

Kapitel 1

Einleitung

Magnetismus ist eine seit mehr als 2000 Jahren bekannte Naturerscheinung. Bereits Thales von Milet (634–546 v. Chr.) beschrieb die Anziehung von Eisen durch das Mineral Magnetit, nach dem das Phänomen entsprechend auch benannt wurde [1]. Heute ist insbesondere der Festkörpermagnetismus Grundlage einer Vielzahl moderner Technologien und besitzt einen hohen Stellenwert sowohl in der angewandten als auch in der Grundlagenforschung. Im Verlauf des 20. Jahrhunderts wurden enorme Fortschritte im Verständnis dieses Phänomens gemacht. Ebenso haben sich magnetische Messtechniken in dieser Zeit stark weiterentwickelt [1, 2]. Im Zuge der sich rasant entwickelnden Mikro- und Nanotechnologie sind Phänomene des Mikromagnetismus zunehmend in den Fokus gerückt. In den letzten Jahrzehnten vermehrte sich dabei insbesondere das Interesse an den dynamischen Eigenschaften mikromagnetischer Strukturen. Die Entdeckung des Riesenmagnetwiderstands (GMR) im Jahr 1988 führte beispielsweise zu einer neuen Generation schneller magnetischer Datenspeichermedien und Magnetfeldsensoren [2]. Diese wurden in den 90er Jahren weiter verbessert mit der Entwicklung magnetischer Tunnelkontakte, die bis heute unter anderem in Leseköpfen magnetischer Festplatten verwendet werden [3, 4]. Beide

Phänomenen basieren auf der direkten Ausnutzung der Eigenschaften des Elektronenspins und trugen damit zur Geburt der Idee bei, die Verwendung von Spins und Spindynamik in der Informationstechnologie weiter auszubauen. Es entwickelte sich das Forschungsfeld der Spintronik [3, 5], in dem entsprechende Ansätze konzipiert und untersucht werden. Moderne Rechen- und Kommunikationstechnologie stößt nach einem halben Jahrhundert beispiellosen Fortschritts allmählich an die Grenzen dessen, was an Miniaturisierung physikalisch noch möglich ist. Auch der hohe Energieverbrauch elektronischer Geräte ist ein Punkt, der gerade angesichts der aktuellen Klimaproblematik einer Lösung bedarf. In der Spintronik finden sich vielversprechende Ansätze zur Lösung dieser Probleme.

Ein grundlegendes Phänomen der Magnetisierungsdynamik sind Spinwellen. Ihre Erforschung reicht zurück bis ins Jahr 1930 zu einer Arbeit von Felix Bloch [6], der die sich wellenartig ausbreitenden Präzessionsanregungen der Magnetisierung erstmals beschrieb. Ihre Wellenlänge ist um Größenordnungen kleiner als die elektromagnetischer Wellen im für diese Technik relevanten Giga- und Terahertzbereich. Mit Mikrowellen, deren Wellenlängen im Zentimeter- und Millimeterbereich liegen, können Spinwellen im Mikro- und Nanometerbereich erzeugt werden. Die Ausbreitung von Spinwellen erfolgt zudem ohne die Bewegung von Ladungsträgern, wodurch sich Ohm'sche Verluste bei der Informationsübertragung vermeiden ließen. Die Verwendung von Wellen als Informationsträger verspricht zudem erweiterte Möglichkeiten bei der Datenverarbeitung und der Gestaltung logischer Schaltkreise und Bauelemente durch Ausnutzung von Wellenphänomenen wie Beugung und Interferenz [5, 7, 8]. Durch dieses Potential haben sich Spinwellen zu einem eigenständigen, prominenten Forschungsfeld auf dem Gebiet des Magnetismus, der Magnonik, entwickelt. Großes Interesse besteht insbesondere an der Erforschung der Erzeugung und des Verhaltens von Spinwellen mit möglichst kurzen Wellenlängen im Nanometerbereich, da diese für rechentchnische Anwendungen zur ausreichenden Miniaturisierung unabdingbar sind.

