

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Kurzfassung	V
Abstract	VII
1 Einleitung	5
1.1 Motivation	5
1.2 Magnetisch gelagerte Antriebssysteme	6
1.3 Historische Entwicklung	9
1.4 Der lagerlose Scheibenläufermotor	11
1.5 Ziel und Aufbau dieser Arbeit	14
2 Modellbildung	17
2.1 Einleitung	17
2.2 Mechanische Spannungen an Grenzflächen	17
2.3 Aufbau des Stators	19
2.4 Aufbau des Rotors	20
2.5 Berechnung der Kraft- und Drehmomentbeziehungen	22
2.6 Stromeinprägung	25
2.7 Spannungseinprägung	26
2.8 Verschaltung der Stränge	27
2.8.1 Ziel der Verschaltung	27
2.8.2 Einfluss der Verschaltung bei Stromeinprägung	28
2.8.3 Einfluss der Verschaltung bei Spannungseinprägung	28
2.8.4 Eigenschaften der Strom-Kraft-Matrix $\mathbf{T}_m(\gamma)$	29
2.8.5 Wahl der Verschaltungsmatrix	31
2.8.6 Zusammenfassung	35
2.9 Optimale Ansteuerung - Umkehrung der Kraft-Strombeziehung	35
3 Regelung	37
3.1 Einleitung	37
3.2 Stromeinprägung	37
3.2.1 Exakte Linearisierung durch Transformation der Eingangsgrößen	39
3.3 Spannungseinprägung	40

3.3.1	Exakte Linearisierung durch Kompensation und Koordinatentransformation	41
3.3.2	Physikalische Deutung der Linearisierung	47
3.3.3	Vereinfachungen	48
3.4	Praktische Realisierung der übergeordneten Regler	49
3.4.1	Eingeprägte Ströme	50
3.4.2	Eingeprägte Spannungen	51
3.5	Zusammenfassung	52
4	Rotordynamische Untersuchungen	53
4.1	Einleitung	53
4.1.1	Beschreibung der Lage des Rotors über die sechs Freiheitsgrade	53
4.1.2	Aktives Radiallager	54
4.1.3	Passives Kipplager	55
4.1.4	Passives Axiallager	56
4.1.5	Systemreduktion	56
4.2	Mechanisches Gesamtmodell des Rotors	57
4.2.1	Modellannahmen	57
4.2.2	Koordinatensysteme	58
4.2.3	Projektionsgleichung	59
4.2.4	Kongruenztransformation	61
4.3	Radiale Pendelschwingungen	62
4.3.1	Freie ungedämpfte Schwingungen - Eigenfrequenzen	63
4.3.2	Anregung der Pendelschwingungen	67
4.3.3	Einfluss der Dämpfung	69
4.3.4	Maximale Rotorauslenkung bei erzwungenen Schwingungen im stationären Betrieb	69
4.4	Kippschwingungen	72
4.4.1	Freie ungedämpfte Schwingungen - Eigenfrequenzen	73
4.4.2	Anregung der Kippschwingungen	74
4.4.3	Einfluss der Dämpfung	74
4.4.4	Maximale Rotorauslenkung bei erzwungenen Schwingungen im stationären Betrieb	75
4.5	Gesamtschwingungen des Rotors	77
4.6	Analogie zu mehrpoligen Rotoren	77
4.7	Zusammenfassung	80
5	Elektronische Ansteuerverfahren	83
5.1	Einleitung	83
5.2	Maximale Leerlaufdrehzahl	83
5.3	Ansteuerung mit Vollbrücken	85
5.4	Ansteuerung mit Halbbrücken	85
5.4.1	Verschaltung im Stern	86
5.4.2	Verschaltung im Ring	86

5.4.3	Optimale Ausnutzung der Stellgrößen beim lagerlosen Motor in Halbrückensteuerung	89
5.5	Zusammenfassung	93
6	Implementierung von digitalen Regelungen auf Echtzeitsystemen	95
6.1	Einleitung	95
6.2	Eigenschaften und Anforderungen an eine Entwicklungsplattform	96
6.2.1	Simulation	97
6.2.2	Tests an der realen Strecke	98
6.3	Entwicklungsplattform M2C	99
6.3.1	Aufbau der regelungstechnischen Blöcke	100
6.3.2	Implementierung am DSP	102
7	Versuchsaufbau	107
7.1	Gesamtkonzept	107
7.2	Prototyp des lagerlosen Scheibenläufermotors	108
7.3	Sensorik	109
7.4	Signal- und Leistungselektronik	111
8	Simulationen und Messungen	113
8.1	Einleitung	113
8.2	Strom-Kraft-Matrix $T_m(\gamma)$	114
8.2.1	Simulation	114
8.2.2	Messung der Strom-Tragkraftbeziehung	114
8.2.3	Messung der Strom-Drehmomentbeziehung	116
8.3	Radiale negative Steifigkeit	117
8.4	Passive axiale Steifigkeit	118
8.5	Wirkungsgrad	118
8.5.1	Mathematische Berechnung des Wirkungsgrads	119
8.5.2	Messung des Wirkungsgrads	120
8.6	Dynamisches Regelverhalten	121
8.7	Messung mit optimierter Modulation	122
9	Zusammenfassung und Ausblick	125
	Literaturverzeichnis	127
A	Formelzeichen	133