Technische Universität Kaiserslautern
Lehrstuhl für Mechatronik und elektrische Antriebssysteme

Optimierter Entwurf hocheffizienter PM-Spaltrohrmotoren für Pumpenapplikationen

Dipl.-Ing. Yves Burkhardt
geboren in Trier

Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

Kaiserslautern, 2011
D 386

Datum der mündlichen Prüfung:	20.07.2011
1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. G. Huth
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. W. Freise
Prüfungsvorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Wolfram H. Wellßow
Dekan des Fachbereichs:	Prof. Dr.-Ing. Norbert Wehn

Kaiserslauterer Beiträge zur Antriebstechnik

Band 5

Yves Burkhardt

**Optimierter Entwurf hocheffizienter
PM-Spaltrohrmotoren für Pumpenapplikationen**

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

Shaker Verlag
Aachen 2011

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.: Kaiserslautern, TU, Diss., 2011

Copyright Shaker Verlag 2011

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0418-2

ISSN 1866-5357

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Diese Arbeit ist das Resultat meiner dreijährigen Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mechatronik und elektrische Antriebssysteme der Technischen Universität Kaiserslautern.

Daher möchte ich zunächst Herrn Prof. Dr. Gerhard Huth für die Ermöglichung dieser Arbeit, für die stets inspirierende und offene Diskussionsbereitschaft sowie für die Betreuung der Arbeit danken.

Herrn Prof. Dr. Dr. E.h. Werner Freise danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens und die damit verbundene inhaltliche Auseinandersetzung mit dieser Arbeit. Ebenso bin ich für die vielen Anregungen und interessanten Diskussionen während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter dankbar. Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr. Wolfram Wellßow für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Die Arbeit wurde durch die Finanzierung eines Forschungsvorhabens von der KSB AG ermöglicht. Dafür möchte ich mich herzlich bedanken, im Speziellen bei Herrn Dr. Sven Urschel und Herrn Ernst Graf für stets hilfreiche Ratschläge und konstruktive Unterstützung.

Meinen Kollegen am Lehrstuhl gilt mein Dank für die sehr angenehme Arbeitsatmosphäre und die vielen auch fachübergreifenden Diskussionen, die sehr das Verständnis gefördert haben und teilweise direkt zu neuen Lösungsansätzen führten. Besonders danke ich Herrn Dr. Peter Greilach für die Bereitschaft, sein umfassendes Fachwissen in vielen lehrreichen und inspirierenden Diskussionen zu teilen.

Abschließend möchte ich mich herzlich bei meinen Eltern für die kontinuierliche und umfassende Unterstützung in jeglicher Hinsicht bedanken, wodurch mir dieser Weg erst ermöglicht wurde. Mein besonderer Dank gilt Susanne, die immer für mich da ist.

Vielen Dank.

Erlangen, im August 2011

Yves Burkhardt

Inhalt

INHALT	I
VERWENDETE FORMELZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN	III
1 EINLEITUNG.....	1
1.1 GRUNDLAGEN DER SPALTROHRMOTORPUMPE	3
1.2 ZIELSETZUNG DER ARBEIT	6
2 KONZEPTE FÜR PM-SPALTROHRMOTOREN	7
2.1 AUSFÜHRUNG DES PM-SPALTROHRMOTORS MIT AM LUFTSPALT LIEGENDEN SE-MAGNETEN	7
2.2 AUSFÜHRUNG DES PM-SPALTROHRMOTORS MIT VERGRABENEN SE-MAGNETEN	9
2.3 AUSFÜHRUNG DES PM-SPALTROHRMOTORS MIT VERGRABENEN FERRITMAGNETEN	11
2.4 MÖGLICHE SPALTROHRAUSFÜHRUNGEN FÜR STÄNDER UND LÄUFER	13
3 BERECHNUNGSGRUNDLAGEN FÜR PM-SPALTROHRMOTOREN	15
3.1 BESCHREIBUNG DES BETRIEBSVERHALTENS IM FELDORIENTIERTEN BETRIEB	17
3.1.1 <i>Analytischer Ansatz zur Bestimmung des Luftspaltfeldes</i>	17
3.1.2 <i>Betrachtung des stationären Betriebsverhaltens bei Vollpolverhalten</i>	22
3.1.3 <i>Betrachtung des stationären Betriebsverhaltens bei ausgeprägtem Reluktanzanteil</i>	23
3.2 BERECHNUNG MOTORTYPISCHER VERLUSTLEISTUNGEN	24
3.3 BERECHNUNG VON SPALTROHRVERLUSTEN	27
3.3.1 <i>Analytisches Modell zur Verlustberechnung</i>	27
3.3.2 <i>Verlustberechnung mittels FEM-Simulation</i>	30
4 UNTERSUCHUNG DES THERMISCHEN VERHALTENS DES SPALTROHRMOTORS	35
4.1 HERLEITUNG EINES ANALYTISCHEN MODELLS	35
4.1.1 <i>Modell und Ersatzschaltbild</i>	35
4.1.2 <i>Bestimmung der Ersatzelemente des thermischen Netzes</i>	38
4.1.3 <i>Berechnung des stationären Zustands</i>	44
4.2 MODELLVERIFIKATION MITTELS FEM-SIMULATION	46
5 SPALTROHRMOTOREN MIT AM LUFTSPALT ANGEORDNETEN SE-MAGNETEN	49
5.1 MODELLIERUNG UND SIMULATION DES STATIONÄREN BETRIEBSVERHALTENS	49
5.2 AUSLEGUNG DER FUNKTIONSMUSTER	55
5.2.1 <i>Aufbau eines Baukastensystems</i>	55
5.2.2 <i>Auslegung des Funktionsmusters mit Zahnspulenwicklung</i>	55
5.2.3 <i>Auslegung des Funktionsmusters mit verteilter Wicklung</i>	63

