennbar. Die Remanenzen werden in [Abbildung 5.8](#) dargestellt. Die Koerzitivfeldstärken, geplottet in [Abbildung 5.9](#) liefern scharfe Peaks, noch deutlicher zu erkennen in [Abbildung 5.10](#). Da das Magnetfeld gedreht wurde, sind die magnetisch leichten Richtungen nun bei  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  und  $270^\circ$  zu finden.



**Abbildung (5.9):** Polarplot der Koerzitivfeldstärken von  $m_r$ -Kurven. Die Koerzitivfeldstärken steigen rapide an, in Nähe der magnetisch leichten Richtungen.



**Abbildung (5.10):** Kartesischer Plot der Koerzitivfeldstärken von  $m_y$ -Kurven. Die scharfen Peaks kennzeichnen die magnetisch leichten Richtungen. Die Höhe der Peaks lässt außerdem eine weitere Zweizähligkeit vermuten, die mit der Vierzähligkeit überlagert ist.

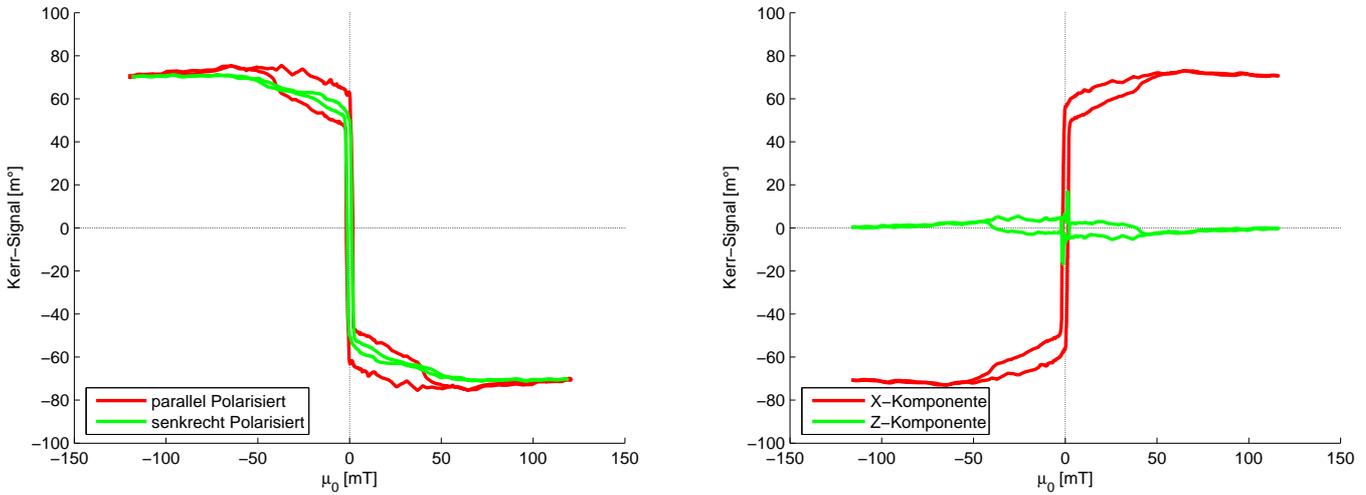
Bei Betrachtung der Peakhöhen in [Abbildung 5.10](#) fällt auf, dass der erste und dritte Peak auf gleicher Höhe sind, genau so wie zweiter und vierter Peak. Dies lässt auf eine eventuelle Zweizähligkeit schließen, die mit der erwarteten Vierzähligkeit der Probe überlagert ist.

