

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Flux-Switching-Maschinen im Kontext der Drehfeldtheorie</b>	<b>4</b>
2.1. Flux-Switching-Maschine . . . . .	4
2.1.1. Bauform . . . . .	4
2.1.2. Intuitives Funktionsprinzip . . . . .	5
2.1.3. Bewertung des Konzeptes der Flux-Switching-Maschine . . . . .	6
2.2. Erweiterung der Drehfeldtheorie um Mehrphasigkeit und harmonische Effekte . . . . .	8
2.2.1. Definition der Wicklungsfunktion . . . . .	10
2.2.2. Herleitung der Felderregerkurve . . . . .	11
2.2.3. Herleitung der Flussverkettung . . . . .	17
2.2.4. Herleitung von harmonischen Induktivitäten . . . . .	18
2.2.5. Prinzip der Drehmomentbildung . . . . .	20
2.2.6. Modulationseffekte durch Stator- und Rotornutung . . . . .	24
2.2.7. Entstehung von Reluktanzmomenten . . . . .	27
2.3. Einordnung der Flux-Switching-Maschine in die Drehfeldtheorie . . . . .	28
2.3.1. Herleitung und Analyse des Erregerfeldes . . . . .	29
2.3.2. Berücksichtigung der Wicklung . . . . .	40
2.3.3. Analyse der Drehmomentbildung . . . . .	44
2.4. Zusammenfassung, Bewertung und weiteres Vorgehen . . . . .	47
<b>3. Wicklungsauslegung für Flux-Switching-Maschinen</b>	<b>48</b>
3.1. Wicklungsauslegung basierend auf dem Nutenstern . . . . .	48
3.1.1. Generelle Wicklungsauslegung anhand des Nutensterns . . . . .	48
3.1.2. Auslegung für Flux-Switching-Maschinen . . . . .	50
3.2. Automatisierte Wicklungsauslegung . . . . .	51
3.2.1. Verketteter Fluss pro Zahnspule . . . . .	52
3.2.2. Festlegung des Schaltschrittes . . . . .	53
3.2.3. Verschaltung der Spulen zu Phasen . . . . .	54
3.2.4. Bewertung des vorgeschlagenen Verfahrens und Implikationen für das weitere Vorgehen . . . . .	58
<b>4. Analytische Rechenverfahren für flussmodulierte Maschinen</b>	<b>59</b>
4.1. Berechnung von relativen Luftspaltleitwerten . . . . .	59
4.2. Analytische und numerische Verfahren . . . . .	63
4.3. Fazit und Auswahl eines Modellierungsansatzes . . . . .	68

<b>5. Entwicklung eines generischen Maschinenmodells</b>	<b>69</b>
5.1. Formulierung von Anforderungen an effizient lösbare Gleichungssysteme	70
5.1.1. Direkte Verfahren	70
5.1.2. Iterative Verfahren	74
5.2. Maxwell-Gleichungen	80
5.3. Entwicklung von generisch erzeugten magnetisch äquivalenten Netzwerken	83
5.3.1. Herleitung von magnetischen Leitwerten	83
5.3.2. Entwicklung eines Algorithmus zur Erzeugung meshbasierter <i>MEC</i>	90
5.3.3. Modellierung von Permanentmagneten	96
5.3.4. Modellierung mehrphasiger Drehstromwicklungen	99
5.3.5. Berücksichtigung von Sättigungseffekten	105
5.4. Modellierung des Luftspalts	111
5.4.1. Formulierungen mithilfe von <i>MEC</i> -Elementen	111
5.4.2. Modellierung über Fourierreihen	124
5.5. Postprocessing	129
5.5.1. Berechnung verketteter Flüsse	129
5.5.2. Berechnung der Luftspaltfelder	129
5.5.3. Methoden zur Berechnung des Drehmoments	131
5.6. Zusammenfassung und Zwischenfazit	133
<b>6. Modellevaluation</b>	<b>135</b>
6.1. Evaluation der Modellvarianten	135
6.1.1. Validierung der Feldlösung	135
6.1.2. Evaluation der Recheneffizienz	139
6.1.3. Festlegung der Modellierungs- und Rechenmethode	141
6.2. Weiterführende Validierung der gewählten Variante	141
6.3. Zwischenfazit	144
<b>7. Topologiestudie unter Anwendung der entwickelten Methoden</b>	<b>145</b>
7.1. Topologieoptimierung	146
7.1.1. Operationalisierung der entwickelten Methoden in einen Ablaufplan	146
7.1.2. Zielfunktion	150
7.1.3. Parametrierung der Geometrie	151
7.1.4. Berücksichtigung thermischer Randbedingungen	153
7.1.5. Auswahl einer Optimierungsmethode	162
7.2. Ergebnisse	164
7.2.1. Dreiphasige Flux-Switching-Maschinen	165
7.2.2. Fünfphasige Flux-Switching-Maschinen	175
7.2.3. Sechphasige Flux-Switching-Maschinen	181
7.2.4. Siebenphasige Flux-Switching-Maschinen	183
7.2.5. Flux-Switching-Maschinen mit 9,10,11 und 12 Phasen	187
<b>8. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>192</b>

<b>A. Mathematischer Anhang</b>	<b>195</b>
A.1. Beweis der Reihe von Sinus- und Kosinusthermen . . . . .	195
A.2. Beweis der Integration über Kosinusprodukte . . . . .	196
A.3. Fourierreihe 1 . . . . .	197
A.4. Fourierreihe 2 . . . . .	198
<b>B. Zur Berechnung magnetischer Widerstände</b>	<b>200</b>
<b>C. Wicklungen mehrphasiger Flux-Switching-Maschinen</b>	<b>201</b>
C.1. Dreiphasige Wicklungen . . . . .	201
C.2. Fünfphasige Wicklungen . . . . .	206
C.3. Sechs- und Siebenphasige Wicklungen . . . . .	210
<b>D. Bild Anhang</b>	<b>215</b>
D.1. Zur Synthese von Flux-Switching-Maschinen in die Drehfeldtheorie . .	215
<b>Symbole und Abkürzungen</b>	<b>219</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>229</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>233</b>
<b>Literatur</b>	<b>235</b>