



EINLEITUNG

Drum hab' ich mich der Magie ergeben, [...]
Daß ich erkenne, was die Welt
Im Innersten zusammenhält,

'Faust', Zeile 379-383, (1808)
Johann Wolfgang von Goethe

Um zu erkennen, „was die Welt im Innersten zusammenhält“, sieht Faust nur die Möglichkeit Magie zu verwenden. Im Gegensatz zu diesem Standpunkt aus dem Jahre 1808 ist heutzutage zur Erlangung dieser Erkenntnis vielmehr die physikalische bzw. naturwissenschaftliche Grundlagenforschung notwendig, wie sie z.B. in der Max-Planck-Gesellschaft betrieben wird.

In diesen Kontext kann daher auch die Leitlinie der Max-Planck-Gesellschaft „Forschung ist eine der wesentlichen Grundlagen für die Fortschritte der Menschheit. Sie dient der Wissensvermehrung und fördert Gesundheit, Wohlstand und Sicherheit der Menschen sowie den Schutz der Umwelt.“ (*entnommen aus: [MPG]*) eingeordnet werden. Grundlagenforschung treibt den Fortschritt der Menschheit in allen Bereichen an und lässt ihn erkennen, „was die Welt im Innersten zusammenhält“.

Die internationale Grundlagenforschung im Bereich des Magnetismus hat dabei zu enormen Fortschritten vor allem hinsichtlich der Computertechnologie geführt, wie beispielsweise die Entdeckung des GMR-Effekts [BGSZ89, BBF⁺88] und dessen Anwendung in Festplatten zeigt. Dabei kommt der Grundlagenforschung die wichtige

Aufgabe zu, ein tieferes Verständnis für die Systemeigenschaften und die zu Grunde liegenden Effekte zu gewinnen und diese gezielt zu untersuchen.

Dabei geht die magnetische Grundlagenforschung Hand in Hand mit der modernen Nanotechnologie. Beide bilden zusammen das Gebiet des Nanomagnetismus, der vor allem in magnetischen Sensoren und Speichern seine Anwendung findet. Im großen Feld des Nanomagnetismus ist die Erforschung der magnetischen Vortex-Struktur als Grundzustandskonfiguration in weichmagnetischen Materialien auf der Nanoskala ein wichtiger Bereich. Diese lässt sich durch eine 'in der Ebene' liegende Magnetisierung mit einem im Zentrum lokalisierten Vortextkern charakterisieren, dessen Magnetisierung 'aus der Probenebene heraus' zeigt und der zwei energetisch äquivalente Zustände mit jeweils umgekehrter Polarisierung besitzt. Die Manipulation bzw. das Umschalten der Polarisierung des Vortextkerns ist das zentrale Thema dieser Dissertation.

Vor ca. acht Jahren wurde von Van Waeyenberge *et al.* die Möglichkeit nachgewiesen, mit Hilfe von externen Magnetfeldern den Vortextkern dynamisch anzuregen und damit die zum Schalten benötigten Magnetfeldamplituden um zwei Größenordnungen zu reduzieren [VWPS⁺06]. Seitdem wird der Vortextkern als potenzieller Kandidat für neuartige Speichermedien diskutiert, beispielsweise hinsichtlich einer Anwendung als digitales, schnelles und stabiles Bit. 2011 konnten Kammerer *et al.* zeigen, dass die Zeit, die zum Umschalten des Vortextkerns benötigt wird, durch die Anregung von Spinwellen deutlich reduziert werden kann [KWC⁺11]. Durch die höheren Frequenzen (im GHz-Bereich) sind die Umschaltzeiten (100 ps-Bereich) deutlich unter den Zeiten, wie sie in bisherigen Speichern erzielt werden.

