

VORTEX DYNAMICS
STUDIED BY
TIME-RESOLVED X-RAY MICROSCOPY

VON DER FAKULTÄT MATHEMATIK UND PHYSIK DER UNIVERSITÄT STUTTGART
ZUR ERLANGUNG DER WÜRDE EINES DOKTORS DER NATURWISSENSCHAFTEN
(DR. RER. NAT.) GENEHMIGTE ABHANDLUNG

VORGELEGT VON
KANG WEI CHOU
AUS MOUSCRON (BELGIEN)

HAUPTBERICHTER: PROF. DR. G. SCHÜTZ
MITBERICHTER: PROF. DR. M. MEHRING

TAG DER MÜNDLICHEN PRÜFUNG: 3. AUGUST 2007

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR METALLFORSCHUNG
STUTTGART • 2007

CONTENTS

Acknowledgements	vii
Contents	ix
List of Abbreviations	xi
Zusammenfassung	xv
1 To cut a long story short	1
1.1 Applications of magnetism	1
1.2 Time scales in magnetism	2
1.3 Magnetic imaging techniques	4
1.4 Outline	6
2 Magnetism in confined structures	7
2.1 Magnetization precession and micromagnetics	8
2.2 The magnetic microstructure	12
2.2.1 Magnetic domains and domain walls	12
2.2.2 Magnetic thin film structures of ideally soft materials	15
2.3 Fast magnetization dynamics	16
2.3.1 Spin dynamics of the magnetic vortex state	18
2.3.2 Micromagnetic simulations	20
3 X-rays: theoretical concepts and applications	21
3.1 Interaction of photons with matter	22
3.2 Soft x-ray imaging	24
3.2.1 XMCD as magnetic contrast mechanism	24
3.2.2 X-ray microscopy methods	25
3.3 Synchrotron radiation	25
3.3.1 Undulator radiation	26
3.3.2 Monochromator	29
3.3.3 Time structure of synchrotron radiation	30
3.4 Scanning transmission x-ray microscopy	31
3.4.1 Zone plate	33

3.4.2	Detection system	35
3.5	Time-resolved scanning transmission x-ray microscopy	37
3.5.1	Sample and stripline configuration for in-plane field excitation	38
3.5.2	Excitation types	39
3.5.3	Experimental setup and data acquisition	42
4	Characterization of ferromagnetic vortex structures	47
4.1	In-plane magnetization of a vortex structure	47
4.1.1	Setup considerations	47
4.1.2	Magnetic contrast at one specific polarization	48
4.1.3	Magnetic contrast - dichroism	49
4.1.4	Element specificity	49
4.2	Out-of-plane magnetization of a vortex structure	52
4.2.1	Setup considerations	52
4.2.2	Magnetic contrast of the vortex core	52
5	Magnetization dynamics in ferromagnetic vortex structures	55
5.1	Differential imaging of magnetic vortex structures	56
5.2	Gyrotropic mode	58
5.2.1	Resonant behaviour under pulsed excitation	59
5.2.2	Resonant sine excitation	63
5.2.3	Driven oscillatory behaviour under burst excitation	70
5.3	Dynamics in coupled ferromagnetic layers	73
5.4	Non-linear response of magnetic vortex structures	75
5.4.1	Vortex core reversal by sine excitation	76
5.4.2	Hysteresis behaviour I: multiple levels	81
5.4.3	Vortex core reversal by burst excitation	83
5.4.4	Vortex core reversal – mechanism	87
5.4.5	Hysteresis behaviour II: circular structures	91
5.4.6	Hysteresis behaviour III: breaking of symmetry	94
5.4.7	Discussion	99
6	Conclusions and perspectives	103
6.1	Conclusions	103
6.2	Perspectives	104
A	The Advanced Light Source (ALS)	109
B	Stripline characterization	111

Bibliography	113
List of Figures	123
List of Tables	127
List of publications	129
Curriculum vitae	131

