





# EMV-Untersuchungen von Kommunikationskabeln in elektrisch angetriebenen Fahrzeugen

Von der Fakultät für Elektrotechnik der  
Helmut – Schmidt – Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg  
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs  
genehmigte

Dissertation  
vorgelegt von

Dipl.-Ing. Benian Chand  
aus Filderstadt

Hamburg, 2016

Referent: Prof. Dr.-Ing. Stefan Dickmann  
Korreferent: PD Dr.-Ing. Thomas Fickenscher

Tag der mündlichen Prüfung: Freitag, 16. Dezember 2016

Berichte aus der Elektrotechnik

**Benian Chand**

**EMV-Untersuchungen von Kommunikationskabeln  
in elektrisch angetriebenen Fahrzeugen**

Shaker Verlag  
Aachen 2017

**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.: Hamburg, Helmut-Schmidt-Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5023-3

ISSN 0945-0718

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

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur Grundlagen der Elektrotechnik der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Dickmann für die Betreuung der Arbeit, seine hilfreiche Unterstützung und die Übernahme des Hauptreferats.

Bei Herrn PD Dr.-Ing. Thomas Fickenscher bedanke ich mich für die Übernahme des Korreferats und sein Interesse an der vorliegenden Arbeit.

Auch möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Joachim Horn für die Übernahme des Vorsitzes des Promotionsausschusses bedanken.

Den Kollegen der Professur danke ich ebenfalls für die tolle Atmosphäre und die zahlreichen Diskussionen und Gespräche, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Insbesondere möchte ich Herrn Dr.-Ing. Stefan Schenke, Herrn Dr.-Ing. Jules Kechie, Herrn Dr.-Ing. Tobias Kut, Herrn Dipl.-Ing. Kai Rathjen und Herrn Dipl.-Ing. Dieter Peppel für die Unterstützung danken.

Mein ganz persönlicher Dank gilt meiner Familie für das entgegengebrachte Verständnis und die Unterstützung während dieser Arbeit und darüber hinaus in allen Lebenslagen.

Benian Chand



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>vii</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1. Grundlagen der EMV . . . . .	5
2.2. Kopplungsarten . . . . .	6
2.3. Schirmung elektromagnetischer Felder . . . . .	7
<b>3. EMV-Prüfverfahren</b>	<b>11</b>
3.1. Direct Power Injection: DPI-Prüfverfahren . . . . .	11
3.2. Bulk Current Injection: BCI-Prüfverfahren . . . . .	12
3.3. Streifenleitung: Stripline-Prüfverfahren . . . . .	13
3.4. Absorber Line Shielded Enclosure: ALSE-Prüfverfahren . .	14
<b>4. Störeinkopplung durch den Antriebsstrang elektrischer Antriebe</b>	<b>17</b>
4.1. Praktische Untersuchung des elektrischen Antriebsstrangs .	17
4.1.1. Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs . . .	19
4.1.2. Optimierung des Messaufbaus . . . . .	23
4.1.3. Charakterisierung des ungeschirmten elektrischen Antriebsstrangs . . . . .	25
4.1.4. Erweiterung des elektrischen Antriebsstrangs durch diverse Schirmungsvarianten . . . . .	35
4.2. Simulation des elektrischen Antriebsstrangs . . . . .	43
4.2.1. Analyse von ungeschirmten HV-Kabeln . . . . .	43
4.2.2. Analyse der unterschiedlichen Schirmungsvarianten	50
4.3. Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen . . . . .	56

<b>5. Untersuchung von Filternetzwerken zur Minimierung der Stör- einkopplung</b>	<b>59</b>
5.1. Filterkonzepte zur Reduzierung von EMV-Störungen . . .	60
5.1.1. Passive Filternetzwerke . . . . .	61
5.1.2. Aktive Filternetzwerke . . . . .	61
5.1.3. Hybride Filternetzwerke . . . . .	63
5.1.4. Gleichtakt- und Gegentaktfilternetzwerke . . . . .	63
5.2. Simulationsbasierte Charakterisierung der Auslegung der Filterstrukturen . . . . .	68
5.2.1. Auswahl der Filterstrukturen . . . . .	68
5.2.2. Beschreibung eines Vierpols mit Hilfe der $\underline{\mathbf{A}}$ -Matrix	69
5.3. Optimierungsalgorithmen zur Ermittlung optimaler Filter- strukturen . . . . .	72
5.3.1. Brute Force Methode . . . . .	72
5.3.2. Ant Colony Algorithm . . . . .	72
5.3.3. Particle Swarm Optimization . . . . .	73
5.3.4. Programmablauf des Simulationsskriptes . . . . .	77
5.4. Validierung der Simulationsergebnisse durch Messungen . .	79
5.5. Praktischer Aufbau des Filters zur Minimierung der Stör- ung im elektrischen Antrieb . . . . .	86
5.6. Gegenüberstellung der Interferenzdämpfung durch Filter- ung und durch Schirmungsvarianten . . . . .	90
<b>6. Zusammenfassung</b>	<b>93</b>
<b>A. Vierpolanordnungen mit deren <math>\underline{\mathbf{A}}</math>-Matrizen</b>	<b>95</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>97</b>
<b>Lebenslauf</b>	<b>105</b>