

Technische Universität Kaiserslautern  
Lehrstuhl für Mechatronik und elektrische Antriebssysteme

# **Entwurfskriterien für permanentmagneterregte Synchronmaschinen in Zahnpulentechnik unter besonderer Berücksichtigung der Zusatzverluste**

Dipl.-Ing. Michael Scheidt  
geboren in Ottweiler

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

Kaiserslautern, 2009

D 386

Datum der mündlichen Prüfung: 26.05.2009

1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. G. Huth

2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. W. Freise

Prüfungsvorsitzender: Prof. Dr.-Ing. P. Weiß

Dekan des Fachbereichs: Prof. Dipl.-Ing. Dr. Gerhard Fohler



Kaiserslauterer Beiträge zur Antriebstechnik

Band 3

**Michael Scheidt**

**Entwurfskriterien für permanentmagneterregte  
Synchronmaschinen in Zahnpulentechnik unter  
besonderer Berücksichtigung der Zusatzverluste**

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

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.: Kaiserslautern, TU, 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 978-3-8322-8396-4

ISSN 1866-5357

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**

Diese Arbeit entstand während meiner dreijährigen Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mechatronik und elektrische Antriebstechnik der TU Kaiserslautern.

Herrn Prof. Dr. Gerhard Huth, der mir die Möglichkeit gab in seiner Arbeitsgruppe diese Arbeit zu verfassen, möchte ich für die ständige Diskussionsbereitschaft, die wertvollen Anregungen und die Betreuung der Arbeit danken.

Herrn Prof. Dr. Dr. E.h. Werner Freise danke ich für die Übernahme des Koreferats und die intensive Auseinandersetzung mit dieser Dissertation. Ebenfalls danke ich Prof. Dr. Paul Weiß für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Diese Arbeit wurde durch die Förderung durch die Siemens AG in Berlin ermöglicht. Insbesondere möchte ich hier Dr. Axel Möhle danken.

Allen Kollegen, die mit mir gearbeitet haben, danke ich für die angenehme Atmosphäre, sowie die vielen erkenntnisfördernden und manchmal auch nur unterhaltsamen Diskussionen. Besonders hervorheben möchte ich dabei Dr. Markus Reinhard und Dr. Sven Urschel.

Meiner Familie danke ich für die Unterstützung in allen Belangen, um mir diesen Weg zu ermöglichen. Insbesondere gilt mein Dank Judith, die immer für mich da ist. Vielen Dank.



## Inhalt

FORMELZEICHEN .....	III
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2 AUFBAU DER PERMANENTMAGNETERREGTEN SYNCHRON-MASCHINE .....</b>	<b>3</b>
2.1 STÄNDERAUFBAU.....	3
2.2 LÄUFERAUFBAU .....	4
2.3 FELDORIENTIERT BETRIEBENE PERMANENTMAGNETERREGTE SYNCHRONMASCHINE .....	6
<b>3 SYSTEMATIK DER ZAHNSPULENTECHNIK .....</b>	<b>7</b>
3.1 EIGENSCHAFTEN DER ZAHNSPULENWICKLUNG.....	7
3.2 ABLEITUNG DER ZAHNSPULENWICKLUNG AUS DER ALLGEMEINEN BRÜCHLOCHWICKLUNG.....	8
3.3 SYSTEMATIK DER ZAHNSPULENWICKLUNG UND ANALYTISCHE BESCHREIBUNG .....	11
3.3.1 <i>Systematik der Zweischicht-Zahnpulenkwicklung</i> .....	11
3.3.2 <i>Analytische Beschreibung der Zweischicht-Zahnpulenkwicklung</i> .....	17
3.3.3 <i>Systematik der Einschicht-Zahnpulenkwicklung</i> .....	20
3.3.4 <i>Analytische Beschreibung der Einschicht-Zahnpulenkwicklung</i> .....	22
3.4 ZWISCHENZAHNTECHNIK .....	25
3.4.1 <i>Einführung in die Zwischenzahntechnik</i> .....	25
3.4.2 <i>Auslegung von Zahnpulenkwicklungen mit Zwischenzahntechnik</i> .....	25
<b>4 MODELLIERUNG DES STATIONÄREN BETRIEBSVERHALTENS .....</b>	<b>27</b>
4.1 SPANNUNGSGLEICHUNG IM STATIONÄREN BETRIEB .....	27
4.2 STÄNDERSTRANGWIDERSTAND .....	28
4.3 DREHFELDINDUKTIVITÄT.....	29
4.3.1 <i>Luftspaltinduktivität</i> .....	29
4.3.2 <i>Nutstreuinduktivität</i> .....	31
4.3.3 <i>Stirnstreuinduktivität</i> .....	33
4.4 POLRADSPANNUNG.....	33
4.5 INNERES DREHMOMENT UND STATIONÄRE DREHZAHN-DREHMOMENT-KENNLINIE .....	34