ZUSAMMENFASSUNG

*“...also noch einmal, du hast völlig Recht aber
gib mir ein Alternativvorschlag ...”*

— HERMANN STOLL

Fortschritte in der Herstellung nanostrukturierter magnetischer Schichten und Schichtsysteme haben in jüngster Zeit neue Entdeckungen hervorgebracht, so unter anderem den Riesenmagnet-Widerstands-Effekt (GMR: giant magnetoresistance) und das spinabhängige quantenmechanische Tunneln von Elektronen (TMR: tunneling magnetoresistance). Dadurch wurden neue Anwendungen möglich, wie die heute gebräuchlichen GMR-Leseköpfe in Festplatten oder die nichtflüchtigen magnetischen Speicher (MRAM: magnetic random access memory). Ein vollständiges Verständnis der Magnetisierungsdynamik in nanostrukturierten ferromagnetischen dünnen Schichten steht allerdings noch aus. Zudem verlangt die magnetische Datenspeicherung nach immer kleineren magnetischen Strukturen und erhöhten Schreib- und Lesegeschwindigkeiten. Möchte man dieser Entwicklung folgen, müssen neue technologische Konzepte für zukünftige Anwendungen entworfen werden. Eine gründliche Kenntnis der dynamischen Eigenschaften wird zunehmend wichtiger, wofür geeignete experimentelle Untersuchungsmethoden unentbehrlich sind. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die Magnetisierungsdynamik an nanostrukturierter ferromagnetischen Schichten mit Hilfe eines zeitaufgelösten magnetischen Raster-Transmissions-Röntgenmikroskops (STXM: scanning transmission x-ray microscope) untersucht.

Nach einer kurzen Einführung zur Motivation der Arbeit, wird zuerst ein Überblick über die physikalisch-theoretischen Grundlagen des Mikromagnetismus gegeben, die durch die mikromagnetische Kontinuumstheorie beschrieben werden. Dabei wird sowohl auf die statische Theorie eingegangen als auch auf die dynamischen Gleichungen, die zur Lösung zeitabhängiger magnetischer Probleme benötigt werden. Danach wird die Spindynamik in magnetischen Wirbelstrukturen (Vortexstrukturen) behandelt. In ferromagnetischen Strukturen,

in deren Zentrum sich ein einzelner Vortextkern befindet, treten verschiedene Anregungsmoden auf, die durch externe zeitabhängige Magnetfelder beeinflusst werden können. Insbesondere regen sinusförmige Magnetfelder in der Strukturebene die gyrotrope Mode an, bei der die Vortexstruktur rund um das Zentrum kreiselt. Der Drehsinn dieser Bewegung hängt ausschließlich von der Richtung der Magnetisierung des Vortextkerns (Polarisation) ab, die nach oben oder nach unten zeigen kann. Am Ende dieses Abschnitts wird auf die Lösung mikromagnetischer Probleme mit Hilfe mikromagnetischer Simulationen eingegangen.

Die wichtigsten Methoden zur zeitaufgelösten Abbildung magnetischer Domänen werden im nächsten Abschnitt der Arbeit vorgestellt, darunter insbesondere die magnetische Raster-Transmissions-Röntgenmikroskopie auf der Basis des zirkularen magnetischen Röntgendichroismus (XMCD: x-ray magnetic circular dichroism). Der Aufbau des ALS Speicherrings wird beschrieben wie auch die beim Experiment verwendete Synchrotronstrahlung mit ihren herausragenden Eigenschaften. Die Implementierung zeitlich aufgelöster stroboskopischer Messungen an einem magnetischen Raster-Transmissions-Röntgenmikroskop wird dargestellt und verschiedene Anregungsarten bei stroboskopischen Messungen werden erörtert. Schnelle Magnetfeldpulse erzeugen eine breitbandige Anregung der ferromagnetischen Struktur, so dass viele Anregungsmoden beobachtet werden können. Spezifische Moden können dagegen gezielt angeregt werden mit einem Wechselfeld mit einer Frequenz nahe ihrer Eigenfrequenzen. Beide Anregungsarten lassen sich auch kombinieren, indem ein gepulstes Wechselfeld die Probe aus dem Grundzustand heraus anregt.

