



Christian Heister (Autor)

# Effiziente Methoden zur Auslegung und Berechnung mehrphasiger flussmodulierter elektrischer Maschinen am Beispiel der Flux-Switching-Maschine

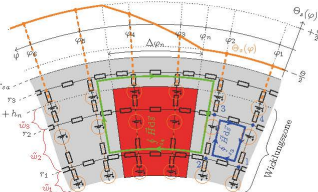
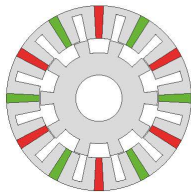


Technische  
Universität  
Braunschweig

**IMAB** Institut für Elektrische Maschinen,  
Antriebe und Bahnen  
TU Braunschweig

Christian Heister

Effiziente Methoden zur Auslegung und  
Berechnung mehrphasiger flussmodulierter  
elektrischer Maschinen am Beispiel der  
Flux-Switching-Maschine



Cuvillier Verlag Göttingen  
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/8562>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,  
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

# 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 Nutzenstern . . . . .	48
3.1.1. Generelle Wicklungsauslegung anhand des Nutzensterns . . . . .	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. Sechshephasige 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>