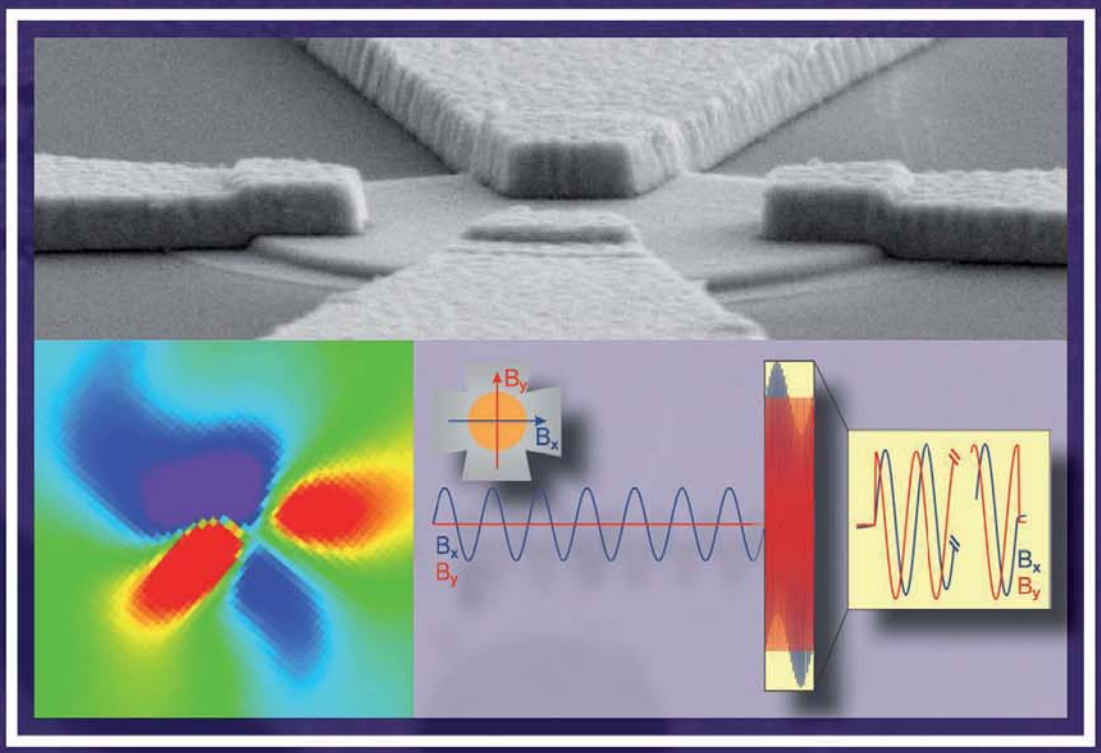
Markus Sproll

Schalten der Polarität magnetischer Vortexkerne durch eine Zwei-Frequenzen Anregung und mittels direkter Einkopplung eines Stroms



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

Schalten der Polarität magnetischer Vortexkerne durch eine Zwei-Frequenzen Anregung und mittels direkter Einkopplung eines Stroms

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Schalten der Polarität magnetischer Vortexkerne durch eine Zwei-Frequenzen Anregung und mittels direkter Einkopplung eines Stroms

Von der Fakultät Mathematik und Physik der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktors der
Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von:

Markus Joachim Sproll

aus Esslingen am Neckar

Hauptberichterin:	Prof. Dr. Gisela Schütz
Mitberichter:	Apl.Prof. Dr. Wolfgang Bolse

Tag der Einreichung:	17.02.2014
Tag der mündlichen Prüfung:	28.04.2014

Max - Planck - Institut für Intelligente Systeme, Stuttgart

2014

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2014
Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2011

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2014
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen
Telefon: 0551-54724-0
Telefax: 0551-54724-21
www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.
1. Auflage, 2014
Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft

ISBN 978-3-95404-716-1
eISBN 978-3-7369-4716-0

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Inhaltsverzeichnis

Summary and Outlook **v**

Abkürzungsverzeichnis **xi**

Einleitung **1**

1 Allgemeine Grundlagen **5**

1.1 Ferromagnetismus 5
1.1.1 Quantisierte Magnetisierung 5
1.1.2 Austauschwechselwirkung 7
1.1.3 Pauli-Prinzip und Heisenberg-Modell 7
1.1.4 Bandmodell des Ferromagnetismus 9
1.1.5 Magnetische Anisotropie 12
1.2 Magnetische Domänen und Domänenwände 14
1.2.1 Verschiedene Domänenwand-Typen 15
1.2.2 Die magnetische Vortex-Struktur 16
1.3 Magnetisierungsdynamik 21
1.3.1 LLG-Gleichung 21
1.3.2 Spinwellen 25
1.4 Grundlagen der Vortexkern-Dynamik 28
1.4.1 (Sub-GHz)-Gyromode 28
1.4.2 Spinwellen in Vortex-Strukturen 29
1.5 Umschalten der Vortexkern-Polarität 33
1.5.1 Statisches Umschalten der Polarität 33
1.5.2 Umschalten durch Anregung der Gyromode . 33

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

1.5.3 Umschalten der Polarität induziert durch Spinwellen 37
1.6 Simulationen 41
1.6.1 Object Orientated MicroMagnetic Framework 41
1.6.2 MuMax2 42
1.6.3 COMSOL 43

2 Experimentelle Grundlagen 45
2.1 Zirkularer Röntgendichrosimus: XMCD 46
2.1.1 Übergangswahrscheinlichkeit 46
2.1.2 Grundlagen des XMCD-Effekts 47
2.2 Magnetische Transmissionsröntgenmikroskopie . . . 51
2.2.1 Elektronsynchrotron (BESSY II) 51
2.2.2 Funktionsweise eines STXM 55
2.2.3 MAXYMUS 58
2.3 Probenpräparation 61
2.3.1 Permalloy 61
2.3.2 Membranen 61
2.3.3 Probenpräparation für Messungen zum strominduzierten Schalten 61
2.3.4 Proben für Messungen mit kombinierter Anregung 64
2.4 Experimenteller Aufbau 64
2.4.1 GHz-Setup 65
2.4.2 GHz-Platine 67
2.4.3 Berechnung von Stromdichte bzw. Magnetfeld 68

3 Kombinierte Anregung von Gyromode und Spinwellen 73
3.1 Messung der Resonanzfrequenz der Gyromode 74
3.2 Elektrisches Anregungsschema 76
3.3 CW Spinwellen-Anregung 80
3.4 Simulationen zur CW-Anregung 83
3.4.1 Erklärung der breitbandigen Schaltschwellen-Absenkung 84

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

3.4.2 Erklärung des zusätzlichen Minimums in der Schaltschwelle 86
3.5 CCW-Spinwellen-Anregung 95
3.5.1 Erklärung der neuen Effekte im CCW-Fall . . 98
3.6 Zusammenfassung: kombinierte Anregung 102

4 Strominduziertes Schalten des Vortexkerns 103
4.1 Theoretische Grundlagen 104
4.2 Erweiterung der LLG-Gleichung 109
4.2.1 Adiabatischer STT-Term 110
4.2.2 Nicht-adiabatischer STT-Term 110
4.2.3 Vergleich des adiabatischen mit dem nicht-adiabatischen STT-Term für eine Vortex-Struktur 113
4.3 Oersted-Feld 113
4.3.1 Homogene Stromverteilung 115
4.3.2 Inhomogene Stromverteilung 116
4.3.3 Einfluss der realen Probengeometrie auf das asymmetrische Oersted-Feld 117
4.4 Literaturdiskussion zu den bisherigen Experimenten 121
4.5 Bemerkungen zum Vortexkern-Schalten mit direkter Strom-Anregung 125
4.6 Schalten induziert durch eine rotierende Gyromoden-Anregung 127
4.6.1 Experimente mit der strominduzierten rotierenden Gyromode 127
4.6.2 Einfluss der Chiralität 130
4.6.3 Simulationen mit rotierender Gyromodenanregung 131
4.6.4 Simulationen mit rotierender Gyromoden-Anregung und asymmetrischem Oersted-Feld . . 134
4.7 Experimente zum strominduzierten Schalten mit Spinwellen 137

