

# **Magnetic imaging of static and dynamic states in systems of reduced dimensions**

Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
des Fachbereichs Physik  
der Universität Hamburg

vorgelegt von  
Stefan Rößler

Hamburg  
2014

**Gutachter der Dissertation:**

Prof. Dr. Hans Peter Oepen  
*Universität Hamburg, Germany*

Prof. Dr. André Thiaville  
*Université Paris-Sud & CNRS, France*

**Gutachter der Disputation:**

Prof. Dr. Hans Peter Oepen  
*Universität Hamburg, Germany*

Prof. Dr. Kornelius Nielsch  
*Universität Hamburg, Germany*

**Datum der Disputation:**

7.1.2015

**Vorsitzender des Prüfungsausschusses:**

Prof. Dr. Michael Rübhausen

**Vorsitzende des Promotionsausschusses:**

Prof. Dr. Daniela Pfannkuche

**Dekan der Fakultät für Mathematik,  
Informatik und Naturwissenschaften:**

Prof. Dr. Heinrich Graener

Berichte aus der Physik

**Stefan Rößler**

**Magnetic imaging of static and dynamic states  
in systems of reduced dimensions**

Shaker Verlag  
Aachen 2015

**Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek**

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Hamburg, Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3523-0

ISSN 0945-0963

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • e-mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

---

## Abstract

Within this thesis, static and dynamic states in magnetic systems of reduced dimensions are investigated by means of the advanced magnetic imaging technique “scanning electron microscopy with polarization analysis” (SEMPA). After a short introductory overview of the historical development of storage media, its current status is described with a focus on random-access memory (RAM). The basic concepts of modern non-volatile storage devices based on magnetism are introduced and the physical mechanisms behind the phenomena that are used to manipulate and access the data are discussed.

Magnetic imaging is a powerful, yet illustrative tool to further explore the physics behind these mechanisms. After a short overview of the history and current status of magnetic imaging techniques, the working principle of SEMPAs is explained. The imaging capabilities of SEMPAs are used to investigate the current-driven stationary displacement of a magnetic vortex core confined in a square permalloy element. The full set of spin-transfer torque parameters is obtained from the measurement. In the course of the investigation, the physical origin of the nonadiabatic contribution ( $\beta = 0.12 \pm 0.02$ ) is explored. It is shown to consist of one component that depends on the intrinsic properties of the material (29 %) and one component that depends on the divergence of the magnetic texture (71 %).

A concept for enhancing the temporal resolution of SEMPAs into the regime of one nanosecond is presented. The feasibility of the concept is proven by observing the gyration of a magnetic vortex core that is excited by a high-frequency field ( $f = 70\text{MHz}$ ). From the elliptic shape of the movement pattern, the resonance frequency of the square permalloy element that contains the vortex core is derived.

In another project of this thesis, the interplay between ferromagnetic and ferroelectric domain walls is investigated. In 20 nm thick  $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$  on  $\text{BaTiO}_3$ , the ferromagnetic domain walls are pinned on top of the ferroelectric ones. Two types of magnetic 90° domain walls are identified: Charged walls are created after an external field was applied parallel to the ferroelectric domain walls. When the field is applied perpendicular to the ferroelectric domain walls, uncharged walls are created. The width of both wall types is compared with SEMPAs. The width is found to be enhanced by 500 % for the charged walls ( $\approx 770\text{nm}$ ) compared to the uncharged walls ( $\approx 150\text{nm}$ ).

The thesis concludes with a theoretical chapter in which the uniaxial anisotropy is derived that emerges when a magnetic film is prepared on top of a rippled substrate. The strength of the anisotropy is calculated for an alignment of the magnetization along the hard in-plane axis, perpendicular to the ripple pattern. Two magnetic configurations are considered: In the wavy configuration, the local magnetization follows the ripple structure of the film. In the uniform configuration, a rigid magnetization is present. A thickness-dependent transition between both states is identified. The results are compared to experimental studies.

---

## Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit werden statische und dynamische Zustände in magnetischen Systemen reduzierter Dimensionen mittels Rasterelektronenmikroskopie mit Polarisationsanalyse (SEMPA) untersucht. Zunächst wird ein kurzer einführender Überblick über die historische Entwicklung und den aktuellen Stand der magnetischen Speichermedien, mit einem Fokus auf „random-access memory“ (RAM), gegeben. Die grundlegenden Konzepte moderner, magnetischer, nichtflüchtiger Speichermedien werden eingeführt. Die physikalischen Mechanismen, die sich hinter den Phänomenen verbergen, welche verwendet werden um auf einzelne Bits zuzugreifen und sie zu manipulieren werden erläutert.

