

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Ferromagnetismus</b>	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>Mikromagnetismus</b>	<b>19</b>
3.1	Gibbssche freie Energie eines Ferromagneten . . . . .	20
3.1.1	Austauschenergie $E_a$ . . . . .	20
3.1.2	Kristallenergie $E_k$ . . . . .	22
3.1.3	Zeemanenergie $E_z$ . . . . .	24
3.1.4	Streifeldenergie $E_z$ . . . . .	24
3.2	Energieminimierung . . . . .	26
3.3	Dynamik : Landau-Lifshitz-Gilbert Gleichung . . . . .	28
3.4	Energieerhaltung . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Mikromagnetischer Algorithmus</b>	<b>33</b>
4.1	Finite Elemente und zugehörige Basisfunktionen . . . . .	35
4.2	Elementfunktionen der Hexaeder . . . . .	36
4.3	Streifeldberechnung . . . . .	40
4.3.1	Matrix-Methode und Multipolentwicklung . . . . .	40
4.3.2	Regelmäßiges Gitter - Faltungsintegral . . . . .	41
4.3.3	Regelmäßiges Gitter - Finite Differenzen . . . . .	42
4.3.4	Unregelmäßiges Gitter - Finite Elemente Methode . . . . .	43
4.3.5	Offenes Randwertproblem . . . . .	45
4.4	Berechnung der Gesamtenergie und des effektiven Feldes . . . . .	49
4.4.1	Mittlere Magnetisierung . . . . .	50
4.4.2	Streifeldenergie . . . . .	51
4.4.3	Zeemanenergie . . . . .	52

4.4.4	Austauschenergie . . . . .	52
4.4.5	Anisotropieenergie . . . . .	53
4.5	Zeitintegration - geometrische Methode . . . . .	54
4.6	Umsetzung der Finiten Elemente Methode im Code . . . . .	57
4.6.1	Gittergenerierung . . . . .	58
4.6.2	Adaptive Gitterverfeinerung . . . . .	60
4.6.3	Details des Programmcodes . . . . .	62
4.7	Test des Codes . . . . .	64
4.7.1	Adaptive Gitterverfeinerung - Ummagnetisieren eines Kobalt-Zylinders . . . . .	66
4.7.2	Elemente 2. Ordnung - $\mu$ mag Problem #4 . . . . .	68
<b>5</b>	<b>Spinwellenstreuung an Domänenwänden</b>	<b>73</b>
5.1	Spinwellen . . . . .	74
5.1.1	Linearisierung der Gilbertgleichung . . . . .	74
5.1.2	Streifeld einer periodischen Magnetisierung . . . . .	75
5.1.3	Dispersionsrelation . . . . .	78
5.2	Erfassen der Spinwellen in der numerischen Simulation . . . . .	82
5.2.1	Absorbierende Randbedingungen . . . . .	82
5.2.2	Vorbetrachtung: $180^\circ$ Bloch-Wand . . . . .	83
5.2.3	Numerische Anpassungen . . . . .	88
5.3	Vorgehensweise bei der Ergebnisauswertung und Genauigkeit	90
5.4	Streuung von Spinwellen an einer $180^\circ$ Néel-Wand . . . . .	96
5.5	Streuung von Spinwellen an einer transversalen Wand . . . . .	98
5.6	Streuung von Spinwellen an einer bewegten Domänenwand .	104
5.7	Streuung einer Spinwelle an einer Phasengrenze mit Domänenwand . . . . .	108
<b>6</b>	<b>Spinwellenstreuung - Analytische Beschreibung</b>	<b>115</b>
6.1	Analytischer Formalismus . . . . .	116
6.1.1	Aufstellen der Differentialgleichung . . . . .	116
6.1.2	Asymptotische Lösung . . . . .	120
6.1.3	Berücksichtigung von Domänenwänden . . . . .	120
6.1.4	Lösen der DGL mittels Koordinatentransformation . .	121
6.1.5	Bestimmung der Eigenwertfunktionen mit der Frobenius-Methode . . . . .	123
6.1.6	Gesamtlösung der DGL . . . . .	125

6.2	Implementieren der Frobenius-Methode . . . . .	127
6.3	Genauigkeit des Algorithmus . . . . .	131
6.4	Spinwellenstreuung an einer $180^\circ$ Néel-Domänenwand . . . . .	134
6.5	Spinwellenstreuung an einer $180^\circ$ Bloch-Wand . . . . .	136
6.5.1	Materialabhängigkeit . . . . .	139
6.6	$90^\circ$ Bloch-Domänenwand mit kubischer Anisotropie . . . . .	140
6.7	Phasenverschiebung . . . . .	143
6.8	Spinwellenstreuung an Bloch-Wänden in dünnen hartmagne- tischen Filmen mit senkrechter Anisotropie . . . . .	147
6.9	Berücksichtigung der Dämpfung . . . . .	148
6.9.1	Analytische Vorbetrachtung . . . . .	149
6.9.2	$180^\circ$ Bloch-Domänenwand . . . . .	154
6.10	Erweiterungen . . . . .	156
6.10.1	Bewegte Domänenwand . . . . .	156
6.10.2	Stehende Wellen . . . . .	157
6.10.3	Spinwellen höherer Ordnung . . . . .	158
<b>7</b>	<b>Diskussion</b>	<b>161</b>
7.1	Vergleich der numerischen und analytischen Methode . . . . .	161
7.2	Einfluss der Filmdicke auf die Spinwellenstreuung . . . . .	162
7.3	Einfluss der Wellenzahl auf die Spinwellenstreuung . . . . .	163
7.4	Streifender Einfall der Spinwellen . . . . .	165
7.5	Einfluss der Materialparameter auf die Spinwellenstreuung . . . . .	167
7.6	Einfluss der Phasengrenze auf die Spinwellenstreuung . . . . .	168
7.7	Einfluss der Domänenwandbewegung auf die Spinwellenstreuung . . . . .	170
7.8	Einfluss der Spinwellen auf die Domänenwandbewegung . . . . .	172
7.9	Vergleich mit linearer Optik . . . . .	175
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>177</b>
<b>9</b>	<b>Anhang</b>	<b>185</b>
<b>10</b>	<b>Publikationen</b>	<b>187</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>189</b>