<b>5</b>	<b>ANALYTISCHE BESTIMMUNG DES PERMANENTMAGNETERREGTEN LUFTSPALTFELDES .....</b>	<b>37</b>
5.1	PERMANENTMAGNETERREGTES LUFTSPALTFELD BEI GLATTER STÄNDERBOHRUNGSOBERFLÄCHE .....	37
5.2	BERÜCKSICHTIGUNG DER STÄNDERNUTUNG .....	40
5.3	BERÜCKSICHTIGUNG DER STÄNDERNUTUNG BEI ZWISCHENZAHNTECHNIK .....	43
<b>6</b>	<b>BETRACHTUNG DER VERLUSTE .....</b>	<b>48</b>
6.1	STROMWÄRMEVERLUSTE .....	48
6.2	UMMAGNETISIERUNGSVERLUSTE IM STÄNDER .....	49
6.3	REIBUNGSVERLUSTE .....	50
6.4	WIRBELSTROMVERLUSTE IN DEN PERMANENTMAGNETEN DES ROTORS .....	52
6.4.1	<i>Analytische Berechnung</i> .....	52
6.4.2	<i>Numerische Berechnung</i> .....	59
<b>7</b>	<b>BETRACHTUNG VON PARASITÄREFFEKTEN .....</b>	<b>63</b>
7.1	NUTRASTMOMENTE .....	63
7.2	LASTABHÄNGIGE PENDELMOMENTE .....	66
<b>8</b>	<b>BESCHREIBUNG DER STUDIENOBJEKTE .....</b>	<b>69</b>
8.1	BESCHREIBUNG DER AUSGEWÄHLTEN MASCHINE UND ABLEITUNG VON PARAMETERVARIANTEN .....	69
8.2	UMBAU DES STUDIENOBJEKTES ZUM FUNKTIONSMUSTER .....	72
<b>9</b>	<b>DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE UND ABLEITUNG VON AUSLEGUNGSKRITERIEN .....</b>	<b>74</b>
9.1	SIMULATIONSTECHNISCHE UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DER NUTÖFFNUNG AUF DAS STATIONÄRE DREHMOMENT .....	74
9.1.1	<i>Einfluss eines magnetisch leitfähigen Nutverschlusskeiles</i> .....	74
9.1.2	<i>Einfluss der Geometrie des Nutschlitzes</i> .....	77
9.2	WIRBELSTROMVERLUSTE .....	83
9.2.1	<i>Vorbetrachtung</i> .....	83
9.2.2	<i>Messung der Wirbelstromverluste</i> .....	83
9.2.3	<i>Überprüfung der Parameterabhängigkeit der Wirbelstromverluste in den Permanentmagneten durch FEM Rechnungen</i> .....	89
9.2.4	<i>Zusammenfassende Übersicht der Wirbelstromberechnung in den Permanentmagneten</i> .....	98
9.3	NUTRASTMOMENTE .....	99
9.4	LASTABHÄNGIGE PENDELMOMENTE .....	102
9.5	STATIONÄRES BETRIEBSVERHALTEN DES STUDIENOBJEKTES .....	106
9.5.1	<i>Programm zur analytischen Simulation des stationären Betriebsverhaltens</i> .....	106
9.5.2	<i>Vergleichende Auslegung des Studienobjektes mit verteilter Wicklung</i> .....	108
9.6	ZUSAMMENFASSUNG DER AUSLEGUNGSKRITERIEN .....	113
<b>10</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>116</b>
<b>A</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>118</b>
A.1	MASCHINENDATEN .....	118
	<b>LITERATUR .....</b>	<b>120</b>