



Felix Groß (Autor)

Entwicklung von Methoden und Bausteinen zur Realisierung Komplexer Magnonischer Systeme



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/8684>

Copyright:

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

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

Kapitel I

Einleitung

Schon seit über 2500 Jahren sind Menschen von der unsichtbaren Kraft des Magnetismus fasziniert.^[1] Da dessen Anwendungen in nahezu jede moderne Technik mit eingeht, ist eine moderne Welt ohne dessen unzählige Anwendungen unvorstellbar. Ob bei Datenspeicherung, im Elektromotor, in Windkraftwerken oder einfach nur am heimischen Kühlschrank – Magnete begleiten uns täglich unbemerkt durch unser aller Leben.

Eine der frühesten Anwendungen des Magnetismus lässt sich bis ins alte China vor circa 1000 Jahren zurückverfolgen.^[2] Schon früh wurde dort entdeckt, dass sich magnetische Partikel entlang der Nord-Süd-Richtung ausrichten. Seitdem hat sich in Sachen magnetischer Anwendung viel getan. Der Begriff der *magnetischen Anziehung* wird trotz allem im allgemeinen Sprachgebrauch bis heute auch im metaphorischen Sinne verwendet. Mit der Entdeckung des Riesenmagnetowiderstands^[3,4] im Jahr 1988, dessen Einzug in die moderne Datenverarbeitung und -speicherung und dem damit verbundenen Nobelpreis 2007 wurden auf Magnetismus basierte technische Anwendung jedoch absolute Realität.

Ein essenzieller Bestandteil der hierzu nötigen Grundlagenforschung ist die Probencharakterisierung mittels Magnetometrie, als der Messung von Magnetisierungskurven. Diese erlauben unter anderem die Bestimmung grundlegende Materialparameter wie Remanenz, Koerzitivfeld, Energieprodukt und Curietemperatur. Dies sind alles Parameter, die sich durch die Messung konventioneller Hystereseschleifen bestimmen lassen. Einige charakteristische Informationen sind jedoch auch im Inneren der Hystereseschleife enthalten und bleiben bei dieser Art Messungen daher unweigerlich verborgen.

Diese Art von Information aus Magnetisierungsmessungen zu extrahieren ist die Aufgabe von *first-order reversal curves* (FORCs)^[5–9]. Mit Hilfe von

geschickt gewählten Feldsequenzen werden bei dieser Messmethode auch Bereiche innerhalb der Hauptschleife abgedeckt, wodurch sich Informationen über verschiedene magnetische Komponenten und deren Interaktion schließen lassen.

FORC, anfangs für geologische Zwecke entwickelt, ^[10–13] wurde zunächst auf Grund seiner Komplexität hauptsächlich als magnetischer Fingerabdruck eines Systems angesehen. ^[14,15] Mittlerweile haben sich jedoch auch viele andere Anwendungsbereiche, wie zum Beispiel Studien von Nanomaterialien ^[16–24] bis hin zu makroskopischen Permanentmagneten ^[25–27] oder temperaturabhängigen Messungen gefunden. ^[24,28–30] Die Ansichtswise des magnetischen Fingerabdrucks rückt dabei immer mehr in den Hintergrund und wird durch neue Interpretationsansätze und quantitatives Verständnis ersetzt. ^[31] Das Problem komplexer und langwieriger Auswertungsalgorithmen ist jedoch bis heute nicht vollständig gelöst.