Parallel zu dieser Entwicklung mit externen Magnetfeldern zeigte im Jahre 2007 die Gruppe um Ono, dass ein magnetischer Vortextkern auch durch einen direkt eingekoppelten Strom umgeschaltet werden kann [YKN⁺07]. Der dem Umschalten zu Grunde liegende Prozess

basiert dabei auf dem sogenannten STT-Effekt (*engl.* 'Spin-Transfer-Torque'), der 1996 von Slonczewski [Slo96] und Berger [Ber96] unabhängig voneinander erstmals beschrieben wurde. Der Kernpunkt dieses Effekts ist die Beeinflussung einer Magnetisierung durch einen spinpolarisierten Strom durch den Übertrag eines Drehmoments. Heute findet dieser STT-Effekt beispielsweise in den Chips der Firma Everspin Technologies seine Anwendung, die bereits von Buffalo Memory in industriellen SATA III-SSDs für die Steuerung des Datenverkehrs verbaut werden [Inca].

Zielsetzung

Im Rahmen dieser Arbeit sollen nun zwei grundlegende Fragestellungen im Bereich der Vortexkern-Dynamik bzw. des Vortexkern-Schaltens untersucht werden:

Einerseits soll die vorhandene Methode des spinwelleninduzierten Umschaltens der Vortexkern-Polarität durch ein neues Anregungsschema erweitert und verbessert werden. Dabei findet erstmals eine Kombination von Gyromoden- und Spinwellen-Anregung seine Anwendung. Mit dieser kombinierten Anregung ist es möglich, eine Kopplung der beiden Moden hervorzurufen, die sich in ihren Resonanzfrequenzen um eine Größenordnung unterscheiden. Dadurch können zum einen tiefere Einblicke in die Wirkungsweisen der unterschiedlichen Moden erreicht werden und zum anderen neue Effekte entdeckt werden.

Andererseits soll die Möglichkeit untersucht werden, mit Hilfe eines direkt auf die Vortex-Struktur eingekoppelten Stroms Spinwellen anzuregen und damit ein Umschalten des Vortexkerns zu erzielen. Dabei müssen neuartige Proben verwendet werden, mit denen eine direkte rotierende Strom-Anregung möglich ist. Mithilfe dieser Anregung soll eine neuen Methode entwickelt werden, die selektives Umschalten durch einen rotierenden Strom ermöglicht. Neben Experi-

menten zur rotierenden Anregung der Gyromode liegt das Hauptaugenmerk vor allem auf der Untersuchung der generellen Möglichkeit, mittels rotierender direkter Einkopplung eines Stroms Spinwellen anzuregen und mit diesen die Polarität des Vortexkerns selektiv umzuschalten. Dabei steht neben dem experimentellen Nachweis dieser Möglichkeit auch die Eingrenzung des Einflusses des OERSTED-Felds, welches den Strom begleitet, im Mittelpunkt der Auswertungen und der mikromagnetischen Simulationen.

1 | ALLGEMEINE GRUNDLAGEN

Im Rahmen dieser Arbeit werden magnetische Vortexkern-Strukturen untersucht, die vor allem in ferromagnetischen dünnen Plättchen auftreten. Daher sollen in diesem Kapitel 1 die physikalischen Grundlagen des Ferromagnetismus (Kap. 1.1) sowie die Entstehung magnetischer Domänen (Kap. 1.2) und die verschiedenen Parameter einer Vortexkern-Struktur (Kap. 1.2.2) zusammengefasst dargestellt werden. Anschließend wird in Kapitel 1.3 die Beschreibung der Magnetisierungsdynamik in ferromagnetischen Materialien mit Schwerpunkt auf die dynamische Anregung von Vortexkernen behandelt. Für die Erklärungen bzw. Bestätigung der experimentell gefundenen neuen Effekte werden mikromagnetische Simulationen herangezogen. Kapitel 1.6 stellt die dafür verwendeten Programmen vor.

