

# Modellierung und Regelung komplexer dynamischer Systeme

Band 52

Thomas Hausberger

## **Nonlinear High-Speed Model Predictive Control with Long Prediction Horizons for Power-Converter Systems**

Schriften aus den Instituten für

Automatisierungs- und Regelungstechnik (TU Wien)  
Regelungstechnik und Prozessautomatisierung (JKU Linz)

Herausgeber: Andreas Kugi, Kurt Schlacher und  
Wolfgang Kemmetmüller

Modellierung und Regelung komplexer dynamischer Systeme

Band 52

**Thomas Hausberger**

**Nonlinear High-Speed Model Predictive Control with  
Long Prediction Horizons for Power-Converter Systems**

Shaker Verlag  
Düren 2021

**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.: Wien, TU, Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2021

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 978-3-8440-7850-3

ISSN 1866-2242

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

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

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Rahmen einer Forschungs Kooperation zwischen dem Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik (ACIN) der Technischen Universität Wien und der AVL List GmbH. Diese Arbeit wurde in ähnlicher Form an der Technischen Universität Wien als Dissertation eingereicht und im Dezember 2020 erfolgreich verteidigt.

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Kugi bedanken, welcher mir schon im Masterstudium die Möglichkeit zur Mitarbeit am Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik der Technischen Universität Wien gegeben hat. Die positiven Erfahrungen und Eindrücke sowie die spannenden Betätigungsfelder wurden auch während meines Doktoratstudiums beibehalten und gefördert. Die fachlichen Denkanstöße und Diskussionen, die Erörterungen und Bewertungen von Strategien sowie auch die rasche und unkomplizierte Unterstützung waren eine sehr gute Basis für das Gelingen dieser Arbeit und den sehr erfolgreichen Verlauf dieser Forschungs Kooperation.

Zudem möchte ich mich bei Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Wolfgang Kemmettmüller für die exzellente Betreuung dieser Arbeit bedanken. Die zahlreichen fachlichen Diskussionen, die gewährten Freiräume zur Entwicklung von neuen Ideen, seine stete Bereitschaft neue Konzepte zu analysieren und zu diskutieren, die konstruktiven Verbesserungsvorschläge sowie sein Engagement und sein Einsatz haben maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit und Forschungs Kooperation beigetragen. Außerdem möchte ich mich sowohl bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Kugi als auch bei Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Wolfgang Kemmettmüller für die hervorragenden Rahmenbedingungen an diesem Institut bedanken.

Zusätzlich danke ich auch allen Kolleginnen und Kollegen am ACIN für das sehr gute Arbeitsklima. Die Freizeitaktivitäten wie z.B. das wöchentliche Fußballspielen oder die Gokart-Rennen haben den Zusammenhalt über das Fachliche hinaus unterhaltsam zusätzlich gefördert. Im Speziellen werde ich auch die gemeinsame Zeit, den Austausch, die Diskussionen und gegenseitigen Hilfestellungen mit meinen Bürokollegen Dipl.-Ing. Domink Büchl und Dipl.-Ing. René Lenz in sehr

guter Erinnerung behalten.

Ich möchte mich auch bei den AVL List GmbH Projektverantwortlichen, allen voran bei Dipl.-Ing. Alexander Eder sowie auch bei Selimcan Deda, MSc., und Dipl.-Ing. Dr.techn. Oliver König für die fachlichen Diskussionen und für das zur Verfügungstellen eines Hardware-in-the-loop Systems bedanken.

Mein großer Dank gilt meinen Eltern, Claudia und Mag. Friedrich Hausberger, welche mich stets in meinen Vorhaben unterstützt und gefördert und mir somit meinen bisherigen Werdegang erst ermöglicht haben. Meine Eltern haben mir den besten Rückhalt gegeben, den man sich nur vorstellen kann. Außerdem gilt mein Dank auch meinem Bruder Gregor und meinen Großeltern für das aufmerksame Zuhören, die gemeinsamen Unternehmungen und die immerwährende Versorgung mit Mehlspeisen.

Ein herzlicher Dank gilt meiner Freundin Lisa für ihren positiven Zuspruch und ihre liebevolle Unterstützung während meines Promotionsvorhabens.