Ein noch junges Forschungsfeld des Magnetismus ist die Magnonik, ^[32–34] also die gezielte Manipulation von Magnonen. Bei diesen fundamentalen Quasiteilchen handelt es sich um eine kollektive Anregung magnetischer Momente, resultierend in einer Präzession um deren Ruhelage. Im Realraum manifestiert sich dieses Phänomen in Form einer Welle, weswegen Magnonen auch häufig als Spinwellen bezeichnet werden. Interessant ist dabei vor allem, dass Spinwellen Informationen auch ohne den tatsächlichen Fluss eines Elektronenstroms, also beispielsweise auch über mehrere Hundert Mikrometer innerhalb eines Isolators, übertragen können. Auf diese Art wird nicht nur die Wärmeentwicklung auf ein Minimum reduziert, gleichzeitig werden auch noch Degradierungseffekte auf Grund von Elektromigration eliminiert. Die Möglichkeit, Information zusätzlich nicht nur in der Amplitude, sondern auch in der Phase der Welle zu codieren eröffnet dabei neue Möglichkeiten zur effektiveren Datenübertragung. Diese Eigenschaften machen Magnonen zu einem höchst attraktiven Forschungsfeld für angewandte Physik.

Fortschrittliche Lithographieprozesse der heutigen Zeit erlauben durch die Manipulation magnetischer Materialien auf der Größenordnung der magnonischen Wellenlänge zudem höchst interessante fundamentale Effekte anderer physikalischer Disziplinen an Magnonen zu beobachten. Hierzu zählen unter anderem Phänomene wie der Tunneleffekt, ^[35,36] Ausbildung von Bandlücken in magnonischen Kristallen, ^[37–41] Bose-Einstein-Kondensate, ^[42,43] das Senll'sche Brechungsgesetz für Spinwellen ^[44] oder Manipulation durch Spinströme. ^[45,46] Die Magnonik als reichhaltiges Teilgebiet der Physik eröffnet sowohl interessante Ideen für Grundlagenforschung und bietet gleichzeitig vielversprechende Ansätze für technische Anwendungsbereiche.

Zur Beobachtung von Spinwellen wurden im Laufe der letzten Jahre viele beeindruckende Methoden mit verschiedenen Stärken und Schwächen entwickelt.

So sind beispielsweise ferromagnetische Resonanz (FMR)^[47] Messungen und elektrische Spinwellenspektroskopie^[48] in der Lage, durch Absorptionsspektren von Hochfrequenzsignalen sehr genaue Aussagen über das Frequenzverhalten von Magnonen zu treffen. Durch rein elektrische Messungen lassen sich aber ohne zusätzliche Information nicht die Wellenlänge beziehungsweise der k -Vektor der gemessenen Welle bestimmen.

Zur Bestimmung der Dispersionsrelation, also der Frequenzabhängigkeit des k -Vektors, werden daher häufig optische Methoden genutzt. Auf diese Art und Weise lassen sich beispielsweise FMR Methoden mit stroboskopischen Lasern kombinieren, um so zusätzlich die Phaseninformation der Welle zu detektieren.^[49] Weitaus geläufigere Methoden zur optischen Detektion sind jedoch die Brillouin Lichtstreuung (BLS)^[50] und Experimente basierend auf dem magnetooptischen Kerr-Effekt (MOKE).^[51–55]

Bei BLS wird durch inelastische Streuung in sogenannten Stokes- und Anti-Stokes-Prozessen die Frequenz und der k -Vektor des gestreuten Photons gegenüber dem des einfallenden verschoben.^[50] Im Falle von unmagnetischen Materialien lassen sich so Phononen detektieren. Bei magnetischen Festkörpern können durch Messung der gestreuten Photonen mit Hilfe von Energie- und Impulserhaltung direkt Rückschlüsse über die Eigenschaften der Magnonen gezogen werden. Zusätzlich ist die Intensität der gestreuten Photonen direkt proportional zur Amplitude der Spinwelle. So lassen sich gleichzeitig sowohl die Frequenz, die relative Amplitude als auch der k -Vektor der Spinwelle bestimmen. Dies ist sowohl im Fall von kohärenten als auch für thermische Magnonen möglich. Um mit Hilfe von BLS höhere optische Auflösungen zu erzielen, muss allerdings die Wellenvektorsensitivität aufgegeben werden. Durch Fokussierung des Laserstrahls können so auch Spinwellen kleiner als $1\ \mu\text{m}$ gemessen werden. Die fundamentale Auflösungsgrenze ist dabei durch die Wellenlänge des eingesetzten Lasers gegeben. Da BLS ein phasensensitiver Messprozess ist, kann theoretisch durch eine aufwendige Serie an Messungen dennoch die Phase der Welle rekonstruiert werden.

