



Nick-André Träger (Autor)
**Röntgenmikroskopische Untersuchungen der
Magnetisierungsdynamik in nanoskaligen
magnonischen Wellenleiterstrukturen**



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/8491>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

Kapitel 1

Einleitung

Seit Thales von Milet (634-546 v. Chr.) die Anziehung von Eisen durch Magnetit beschrieb, fasziniert das Naturphänomen des Magnetismus die Menschen [1]. Der Magnetismus ist ein bedeutendes Forschungsfeld, in welchem viele Errungenschaften hinsichtlich ihrer technischen Bedeutung aus der heutigen Welt nicht mehr wegzudenken sind. Zu einem der prominentesten Beispielen zählt der Einsatz von magnetischen Materialien und Phänomenen in der Mikroelektronik und Datenverarbeitung [1]. Hierbei wurde mit der Entdeckung des Riesenmagnetwiderstandes im Jahre 1984, die 2007 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet wurde, das Gebiet der Spintronik geboren [1].

Durch die rasante Entwicklung der technischen Möglichkeiten hinsichtlich der Dünnschichtpräparationsverfahren und Strukturierungstechniken auf der Nanoskala in den letzten Jahrzehnten war es möglich,

magnetische Strukturen auf der fundamentalen Längenskala der magnetischen Wechselwirkungen unterhalb von 100 nm zu fertigen. Die elementaren Anregungen in diesen Systemen, die Spinwellen oder Magnonen, zeigen Wellenlängen genau in diesem Bereich. Mit ihren Mega- bis Gigahertz-Frequenzen, liegen sie exakt im Bereich der modernen Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik. Aus dem beobachteten magnetischen Verhalten wuchs die Idee der Magnonik als Teilgebiet der Spintronik, welche die Spindynamik zur Informations- und Datenübertragung ausnutzt. Es besteht die Hoffnung durch zukünftige spintronische Bauteile, den in der Elektronik präsenten ohmschen Wärmeverlust zu reduzieren. Auch die Photonik bestimmt in weiten Bereichen die Informationstechnik. Durch die weitere Miniaturisierung von elektrooptischen Systemen mit Strukturen weit unterhalb der Lichtwellenlängen sind hier an vielen Stellen natürliche Grenzen gesetzt, deren Überwindung aktuell eine große Herausforderung darstellt. Das Forschungsfeld der Magnonik könnte daher vielversprechende alternative Lösungen bereitstellen.

Das fundamentale Phänomen, auf welchem der Bereich der Magnonik beruht, wurde erstmals von Felix Bloch beschrieben [2]. Dabei zeigte er die wellenartige Präzessionsbewegung der Magnetisierung, sogenannte Spinwellen, die im Gegensatz zur Elektronik keine Ladungsträger bewegen und somit keine ohmschen Verluste verursachen. Magnonen, die als Quasiteilchen in die Kategorie der Bosonen fallen, zeigen außerdem fundamentale Quantenphänomene wie Interferenz oder Beugung, die sich innerhalb logischer Operationen ausnutzen lassen könnten [3, 4]. Somit stellt die Magnonik einen unter Umständen vielversprechenden Kandidaten für fortschrittliche Konzepte dar. Prinzipielle Schwierigkeiten entstehen jedoch durch richtungsabhängige Vielfalt der Magnonen-

typen, die in der Regel simultan auftreten und zu einem komplexen Wellenfeld führen können. Weiterhin verschiebt ein äußeres Magnetfeld die einzelnen Beiträge in unterschiedlicher Weise. Innerhalb eines realen Systems erzeugt eine eingeschränkte Geometrie inhomogene Magnetfeldkomponenten, die sich bei nicht gut definierten Rändern schwer beherrschen lassen und zu einer unkontrollierbaren Spinwellenlandschaft führen können. Daher ist es von essentieller Bedeutung, experimentelle bildgebende Verfahren zu entwickeln, die eine Kombination von entsprechender Ortsauflösung unter etwa 100 nm und einer Zeitauflösung von unter 100 ps bereitstellen.

Spinwellen wurden bisher entweder mit der konventionellen zeitaufgelösten Kerr-Mikroskopie oder durch die etablierte Brillouin-Lichtstreuung untersucht und sichtbar gemacht. Jedoch begrenzt die optische Wellenlänge die detektierbare Wellenlänge der Magnonen [5]. Seit der enormen Weiterentwicklung der Lithographieprozesse und der Strukturierung nanoskopischer Proben wurden in den letzten Jahren die Charakterisierung der Eigenschaften von Magnonen unterhalb der möglichen Auflösung dieser konventionellen Methoden (< 250 nm) immer wichtiger. Für die Untersuchungen auf Längenskalen unterhalb 250 nm bietet die zeitaufgelöste Röntgenmikroskopie ideale Eigenschaften. Der zugrunde liegende Röntgenzirkulardichroismus (XMCD; *X-ray Magnetic Circular Dichroism*) liefert sehr hohe magnetische und elementspezifische Kontraste. Mit ihrer extrem hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung ist sie in der Lage, Wellenlängen unterhalb der 100 nm-Grenze abzubilden und mit bis zu 50 Milliarden Bildern pro Sekunde (≈ 50 GHz) dynamische Prozesse zu filmen, was einer Zeitauflösung von etwa 20 ps entspricht. Eine weitere Stärke dieser Technik ist der direkte Zugang zur Phasen- und Amplitudeninformation, was die

Möglichkeiten der oben genannten Methoden deutlich übersteigt [6, 7]. Zwar kann mit einer besonderen Form der Brillouin-Lichtstreuung die Phase ebenfalls erfasst werden, jedoch unter dem Informationsverlust der Amplitude [5].

