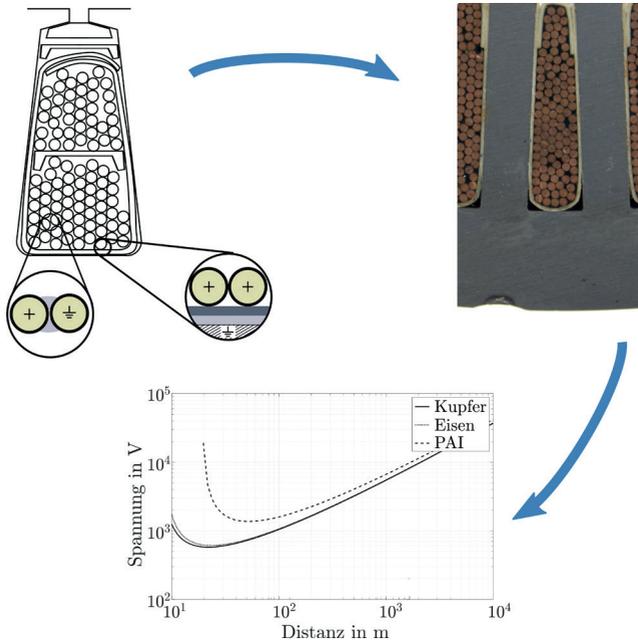


Florian Alexander Pauli

Auslegung der Windungsisolierung wechselrichtergespeister elektrischer Niederspannungsmaschinen anhand der Modellierung von Gasentladungsprozessen



Auslegung der Windungsisolierung wechselrichtergespeister elektrischer Niederspannungsmaschinen anhand der Modellierung von Gasentladungsprozessen

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

Herrn
Florian Alexander Pauli

aus Witten

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Kay Hameyer
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Mark-Matthias Bakran

Tag der mündlichen Prüfung: 15. März 2022

Aachener Schriftenreihe zur
Elektromagnetischen Energiewandlung

Band 46

Florian Alexander Pauli

**Auslegung der Windungsisolierung
wechselrichtergespeister elektrischer
Niederspannungsmaschinen anhand der
Modellierung von Gasentladungsprozessen**

Shaker Verlag
Düren 2022

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, 2022)

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 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8642-3

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

Danksagung

Diese Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für elektrische Maschinen an der RWTH Aachen University von 2017 bis 2022. Für die hervorragende Betreuung sowie die im Rahmen meiner Tätigkeit entstandenen Möglichkeiten zur Realisierung dieser Arbeit spreche ich meinem Doktorvater, dem Institutsleiter Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Kay Hameyer, meinen besonderen Dank aus. Seine Expertise zur Erstellung einer wissenschaftlichen Arbeit sowie ein reger fachlicher Austausch haben entscheidend zur Entstehung dieser Dissertation beigetragen. Für die Erstellung des Zweitgutachtens und seinen damit verbundenen konstruktiven Anmerkungen danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. Mark-Matthias Bakran. Ferner möchte ich mich bei allen Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen des Instituts für Elektrische Maschinen bedanken. Namentlich möchte ich hier Herrn Dr.-Ing. Andreas Ruf, Herrn Dr.-Ing. Michael Schröder sowie Herrn Niklas Driendl, M. Sc. hervorheben. Sie standen mir stets mit ihrem fachlichen Rat zur Seite. Für die Hilfe bei der Umsetzung messtechnischer Aufbauten möchte ich der elektronischen und mechanischen Werkstatt danken. Das Sekretariat des Institutes hat mir bei organisatorischen Fragen immer weitergeholfen und meine wissenschaftliche Tätigkeit somit erheblich vereinfacht. Meine Abschlussarbeiter und studentische Hilfskräfte haben mich durch zahlreiche Untersuchungen zur Beantwortung wissenschaftlicher Fragestellungen unterstützt. Dies gilt insbesondere für Frau Clara lütke Jüdefeld, M. Sc., Frau Julianna Monissen, B. Sc. sowie Herrn Yixuan Wu, M. Sc.

Der größte Dank aber gilt meiner Familie, meiner Lebenspartnerin und meinen Freunden, die mir jederzeit mit ihrem Rat und ihrer Hilfe zur Seite standen. Ohne diese Unterstützung hätte ich die zum Erstellen diese Arbeit notwendige Konzentration und Zeit sicherlich nicht aufgebracht.

Kurzfassung

Motivation, Ziel und Aufgabenstellung der Arbeit

Eine elektrische Maschine und ein Umrichter, bestehend aus Gleichrichter, Gleichspannungszwischenkreis und Wechselrichter, sind wesentliche Elemente eines modernen drehzahlvariablen elektrischen Antriebssystems. Es ist abzusehen, dass sich die Spannung im Zwischenkreis der Umrichter zukünftiger Antriebsgenerationen erhöhen wird. Zudem kommen vermehrt schnellschaltende Halbleiter zum Einsatz. Diese verursachen ein transientes Überschwingen der Spannung an den Maschinenklemmen und in Kombination mit der steigenden Zwischenkreisspannung eine zunehmende Belastung des Isoliersystems der elektrischen Maschine. Die Auslegung der Isolierung erfolgt nach dem heutigen Stand der Technik mithilfe einer Reihe empirischer Sicherheitsfaktoren, die mit der Zwischenkreisspannung multipliziert werden. Diese werden in der Norm *DIN EN 60034-18-41* näher spezifiziert. Im Bereich der Niederspannungsmaschinen ist das Ziel dieser Auslegung, sogenannte Teilentladungen in der Wicklung zu vermeiden, da diese die Lebensdauer der Isolierung auf wenige Stunden verkürzen. Teilentladungsfreiheit kann dabei durch hinreichend dicke Isolierschichten oder durch eine Verminderung der Betriebsspannung erreicht werden. Aus Sicht des Antriebstranges sind beide Varianten unerwünscht, weshalb die Isolierschichtdicke bei einer festgelegten Spannung so gering wie möglich sein sollte. Die nach dem Stand der Technik verwendete Methodik zur Dimensionierung der Isolierung berücksichtigt weder die Wicklungstopologie, noch die physikalischen Hintergründe des Entladungsprozesses. Dies kann zu einer fehlerhaften Dimensionierung der Isolierung und damit zu einem erhöhten Ressourcenaufwand bei der Herstellung des Antriebstranges führen.

Wesentliche wissenschaftliche Beiträge der Arbeit

Bei der Auslegung nach Norm werden sowohl Faktoren angewendet, die transiente Phänomene aufgrund von schnellen Spannungsanstiegen als auch Faktoren, die äußere Einflüsse auf den Teilentladungsprozess berücksichtigten. Diese Aufteilung der Ursachen für die Belastung im Isoliersystem

bleibt bei dem in dieser Arbeit verfolgten Ansatz bestehen. Allerdings werden hier sowohl die Wicklungstopologie als auch die Dimensionierung und Materialeigenschaften der Isolierschicht berücksichtigt. Dies bietet die Möglichkeit individuell den Aufbau und die Betriebsbedingungen eines Antriebs in die Auslegung der Isolierung mit einzubeziehen statt allgemein gefasster Sicherheitsfaktoren zu verwenden. Durch Modellierung der transienten Spannungsverteilung innerhalb der Wicklung wird dabei zunächst der Spannungsfall zwischen einzelnen Komponenten des Isoliersystems bestimmt. Unter Berücksichtigung der Geometriedaten können dann die Schwachstellen der Isolierung identifiziert werden. Diese limitieren den Betriebsbereich der Isolierung, da hier bei einer sukzessiven Erhöhung der Zwischenkreisspannungen als erstes Teilentladungen erwartet werden. Die Geometrie der unmittelbaren Umgebung der identifizierten Schwachstellen wird extrahiert und in eine zweidimensionale, elektrostatische FE-Simulation überführt. Mithilfe eines Modells für einen Barriereentladungsprozess wird die Spannung bestimmt, ab der Teilentladungen entlang der gewählten Isolierstrecke auftreten. Dabei werden auch Umweltfaktoren berücksichtigt, die sich aus dem Betrieb des elektrischen Antriebstranges ergeben. Die Ergebnisse der Simulation werden durch die Messung der TE-Einsatzspannung an verschiedenen Ersatzanordnung und bei unterschiedlichen Temperaturen, Luftfeuchtigkeiten und -drücken validiert. Mithilfe der eingangs vorgenommenen transienten Modellierung kann auf die maximal zulässige Zwischenkreisspannung des Antriebs geschlossen werden. Dieses Zusammenführen beider Modellansätze geschieht anhand der Auslegung des Isoliersystems eines exemplarischen Erprobungsträgers mit Einzelzähnen und Formspulenwicklung. Dabei wird das Ergebnis einer herkömmlichen Auslegung des Isoliersystems nach Norm mit dem Ergebnis des in dieser Arbeit hergeleiteten Verfahrens verglichen. Es wird deutlich, dass ein nach Norm ausgelegtes Isoliersystem für den hier betrachteten Erprobungsträger signifikant überdimensioniert ist. Abschließend werden sogenannte Motoretten mit dem so ausgelegte Isoliersystem Lebensdauertests unterzogen. Da es sich bei dem Erprobungsträger um eine Niederspannungsmaschine mit TE-freiem Isoliersystem handelt, steht hier die thermische Alterung im Vordergrund. Der Einfluss elektrischer Alterung wird verallgemeinert an einfachen Leiteranordnungen untersucht. Die hierbei auftretenden geringen Lebensdauern stützen die Forderung nach einem TE-freien Isoliersystem.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen des Isoliersystems wechselrichtergespeister Nieder- spannungsmaschinen	5
2.1	Aufbau und Alterung des Isoliersystems	5
2.1.1	Polymerbasierte Isoliersysteme	7
2.1.2	Alterungsprozesse	8
2.1.3	Alterungsfaktoren	9
2.2	Transiente Spannungen in den Wicklungen wechselrichterge- speister Maschinen	11
2.2.1	Transiente Spannungen in einer verlustbehafteten Ko- axialleitung	13
2.2.2	Übertragbarkeit auf die Wicklung einer elektrischen Maschine	14
2.3	Teilentladungen als Gasentladungsprozess in Lufteinschlüssen der Wicklung	15
2.3.1	Zündbedingung nach <i>Paschen</i>	16
2.3.2	Ladungsträgerbasiertes Entladungsmodell	22
2.3.3	Mechanismen zur Ladungsträgerbereitstellung	23
2.3.4	Ladungsträgeransammlungen und Polarisations-effekte	25
2.4	Messung der Teilentladungseinsetzspannung	28
2.4.1	TE-Detektion mit Koppelkondensator bei sinusförmiger Spannung	29
2.4.2	Antenne	30
2.4.3	Sonstige Methoden	31
2.5	Ladungsträgertransport und Durchschlagmechanismen in Po- lymeren	32
2.5.1	Ladungsträgertransport	32
2.5.2	Durchschlagmechanismen	34
3	Transiente Modellierung der Wicklung	37
3.1	Modellierung der Wicklung	38
3.2	Einzelzahnwicklung	40

