

# **Reichweitenverlängerung von Elektrofahrzeugen durch Optimierung des elektrischen Antriebsstranges**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
**DOKTOR-INGENIEURS**  
von der Fakultät für  
Elektrotechnik und Informationstechnik  
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)  
genehmigte

## **DISSERTATION**

von  
Christian Klöffler, M.Eng.  
geboren in Annweiler am Trifels

Tag der mündlichen Prüfung: 30.07.2015  
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Martin Doppelbauer  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Mark-Matthias Bakran  
(Universität Bayreuth)



Berichte aus der Elektrotechnik

**Christian Klöffer**

**Reichweitenverlängerung von Elektrofahrzeugen  
durch Optimierung des elektrischen Antriebsstranges**

Shaker Verlag  
Aachen 2015

**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.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3961-0

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)

*„Ich glaube an das Pferd.*

*Das Automobil ist eine vorübergehende Erscheinung!“*

Wilhelm II (1859 – 1941)



# Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Hybridelektrische Fahrzeuge (HEV) des Elektrotechnischen Instituts (ETI) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) in Zusammenarbeit mit der Daimler AG.

Ich möchte mich auf diesem Wege bei allen herzlich bedanken, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Doppelbauer danke ich für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die fachliche und persönliche Unterstützung, wodurch diese Arbeit überhaupt erst realisiert werden konnte. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Mark-Matthias Bakran für das Interesse an der Arbeit und die Übernahme des Korreferats.

Der Daimler AG und insbesondere Herrn Dr. Wolfgang Wondrak sowie Herrn Dr.-Ing. Jörg Weigold danke ich für die großartige Unterstützung bei der Durchführung meines Forschungsprojektes. Ebenso möchte ich Herrn Dr.-Ing. Marcus Menne, der mir mit der Betreuung meiner Masterthesis den Einstieg in die Forschung im Automobilbereich ermöglichte, meinen Dank aussprechen.

Ein besonderes Dankeschön geht an meine Kollegen, die mir täglich sowohl mit fachlichem als auch mit persönlichem Rat zur Seite standen. Besonders hervorheben möchte ich an dieser Stelle die Herren Torsten Epskamp, Bastian Heidler, Christian Uhler, Marc Veigel und Andreas Wolf, mit denen neben dem kollegialen Zusammenhalt auch tolle Freundschaften entstanden.

Der größte Dank gilt meiner Familie! Bei meiner Freundin Isabel Parusel bedanke ich mich herzlich für den Rückhalt in allen anstrengenden Zeiten sowohl während meines Studiums als auch während meiner Promotion. Meinen Eltern Birgitta und Michael Klöffler danke ich ganz besonders für alles, was sie in den letzten 28 Jahren für mich getan haben. Nur mit dieser besonderen Hilfe wurde mir dies alles überhaupt erst ermöglicht.

Christian Klöffler,

Karlsruhe, im August 2015

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1	Einordnung der Arbeit.....	1
1.2	Gleichspannungswandler im Fahrzeug.....	2
1.3	Stand der Technik.....	4
1.4	Motivation.....	5
<b>2</b>	<b>Der elektrische Antriebsstrang.....</b>	<b>7</b>
2.1	Elektrische Maschine.....	7
2.1.1	Grundfunktion.....	7
2.1.2	Regelung.....	11
2.2	Wechselrichter.....	18
2.2.1	Grundfunktion.....	18
2.2.2	Modulationsverfahren.....	26
2.3	Gleichspannungswandler.....	30
2.3.1	Grundfunktion.....	32
2.3.2	Mehrphasiger Synchronwandler.....	38
2.3.3	Regelung.....	41
2.4	Energiespeicher.....	54
<b>3</b>	<b>Verlustoptimierung im elektrischen Antriebsstrang.....</b>	<b>59</b>
3.1	Verlustmechanismen.....	59
3.1.1	Elektrische Maschine.....	59
3.1.2	Wechselrichter.....	64
3.1.3	DC/DC-Wandler.....	68

