



Implementation der FORC-Methode an  
Mikro-Hall-Sensoren

Bachelorarbeit

Paul Eibisch

vorgelegt am Fachbereich Physik  
der Goethe-Universität Frankfurt am Main,

den 31.08.2015

Erstprüfer: Prof. Dr. Müller

Zweitprüfer: Prof. Dr. Lang



# Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>1 Theoretische Grundlagen</b>	<b>2</b>
1.1 Makroskopische Beschreibung des Magnetismus . . . . .	2
1.2 Mikroskopische Klassifizierung magnetischer Systeme . . . . .	3
1.3 Wechselwirkungen . . . . .	4
1.4 Magnetische Ordnungsstrukturen . . . . .	5
1.5 Magnetische Anisotropie . . . . .	6
1.6 Domänenbildung . . . . .	7
1.7 Magnetische Hysterese . . . . .	8
1.8 Praktische Durchführung der FORC-Methode . . . . .	10
1.9 Interpretation von FORC-Diagrammen . . . . .	11
<b>2 Verwendete Messgeräte</b>	<b>16</b>
2.1 Hall-Effekt . . . . .	16
2.2 Aufbau der Mikro-Hall-Sensoren . . . . .	18
2.3 Verwendete Messtechnik . . . . .	19
2.4 Ortsabhängige Streufeldmessung . . . . .	20
2.5 Genutztes Kryostatsystem . . . . .	21
2.6 Funktionsweise und Aufbau eines VSMs . . . . .	23
<b>3 Messungen an einer Floppy Disk</b>	<b>25</b>
3.1 Gewählte Probe . . . . .	25
3.2 Messungen am VSM . . . . .	27
3.3 Verwendeter Mikro-Hall-Sensor . . . . .	31
3.4 Messungen am Mikro-Hall-Sensor . . . . .	33
<b>4 Auswertung der Floppy Disk-Messungen</b>	<b>37</b>
4.1 Vergleich zwischen Literatur und VSM-Messung . . . . .	37
4.2 Gegenüberstellung der Messungen am VSM . . . . .	39
4.3 Streufeldsimulation . . . . .	41
4.4 Analyse der FORC-Messungen bei $T = 15$ K . . . . .	43
<b>5 Messungen an Chromdioxid</b>	<b>47</b>
5.1 Untersuchtes Material . . . . .	47
5.2 Aufbau des Experiments . . . . .	48
5.3 Resultate der Messungen . . . . .	49
5.4 Auswertung der Messdaten . . . . .	50
<b>Zusammenfassung</b>	<b>52</b>
<b>Ausblick</b>	<b>53</b>
<b>Literatur- und Abbildungsverzeichnis</b>	<b>54</b>
<b>Erklärung und Danksagung</b>	<b>58</b>



# Einleitung

Der Magnetismus ist wohl eines der seit längstem bekannten und faszinierendsten physikalischen Phänomene, das die Menschheit beschäftigt. Bereits in der griechischen Antike war eine damals noch unverstandene zwischen eisenhaltigen Materialien wirkende Kraft bekannt. Und selbst nach mehr als tausend Jahren werden Menschen noch immer durch das Verhalten magnetischer Körper begeistert. Trotz eines lückenhaften Verständnisses dieses Phänomens und dem Ausbleiben einer vollständigen theoretischen Beschreibung bis hin zur heutigen Zeit wurden über die Jahrtausende eine Reihe von wohlbekanntem Anwendungen wie ferromagnetische Kompassnadeln, magnetische Leseköpfe und Speichermedien realisiert, die das Leben der Menschen in der jeweiligen Zeit stark geprägt haben. Diese Errungenschaften sind gerade in den letzten Jahrzehnten auf eine intensive, experimentbasierte Forschung zurückzuführen. Insbesondere für die Entwicklung letztgenannter Speichermedien wird die Erforschung von Ummagnetisierungsprozessen mikroskopischer magnetischer Strukturen immer wichtiger.

Eine Möglichkeit solche Prozesse an magnetischen Mikro- und Nanostrukturen zu untersuchen, bietet der Einsatz von Mikro-Hall-Sensoren. Diese Sensoren basieren auf einer Halbleiter-Heterostruktur, in deren Inneren ein zweidimensionales Elektronengassystem besteht. Das Streufeld einer auf der Sensoroberfläche platzierten magnetischen Probe erzeugt aufgrund des klassischen Hall-Effekts eine Hall-Spannung, die als Messsignal verwendet wird. Aus der gemessenen Hall-Spannung kann direkt auf die Magnetisierung der Probe zurück geschlossen werden.