3.3	Ausbreitungsgeschwindigkeit im niedrigen Frequenzbereich . .	43
3.3.1	Messung der Sprungantwort	43
3.3.2	Ausbreitungsgeschwindigkeit bei Eigenfrequenz des Stators	44
3.3.3	Ausbreitungsgeschwindigkeit bei maximaler angeregter Frequenz	46
3.4	Verteilte Wicklungen	49
3.4.1	Motor und Messaufbau	50
3.4.2	Whitebox-Modellierung mit diskreten Ersatzschaltbildern	50
3.4.3	Modellierung im Frequenzbereich	58
3.4.4	Vergleich der Mess- und Simulationsergebnisse	63
4	Berechnung der TE-Einsetzspannung in Ersatzanordnungen	69
4.1	Modellierung der TE-Einsetzspannung in Leiter-Leiter-Anordnungen	69
4.1.1	Modellierung der PDIV mit dem <i>Townsend</i> -Kriterium	70
4.1.2	Berechnung der TE-Einsetzspannung mithilfe des Plasmaansatzes	75
4.1.3	Äußere Einflussfaktoren auf die TE-Einsetzspannung .	90
4.2	Modellierung der TE-Einsetzspannung zwischen Wicklung und Statoreisen	95
4.2.1	Ersatzanordnung	96
4.2.2	Simulation	98
4.2.3	TE-Einsetzspannung	99
4.2.4	Ersatzanordnung als Prüfling	101
4.2.5	Messung und Validierung	101
5	Methodik zur Auslegung des Isoliersystems einer Niederspannungsmaschine	105
5.1	Erprobungsträger	105
5.2	Anforderungen an das Isoliersystem	106
5.2.1	Teilentladungsfreiheit	107
5.2.2	Temperaturbeständigkeit	109
5.2.3	Schichtdicke	109
5.3	Grobauslegung des Isoliersystems	110
5.3.1	Auslegung nach DIN-EN 60034-18-41	111
5.3.2	Erweiterte Auslegung	116
5.4	Prototypfertigung des Isoliersystems	122
5.4.1	Fertigungsverfahren	122

5.4.2	Fertigungseinflüsse und deren Auswirkungen	125
5.4.3	Zusammenfassung Prototypfertigung	129
6	Lebensdauertests	133
6.1	Alterung TE-freier Isoliersysteme	133
6.1.1	Prüfkörper	134
6.1.2	Zyklische Alterung	136
6.2	Elektrische Alterung	144
6.2.1	Messaufbau zur Charakterisierung der elektrischen Alterung	144
6.2.2	Ergebnisse und Modellierung der elektrischen Alterung	147
7	Zusammenfassung und Ausblick	153
	Literaturverzeichnis	163
	Eigene Veröffentlichungen	173
	Betreute Abschlussarbeiten	177
	Lebenslauf	179

Abkürzungsverzeichnis

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEM	Institut für Elektrische Maschinen
PAI	Polyamidimid
PDEV	Teilentladungsaussetzspannung, engl. Partial Discharge Extinction Voltage
PDIV	Teilentladungseinsetzspannung, engl. Partial Discharge Inception Voltage
PEEK	Polyetheretherkethon
PESI	Polyesterimid
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
SoH	Gesundheitszustand, engl. State of Health
TE	Teilentladung