

Analytische Berechnung  
Geschalteter Reluktanzmaschinen

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Universität der Bundeswehr München

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur  
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Berthold Schinnerl



Neubiberg

2009

Vorsitzender:	Prof. Dr. rer. nat. Konrad Pilzweger
erster Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling
zweiter Berichterstatter:	Prof. DI Dr. sc. techn. Wolfgang Amrhein
Tag der Promotion:	07.07.2009

Forschungsberichte Elektrische Antriebstechnik und Aktorik

Band 5

**Berthold Schinnerl**

**Analytische Berechnung  
Geschalteter Reluktanzmaschinen**

Shaker Verlag  
Aachen 2009

**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.: München, Univ. der Bundeswehr, Diss., 2009

Copyright Shaker Verlag 2009

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8411-4

ISSN 1863-0707

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)

## **Vorwort**

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling danke ich für seine großartige Arbeitsauffassung und Organisation im Institut. Weiterhin danke ich für die jederzeit mögliche Ansprechbereitschaft und Diskussionsbereitschaft, sowie der uneingeschränkten Unterstützung.

Für die Mitherrichterstattung und die damit verbundene intensive Durchsicht der Arbeit danke ich Herrn Prof. DI Dr. sc. techn. Wolfgang Amrhein von der Johannes Kepler Universität, Linz.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. Konrad Pilzweger danke ich ganz herzlich für die Übernahme des Vorsitzes des Promotionsausschusses. Er hat durch die Vorlesung der Höheren Mathematik das mathematische Grundwissen in exzellenter Weise vermittelt.

Besonderer Dank gilt auch meinem Kollegen Dr.-Ing. Hans-Joachim Köbler. Herrn Dr.-Ing. Harald Hofmann spreche ich höchstes Lob und Anerkennung für sein kollegiales Verhalten aus.

Herrn Dipl.-Ing. Ulf Kreuzer und Herrn Dipl.-Ing. Lukas Lambertz danke ich für das Querlesen meiner Arbeit.

Berthold Schinnerl



1	Einleitung.....	8
1.1	Motivation der Arbeit.....	8
1.2	Struktureller Überblick.....	9
2	Charakteristik und theoretische Grundlagen der GRM.....	11
2.1	Aufbau.....	11
2.2	Funktionsprinzip.....	12
2.3	Modell der GRM.....	14
2.4	Eigenschaften und Anwendungsgebiete der GRM.....	20
3	Maschinenentwurf.....	22
3.1	GRM als Kraftstoffpumpenantrieb .....	22
3.2	Anforderung Kraftstoffpumpe .....	22
3.3	Vorbereitung.....	23
3.4	Auslegung.....	26
3.4.1	GRM 1.....	26
3.4.2	GRM 2.....	33
3.4.3	GRM A.....	36
3.4.4	GRM B.....	39
3.5	Kühlung .....	42
3.6	Maschinenvergleich .....	46
3.7	Bewertung.....	50
4	Wicklungsfehler.....	53
4.1	Windungskurzschlüsse allgemein.....	54
4.2	Analytische Betrachtung der Windungskurzschlüsse .....	58
4.2.1	Kurzschluss in 1..N Windungen einer Spule .....	62
4.2.2	Kurzschluss einer gesamten Spule.....	67
4.2.3	Kurzschluss eines Stranges.....	68
4.2.4	Kurzschluss zwischen zwei Spulen unterschiedlicher Stränge .....	70
4.2.5	Massschluss in einer Spule .....	88
4.3	Betrieb bei zwei intakten Phasen.....	91
4.4	Bewertung.....	93
5	Bestimmung der magnetischen Flussverkettung.....	95
5.1	Messung der $\psi$ -i-Kennlinie .....	95
5.1.1	Messung mit sinusförmiger Wechselspannung.....	96
5.1.2	Messung durch Spannungssprung .....	96
5.2	FEM-Berechnung.....	97
5.3	Analytische Berechnung.....	99
5.3.1	Vergleich existierender analytischer Ansätze.....	99
5.3.2	Modell 1 .....	99
5.3.3	Beurteilung Modell 1.....	100
5.3.4	Modell 2 .....	102
5.3.5	Beurteilung Modell 2.....	103
5.3.6	Modell 3 .....	105
5.3.7	Berechnung und Beurteilung Modell 3.....	106
5.3.8	Modell 4 .....	107
5.3.9	Modell 5 .....	110

5.3.10	Berechnung und Beurteilung Modell 5.....	115
5.3.11	Modell 6 .....	116
5.3.12	Berechnung und Beurteilung des Modell 6 .....	120
5.3.13	Bewertung .....	124
6	Neue Analytische Berechnung .....	125
<b>6.1</b>	<b>Stirnseiten .....</b>	<b>125</b>
6.1.1	Quersfeldstellung .....	125
6.1.2	Berechnung des vorgestellten Modells.....	127
6.1.2.1	Allgemeine Herleitung.....	127
6.1.2.2	Berechnung der Teilbereiche .....	129
6.1.2.3	Bereich 1.....	131
6.1.2.4	Bereich 2.....	133
6.1.2.5	Bereich 3.....	135
6.1.2.6	Gesamtbereich .....	137
6.1.3	Rotorpositionen mit nicht überlappenden Zähnen.....	137
6.1.4	Bewertung .....	139
<b>6.2</b>	<b>Berechnung der Flussverkettung in der d-Stellung.....</b>	<b>141</b>
6.2.1	Der magnetische Kreis in einer GRM.....	141
6.2.2	Grundlagen zur Berechnung des magnetischen Kreises .....	143
6.2.3	Angewandte Berechnung.....	144
6.2.4	Neue Funktion zur Beschreibung der $\psi$ -i-Kennlinie .....	150
<b>6.3</b>	<b>Berechnung der Flussverkettung in der q-Stellung.....</b>	<b>156</b>
6.3.1	Berechnungsmethoden.....	157
6.3.2	Krishnan*.....	157
6.3.3	Rafajdus*.....	158
6.3.4	Luft 1*.....	158
6.3.5	Luft 2*.....	159
6.3.6	FEM 2D und FEM 2D*.....	160
6.3.7	Berechnungsergebnisse .....	160
<b>6.4</b>	<b>Bewertung.....</b>	<b>163</b>
7	Berechnung des Drehmomentes.....	164
7.1	Berechnung des Drehmomentes mittels FEM.....	167
7.2	Analytische Berechnung des Drehmomentes .....	167
7.3	Drehmoment der SRM 300 .....	175
7.4	Durchschnittliches Drehmoment.....	182
7.5	Vergleich mit Software SPEED .....	184
7.6	Bewertung der Drehmomentberechnung .....	184
8	Berechnung des Drehmomentes II .....	185
8.1	Charakteristik des Drehmomentes einer GRM .....	185
8.2	Analytische Berechnung der magnetischen Flussverkettung .....	189
8.3	Drehmomentberechnung.....	201
8.4	Bewertung der Drehmomentberechnung II .....	213
	Zusammenfassung .....	215
	Literaturverzeichnis.....	217