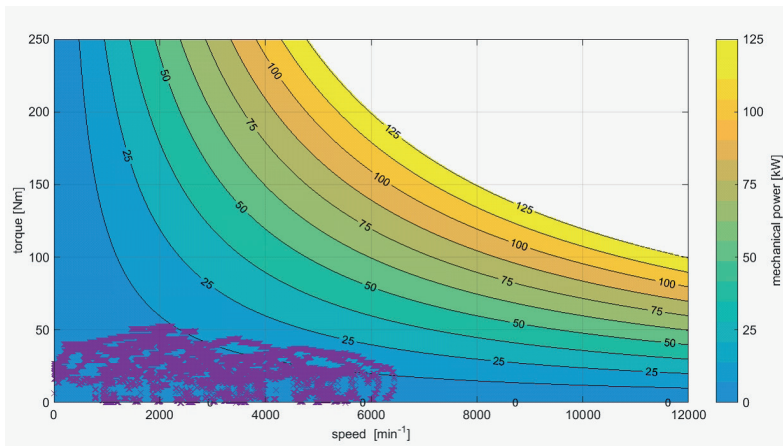


**Forschungsberichte  
Elektrische Antriebstechnik und Aktorik**

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling

**Eva Knischourek**

**Part Load Efficiency Improvement  
of Electric Vehicle Traction Inverters**



# **Part Load Efficiency Improvement of Electric Vehicle Traction Inverters**

**Eva Verena Knischourek**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektro- und Informationstechnik der Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)**

genehmigten Dissertation.

**Gutachter:**

1. Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling
2. Prof. Dr.-Ing. Marc Hiller

Die Dissertation wurde am 12.12.2017 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Elektro- und Informationstechnik am 20.04.2018 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 10.07.2018 statt.



Forschungsberichte Elektrische Antriebstechnik und Aktorik

Band 35

**Eva Knischourek**

**Part Load Efficiency Improvement  
of Electric Vehicle Traction Inverters**

Shaker Verlag  
Aachen 2018

**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.: München, Univ. der Bundeswehr, Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

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 978-3-8440-6373-8

ISSN 1863-0707

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)

Für Mama



# Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Zeit am Lehrstuhl für Elektrische Antriebstechnik und Aktorik der Universität der Bundeswehr in Neubiberg. In den Jahren die ich mit der Anfertigung dieser Arbeit verbracht habe, konnte ich auf die Unterstützung einiger Personen zählen, die ich hier explizit erwähnen möchte.

Großer Dank gebührt Herrn Gerling für die Chance diese Arbeit an seinem Lehrstuhl anzufertigen, die geduldige fachliche und persönliche Unterstützung und die Gelegenheit das Institut auch abseits der fachlichen Themen zu unterstützen und zu gestalten. Ebenfalls möchte ich Herr Prof. Marc Hiller für die Anfertigung des Zweitgutachtens und das fachliche und inhaltliche Feedback danken.

Auch andere Institutsmitglieder waren für meine Arbeit von großer Hilfe. Ich möchte Jochen und Rita Köbler für die organisatorische Unterstützung danken und dafür dass sie mir, auch für persönliche Dinge, immer zur Seite standen. Genauso danke an Hans Mayer der mir bei der Abwicklung des Promotionsverfahrens geholfen hat. Fachliche Unterstützung bekam ich von vielen Personen, insbesondere möchte ich Benno Lange und Harald Hofmann danken, dass sie immer bereit waren ihr schier unerschöpfliches Know-How mit mir zu teilen und ich sehr viel von ihnen lernen durfte. Ebenso geht ein großes Dankeschön an die Werkstatt und das Labor-Team auf die ich mit Fragen immer zugehen durfte. Bei Klaus Mühlbauer möchte ich mich dafür bedanken, die Vorarbeit für diese Arbeit geleistet zu haben und mich in der Weiterentwicklung des Themas immer fachlich und mit vielen Ratschlägen zu unterstützen, auch aus der Ferne. Ganz ausdrücklich möchte ich mich auch bei den Damen des Lehrstuhls bedanken, allen voran Lara Nollau, Elvira Islamic und Rita Köbler. Ihre Unterstützung bei organisatorischen, persönlichen und vielen anderen Dingen waren eine großartige Hilfe und Stütze für mich.

Natürlich gab es auch in meinem privaten Umfeld viele Personen auf die ich die Jahre über zählen konnte. Ich möchte meinen Schwestern Anja und Beate mit ihren Familien danken für ihr Interesse an meiner Arbeit und auch die ein oder andere Ablenkung vom Schreib-Stress. Ohne meinen Freund Max und seinen unermüdlichen Ansporn und Ehrgeiz



## Danksagung

---

wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen, wofür ich mich ganz besonders bedanken möchte. Gleiches gilt für meine Schwiegereltern Sabine und Peter die den Fortschritt meiner Arbeit stets mit große Interesse verfolgt haben. Zu guter Letzt möchte ich mich bei meinen Eltern Christa und Heinz für ihre Unterstützung und Motivation nicht nur während der letzten Jahre bedanken. Ohne sie wäre ich nicht da, wo ich heute stehe und hätte einige Dinge, auf die ich heute zurückblicken darf nicht erreicht.