Im Fall von zeitaufgelöstem MOKE lassen sich Spinwellen über die Polarisationsdrehung eines reflektierten Laserstrahls messen. Diese ist dabei direkt proportional zur lokalen Spinwellenintensität. Durch Abrastern der Probe mit einem fokussierten Laser können so magnetische Wellen im Submikrometerbereich abgebildet werden. Der Vorteil dieser Methode ist, dass sie Spinwellen direkt zeitaufgelöst und im Realraum darstellen kann. Eindrucksvoll wurde das zum Beispiel durch Stigloher *et al.* gezeigt, die in der Lage waren, das Snelliussches Brechungsgesetz auf Magnonen zu übertragen.^[44]

Innerhalb der letzten Jahre wurden zusätzlich elektronenbasierte Verfahren immer prominenter.^[56,57] Diese erlauben es mit stroboskopischen Methoden Magnetisierungsdynamik mit der Auflösung üblicher Elektronenmikroskopie-

methoden zu beobachten.^[56] So ist es mit zeitaufgelöster Lorentzmikroskopie beispielsweise möglich, Vortexkerndynamik mit einer räumlichen Genauigkeit von bis zu 2 nm abzubilden, jedoch ist man hierbei auf Frequenzen von wenigen Hundert Megahertz beschränkt. Einer der Nachteile dieser Methode ist allerdings die Empfindlichkeit auf externe Felder auf Grund der Lorentzkraft. Zudem ist diese Mikroskopiemethode außerordentlich anspruchsvoll und wird nur von wenigen Gruppen beherrscht.

Ein weiterer vielversprechender Ansatz ist die Messung von Spinwellen mittels eines Stickstoff-Fehlstellen-Zentrums (NV-Zentrum). Bei dieser Methode wird das NV-Zentrum als Feldsensor zur Detektion des magnetischen Streufeldes genutzt.^[58] Hierbei können auf Grund der atomaren Größe des NV-Zentrums Auflösungen im Bereich von circa 30 nm erreicht werden.^[59] Auf diese Weise wurde schon verschiedenste Magnetisierungsdynamik gemessen, unter anderem existieren auch Aufnahmen von Spinwellen im Realraum mit räumlichen Auflösungen im Mikrometerbereich, jedoch in stark eingeschränkten Frequenzbereichen.^[60]

Mit Hilfe von Rasterröntgenmikroskopie (*scanning transmission x-ray microscopy*, STXM) ist es möglich, Magnetisierungsstrukturen direkt im Realraum abzubilden. Der hierfür kontrastgebende Mechanismus ist dabei der Röntgenzirkulardichroismus (*x-ray magnetic circular dichroism*, XMCD), also die polarisations- und elementabhängige Absorption von Röntgenstrahlen in magnetisierten Materialien. Durch die kurze Wellenlänge der Röntgenstrahlen ist dabei die laterale Auflösung nicht länger durch deren Wellenlänge, sondern ausschließlich durch die zur Verfügung stehende Röntgenoptik limitiert. Durch die stroboskopische Belichtung der Röntgenquelle kann Magnetisierungsdynamik gleichzeitig mit hoher räumlicher (15 nm) und zeitlicher (100 ps) Auflösungen direkt in Form von Videos abgebildet werden. Im sogenannten *low-alpha*-Modus des Synchrotrons, bei dem das Elektronenpaket entlang der Zeitachse noch weiter komprimiert wird, können sogar Zeitaufösungen von bis zu 10 ps erreicht werden. Der direkte Zugang zur Amplituden- als auch Phaseninformation erlaubt die vollständige Bestimmung aller Wellenparameter für Magnetisierungen in als auch senkrecht zur Probenebene.^[61]