Zudem möchte ich mich auch bei den Eltern meiner Freundin, Eva und Alois Leitner, für die wunderbare Aufnahme und die sehr guten Arbeitsbedingungen während der Covid-19 bedingten Home-Office-Phasen bedanken.

All diese positiven Unterstützungen, begleitet von den ausgezeichneten Rahmenbedingungen, haben dazu geführt, mit dieser Arbeit die Grenzen des technisch Machbaren zu versetzen.

Wien, im November 2020

Thomas Hausberger

The demanding emission regulation, and the expectable further tightening of these regulations, lead to the (partly) electrification of powertrains in transportation systems. This electrification is realized by the applications of (high-voltage) batteries, fuel cells, power converters and electric motors in powertrains. For the development and test of these systems, powerful, accurate and highly dynamic test systems are needed. These test systems can be used in power-hardware-in-the-loop (P-HIL) systems for the testing or stressing of powertrain components. Herein, the test systems for the electric components of a powertrain typically consist of (coupled) AC/DC- and DC/DC-power converter. Furthermore, in the field of the renewable energy production via photovoltaic (PV) cells or wind turbines, and in batteries for energy storage, (coupled) AC/DC- and DC/DC-power converters are often applied in DC- or AC-microgrids. For all these tasks, highly dynamic, efficient and accurately controlled power converters are needed.

The emerging wide-band-gap devices based on silicone carbide or gallium nitride exhibit significant reduction of switching losses for power switches compared to IGBT or silicone MOSFET technologies. This enables the possibility to increase efficiency, while increasing the system dynamics caused by higher applicable switching frequencies.

For achieving the challenging demands for power converters while, concurrently, utilizing the potential of wide-band-gap-semiconductors, high-speed optimal control strategies are required that achieve sampling times in the lower  $\mu\text{s}$  range. The industrial standard for the control of power converters is still based on (cascaded) linear controllers like PI and PID controllers, which work pretty well around a certain operation point. Other control concepts are based on exact input-output linearisation, passivity methods or  $H_\infty$  controllers. All of these methods do not provide the possibility for a systematic consideration of system constraints. Therefore, model-based optimal control concepts are a focus in current research, with model predictive control (MPC) as the most outstanding representative. Model predictive control methods provide the possibility to systematically incorporate system constraints like state and control input constraints, while also typically

utilizing the whole operation range of a system. State-of-the-art MPC concepts for power converters do not fully utilize the potentials of modern power converters, since they typically only provide short prediction horizons in the range of one to two steps. The short prediction horizon is caused by the fact that many known MPC concepts suffer from a significant (exponential) increase of computation time for an elongation of the prediction horizon, which is contradicting to utilize the high switching frequency capabilities of wide-band-gap-semiconductors and a resulting system dynamic increase. However, a long prediction horizon is desirable with respect to closed-loop system stability, the incorporation of future known changes of desired values or disturbances. Nonlinear online optimizing model predictive control strategies provide the capability to realize longer prediction horizons, while meeting the real-time constraints. In the literature, online optimizing model predictive control strategies achieve medium prediction horizon length (up to 7 steps), but do not fully incorporate system constraints.

In the research, digital signal processors (DSP) are the main platform for the implementations of MPCs. The emerging developments in the field of FPGAs (Field Programmable Gate Array) provide fastly increasing parallel computation capability in hardware. Therefore, FPGA platforms can be advantageous compared to DSPs in terms of calculation time, if an MPC algorithm exploits the parallel computation capability of FPGAs. This utilization is, until now, only used by MPC methods with predictions horizons of only up to two steps.

Therefore, this work deals with the development of high-speed nonlinear online optimizing model predictive control strategies with long prediction horizons for power converters (AC/DC- and DC/DC-converter) tailored to the implementation on FPGAs.

The MPC strategies in this work require a mathematical model of the power converters. These models must cover the system behavior of the power converters, but be efficient. An envelope modeling approach is used for the modeling in this work. An envelope model has the ability to reproduce the dynamic behavior accurately, while exhibiting scalability in modeling complexity (modeling depth). The envelope models of the converter are the basis for the derivation of reduced models tailored to the MPC controller design.