Im Fokus der Forschungsarbeiten in der Magnonik stand zunächst die fundamentale Spinwellenanregung in ausgedehnten magnetischen Dünnschichten, welche durch verschiedenste Methoden realisiert werden konnten. Dabei wurden unter anderem Spinwellen innerhalb eines magnetischen Materials durch triviale Mikrowellenantennen oder auch durch koplanare Wellenleiter induziert [5, 8, 9]. Der oszillierende Strom durch die Kupfer, Gold oder Aluminium-Leitung erzeugt ein oszillierendes lokales Magnetfeld, das Magnonen anregt. Lokalisierte Spinwellenquellen können auch durch die Anregung von speziellen Magnetisierungsstrukturen, wie beispielsweise Vortex- oder auch Loch-Strukturen, realisiert werden, welche ultrakurze Wellenlängen generieren können [10–13]. So wurden beispielsweise 2019 durch die hochfrequente Gyration einer Vortexstruktur Wellenlängen unterhalb 100 nm beobachtet und abgebildet [12].

Neben diesen grundlegenden Forschungsarbeiten hinsichtlich der Erzeugung und Beobachtung extrem kurzer Wellenlängen, wurde des Weiteren die Manipulation propagierender Spinwellen erforscht. Dazu wurden lokale Variationen der Magnetisierungslandschaft, welche durch Dicken- oder Materialänderungen realisiert wurden, verwendet, um beispielsweise die Richtung oder die Wellenlänge propagierender Spinwellen zu modifizieren [14]. In Analogie zur Photonik konnte außerdem das Snelliussche Brechungsgesetz in die Welt der Magnonik übertragen werden [15]. Somit konnten die Propagationseigenschaften von Spinwellen in einem Material mit Stufen- bzw. Dickenprofil vorausgesagt und

gezielt manipuliert werden.

Ein weiteres prominentes Forschungsfeld in der Magnonik stellen die sogenannten magnonische Kristalle dar. Dabei handelt es sich um Proben-systeme, deren magnetische Eigenschaften durch Streifenstrukturen oder Antidotgitter im Raum periodisch variieren [4, 16]. Somit lässt sich eine Bandstruktur erzeugen, die sich in der Anregung und Ausbreitung von Spinwellen hochgenau einstellen lässt. Des Weiteren konnten dynamische Kristalle generiert werden, die sich beispielsweise durch eine räumliche Variation des Feldes innerhalb einer magnonischen Proben-geometrie mit Hilfe von Strom formierten [17–19]. Mit dieser Technik könnten Bandstrukturen durch dynamische magnonische Kristalle beliebig rekonfiguriert und manipuliert werden.

Ein wesentlicher Aspekt der Magnonik ist die Anregung, Propagation, Manipulation und die Detektion von Spinwellen in magnonischen Wellenleiterstrukturen. Diese wurden schon im speziellen für konzeptionelle magnonische Transistoren und Logikgatter verwendet, welche die ersten Grundlagen für zukünftige reale Anwendungen bereitstellten [20–23]. Frühe theoretische und erste experimentelle Arbeiten haben jedoch gezeigt, dass die physikalische Einschränkung der Breite einer magnetischen Probe zu Effekten im Mikrometerbereich führt, die nicht vernachlässigbar sind [24–26]. Auch in dieser Arbeit wird primär das grundlegende Spinwellenverhalten in physikalisch eingeschränkten Systemen untersucht, um diese Effekte genauer zu verstehen und um den Weg für zukünftige Anwendungen zu ebnen.

Die Charakteristiken der Spinwelleneigenschaften sind stark von dem gewählten magnonischen Material abhängig. Dabei spielt der Dämpfungsparameter α eine entscheidende Rolle. Je nach dessen Grö-

ße zerfällt eine Spinwelle erst nach mehreren Millimetern oder schon nach wenigen Mikrometern. Dementsprechend bieten Materialien mit einer geringen Dämpfung ideale Eigenschaften für die grundlagenphysikalische Forschung, da in ihnen die Propagationseigenschaften innerhalb größeren und komplexeren Strukturen untersucht werden können. Das prominenteste Beispiel dafür ist Yttrium-Eisen-Granat (YIG) mit einer Dämpfung von $\alpha < 0.001$ [27, 28]. Jedoch ist YIG in der Herstellung extrem aufwendig und kostenintensiv, sodass dieses Material als zukünftige Komponente in realen Systemen derzeit nicht in Frage kommt. Im Gegensatz dazu besitzen Metalle wie Eisen oder Kobalt eine Dämpfung von $\alpha \approx 0.01$, die die Spinwellenpropagation auf wenige Mikrometer beschränkt [26, 29]. Trotz des höheren Dämpfungsparameters sind diese Materialien für zukünftiger Anwendungen enorm interessant, da die kurzen Propagationslängen wegen der Längenskalen der Mikrochiptechnik gut tolerierbar sind. Darüber hinaus sind sie vergleichsweise einfach und kostengünstig durch Sputterdepositionen herzustellen.