Um das Potenzial dieser Messmethode voll auszunutzen und gleichzeitig die Wellenlänge von Spinwellen für potenzielle Anwendungen so weit wie möglich zu reduzieren, sind Anregungsmechanismen für die Erzeugung kurzer Spinwellen von immenser Bedeutung. Üblicherweise werden hierfür mikrometergroße Antennen^[62,63] oder koplanare Wellenleiter^[64] verwendet. Bei dieser Anregungstechnik erreicht allerdings keine zufriedenstellende Anregungseffizienz für Wellen weit unter 400 nm.^[48] Eine der Beschränkungen für die Anregung ist, dass das anregende Element sich in der Größenordnung der Spinwelle befinden muss. Auf Grund dessen werden zur Anregung kurzer

Spinwellen häufig andere Methoden genutzt, zum Beispiel die Anregungen verschiedenster Magnetisierungsstrukturen^[65–67] oder die Anregung über komplexe Probengeometrien,^[39,68–71] deren Fertigung sich allerdings häufig als aufwendig herausstellt.

Nach der Erzeugung der Welle wird diese idealerweise durch zuvor konstruierte Mechanismen genutzt, gelenkt oder manipuliert. Besonders im Vordergrund stand dabei in den letzten Jahren die Manipulation durch zusätzliche Spinströme.^[45,72] Auf Grund der benötigten hohen Stromdichten des Spin-Hall-Effekts stellt sich dies jedoch häufig impraktikabel heraus. Eine weitere Möglichkeit der Manipulation ist durch gezieltes Strukturieren des magnetischen Materials. In den letzten Jahren erregten in diesem Gebiet vor allem magnonische Kristalle^[37–39,73–76] und Quasikristalle^[40,41] Aufsehen. Das Interessante hierbei ist, dass diese Kristalle analog zur elektronischen Bandstruktur eine magnonische Bandstruktur ausbilden. So entstehen für Magnonen ähnlich wie für Elektronen erlaubte und verbotene Frequenzbereiche in denen sich diese aufhalten können. Durch Variation verschiedener Parameter lassen sich diese anschließend nach Belieben konfigurieren.

Trotz all dieser umfangreichen Grundlagenforschung gibt es auf dem Gebiet der Magnonik noch vieles zu entdecken. Nur ein ausreichendes Verständnis, nicht nur der Erzeugung, sondern auch des Umgangs mit Magnonen und deren Integration in verschiedenen magnonische Bauteile erlaubt es, anwendungsnahe Experimente zu kreieren. Schon seit einigen Jahren existieren verschiedenste Ansätze logischer Bausteine, realisiert durch magnonische Wellenleiter,^[77–80] doch nur durch anhaltende Forschung an den kleinstmöglichen magnonischen Elementen lassen sich diese weiterentwickeln und miniaturisieren.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zunächst verschiedene Fragen zu Themen wie magnetischer Vorcharakterisierung sowie Erzeugung und Auswertung von Magnetisierungsdynamik beantwortet. So ist beispielsweise eine der Herausforderungen der FORC Methode der damit einhergehende langwierige Auswertungsprozess der Messdaten. Um dies zu vereinfachen, wird ein auf Fourier Transformationen basierender Algorithmus entwickelt, der in der Lage ist, bei gleicher Qualität die benötigte Rechenzeit um ein Vielfaches zu reduzieren. Nur so können neue Ansätze aufgegriffen werden, die aktuell auf Grund langer Berechnungszeiten nicht realisierbar sind.

Bis heute ist sowohl die Anregung von Magnonen als auch die damit verbundene Dateninterpretation nicht trivial. Die Erzeugung und Übertragung arbiträrer elektrischer Signale für Spinwellenanregung im Gigahertzbereich bleibt weiterhin eine technische Herausforderung. Um Spinwellen mit beliebig geformten Signalen anzuregen, soll eine Softwarelösung erarbeitet werden, die es ermöglicht, mit geringem Aufwand künstlich erzeugte Mikrowellensignale unterschiedlichster Form zu generieren. Die an die Messung anschließenden

Auswertungsmethoden können sich als anspruchsvoll herausstellen, folgen aber häufig standardisierten Verfahren zur Bildanalyse, Frequenzfilterung, Bestimmung von k -Vektoren oder Dispersionsrelationen. Unter Berücksichtigung verschiedenster Messformate sollen Auswertungs- und Visualisierungsmethoden erarbeitet werden, die die Aufbereitung verschiedenster zeitabhängiger Datensätze vereinheitlichen.

