

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	xvii
1 Einleitung	1
1.1 Stand der Technik	3
1.1.1 Fertigungstoleranzen in elektrischen Maschinen	3
1.1.2 Sensitivitätsanalyse	5
1.1.3 End-of-Line-Prüfung	7
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	8
1.3 Vorstellung der untersuchten Maschine	12
2 Grundlegendes Konzept der eingesetzten Probabilistik	15
2.1 Stochastische Verteilungen	16
2.2 Design of Experiments	19
2.2.1 Quasi-Monte-Carlo Methoden	20
2.2.2 Auswahl der QMC-Methode	24
2.3 Metamodellierung	26
2.3.1 Multivariate lineare Regression	27
2.3.2 Polynomiale Chaos Expansion	27
2.3.3 Kriging	31
2.3.4 Güte der Metamodellierung	31
2.4 Sensitivitätsanalyse	32
2.4.1 Regressionsanalyse	32
2.4.2 Varianzanalyse	33
3 Grundlagen und Anwendung der Maschinensimulation	37
3.1 Numerische Berechnung der elektrischen Maschine	39
3.2 Transiente Antriebssimulation im Umrichterbetrieb	41
3.2.1 Kennfeldberechnung	41
3.2.2 Beschreibung des Simulationsmodells	42
3.2.3 Analyse des Simulationsmodells	44
3.3 Berechnung der strukturdynamischen Schwingungsanregung . .	45
3.3.1 Bestimmung des Frequenzgangs	46
3.3.2 Auswertung der Oberflächenbeschleunigung	47

Inhaltsverzeichnis

3.4	Qualitätsattribute zur Bewertung der Maschinenausgangsgrößen	48
3.5	Modellierung des Statorsegment-Luftspalts	51
4	Toleranzen in der permanentmagneterregten Synchronmaschine	55
4.1	Produktion der permanenterregten Synchronmaschine	56
4.2	Geometrietoleranzen	57
4.2.1	Toleranzen im Rotor	58
4.2.2	Toleranzen im Stator	60
4.2.3	Exzentrizität	61
4.3	Materialtoleranzen	64
4.4	Einfluss der Einzeltoleranzen auf die Qualitätsattribute	65
4.5	Parameterkonzentration durch stochastische Toleranzmuster	69
4.6	Dominante Frequenzordnungen der Toleranzen	74
5	Probabilistische Sensitivitätsanalyse	81
5.1	Analyse der Toleranzen bei idealer Bestromung	82
5.1.1	Auswertung der FE-Simulationen	83
5.1.2	Metamodellierung	87
5.1.3	Sensitivität	92
5.2	Analyse der einflussreichsten Toleranzen im Umrichterbetrieb	97
5.2.1	Kennfeld-Diskretisierung	98
5.2.2	Auswertung der transienten Antriebssimulationen	100
5.2.3	Metamodellierung	103
5.2.4	Sensitivität	112
5.2.5	Einfluss der Toleranzen auf die Frequenzordnungen	120
5.3	Diskussion der Ergebnisse und der ersten Hypothese	129
6	Verifizierung durch Messungen	139
6.1	Prüfstandsaufbau und Messdurchführung	139
6.2	Auswertung	141
6.3	Probabilistische Einordnung zur Sensitivitätsanalyse	143
7	Generische dreistufige Methodik der Sensitivitätsanalyse	149
7.1	Stufe 1: Voruntersuchung	149
7.2	Ideale Sensitivitätsanalyse	151
7.3	Transiente Sensitivitätsanalyse	152
7.4	Diskussion der zweiten Hypothese	155
8	Automatisierte Erkennung von Toleranzabweichungen	157
8.1	Maschinelle Lernverfahren	158

8.2	Simulationsszenarien	159
8.3	Erkennung der Abweichungen	161
8.4	Diskussion der Ergebnisse und der dritten Hypothese	167
9	Zusammenfassung und Ausblick	171
	Symbolverzeichnis	179
	Literaturverzeichnis	183
	Eigene Veröffentlichungen	195
	Betreute Abschlussarbeiten	197
	Lebenslauf	199