3.1.4	Energiespeicher.....	71
3.2	Antriebsstrangmodell .....	72
3.2.1	Betriebspunkt E-Maschine .....	73
3.2.2	Betriebspunkt DC/AC-Wandler.....	78
3.2.3	Betriebspunkt DC/DC-Wandler .....	79
3.2.4	Betriebspunkt Energiespeicher .....	79
3.3	Optimierbare Verlustparameter .....	80
3.3.1	Zwischenkreisspannung.....	81
3.3.2	Schaltfrequenz DC/AC-Wandler .....	85
3.3.3	Modulationsart DC/AC-Wandler .....	86
3.3.4	Schaltfrequenz DC/DC-Wandler .....	87
3.3.5	Phasenzahl DC/DC-Wandler.....	89
<b>4</b>	<b>Auslegung des Gleichspannungswandlers .....</b>	<b>93</b>
4.1	Gängige Auslegungsmethoden .....	93
4.1.1	Volumenoptimierte Auslegung.....	94
4.1.2	Wirkungsgradoptimierte Auslegung .....	96
4.1.3	Bewertung der Auslegungsverfahren.....	99
4.2	Neuartiges Auslegungskonzept .....	100
4.2.1	Definition der Auslegungsparameter .....	101
4.2.2	Vollständige Auslegung des DC/DC-Wandlers .....	103
4.2.3	Betriebspunkthäufigkeit.....	105
4.2.4	Betriebsstrategie.....	108
4.2.5	Zielfunktion .....	111
4.2.6	Ergebnis der Optimierung .....	111
<b>5</b>	<b>Optimierung der Betriebsstrategie .....</b>	<b>115</b>

5.1	Problemstellung.....	115
5.2	Optimierungsalgorithmen.....	117
5.2.1	Deterministische Algorithmen.....	118
5.2.2	Stochastische Algorithmen.....	121
5.3	Vergleich der Algorithmen.....	133
<b>6</b>	<b>Simulative Optimierungsergebnisse .....</b>	<b>141</b>
6.1	Systemdefinition.....	141
6.2	(A)-Optimierung.....	144
6.2.1	Batteriearbeitspunkt bei 10% SOC.....	145
6.2.2	Batteriearbeitspunkt bei 50% SOC.....	156
6.2.3	Batteriearbeitspunkt bei 100% SOC.....	161
6.2.4	Zwischenfazit.....	163
6.3	(ADE)-Optimierung.....	164
6.4	(ABCDE)-Optimierung.....	170
<b>7</b>	<b>Validierung der Optimierungsergebnisse .....</b>	<b>175</b>
7.1	Prüfstandskonzept.....	175
7.1.1	Leistungsaufbau .....	175
7.1.2	Signalverarbeitung und Regelung.....	179
7.1.3	Leistungsmessung.....	180
7.1.4	Referenzmessungen .....	183
7.2	Messroutine .....	185
7.2.1	Kennfeldmessung.....	185
7.2.2	Fahrzyklusmessung.....	186
7.3	(A)-Optimierung.....	187
7.4	(ADE)-Optimierung.....	192

7.5	(ABCDE)-Optimierung .....	194
7.6	Bewertung der Optimierung .....	196
7.7	Reichweitenabschätzung .....	197
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>201</b>
<b>A</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>203</b>
A.1	Vollständige Systemparameter .....	203
A.2	Einstellungen Optimierungsalgorithmen .....	206
A.2.1	Simulated-Annealing-Algorithmus .....	206
A.2.2	Particle-Swarm-Algorithmus.....	207
A.2.3	Evolutionary-Algorithmus.....	208
A.3	Technische Randbedingungen Optimierung .....	209
A.4	Prüfstandsabbildungen .....	210
<b>B</b>	<b>Verzeichnisse .....</b>	<b>213</b>
B.1	Formelzeichenverzeichnis .....	213
B.1.1	Variablen .....	213
B.1.2	Indizes.....	215
B.1.3	Operatoren.....	217
B.2	Abkürzungsverzeichnis .....	219
B.3	Abbildungsverzeichnis .....	221
B.4	Tabellenverzeichnis .....	229
B.5	Literaturverzeichnis .....	231
<b>C</b>	<b>Betreute studentische Arbeiten .....</b>	<b>243</b>
<b>D</b>	<b>Eigene Veröffentlichungen .....</b>	<b>245</b>
<b>E</b>	<b>Lebenslauf .....</b>	<b>247</b>