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

4.8 Simulationen zum strominduzierten Schalten mit Spinwellen 141
4.8.1 Simulationen mit 'reiner STT'-Anregung . . . 141
4.8.2 Simulationen mit strominduzierter rotierender Spinwellen-Anregung und symmetrischem Oersted-Feld 147
4.8.3 Simulationen mit zusätzlichem effektivem Magnetfeld 149
4.8.4 Erklärung der hohen Schaltschwelle mit 'reinem STT'-Effekt 151
4.8.5 Einfluss des nicht-adiabatischen Terms 154
4.9 Zusammenfassung: Strominduziertes Schalten 157

Zusammenfassung und Ausblick **159**

Literaturverzeichnis **165**

Abbildungsverzeichnis mit zugehörigen Quellen **181**

Liste der Veröffentlichungen **183**

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Summary and Outlook

The main objective of this work was the investigation of new mechanisms for a selective vortex core polarity reversal. For this purpose two different approaches were studied:
On the one hand the so far used excitation by external magnetic fields was modified by exciting the gyromode simultaneously with azimuthal spinwaves. On the other hand the possibility to switch the vortex core polarity by a direct injection of a rotating current into the sample to excite the vortex gyromode or azimuthal spinwaves was investigated.

Both different types of excitation have been studied with modern magnetic **S**canning **T**ransmission **X**-ray **M**icroscopy (STXM) at the MAXYMUS facility at BESSY II in Berlin. With a temporal resolution of 45 ps and a lateral resolution of 25 nm, this microscope offers ideal conditions to detect vortex core switching by using the XMCD-effect (**X**-ray **M**agnetic **C**ircular **D**ichroism). It is further possible to record time-resolved movies of the magnetization dynamics induced by an external excitation by using the implemented stroboscopic meaurement method and so it is even possible to image spinwaves and their characteristic mode structure.

Switching by a two-frequency-excitation:
The first part of this thesis dealt with the development of a combined excitation scheme, which enables the investigation of a novel mode coupling between the gyrotropic- and individual spinwave modes. The challenge of this method was to excite these modes simultaneously because their resonance frequencies differ of about one order of magnitude. For this a linear sub-threshold gyromode

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

excitation (by applying a sinus with a frequency of around 200 MHz) was combined with a rotating spinwave excitation (in the GHz-frequncy range). The external magnetic fields for the excitation were created by using a RF-board and crossed striplines below the sample.

Several new effects emerged from this mode coupling:
Firstly a **large reduce in the spinwave mediated switching threshold** in the frequency range between 2 GHz and 6 GHz could be observed, directly associated with an improvement in the unidirectionality of the switching process. This decrease could be explained for the 'CW-case' (**c**lock**w**ise) by the modification of the original spinwave spectrum due to the mode coupling induced dynamically by mode splitting into several new branches due to the simultaneously excited gyromode. These additional branches could be excited and so the switching threshold was reduced by up to one order of magnitude. The much weaker reduction for the 'CCW-case' (**c**ounter**c**lock**w**ise), where no splitting of the original mode exits, could be ascribed to the superposition of the two dips enforcing the vortex-antivortex pair formation created by the gyromode and the spinwave-excitation.
Secondly for both cases (CW and CCW) **new minima in the switching threshold** occured which were located at half of the original resonance eigenfrequency. This effect could be explained by the excitation of higher harmonic spinwave modes due to a non-linear interaction caused by the mode coupling. Beside these effects an additional minimum in the CCW-switching threshold could be observed by micromagnetic simulations. This minimum is based on the possible excitation of the $(n = 1, m = +2)$-spinwave mode due to the symmetry breaking of the additionally applied gyromode. The occurrence of this mode could be confirmed by experimental XMCD-movies where the characteristic $(n = 1, m = +2)$-spinwave mode profile could be imaged.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Polarity reversal by a rotating direct current injection

In the second part of this work the possibility of an unidirectional switching mechanism of the vortex core polarity by applying a direct rotating current on the sample was investigated. For this direct injection, samples with four opposing gold contacts on top were prepared with contacts as thin as possible, but with a contact resistance between contacts and sample as low as possible.

