

1 Einleitung

Betrachtet man die Entwicklung der Forschung auf dem Gebiet des Magnetismus in den letzten Jahren, so war diese stets geprägt vom Wunsch nach dem Verständnis und der Möglichkeit zur Herstellung und Manipulation von immer kleineren Strukturen. Großes Potential wird nicht nur zukünftigen Entwicklungen der Datenspeicherung zugeschrieben, sondern auch elektronischen Bauteilen, basierend auf der Spintronik [2, 3, 4], die neben der Ladung auch den Spinfreiheitsgrad und damit das magnetische Moment des Elektrons ausnutzen. Im Bereich der Sensorik und der Erforschung nichtflüchtiger Speicher ist insbesondere die Entdeckung des Riesenmagnetowiderstands [5, 6] zu erwähnen, die erst kürzlich mit dem Nobelpreis gewürdigt wurde.

Seit der Mitte des letzten Jahrhunderts ist bekannt, dass Domänenwände in magnetischen Materialien zwei Gebiete unterschiedlicher Magnetisierung voneinander trennen und deshalb in fast jeder magnetischen Konfiguration bis in den Nanometer-Bereich hinein auftreten. Nicht ohne Grund sind Domänenwände deshalb seit ihrer Entdeckung ein wichtiges und andauerndes Forschungsobjekt. In den letzten Jahren war besonders die direkte Domänenwandmanipulation von Interesse. So konnte experimentell bereits erfolgreich die Bewegung einer Domänenwand mittels eines externen Feldes [7, 8], wie auch mit einem polarisierten elektrischen Stroms („spin transfer torque“) [9, 10, 11] nachgewiesen werden. Diese Manipulationen legen den Grundstein für eine mögliche Variante der Datenspeicherung in der Zukunft („racetrack memory“), und bieten darüber hinaus die Möglichkeit, die Domänenwände als Basis für Logik-Schaltungen zu verwenden [12].

Einen weiteren wichtigen Grundpfeiler der Magnetisierungsdynamik stellt der Bereich der Spinwellen dar, in dem ebenfalls in den letzten Jahren intensiv an kleineren Strukturen geforscht wurde (siehe z. B. [13, 14]). Von besonderer Bedeutung ist dabei die Beeinflussung von Spinwellen durch ein externes Feld [15], einen Strom [16], oder Multilagen und magnonische Kris-

talle [17]. Die Demonstration der prinzipiellen Funktionsweise von spinwellenbasierten Logikbauteilen [18] oder Signalverarbeitungselementen [19, 20, 21] war zugleich das Aufzeigen des Potentials für mögliche Anwendungen.

Die theoretische Erforschung des Verhaltens von propagierenden Spinwellen an Domänenwänden stellt damit gegenwärtig ein interessantes Forschungsgebiet dar, sind doch die experimentellen Möglichkeiten zur Untersuchung, beispielsweise mittels Brillouin-Lichtstreuemikroskopie, in jüngster Zeit entwickelt worden [22]. Bis jetzt wurden nur einige wenige, analytische oder numerische Arbeiten auf dem Gebiet der Spinwellenstreuung durchgeführt [23, 24, 25], die eine Phasenverschiebung einer propagierenden Spinwelle in einer Domänenwand vorhergesagt haben mit einer möglichen Anwendung als statisches Bauteil für Logik-Schaltungen oder Spinwelleninterferometer. Wenige ältere Arbeiten wie z. B. [26, 27] beschäftigten sich mit dem Verhalten propagierender Spinwellen an Bloch-Wänden mit weitestgehend analytischen Methoden. Besonders hervorzuheben ist insbesondere die Doktorarbeit von Glock [26], die mittels numerischer und exakter analytischer Rechnungen zeigen konnte, dass es unter schrägem Einfall der Spinwelle an einer Bloch-Wand zu Reflexionen derselben kommen kann.