## 5.4 Vektor-MOKE

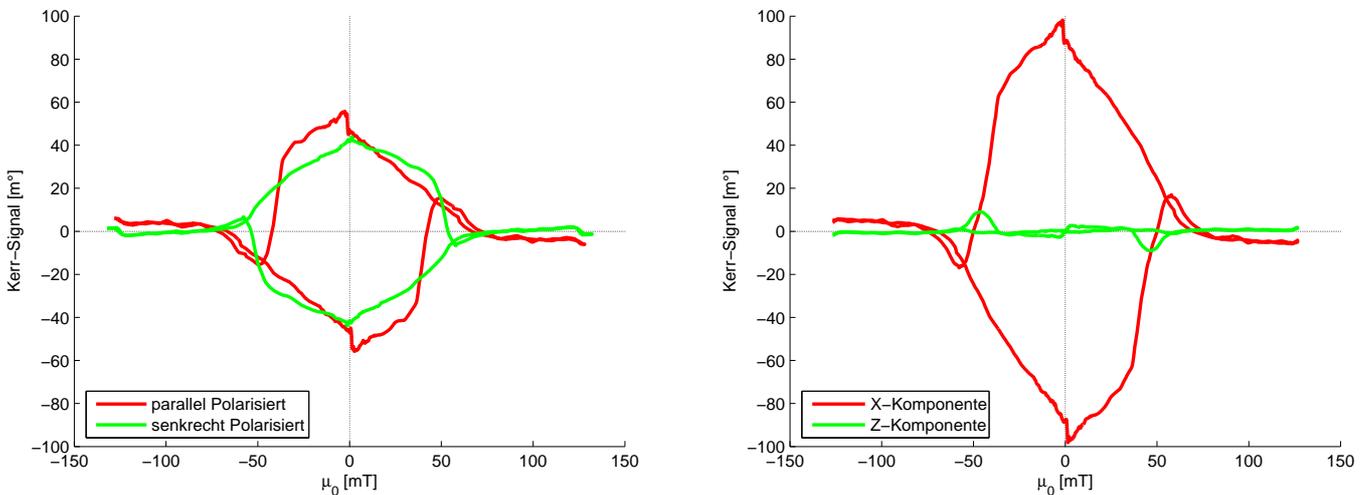
In diesem Kapitel werden die Ergebnisse vorgestellt, die aus Verrechnungen der MOKE-Signale hervorgehen. Dazu gehören die aufgespaltenen Komponenten des Magnetisierungsvektors  $m_x$ ,  $m_y$  und  $m_z$ , sowie Betrag und Ausrichtungswinkel des Magnetisierungsvektors unter Vernachlässigung der  $m_z$ -Komponente.

### 5.4.1 Die Raumkomponenten des Magnetisierungsvektors

Um die Raumkomponenten des Magnetisierungsvektors zu erhalten bedienen wir uns der Gleichungen [2.13](#) und [2.14](#). Die  $m_z$ -Komponente ist der  $m_x$ - und  $m_y$ -Komponente überlagert. Die [Abbildungen 5.11](#) und [5.12](#) zeigen die einzelnen Komponenten, sowie die Kurven aus denen sie errechnet wurden.



**Abbildung (5.11):** Trennung von  $m_x$ - und  $m_z$ -Komponente. Links sind die verrechneten Kurven aus den Messungen mit senkrecht und parallel polarisiertem Licht. Rechts die getrennten Signale,  $m_x$ - und  $m_z$ -Komponente des Magnetisierungsvektors. Die  $m_z$ -Komponente ist hier zu groß dargestellt, da sie eine stärkere KERR-Drehung erzeugt als die  $m_x$ -Komponente.



**Abbildung (5.12):** Trennung von  $m_y$ - und  $m_z$ -Komponente. Links sind die verrechneten Kurven aus den Messungen mit senkrecht und parallel polarisiertem Licht. Rechts die getrennten Signale der  $m_y$ - und  $m_z$ -Komponente. Auch hier ist die  $m_z$ -Komponente im Vergleich zur  $m_y$ -Komponente zu groß dargestellt.

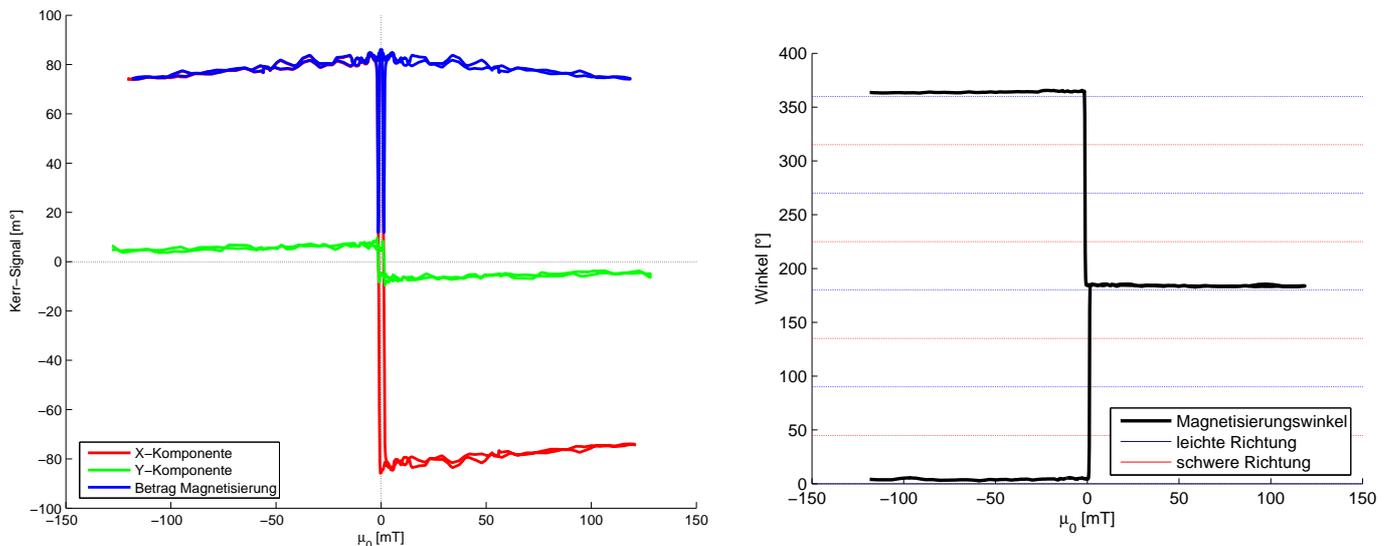
Hierzu ist zu sagen, dass das Signal der  $m_z$ -Komponente einen größeren KERR-Effekt erzeugt als die anderen zwei Komponenten, da die  $m_z$ -Komponente den polaren MOKE erzeugt. Der polare MOKE bewirkt eine größere KERR-Drehung als der lineare MOKE, den  $m_x$ - und

