

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	XI
Symbolverzeichnis	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Stand der Technik	2
1.3 Ziel und Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen elektrischer Maschinen und Entwurf der Referenzmaschine	7
2.1 Grundlagen elektrischer Maschinen	7
2.1.1 Ausführungsformen	7
2.1.2 Aufbau	8
2.1.3 Maschinentopologien	9
2.1.4 Vergleich der Maschinentopologien	10
2.2 Wicklungen in elektrischen Maschinen	11
2.2.1 Bezeichnung der Wicklungen	11
2.2.2 Einteilung der Wicklungen	14
2.2.3 Wicklungsfaktor	15
2.3 Grundlagen des Reluktanznetzwerkes	17
2.3.1 Idee des Reluktanznetzwerkes	18
2.3.2 Der magnetische Widerstand	19
2.3.3 Lösung des Gleichungssystems	20
2.4 Entwurf der Referenzmaschine	21
2.4.1 Anforderungen an die Referenzmaschine	22
2.4.2 Design der Referenzmaschine	22
2.4.3 Wicklung der Referenzmaschine	23
3 Design der innovativen Flussbarrierenmaschine	27
3.1 Grundlagen der Flussbarrieren	27
3.1.1 Grundlegende Idee der Verlustreduzierung	27
3.1.2 Umsetzung als Flussbarrieren	28
3.1.3 Wicklungsfaktor bei Verwendung von Flussbarrieren	30
3.1.4 Alternative Statortopologien mit Flussbarrieren	31
3.2 Parametrierter Aufbau	31
3.3 Analytische Parameterbestimmung	35
3.3.1 Aufstellung des Reluktanznetzwerkes	36

3.3.2	Berechnung der Elemente im Reluktanznetzwerk	37
3.3.3	Lösung des Reluktanznetzwerkes	41
3.3.4	Bestimmung der Verteilung der magnetischen Spannungen	42
3.3.5	Bestimmung der geometrischen Parameter	43
3.4	Simulative Parameterbestimmung	47
3.4.1	Statorbetrachtung	47
3.4.2	Stator- und Rotorbetrachtung	51
4	Auswirkungen der Werkstoffeigenschaften	57
4.1	Grundlagen der Elektrobleche	57
4.1.1	Grundbegriffe des Magnetismus	57
4.1.2	Ferromagnetismus	58
4.1.3	Einsatz von Elektroblechen	61
4.1.4	Kornorientierung	65
4.1.5	Laminierung	66
4.1.6	Mechanische Beanspruchung	66
4.2	Einfluss der Werkstoffeigenschaften auf das Luftspaltfeld	67
4.2.1	Auswirkung der Laminierung	67
4.2.2	Auswirkung der Kornorientierung	68
4.2.3	Auswirkung der Laminierung und Kornorientierung	69
4.2.4	Untersuchung und Nachbildung der Effekte	70
5	Untersuchung der Verluste	83
5.1	Grundlagen der Verlustberechnung	83
5.1.1	Stromwärmeverluste	83
5.1.2	Eisenverluste	84
5.1.3	Magnetverluste	89
5.2	Bestimmung der Wirbelstromverluste im Stator	92
5.2.1	Analytische Verifizierung der FEM-Simulation	92
5.2.2	FEM-Simulation der Wirbelstromverluste im Stator	94
5.2.3	Verwendung von anisotropem Blechmaterial	102
5.2.4	Verwendung von Blechmaterial mit nicht linearen Eigenschaften	104
5.2.5	Rückwirkung der Wirbelströme im Stator	105
5.2.6	Reduzierung der Wirbelstromverluste im Stator	106
5.2.7	Quantitative Bestimmung der Wirbelstromverluste am Nennpunkt	108
5.3	Untersuchung der Magnetverluste	112
5.3.1	Wirbelströme aufgrund der Nutzungseffekte	113
5.3.2	Wirbelströme aufgrund der Statorharmonischen	114
5.3.3	Reduzierung der Magnetverluste	116
6	Vergleich des Betriebsverhaltens der Flussbarrieren- und Referenzmaschine	117
6.1	FEM-Simulation der Maschinen am Nennpunkt	117
6.1.1	FEM-Simulation der Flussbarrierenmaschine	117
6.1.2	FEM-Simulation der Referenzmaschine	118
6.2	Simulativer Vergleich und Analyse der Maschinen	119
6.3	Zusammenhang zwischen der Flussbarrieren- und Referenzmaschine	124
6.3.1	Harmonische bei reiner Statorstromspeisung	125
6.3.2	Harmonische im Leerlauf	127

6.4	Auswirkungen fertigungsbedingter Ungenauigkeiten	129
6.4.1	Ungleichmäßige Länge der Einzelbleche im Statorzahn	129
6.4.2	Radiale Verschiebung des Rotors	131
6.4.3	Verdrehung der U-Module bei axialer Segmentierung	132
7	Validierung der Flussbarrieren- und Referenzmaschine	135
7.1	Anpassungen der Flussbarrierenmaschine	135
7.1.1	Temperaturrentwicklung	135
7.1.2	Fertigung	136
7.1.3	Auswirkungen des Biegens auf die magnetischen Eigenschaften	137
7.1.4	Alternative innovative Statorgeometrie	138
7.1.5	Zusammenhang zwischen beiden Statorgeometrien	140
7.2	Validierung der Flussbarrierenmaschine am Prüfstand	142
7.2.1	Messung der Flussbarrierenmaschine Version 2	142
7.2.2	Vergleichende FEM-Simulation der Flussbarrierenmaschine Version 2	145
7.3	Validierung der Referenzmaschine	147
7.3.1	Messung der Referenzmaschine	147
7.3.2	Vergleichende FEM-Simulation der Referenzmaschine	149
7.4	Analyse und Vergleich der Maschinen am Prüfstand	151
8	Fazit und Ausblick	155
8.1	Zusammenfassung der Arbeit	155
8.2	Ausblick	157
A	Daten der Maschinen	i
B	Herleitung der Zahnhöhe	iii
C	Matrizen zur Lösung des Reluktanznetzwerkes	v
D	Prüfstandsgeräte	vii
Literatur		ix