The main control objectives of the control concepts for the considered power converter are an accurate tracking of the output voltages, while meeting the system constraints like current limitations and control input limitations. The control objectives are formulated by cost functions, which are used in a optimal control problem (OCP). The cost functions and the solution method for this OCP presented in this work, are designed in a way that only additions, subtractions and multiplications are required. A significant number of operations and control parts can be calculated in parallel, which is ideal for an implementation on an FPGA. By simulations studies, the MPCs for the AC/DC- and DC/DC-converter are analyzed with respect to the closed-loop system behavior, tracking accuracy and robustness against disturbances. Moreover, the influence of the long prediction

horizon on the control performance is extensively investigated and comparisons with state-of-the-art control concepts are presented. The results given in this thesis show the advantages of the proposed MPC concepts. Furthermore, the MPCs are implemented on an FPGA, tested on a hardware-in-the-loop test bench and analyzed with respect to their control performance. With the developed MPC concepts in this work prediction horizon lengths of up to 100-times the sampling time can be achieved, while systematically considering system constraints and achieving sampling times in the range of 20  $\mu$ s. This achievable long prediction horizon enables the systematic consideration of future known changes of the desired values and future known load changes in the calculation of the optimal control input for the system.

In addition, the MPC of the DC/DC-converter is utilized for an emulation of a battery behavior at the DC/DC-converter output terminals, where a good and robust emulation behavior is achieved for demanding power loads trajectories. This also demonstrates the versatility of the proposed control strategy.

In coupled power converter systems, which appear, e.g., in test systems or DC- and AC-microgrids, the converters are typically controlled separately and their dynamic interaction is a disturbance for the controller (uncooperative control). In this thesis it is examined if and how an information exchange or the incorporation of the whole coupled system in the optimal controller design can increase the overall control performance. To do so, cooperative MPC concepts, which are based on the proposed MPCs for the AC/DC- and DC/DC-power converters, are developed for coupled power converters. In particular, the long prediction horizons are beneficially utilized to improve the control accuracy of the overall system. It will be shown, that a data exchange of the predicted system behavior between the MPCs of the converters remarkably improves the control performance of the coupled power converter system compared to the typically uncooperative control of power converter systems. In particular, for set point changes and known changes of the load, the control performance of the developed distributed MPCs achieve very similar results to a centralized MPC, where one MPC controls the whole coupled system. In this work, a centralized MPC is derived for benchmarking the control behavior of the distributed MPCs and the decentralized MPC. Typically, centralized MPCs are the benchmark for the achievable control performance but these MPCs usually suffer problems in realizing a real time implementation. The derived distributed MPCs allow for a real time implementation, where the data exchange can be performed in parallel to the MPC calculations and, thus, is also tailored to the realization on an FPGA. Moreover, the component downsizing potential of coupled power converter systems, enabled by utilization of cooperative MPC concepts, are also analyzed in this work. Especially, the DC-link capacitors have a major impact on the system dynamics of the overall coupled system and are often designed to approximately decouple power converters in a dynamic sense (large DC-link capacitor values) and for a reduction of current and voltage ripple. On the one hand, large DC-link capacitor values decrease the immediate impact of

disturbances or load changes on the DC-link and build convenient conditions for an uncooperative control the coupled power converter system. But, on the other hand, large DC-link capacitor values decrease the achievable dynamic system behavior of the power converter systems and the economical competitiveness of the system. The utilization of cooperative MPC concepts in the coupled power converter system exhibited that the DC-link capacitor values can be decreased by 90%, while achieving a high robustness against disturbances and a significant better overall control behavior compared to uncooperative control concepts.