Eine wichtige Voraussetzung für das Funktionieren einer solchen Technik ist die Möglichkeit der Umwandlung von Ladungsströmen zu Spinströmen und umgekehrt. Derartige Mechanismen sind auch für die Anwendung in magnetischen Datenspeichern interessant. Im Fokus der jüngeren Forschung sind dabei vor allem Phänomene wie der Spin-Hall-Effekt und der Rashba-Effekt, die sich aus der Spin-Bahn-Wechselwirkung ergeben. In dünnen Filmen von Materialien mit hoher Spin-Bahn-Wechselwirkung führen diese Effekte bei fließendem Ladungsstrom zu Spinströmen in eine angrenzende Materialschicht. Ist diese Schicht magnetisch, kann dadurch ein Drehmoment auf die Magnetisierung ausgeübt werden, wodurch sich Magnetisierungsdynamik anregen oder beeinflussen lässt [9, 10]. Aufgrund der Komplexität dieser Effekte, die auf einer Vielzahl verschiedener zusammenwirkender Mechanismen auf ähnlichen Energie- und Zeitskalen basieren, sind quantitative Vorhersagen über ihre Größe und Zusammensetzung in einem gegebenen Materialsystem noch immer schwierig.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Untersuchungen im Bereich der obigen Phänomene durchgeführt. Als primäre Messmethode wurde dabei zeitaufgelöste Rasterröntgentransmissionsmikroskopie eingesetzt. Im Vergleich mit anderen etablierten Messverfahren für Magnetisierungsdynamik wie zeitaufgelöste Kerr-Mikroskopie und Brillouin-Lichtstreuung, bietet diese Technik eine deutlich erhöhte räumliche Auflösung. Damit sind Einblicke in Bereiche möglich, die für die genannten optischen Methoden schwer bis garnicht zugänglich sind. Allerdings setzt ihre Anwendung eine hinreichende Transparenz der untersuchten Probe für weiche Röntgenstrahlung voraus. Dies ist mit metallischen Dünnschichten leicht zu realisieren, da diese direkt auf geeigneten röntgentransparenten Membranen präpariert werden können. In solchen Systemen wurden in dieser Arbeit Versuche zur Wirkung des Spin-Hall-Effekts an magnetischen Vortexstrukturen durchgeführt. Dabei wurde die Dynamik einer Vortexstruktur als Reaktion auf die Anregung mit einem durch diesen Effekt generierten Spinstrom gemessen. Weiterhin wurden in ausgedehnten Versuchsreihen die Ausbreitung und Dispersion von Spinwellen in einkristallinen Filmen des ferrimagnetischen Isolators Yttrium-Eisengranat untersucht. Hier erlaubt die Röntgenmikroskopie, im Gegensatz zu optischen Techniken, die Unter-

suchung von Wellen mit Wellenlängen unter 200 nm, welche für technische Anwendungen die Minimalanforderung wären. Da Einkristalle meist nicht auf üblichen röntgentransparenten Membranen präpariert werden können, mussten zunächst spezielle Verfahren entwickelt werden, um das Substrat der Filme auf eine röntgentransparente Dicke zu dünnen. Dadurch wurde das in der Spinwellenforschung prominente Yttrium-Eisengranat erstmals der zeitaufgelösten Röntgenmikroskopie zugänglich gemacht. In all diesen Projekten wurden zudem mikromagnetische Simulationen zur Auswertung der Messergebnisse eingesetzt.

