

DISS. ETH NO. 28096

X-RAY IMAGING OF SPIN-WAVE DYNAMICS: FROM FERROMAGNETIC TO ANTIFERROMAGNETIC SYSTEMS

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

presented by
SINA MAYR

M.Sc.
Technical University of Munich

born on 25.09.1991

citizen of
Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Laura Heyderman
Dr. Jörg Raabe
Prof. Dr. Pietro Gambardella
Prof. Dr. Christian Back

2021

Abstract

Spin waves are collective excitations of ordered spin systems, for which, in a classical view, the magnetic moments precess with a spatially periodic phase shift that determines their wavelength. In terms of applications, the use of spin waves as signal carriers in future spintronic logic and memory devices has the advantages of potentially lower power consumption and improved miniaturisation compared to today's charge-based technologies. The use of antiferromagnetic systems with their ultrafast spin dynamics could additionally boost the operational speed of future spin-wave devices. As the dynamics of spin waves in antiferromagnets is still largely unknown, ferrimagnets offer an ideal intermediate step on the way towards the investigation of fully antiferromagnetic systems.

The research projects described in this thesis follow the route from ferromagnetic towards antiferromagnetic magnonic systems. To directly image spin waves in these systems with a spatial and temporal resolution on the order of 10 nm and 10 ps in a phase-resolved way, time-resolved scanning transmission x-ray microscopy (TR-STXM) was employed. A process to fabricate x-ray transparent windows into bulk samples based on Xe plasma focused ion beam milling was developed to be able to image spin waves in single crystalline systems.

At first, the manipulation of short-wavelength spin-wave emission from vortex cores in both a synthetic ferrimagnet and single-layer ferromagnetic films with an applied static magnetic field is discussed. In the single-layer system, the vortex core exhibits a field-induced expansion and thus becomes a source for the directional emission and focussing of spin waves.

Subsequently, the direct imaging of spin waves with nanoscale wavelengths in ferromagnetic systems at high frequencies exceeding 30 GHz is demonstrated. Acoustic and optical modes were observed in coupled ferromagnetic systems with antiparallel magnetic orientation. In single-layer systems, spin-wave modes up to the fourth perpendicular standing order were directly imaged.

Furthermore, spin waves in ferrimagnetic Ga-doped yttrium-iron-garnet (YIG) with a reduced net magnetization to approach compensation are discussed. Despite their relatively long wavelengths, the spin waves in this material exhibit exchange-governed dynamics. Moreover, a non-linear effect in the spin-wave excitation was observed, which leads to giant spin-wave precession angles exceeding 20° .

Finally, the coherent excitation and imaging of spin-wave dynamics in antiferromagnetic hematite at room temperature above 20 GHz is demonstrated.

Kurzfassung

Spinwellen sind kollektive Anregungen von geordneten Spinsystemen, bei denen, klassisch betrachtet, die magnetischen Momente mit einer räumlich periodischen Phasenverschiebung, die die Wellenlänge bestimmt, präzessieren. In Bezug auf Anwendungen bietet die Verwendung von Spinwellen als Signalträger in zukünftigen spintronischen Logik- und Speicherbauteilen zwei wesentliche Vorteile gegenüber den heutigen ladungsbasierten Technologien: einen potenziell geringeren Energieverbrauch und bessere Miniaturisierungsmöglichkeiten. Daneben könnte die Verwendung antiferromagnetischer Systeme mit intrinsisch ultraschneller Spindynamik die Operationsgeschwindigkeit künftiger Spinwellen-Bauelemente zusätzlich erhöhen. Da die Dynamik von Spinwellen in Antiferromagneten zur Zeit noch weitgehend unbekannt ist, bieten Ferrimagnete einen idealen Zwischenschritt auf dem Weg zur Untersuchung vollständig antiferromagnetischer Systeme.

Die in dieser Arbeit beschriebenen Forschungsprojekte befassen sich mit dem Übergang von ferromagnetischen zu antiferromagnetischen magnonischen Systemen. Für die phasenaufgelöste Abbildung von Spinwellen in diesen Systemen mit einer kombinierten räumlichen und zeitlichen Auflösung in der Größenordnung von 10 nm und 10 ps, wurde zeitaufgelöste Rastertransmissionsröntgenmikroskopie (TR-STXM) eingesetzt. Um Spinwellen in einkristallinen Systemen abbilden zu können, wurde ein Verfahren zur Herstellung von röntgentransparenten Fenstern in massiven Proben entwickelt, das auf fokussiertem Ionenstrahldünnen mit in einem Plasma erzeugten Xe-Ionen basiert.

Zunächst wird der Einfluss eines statischen Magnetfelds auf die kurzweilige Spinwellenemission von magnetischen Wirbelkernen sowohl in einem synthetischen Ferrimagneten als auch in einschichtigen ferromagnetischen Filmen diskutiert. Im einschichtigen System weist der Wirbelkern eine feldinduzierte Ausdehnung auf und wird so zu einer Quelle für die gerichtete Emission und Fokussierung von Spinwellen.

Anschließend wird die direkte Abbildung von Spinwellen mit nanoskaligen Wellenlängen in ferromagnetischen Systemen bei hohen Frequenzen von über 30 GHz gezeigt. Akustische und optische Moden wurden in gekoppelten ferromagnetischen Systemen mit antiparalleler magnetischer Orientierung beobachtet. In einschichtigen Systemen wurden Spinwellenmoden bis zur vierten senkrecht stehenden Ordnung direkt abgebildet.

Außerdem werden Spinwellen in ferrimagnetischem Ga-dotiertem Yttrium-Eisen-Granat (YIG) mit reduzierter Nettomagnetisierung in Annäherung an den magnetischen Kompensationspunkt diskutiert. Trotz ihrer relativ langen Wellenlängen zeigen die Spinwellen in diesem Material eine durch die Austauschwechselwirkung dominierte Dy-

Kurzfassung

namik. Darüber hinaus wurde ein nichtlinearer Effekt bei der Spinwellenanregung beobachtet, der zu außergewöhnlich großen Präzessionswinkeln der Spinwellen von über 20° führt.

Abschließend wird die kohärente Anregung und Abbildung der Spinwellen-Dynamik in antiferromagnetischem Hämatit bei Raumtemperatur oberhalb von 20 GHz demonstriert.