

# Wireless Charging of Electric Vehicles - a Pareto-Based Comparison of Power Electronic Topologies

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

Diplom-Ingenieur  
Tobias Markus Diekhans  
aus Rheda-Wiedenbrück

Berichter:

Universitätsprofessor Dr. ir. Rik W. De Doncker  
Universitätsprofessorin Dr.-Ing. Nejila Parspour

Tag der mündlichen Prüfung: 14.6.2016

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar.



**Tobias Diekhans**

**Wireless Charging of Electric Vehicles –  
a Pareto-Based Comparison of  
Power Electronic Topologies**

**Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek**

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2016)

**AACHENER BEITRÄGE DES ISEA**

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr. ir. Dr. h.c. Rik W. De Doncker  
Leiter des Instituts für Stromrichter-technik und  
Elektrische Antriebe der RWTH Aachen (ISEA)  
52056 Aachen

Copyright Shaker Verlag 2017

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5048-6

ISSN 1437-675X

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • e-mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Vorwort und Dank

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Doktorand in der zentralen Forschung und Vorausbildung der Robert Bosch GmbH in der Gruppe für Leistungselektronik und elektrische Antriebe (CR/ARE3). Die wissenschaftliche Betreuung übernahm Professor Rik W. De Doncker vom Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA) der RWTH Aachen. Nach 5 Jahren möchte ich die Gelegenheit nutzen, zurückzublicken und mich bei all denjenigen zu bedanken, die mich während dieser spannenden Zeit unterstützt haben.

Mein Dank gilt in erster Linie meinem Doktorvater Professor Rik W. De Doncker, der mir ein hohes Maß an Selbständigkeit ermöglichte. Bei unseren Diskussionen schätzte ich besonders sein großes Interesse an neuen Forschungsthemen verbunden mit langjähriger Erfahrung auf dem Gebiet der Leistungselektronik. Weiterhin bedanken möchte ich mich bei Professorin Nejila Parspour vom Institut für Elektrische Energiewandlung (IEW) der Universität Stuttgart für die Übernahme des Koreferats.

In der täglichen Arbeit bei Bosch habe ich besonders die kollegiale und hilfsbereite Arbeitsatmosphäre geschätzt. Herzlicher Dank gilt an erster Stelle meinem fachlichen Betreuer Thomas Plum und meinem Chef Knut Kasper, die sich beide äußerst engagiert für mich eingesetzt haben und mir den Rücken freihielten. Außerdem möchte ich mich bei Felix Stewing bedanken, der die Arbeit auch gegengelesen hat und die Projektarbeit nicht nur durch zahlreiche lustige Anekdoten bereichert hat. Weiterhin bedanken möchte ich mich bei allen Kollegen, die mir im Labor geholfen haben, insbesondere Konstantin Spanos und Jan Riedel. Dank gilt auch Philipp Schumann und Steffen Eppler für interessante Diskussionen zu den übergeordneten Themen Markt und System. Für die Wertschätzung und das entgegengebrachte Vertrauen möchte ich mich auch beim Bosch Management bedanken: Ralf Wegst, Peter Fischer und Klaus-Peter Schnelle.

Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei vielen Kollegen am ISEA, wo ich mich auch als externer Doktorand immer sehr willkommen gefühlt habe. Besonderer Dank gilt Hauke van Hoek, Stefan Engel, Silvano Taraborrelli, Georges Engelmann, Christoph Loef, Andreas Hofmann, Martin Harries und Jessica Maaßen für die Unterstützung während der Dissertation und Vorbereitung der Verteidigung.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken für die dauerhafte Unterstützung während der Anfertigung dieser Arbeit. Besonderer Dank gilt meinen Eltern dafür, dass sie mir mein Ingenieursstudium in Aachen ermöglicht haben, mich auf dem Weg dorthin gefördert haben und sich tatsächlich auch nach 5 Jahren noch für mein Dissertationsthema interessieren.

Stuttgart, August 2016  
*Tobias Diekhans*

# Contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	Scope of this Thesis . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Fundamentals of Inductive Power Transfer</b>	<b>5</b>
2.1	Background on Electric Vehicles and Charging Infrastructure . . . . .	7
2.2	Introduction to Inductive Power Transfer . . . . .	8
2.3	Coil Geometries . . . . .	12
2.4	Power Electronic Topologies . . . . .	14
2.5	Electromagnetic Interference and Safety . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Topology Preselection and Qualitative Discussion</b>	<b>21</b>
3.1	Reactive Power Compensation . . . . .	22
3.2	Power Control . . . . .	24
3.3	Topology Preselection . . . . .	28
3.4	<i>LCL</i> -Parallel RPC with Secondary Side Control . . . . .	29
3.5	<i>LCL</i> -Parallel RPC with Primary Side Control . . . . .	35
3.6	Series-Series RPC with Primary Side Control . . . . .	39
3.7	Series-Series RPC with Dual-Side Control . . . . .	42
<b>4</b>	<b>Parametric Simulation Models</b>	<b>47</b>
4.1	Magnetic Flux Density Distribution . . . . .	48
4.2	Transformer Copper Losses . . . . .	52
4.3	Transformer Core Losses . . . . .	58
4.4	Transformer Shielding Losses . . . . .	62
4.5	Losses in the Power Semiconductors . . . . .	66
4.6	Losses in the Reactive Power Compensation . . . . .	72
4.7	Material Costs . . . . .	75
<b>5</b>	<b>Results of the Multi-Objective Optimization</b>	<b>77</b>
5.1	Optimization Objectives and Exclusion Criteria . . . . .	77
5.2	A Systematic Topology Comparison . . . . .	79
5.3	Discussion of the Optimal Operating Frequency . . . . .	90
5.4	Design Trade-Offs and Final Optimization . . . . .	98
<b>6</b>	<b>Hardware Prototype</b>	<b>103</b>
6.1	Dual-Side Control Loop . . . . .	104
6.2	Efficiency Measurements . . . . .	106
6.3	Voltage and Current Measurements . . . . .	108
6.4	Experimental Comparison to Primary-Side Control . . . . .	110

---

6.5	Magnetic Stray Field . . . . .	112
<b>7</b>	<b>Discussion of Current Development Trends</b>	<b>115</b>
7.1	Increasing the Operating Frequency . . . . .	115
7.2	Increasing the Output Power . . . . .	119
7.3	Downsizing the Transformer . . . . .	122
<b>8</b>	<b>Conclusions</b>	<b>125</b>
	<b>Lebenslauf - Curriculum Vitae</b>	<b>129</b>
	<b>Abbreviations</b>	<b>130</b>
	<b>Publications</b>	<b>132</b>
	<b>Bibliography</b>	<b>134</b>