1.1 Ferromagnetismus

1.1.1 Quantisierte Magnetisierung

Der Bahndrehimpuls wird mit \mathbf{L} und zugehöriger Bahndrehimpuls-Quantenzahl l , der Spin wird mit \mathbf{S} und zugehöriger Spin-Quantenzahl s beschrieben. Der Gesamtdrehimpuls \mathbf{J} (mit der Gesamtdrehimpuls-Quantenzahl j) hängt mit \mathbf{L} und \mathbf{S} wie folgt zusammen:

$$\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S} \quad (1.1)$$

Es besteht folgender Zusammenhang zwischen j , l und s , der mittels quantenmechanischer Betrachtung hergeleitet werden kann und LANDÉ'scher Aufspaltungsfaktor g genannt wird:

$$g = 1 + \frac{j(j+1) + s(s+1) - l(l+1)}{2j(j+1)} \quad (1.2)$$

Der Zusammenhang zwischen magnetischem Moment \mathbf{m} und Bahndrehimpuls \mathbf{L} ist durch das Bahnmoment m_l gegeben:

$$\mathbf{m}_l = -g_l \frac{\mu_B}{\hbar} \mathbf{L} . \quad (1.3)$$

Entsprechend ist der Zusammenhang zwischen magnetischem Moment \mathbf{m} und Spindrehimpuls \mathbf{S} durch das Spinmoment m_s gegeben:

$$\mathbf{m}_s = -g_s \frac{\mu_B}{\hbar} \mathbf{S} , \quad (1.4)$$

wobei das BOHR'sche Magneton μ_B das Elementarquant der gequantelten Magnetisierung ist und damit das kleinste, nicht mehr teilbare magnetische Dipolelement eines Elektrons darstellt:

$$\mu_B = -\frac{|e|\hbar}{2m_e} = 9,274 \cdot 10^{-24} \frac{\text{J}}{\text{T}} = 5,788 \cdot 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{T}} . \quad (1.5)$$

Mit diesen elementaren quantenmechanischen Größen, die zur Beschreibung des Magnetismus notwendig sind, lässt sich nun im Folgenden der Ferromagnetismus mit unterschiedlichen Modellen erklären. Allgemein gilt, dass bei einer existierenden Kopplung zwischen Spins das magnetische System in einen geordneten Zustand übergehen kann, in dem alle Spins in dieselbe Richtung zeigen. Solch eine kollektive langreichweitige Ordnung wird Ferromagnetismus genannt. Dieses Ordnungsphänomen wird überhalb einer kritischen Temperatur T_C , der CURIE-Temperatur, zerstört.

Im Folgenden werden zwei verschiedene Modelle skizziert, die zu ferromagnetischer Kopplung in unterschiedlichen Systemen führen können. Eine detaillierte Beschreibung findet sich z.B. in [IL99, BSKVB05].

1.1.2 Austauschwechselwirkung

Die Austausch-Wechselwirkung beruht auf einer Wechselwirkung der Elektronen untereinander, die aufgrund des PAULI-Prinzips (Kap. 1.1.3) eine parallele Spinstellung der Elektronen favorisiert. Es wird prinzipiell zwischen lokalisierten Elektronen (z.B. bei den seltenen Erden mit partiell gefüllten f-Schalen) und delokalisierten Elektronen (z.B. bei den 3d-Übergangsmetallen) unterschieden, wobei im Falle der lokalisierten Elektronen das HEISENBERG-Modell (Kap. 1.1.3) und im Falle der delokalisierten Elektronen das STONER-WOHLFAHRT-Bandmodell (Kap. 1.1.4) zur Beschreibung verwendet wird.

