



Doctoral Thesis

Magnetisation Dynamics in Ferri-/Ferromagnetic Hybrid and Thin Film Elements

Author(s):

Wohlhüter, Phillip

Publication Date:

2016

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010834874> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Magnetisation Dynamics in Ferri-/Ferromagnetic Hybrid and Thin Film Elements

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Phillip Wohlhüter

Dipl.-Phys., Universität Konstanz

born June 13, 1986,

citizen of Germany

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. L. J. Heyderman

Prof. Dr. P. Gambardella

Prof. Dr. C. Back

Abstract

Magnetic vortices are fundamental structures that naturally form in elements of mesoscopic size. They are characterised by a curling of the in-plane magnetisation around the centre of the structure as a result of the magnetostatic energy minimisation. In order to avoid a singularity in the centre, the magnetisation points out of the plane forming a very small and stable core (≈ 10 nm in diameter), which can either point ‘up’ or ‘down’ forming two polarisation states. The core of the vortex is of great interest because, from a fundamental point of view, they are one of the smallest and most robust magnetic structures known so far and their two polarisation states could be used to encode a bit, which is appealing for novel types of technological applications. What is more, vortices, in particular Landau states in square-shaped elements, exhibit a rich dynamic behaviour ranging from the gyrotropic mode, at tens to hundreds of MHz, to domain and domain wall modes in the GHz range. The gyrotropic mode is especially interesting, since it was shown that the vortex core orientation can be reversed with low power when excited at resonance.

This thesis elucidates the effects on the vortex core dynamics in square-shaped elements induced by lateral magnetostatic coupling of two squares, interlayer magnetostatic coupling between two magnetic layers with orthogonal anisotropies in a hybrid system, and when migrating to a ferrimagnetic system. Ferrimagnets are interesting because of their special temperature-dependent behaviour. This could be used as additional degree of freedom, since the two sublattices, which have opposite magnetisations, have different temperature-dependent behaviours. As a result, the magnetisations can cancel out at the compensation temperature. The experiments in this thesis are performed at a scanning transmission X-ray microscope (STXM), a synchrotron-based imaging tool that provides high lateral and temporal resolution as well as element specificity, and are extended by micromagnetic simulations.

In the first part, the influence of lateral magnetostatic coupling between two square elements with Landau states on the resonance frequency is discussed. We found with micromagnetic simulations that the coupling leads to a shift in resonance frequency compared to a single square. The frequency shift depends on the magnetic configuration (polarisations and vorticities) of the two squares. Together with differences in the switching threshold, this could allow for selective switching of vortex cores in arrays of coupled elements. At the same time, a broadband excitation scheme was implemented at the STXM at the PolLux beamline at the Swiss Light Source (SLS), which greatly facilitates the acquisition of a frequency spectrum by reducing the required time from several to one scan. Frequency spectra are invaluable tools for the study of magnetisation dynamics, since they reveal the response of the magnetisation as a function of excitation frequency from which the system’s resonance frequency can be obtained.

In the second part, a ferromagnetic permalloy (Py) square with in-plane anisotropy coupled to a Co/Pd multilayer layer with out-of-plane anisotropy is characterised. In this hybrid system, the strong interlayer magnetostatic coupling provides a means to a local

control of the vortex core dynamics. This is the result of a mutual domain imprint with the Landau state of the Py layer being present in the Co/Pd multilayer and with the maze domain pattern of the Co/Pd multilayer extending throughout the Py layer. The mutual imprint has a significant impact on the magnetisation dynamics. When a dynamically excited vortex core crosses the boundary between two maze domains in such a hybrid system, it interacts with the maze domain wall and reverses its orientation. This polarisation reversal is distinct to the processes known so far in single-layer materials. Micromagnetic simulations show that the reversal is mediated by the creation of two singularities (Bloch points) at the interface between the Co/Pd and the Py layers. The two singularities lead to the dissolution of the vortex core along the maze domain wall and, consequently, to the reversal of the magnetisation direction of the vortex core. The maze domain wall therefore acts as a highly localised switch for the vortex polarisation.

