

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>XI</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>XIII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation	1
1.2 Stand der Technik	2
1.3 Ziel und Aufbau der Arbeit	3
<b>2 Grundlagen elektrischer Maschinen und Entwurf der Referenzmaschine</b>	<b>7</b>
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
<b>3 Design der innovativen Flussbarrierenmaschine</b>	<b>27</b>
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
<b>4</b>	<b>Auswirkungen der Werkstoffeigenschaften</b>	<b>57</b>
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
<b>5</b>	<b>Untersuchung der Verluste</b>	<b>83</b>
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
<b>6</b>	<b>Vergleich des Betriebsverhaltens der Flussbarrieren- und Referenzmaschine</b>	<b>117</b>
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
<b>7</b>	<b>Validierung der Flussbarrieren- und Referenzmaschine</b>	<b>135</b>
7.1	Anpassungen der Flussbarrierenmaschine . . . . .	135
7.1.1	Temperaturentwicklung . . . . .	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
<b>8</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>155</b>
8.1	Zusammenfassung der Arbeit . . . . .	155
8.2	Ausblick . . . . .	157
<b>A</b>	<b>Daten der Maschinen</b>	<b>i</b>
<b>B</b>	<b>Herleitung der Zahnhöhe</b>	<b>iii</b>
<b>C</b>	<b>Matrizen zur Lösung des Reluktanznetzwerkes</b>	<b>v</b>
<b>D</b>	<b>Prüfstandsgeräte</b>	<b>vii</b>
<b>Literatur</b>		<b>ix</b>