---

## Kurzzusammenfassung

---

Anspruchsvolle Emissionsvorgaben und die zu erwartenden weiteren Verschärfungen dieser Vorgaben führen zu einer (Teil-) Elektrifizierung von Antriebssträngen in Transportsystemen. Diese Elektrifizierung wird durch den Einsatz von (Hochvolt-) Batterien, Brennstoffzellen, Leistungskonvertern und Elektromotoren in Antriebssträngen realisiert. Für die Entwicklung und den Test dieser Systeme werden leistungsstarke, genaue und hochdynamischen Testsysteme benötigt. Diese Testsysteme können in sogenannten Power-Hardware-in-the-Loop (P-HIL) Anwendungen für das Prüfen, Beanspruchen oder Belasten von Antriebsstrangkomponenten verwendet werden. Testsysteme für die genannten elektrischen Komponenten eines Antriebsstrangs bestehen üblicherweise aus (gekoppelten) Leistungskonvertern wie AC/DC-Konverter und DC/DC-Konverter. Auch im Bereich der erneuerbaren Energien, wo Photovoltaik-Anlagen oder Windkraft-Anlagen mit Batterien als Energiespeicher gekoppelt werden, finden derartige (gekoppelte) Leistungskonverter in sogenannten DC- oder AC-Micogrids vielfach Anwendung. Für all diese Aufgaben werden hochdynamische, effiziente und präzise geregelte Leistungskonverter benötigt.

Neueste Entwicklungen im Bereich der Wide-Band-Gap Halbleiter auf Basis von Siliziumkarbid oder Galliumnitrid weisen eine signifikante Verringerung der Schaltverluste für Leistungsschalter, im Vergleich zu IGBT- oder Silizium-MOSFET-Technologien, auf. Durch diese Reduktion kann die Effizienz von Leistungskonvertern erhöht werden und gleichzeitig können auch höhere Schaltfrequenzen erreicht werden, wodurch die Systemdynamik zusätzlich erhöht werden kann.

Um die Anforderungen an Leistungskonverter, bei einer gleichzeitigen Nutzung des Potenzials von Wide-Band-Gap Halbleitern, zu erfüllen, sind für die betrachteten Leistungskonverter optimale High-Speed Regelungsstrategien erforderlich, wobei Abtastzeiten im Bereich von einigen zehn  $\mu\text{s}$  erreicht werden müssen.

Der industrielle Standard für die Regelung von Leistungskonvertern basiert auf (kaskadierten) linearen Reglern wie PI- und PID-Reglern, welche um einen festen Betriebspunkt eine gute Regelgenauigkeit aufweisen. Andere Regelungskonzepte basieren auf exakter Eingangs-Ausgangs-Linearisierung, passivitätsbasierte Me-

thoden oder  $H_\infty$ -Regler. Diese Methoden bieten allerdings keine Möglichkeit zur systematischen Berücksichtigung von Systembeschränkungen. Daher ist in der Forschung der Fokus auf modellbasierte optimale Regelungskonzepte gerichtet, wobei modellprädiktive Regelungskonzepte (MPC) den Schwerpunkt bilden.

Modellprädiktive Regelungskonzepte bieten die Möglichkeit, Systembeschränkungen wie Zustands- und Stellgrößenbeschränkungen systematisch zu berücksichtigen, während auch der gesamte Betriebsbereich eines Systems genützt werden kann. Derzeitige MPC-Konzepte für Leistungskonverter nutzen diese Potentiale nur zum Teil, da MPCs für Leistungskonverter typischerweise nur kurze Prädiktionshorizontlängen im Bereich von ein bis zwei Schritten aufweisen. Diese kurzen Prädiktionshorizontlängen resultieren daraus, dass bisherige Konzepte eine signifikante (exponentielle) Erhöhung der Rechenzeit bei einer Verlängerung des Prädiktionshorizonts aufweisen, womit eine Erhöhung der Schaltfrequenzen und eine daraus herrührende Erhöhung der Systemdynamik auf Basis von Wide-Band-Gap Halbleitern konterkariert wird. Allerdings ist ein langer Prädiktionshorizont in Bezug auf die Systemstabilität im geschlossenen Regelkreis und die Möglichkeit zur Einbeziehung zukünftiger bekannter Änderungen von Sollwerten oder Störungen wünschenswert. Nichtlineare online optimierenden MPC Strategien bieten die Möglichkeit, längere Prädiktionshorizonte zu realisieren und gleichzeitig die harten Echtzeitanforderungen zu erfüllen. In der Literatur erreichen online-optimierende MPC-Strategien derzeit eine mittlere Prädiktionshorizontlänge von bis zu 7 Schritten, berücksichtigen jedoch nicht vollständig die Systembeschränkungen.