$m_y$ -Komponente erzeugen.

Die Vernachlässigung der  $m_z$ -Komponente ist nach den Abbildungen 5.11 und 5.12 durchaus gerechtfertigt.

#### 5.4.2 Betrag und Ausrichtung des Magnetisierungsvektors

Unter Vernachlässigung der  $m_z$ -Komponente können wir nun den Betrag und die Ausrichtung des Magnetisierungsvektors errechnen. Durch diese Verrechnung lässt sich das Verhalten des Magnetisierungsvektors während der gesamten Aufnahme einer Magnetisierungskurve beobachten, für jeden Drehwinkel der Probe.

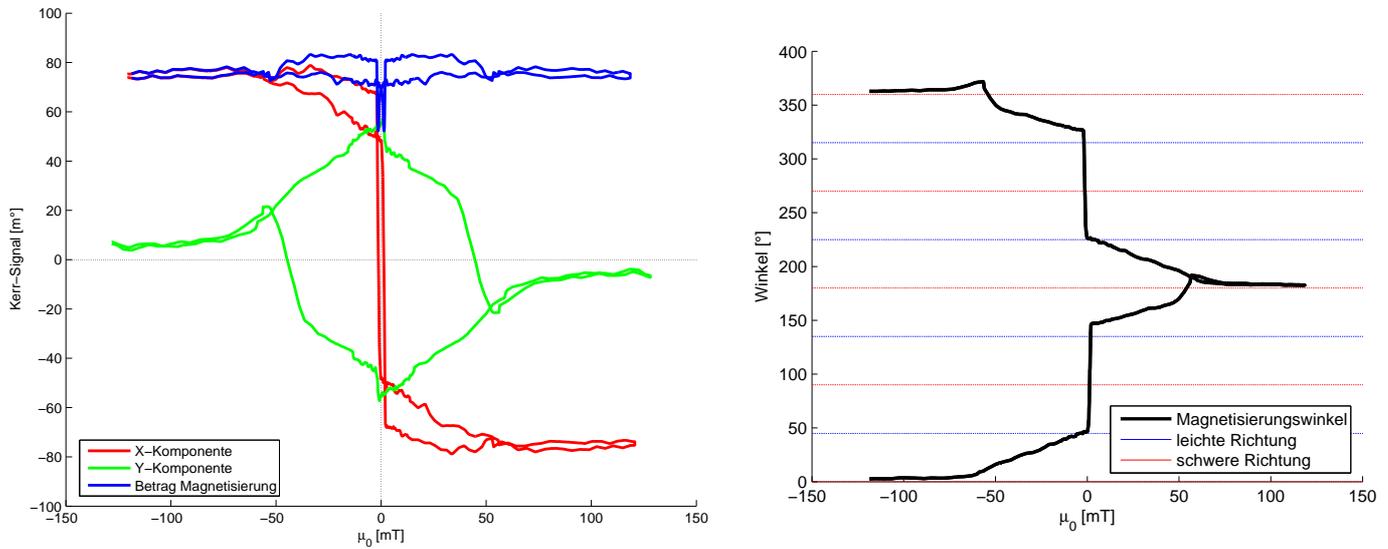


**Abbildung (5.13):** Magnetisierungsvektor im Drehwinkel von  $45^\circ$ . Es handelt sich um eine magnetisch leichte Richtung für das Material. Links: Die verrechneten Kurven, das heißt  $m_x$ - und  $m_y$ -Komponente, und der Betrag des Magnetisierungsvektors. Rechts: Der Winkel des Magnetisierungsvektors zur Richtung des angelegten Magnetfeldes.

