

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	xi
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	3
1.2 Forschungsstand zur Modellierung von Wirbelströmen in Aktoren	5
1.3 Struktur der Arbeit	7
1.4 Eigene Vorarbeiten und Publikationen	9
2 Grundlegende Konzepte und Vorbetrachtungen	11
2.1 Magnetische Krafterzeugung und das Differenzprinzip	11
2.2 Wirbelströme und ihr Einfluss auf die Dynamik aktiver Magnetlager	16
2.2.1 Physikalische Betrachtung	16
2.2.2 Mathematische Betrachtung	18
2.3 Regelung aktiver Magnetlager	21
2.3.1 X - I -Regelung	23
2.3.2 X - Φ_{EST} -Regelung	26
2.3.3 Vergleich Flusschätzung und -messung	29
2.4 Vergleich von Kernmaterialien	32
2.5 Fraktionale Systeme	36
2.5.1 Definition im Zeitbereich	37
2.5.2 Definition im Bildbereich	38
2.5.3 Stabilitätsbetrachtungen	38
2.5.4 Anwendungen: Stand der Forschung	41
2.5.5 Äquivalenz v. Kettenleitern u. -brüchen und FO-Systemen	42
I Einführungsbeispiel: Massive Ringkernspule	45
3 Analytische Modellierung des Flusschätzers	47
3.1 Modellierung von Wirbelströmen als effektive Reluktanz	47
3.1.1 Transzendente Lösung	47
3.1.2 Annäherung als fraktionales System	51
3.2 Einfluss von Sättigung und Hysterese	55
3.2.1 Statisches Hysteresemodell	55
3.2.2 Dynamisches Hysteresemodell	58
3.2.3 Fraktionaler Hysterese-Allpassfilter	60

4	Rationale Approximation der transzend. Übertragungsfunktion	63
4.1	Rationale Approximation fraktionaler Systeme	64
4.1.1	Kettenbruchentwicklung implizites FO-System (IKBE)	65
4.1.2	Explizite Matsuda-Approximation (EMA)	66
4.1.3	Implizite Matsuda-Approximation (IMA)	68
4.2	Direkte rationale Approximation (DRA)	70
4.2.1	Direkte Kettenbruchentwicklung (DKBE)	70
4.2.2	Padé-Approximation (PA)	73
4.3	Vergleich der Approximationen	75
II	Anwendungsbeispiel: 5-achsiges aktives Magnetlager	77
5	Rationale Teilreluktanzen	79
5.1	Axiallager mit massivem Kern	79
5.1.1	Radiale Reluktanzen	81
5.1.2	Äußere Axiale Reluktanzen	83
5.1.3	Innere Axiale Reluktanzen	87
5.1.4	Luftspaltreluktanzen	89
5.1.5	Eckreluktanzen	94
5.2	Radiallager mit geblechtem Kern	97
5.3	Zusammenfassung und Einfluss der Approximationsordnungen	102
6	Rationale Gesamtreluktanz	107
6.1	Summe der Teilreluktanzen	108
6.2	Analytische Verfahren	110
6.2.1	Padé-Approx. der Summe der Teilreluktanzen (PASR)	110
6.2.2	Matsuda-Approx. des äquiv. impliziten Systems (MAEIS)	112
6.2.3	Vergleich der Verfahren	113
6.3	Numerische Verfahren für empirische Daten (LEVY RVF)	116
6.4	Auswahlkriterien	121
7	Einfluss von Streu- und Stirnflüssen	123
7.1	Magnetostatischer Fall	125
7.2	Dynamischer Fall	130
7.3	Analytische Betrachtung	136
7.4	Implementierung und Fazit	140
8	Magnetlagerregelung mit unterlagerter Flussregelung	147
8.1	Digitaler fraktionaler Flussschätzer	147
8.1.1	IIR-Filter	149

8.1.2	Stabilität	150
8.1.3	Digitale Biquad-Filter-Kaskade	153
8.2	Flussregelung auf Basis des Schätzers	157
8.2.1	Betragsoptimum und Symmetrisches Optimum	158
8.2.2	Strombegrenzung	161
8.3	Stromregelung unter dem Einfluss von Wirbelströmen	163
8.4	Lageregelung	165
9	Experimentelle Untersuchung	169
9.1	Aufbau des Versuchsstands	169
9.2	Simulationsmodell	175
9.3	Validierung des kontinuierlichen Flussmodells	178
9.4	Auswahl einer Variante des digitalen Flusssschätzers	181
9.5	Definition eines Unsicherheitsbereichs	184
9.6	Flussregelung	186
9.6.1	Frequenzganganalyse	187
9.6.2	Sprungantworten	189
9.6.3	Fazit	192
9.7	Lageregelung	195
9.7.1	Stationärer Schwebezustand	196
9.7.2	Führungsverhalten	200
9.7.3	Störübertragungsverhalten	208
9.7.4	Fazit	211
10	Zusammenfassung und Ausblick	213
10.1	Zusammenfassung	213
10.2	Anwendungspotenzial	215
10.3	Ausblick	216
	Thesen	219
	Literaturverzeichnis	223
	Abbildungsverzeichnis	237
	Tabellenverzeichnis	239
	Anhang A Mathematische Beweise und Definitionen	I
	Anhang B Programmiertechnische Implementierungen	III
	Anhang C Konstruktionszeichnungen	V
	Anhang D Parametertabellen	VII