Innerhalb dieser Arbeit wurden aktuelle Fragen aus dem Bereich der Magnonik adressiert, deren Lösungen wesentlich zum Fortschritt dieses Forschungszweiges beitragen sollen. Zunächst wird eine schnelle, exakte und daher leistungsfähige Methode zur direkten experimentellen Bestimmung der magnonischen Dispersionsrelation realisiert, die eine grundlegende und essentielle Charakterisierung in der Magnonik darstellt. Die konventionelle Methode, wie das Abtasten verschiedener Frequenzen und das jeweilige Messen der Wellenvektoren, ist bis heute eine enorm zeitintensive Messung.

Die Spinwellenemission in magnonischen Wellenleiterstrukturen im Mikrometerbereich können erheblich durch die eingeschränkte Geometrie und durch unscharfe Ränder beeinflusst werden. Bisher war es nicht

mögliche diese Effekte genau genug zu erfassen und es ist bis heute weitgehend ungeklärt, wie und wodurch genau Magnonen in solchen Systemen entstehen. Dies soll im Rahmen dieser Arbeit an einfachen rechteckigen Permalloy (Py) Wellenleitern geklärt werden. Ebenfalls wurde die Thematik der simultanen Anregung und Propagation von Spinwellenmoden höherer Ordnungen behandelt, die durch laterale Quantisierungseffekte der Wellenleiterstrukturen entstehen. Diese wurden zwar theoretisch beschrieben, jedoch konnten sie bisher ebenfalls nicht mit der notwendigen räumlichen und zeitlichen Auflösung experimentell beobachtet und abgebildet werden.

Mit den im Rahmen dieser Arbeit erreichten räumlichen und zeitlichen Auflösung konnte ein unerwartetes Auftreten von höheren harmonischen Anregungen in der oszillierenden Magnetisierungsstruktur beobachtet werden. Zur Erklärung wird ein neues Konzept eines magnonischen Kristalls als Quantensystem erarbeitet, dass auf der Formation eines sogenannten Raum-Zeit-Kristalls beruht. Dies könnte den ersten Nachweis eines solchen Systems bei Raumtemperatur in einer mikrometergroßen Struktur darstellen, was ein neues Forschungsfeld innerhalb der Magnonik eröffnet.

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

In den folgenden Kapiteln wird eine kurze Übersicht der theoretischen Grundlagen gegeben, welche zum Verständnis der in Kapitel 4 besprochenen Ergebnisse beitragen. Dabei werden zunächst die relevanten magnetostatischen Wechselwirkungen und die Bildung von magnetischen Domänenwänden aufgezeigt. Jedoch liegt das Hauptaugenmerk dieser Arbeit auf der Magnetisierungsdynamik, welche in Kapitel 2.2 behandelt wird. Dabei wird insbesondere auf die Landau-Lifschitz-Gilbert-Gleichung eingegangen, durch welche die Magnetisierungsdynamik beschrieben werden kann. Abschließend wird der Fokus auf das Auftreten von Spinwellen und deren frequenzabhängiges Verhalten gelegt.

2.1 Magnetismus auf der Nanoskala

Zeeman-Wechselwirkung

Aus der Wechselwirkung zwischen einem magnetischen Feld externen Ursprungs H_{ext} und einem magnetischen Moment m eines Körpers resultiert die Zeeman-Energie. Diese ist minimal, wenn H_{ext} und m parallel ausgerichtet sind. Somit bewirkt die Zeeman-Energie die parallele Ausrichtung der magnetischen Momente zu einem äußeren Feld. Diese Beziehung kann durch einen Hamiltonoperator beschrieben werden [1, 13]:

$$\mathcal{H}_{\text{Zee}} = -m \cdot H_{\text{ext}} \quad (2.1)$$

Streu- und Entmagnetisierungsfeld

Um den Einfluss des Streu- und Entmagnetisierungsfeldes zu verstehen, muss die Beziehung der drei magnetischen Vektoren B , H und M berücksichtigt werden. In der Gleichung

$$M = B - \mu_0 H \quad (2.2)$$

sind die magnetische Flussdichte B , das magnetische Feld H und die Magnetisierung M miteinander verknüpft [1]. Abbildung 2.1 veranschaulicht diese Beziehung. Betrachtet man das Gaußsche Gesetz für Magnetfelder