In the third part, we present experiments that pave the way towards studying the influence of the temperature-dependent behaviours of ferrimagnetic sublattices on the vortex core dynamics. Using ferrimagnets provides a means to study antiparallel exchange coupling within a material itself. Despite the strong dependence of the material parameters on the composition and growth conditions, micrometre-sized GdFe squares with Landau states were successfully fabricated. The induced vortex core dynamics showed a linear motion. Transmission electron microscopy (TEM) experiments imaging the vortex core displacement as a function of applied field suggest that the linear motion is caused by pinning in the material. Micromagnetic simulations assuming patches with random anisotropy directions are able to reproduce the experimental results.

The results presented in this thesis demonstrate how different types of interactions influence the vortex core dynamics. These findings are of interest for the implementation of vortices in novel devices such as vortex random access memory (VRAM) and spin torque oscillators (STOs).

Zusammenfassung

Magnetische Wirbel sind fundamentale Spinstrukturen, die sich in Elementen mesoskopischer Größe ausbilden. Sie sind durch eine geschlossene Drehung der Magnetisierung in der Ebene um das Zentrum herum charakterisiert, wodurch die magnetostatische Energie minimiert wird. Um eine Singularität bzw. Divergenz der Austauschenergie im Zentrum des Elements zu verhindern, zeigt die Magnetisierung dort aus der Ebene heraus und formt dabei einen sehr kleinen und stabilen Kern (ca. 10 nm im Durchmesser), der entweder nach ‘oben’ oder ‘unten’ zeigen kann, wodurch sich zwei mögliche Polarisationszustände ergeben. Solche Wirbelkerne sind von großem Interesse, da sie aus fundamentaler Sicht mit die kleinsten und robustesten bisher bekannten magnetischen Strukturen darstellen, und da ihre zwei Polarisationszustände dazu genutzt werden könnten, ein Bit zu kodieren. Dies wäre vor allem für neue Arten von Speicheranwendungen interessant. Darüberhinaus zeigen magnetische Wirbel und im Besonderen Landauzustände (diskrete Wirbel) in quadratischen Elementen ein vielfältiges dynamisches Verhalten, das von der gyrotropischen Mode im MHz-Bereich hin zu Domänen- und Domänenwandmoden im GHz-Bereich reicht. Die gyrotropische Mode ist dabei von speziellem Interesse, da gezeigt wurde, dass die Wirbelkernorientierung bei resonanter Anregung mit wenig Leistung über diese Mode geschaltet werden kann.

In dieser Dissertation werden die Auswirkungen auf das dynamische Verhalten magnetischer Wirbelkerne durch laterale magnetostatische Kopplung zweier Quadrate, starke magnetostatische Kopplung zwischen zwei Schichten mit senkrecht zueinanderliegenden Anisotropieachsen in einem Hybridsystem, und den Übergang zu einem ferrimagnetischen System untersucht. Ferrimagnete sind auf Grund ihres außergewöhnlichen, temperaturabhängigen Verhaltens von Interesse, welches als zusätzlicher Freiheitsgrad angesehen werden kann. Der Grund dafür ist ein unterschiedliches Temperaturverhalten der beiden Untergitter, welche entgegengesetzte Magnetisierungen besitzen, was zu einer Kompensationstemperatur führen kann, an der sich die Magnetisierungen der Untergitter genau aufheben. Die Experimente in dieser Dissertation wurden an einem Rastertransmissionsröntgenmikroskop durchgeführt. Dieses synchrotronbasierte Instrument verfügt über eine hohe Orts- und Zeitauflösung und kann darüberhinaus elementspezifisch abbilden. Die experimentellen Ergebnisse wurden zusätzlich mit mikromagnetischen Simulationen verglichen und um diese erweitert.

