

**Beitrag zur Analyse elektrischer Antriebssysteme mit  
toleranzbehafteten Komponenten:  
Vom elektromagnetischen Entwurf bis zur End-of-Line  
Prüfung**

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen  
zur Erlangung des akademischen Grades einer Doktorin  
der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Ingenieurin  
Isabel Coenen  
aus Rheinberg

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Kay Hameyer  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Doppelbauer

Tag der mündlichen Prüfung: 13. November 2014



Aachener Schriftenreihe zur  
Elektromagnetischen Energiewandlung

Band 18

**Isabel Coenen**

**Beitrag zur Analyse elektrischer Antriebssysteme  
mit toleranzbehafteten Komponenten:  
Vom elektromagnetischen Entwurf  
bis zur End-of-Line Prüfung**

Shaker Verlag  
Aachen 2015

### **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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2014)

### **Aachener Schriftenreihe zur Elektromagnetischen Energiewandlung**

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Kay Hameyer  
Institut für Elektrische Maschinen  
RWTH Aachen  
52056 Aachen

Copyright Shaker Verlag 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3564-3

ISSN 1861-3799

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)

# Danksagung

An erster Stelle gilt mein besonderer Dank Herrn Prof. Hameyer für die fachliche und persönliche Betreuung meiner Arbeit am Institut für Elektrische Maschinen (IEM) der RWTH Aachen. Seine langjährige fördernde Unterstützung beginnend bei meiner Hiwitätigkeit, über die Diplomarbeit bis hin zu der vorliegenden Dissertationsschrift weiß ich sehr zu schätzen.

Das Thema dieser Arbeit ist im Laufe des vom BMWi geförderten Projektes „Autonome Antriebstechnik durch Sensorfusion für die intelligente, simulationsbasierte Überwachung & Steuerung von Produktionsanlagen“ (AutASS) entstanden. Ich bedanke mich beim BMWi als Förderer, beim DLR als Projektträger und bei den im Konsortium beteiligten Firmen und Forschungseinrichtungen HANNING ELEKTRO-WERKE GmbH & Co.KG (Konsortialführer), Fraunhofer IIS/EAS Dresden, inIT der Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Interroll Trommelmotoren GmbH, InTraCom Group, KAT der Universität Paderborn.

Einige Inhalte dieser Arbeit gingen zudem aus einem Industrieprojekt mit der Robert Bosch GmbH hervor. Für die gute und interessante Zusammenarbeit bedanke ich mich bei allen Beteiligten.

Ich bedanke mich herzlich bei Herrn Prof. Doppelbauer vom Elektrotechnischen Institut des Karlsruher Instituts für Technologie für die engagierte Übernahme des Korerferats und das Interesse an meiner Arbeit.

Meinen Kollegen am IEM danke ich für die gute Zusammenarbeit und die angenehme Arbeitsatmosphäre. Besonderer Dank für viele fachliche Anregungen gilt Frau Dr.-Ing. Mercedes Herranz Gracia, Herrn Dipl.-Ing. Thomas Herold und Frau Dipl.-Ing. Christelle Piantzop Mbo'o.

Ein liebes Dankeschön möchte ich Frau Petra Jonas-Astor für die Unterstützung bei vielen kleinen und doch so wichtigen organisatorischen Belangen aussprechen.

Für die sprachlichen Korrekturen bedanke ich mich bei meinem Vater und meiner Schwägerin Frau Anne-Rose Uebel.

Mein ganz besonderer persönlicher Dank gilt meiner Familie. Meinen Eltern danke ich von Herzen für die liebevolle Unterstützung und den Rückhalt, auf den ich mich stets verlassen kann. Ich danke meinem Bruder Herrn Dr.-Ing. Sebastian Coenen, dessen Vorbild die Wahl meines beruflichen Weges wesentlich beeinflusst hat. Meinen Schwiegereltern danke ich für die liebe und mitfühlende Unterstützung auf dem Weg zur Promotion. Von ganzem Herzen danke ich meinem Mann und meiner Tochter für ihre Geduld, ihr Vertrauen und ihre Liebe. Diese waren besonders in der Endphase meiner Promotion von bedeutender Wichtigkeit.