Die so erarbeitete Methodik erlaubt anschließend eine eingehende Befassung mit der faszinierenden Thematik der Spinwellen in magnetischen Dünnschichten. Zunächst wird hierbei die Dispersionsrelation mit Hilfe von STXM verifiziert werden. Über Kalibrierung der gemessenen Spinwellenvideos mit Hilfe von XMCD-Spektren wird anschließend der absolute Auslenkungswinkel der magnetischen Momente in dünnen Schichten bestimmt.

Die beeindruckende Orts- und Zeitauflösung, bereitgestellt durch STXM, erlaubt es Magnetisierungsdynamik auf Größenskalen zu untersuchen, die anderen Messmethoden verborgen bleibt. In Kombination mit Lithographieprozessen auf der Größenskala der magnonischen Wellenlänge lassen sich so erstaunliche Effekte in zweidimensionalen magnonischen Kristallen erzeugen und nachweisen. Hier stehen vor allem neuartige Moden und nichtlineare Phänomene im Vordergrund. Diese ermöglichen es Magnetisierungsdynamik innerhalb der magnonischen Bandlücke, einem vorher ungenutzten Frequenzbereich, zu erzeugen. Darüber hinaus erlauben die speziellen Magnetisierungsstrukturen innerhalb des Kristalls die effiziente Anregung kurzer Spinwellen bei niedrigen Frequenzen, erzeugt durch Frequenzvervielfachung.

Aufbauend auf vorherigen Arbeiten zur Spinwellenstreuung an einzelnen Antidots^[81] wird gezeigt, dass der fundamentale Grund hierfür nanoskalige Magnetisierungsstrukturen am Rande der Struktur sind. Werden diese zur Oszillation angeregt, sind sie in der Lage, die gesamte Isofrequenzkontur zu bevölkern und so alle erlaubten k -Vektoren anzuregen. Dieser Mechanismus erlaubt, langwellige Damon-Eshbach-Spinwellen umzulenken und auf diese Weise in kurzwellige *backward-volume*-Wellen zu transformieren. Es wird darüber hinaus demonstriert, dass dies nicht nur das Lenken und Konvertieren planarer Wellenfronten erlaubt, sondern außerdem die Erzeugung kurzwelliger gerichteter Spinwellenstrahlen ermöglicht. Durch tiefgreifendes Verständnis der erarbeiteten Konzepte zur Anregung, Auswertung und Manipulation von Magnonen werden grundlegende Schritte zu anwendungsbezogener Spinwellendynamik zugänglich erläutert.

Kapitel **II**

Grundlagen

Im nachfolgenden Kapitel werden sowohl theoretische als auch experimentelle Grundlagen erarbeitet, die zum Verständnis der präsentierten Ergebnisse beitragen. Zunächst werden theoretische Grundlagen wie magnetische Wechselwirkungen, das Funktionsprinzip von *first-order reversal curves* und Grundprinzipien der Magnetisierungsdynamik vorgestellt. Anschließend werden experimentelle Grundlagen zur Röntgenmikroskopie, Methoden zur Probenpräparation sowie für die Arbeit relevante Messmethoden erläutert. Besonders hervorzuheben ist hierbei die Einführung in die Thematik der Spinwellen, welche einen wesentlichen Anteil der in Kapitel **III** vorgestellten Ergebnisse ausmachen.