Im nächsten Abschnitt werden die experimentellen Messergebnisse vorgestellt und anschließend diskutiert. Die statische Magnetisierungsverteilung von Vortexstrukturen wird als erstes beschrieben. Untersucht wurden Strukturen aus Permalloy ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) mit einem einzelnen Vortextkern. Dabei wurde der magnetische Kontrast sowohl in der Schichtebene als auch senkrecht dazu beobachtet und die Breite des Vortextkerns sowie der maximale magnetische Kontrast im Vortextkern abgeschätzt. Auch Mehrschichtsysteme, bestehend aus zwei ferromagnetischen Schichten (Permalloy & Co) mit einer nichtferromagnetischen Cu Zwischenschicht, wurden untersucht. Hier treten durch die magnetische Kopplung zwischen den ferromagnetischen Schichten komplizierte Magnetisierungsverteilungen auf.

In einem weiteren Abschnitt der Arbeit werden die Ergebnisse dynamischer Messungen vorgestellt. Als erstes wird eine differenzielle Abbildungsmethode

beschrieben, mit deren Hilfe die gyrotrope Bewegung in den Vortexstrukturen mit verbessertem Signal-Rausch-Verhältnis untersucht werden können. Der magnetische Kontrast sowohl in der Schichtebene als auch senkrecht dazu wurde gemessen. Vortexstrukturen in verschiedenen Geometrien, mit unterschiedlicher Dicke und Durchmesser, wurden mit schnellen Magnetfeldpulsen angeregt. Aus dem Relaxationsprozess konnte dabei die Resonanzfrequenz abgeleitet werden. Es ergab sich ein linearer Zusammenhang zwischen der Resonanzfrequenz und der Dicke sowie dem Kehrwert des Durchmessers der Probe. Die Resonanzfrequenz verläuft auch linear mit der Dicke der Probe. Daraufhin wurde die gyrotrope Mode durch ein magnetisches Wechselfeld mit einer Frequenz in der Nähe der Resonanzfrequenz angeregt. Hierbei konnte eine Veränderung des magnetischen Kontrasts senkrecht zur Strukturebene beobachtet werden, die eine Verformung des Vortexkerns anzeigt. Die Ausdehnung der Trajektorien des Vortexkerns bei Variation der Amplitude des Wechselfeldes wurde ebenfalls untersucht. Für niedrige Amplituden ergibt sich dabei ein annähernd linearer Zusammenhang.

Nichtlineare Effekte treten bei einer leichten Erhöhung der Amplitude auf und bewirken ein Umschalten der Magnetisierungsrichtung des Vortexkerns. Dieses Umschalten konnte nachgewiesen werden sowohl über die Änderung des Drehsinns der gyrotropen Bewegung als auch direkt über die Änderung des magnetischen Kontrasts senkrecht zur Strukturebene. Die Schwellen für dieses Schalten, die für die praktische Anwendung in magnetischen Speicherelementen von großer Bedeutung sind, wurden ausführlich untersucht. Bei schneller Änderung der Amplitude des Wechselfeldes konnten Hysterese-Effekte festgestellt werden. Ein Umschalten des Vortexkerns konnte auch beobachtet werden bei Anregung durch eine einzelne Periode eines Hochfrequenzfeldes. Die Erklärung für das in dieser Arbeit beschriebene Schalten der Polarisation des Vortexkerns besteht in einer Erzeugung und Vernichtung eines Vortex-Antivortex-Paars, wie durch mikromagnetische Simulationen gezeigt werden konnte.