Aachen, im November 2014

Isabel Coenen



# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelverzeichnis</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1 Begriffsklärungen . . . . .	3
2.2 Elektrische Antriebssysteme . . . . .	4
2.2.1 Einfluss des Fertigungsprozesses . . . . .	6
2.2.2 Anforderungen an die elektrische Maschine . . . . .	7
2.2.3 Notwendigkeit der Qualitätskontrolle . . . . .	8
2.3 Untersuchte Maschinen . . . . .	8
2.3.1 Permanentmagneterrgte Synchronmaschine . . . . .	10
2.3.2 Asynchronmaschine mit Käfigläufer . . . . .	12
<b>3 Ermittlung relevanter unzulässiger Abweichungen</b>	<b>13</b>
3.1 Fertigungsbedingte Abweichungen bei elektrischen Maschinen . . . . .	13
3.1.1 Toleranzbehaftete Materialeigenschaften . . . . .	13
3.1.2 Fehlstellungen . . . . .	15
3.1.3 Abweichungen von Entwurfsparametern . . . . .	18
3.2 Bewertung mittels Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse . . . . .	19
<b>4 Einfluss fertigungsbedingter Abweichungen</b>	<b>23</b>
4.1 Experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung von Fertigungseinflüssen . . . . .	23
4.1.1 Berechnung mit Hilfe numerischer Verfahren . . . . .	24
4.1.1.1 Berechnungsmodelle . . . . .	25
4.1.1.2 Toleranzbehaftete Materialeigenschaften . . . . .	27
4.1.1.3 Fehlstellungen . . . . .	39

4.1.1.4	Abweichungen von Entwurfsparametern . . . . .	51
4.1.1.5	Wechselwirkungen zwischen Parametern . . . . .	52
4.1.1.6	Vergleich von Fertigungseinflüssen bei verschiedenen Rotortopologien . . . . .	56
4.1.2	Statistische Messreihen . . . . .	59
4.1.2.1	Ermittlung der statistischen Streuung der induzier- ten Spannung innerhalb einer toleranzbehafteten Maschinenserie . . . . .	59
4.1.2.2	Auswertung von Blechanisotropie . . . . .	62
4.2	Klassifizierung von Abweichungen anhand analytischer Methoden . .	63
4.2.1	Analytische Beschreibung der Maschinengrößen . . . . .	64
4.2.2	Analyse der Ordnungszahlen der Luftspaltkomponenten bei der PMSM . . . . .	65
4.2.2.1	Anwendung der Ordnungszahlenanalyse auf die PMSM2 . . . . .	67
4.2.3	Klassifizierung der betrachteten Abweichungen . . . . .	69
<b>5</b>	<b>Methodik zur Entwicklung einer End-of-Line Kontrolle</b>	<b>73</b>
5.1	Definition der Zielsetzung . . . . .	73
5.2	Ermittlung der Relevanz und Einflüsse fertigungsbedingter Abwei- chungen . . . . .	75
5.3	Prüfstandskonzept . . . . .	75
5.4	Durchführung und Bewertung . . . . .	76
<b>6</b>	<b>Beispielhafte Anwendung der Methodik für den Motor eines in-   dustriellen Antriebssystems</b>	<b>79</b>
6.1	Zielsetzung . . . . .	79
6.2	Berücksichtigte Abweichungen . . . . .	83
6.3	Prüfstandskonzept . . . . .	85
6.4	Durchführung und Bewertung . . . . .	87
<b>7</b>	<b>Bewertung</b>	<b>95</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>99</b>

---

<b>9 Anhang</b>	<b>103</b>
9.1 edq-Modell mit Umrichterspeisung der Maschine . . . . .	103
9.2 Spektrale Leistungsdichte . . . . .	104
9.3 Statistische Auswertung . . . . .	105
9.4 Berechnung des Wicklungsfaktors bei Zweischicht-Zahnspulenwicklungen	106
9.5 Bestimmung des notwendigen Stichprobenumfangs . . . . .	107
9.6 Ergebnisse der Testmessreihen an vorgeschädigten Maschinen . . . .	108
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>111</b>