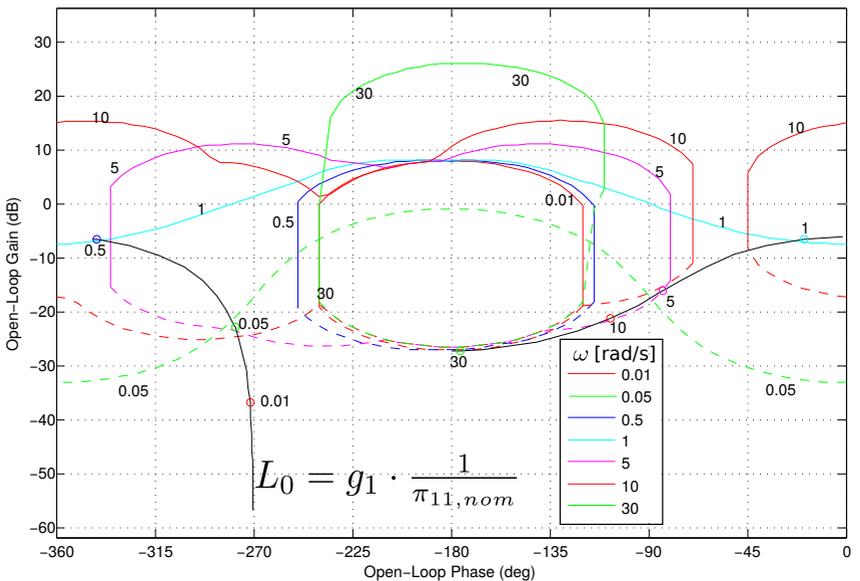


Christopher Masjosthusmann

Ein neuartiger Ansatz der robusten Regelung für das Lastmanagement in batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen



Berichte aus dem Fachgebiet
Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik

Band 7

Ein neuartiger Ansatz der robusten Regelung für das Lastmanagement in batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen

Von der Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik
der Universität Paderborn

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing Christopher Masjosthusmann

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker

Zweiter Gutachter: Dr.-Ing. habil. Ulrich Büker

Tag der mündlichen Prüfung: 25.04.2018

Paderborn 2018

Diss. EIM-E/337

Berichte aus dem Fachgebiet Leistungselektronik und
Elektrische Antriebstechnik

Band 7

Christopher Masjosthusmann

**Ein neuartiger Ansatz der robusten Regelung
für das Lastmanagement in batteriebetriebenen
Elektrofahrzeugen**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag
Aachen 2018

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.: Paderborn, Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6047-8

ISSN 1862-3492

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand im Rahmen des EU geförderten Projektes eFuture sowie während meiner anschließenden Tätigkeit als Functional Safety Manager, jeweils bei der HELLA GmbH & Co. KGaA. Mein Promotionsstudium habe ich als externer Doktorand am Lehrstuhl „Leistungselektronik und elektrische Antriebstechnik“ der Universität Paderborn abgelegt.

Zuerst gebührt mein Dank Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker und Dr.-Ing. habil. Ulrich Büker, die meine Dissertation betreut und begutachtet haben. Für die konstruktive Kritik, Unterstützung, Anregungen und Geduld bei der Erstellung der Arbeit möchte ich mich herzlichst bedanken.

Ebenfalls möchte ich mich bei meinen Kollegen Dr. Ulrich Köhler und Nikolaus Decius bedanken, die mir mit viel Geduld, Interesse und Hilfsbereitschaft zur Seite standen. Bedanken möchte ich mich für die zahlreichen interessanten Diskussionen, die maßgeblich dazu beigetragen haben, dass diese Arbeit in dieser Form vorliegt.

Auch möchte ich Prof. Yossi Chait (Ph.D.) danken, der mir freundlicherweise kostenlos eine Lizenz der QFT-Toolbox sowie Vorlesungsvideos zur QFT zur Verfügung gestellt hat.