Stand der Forschung

Spin-Orbit-Torque (SOT)

Zum Zeitpunkt des Beginns der Arbeit an der vorliegenden Dissertation war die Erforschung sogenannter Spin-Transfer-Torque (STT)-Effekte ein etabliertes und vielbeachtetes Feld der mikromagnetischen Forschung [11]. Man versteht darunter ein Drehmoment auf die lokale Magnetisierung durch spinpolarisierte Elektronen. Eine besondere Untergruppe der STT-Effekte stellen die sogenannten Spin-Orbit-Torques (SOT) dar, bei denen die erforderliche Spinpolarisation durch die starke Spin-Bahn-Kopplung in Materialien mit hoher Kernladungszahl erzeugt wird, wenn durch sie ein elektrischer Strom fließt. Dieses Phänomen war seit Beginn des 21. Jahrhunderts zunehmend in den Fokus der Forschung gerückt. Untersucht wurde in den experimentellen Arbeiten in erster Linie das durch den Effekt induzierte Umklappen der Magnetisierung eines angrenzenden homogen magnetisierten Films [9, 12–15]. Eher grundlagenorientierte Arbeiten versuchten die Stärke des resultierenden Drehmoments mittels elektrischer Messungen zu quantifizieren [16, 17]. Über die physikalischen Ursachen dieses Effekts wurde allerdings noch immer diskutiert. Der Spin-Hall-Effekt [9, 18] und der Rashba-Effekt [12, 19] waren hier die am meisten diskutierten Phänomene. Der seinerzeit aktuelle Stand war, dass beide Effekte zum SOT beitragen, wobei ihr jeweiliger Anteil, ebenso wie die Gesamtstärke des SOT, stark vom untersuchten System abhängt [10, 20]. Eine genaue Bestimmung dieser Anteile in einem spezifischen System war aufgrund der sehr ähnlichen Wirkung beider Phänomene bestenfalls in speziell zu diesem Zweck gewählten Materialkombinationen möglich [20]. In der Regel ist die Basis dieser Untersuchungen makroskopische elektrische Transportmessungen an nanoskopischen Systemen. Aufgrund der Unterschiede der realen strukturellen Gegebenheiten können die Ergebnisse stark streuen. In den letzten Monaten sind zudem bedeutende Zweifel an der Verlässlichkeit dieser Messungen bei SOT-Schaltexperimenten an Antiferromagneten erwachsen [21, 22].

Ein mikromagnetisches System, an dem die Wirkung von SOT zu dieser Zeit noch nicht untersucht worden war, ist der magnetische Vortex. Diese topologische Struktur ist aufgrund ihrer Stabilität und ihres breiten Spektrums dynamischer Eigenmoden ein oft genutztes Studienobjekt in der Magnetisierungsdynamik und mikromagnetischen Forschungsarbeiten. In anwendungsorientierten Arbeiten wurde der Vortex in Verbindung mit STT unter anderem hinsichtlich seines Potenzials als regelbarer Hochfrequenzoszillator im Nanometerbereich erforscht [23–26]. Daraus ergab sich die Idee, die Anregung von Vortexdynamik mittels SOT auf ihre Effektivität hin zu untersuchen und festzustellen, ob aus dieser Dynamik auch Rückschlüsse auf die Stärke des SOT im jeweiligen Materialsystem möglich sind. Eine direkte Abbildung von Vortexdynamik, insbesondere der Umkehrung seiner Kernpolarität („Schalten“), ist seit langem durch zeitaufgelöste Rasterröntgentransmissionsmikroskopie möglich [27–29]. Diese Technik erlaubt die direkte Abbildung von Magnetisierungsdynamik mit bis zu 20 nm räumlicher und bis zu 10 ps zeitlicher Auflösung. Damit kann auch eine einige 100 nm große Vortexstruktur und besonders der wenige 10 nm große Kern erfasst werden und es bietet sich die Möglichkeit zur Untersuchung einer durch SOT angeregten Vortexdynamik.

Spinwellen und Magnonik

Als die vorliegende Arbeit begonnen wurde, war der Bereich der Spinwellenforschung bereits stark auf potentielle technologische Anwendungen ausgerichtet. Als Untergruppe des Gebiets der Spintronik, die sich mit der Anwendung von Spindynamik in Informations- und Kommunikationstechnik allgemein befasst, etablierte sich hier die sogenannte Magnonik, benannt nach dem Spinwellenquant Magnon, die speziell das Potenzial von Rechentechnik auf Basis von Spinwellen als Informationsträger untersucht [5, 7, 8]. Forschungsgegenstand der Magnonik sind daher hauptsächlich die Erzeugung, Manipulation und Detektion von Spinwellen in Dünnsystems und Mikrostrukturen.

