



# Inhaltsverzeichnis

---

<b>Summary</b>	<b>v</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>x</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>I Theoretische Grundlagen</b>	<b>5</b>
<b>2 Theorie des Mikromagnetismus</b>	<b>6</b>
2.1 Einleitung . . . . .	6
2.2 Magnetostatik: Energiebeiträge im Ferromagneten . . . . .	7
2.2.1 Zeemann-Energie . . . . .	8
2.2.2 Streufeldenergie . . . . .	8
2.2.3 Austauschenergie . . . . .	9
2.2.4 Anisotropieenergie . . . . .	10
2.3 Magnetisierungsdynamik . . . . .	11
2.3.1 Landau-Lifschitz-Gilbert Gleichung (LLG) . . . . .	11
2.3.2 Spinwellen . . . . .	15
<b>3 Magnetische Mikrostrukturen und Vortizes</b>	<b>19</b>
3.1 Domänenwände . . . . .	19
3.2 Magnetische Domänenstrukturen . . . . .	21
3.3 Magnetischer Vortex . . . . .	24
<b>4 Dynamische Anregungsmoden in Vortexstrukturen und Vortexkerninversion</b>	<b>27</b>
4.1 Theoretische Behandlung . . . . .	27
4.2 Die gyrotrope Eigenmode $G_0$ . . . . .	29



4.3	Magnetostatische Spinwellen in Vortexstrukturen . . . . .	33
4.4	Frequenzaufspaltung bei Spinwellen aufgrund von Hybridisierung . . . . .	37
4.5	Dynamische Vortexkerninversion . . . . .	40
<b>II</b>	<b>Verwendete Techniken und Methoden</b>	<b>45</b>
<b>5</b>	<b>Röntgenmikroskopie</b>	<b>46</b>
5.1	Die Synchrotronquelle und Strahlführung . . . . .	47
5.1.1	Erzeugung von Synchrotronstrahlung . . . . .	47
5.1.2	Zeitstruktur der Strahlung im Fall des BESSY II Speicherringes . . . . .	50
5.1.3	Der elliptische Undulator . . . . .	53
5.1.4	Strahlführung (Beamline) . . . . .	56
5.2	Magnetischer Röntgenkontrast durch den XMCD-Effekt . . . . .	57
5.3	Fokussierung von Röntgenstrahlen mit Fresnellinsen . . . . .	61
5.4	Das Rasterröntgenmikroskop MAXYMUS . . . . .	64
5.5	Statische XMCD Abbildungen von Vortexstrukturen . . . . .	65
<b>6</b>	<b>Zeitaufgelöste Röntgenmikroskopie</b>	<b>70</b>
6.1	Komponenten des zeitauflösenden Messaufbaus . . . . .	70
6.1.1	Einzelphotonendetektion mit der Avalanche Photodiode (APD) . . . . .	70
6.1.2	Digitale Erfassung der Einzelphotonenereignisse . . . . .	72
6.1.3	Das FPGA System (Field Programmable Gate Array) . . . . .	75
6.2	Ermittlung der realen Zeitauflösung . . . . .	77
6.3	Unterschiedliche Messmodi . . . . .	79
6.4	Weiterentwicklung der Messtechnik . . . . .	82
<b>7</b>	<b>Präparation und Charakterisierung der Vortexproben</b>	<b>87</b>
7.1	Präparation . . . . .	87
7.2	Charakterisierung . . . . .	90
7.3	Hochfrequenzanregung . . . . .	93
<b>8</b>	<b>Mikromagnetische Simulationen</b>	<b>95</b>
8.1	Verwendete Simulationsprogramme . . . . .	95
8.2	Modenanalyse mittels lokaler Fouriertransformation . . . . .	97



<b>9 Experimentelle Bestimmung der magnetischen Materialparameter einer Vortexstruktur</b>	<b>101</b>
<b>III Experimente zum schnellen, gepulsten Vortextkernschalten</b>	<b>105</b>
<b>10 Vortextkernschalten durch quasi-resonante, gepulste Anregung: Gyromode</b>	<b>106</b>
10.1 Prinzip . . . . .	107
10.2 Messung des Schaltverhaltens . . . . .	110
10.3 Aktives Abbremsen der Vortextkerngyration (“Quenching“). . . . .	111
10.4 Übergang vom Gyromodenschalten zu spinwellenbegleiteten Schalten durch Verkürzung der Pulslänge . . . . .	111
<b>11 Vortextkernschalten durch sub-100 ps Pulse: Spinwellenbegleitetes, unidirektionales Vortextkernschalten</b>	<b>113</b>
11.1 Sub-100 ps Vortextkernschalten . . . . .	113
11.1.1 Zeitaufgelöste Messung des Schaltvorgangs . . . . .	119
11.1.2 Schaltgeschwindigkeit . . . . .	121
11.1.3 Ursachen der Unidirektionalität: Spinwelleninterferenz und Hybridisierung . . . . .	122
11.2 Ausblick: 2-Bit MRAM . . . . .	133
<b>IV Der Vortex und sein Kern in dreidimensionaler Betrachtung</b>	<b>137</b>
<b>12 Profil des Vortextkerns</b>	<b>139</b>
<b>13 Dreidimensionale Aspekte zur Vortextkerninversion</b>	<b>141</b>
13.1 Blochlinien und Blochpunkte . . . . .	141
13.2 Rolle des Blochpunktes beim sub-100 ps Schalten . . . . .	144
13.3 Einfluss der Diskretisierung auf die Schaltschwelle . . . . .	147
<b>14 (Flexo-) Gyromoden höherer Ordnung</b>	<b>150</b>
14.1 Generelle Betrachtungen . . . . .	150
14.2 Hybridisierung der Gyromode $G_0$ mit den höheren Flexomoden	152
14.3 Hybridisierung von Spinwellen mit höheren Flexomoden . . . . .	154



14.4 Senkrecht stehende Spinwellen (PSSWs) in Vortizes . . . . .	158
14.5 Fazit . . . . .	161
<b>V Vortexdynamik mit magnetischen Tunnelementen</b>	<b>163</b>
<b>15 Magnetische Tunnelemente (MTJ)</b>	<b>164</b>
15.1 Tunnelmagnetowiderstand . . . . .	164
<b>16 MTJ-Experimente an Vortex Proben</b>	<b>167</b>
16.1 Präparation der MTJ-Proben . . . . .	167
16.2 MTJ-Messtechnik . . . . .	168
16.3 Vortexdynamik ohne Synchrotron . . . . .	170
<b>17 Zusammenfassung</b>	<b>176</b>
<b>VI Anhang</b>	<b>181</b>
<b>A Zur Landau-Lifschitz-Gilbert Gleichung</b>	<b>182</b>
<b>B Interne Funktionsweise des FPGA</b>	<b>184</b>
B.1 Field Programmable Gate Arrays (FPGA) . . . . .	184
B.2 Interne Programmstruktur des FPGA . . . . .	186
B.3 Realisierung der Mehrkanal-Zähllogik . . . . .	188
B.4 Hauptroutine des LabView-Messprogramms . . . . .	190
<b>C Präparation von Lamellen für TEM-Messungen</b>	<b>192</b>
<b>D Messung von Strukturen unterhalb der Rayleigh Auflösung</b>	<b>195</b>
<b>E Weitere Betrachtungen zur Hybridisierung von <math>G_0</math> und <math>G_1</math></b>	<b>198</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>203</b>
<b>Abbildungsverzeichnis mit Quellenangaben</b>	<b>218</b>
<b>Liste der Veröffentlichungen</b>	<b>224</b>