Auf der anderen Seite kann auch die Frage nach dem Einfluss der Spinwelle auf die Domänenwand selbst gestellt werden, insbesondere ob ein Impulsübertrag auf die Domänenwand möglich ist. So konnten Han et. al [1] mittels numerischer Simulation zeigen, dass die Bewegung einer Domänenwand von einer durchlaufenden Spinwelle induziert werden kann. Dieses Verhalten würde zu neuen Erkenntnisse bzgl. der thermischen Stabilität von Domänenwänden führen [26, 28, 29] und eine weitere Methode der Domänenwandmanipulation darstellen.

Diese Arbeit hat das Ziel, das Verhalten von propagierenden Spinwellen an Domänenwänden mittels numerischer und analytischer Rechnungen im Rahmen der Theorie des Mikromagnetismus systematisch zu untersuchen. Dazu werden im Gegensatz zu bisherigen Arbeiten ein wesentlich breiteres Spektrum an Domänenwandtypen, Probengeometrien und Materialparametern herangezogen, sowie die Abhängigkeit von äußeren Einflüssen wie einem angelegten externen Feld untersucht, um somit ein vollständiges Bild des Spinwellenstreuprozesses zu erhalten. Zur Erreichung des Ziels werden im

Rahmen dieser Arbeit zwei verschiedene Methoden entwickelt, die zwei vollkommen unterschiedliche Lösungsansätze verfolgen.

So wird zunächst in Kapitel 4 nach dem Vorstellen der Grundlagen des Ferromagnetismus und der Theorie des Mikromagnetismus in Kapitel 2 bzw. 3, die Methode und Implementierung eines vollständigen mikromagnetischen Finite Elemente Codes beschrieben. Gegenüber anderen auf Finite Differenzen basierenden Programmen wie [30, 31, 32] bietet die Finite Elemente Methode vor allem den Vorteil der einfachen Nachbildung sehr komplexer Probengeometrien [33, 34], die mit anderen Methoden nicht zu erreichen ist. Desweiteren wird sehr viel Wert auf eine hohe Genauigkeit der Ergebnisse, wie auch auf eine gute Effizienz der Algorithmen gelegt. Aus diesem Grund werden Elementfunktionen 2. Ordnung für alle Energieterme und zur Beschleunigung der Rechnungen eine dynamische adaptive Gitterverfeinerung implementiert und getestet.

In Kapitel 5 wird der Finite Elemente Code zur quantitativen Untersuchung infolge senkrecht zur Domänenwand einfallenden Spinwellen angepasst. Neben der Untersuchung der Streuung an 180° Néel-Wänden und transversalen Wänden in dünnen Filmen bzw. Streifen wird auch die Spinwellenstreuung sich bewegender Domänenwänden untersucht, sowie das Verhalten von propagierenden Spinwellen an einer Domänenwand, die an einer Phasengrenze von austauschgekoppelten hart- und weichmagnetischen Materialien verankert ist.

Zur Untersuchung des schrägen Einfalls und zur Analyse eines wesentlich größeren Parameterraums wird in Kapitel 6 ein analytischer mikromagnetischer Formalismus entwickelt, der es ermöglicht, das Spinwellenverhalten an einfachen Domänenwandtypen sehr genau und mit geringem Zeitaufwand zu ermitteln. Damit wird das Spinwellenverhalten an verschiedenen Domänenwandtypen in dünnen Filmen, sowie der Einfluss der Materialparameter und Probengeometrie untersucht. Zudem werden weitere Möglichkeiten der analytischen Methode zur Untersuchung der Ausbildung von stehenden Spinwellen, Spinwellenstreuung an sich bewegenden Domänenwänden und die Betrachtung höherer Spinwellenmoden aufgezeigt. In Kapitel 7 werden die mit Hilfe der numerischen Methode (Kapitel 5) und analytischen Methode (Kapitel 6) erzielten Ergebnisse diskutiert. In Kapitel 8 werden schließlich die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst.