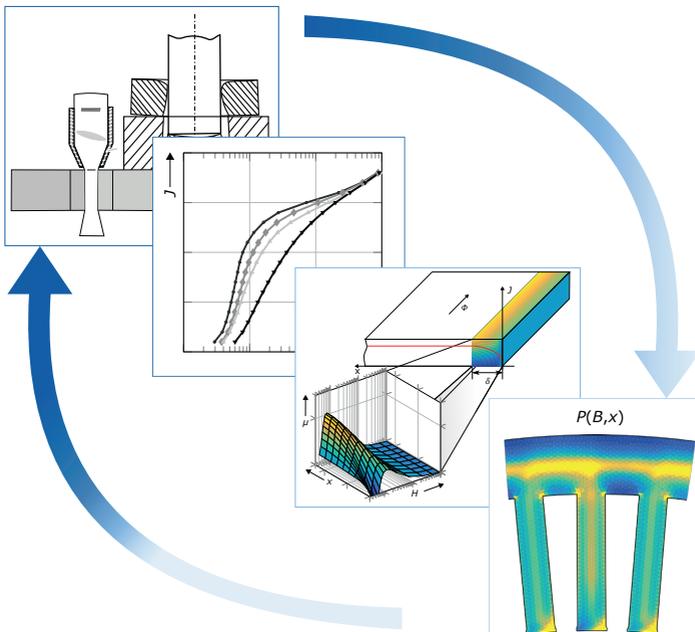


Silas Johannes Heinrich Elfgen

Beitrag zur Untersuchung des Schnittkanteneinflusses von nicht-kornorientiertem Elektroband auf das Betriebsverhalten rotierender elektrischer Maschinen



Beitrag zur Untersuchung des Schnittkanteneinflusses von nicht-kornorientiertem Elektroband auf das Betriebsverhalten rotierender elektrischer Maschinen

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

vorgelegt von

Master of Science RWTH Aachen University
Silas Johannes Heinrich Elfgren

aus Aachen

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Kay Hameyer
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Ponick

Tag der mündlichen Prüfung: 25. Februar 2019

Aachener Schriftenreihe zur
Elektromagnetischen Energiewandlung

Band 37

Silas Johannes Heinrich Elfgén

**Beitrag zur Untersuchung des
Schnittkanteneinflusses von nicht-kornorientiertem
Elektroband auf das Betriebsverhalten
rotierender elektrischer Maschinen**

Shaker Verlag
Düren 2019

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, 2019)

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 2019

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6686-9

ISSN 1861-3799

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Für meine Frau Kezia.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit am Institut für elektrische Maschinen der RWTH Aachen.

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Kay Hameyer, dessen gute wissenschaftliche Unterstützung und Leitung diese Arbeit ermöglichten. Ebenfalls möchte ich mich in aller Form bei Herrn Prof. Ponick für die Übernahme des Koreferats bedanken.

Bedanken möchte ich mich für die Unterstützung der Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA) in der Thematik der Unsicherheiten magnetischer Messungen.

Die gute Zusammenarbeit und Unterstützung meiner Kolleginnen und Kollegen am Institut hat wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Explizit möchte ich mich bei meinen Kollegen Benedikt Groschup, M.Sc., Christoph Mülder, M.Sc. und Jan Karthaus, M.Sc. für die Unterstützung und den Beitrag zu dieser Arbeit bedanken. Meinen ausdrücklichen Dank möchte ich auch unserem Sekretariat und der mechanischen Werkstatt aussprechen. Ihr offenes Ohr und der konstruktive Austausch waren mir stets eine große Hilfe.

Meinen Eltern und meiner Familie danke ich für das Vertrauen und die großen Bemühungen, die mir während meines gesamten Leben zuteil wurden. Sie sind der Grundstein, auf dem ich bauen darf. Der größte Dank gilt meiner Frau Kezia Elfgen für ihre Unterstützung, Geduld und kritische Einordnung. Ihr liebevoller Rückhalt und ihr Verständnis haben es mir ermöglicht, diese Arbeit anzufertigen!

Kurzfassung

In Folge mechanischer oder thermischer Schneidverfahren können in ferromagnetischen Materialien lokale mechanische Spannungen entstehen und in Form von Eigenspannungen im Material verbleiben. Wird das Material lokalen oder globalen mechanischen Spannungen ausgesetzt, beeinflusst dies signifikant die charakteristischen magnetischen Eigenschaften sowie die entstehenden spezifischen Eisenverluste. Es resultiert eine magnetisch wirksame Einflusszone, deren Größe abhängig vom Trennverfahren und den Prozess- und Materialparametern ist. Mit schmalen geometrischen Abmessungen des magnetischen Flussweges steigt der Anteil des beeinflussten Materials und verändert die resultierenden globalen magnetischen Eigenschaften.

Mit steigenden Leistungsdichten und steigenden Wirkungsgradanforderungen an die elektrischen Maschinen ist ein tiefes Verständnis des Zusammenspiels aus Bearbeitungsverfahren und Magnetik notwendig. Innerhalb des Auslegungsprozesses elektrischer Maschinen können verschiedene Schnittverfahren, wie Laserschneiden bei Prototypen und Stanzen innerhalb einer Serienfertigung, eingesetzt werden. Mit Hilfe eines lokalen Materialmodells ist die Abbildung und Analyse dieser unterschiedlichen Bearbeitungseinflüsse möglich. Zur Bewertung von Trennverfahren muss das Materialmodell bzgl. der Einflusszone kontinuierlich sein. Weiter muss das Rechenmodell die Größe der Einflusszone als Resultat liefern und diese Kenntnis nicht voraussetzen. In Modellen der Methode der Finiten Elemente muss das Schnittkantenmodell auch unabhängig von der Diskretisierung sein. In der Literatur findet man Schichtenmodelle, die die genannten Eigenschaften nicht besitzen. In der vorliegenden Arbeit wird daher ein Modell entwickelt und in eine Finite-Elemente-Umgebung implementiert, das alle eben geschilderten Eigenschaften besitzt. Andere erforderliche Eigenschaften der entwickelten Methodik leiten sich aus der messtechnisch basierten Parametrierung des Modells ab.

Die standardisierte Charakterisierung weichmagnetischer Materialien dient als Grundlage von Magnetisierungs- und Eisenverlustmodellen und zur Auslegung elektromagnetischer Kreise. Folglich muss der Einfluss der Bearbeitung

auch innerhalb standardisierter, magnetischer Charakterisierungsverfahren berücksichtigt werden. Magnetische Schädigungen in Folge eines Trennverfahrens führen zu einer lokalen Magnetisierung und Eisenverlustverteilung. Voraussetzung der Analyse zum Verständnis und zur Bewertung des Schädigungseinflusses ist die Entwicklung einer kontinuierlichen und lokalen Modellbeschreibung. Eine Bewertung der Modellgrenzen wird unter Berücksichtigung resultierender Messunsicherheiten der spezifischen Eisenverluste durchgeführt.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Wirkungsweise lokaler magnetischer Schädigungen auf Basis des entwickelten kontinuierlichen Material- und Eisenverlustmodells zu analysieren. Innerhalb der Vielzahl der Einflussfaktoren kann so ein tiefergehendes Verständnis des Zusammenspiels aus Bearbeitungseinfluss und resultierendem magnetischem Verhalten gewonnen werden.

Die Arbeit fokussiert auf die Untersuchung der Wirkzusammenhänge materialspezifischer Parameter auf der einen sowie auf elektrische und magnetische Parameter auf der anderen Seite. Die entwickelten modellbasierten, lokalen Formulierungen der Permeabilität und der Eisenverluste erlauben eine Anwendung innerhalb der Methode der Finiten Elemente. Auf Basis von Messungen wird die hohe Übereinstimmung und Prädiktivität von Simulationen und Modellergebnissen validiert. Ferner wird der Einfluss der Materialbearbeitung exemplarisch für eine rotierende elektrische Maschine analysiert und bewertet. Abschließend wird die erweiterte Gültigkeit der Formulierung hinsichtlich externer mechanischer Spannungen gezeigt und ein aktiver Einsatz der Materialbearbeitung diskutiert.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	xiii
1. Einleitung	1
2. Weichmagnetische Materialien	5
2.1. Magnetisierungsverhalten	6
2.1.1. Klassifizierung von Elektroband	11
2.1.2. Einfluss mechanischer Spannungen	13
2.1.3. Eigenspannungen	15
2.2. Mechanische und thermische Trennverfahren	16
2.2.1. Thermische Laserschneidverfahren	17
2.2.2. Mechanisches Scherschneiden	18
3. Phänomenologische Analyse des Bearbeitungseinflusses auf das Magnetisierungsverhalten	21
3.1. Motivation der magnetischen Charakterisierung	22
3.2. Charakterisierungsverfahren zur Quantifizierung der Materialschädigung	22
3.3. Messaufbau	24
3.4. Probenvorbereitung zur Bewertung der Trennverfahren	27
3.4.1. SST Proben	27
3.4.2. Ringkernproben	28
3.4.3. Probenumfang	28
3.5. Charakterisierung unterschiedlicher Streifenbreiten am Einzelblatttester	32
3.5.1. Analyse resultierender Messunsicherheiten	32
3.6. Analyse materialspezifischer und magnetischer Parameter hinsichtlich des Einflusses der Materialschädigung	44
3.6.1. Quantitative Analyse	44
3.6.2. Statistische Untersuchung	52
3.6.3. Zusammenfassung	58

4. Das kontinuierliche lokale Schnittkantenmodell	61
4.1. Modellbildung lokaler Magnetisierungseigenschaften	61
4.1.1. Streifenbreitenabhängige Modellbildung	63
4.1.2. Schichtenmodelle mit analytischer Lösung	66
4.2. Modellbildungen kontinuierlicher lokaler magnetischer Eigen- schaften	67
4.2.1. Lokaler Schädigungsverlauf	70
4.3. Identifikation der Modellparameter	73
4.4. Analyse der Modellparameter	80
4.4.1. Mechanische Trennverfahren	80
4.4.2. Thermische Trennverfahren	86
4.4.3. Zusammenfassung der Analyse	91
4.5. Berücksichtigung lokaler Materialeigenschaften im FE-Modell	93
4.5.1. Struktur der Modellvalidierung	93
4.5.2. Bestimmung des Elementabstands zur Schnittkante	96
4.5.3. Berechnung der Reluktivitätsmatrix	98
4.5.4. Lokale Flussdichteverteilung am Beispiel eines Ringkerns	101
4.5.5. Konvergenz des kontinuierlichen Modells am Beispiel eines Ringkerns	104
5. Einsatz des Schnittkantenmodells zur Bewertung des Einflusses der Materialbearbeitung auf die Eisenverlustanteile	109
5.1. Frequenzbasiertes Eisenverlustmodell	109
5.2. Einfluss auf die globalen Eisenverlustanteile	110
5.2.1. Statische Hystereseverluste	112
5.2.2. Klassische Wirbelstrom-Verluste	117
5.2.3. Zusatzverluste (anomale Wirbelstromverluste)	119
5.2.4. Nicht-lineare Verluste	123
5.2.5. Einfluss auf die Eisenverlustmechanismen verschiede- ner Materialgüten	129
5.2.6. Zusammenfassung des Bearbeitungseinflusses auf die Eisenverlustparameter	133
5.3. Lokale Verlustmodellbildung	134
5.3.1. Analyse lokaler Wirbelstromverteilungen	134
5.3.2. Randbedingungen lokaler Eisenverlustparameter	148
5.3.3. Identifikation lokaler Eisenverlustparameter	150
5.3.4. Validierung und Prädiktivität des lokalen Eisenver- lustmodells	155

6. Einfluss des Schnittkanteneffekts auf das Betriebsverhalten rotierender elektrischer Maschinen	159
6.1. Beispieltopologie einer PMSM	159
6.2. Berücksichtigung der lokalen Magnetisierung	161
6.3. Untersuchung der lokalen Magnetisierung	162
6.4. Koordinatensystem des Maschinenmodells	165
6.5. Einfluss der Materialbearbeitung auf die Hauptinduktivitäten	166
6.6. Einfluss der Materialbearbeitung auf das Drehmoment	168
6.7. Eisenverlustberechnung innerhalb der FEM	170
6.8. Untersuchung globaler und lokaler Eisenverlustanteile	172
6.9. Einfluss der Materialbearbeitung auf den Wirkungsgrad . . .	177
6.10. Fahrzeugmodell	178
6.11. Einfluss der Materialbearbeitung im Fahrzyklus	179
6.12. Methode zur a priori-Berücksichtigung resultierender Eisenverluste	182
6.13. Diskussion der Ergebnisse	186
7. Gezielter Einsatz von Schnittspannungen und Adaption der Modellbeschreibung	189
7.1. Gezielte Einsatzmöglichkeit von Schnittspannungen in rotierenden elektrischen Maschinen	189
7.2. Erweiterung des lokalen Magnetisierungsmodells hinsichtlich mechanischer Spannungen	195
7.2.1. Magnetische Charakterisierung unter dem Einfluss mechanischer Spannungen	196
7.2.2. Mechanische Spannungsverteilung	197
7.2.3. Erweiterung der Modellbeschreibung	198
7.2.4. Lokale Spannungsverteilung	201
8. Zusammenfassung	205
A. Gezielte Einsatzmöglichkeit von Schnittspannungen bei kornorientiertem Elektrobund	209
Symbolverzeichnis	211
Literaturverzeichnis	219
Eigene Veröffentlichungen	231
Lebenslauf	237