In der aktuellen Forschung werden hauptsächlich digitale Signalprozessoren (DSP) als Plattform für die Implementierung von MPCs verwendet. Die Entwicklungen im Bereich der FPGAs (Field Programmable Gate Array) in den letzten Jahren ermöglichen eine parallele Abarbeitung von Algorithmen und parallele Berechnungen in Hardware. Daher können FPGA-Plattformen im Vergleich zu DSPs hinsichtlich einer Verringerung von Rechenzeiten vorteilhaft sein, wenn ein MPC-Algorithmus die Fähigkeit von FPGAs zur parallelen Berechnung in Hardware nutzt. FPGAs wurden bisher im Wesentlichen nur für MPC-Methoden mit Prädiktionshorizontlängen von ein bis zwei Schritten verwendet.

Diese Arbeit umfasst und beschreibt daher die Entwicklung von schnellen nichtlinearen online-optimierenden modellprädiktiven Regelungsstrategien mit langen Prädiktionshorizonten für Leistungskonverter (AC/DC- und DC/DC-Konverter), welche für eine Implementierung auf FPGAs zugeschnitten sind. Die entwickelten MPC-Strategien in dieser Arbeit basieren auf mathematischen Modellen der Leistungskonverter. Diese Modelle müssen das Systemverhalten der Leistungskonverter genau abbilden, wobei diese gleichzeitig mathematisch effizient sein müssen. Für die Modellierung in dieser Arbeit wird ein Hüllkurvenansatz herangezogen. Ein Hüllkurvenmodellierungsansatz hat die Fähigkeit das dynamische Verhalten genau zu reproduzieren. Zudem weist dieser Hüllkurvenansatz gleichzeitig eine gute Skalierbarkeit in der Komplexität der Modellierung auf (Modellierungstiefe). Die Hüllkurvenmodelle des Konverters bilden die Grundlage für eine Modellreduktion,

um ein adäquates Reglermodell für die MPC abzuleiten.

Die Hauptregelungsaufgabe der Regelungskonzepte für die betrachteten Leistungskonverter ist eine genaue Regelung der Ausgangsspannung unter Einhaltung der Systembeschränkungen wie Strombegrenzungen und Stellgrößenbeschränkungen. Diese Regelziele werden mit Kostenfunktionen formuliert, die in einem optimalen Steuerungsproblem (OCP) verwendet werden. Die in dieser Arbeit definierten Kostenfunktionen und die entwickelte Lösungsmethode für dieses OCP sind so konzipiert, dass nur Additionen, Subtraktionen und Multiplikationen erforderlich sind und eine erhebliche Anzahl von Operationen und Aufgaben parallel berechnet werden können. Dies ergibt ideale Voraussetzungen für eine Implementierung auf einem FPGA. Durch Simulationsstudien werden die MPCs für den AC/DC- und DC/DC-Konverter hinsichtlich des Verhaltens im geschlossenen Regelkreis, der Folgegenauigkeit von Trajektorien und der Robustheit gegenüber Störungen analysiert. Darüber hinaus wird der Einfluss des realisierten langen Prädiktionshorizonts auf die Regelgüte eingehend untersucht und die Regelperformance anderen Regelungskonzepten gegenübergestellt. Die Resultate zeigen die Vorteile der in dieser Arbeit entwickelten MPC-Konzepte. Darüber hinaus werden die MPCs auf einem FPGA implementiert und auf einem Hardware-in-the-Loop System getestet und hinsichtlich ihrer Regelgüte analysiert. Mit den entwickelten MPC Konzepten können lange Prädiktionshorizonte von bis zu dem 100-fachen der Abtastzeit und unter systematischer Berücksichtigung von Systembeschränkungen, bei Abtastzeiten im Bereich von  $20\ \mu\text{s}$ , erreicht werden. Mit diesen langen Prädiktionshorizonten ist es möglich zukünftige bekannte Sollgrößen- und Laständerungen systematisch in der Berechnung der Stellgrößen zu berücksichtigen.

Zusätzlich wird die MPC für den DC/DC-Konverter zur Emulation eines Batteriehaltens am Ausgang des DC/DC-Konverters verwendet. Es wird ein gutes Batterieemulationsverhalten bei fordernden Lastverläufen erzielt, womit diese Regelungsstrategie auch für einen Batterieemulator zum Einsatz kommen kann. Dies zeigt die Vielseitigkeit der entwickelten MPC-Strategie.

Bei gekoppelten Leistungskonvertersystemen, die beispielsweise in den genannten Testsystemen oder auch in DC- und AC-Microgrids auftreten, werden die Konverter normalerweise unabhängig voneinander geregelt und ihre dynamische Wechselwirkung wird lediglich als Störung für die Regelung aufgefasst (unkooperative Regelung). In dieser Arbeit wird untersucht, ob und wie durch einen Informationsaustausch oder die Einbeziehung des gesamten gekoppelten Systems in den Entwurf eines Regelungskonzepts, das Gesamtsystemverhalten verbessert werden kann. Es werden kooperative MPC-Konzepte für gekoppelte Leistungskonverter entwickelt, die auf die vorgestellten MPCs mit langem Prädiktionshorizonten für den AC/DC- bzw. DC/DC-Konverter basieren. Im Speziellen werden die langen Prädiktionshorizonte vorteilhaft genutzt, um die Regelgüte des Gesamtsystems zu verbessern.

In dieser Arbeit wird gezeigt, dass durch einen Informationsaustausch (Datenaustausch) des prädizierten Systemverhaltens zwischen den MPCs der Konverter die

Regelgüte der gekoppelten Konverter, im Vergleich zu den typischen unkooperativen Regelungsstrategien gekoppelter Konverter, signifikant verbessert werden kann. Insbesondere für Sollwertänderungen und bekannte Laständerungen, können für die entwickelten verteilten (distributed) MPCs sehr ähnlich Regelgüten wie bei einer zentralen MPC, bei der eine MPC das gesamte gekoppelte System regelt, erreicht werden. In dieser Arbeit wird eine zentrale MPC zum Benchmarking der Regelgüten entwickelt. Üblicherweise sind zentrale MPCs die Referenz in Hinsicht auf die erreichbaren Regelgüten, wobei jedoch eine Echtzeitimplementierung schwer zu realisieren ist. Die entwickelten verteilten MPCs ermöglichen eine Echtzeitimplementierung bei der der Datenaustausch vollständig parallel zu den MPC-Berechnungen durchgeführt werden kann und für die Implementierung auf einem FPGA zugeschnitten ist. Darüber hinaus wird in dieser Arbeit auch das Potenzial zur Verkleinerung von Komponenten, zufolge des Einsatzes kooperativer MPC-Strategien für gekoppelte Leistungskonverter analysiert. Insbesondere haben die Zwischenkreiskondensatoren einen großen Einfluss auf die Systemdynamik des gesamten gekoppelten Systems und sind oft im dynamischen Sinne so ausgelegt, dass die Leistungskonverter näherungsweise dynamisch entkoppelt sind (große Zwischenkreiskondensatorwerte). Zudem tragen diese hohe Kapazitätswerte zur Verringerung der Strom- und Spannungswelligkeiten bei. Damit verringern große Zwischenkreiskondensatorwerte die unmittelbaren Auswirkungen von Störungen oder Laständerungen auf den Zwischenkreis und bilden daher günstige Bedingungen für eine unkooperative Regelung (dezentrale MPC, kein Datenaustausch) gekoppelter Konverter. Andererseits verlangsamen aber große Zwischenkreiskondensatoren die erreichbare Systemdynamik der gekoppelten Konverter und verringern die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit. Die Anwendung der entwickelten kooperativen MPC-Konzepte auf die gekoppelten Konverter hat gezeigt, dass die Zwischenkreiskondensatorwerte um 90% verringert werden können. Trotz dieser Verkleinerung wird eine hohe Robustheit gegenüber Störungen und eine deutliche Verbesserung der Regelgüte im Vergleich zu nicht kooperativen Regelungskonzepten erzielt.