Die Geschwindigkeit (\sim Ausdehnung der Trajektorie) des Vortexkerns wurde als Funktion der Amplitude des Wechselfeldes bestimmt. Bei der Schaltschwellen werden Sprünge in der Geschwindigkeit beobachtet. In einem bestimmten Amplituden-Bereich stellt man auch einen großen Unterschied in der Geschwindigkeit fest, je nachdem ob der Vortexkern nach oben oder unten orientiert ist. Dieser Unterschied deutet möglicherweise auf eine Abweichung der Resonanzfrequenz der gyrotroper Mode hin, in Abhängigkeit von der Polarisation (Magnetisierungsrichtung) des Vortexkerns.

Die gyrotrope Bewegung bei Anregung mit einem Wechselfeld wurde ebenfalls in Mehrschichtsystemen, bestehend aus zwei ferromagnetischen Schichten (Permalloy & Co) und einer nichtferromagnetischen Cu Zwischenlage, untersucht. Durch die Kopplung der beiden magnetischen Schichten wird die gyrotrope Bewegung in diesen Schichten vollständig verändert. Verschiedene dynamische Effekte konnten beobachtet werden zwischen beiden ferromagnetischen Schichten, aber es handelt sich nicht mehr um eine einfache Gyrationbewegung.

Abschließend wird ein Ausblick auf zukünftige Messungen gegeben und mögliche Verbesserungen der Messanordnung erörtert.

CHAPTER 1

TO CUT A LONG STORY SHORT

“Just relax, you might enjoy it!”

— ALEKSANDAR PUZIĆ

Magnetism provided astonishing scientific discoveries combined with vast technological potential and economic impact. Recent years have seen the advent of magneto-electronics and spintronics, fields in which magnetism and solid state electronics are joined to exploit spin dependent transport processes. This creates novel electronic functionalities that in part already have entered the market, for example in hard disk read heads and non-volatile, magnetic random access memories (MRAMs). The continuing need for increasing storage density leads to smaller and smaller magnetic entities. Nevertheless, the impact of these nanomagnets is not limited to technology. At the cutting edge of research several new phenomena, such as spin-torque transfer, spin-current induced magnetic switching or spin-current induced microwave generation, have been found. Their discovery was made possible on account of the ability to fabricate magnetic nanostructures in the 100 nm range. Clearly, a challenge for the future is to understand and control magnetism and magnetic phenomena on very small time scales and in reduced dimensions. The relevant physical systems range from thin films through quantum wires and quantum dots down to individual clusters, magnetic molecules, or even single magnetic atoms on a surface.

1.1 APPLICATIONS OF MAGNETISM

A large variety of applications employs either magnetic principles, magnetic materials, or both. The continuous quest for high density, non-volatile data storage media has been stimulating major research activities in the area of magnetic thin films. More recently, the dominant driving force comes from the immense technological potential promised by spintronics, i.e. the exploitation of spin dependent electrical transport phenomena. Hallmarks in this development are

the successful implementation of hard disk read heads containing GMR (giant magnetoresistive) sensor elements and the current transition towards devices based on tunneling magnetoresistance (TMR). Another major step will be the introduction of TMR-based magnetic random access memories, which is currently pushed by all major micro-electronics companies. In basically all of these applications, nanoscale magnetic structures with a high chemical complexity constitute the essential building blocks. It is this combination of nanoscale magnetism and spintronics which currently drives the field of magnetism at an amazing speed.

Each magnetic structure is characterized by a spatial magnetization distribution, which in turn is a result of energy minimization. In very small particles, one often finds a single domain state where the magnetization is homogeneously oriented along one direction, creating a sizable magnetic stray field outside the particle. For larger particles, the stray field increases up to the point where the total energy of the system may be reduced at the expense of exchange energy by the spontaneous formation of domains, domain walls and non-collinear magnetization distributions. The details of the magnetic microstructure depend sensitively on the shape of the magnetic particle and the material parameters. As a result, one observes a large zoo of magnetic domain structures, even in the static case.

Understanding the formation of these domain structures and their dynamic response to external fields is at the heart of magnetization reversal processes. The experimental visualization of magnetic structures in both the static and dynamic case provides a major key to this understanding.

1.2 TIME SCALES IN MAGNETISM

Magnetic phenomena can be observed on time scales covering almost 30 orders of magnitude. On a larger scale, geologists find signatures of the reversal of the earth's magnetic field by measuring the direction of the magnetization of haematite (Fe_2O_3) minerals of volcanic origin in the deep sea ditch. There the gap between the continental shelves moving away from each other is being filled continuously with material from the inner earth. When this material is cooled down below its Curie temperature, the magnetization is being aligned to the direction of the magnetic field of the earth present at that time. Today, one can measure the magnetic field at the ground of the ocean and can find the magnetization direction oscillating with the distance from the deep sea

ditch, i.e. as a function of the age of the volcanic material. Over a time of several ten million years, this magnetic information has been preserved, while the external magnetic field has reversed several times, in average every 100 000 years.

Today's magnetic data storage devices keep their magnetization state several years, yet the influence of the degradation of the domain structure due to magnetic creep at the domain boundaries is already measurable. The information is stored in oppositely magnetized regions on the surface of disks coated with ferromagnetic material. After 10 years, the information stored on a floppy disk is often damaged. On magnetic audio tapes, after several years, the high frequency component of the stored music is lost because higher frequencies involve smaller magnetic domains, which degrade much faster by a slow moving of the domain walls than the larger domains representing the low frequency component of the music.

Spin glasses, in which the magnetic moments experience frustration due to a coupling with alternating sign to different neighbours, show a logarithmic relaxation time as a reaction to external field changes, which extends into an order of magnitude of seconds to hours.

The slowest mechanism of changing the magnetization state in a ferromagnetic material with an externally applied field, is the motion of magnetic domains. This corresponds to the propagation of domain walls and results in an increase in size of those domains which have a net magnetization parallel to the applied field. The mechanisms are the nucleation of domains and the propagation of domain walls. These are driven by fundamental processes like the dipolar interaction and the magnetocrystalline anisotropy. The time scale for the motion of magnetic domains varies with the structure, the exchange strength and the inhomogeneity of the material. Structural defects or chemical inhomogeneities (e.g. for alloys) tend to pin the domain walls, resulting in slower and more complex switching patterns. In weakly coupled magnetic nanoparticle arrays, characteristic time scales are seconds, while in homogeneous and clean transition metal ferromagnets, the time scale for the domain wall motion is in the μs range.

A faster mechanism concerns the reversal of a single domain or the rotation of domains with the magnetization misaligned with respect to the applied field. It occurs when the energy brought by the magnetic field overcomes the anisotropy energy barrier. The time scale associated with this mechanism (0.1 – 10 ns) depends also on extrinsic factors.

Even faster are the magnetic excitations of the electronic system. The spin wave (magnon) relaxation due to spin-lattice interactions occur on the time scale of ps. The fastest relaxation process is the relaxation of Stoner excitations. The excitation of the electronic system of a ferromagnetic material, e.g. by the absorption of photons, affects the magnetic state because the band structure for the two spin states is different. When the electronic system is heated, e.g. by a laser pulse, the magnetization is reduced and will be re-established by the transfer of energy from the electronic system to the lattice. These relaxations take place on a time scale of 100 fs.

1.3 MAGNETIC IMAGING TECHNIQUES

A large variety of imaging techniques has been developed over the years in order to visualize static magnetic structures on different length scales [1, 2]. They range from most widely used magneto-optical approaches to spin-polarized tunneling microscopy, thereby covering spatial resolution values from a few hundred nanometers down to the atomic scale. In order to meet the challenges posed by contemporary magnetic systems, the ideal magnetic imaging technique should meet as many of the following criteria as possible:

- high lateral resolution,
- strong magnetic contrast,
- well defined information depth,
- chemical selectivity,
- compatibility with external fields, and
- fast data acquisition.

