



Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen	XI
1 Einleitung	1
2 Optimierung rechenzeitintensiver Fragestellungen	7
2.1 Grundlagen der multikriteriellen Optimierung	7
2.2 Optimierung elektrischer Maschinen	11
2.3 Methoden zur Reduzierung der Gesamtrechenzeit	13
3 Das Optimierungsverfahren KG-MPSO	15
3.1 Multikriterielle Partikelschwarmoptimierung	16
3.2 Umgang mit linearen Restriktionen des Parameterraums	20
3.3 Das Kriging-Interpolationsverfahren	23
3.4 Unterstützung der Partikelschwarmoptimierung	26
3.4.1 Pre-Evaluation	26
3.4.2 Spawning	28
3.4.3 Anpassung der Schwarmgröße	31
3.5 Ablauf der KG-MPSO	32
3.6 Untersuchung des Verfahrens mit akademischen Testfällen	34
4 Betriebsverhalten und Werkstoffe von permanenterregten Synchronmaschinen	39
4.1 Aufbau und Grundwellenmodell der PSM	39
4.2 Regelung permanenterregter Synchronmaschinen	44
4.2.1 Maschinen ohne Schenkligkeit $L_d = L_q$	44
4.2.2 Maschinen mit Schenkligkeit $L_d < L_q$	46
4.3 Permanentmagnete	48
4.3.1 Eigenschaften von Selten-Erd-Magneten	49
4.3.2 Herstellung mittels Korngrenzendiffusion	52
4.4 Elektroblech	54
4.5 Verlustmechanismen und Wirkungsgrad	57
4.6 Einflüsse auf die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie	60
5 Optimierung von permanenterregten Synchronmaschinen	67
5.1 Anforderungen, Randbedingungen und Zielgrößen	67
5.2 Maschinenvarianten	70
5.2.1 Rotorvarianten und deren Parameter	71
5.2.2 Statorvarianten und deren Parameter	73
5.2.3 Untersuchte Maschinenvarianten	74



5.3	Voruntersuchungen	75
5.3.1	Zulässiger Parameterraum	77
5.3.2	Aktive Länge	77
5.3.3	Windungszahl	79
5.3.4	Staffelung	80
5.3.5	Transienter dreiphasiger Kurzschluss	83
5.3.6	Analytische Berechnung der mechanischen Spannung	87
5.4	Vorgehen bei der Optimierung	89
5.4.1	Festlegung zusätzlicher Maschinenparameter	89
5.4.2	Ermittlung der Zielfunktionswerte	90
5.4.3	Anpassung des Optimierungsverfahrens an die Problemstellung	91
5.5	Ergebnisse der Optimierung	91
5.5.1	Polpaarzahl 3, Lochzahl 3 mit Rotor T3 (p3q3T3)	92
5.5.2	Polpaarzahl 4, Lochzahl 2 mit Rotor T3 (p4q2T3)	93
5.5.3	Polpaarzahl 4, Lochzahl 2,5 mit Rotor T3 (p4q2,5T3)	93
5.5.4	Polpaarzahl 5, Lochzahl 2/5 mit Rotor T3 (p5q0,4T3)	95
5.5.5	Polpaarzahl 5, Lochzahl 2 mit allen Rotorvarianten	95
5.5.6	Polpaarzahl 6, Lochzahl 1/2 mit Rotoren V1 und T3	96
5.5.7	Polpaarzahl 6, Lochzahl 1,5 mit Rotor T3 (p6q1,5T3)	97
5.5.8	Polpaarzahl 7, Lochzahl 1 mit Rotor T3 (p7q1T3)	98
5.5.9	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	98
5.6	Vergleich ausgewählter Maschinenvarianten	102
5.6.1	Vergleich auf Basis der multikriteriellen Optimierung	102
5.6.2	Vergleich auf Basis des Verbrauchs in einem Fahrzyklus	104
5.6.3	Auswahl eines Maschinendesigns	107
6	Untersuchung der aufgebauten Maschine und Vergleich mit der Messung	109
6.1	Effiziente Nutzung des Magnetmaterials durch hohe Rotorfestigkeit	109
6.1.1	Bionischer Ansatz zur Reduzierung mechanischer Spannungen	110
6.1.2	Optimierung der Anordnung und Kontur der Stege	112
6.2	Aufbau eines Prototypen	113
6.3	Eigenschaften im Leerlauf	115
6.3.1	Induzierte Spannung	115
6.3.2	Verluste	116
6.4	Betriebsverhalten unter Last	118
6.4.1	Stromdichteverdrängung	118
6.4.2	Betriebskennfelder	119
6.4.3	Maximalkennlinie	120
6.4.4	Wirkungsgrad	122
7	Zusammenfassung und Ausblick	125
A	Anhang	129
A.1	Grundlagen zum magnetischen Kreis	129
A.2	Richtwerte bei der Maschinenauslegung	133
	Literaturverzeichnis	134