Viele Arbeiten untersuchten dabei die allgemeinen Eigenschaften der Wellen sowohl in ausgedehnten Filmen [30, 31], als auch in speziellen Strukturen wie streifenförmigen Wellenleitern [32, 33] oder ferromagnetischen Mikrodrähten [34], die später auch in ähnlicher Art in Anwendungen verwendet werden könnten. Andere Arbeiten erforschten die Erzeugung von Spinwellen mit verschiedenen Mechanismen. Neben der Verwendung einer einfachen Stripline-Antenne [35] wurden auch durch spezielle Magnetisierungstopologien erzeugte inhomogene Magnetfelder als Quellen untersucht [36, 37]. Die effiziente Erzeugung möglichst geringer Wellenlängen (< 100 nm), die für Anwendungen in der Mikrotechnologie und Informationsverarbeitung von großem Interesse sind, war eine wesentliche Zielstellung dieser Experimente. Auch Manipulation und Steuerung der Wellen war Gegenstand der Forschung. Dazu gehörte beispielsweise die Lenkung von Spinwellen durch lokale Variation der magnetischen Eigenschaften des Mediums [38] oder ihre Fokussierung mittels magnonischer Fresnel-Zonenplatten [39]. Ein weiteres Teilgebiet der Forschung stellten magnonische Kristalle dar. Dabei handelt es sich um Systeme mit räumlich periodischen Variationen in den magnetischen Eigenschaften, die als Metamaterialien für Spinwellen wirken. Dementsprechend interessant sind solche Systeme für Anwendungen, da sie genau einstellbare Charakteristika bei Erzeugung und Ausbreitung der Wellen besitzen [40–43]. Die wohl am meisten anwendungsorientierte Forschung versuchte bereits die Konstruktion tatsächlicher magnonischer Bauelemente wie Logikgatter [44, 45] oder Transistoren [46]. Diese waren zwar noch nicht für eine reale Anwendung geeignet, demonstrierten jedoch, dass das Konzept magnonischer Rechentechnik funktionieren kann und wo noch wesentliche Hürden bei deren Umsetzung bestehen.

Für den Großteil der hier genannten Forschung wurden als Messmethode entweder die etablierten optischen Methoden Brillouin-Lichtstreuung und zeitaufgelöste Kerr-Mikroskopie oder rein elektrische Spinwellenspektroskopie eingesetzt. Letztere Methode kann zwar Spinwellenaktivität detektieren, jedoch nicht räumlich auflösen. Zur Bestimmung von Wellenlängen oder genauer Ausbreitungscharakteristiken ist hierbei der Vergleich mit Simulationen das einzige Mittel. Die optischen

Verfahren verfügen zwar über räumliche Auflösung, diese ist jedoch begrenzt durch die Wellenlänge des verwendeten sichtbaren Lichts auf etwa 250 nm [47]. Jedoch bestand sowohl aus Sicht grundlegender als auch anwendungsorientierter Forschung großes Interesse an der Beobachtung deutlich kürzerer Wellen. Für die Grundlagenforschung interessant war einerseits der Übergang der Spinwellen vom Dipol-Austausch- in das reine Austausch-Regime und andererseits die Wechselwirkung mit ihrem Medium, wenn die Wellenlängen zunehmend in die Größenordnung von Korngrößen vordringen. Aus Anwendungssicht wiederum wären Wellenlängen von unter 100 nm erforderlich, damit diese Technik mit der Leistungsdichte aktueller Elektronik konkurrieren könnte.