Die magnetische Bildgebung ist ein leistungsstarkes und dennoch illustratives Werkzeug, um die Physik hinter diesen Mechanismen weiter zu erforschen. Nach einem kurzen Überblick über die Geschichte und den aktuellen Stand der magnetischen Abbildungsverfahren wird die Funktionsweise des SEMPA erläutert. Die bildgebenden Fähigkeiten des SEMPA werden verwendet, um die stationäre Verschiebung einer magnetischen Wirbelstruktur, die in einem Quadrat aus Permalloy eingeschlossen ist, durch einen Gleichstrom zu untersuchen. Aus der Messung wird der volle Satz der „spin-transfer torque“ Parameter bestimmt. Im Zuge dieser Untersuchung wird der physikalische Ursprung des nichtadiabatischen Beitrages ( $\beta = 0.12 \pm 0.02$ ) untersucht. Es wird gezeigt, dass dieser aus zwei Komponenten besteht: eine, die nur von den inneren Eigenschaften des Materials abhängt (29 %) und eine, die von der Divergenz der magnetischen Textur bestimmt wird (71 %).

Ein Konzept zur Verbesserung der Zeitauflösung des SEMPA in den Bereich von einer Nanosekunde wird vorgestellt. Die Zuverlässigkeit des Konzepts wird durch Beobachtung der Kreisbewegung eines von einem Hochfrequenzfeld (70 MHz) angeregten magnetischen Wirbelkerns nachgewiesen. Aus der elliptischen Form des Bewegungsmusters wird die Resonanzfrequenz des magnetischen Quadrates abgeleitet, welches den Wirbelkern beinhaltet.

In einem weiteren Projekt dieser Arbeit wird das Wechselspiel zwischen ferromagnetischen und ferroelektrischen Domänenwänden untersucht. In 20 nm dickem Co<sub>40</sub>Fe<sub>40</sub>B<sub>20</sub> auf BaTiO<sub>3</sub> sind die ferromagnetischen Wände an die ferroelektrischen Wände gekoppelt. Zwei Arten von magnetischen 90° Domänenwänden werden in diesem System identifiziert: Geladene Wände entstehen, nachdem ein externes Magnetfeld parallel zu den ferroelektrischen Domänenwänden angelegt wird. Ungeladene Wände hingegen entstehen, wenn das Feld senkrecht zu den ferroelektrischen Domänenwänden angelegt wird. Die Breite der beiden Wandtypen wird mittels SEMPA verglichen und es zeigt sich, dass die geladenen Wände ( $\approx 770$  nm) um einen Faktor fünf breiter sind als die ungeladenen Wände ( $\approx 150$  nm).

Diese Arbeit schließt mit einem theoretischen Abschnitt. In diesem wird die uniaxiale Anisotropie abgeleitet, die entsteht, wenn ein magnetischer Film auf einem gewellten Substrat hergestellt wird. Die Stärke der Anisotropie wird für eine Ausrichtung der Magnetisierung entlang der harten Richtung innerhalb der Filmbene, senkrecht zu der Wellenstruktur, berechnet. Zwei magnetische Konfigurationen werden behandelt: In der welligen Konfiguration folgt die Magnetisierung der welligen Struktur des Filmes und in der gleichförmigen Konfiguration ist die Magnetisierung starr in eine Richtung gerichtet. Ein Schichtdicken-abhängiger Übergang zwischen beiden Konfigurationen wird hierbei identifiziert. Die Ergebnisse werden mit experimentellen Arbeiten verglichen.