---

# Contents

---

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	Control concepts for power converters . . . . .	3
1.2	Objectives of this work . . . . .	5
1.3	Structure of this thesis . . . . .	6
<b>2</b>	<b>AC/DC-Converter</b>	<b>11</b>
2.1	Introduction . . . . .	11
2.2	System Description and Mathematical Model . . . . .	13
2.2.1	Network Theory . . . . .	14
2.2.2	Envelope Modelling . . . . .	21
2.2.3	Model Reduction . . . . .	24
2.2.4	Controller Model . . . . .	30
2.3	Control Concept . . . . .	30
2.3.1	Current Balancing . . . . .	31
2.3.2	Control Input Parametrization . . . . .	32
2.3.3	Estimation and Prediction of the Grid Voltage . . . . .	34
2.3.3.1	Prediction . . . . .	34
2.3.3.2	Estimation . . . . .	36
2.3.4	Load Current Estimation . . . . .	38
2.3.5	Prediction of the System States - Magnus Expansion . . . . .	39
2.3.6	Prediction of the System States - Efficient Approach . . . . .	41
2.3.7	Optimization Task . . . . .	43
2.3.8	Optimization Procedure . . . . .	44
2.4	Simulation Results . . . . .	47
2.5	Hardware-in-the-Loop Tests . . . . .	62
2.5.1	Test Bench . . . . .	62
2.5.2	Implementation . . . . .	62
2.5.3	HIL Measurement Results . . . . .	64
2.6	Conclusions and Outlook . . . . .	76

<b>3</b>	<b>DC/DC-Converter</b>	<b>77</b>
3.1	Introduction . . . . .	77
3.2	System Description and Model . . . . .	79
3.2.1	Full Modell . . . . .	79
3.2.2	Envelope Model . . . . .	83
3.2.3	Reduced Envelope Model . . . . .	84
3.3	Control Concept . . . . .	86
3.3.1	Current Balancing . . . . .	87
3.3.2	Load Current Estimation . . . . .	88
3.3.3	Control Input Parametrization . . . . .	89
3.3.4	Prediction of the System States . . . . .	89
3.3.5	Optimization Problem . . . . .	90
3.4	Simulation Results . . . . .	94
3.5	Hardware-in-the-Loop Tests . . . . .	103
3.5.1	HIL Description and Implementation Details . . . . .	103
3.5.2	HIL Results . . . . .	104
3.6	FPGA Clock Frequency Investigations . . . . .	107
3.7	Battery Emulation . . . . .	109
3.7.1	Battery Model . . . . .	110
3.7.2	Battery Behavior Prediction . . . . .	113
3.7.3	Power Distribution Unit - Cable Resistor Estimation . . . . .	113
3.7.4	Hardware-in-the-loop Measurements . . . . .	115
3.8	Conclusions and Outlook . . . . .	125
<b>4</b>	<b>Coupled Converters</b>	<b>127</b>
4.1	Introduction . . . . .	127
4.2	System Description and Model . . . . .	130
4.3	Control Concepts . . . . .	132
4.3.1	Cost Function . . . . .	133
4.3.2	Optimization Procedure . . . . .	133
4.3.2.1	Distributed MPC - no data transfer (NT) . . . . .	135
4.3.2.2	Distributed MPC - uni-directional data transfer (UT) . . . . .	136
4.3.2.3	Distributed MPC - bi-directional data transfer (BT) . . . . .	136
4.3.2.4	Centralized MPC (C) . . . . .	137
4.4	Simulation Results . . . . .	137
4.5	Implementation and Application Aspects . . . . .	143
4.6	Conclusions . . . . .	145
<b>5</b>	<b>Conclusions and Outlook</b>	<b>147</b>
5.1	Conclusions . . . . .	147
5.2	Outlook . . . . .	152

<b>A</b>	<b>Appendix AC/DC-Converter</b>	<b>153</b>
<b>B</b>	<b>Appendix DC/DC-Converter</b>	<b>157</b>
B.1	Switching Functions . . . . .	157
B.2	System Parameters . . . . .	157