



Inhaltsverzeichnis

Vorwort	iii
Kurzfassung	v
Abstract	vii
Symbolverzeichnis	xix
1. Einleitung und Struktur der Arbeit	1
1.1. Struktur der Arbeit	2
1.2. Umfeld	4
1.2.1. Hermetisch abgedichtete Pumpen	4
1.2.2. Magnetgelagerte Inline-Spaltrohrmotorpumpe (Konzept)	8
1.2.3. Vorstudie: Teilprototypen	10
1.3. Stand der Forschung	15
1.3.1. Lagerloser Motor	15
1.3.2. (Lagerlos) magnetgelagerte Spaltrohrmotorpumpen	19
1.3.3. Fazit	21
2. Elektromagnetisches Modell des lagerlosen Motors	23
2.1. Basismodell (zentrierter Rotor)	24
2.1.1. Basismodell der Querkraftgleichungen	26
2.2. Überführung der Kraftgleichungen in Feldkoordinaten	28
2.3. Entkopplung / Inverses Kraftmodell in Feldkoordinaten	30
2.4. Vermessung der Versuchsmaschinen und Parametrierung Basismodell	32
2.4.1. Einfluss des Antriebssystems auf die Kraftbildung	35
3. Modellerweiterung: Exzentrischer Rotor	41
3.1. Modellierungsansatz	41
3.2. Diskussion und Interpretation des erweiterten Modells	50
3.2.1. Rohergebnis der Berechnungen	51
3.2.2. Plausibilitätsprüfung des erweiterten Modells	52
3.2.3. Erweitertes Modell bei unbelastetem Antrieb: $\underline{i}_A \equiv \underline{0}$	55
3.2.4. Vollständiges erweitertes Modell bei exzentrischem Rotor ($\underline{i}_A \neq \underline{0}$)	60
3.3. Parasitäres Drehmoment bei exzentrischem Rotor	64
3.4. Modellabgleich	67
3.4.1. Parameteridentifikation	67
3.4.2. Abgleich mit Prüfstandsmessungen	72
3.5. Entkopplung mit dem erweiterten Modell	73
3.6. Berücksichtigung höherer Harmonischer	75
3.6.1. Harmonische der Permanentmagneterregung	76
3.6.2. Verallgemeinerte Berücksichtigung höherer Harmonischer	78
3.7. Fazit der erweiterten Modellbildung	79



4. Modellbildung der Stellglieder	81
4.1. Gleichspannungszwischenkreisumrichter	81
4.2. Spannungsmodell des lagerlosen Motors	86
4.2.1. Rotor(feld)orientierung	87
4.2.2. Spannungsmodell des Antriebssystems in Feldkoordinaten	88
4.2.3. Spannungsmodell des Tragsystems in Feldkoordinaten	90
5. Mechanische Modellbildung	91
5.1. Starrer Rotor	91
5.2. Elastischer Rotor	96
5.2.1. Methode der finiten Elemente für die Rotordynamik	97
5.2.2. Modalanalyse für Rotor I	104
5.2.3. Modellreduktion durch Modaltransformation	106
6. Distanzsensoren	111
6.1. Allgemeine Grundlagen	111
6.2. Randbedingungen der Spaltrohrpumpe für den Sensorentwurf	114
6.3. Methode: Hybrides Modell zur Auswahl von Wirbelstromabstandssensoren	118
6.3.1. Modelle für Spulenkonfiguration, Schwingkreis und Leitungen	121
6.3.2. Modelle der Sensorauswertung	124
6.3.3. Schwingkreisabstimmung	129
6.3.4. Optimierung: Auswahlverfahren für Sensorkennlinien	134
6.3.5. Zusammenfassung und Ausblick	141
7. Stromregelkreise	143
7.1. Auslegung der Regelung für Antrieb- und Tragsystem	143
7.1.1. Zeitdiskrete Reglerauslegung nach dem Dämpfungsoptimum	145
7.1.2. Methode von Gröling	148
7.1.3. Vereinfachte Reglerauslegung in s	149
7.1.4. Vergleich der Lösungsansätze	150
7.2. Anti-Windup-Maßnahmen	151
7.3. Implementierung und Regelungsstruktur	154
7.3.1. Regelungsstruktur des Antriebssystems	154
7.3.2. Regelungsstruktur des Tragsystems (unterlagerte Ebene)	158
7.4. Parameteridentifikation im Stromregelkreis	161
7.5. Kerbfilter für die Stellgrößen	164
7.5.1. Funktionsweise, Auslegung und Diskussion	164
8. Positionsregelung des Tragsystems	167
8.1. Versuchsergebnisse	171
8.2. Sonstige Messergebnisse (Kreuzkopplung durch EMK)	174
9. Prüfstandsaufbauten	177
9.1. Steuerrechner und Peripherieelektronik	177
9.2. Motorprüfstände	178
9.3. Wirbelstromsensorprüfstände	181



10. Zusammenfassung und Ausblick	185
10.1. Zusammenfassung	185
10.2. Ausblick	187
10.2.1. Offene Punkte Teilprototypuntersuchungen	188
10.2.2. Hygienic Design und Fanglagergestaltung	188
10.2.3. Rotorgestaltung, Modalanalyse und Anpassung der Regelung .	189
10.2.4. Axiale Magnetlagerung	189
10.2.5. Modifizierter Winkelsensor oder sensorloser Betrieb (Antrieb)	189
10.2.6. Vermessung hydraulischer Effekte, Gesamtwirkungsgrad	190
10.2.7. Weitere Optimierung der Abstandssensorik	190
10.2.8. Prozessüberwachung	192
A. Modellbildung	193
A.1. Harmonische der PM-Erregung	193
A.2. Vollständiges Modell	198
B. Stromregelung	209
B.1. Blockschaltbildumformungen für <i>PI</i> -Anti-Windup-Dynamik	209
Literaturverzeichnis	211