1 Theoretische Grundlagen

1.1 Magnetostatik

Die nachfolgenden Abschnitte beschäftigen sich mit grundlegenden statischen Interaktionseffekten. Diese Effekte sind dafür verantwortlich, dass in bestimmten Materialien komplexe magnetische Ordnung auftreten kann. Für eine tiefgehende Einführung in die spannenden Themen des Magnetismus sei der Leser auf [1,82–84] verwiesen.

1.1.1 Magnetisches Moment im externen Feld

Befindet sich ein magnetisches Moment \mathbf{m} in einem externen Feld \mathbf{H}_{ext} ,^[83] so ist dessen Energie gegeben durch

$$E = -\mathbf{m} \cdot \mu_0 \mathbf{H}_{\text{ext}} = -\mathbf{m} \cdot \mathbf{B}_{\text{ext}}. \quad (1.1)$$

Hierbei ist $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Vs/Am}$ die magnetische Permeabilität. Die Energie hängt demnach also nicht nur vom Betrag des magnetischen Moments und des Feldes ab, sondern darüber hinaus auch noch vom relativen Winkel zwischen Moment und Feld. Steht das magnetische Moment parallel auf den Feldlinien, so wird der Ausdruck in (1.1) minimal, stehen die beiden antiparallel, so ist der Ausdruck maximiert. Das magnetische Moment wird also demnach versuchen sich entlang der Feldlinien des externen Feldes auszurichten.

1.1.2 Magnetische Dipol Interaktion

Werden zwei magnetische Dipole einander angenähert beginnen sie, ähnlich wie Stabmagnete, sich durch die Dipolwechselwirkung gegenseitig zu beeinflussen. Ein magnetisches Dipolmoment \mathbf{m} am Ursprung erzeugt am Ort \mathbf{r} ein Feld,^[85] welches gegeben ist durch

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{3\mathbf{n}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{m}) - \mathbf{m}}{|\mathbf{r}|^3} \right]. \quad (1.2)$$

Dabei ist \mathbf{n} der Einheitsvektor entlang der Richtung von \mathbf{r} . Die Energie der beiden Dipole ist dann gegeben durch^[83]

$$E = \frac{\mu_0}{4\pi |\mathbf{r}|^3} \left[\mathbf{m}_1 \cdot \mathbf{m}_2 - \frac{3}{|\mathbf{r}|^2} (\mathbf{m}_1 \cdot \mathbf{r}) (\mathbf{m}_2 \cdot \mathbf{r}) \right]. \quad (1.3)$$

Sie hängt also sowohl vom Abstand, als auch von der relativen Orientierung beider Dipole ab.

Auch wenn die Dipol Interaktion energetisch gesehen die kleinste der magnetischen Interaktionen ist, hat sie durch ihre lange Reichweite dennoch einen großen Einfluss auf das Verhalten magnetischer Materialien und hängt stark von der Geometrie und Morphologie ab. Für parallele Ausrichtung bei einem typischen Atomabstand von 2 \AA ergibt sich eine Energie von circa 0.013 meV , also deutlich weniger als die thermische Energie bei nur 1 K (0.086 meV). Dennoch haben viele Materialien eine langreichweitige magnetische Ordnung bei noch mehreren 100 K .^[83] Der Ursprung hierfür ist allerdings nicht die Dipol- sondern die Austauschwechselwirkung.

1.1.3 Austauschwechselwirkung

Die Austauschwechselwirkung zweier Spins \mathbf{S}_i und \mathbf{S}_j wird üblicherweise als Heisenberg-Hamiltonoperator folgender Form dargestellt:^[83]

$$\mathcal{H}_{\text{exch}} = - \sum_{ij} J_{ij} \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j \quad (1.4)$$