Any realistic imaging approach, however, will have specific advantages and deficiencies. For example, a widely used and well established approach is Kerr microscopy [3], exploiting the magneto-optical Kerr effect (MOKE) in the visible light range. The wavelength of the applied light renders the spatial resolution of this technique, limited by diffraction effects. On the other hand, it can be conveniently used in external magnetic fields. Lorentz microscopy [4, 5], being a special variant of transmission electron microscopy (TEM), offers a high spatial resolution but requires particular sample geometries and preparation. This is necessary as the electrons have to pass through the entire sample in order to accumulate a deflection (due to the Lorentz force) or a phase difference along

the trajectory, before they are imaged. Its counterpart may be seen in scanning electron microscopy with spin polarization analysis (SEMPA), which combines high lateral resolution with high surface sensitivity [6]. Both electron based approaches are compatible with only moderate external fields.

In general, the imaging techniques may be grouped into two classes:

- In a scanning technique, the magnetic information is obtained from a point-like area of interaction between the probe and the sample. This area of interaction is then moved across the sample by scanning the probe and the sample relative to one another, and the image is constructed in a point-by-point manner. The lateral resolution is basically determined by the size of the probe or the extension of the interaction volume.
- In contrast to this stands the parallel or wide field imaging technique. In most cases it involves the irradiation of the sample with a parallel beam of photons or electrons and image a certain area (field of view) with a magnification determined by an adapted electron or light optical lens system. The lateral resolution is then basically determined by the quality of the optical system.

Scanning microscopes with tip-like probes have recently gained particular importance in magnetic imaging. One of the most widely used is magnetic force microscopy (MFM), which maps the interaction between a magnetic tip and the stray field emanated from a sample [7]. The highest lateral resolution can be achieved by means of spin-polarized scanning tunneling microscopy (SP-STM) [8, 9]. It employs the spin dependent tunneling through a vacuum gap between a magnetic tip and the investigated magnetic surface, thus a magnetic contrast can be formed. With this approach, atomically resolved imaging of magnetic moments has come within reach [10].

At first glance, wide field techniques where an image of the magnetic system is collected on an areal detector seem to be predestined for time-resolved imaging purposes. Representatives of this configuration are Kerr and Lorentz microscopies, or electron based approaches such as spin-polarized low-energy electron microscopy (SP-LEEM) [11] and x-ray photo-emission electron microscopy (XPEEM) [12, 13], as well as an all-optical x-ray imaging technique, the x-ray transmission microscopy (XTM) [14]. Nevertheless, scanning approaches have also been successfully employed for stroboscopic imaging purposes [15, 16].

1.4 OUTLINE

The main topic of this work is the study of the magnetization dynamics in thin film, confined magnetic structures with a lateral size in the micron and sub-micron range, more specifically in structures with a single vortex. The change of the magnetization distribution was investigated under the influence of a time varying magnetic field. Time-resolved measurements, based on a stroboscopic measuring scheme, were therefore implemented into a scanning transmission x-ray microscope (STXM). A time and lateral resolution of about 70–100 ps and 30–40 nm can be achieved respectively.

In Chapter 2, a brief introduction is given to the physics of magnetism and the basic concepts of magnetization dynamics. The employed experimental technique is described in Chapter 3. Special attention goes to the experimental setup for time-resolved STXM measurements, where three different excitation types were developed: pulsed, sine and burst excitation. Chapter 4 deals with the static magnetic configuration of ferromagnetic vortex structures. Single layers as well as trilayer stacks have been imaged. Results of the dynamic measurements are collected in Chapter 5. A summary with outlook finalizes this work in Chapter 6.