Da einem Ummagnetisierungsprozess verschiedene mikroskopische Wechselwirkungen zugrunde liegen können, benötigt die vollständige Erforschung dieser Vorgänge eine geeignete Untersuchungsmethode, die eine getrennte Analyse eben dieser Wechselwirkungen ermöglicht. Diese Anforderungen werden von der sogenannten FORC-Methode (engl. first order reversal curve), einer ursprünglich geologischen Untersuchungsmethode, abgedeckt. Innerhalb einer FORC-Messung wird durch Aufzeichnung der Probenmagnetisierung als Funktion externer Magnetfelder ein Satz von über hundert Kurven bei unterschiedlichem Startfeld gewonnen, der anschließend zur Auswertung in ein FORC-Diagramm transformiert werden kann.

In dieser Arbeit wird anhand von vergleichenden Messreihen an einem VSM (engl. vibrating sample magnetometer) sowie an Mikro-Hall-Sensoren beschrieben wie sich die FORC-Methode an eben diesen Sensoren implementieren lässt. Hierzu ist der Hauptteil der Arbeit in fünf Kapitel gegliedert. Das erste Kapitel behandelt jene theoretischen Grundlagen des Magnetismus, die für das Verständnis der magnetischen Hysterese benötigt werden. Ausgehend davon werden die Durchführung der FORC-Methode sowie zugehörige theoretische Modelle erläutert. Im zweiten Kapitel werden der Aufbau und die Funktion der für diese Arbeit verwendeten Messgeräte erklärt. Folgend wird im dritten Kapitel zunächst die untersuchte Probe, eine Floppy Disk, vorgestellt, woran sich eine Beschreibung der durchgeführten Messungen und deren Ergebnisse anknüpft. Schließlich behandelt das vierte Kapitel eine weiterführende Auswertung der Messungen an der Floppy Disk, sodass im fünften Kapitel analoge Untersuchungen an Chromdioxid besprochen werden können. Die Arbeit wird mittels einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf mögliche zukünftige FORC-Messungen an Mikro-Hall-Sensoren abgeschlossen.

## Zusammenfassung

Zu Beginn dieser Arbeit konnte aufbauend auf grundlegenden Erläuterungen zum Magnetismus fester Körper ein elementares Verständnis für die Durchführung und theoretische Deutung der FORC-Methode vermittelt werden. Ergänzend hierzu wurden nachfolgend die für die Experimente genutzten Messgeräte beschrieben, wobei insbesondere die Struktur, Funktionsweise und praktische Anwendung der Mikro-Hall-Sensoren erörtert wurde. Damit konnten die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen vorgestellt werden, mit denen die Umsetzung der FORC-Methode an Mikro-Hall-Sensoren ausgiebig erprobt werden sollten. Gegenstand dieser Messungen war eine Floppy Disk, die bereits durch frühere Untersuchung von C. Pike et al. intensiv erforscht worden war [9]. Durch FORC-Messungen dieser Probe am VSM bei Raumtemperatur konnten zunächst Resultate aus der Literatur erfolgreich reproduziert werden. Weiterführende Untersuchungen bei Temperaturen von  $T = 15$  K lieferten eine Referenz für Messungen, die mittels der Mikro-Hall-Magnetometrie erfolgten. Hierbei wurde im Übergang von Raum- zu Tieftemperaturen eine Verschiebung der Charakteristika zugehöriger FORC-Diagramme beobachtet, die nach theoretischen Modellen umfassend erklärt werden konnten.

Bevor erste FORC-Messungen mit Mikro-Hall-Sensoren realisiert wurden, erlaubten unterschiedliche Untersuchungen die Charakterisierung eines vorab ausgewählten Sensors und somit die Kontrolle dessen Funktionalität. Die Güte nachfolgender mittels Mikro-Hall-Magnetometrie durchgeführter FORC-Messungen konnte durch eine Gegenüberstellung zu analytischen Streufeldsimulationen gesichert werden. Anhand jenen Messungen und der daraus generierten FORC-Diagramme wurde zum einen aufgezeigt, dass die FORC-Methode mit Mikro-Hall-Sensoren grundsätzlich angewendet werden kann und im Vergleich zu standardisierten Messverfahren qualitativ gleichwertige Ergebnisse gewonnen werden können. Zum anderen konnte der Einfluss der Sweep-Rate auf die erhaltenen FORC-Diagramme analysiert werden, anhand dessen festgestellt wurde, dass eine zu groß gewählte Sweep-Rate die Qualität der Diagramme merklich verringerte.