Im ersten Teil der Arbeit wird der Einfluss magnetostatischer Kopplung zwischen zwei Quadraten, die sich jeweils in einem Landauzustand befinden, auf deren Resonanzfrequenz untersucht. Dabei wurde u.A. mit Hilfe mikromagnetischer Simulationen ermittelt, dass die Kopplung zu einer Verschiebung der Resonanzfrequenz im Vergleich zu einem einzelnen Quadrat führt. Die Frequenzverschiebung hängt dabei von der magnetischen Konfiguration (Polarisation und Vortizität) der beiden Quadrate ab. Zusammen mit Unterschieden im Schaltschwellenwert könnte dies genutzt werden, um Wirbelkerne in einer Anordnung von gekoppelten Wirbeln gezielt zu schalten. Gleichzeitig wurde die Implementierung einer Breitbandanregung in das Rastertransmissionsröntgenmikroskop der PoLux-Strahllinie an

der Synchrotron Lichtquelle Schweiz (SLS) demonstriert, welche die Aufnahme eines Frequenzspektrums stark vereinfacht und die benötigte Zeit auf die einer einzelnen Abbildung reduziert. Experimentell gemessene Frequenzspektren sind ein wichtiges Instrument für die Untersuchung der Magnetisierungsdynamik eines Systems, da sie das Verhalten der Magnetisierung in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz wiedergeben und sich daraus direkt die Resonanzfrequenz ablesen lässt.

Im zweiten Teil der Arbeit wird ein Quadrat charakterisiert, das aus ferromagnetischem Permalloy (Py) besteht, dessen leichte Anisotropieebene in der Probenebene liegt, und das mit Co/Pd-Multilagen gekoppelt ist, deren leichte Anisotropieachse aus der Ebene heraus zeigt. In diesem Hybridsystem führt die starke magnetostatische Wechselwirkung zwischen den beiden Schichten zu einer lokal stark veränderten Wirbelkerndynamik. Dies ist das Resultat der gegenseitigen Domänenaufrägung, wodurch eine Signatur des Landauzustands der Py-Schicht in den Co/Pd-Multilagen vorhanden ist; umgekehrt durchziehen die Labyrinthdomänen der Co/Pd-Multilagen die Py-Schicht. Diese gegenseitige Domänenaufrägung hat einen erheblichen Einfluss auf die Magnetisierungsdynamik. Wenn ein dynamisch angeregter Wirbelkern die Grenze zwischen zwei Labyrinthdomänen übertritt, wechselwirkt er mit der Labyrinthdomänenwand und schaltet seine Polarisation. Dieser Polarisationswechsel unterscheidet sich merklich von den Prozessen, die bisher von Einlagensystemen bekannt sind. An Hand mikromagnetischer Simulationen wird gezeigt, dass dieser Schaltvorgang durch die Bildung zweier Singularitäten (Blochpunkte) an der Grenzfläche zwischen den Co/Pd- und Py-Schichten vermittelt wird. Die beiden Singularitäten führen zu einer Auflösung des Wirbelkerns entlang der Labyrinthdomänenwand und folglich zu einer Umkehrung der Magnetisierungsrichtung. Die Labyrinthdomänenwand fungiert daher als stark lokalisierter Polarisationswechsler des Wirbelkerns.

Im dritten Teil der Arbeit werden Experimente präsentiert, die den Weg zur Untersuchung des temperaturabhängigen Einflusses ferrimagnetischer Untergitter auf die Wirbelkerndynamik ebnen. Ferrimagnete eröffnen die Möglichkeit, antiparallele Austauschwechselwirkung innerhalb eines Materials zu untersuchen. Obwohl die Materialeigenschaften von GdFe stark von der Komposition und den Wachstumsbedingungen abhängen, wurden mikrometergroße GdFe Quadrate, die sich in einem Landauzustand befinden, erfolgreich hergestellt. Die erzeugte Wirbelkerndynamik zeigte eine lineare Bewegung. Transmissionselektronenmikroskopieexperimente, die die Ablenkung der Wirbelkerne in Abhängigkeit des angelegten Feldes abbilden, deuten darauf hin, dass die lineare Bewegung durch Verankerung ('pinning') im Material hervorgerufen wird. Mikromagnetische Simulationen, denen Bereiche mit zufälliger Anisotropierichtung zu Grunde liegen, können die experimentellen Ergebnisse reproduzieren.

Die Ergebnisse, die in dieser Dissertation vorgestellt werden, zeigen, wie verschiedene Wechselwirkungen die Wirbelkerndynamik beeinflussen. Diese Erkenntnisse sind für die Verwendung von Wirbeln in neuartigen Anwendungen wie Wirbelarbeitspeicher ('vortex random access memory', VRAM) oder 'spin torque' Oszillatoren (STOs) von großem Interesse.