

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung und Motivation	1
1.2	Projektzusammenhang und Forschungsbedarf	2
1.3	Zielsetzung und wissenschaftlicher Beitrag	3
1.4	Aufbau der Arbeit	4
2	Methodenentwicklung	5
2.1	Anforderungen	5
2.1.1	Integrierter Optimierungsprozess in der Produktentstehung	5
2.1.2	Funktionale Anforderungen an das Rotordesign	7
2.1.3	Fertigung und Montage der Magnete und Rotorbleche	8
2.2	Stand der Wissenschaft	11
2.2.1	Simulationsgestützte Optimierung	11
2.2.2	Topologieoptimierung	14
2.2.3	Topologieoptimierung elektrischer Maschinen	16
2.2.4	Automatisierte Ansätze zur Geometrierückführung	19
2.3	Methodik für einen integrierten Optimierungsansatz	23
3	Modellierung und Optimierung der permanenterregten Synchronmaschine	27
3.1	Berechnungsgrundlagen	27
3.1.1	Spannungsgrundgleichungen	27
3.1.2	Finite-Elemente-Methode	30
3.1.3	Modellierung elektromagnetischer Vorgänge	32
3.1.4	Modellierung elastostatischer Vorgänge	34
3.1.5	Materialien	37
3.2	Topologieoptimierung mit der Dichtemethode	39
3.2.1	Formulierung des Topologieoptimierungsproblems	39
3.2.2	Optimierungsalgorithmus	44
4	Simulationsmodell	47
4.1	Berechnung der Maschineneigenschaften	47
4.1.1	Leerlauf	49
4.1.2	Lastbetrieb	50
4.1.3	Drehzahlfestigkeit	53
4.1.4	Entmagnetisierungsfestigkeit	55
4.1.5	Modellaufbau	57
4.2	Modellanpassungen	58
4.3	Kontinuierliches Strukturmodell	60
4.3.1	Geometriedarstellung durch wertkontinuierliche Dichtevariablen	61
4.3.2	Einfluss des kontinuierlichen Strukturmodells auf die Maschineneigenschaften	63
4.4	Zusammenfassung	67

5	Topologische Optimierung	71
5.1	Optimierungsmodell	71
5.2	Drehmoment und Drehmomentwelligkeit im Eckdrehzahlpunkt	74
5.3	Lastbetrieb	77
5.4	Drehzahlfestigkeit	78
5.5	Entmagnetisierungsfestigkeit	81
5.6	Kombination aller Anforderungen	84
5.7	Zusammenfassung	87
6	Geometrierückführung	89
6.1	Konturextraktion	89
6.1.1	Umsetzung	89
6.1.2	Nachrechnung	91
6.1.3	Einflussanalysen	91
6.1.4	Sensitivitätsanalyse	93
6.2	Parametrisierung der Linienzüge	94
6.2.1	Geometriebeschreibung durch NURBS	94
6.2.2	Parametrisierung der Magnetformen	97
6.2.3	Parametrisierung der Luftkavitäten	98
6.3	Formoptimierung	101
6.3.1	Ansatz zur Formoptimierung der topologisch optimierten Rotor- designs	101
6.3.2	Formoptimierungsmodell	103
6.3.3	Ergebnisse der Formoptimierung	105
6.4	Validierung	106
6.5	Zusammenfassung	109
7	Fazit und Ausblick	111
A	Anhang	115
A.1	Winkeldefinition	115
A.2	Zusatz zu Kapitel 3	115
A.2.1	Magnetisierungswinkel	115
A.2.2	Wirkungsweise der Filter- und Projektionsparameter	116
A.3	Zusatz zu Kapitel 4	117
A.3.1	Rotorschrägungswinkel	117
A.3.2	Resultierende kontinuierliche und diskrete Strukturen bei einer Variation der Einstellparameter	118
A.4	Zusatz zu Kapitel 5	119
A.4.1	Einfluss der Gewichtungen im TO-Modell	119
A.4.2	Einfluss des Strafterms κ_E	120
A.4.3	Einfluss des Strafterms κ_{B_r}	121
A.4.4	Direkte Beschränkung der Grauwerte	122
A.4.5	Ausgangsmodell für Parametervariationen	122
A.4.6	Konvergenzverhalten in Abhängigkeit von den Einstellparametern	123
A.4.7	Magnetfläche als Zielfunktion	127
A.4.8	Schärfung der Einstellparameter im zweiten Optimierungsschritt	128
A.5	Zusatz zu Kapitel 6	129
A.5.1	Geometrische Grundformen	129
A.5.2	Einflussseparation, Vernetzung und Diskretisierung	133

A.5.3	Variation der Schwellenwerte	134
A.5.4	Festigkeitsberechnung ohne Berücksichtigung der Mindeststegbreiten	137