Nachdem erfolgreich eine Technik zur Durchführung von FORC-Messungen an Mikro-Hall-Sensoren implementiert wurde, fanden weitere magnetfeldabhängige Untersuchungen am Material Chromdioxid ( $\text{CrO}_2$ ) statt, dessen Erforschung gegenüber der Floppy Disk von Relevanz in der aktuellen Grundlagenforschung ist. Die FORC-Messungen an  $\text{CrO}_2$  erlaubten die Auswirkung von Signalstärke und Schrittweite der Felder  $H_a$  und  $H_b$  auf die anschließend berechneten FORC-Diagramme zu bestimmen. Dadurch konnte aufgezeigt werden, dass selbst bei verminderter Signalstärke mittels der Mikro-Hall-Magnetometrie zufriedenstellende FORC-Messungen umgesetzt werden können und dass eine Steigerung der Auflösung durch eine Reduktion der Magnetfeldschrittweite erreicht werden kann.

Allerdings wurde durch diese Messungen ebenfalls deutlich, dass eine Interpretation der FORC-Diagramme komplexerer Systeme nicht im Rahmen des simplen Preisach Modells erfolgen kann und daher wie im folgenden Ausblick beschrieben für eine weiterführende Analyse von FORC-Messungen ein angemessenes Verständnis der Ummagnetisierungsprozesse nötig sein wird.

## Ausblick

In der vorliegenden Arbeit konnte eine Methode erläutert und erprobt werden, die es ermöglicht FORC-Messungen mit Mikro-Hall-Sensoren zu realisieren. Dies gestattet es gegenüber konventionellen Untersuchungsverfahren in künftigen Arbeiten Ummagnetisierungsprozesse sowie unterschiedliche magnetische Wechselwirkungen an mikro- oder nanoskaligen Proben intensivst zu erforschen.

Um diese Technik weiter zu optimieren, können in der Zukunft unter verschiedenen Bedingungen systematische FORC-Messungen an physikalisch einfachen und gut verstandenen Systemen erfolgen. Dadurch sollte es möglich sein den Einfluss von Sweep-Rate, Signalstärke, Schrittweite der Magnetfelder, FORC-Zahl und weiterer Parameter auf die Resultate der Untersuchungen zu quantifizieren und so die günstigsten Einstellungen für zukünftige FORC-Messungen zu bestimmen.

Zur weiteren Steigerungen der Effizienz von FORC-Messungen an Mikro-Hall-Sensoren kann eigens ein Programm erstellt werden mittels dem akquirierte Messdaten direkt und unkompliziert in ein FORC-Diagramm transformiert werden können. Ein solches Programm würde die langwierige Formatierung der FORC-Daten und die zusätzliche Verwendung von "FORCinel" zur Auswertung der Messungen erübrigen.

Demzufolge sollte die Mikro-Hall-Magnetometrie die Umsetzung der FORC-Methode in exzellenter Art und Weise erlauben. Unter Verwendung der Kryostat- und Gradiometrie-technik können in zukünftigen Projekten erweiterte Untersuchungen verschiedenster magnetischer Proben bei variablen Temperaturen und Orientierungen zwischen dem externen Magnetfeld und der Probe durchgeführt werden. In Zusammenarbeit mit anderen Arbeitsgruppen, die im Gebiet der Probenherstellung tätig sind, könnten außerdem die Auswirkungen der chemischen Zusammensetzung sowie der Geometrie auf die magnetischen Eigenschaften der Proben anhand von FORC-Messungen genauer untersucht werden.

Ebenso dürften Kooperationen mit Gruppen der theoretischen Physik die zuvor erörterte Problematik der angemessenen Deutung von FORC-Diagrammen komplexerer Systeme lösen. Nur durch ein tiefer gehendes Verständnis des Magnetismus der erforschten Materialien und einer hiervon ausgehenden geeigneten Simulation der relevanten Ummagnetisierungsprozesse wird in Zukunft einerseits eine vollständige Interpretation der FORC-Messungen möglich sein und andererseits eine quantitative Analyse zugehöriger FORC-Diagramme neue Erkenntnisse erbringen.