Abbildung 5.13 zeigt, dass der Magnetisierungsvektor fast während der gesamten Messung in die Richtung des angelegten Magnetfeldes zeigt. Der Betrag des Magnetisierungsvektors geht stark zurück in dem Bereich in dem das Magnetfeld gegen Null geht, was von einem Domänenzerfall zeugt. Während des Wechsels der Magnetfeldrichtung werden die magnetisch schweren Richtungen vom Magnetisierungsvektor übersprungen.

In einer magnetisch schweren Richtung, wie in Abbildungen 5.14 gezeigt, dreht sich der Magnetisierungsvektor bei abnehmendem Magnetfeld aus dieser Richtung hinaus, und in eine magnetisch leichte Richtung hinein. Der Betrag des Magnetisierungsvektors geht nicht mehr so stark zurück, was bedeutet, dass er nicht mehr in so viele Domänen zerfällt, sondern eine große Domäne tatsächlich die Richtung ändert.

Auf der CDROM welche dieser Arbeit beigelegt wurde befinden sich unter anderem einige Video-Dateien, welche das Verhalten des Magnetisierungsvektors als animierten Pfeil darstellt, für magnetisch leichte und schwere Richtungen.



**Abbildung (5.14):** Magnetisierungsvektor im Drehwinkel von  $89^\circ$ . Der Betrag des Magnetisierungsvektors wird im Bereich von  $\mu_0 H \approx 0$  nicht so klein wie bei einer Messung in magnetisch leichter Richtung. In der Abbildung des Winkels (rechts) ist gut zu erkennen, wie sich der Vektor aus der magnetisch schweren in die magnetisch leite Richtung dreht, mit abnehmendem Magnetfeld.



## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Software wurde entwickelt, um die Auswertung von magnetooptischen Daten schneller und effektiver zu machen. Dieses Ziel wurde erreicht. Trotzdem gibt es einige Punkte zur Erweiterung des Programms, welche jedoch nicht mehr im Rahmen dieser Bachelorarbeit durchgeführt werden. Einige dieser Punkte wurden bereits angesprochen. Dazu gehören

### **Programmerweiterungen:**

Einige Erweiterungen sowie „kosmetische“ Änderungen des Programms wären sinnvoll

- Weitere Dateitypen wie zum Beispiel MATLAB-Figures importierbar und exportierbar machen
- Eine Option „save Session“, mit der eine Arbeitssituation vollständig gespeichert und später wiederhergestellt werden kann
- Vereinfachung der Prozedur, aus einem Errechnetem Signal einen neuen Datensatz zu erstellen

### **Laufzeitoptimierung:**

Besonders bei Bearbeitung von Datensätzen mit hoher Auflösung, also vielen Daten, kommt es teilweise zu Verzögerungen im Programm. Um die Software schneller und schlanker zu machen wäre es notwendig einige Algorithmen von Berechnungen und Verrechnungen zu überarbeiten und zu optimieren.

### **Refactoring:**

Während der Entwicklungszeit wurden einige Punkte festgelegt, die später wieder verändert, erweitert oder wieder abgeschafft wurden. Daraus ergaben sich Variablen- und Parameternamen sowie Programmstrukturen die für Situationen ausgelegt waren die wieder geändert wurden. Diese Namen und Strukturen müssten neu angepasst werden.

Außerdem müssen Interfaces geschaffen werden, durch die eine Erweiterung des Programms standardisiert werden kann.

Unter „Refactoring“ versteht man eine Verbesserung der Programm-Struktur. Dies erhöht vor allem die Lesbarkeit des Quelltextes, was eine Fehlerdiagnose erheblich vereinfacht. Da das „Refactoring“ viel Zeit kostet, ohne das eine sichtbare Änderung am Programm feststellbar ist, konnte es in Rahmen dieser Arbeit nicht vollständig durchgeführt werden, da die Benutzbarkeit der Software im Vordergrund stand.

Neben Verbesserungen der Software, bzw. des Quelltextes, würden auch einige Änderungen am Aufbau der Apparatur zur Aufnahme von KERR-Signalen, bessere Ergebnisse liefern. Ein zusätzlicher Magnet, senkrecht zum bereits vorhandenen Magneten ausgerichtet installiert, sowie ein neuer Lock-In-Verstärker würden die Geschwindigkeit und Qualität der Messungen stark Erhöhen.