With the **rotating excitation of the gyromode** a selective switching process of the vortex core polarity could be obtained, which is in principle not possible at the hitherto published works on linear gyromode excitation by direct current injection. In addition the comparison with three-dimensional micromagnetic simulations showed the big influence of an asymmetric OERSTED-field which is a direct consequence of the inhomogeneous current density due to the contacts, while a symmetric OERSTED-field couldn't influence the switching process.

An additional goal of this thesis was the first investigation of the polarity reversal induced by **the excitation of azimuthal spinwaves driven by a directly injected current**. Experiments as well as simulations confirmed this possibility of a spinwave induced vortex core polarity reversal. The simulations also showed, that for the spinwave induced switching the pure STT-effect (**S**pin**T**ransfer**T**orque) plays a negligible role. Even with a symmetric OERSTED-field the switching threshold could be reduced by one order of magnitude, compared with the pure STT-effect in contrast for example to the results of the 'gyromode-case'. But the most important contribution to the switching process could be assigned to the asymmetric OERSTED-field. The asymmetric behaviour of the experiments was implemented into the simulations by taking an additional homogenous magnetic field into account (in addition to the symmetric OERSTED-field and the STT-effect). With this additional magnetic field the experimental switching threshold could

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

be reproduced in the performed three-dimensional micromagnetic simulations. The big effect of the asymmetric OERSTED-field was understood in terms of the STT-effect property mainly acting on magnetic gradients. However, the spinwave is a large area excitation state over the complete sample and in the case of a vortex structure the largest magnetization gradients occur strongly localized in the region around the vortex core. That's the reason why the pure STT-effect was not able to excite azimuthal spinwave modes and a OERSTED-field was necessary.

Outlook

The results of this thesis pave the way for a deeper insight and a better understanding of the magnetic vortex structure behaviour under an external excitation. Knowing all the basic properties of this structure can influence future developments and might play an important role for possible technological applications in the field of ultrafast V(ortex)-MRAMs or magnetic vortex sensors.
Regarding the potential use as ultrafast V-MRAM, M. Kammerer showed in [Kam12] that a reduction of the switching time is directly correlated with a reduction of the sample size. But as negative side effect this sample size reduction yields a large increase in the switching threshold. As possible solution for this fundamental problem, one can think about the use of this combined excitation scheme to again decrease the switching threshold.
Additional investigations and modifications of the combined excitation scheme with very short 100 ps-pulses instead of GHz-bursts and additionally applied linear gyromode excitation may lead to a substantially decrease in switching time as well as a modification with a rotating excitation of the gyromode may also provide a further decrease in switching threshold.
Moreover, the results of the mode coupling experiments and the resulting non-linear interaction may be the starting point for a deeper understanding and an extended theory to describe the interaction between vortex core, gyromode and spinwaves.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

The possibility of the here first time shown excitation of spinwaves by a rotating direct current excitation leading to an unidirectional vortex core polarity reversal may be optimized concerning sample dimensions and contact geometry. Also, a combination of both topics of this thesis could yield further insights into the operation principle of the STT-effect and a possible application on direct current induced spinwave excitation. A thus obtained deeper insight may play an important role in terms of a future development of a STT-(V)-MRAM.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Abkürzungsverzeichnis

APD engl. ***A**valanche **P**hoto **D**iode*: Lawinenphotodiode (siehe auch Kapitel 2.2.3)

CW engl. ***C**lock**W**ise*: Rotation im Uhrzeigersinn

CCW engl. ***C**ounter**C**lock**W**ise*: Rotation entgegengesetzt zum Uhrzeigersinn

FFT engl. ***F**ast **F**ourier **T**ransformation*

GPU engl. ***G**raphical **P**rocessing **U**nit*

HF ***H**och**F**requenz*: Bezeichnung in der Elektrotechnik für den Frequenzbereich von 3 MHz bis in den hohen GHz-Bereich (bis zu 300 GHz).

