

**Modellbildung einer  
Transversalfussmaschine für die  
stationäre und dynamische Simulation**

**Von der Fakultät Informatik, Elektrotechnik  
und Informationstechnik der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines Doktor–Ingenieurs (Dr.–Ing.)  
genehmigte Abhandlung**

**Vorgelegt von  
Manuel Gärtner  
aus Backnang**

**Hauptberichterin: Prof. Dr.–Ing.  
Nejila Parspour**  
**Mitberichter: Univ.–Prof. Dr.–Ing. habil. Dr. h.c.  
Kay Hameyer**

**Tag der mündlichen Prüfung: 28.04.2014**

**Institut für Elektrische Energiewandlung  
der Universität Stuttgart**

**2014**



Berichte aus dem Institut für Elektrische Energiewandlung

Band 2

**Manuel Gärtner**

**Modellbildung einer Transversalflussmaschine  
für die stationäre und dynamische Simulation**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag  
Aachen 2014

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2014

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3038-9

ISSN 2196-9213

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>XXXV</b>
<b>Abstract</b>	<b>XXXIX</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Vorbetrachtungen</b>	<b>5</b>
2.1. Modelle für elektrische Maschinen und ihre Anwendung . . . . .	5
2.1.1. Simulation des dynamischen Verhaltens unter Verwendung des ESB . . . . .	5
2.1.2. Untersuchung des stationären Verhaltens durch Erstellung eines magnetisch äquivalenten Kreises . . . . .	6
2.1.3. Untersuchung des stationären Verhaltens mit einer Finite-Elemente-Simulation . . . . .	7
2.1.4. Lineare Zerlegung des gebildeten Drehmoments in Nutzmoment, Rastmoment und Reluktanzmoment . . . . .	9
2.1.5. Dynamisches Simulationsmodell einer permanentmagnetisch erregten Transversalflussmaschine auf Basis von Ergebnissen einer Finite-Elemente-Simulation . . . . .	10
2.1.6. Schlussfolgerungen aus den Eigenschaften der vorgestellten Modelle . . . . .	15
2.2. Grundlagen für die Analyse von elektrischen Maschinen . . . . .	15
2.2.1. Reluktanz-Widerstands-Analogie . . . . .	16
2.2.2. Modellierung von Permanentmagneten im magnetisch äquivalenten Kreis . . . . .	17
2.2.3. Permeanz-Kapazitäts-Analogie . . . . .	20
2.2.4. Flussröhren – Möglichkeiten zur Modellierung von Luftspalten in magnetischen Kreisen . . . . .	29

2.2.5.	Maxwellsche Kraft in magnetischen, teilweise gesättigten Kreisen mit mehreren Quellen . . . . .	32
2.3.	Aufbau und Funktion von Transversalflussmaschinen . . . . .	34
2.3.1.	Aufbau . . . . .	34
2.3.2.	Funktion einer permanentmagnetisch erregten Transversalflussmaschine – Analogie zur Synchronmaschine . . . . .	35
2.3.3.	Funktion einer permanentmagnetisch erregten Transversalflussmaschine – Analogie zum elektronisch kommutierten Motor . . . . .	37
2.3.4.	Funktion einer Reluktanz-Transversalflussmaschine . . . . .	38
2.3.5.	Vorteile von Transversalflussmaschinen . . . . .	38
2.4.	Klassifikation bekannter Topologien von Transversalflussmaschinen . . . . .	40
2.4.1.	Unterscheidungsmerkmale . . . . .	41
2.4.2.	Besonderheiten bei linearen Transversalflussmaschinen . . . . .	43
<b>3.</b>	<b>Die lineare TFM mit PM in Sammleranordnung</b> . . . . .	<b>45</b>
3.1.	Topologie . . . . .	45
3.2.	Analytische Modellierung . . . . .	47
3.2.1.	Geometrie der zu modellierenden Transversalflussmaschine . . . . .	47
3.2.2.	Modellierung des magnetischen Kreises als magnetisch äquivalenter Kreis . . . . .	48
3.2.3.	Transformation des magnetisch äquivalenten Kreises in ein Gyrtator-Kapazitäts-Modell . . . . .	67
3.3.	Der Prototyp . . . . .	67
3.3.1.	Zielsetzung bei der Konstruktion . . . . .	67
3.3.2.	Mechanischer Aufbau . . . . .	68
<b>4.</b>	<b>Regelung</b> . . . . .	<b>73</b>
4.1.	Topologie des RRG . . . . .	75
4.2.	Physikalisches Modell . . . . .	76
4.2.1.	Elektrischer Teil der Regelstrecke . . . . .	76
4.2.2.	Mechanischer Teil der Regelstrecke . . . . .	80
4.3.	Drehmomentregelung . . . . .	81
4.4.	Drehmomentverteilung . . . . .	82
4.5.	Drehzahlregelung . . . . .	89
4.6.	Drehzahlbeobachtung . . . . .	93
4.7.	Lageregelung . . . . .	94
4.8.	Realisierung . . . . .	96
4.9.	Weitere Regelungsverfahren . . . . .	98
4.9.1.	Inverse LUT . . . . .	98