# Abstract

This work deals with recent research activities regarding electric drives for automotive applications. Special focus lies on improving the drive's efficiency especially the power electronics inverter. At part load operation, which is most relevant for electric vehicles, considerable potential for efficiency optimization and reduction of power dissipation in the electric drive components exists.

Various approaches to improve inverter efficiency are introduced: reducing the switching frequency, changing system parameters such as DC-link voltage and adapting the active chip area. Focusing on the latter method a new approach to changing the active chip area of semiconductor devices (IGBTs) during inverter operation is introduced. In order to analyze this approach a unique prototype has been designed which uses several individually-controlled half-bridges in parallel per phase. When the drive is operated at part load not all half-bridges are required to drive the electric machine current thus deactivating unnecessary IGBTs can lead to an efficiency benefit by reducing switching losses in inactive chips.

In order to investigate this method and compare various driving cycles several simulation models are presented to estimate drive resistances, the electric machine and electric as well as thermal behavior of the drive inverter. Using these simulation tools driving cycles are analyzed and the impacts of different optimization approaches are evaluated regarding drive efficiency and inverter life time .

In addition to simulating driving cycles experiments using the aforementioned prototype have been conducted and measurement data on inverter efficiency and semiconductor temperature has been obtained. Besides variation of active chip area the other methods of efficiency improvement mentioned above have been analyzed. Measurement results show that varying the number of active transistors during inverter operation does not yield the beneficial effect on inverter losses expected from simulation data. The reason for this lies in the test setup and prototype design. For the electric drive examined in this thesis other options such as reducing the switching frequency are more promising which is explained

## Abstract

---

in detail in the last chapter of this work. Additionally an outlook on other possibilities to implement the approach of chip area variation with the desired efficiency potential is given.

# Contents

1. Introduction	1
1.1. Electric Vehicle Drive Systems	2
1.2. State of the Art and Motivation	3
1.3. Aim and Structure of the Thesis	5
2. Inverter Fundamentals	7
2.1. Losses in Power Electronics Inverters	7
2.1.1. Power Device Fundamentals	7
2.1.2. Drive Inverter Topology	18
2.1.3. Calculating Inverter Losses	23
2.2. Inverter lifetime	26
2.2.1. Power Module Structure	26
2.2.2. Failure Mechanisms	27
2.2.3. Inverter lifetime Estimation	27
3. Improving Inverter Efficiency	31
3.1. Approaches to Loss Reduction	31
3.1.1. Inverter Topology	31
3.1.2. Electric Machine Control	32
3.1.3. Semiconductor Materials	32
3.2. Part Load Efficiency	33
3.2.1. Adapting Inverter Chip Area	33
3.2.2. Optimization Algorithms	38
3.3. Impact of Driving Cycle on Power Losses	43
3.3.1. Driving Cycle Overview	44
3.3.2. Part Load Factor	45
4. Electric Vehicle Simulation	49
4.1. Electric Vehicle Model	49
4.1.1. Drive Resistance Model	50
4.1.2. Modeling the Electric Machine	51
4.2. Inverter Loss Model	56
4.2.1. Modeling of Discrete Devices	60

## Contents

---

4.2.2. Inverter Circuit Model . . . . .	68
4.3. Inverter Thermal Model . . . . .	70
4.3.1. Thermal CFD Analysis . . . . .	70
4.3.2. Thermal Equivalent Network . . . . .	75
4.4. Simulation Results . . . . .	80
4.4.1. Drive Efficiency . . . . .	80
4.4.2. Inverter Lifetime . . . . .	96
5. Practical Analysis and Verification . . . . .	101
5.1. Test Bench Setup . . . . .	101
5.1.1. Inverter Prototype . . . . .	101
5.1.2. Auxiliary and Measurement equipment . . . . .	103
5.1.3. Driving Cycle Measurement . . . . .	104
5.2. Experiment Results . . . . .	108
5.2.1. Inverter Efficiency . . . . .	109
5.2.2. Inverter Lifetime . . . . .	115
6. Discussion of Results . . . . .	121
6.1. Comparison of simulation and measurement results . . . . .	121
6.2. Summary of efficiency improvement approaches . . . . .	123
6.3. Effects on inverter life time . . . . .	125
6.4. Review of driving cycles . . . . .	125
7. Conclusion and Outlook . . . . .	129
A. Appendix . . . . .	133
List of Figures . . . . .	172
List of Tables . . . . .	174
List of Symbols and Abbreviations . . . . .	178
List of References . . . . .	185