1.1.3 Pauli-Prinzip und Heisenberg-Modell

Das PAULI-Prinzip beschreibt die Symmetrie und Antisymmetrie der Gesamtwellenfunktion bei der Vertauschung zweier Teilchen. Es ist ein Naturgesetz, das 1925 vom österreichischen Physiker WOLFGANG PAULI postuliert wurde und wofür ihm 1945 der Nobelpreis verliehen wurde:

„Es kann niemals zwei oder mehrere äquivalente Elektronen im Atom geben, für welche in starken Feldern die Werte aller Quantenzahlen [...] übereinstimmen“ (aus: [Pau25])

- (1) Fermionen (also Teilchen mit halbzahligem Spin, wie z.B. Elektronen, Protonen, Neutronen) werden durch eine antisymmetrische Gesamtwellenfunktion beschrieben und gehorchen der sogenannten FERMI-DIRAC-Statistik. Diese Gesamtwellenfunktion besteht dabei aus der Spin- und der Ortswellenfunktion, was unter der Annahme einer symmetrischen Ortswellenfunktion für ein elektronisches System bedeutet, dass ein Zustand niemals von zwei Elektronen mit demselben Spin besetzt werden kann [Gas02].

- (2) Systeme, die aus Bosonen bestehen (also aus Teilchen mit ganzzahligem Spin) werden dagegen durch eine gerade Gesamtwellenfunktion beschrieben und gehorchen der BOSE-EINSTEIN-Statistik.

Dieses PAULI-Prinzip bildet nun die Grundlage des HEISENBERG-Modells. Dieses Modell behandelt lokalisierte Elektronen und wurde 1928 von WERNER HEISENBERG vorgestellt:

„Es liegt also nahe, auch zur Erklärung der ferromagnetischen Erscheinungen dieses Austauschphänomen heranzuziehen. Wir werden zu zeigen versuchen, daß die Coulomb'schen Wechselwirkungen zusammen mit dem Pauli'schen Prinzip ausreichen, um die gleichen Wirkungen hervorzubringen wie das von Weiss postulierte molekulare Feld.“ (aus: [Hei28])

Basierend auf einem Zweielektronensystem (Wasserstoffmolekül) ergibt sich als Ausgangspunkt für die Herleitung einer Austauschwechselwirkung nach der HEITLER-LONDON-Methode folgende Ortswellenfunktion:

$$\psi_{\text{symm}} = \phi_A(1)\phi_B(2) + \phi_A(2)\phi_B(1) \quad (1.6)$$

$$\psi_{\text{anti}} = \phi_A(1)\phi_B(2) - \phi_A(2)\phi_B(1) , \quad (1.7)$$

wobei ψ_{anti} (ψ_{symm}) eine antisymmetrische (symmetrische) Wellenfunktion und $\phi_A(1)$ die Einelektronen-Wellenfunktion von Elektron '1' bei Proton 'A' usw. darstellt.

Gleichung 1.6 beschreibt also einen Singulett-Zustand (Spinausrichtung antiparallel), Gleichung 1.7 einen Triplett-Zustand (Spins können sich parallel ausrichten). Die zugehörigen Energie-Eigenwerte für Singulett- und Triplett-Zustand sind

$$E_{\text{singulett}} = 2E_I + \frac{C + A}{1 + S} \quad (1.8)$$

$$E_{\text{triplett}} = 2E_I + \frac{C - A}{1 - S} . \quad (1.9)$$

1.1 Ferromagnetismus

Hier steht E_I für die Ionisierungsenergie des Wasserstoffatoms, C für das COULOMB-Integral, A für das Austausch-Integral und S für das Überlapp-Integral (ausführliche Herleitung z.B. in [Gas02]).

Mithilfe der Austauschkonstanten J

$$-J = E_{\text{triplett}} - E_{\text{singulett}} = \frac{2(CS - A)}{1 - S^2} \quad (1.10)$$

lässt sich nun entscheiden, ob das System in einen Singulett-Zustand ($J < 0$) oder einen Triplett-Zustand ($J > 0$) übergeht. Durch die Einführung des HEISENBERG-Hamiltonoperators \mathcal{H}_H lässt sich die Kopplung zwischen beiden Elektronen beschreiben:

$$\mathcal{H}_H = -2J \cdot \sigma_1 \sigma_2, \quad (1.11)$$

wobei σ_i für die PAULI-Spinmatrizen steht.