# Contents

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduction</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Magnetic Imaging</b>   | <b>11</b> |
| 2.1      | Historical Overview . . . . .   | 11        |
| 2.2      | Scanning Electron Microscopy with Polarization Analysis . . . . .                   | 13        |
| 2.2.1    | Measuring the Spin Polarization of Secondary Electrons . . . . .                    | 14        |
| 2.2.2    | SEMPA Imaging With a LEED Detector . . . . .  | 16        |
| 2.2.3    | SEMPA in Comparison . . . . .   | 23        |
| <b>3</b> | <b>Spin-Transfer-Torque Parameters for a Magnetic Vortex Core</b>                   | <b>25</b> |
| 3.1      | Micromagnetics . . . . .  | 25        |
| 3.1.1    | Torques and Energies in Micromagnetics . . . . .                                    | 26        |
| 3.1.2    | Effective Field . . . . .   | 27        |
| 3.1.3    | Damping . . . . .   | 30        |
| 3.1.4    | Spin-Transfer . . . . .   | 31        |
| 3.1.5    | Summary . . . . .   | 35        |
| 3.2      | Previous Experimental Work on the Spin-Transfer-Torque Parameters . . . . .         | 36        |
| 3.3      | Using a Vortex Core to Determine All Spin-Transfer-Torque Parameters . . . . .      | 37        |
| 3.3.1    | Theoretical Approach . . . . .  | 39        |
| 3.3.2    | Micromagnetic Simulations of the Current-Induced Vortex Core Displacement . . . . . | 42        |
| 3.3.3    | Sample Preparation . . . . .  | 44        |
| 3.4      | Vortex Displacement in Iron Alloys . . . . .  | 48        |
| 3.5      | Vortex Displacement in Permalloy . . . . .  | 51        |
| 3.5.1    | SEMPA Measurements . . . . .  | 52        |
| 3.5.2    | Material Properties Obtained by Ferromagnetic Resonance . . . . .                   | 56        |
| 3.5.3    | Determination of all Spin-Transfer-Torque Parameters . . . . .                      | 59        |
| 3.5.4    | Experimental Sources of an Oersted Field . . . . .                                  | 66        |
| 3.6      | Summary . . . . .   | 71        |
| <b>4</b> | <b>Time-Resolved Magnetic Imaging</b>   | <b>73</b> |
| 4.1      | Time-Resolved Magnetic Imaging . . . . .  | 73        |
| 4.1.1    | Photon-Based Techniques . . . . .   | 73        |
| 4.1.2    | Electron-Based Techniques . . . . .   | 75        |
| 4.1.3    | Scanning Probe Techniques . . . . .   | 76        |
| 4.2      | Time-Resolved SEMPA . . . . .   | 76        |
| 4.3      | Technical Improvement of the Setup . . . . .  | 78        |

## Contents

---

|                        |   |            |
|------------------------|---|------------|
| 4.4                    | Time-Resolved Measurements . . . . .  | 80         |
| 4.4.1                  | Time-Resolved SEM . . . . .   | 82         |
| 4.4.2                  | Time-Resolved SEMPA . . . . .   | 83         |
| 4.5                    | Summary and Outlook . . . . .   | 90         |
| <b>5</b>               | <b>Interaction Between Ferroelectric and Ferromagnetic Domain Walls</b>       | <b>93</b>  |
| 5.1                    | Charged Walls . . . . .   | 95         |
| 5.2                    | Uncharged Walls . . . . .   | 100        |
| 5.2.1                  | Determination of Wall Width . . . . .   | 100        |
| 5.2.2                  | Experimental Broadening . . . . .   | 102        |
| 5.2.3                  | Wall Width in Theory and Experiment . . . . .                                 | 106        |
| 5.3                    | Summary . . . . .   | 107        |
| <b>6</b>               | <b>Uniaxial Anisotropy of a Rippled Magnetic Film</b>                         | <b>109</b> |
| 6.1                    | Model System and Possible Magnetic Configurations . . . . .                   | 110        |
| 6.2                    | Stray Field Energy . . . . .  | 113        |
| 6.2.1                  | Surface and Volume Magnetic Charges . . . . .                                 | 113        |
| 6.2.2                  | From Charges to Energy . . . . .  | 117        |
| 6.3                    | Exchange Energy . . . . .   | 122        |
| 6.4                    | Comparison of the Energy Contributions . . . . .                              | 124        |
| 6.5                    | Comparison of Model Values to Experimental Data . . . . .                     | 127        |
| 6.5.1                  | Permalloy on Diamond . . . . .  | 127        |
| 6.5.2                  | Cobalt on Magnesium Oxide . . . . .   | 128        |
| 6.5.3                  | Permalloy, Cobalt, and Iron on Silicon . . . . .                              | 129        |
| 6.6                    | Summary . . . . .   | 133        |
| <b>7</b>               | <b>Appendix</b>   | <b>135</b> |
| 7.1                    | Evaluation Tools for SEMPA Data . . . . .                                     | 135        |
| 7.1.1                  | Determination of the Vortex Core Position from SEMPA Data . . . . .           | 135        |
| 7.1.2                  | Determination of Position and Orientation of the Magnetic Structure . . . . . | 138        |
| 7.2                    | Correction of Current Density for Parasitic Shunt Resistances . . . . .       | 140        |
| 7.3                    | Raw Data of SEMPA Images . . . . .  | 142        |
| <b>References</b>      |   | <b>145</b> |
| <b>Publications</b>    |   | <b>175</b> |
| <b>Acknowledgement</b> |   | <b>177</b> |