HZB ***H**elmholtz **Z**entrum **B**erlin*

LLG ***L**andau-**L**ifshitz-**G**ilbert*-Gleichung: Fundamental wichtige Gleichung in der Magnetisierungsdynamik (siehe Kapitel 1.3)

MAXYMUS engl. ***Ma**gnetic **X**ray **M**icroscope and **U**HV **S**pectrometer*: Endstation bei BESSY II, an der alle Experimente durchgeführt wurden (siehe Kapitel 2.2.3)

MuMax GPU-basierendes mikromagnetisches Simulationsprogramm (siehe Kapitel 1.6.2)

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

OOMMF ***O****bject* ***O****rientated* ***M****icro****M****agnetic* ***F****ramework*: Mikromagnetisches Simulationsprogramm, entwickelt von 'Applied and Computational Mathematics Division' (ACMD) am National Institute of Standards and Technology (NIST) [DP99] (siehe Kapitel 1.6.1)

OSA engl. ***O****rder* ***S****electing* ***A****perture*: Vorrichtung zur Ausblendung bestimmter Beugungsordnungen (siehe auch Kapitel 2.2.3 bzw. Abbildung 2.6)

Py ***P****ermallo****y***: Weichmagnetische Nickel-Eisen ($Ni_{81}Fe_{19}$)-Legierung

STT engl. ***S****pin* ***T****ransfer* ***T****orque*: Drehmomentübertrag durch Spins, wird in Kapitel 4 ausführlich behandelt.

STXM engl. ***S****canning* ***T****ransmisson* ***X****-ray* ***M****icroscope*: Rasterröntgentransmissionsmikroskop

XMCD engl. ***X****-ray* ***M****agnetic* ***C****ircular* ***D****ichroism*: siehe Kapitel 2.1.2

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Einleitung

Drum hab' ich mich der Magie ergeben, [...]
Daß ich erkenne, was die Welt
Im Innersten zusammenhält,

'Faust', Zeile 379-383, (1808)
Johann Wolfgang von Goethe

Um zu erkennen, „was die Welt im Innersten zusammenhält", sieht Faust nur die Möglichkeit Magie zu verwenden. Im Gegensatz zu diesem Standpunkt aus dem Jahre 1808 ist heutzutage zur Erlangung dieser Erkenntnis vielmehr die physikalische bzw. naturwissenschaftliche Grundlagenforschung notwendig, wie sie z.B. in der Max-Planck-Gesellschaft betrieben wird.
In diesen Kontext kann daher auch die Leitlinie der Max-Planck-Gesellschaft „Forschung ist eine der wesentlichen Grundlagen für die Fortschritte der Menschheit. Sie dient der Wissensvermehrung und fördert Gesundheit, Wohlstand und Sicherheit der Menschen sowie den Schutz der Umwelt." (*entnommen aus:* [MPG]) eingeordnet werden. Grundlagenforschung treibt den Fortschritt der Menschheit in allen Bereichen an und lässt ihn erkennen, „was die Welt im Innersten zusammenhält".

Die internationale Grundlagenforschung im Bereich des Magnetismus hat dabei zu enormen Fortschritten vor allem hinsichtlich der Computertechnologie geführt, wie beispielsweise die Entdeckung des GMR-Effekts [BGSZ89, BBF$^+$88] und dessen Anwendung in Festplatten zeigt. Dabei kommt der Grundlagenforschung die wichtige

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Aufgabe zu, ein tieferes Verständnis für die Systemeigenschaften und die zu Grunde liegenden Effekte zu gewinnen und diese gezielt zu untersuchen.
Dabei geht die magnetische Grundlagenforschung Hand in Hand mit der modernen Nanotechnologie. Beide bilden zusammen das Gebiet des Nanomagnetismus, der vor allem in magnetischen Sensoren und Speichern seine Anwendung findet. Im großen Feld des Nanomagnetismus ist die Erforschung der magnetischen Vortex-Struktur als Grundzustandskonfiguration in weichmagnetischen Materialien auf der Nanoskala ein wichtiger Bereich. Diese lässt sich durch eine 'in der Ebene' liegende Magnetisierung mit einem im Zentrum lokalisierten Vortexkern charakterisieren, dessen Magnetisierung 'aus der Probenebene heraus' zeigt und der zwei energetisch äquivalente Zustände mit jeweils umgekehrter Polarisation besitzt. Die Manipulation bzw. das Umschalten der Polarisation des Vortexkerns ist das zentrale Thema dieser Dissertation.

