

Methoden zur kennlinienbasierten Zustandsüberwachung von Metalloxid- Varistoren

Stefan Jörres



Universität Kassel

Fachbereich Elektrotechnik/Informatik

Fachgebiet Anlagen und Hochspannungstechnik

Methoden zur kennlinienbasierten Zustandsüberwachung von Metalloxid-Varistoren

Vom Fachbereich Elektrotechnik/Informatik der Universität Kassel

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation von

Stefan Jörres

Referent:	Prof. Dr.-Ing. Albert Claudi
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Zacharias
Tag der Einreichung:	15. Januar 2020
Tag der mündlichen Prüfung:	15. Mai 2020

Kassel 2020

Berichte aus der Elektrotechnik

Stefan Jörres

**Methoden zur kennlinienbasierten Zustands-
überwachung von Metalloxid-Varistoren**

D 34 (Diss. Univ. Kassel)

Shaker Verlag
Düren 2020

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.: Kassel, Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7416-1

ISSN 0945-0718

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in den Jahren 11/2016 bis 03/2020 am Fachgebiet Anlagen und Hochspannungstechnik des Fachbereiches Elektrotechnik/Informatik an der Universität Kassel.

Mein besonderer Dank gilt dem Fachgebietsleiter, Herrn Prof. Dr.-Ing. Albert Claudi, für seine wissenschaftliche Betreuung, seine wertvollen Anregungen und konstruktiven Gespräche, wodurch er wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Zacharias danke ich für die Übernahme des Korreferates sowie den weiteren Mitgliedern der Kommission für das Interesse an dieser Arbeit.

Weiterhin richtet sich mein Dank insbesondere an die Firma PHOENIX CONTACT GmbH & Co. KG für die Zusammenarbeit und Finanzierung des Forschungs- und Entwicklungsprojektes. Stellvertretend hierfür möchte ich Herrn Dr.-Ing. Martin Wetter und Herrn Dr.-Ing. Gernot Finis für das entgegengebrachte Vertrauen danken.

Allen ehemaligen Kollegen und derzeitigen Mitarbeitern am Fachgebiet danke ich für die besondere Arbeitsatmosphäre und die zahlreichen inspirierenden Momente sowohl während, als auch außerhalb der Arbeitszeit. In diesem Zuge möchte ich auch meinen Kollegen bei PHOENIX CONTACT danken, die mir stets mit Rat und Tat zur Seite standen. Durch die Mitarbeit im Bereich der Produktentwicklung habe ich weitreichende Kenntnisse dazugewinnen können. Stellvertretend für das gesamte Team IPCH möchte ich Herrn Christian Sander für die lösungsorientierte Zusammenarbeit danken.

Das Themenfeld der vorliegenden Arbeit umfasst ein breites Spektrum an Fachgebieten, wodurch viele interessante Kooperationen entstanden sind. Für die initiale Hilfestellung zur Simulation gekoppelter Spulen danke ich Herrn Dr.-Ing. Peter Scholz und Herrn Dr.-Ing. Yves Hackl. Im Bereich der mikrostrukturellen Analysen möchte ich Frau Bianca Böttge, Herrn Rico Bernhardt und dem dahinterstehenden Team des Fraunhofer-Institutes für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen meinen Dank aussprechen.

Einen besonderen Anteil am Gelingen dieser Arbeit haben die vielen Studierenden der Universität Kassel in Form von Projekt-, Bachelor- und Masterarbeiten sowie hilfswissenschaftlichen Tätigkeiten. Für die außergewöhnlich umfangreiche und gewissenhafte Arbeit möchte ich mich bei Kai Alsdorf, Johannes Heid, Daniel Zuber, Jan Lipphardt, Hendrik Puchinger und Christian Lottis bedanken.

Abschließend gilt mein besonderer Dank meiner Familie, die mich auf dem gesamten Weg stets unterstützt hat. Besonders meiner Verlobten Nathalie möchte ich für das Verständnis und die stetige Rückendeckung danken.

Kassel, Mai 2020

Stefan Jörres

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Symbolverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	XI
Chemisches Abkürzungsverzeichnis	XIII
Kurzfassung	XV
Abstract	XVII
1 Einleitung	1
2 Alterungsmechanismen von MO-Varistoren	5
2.1 Varistoren im Überspannungsschutz	5
2.2 Grundlagen Festkörperphysik und Halbleitertechnik	8
2.2.1 Bändertheorie	8
2.2.2 Kristalldefekte	10
2.2.3 Schottkybarriere	12
2.2.4 Ladungsträger-Transportmechanismen	15
2.3 Zinkoxid und Doppel-Schottky-Barrieren	17
2.3.1 Doppel-Schottky-Barriere	18
2.3.2 Erweitertes Modell einer Doppel-Schottky-Barriere	23
2.4 Degradationsmechanismen von Zinkoxid-Varistoren	24
2.4.1 Langzeitdegradation - Defektarten der Doppel-Schottky-Barriere	24
2.4.2 Impulsdegradation	27
2.4.3 Mikrostrukturelle Defekte	28
2.4.4 Diskussion: Kennlinienänderung unterschiedlicher Teilbereiche	31
2.4.5 Ausfallmechanismen	36
3 Versuchsmethodik	39
3.1 Kriterien zur Beurteilung der Degradation	39

3.2 Technische Daten untersuchter Varistoren	44
3.3 Entwicklung eines Varistor-Kennlinien Messstandes	46
3.4 Qualifizierung des Messsystems	50
3.4.1 Erweiterte Messunsicherheit	51
3.4.2 Fähigkeitsuntersuchung	54
3.4.3 Untersuchungen des wahren Wertes	57
3.4.4 Vergleich der Polaritätsabhängigkeit initialer Varistoren	59
4 Kennlinienbasierte Untersuchungen an MO-Varistoren	61
4.1 Methode zur kennlinienbasierten Datenauswertung	61
4.2 Umwelteinflüsse	63
4.2.1 Kennlinienverhalten unter Temperatureinflüssen	65
4.2.2 Versuchsstand zur Messung des Temperatur- und Luftfeuchteverhaltens	67
4.3 Impulsbelastbarkeit	72
4.3.1 Einzelimpulsbelastung	72
4.3.2 Repetierende Impulsbelastungen	76
4.4 Temporäre Überspannungen	86
4.5 Energiearme repetierende transiente Störgrößen	91
4.6 Bestimmung der Degradationsphänomene	92
5 Entwicklung eines Ableiter-Überwachungssystems	95
5.1 Stand der Technik	96
5.2 Entwurf geeigneter Sensoren	97
5.2.1 Spulendesign	103
5.2.2 Simulation gekoppelter Luftspulen	104
5.2.3 Messperformance des Gesamtsystems	108
5.3 Inverse Matrix Methode	113
5.4 Detektion von Langzeitströmen	119
5.5 Detektion elektromagnetischer Interferenzen	122
5.6 Weiterentwicklung des Messsystems	126
6 Zusammenfassung und Ausblick	129
Literaturverzeichnis	133
A Regelkarten	141
B EDX-Mapping	147