## Literatur

- [1] TERUNOBU MIYAZAKI, Nobuki T.: Giant magnetic tunneling effect in Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe junction. In: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 139 (1995), S. L231–L234
- [2] JULLIÈRE, Michel: Tunneling between ferromagnetic films. In: *Physics Letters A* 54 (1975), S. 225–226
- [3] KERR, John: On Rotation of the Plane of Polarisation by Reflecting from the Pole of a Magnet. In: *Philosophical Magazine and Journal of Science* 3 (1877), S. 321–343
- [4] JONES, R. C.: A new calculus for the treatment of optical systems. In: *Journal of the Optical Society of America* 31 (1941), S. 488–493
- [5] ROBINSON, Curtis C.: Longitudinal Kerr Magneto-Optic Effect in Thin Films of Iron, Nickel and Permalloy. In: *Journal of the Optical Society of America* 53, 6 (1963), S. 681–689
- [6] VISNOVSKY, Stefan: Optics of Magnetic Multilayers. In: *Czechoslovak Journal of Physics* 41 (1991), S. 663–694
- [7] HULME, H.R.: The Faraday Effect in Ferromagnetics. In: *Proc. R. Soc. London* A135 (1932), S. 237–257
- [8] SMITH, D.: Magneto-optical scattering from multilayer magnetic and dielectric films. In: *J. Mod. Opt.* 12:1 (1965), S. 13–46
- [9] S. TEITLER, B.W. H.: Refraction in stratified, anisotropic media. In: *J. Opt. Soc Am* 60:6 (1970), S. 830–834
- [10] BERREMAN, D. W.: Optics in stratified and anisotropic media: 4x4 Matrix Formulation. In: *J. Opt. Soc. Am* 62:4 (1972), S. 502–510
- [11] VAVASSORI, Paolo: Polarization modulation technique for magneto-optical quantitative vector magnetometry. In: *Applied Physical Letters* 77, 11 (2000), S. 1605–1607
- [12] BARDENHAGEN, Hauke: *MOKE Messungen an ferromagnetischen epitaktischen Schichten*, Universität Osnabrück, Diplomarbeit, 2009

## Abbildungsverzeichnis

2.1	Skizze des magnetooptischen KERR-Effekts	3
2.2	Skizze von KERR-Winkel und KERR-Elliptizität	4
2.3	Beispiel einer Magnetisierungskurve	6
2.4	Skizze der MOKE-Arten	7
2.5	Darstellung von magnetisch leichter und schwerer Richtung	8
2.6	Überlagerung von LMOKE und QMOKE	9
2.7	Messen der $m_y$ -Komponente	12
2.8	Beispielverlauf eines MOKE-Signals mit senkrechtem Magneten	12
3.1	Schema des Versuchsaufbaus	13
3.2	Skizze Fe auf MgO	14
4.1	Beispiel für die Klasse GraphCanvas	18
4.2	Beispiel für die Klasse PolarGraphCanvas	18
4.3	Darstellung des Grafik-Panels mit Beispielkurven	19
4.4	Beispiel einer gefüllten JList	20
4.5	Ansicht des Checkbox-Bereiches	21
4.6	Abbildung des Button-Menüs	22
4.7	Abbildung des Start-Menüs der Software	23
4.8	Abbildung des Tool-Menüs der Software	24
5.1	Auswertung von LMOKE- und QMOKE-Signal mit parallelem Magnetfeld	27
5.2	Auswertung von LMOKE- und QMOKE-Signal mit senkrechtem Magnetfeld	28
5.3	Beispiel zur richtigen Verschiebung der Kurven	29
5.4	Beispiel zur falschen Verschiebung der Kurven	30
5.5	Anisotropiebetrachtung von $m_x$ -Kurven	31
5.6	Polarplot der Remanenzen von $m_x$ -Kurven	31
5.7	Anisotropiebetrachtung von $m_y$ -Kurven	32
5.8	Polarplot der Remanenzen von $m_y$ -Kurven	33
5.9	Polarplot der Koerzitivfeldstärken von $m_y$ -Kurven	33
5.10	Karthesischer Plot der Koerzitivfeldstärken von $m_y$ -Kurven	34
5.11	Trennung von $m_x$ - und $m_z$ -Komponente	35
5.12	Trennung von $m_y$ - und $m_z$ -Komponente	35
5.13	Magnetisierungsvektor im Drehwinkel von $45^\circ$	36
5.14	Magnetisierungsvektor im Drehwinkel von $89^\circ$	37