Mithilfe der Einführung dieses HEISENBERG-Hamiltonoperators kann der Ferromagnetismus für paarweise gekoppelte Elektronen beschrieben werden. Außerdem lässt sich die quantenmechanische Austauschenergie wie folgt darstellen:

$$E_{\text{Ex}} = A \int dV (\nabla \mathbf{m}) \cdot (\nabla \mathbf{m}), \quad (1.12)$$

wobei hier A für die materialabhängige Austauschkonstante und $\nabla \mathbf{m}$ für die Gradienten der Magnetisierungskomponenten stehen.

1.1.4 Bandmodell des Ferromagnetismus

Allerdings kann obige Betrachtung nicht den Ferromagnetismus der elementaren Ferromagnete ($3d$ -Übergangsmetalle: Fe, Co, Ni) erklären, weshalb dafür ein anderer Ansatz verwendet werden muss.

Die Austausch-Wechselwirkung zweier freier Elektronen kann zu einer ferromagnetischen Kopplung beider führen. Dieses Verhalten kann anschaulich durch eine Abschirmung ausgelöst durch das PAULI-Prinzip verstanden werden:

Ein vom Atomkern weit entferntes Auelektron nimmt aufgrund der anderen Elektronen mit derselben Spin-Ausrichtung zwischen ihm und dem Atomkern nur eine verminderte Kernladungszahl $Z_{\text{eff}} < Z$ wahr. Dies führt dazu, dass die Abschirmung durch das COULOMB-Potential der Ionenrümpfe für dieses Auelektron verkleinert ist, was eine Absenkung der Gesamtenergie für dieses Auelektron zur Folge hat. Dies wird zusätzlich verstärkt, wenn möglichst viele Elektronen denselben Spin wie dieses Auelektron besitzen. Es ergibt sich also ein Energiegewinn für die Einelektronenenergie bei paralleler Spinstellung und somit eine Art kollektive Austauschwechselwirkung mit positivem Vorzeichen.

Diese Idee der Energieverringerung eines Elektrons durch die Anwesenheit anderer Elektronen derselben Spinpolarisation liegt dem STONER-WOHLFAHRT-Modell [Sto38, Sto39, Woh49] zugrunde:

$$E_{\uparrow/\downarrow}(\mathbf{k}) = E(\mathbf{k}) - \frac{I \cdot n_{\uparrow/\downarrow}}{N} . \quad (1.13)$$

Dabei ist I der STONER-Parameter (Proportionalitätsfaktor zwischen Energieabsenkung und Bruchteil der Elektronen mit parallelem Spin), $E(\mathbf{k})$ die Dispersionsrelation der Einelektronenbandstruktur, $n_{\uparrow/\downarrow}$ die Anzahl der Elektronen mit zugehörigem Spin und N die Zahl der Atome.

Durch die Einführung des relativen Überschusses der Elektronen einer Spinsorte $R = 1/N \cdot (n_{\uparrow} - n_{\downarrow})$ und von $\tilde{E}(\mathbf{k}) = E(\mathbf{k}) - I(n_{\uparrow} - n_{\downarrow})/2N$ ergibt sich eine von \mathbf{k} unabhängige Aufspaltung der Energiebänder für verschiedene Spins:

$$E_{\uparrow}(\mathbf{k}) = \tilde{E}(\mathbf{k}) - \frac{1}{2} I \cdot R \quad (1.14)$$

$$E_{\downarrow}(\mathbf{k}) = \tilde{E}(\mathbf{k}) + \frac{1}{2} I \cdot R \quad (1.15)$$

Mittels Anwendung der FERMI-Statistik auf R , einigen Umformungen und der Einführung der Zustandsdichte $\tilde{D}(E_F) = (V/2N) \cdot D(E_F)$