Die Summe in (1.4) wird dabei nur über die nächsten Nachbaratome ausgeführt. J wird Austauschkonstante genannt und kann sowohl positive als auch negative Werte annehmen.^[84] Ist J positiv so wird die Summe in (1.4) für eine parallele Ausrichtung der Spins minimiert und man spricht von Ferromagnetismus. Ist J negativ, so wird die Summe für eine antiparallele Ausrichtung minimal und es handelt sich um Antiferromagnetismus. Für mikromagnetische Simulationen wird J häufig in Form der *exchange stiffness* Konstante A_{ex} dargestellt, die zusätzliche Informationen wie Gitterkonstanten und die Art des Gitters berücksichtigt.^[86] Typische Werte für A_{ex} liegen im Bereich von 5 pJ/m bis 100 pJ/m beziehungsweise 0.03 eV/nm bis 0.6 eV/nm . Auch wenn die Austauschwechselwirkung nur innerhalb nächster Nachbarn wirkt, ist sie dennoch extrem stark.

1.1.4 Dzyaloshinskii-Moriya Wechselwirkung

In Materialien mit gebrochener Inversionssymmetrie kann zusätzlich zur isotropen Austauschwechselwirkung einer weiterer anisotroper Term eine entscheidende Rolle spielen.^[82,87] Der Energiebeitrag der Dzyaloshinskii-Moriya Wechselwirkung (DMI) ist dabei durch den Hamiltonoperator

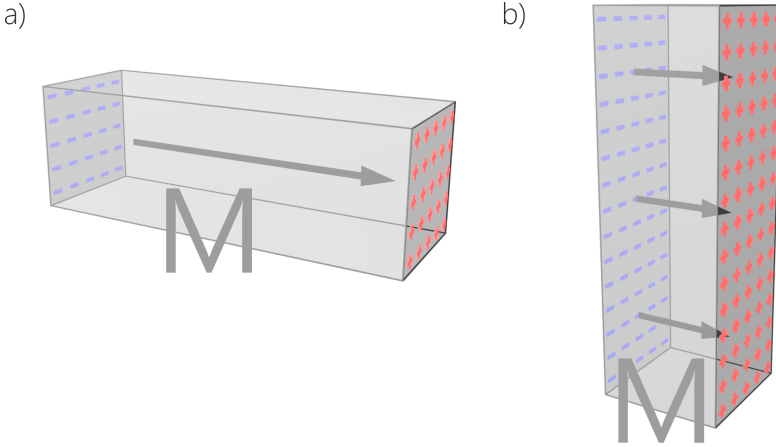


Abbildung 1.1: Beispiel zur Veranschaulichung magnetischer Ladungen mit der Magnetisierung entlang der langen (a) und entlang der kurzen geometrischen Achse (b). Reproduziert nach [1].

$$\mathcal{H}_{\text{DMI}} = \sum_{ij} \mathbf{D}_{ij} \mathbf{S}_i \times \mathbf{S}_j \quad (1.5)$$

bestimmt. Dabei ist \mathbf{D}_{ij} ein konstanter Vektor dessen Richtung parallel zum Kreuzprodukt $\mathbf{S}_i \times \mathbf{S}_j$ ausgerichtet ist. Die DMI wirkt dabei ähnlich wie die Austauschwechselwirkung, versucht allerdings benachbarte Spins auf Grund des Kreuzproduktes in Formel (1.5) senkrecht zueinander auszurichten. Üblicherweise wird statt einem Vektor für \mathbf{D} nur eine Konstante angegeben, welche sowohl positive als auch negative Werte annehmen. Bei vergleichbaren Größenordnungen der Austausch- und Dzyaloshinskii-Moriya Wechselwirkung können abhängig vom Vorzeichen von D , ähnlich wie für J , unterschiedliche magnetische Phänomene auftreten. Diese werden häufig unter der Kategorie des chiralen Magnetismus eingeordnet und umfassen unter anderem magnetische Texturen wie Skyrmionen und Antiskyrmionen. Typische Werte für D liegen sowohl in dünnen Filmen, als auch in Volumenproben im Bereich von wenigen mJ/m^2 .^[88–90]

1.2 Magnetische Ladungen

Die magnetische Flussdichte \mathbf{B} und die magnetische Feldstärke \mathbf{H} sind über folgenden Zusammenhang verknüpft:^[83]