Zeit aufgelöste Röntgentransmissionsmikroskopie bietet genug räumliche und zeitliche Auflösung, um in diesen Wellenlängenbereich vorzudringen. Neben den im vorherigen Abschnitt genannten Messungen magnetischer Vortexstrukturen, war diese Technik Stand 2016 bereits auch mehrfach für die Abbildung kurzer Spinwellen genutzt worden [37] (2016 gemessen, später veröffentlicht [48]). Diese Messungen waren ausschließlich in metallischen Dünnschichten erfolgt, da diese leicht auf kommerziellen röntgentransparenten Membranen gewachsen werden können. Das wohl prominenteste Material der Spinwellenforschung war jedoch das für seine sehr geringe magnetische Dämpfung bekannte ferrimagnetische Oxid Yttrium-Eisengranat ($Y_3Fe_5O_{12}$), kurz YIG (siehe beispielsweise [8, 31, 42, 49]). Die in YIG erzielbaren Laufweiten von Spinwellen übertreffen die von Metallfilmen bei weitem, da die Dämpfung ist hier um mindestens eine Größenordnung geringer ist. Dafür sind jedoch strukturell nahezu perfekte Filme nötig, die nur auf einkristallinem Gadolinium-Galliumgranat wachsen. Das sich daraus ergebende Problem der unzureichenden Röntgentransparenz zu beheben und damit eine direkte Abbildung und Untersuchung von Spinwellen in YIG unterhalb der optischen Auflösungsgrenze zu ermöglichen war dementsprechend von großem Interesse für die Spinwellenforschung und ein Schwerpunkt dieser Dissertation.

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

2.1 Magnetismus in Festkörpern

2.1.1 Magnetische Dipolmomente in Atomen

Festkörpermagnetismus ist ein kollektives Phänomen basierend auf der Wechselwirkung von atomaren magnetischen Dipolmomenten [1, 2]. Magnetische Dipolmomente, oder einfach magnetische Momente, \vec{m} stellen die elementare Quelle magnetischer Felder dar. Analog zum elektrischen Dipol ist die potentielle Energie des magnetischen Dipols in einem äußeren magnetischen Feld \vec{H} gegeben durch [1]:

$$E = -\mu_0 \vec{m} \cdot \vec{H} \quad (2.1)$$

wobei $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ NA}^{-2}$ die magnetische Feldkonstante ist. Diese Energie ist minimal wenn $\vec{m} \parallel \vec{H}$. Ein magnetischer Dipol richtet sich daher bevorzugt parallel zu einem angelegten Magnetfeld aus. Der

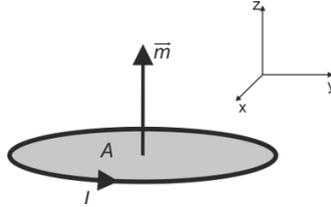


Abbildung 2.1: Magnetisches Moment \vec{m} eines Kreisstromes I , der eine Fläche A einschließt, im kartesischen Koordinatensystem.

Ursprung magnetischer Momente liegt in der Bewegung elektrischer Ladungen oder elektrischen Strömen. In der klassischen Physik gilt für eine beliebige ortsabhängige elektrische Stromdichteverteilung $\vec{j}(\vec{r})$ [2]:

$$\vec{m} = \frac{1}{2} \int \vec{r} \times \vec{j}(\vec{r}) d^3r \quad (2.2)$$

Im einfachen Fall eines ebenen Kreisstromes, der im kartesischen Koordinatensystem (xyz) in der xy -Ebene fließen soll, ergibt sich daraus die Beziehung:

$$\vec{m} = IA \vec{e}_z \quad (2.3)$$

wobei I die elektrische Stromstärke, A die vom Strom umschlossene Fläche und \vec{e}_z der Einheitsvektor entlang der z -Achse (siehe Abbildung 2.1) ist. In einem Atom sind bewegte elektrische Ladungen gegeben durch die Elektronen in der Atomhülle. Wird für den Kreisstrom ein Elektron mit einem klassischen Bahndrehimpuls \vec{l} eingesetzt, erhält man [1, 2]:

$$\vec{m} = -\frac{e}{2m_e} \vec{l} \quad (2.4)$$