Vor ca. acht Jahren wurde von Van Waeyenberge *et al.* die Möglichkeit nachgewiesen, mit Hilfe von externen Magnetfeldern den Vortexkern dynamisch anzuregen und damit die zum Schalten benötigten Magnetfeldamplituden um zwei Größenordnungen zu reduzieren [VWPS+06]. Seitdem wird der Vortexkern als potenzieller Kandidat für neuartige Speichermedien diskutiert, beispielsweise hinsichtlich einer Anwendung als digitales, schnelles und stabiles Bit. 2011 konnten Kammerer *et al.* zeigen, dass die Zeit, die zum Umschalten des Vortexkerns benötigt wird, durch die Anregung von Spinwellen deutlich reduziert werden kann [KWC+11]. Durch die höheren Frequenzen (im GHz-Bereich) sind die Umschaltzeiten (100 ps-Bereich) deutlich unter den Zeiten, wie sie in bisherigen Speichern erzielt werden.
Parallel zu dieser Entwicklung mit externen Magnetfeldern zeigte im Jahre 2007 die Gruppe um Ono, dass ein magnetischer Vortexkern auch durch einen direkt eingekoppelten Strom umgeschalten werden kann [YKN+07]. Der dem Umschalten zu Grunde liegende Prozess

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

basiert dabei auf dem sogenannten STT-Effekt (*engl.* 'Spin-Transfer-Torque'), der 1996 von Slonczewski [Slo96] und Berger [Ber96] unabhängig voneinander erstmals beschrieben wurde. Der Kernpunkt dieses Effekts ist die Beeinflussung einer Magnetisierung durch einen spinpolarisierten Strom durch den Übertrag eines Drehmoments. Heute findet dieser STT-Effekt beispielsweise in den Chips der Firma Everspin Technologies seine Anwendung, die bereits von Buffalo Memory in industriellen SATA III-SSDs für die Steuerung des Datenverkehrs verbaut werden [Inca].

Zielsetzung

Im Rahmen dieser Arbeit sollen nun zwei grundlegende Fragestellungen im Bereich der Vortexkern-Dynamik bzw. des Vortexkern-Schaltens untersucht werden:

Einerseits soll die vorhandene Methode des spinwelleninduzierten Umschaltens der Vortexkern-Polarität durch ein neues Anregungsschema erweitert und verbessert werden. Dabei findet erstmals eine Kombination von Gyromoden- und Spinwellen-Anregung seine Anwendung. Mit dieser kombinierten Anregung ist es möglich, eine Kopplung der beiden Moden hervorzurufen, die sich in ihren Resonanzfrequenzen um eine Größenordnung unterscheiden. Dadurch können zum einen tiefere Einblicke in die Wirkungsweisen der unterschiedlichen Moden erreicht werden und zum anderen neue Effekte entdeckt werden.

Andererseits soll die Möglichkeit untersucht werden, mit Hilfe eines direkt auf die Vortex-Struktur eingekoppelten Stroms Spinwellen anzuregen und damit ein Umschalten des Vortexkerns zu erzielen. Dabei müssen neuartige Proben verwendet werden, mit denen eine direkte rotierende Strom-Anregung möglich ist. Mithilfe dieser Anregung soll eine neuen Methode entwickelt werden, die selektives Umschalten durch einen rotierenden Strom ermöglicht. Neben Experi-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

menten zur rotierenden Anregung der Gyromode liegt das Hauptaugenmerk vor allem auf der Untersuchung der generellen Möglichkeit, mittels rotierender direkter Einkopplung eines Stroms Spinwellen anzuregen und mit diesen die Polarität des Vortexkerns selektiv umzuschalten. Dabei steht neben dem experimentellen Nachweis dieser Möglichkeit auch die Eingrenzung des Einflusses des OERSTED-Felds, welches den Strom begleitet, im Mittelpunkt der Auswertungen und der mikromagnetischen Simulationen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.