5.2.4	Überblick Funktionsmuster	65
5.3	ERPROBUNG DER FUNKTIONSMUSTER IM VERGLEICH ZU SIMULATIONSERGEBNISSEN	70
5.3.1	Beschreibung des Versuchsaufbaus	70
5.3.2	Erprobung im direkten Vergleich zur Simulation	71
5.3.3	Identifikation und Analyse von Parameterabhängigkeiten	78
6	SPALTROHRMOTOREN MIT VERGRABENEN SE-MAGNETEN	85
6.1	MODELLIERUNG UND SIMULATION DES STATIONÄREN BETRIEBSVERHALTENS	85
6.2	AUSLEGUNG DER FUNKTIONSMUSTER	85
6.2.1	Ergänzung des Funktionsmusterbaukastens	85
6.2.2	Auslegung des IPM-Rotors	86
6.3	ERPROBUNG DER FUNKTIONSMUSTER IM VERGLEICH ZU SIMULATIONSERGEBNISSEN UND SMPM-AUSFÜHRUNGEN	91
6.3.1	Erprobung im direkten Vergleich zu SMPM-Funktionsmustern	91
6.3.2	Identifikation und Analyse von Parameterabhängigkeiten	95
6.3.3	Geräuschentwicklung	99
7	SPALTROHRMOTOREN MIT VERGRABENEN FERRITMAGNETEN	111
7.1	MOTIVATION ZUR BETRACHTUNG VON FERRITMAGNETEN	111
7.2	OPTIMIERTE AUSLEGUNG EINES FUNKTIONSMUSTERS	112
7.2.1	Problematik beim Einsatz von Ferritmagneten	112
7.2.2	Beschreibung des Funktionsmusters	117
7.2.3	Konkrete Auslegung des Funktionsmusters	123
7.3	ERPROBUNG DES FUNKTIONSMUSTERS IM VERGLEICH ZU SIMULATIONSERGEBNISSEN	129
7.3.1	Erprobung im direkten Vergleich zur Simulation	129
7.3.2	Messtechnische Bestimmung des optimalen Bestromungswinkels	129
7.3.3	Identifikation und Analyse von Parameterabhängigkeiten	137
8	DREIECKSCHALTUNG DER STÄNDERWICKLUNG IM VERGLEICH ZUR STERNSCHALTUNG	142
8.1	HINTERGRUND	142
8.2	BETRIEB BEI DREIECKSCHALTUNG	142
8.3	SIMULATION DER Δ -SCHALTUNG AN EINEM KONKRETEN BEISPIEL IM VERGLEICH ZUR MESSUNG	148
9	KONZEPTVERGLEICH	150
9.1	GEGENÜBERSTELLUNG DER FUNKTIONSMUSTER	150
9.2	WICKLUNGSKONZEPTE UND ROTORAUSFÜHRUNGEN	151
9.3	MAGNETTECHNIK	152
10	AUSLEGUNGSRICHTLINIEN FÜR PM-SPALTROHRMOTOREN	156
11	ZUSAMMENFASSUNG	161
A.	ANHANG	163
	LITERATURVERZEICHNIS	165