4.9.2. Parameteridentifikation . . . . .	99
<b>5. Messungen und Ergebnisse</b>	<b>101</b>
5.1. Kraftkennfeld . . . . .	101
5.1.1. Gyrtor-Kapazitäts-Modell . . . . .	101
5.1.2. 3-dimensionale Finite-Elemente-Methode . . . . .	102
5.1.3. Messung . . . . .	104
5.1.4. Schlussfolgerungen und Anwendung . . . . .	105
5.2. Positioniervorgang . . . . .	109
5.2.1. Vorstellung der Ergebnisse . . . . .	109
5.2.2. Beurteilung der GyCap-Ergebnisse . . . . .	110
5.2.3. Beurteilung der Regelungsergebnisse . . . . .	111
<b>6. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>115</b>
<b>A. Maxwellische Kraft</b>	<b>119</b>
A.1. Mathematische Herleitung . . . . .	120
A.1.1. Grundgleichungen . . . . .	120
A.1.2. Energieerhaltungsansatz . . . . .	122
A.1.3. Magnetische gespeicherte Energie . . . . .	124
A.1.4. Mechanisch abgegebene Energie . . . . .	126
A.1.5. Magnetische Koenergie . . . . .	129
A.1.6. Allgemeine Darstellung der Maxwellischen Kraft . . . . .	131
A.2. Grafische Veranschaulichung . . . . .	132
A.3. Interpretation des Ergebnisses . . . . .	137
<b>B. Flussröhrenpermeanzen der LTFPM</b>	<b>139</b>
B.1. Positionen mit Veränderung der Flussröhrenkonstellation . . . . .	141
B.2. Bestimmung der Permeanzen . . . . .	153
B.2.1. Für $0 \leq x \leq x_a$ . . . . .	153
B.2.2. Für $x_a \leq x \leq x_b$ . . . . .	155
B.2.3. Für $x_b \leq x \leq x_c$ . . . . .	156
B.2.4. Für $x_c \leq x \leq x_d$ . . . . .	157
B.2.5. Für $x_d \leq x \leq x_e$ . . . . .	160
B.2.6. Für $x_e \leq x \leq x_f$ . . . . .	161
B.2.7. Für $x_f \leq x \leq x_g$ . . . . .	162
B.2.8. Für $x_g \leq x \leq x_h$ . . . . .	162
B.2.9. Für $x_h \leq x < \infty$ . . . . .	163

<b>C. Topologien von Transversalflussmaschinen</b>	<b>165</b>
C.1. Transversalfluss-Reluktanzmaschinen . . . . .	165
C.2. TFPM mit Oberflächen-PM . . . . .	166
C.3. TFPM mit PM in Sammleranordnung . . . . .	168
C.3.1. Dreidimensionale Flussführung im Stator . . . . .	170
C.3.2. Zweidimensionale Flussführung mit einseitigem Stator . . . . .	170
C.3.3. Zweidimensionale Flussführung im doppelseitigen Stator . . . . .	171
<b>D. Ergänzungen zum implementierten Regelungssystem</b>	<b>173</b>
D.1. Normierung . . . . .	173
D.2. Parameter . . . . .	176
<b>E. Fertigungskonzept für eine rotierende Transversalflussmaschine</b>	<b>181</b>
E.1. Stand der Technik/bisherige Lösungsansätze für die Flussführung . . . . .	182
E.1.1. Lösungen mit weichmagnetischen Pulververbundwerkstoffen . . . . .	182
E.1.2. Lösungen mit geblechten Komponenten . . . . .	183
E.2. Lösungsvorschlag . . . . .	190
E.2.1. Randbedingungen . . . . .	190
E.2.2. Grundidee und prinzipielle Anordnung . . . . .	190
E.2.3. Möglichkeiten zur Realisierung verschiedener Topologien . . . . .	192
E.3. Vor- und Nachteile des neuen Blechungskonzepts . . . . .	193
<b>F. Kennzahlen für elektrische Maschinen</b>	<b>197</b>
F.1. In der Literatur übliche Kennzahlen . . . . .	198
F.1.1. Leistungsdichte bezogen auf Volumen/Masse . . . . .	198
F.1.2. Drehmomentdichte bezogen auf Volumen/Masse . . . . .	199
F.1.3. Mittlerer Flächenschub . . . . .	199
F.1.4. Esson'sche Zahl . . . . .	201
F.1.5. Wirkungsgrad im Nennpunkt . . . . .	201
F.2. Einführung weiterer aussagekräftiger Kennzahlen . . . . .	202
F.2.1. Wirkungsgrad im gesamten Betriebsbereich . . . . .	202
F.2.2. Drehmoment bezogen auf Läufer-Massenträgheitsmoment . . . . .	203
F.3. Einordnung der Prototypen . . . . .	205
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>211</b>