Meiner Frau Qian Masjosthusmann danke ich besonders für den starken moralischen und partnerschaftlichen Rückhalt über die gesamte Dauer des Promotionsstudiums. Auch möchte ich mich bei meinen beiden Kindern Kai und Annabella Masjosthusmann bedanken, die mir Sinn und Antrieb im Leben geben.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern Ferdinand und Margareta Masjosthusmann bedanken, die mich während meines gesamten Studiums unterstützt haben und mir stets Rückhalt gaben. Meiner gesamten Familie,

einschließlich meiner lieben Brüder Hendrik und Maximilian Masjosthusmann, möchte ich für die Liebe danken, die sie mir jeden Tag schenken.

Angesprochen auf seine vielen Fehlschläge bei der Entwicklung der Glühbirne soll Thomas Alva Edison geantwortet haben: „Ich habe nicht tausend Mal versagt. Die Glühbirne war eine Erfindung in tausend Schritten.“¹ Auch mein Promotionsstudium verbunden mit meinen Pflichten als junger Familienvater und Ehemann bestand aus mindestens „1000 Schritten“. „Erfolg“, so heißt es, „bedeutet nicht, dass man nicht versagt, sondern dass man von Versagen zu Versagen geht, ohne auch nur im Geringsten an Begeisterung nachzulassen.“² Hiermit möchte ich jeden Leser dazu inspirieren, sich von Stolpersteinen nicht entmutigen zu lassen, sondern sie als Trittsteine anzusehen, die es uns ermöglichen zu lernen und somit Fortschritt zu machen.³

Nanjing, im Mai 2018

Christopher Masjosthusmann

¹ Thomas Edison, zitiert von Zorian Rotenberg in: „To Succeed, You Must Fail, and Fail More“, 13. November 2013, insightsquared.com.

² Dieses Zitat ist mehreren Urhebern zugeschrieben worden, unter anderem auch Abraham Lincoln und Winston Churchill.

³ Dieser Absatz ist inspiriert von einer Ansprache von Lynn G. Robbins vom 31.03.2018, Generalkonferenz HLT 2018.



Abstract of the dissertation:

**Ein neuartiger Ansatz
der robusten Regelung für das Lastmanagement
in batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen**

by Mr. Christopher Masjosthusmann

Limited fossil energy resources affect the individual mobility of today and the future. A key technology to solve the transport energy problem is the Battery Electric Vehicle (BEV). The battery of a BEV is the bottleneck in terms of range and costs per capacity. This work presents the development of a vehicle energy management system for a single source BEV aiming at reducing this bottleneck. It especially discusses a novel load management strategy aimed at reducing the energy losses of the high voltage traction battery, thus improving the vehicle range per installed capacity. The way to reach this goal is to smooth the battery current by balancing the load of components inside the electrified vehicle. The energy management system acts then as a "virtual capacitor": it reduces the fluctuations around the floating average battery current by balancing electrical loads. The reduced stress to the battery by reducing peak currents and fluctuations in general might increase the battery lifetime or leads to less restrict power density requirements in favor of a higher energy density (and in favor of a higher range or lower battery costs).

A novel design procedure is developed in order to achieve a smoothed battery current by applying the Quantitative Feedback Theory to design a robust stable MIMO controller in the presence of parametric plant uncertainties and nonlinearities. Inside the prototype vehicle the MIMO controller influences the electrical heater to heat the passenger cabin and the biggest load inside the vehicle: the drivetrain itself. Theoretically an range increase of up to 3,462 % is reached. While on the one hand the heater is predestined to be influenced by the energy management, because of the big time constant to heat the passenger cabin - to influence the drivetrain power on the other hand is quite critical in terms of driver acceptance. Therefore the influence of this function must be limited to a level that the driver accepts, which is therefore underpinned with a driver acceptance study.



Zusammenfassung der Dissertation:

**Ein neuartiger Ansatz
der robusten Regelung für das Lastmanagement
in batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen
des Herrn Christopher Masjosthusmann**

Begrenzte Vorräte fossiler Energiequellen beeinflussen die individuelle Mobilität von heute und morgen. Eine Schlüsseltechnologie, um dieses Energieproblem zu lösen, ist das batteriebetriebene Elektrofahrzeug (BEV). Der „Flaschenhals“ des BEV in Bezug auf Reichweite und Kosten pro Kapazität ist die Batterie. Diese Arbeit beschreibt die Entwicklung eines Fahrzeugenergiemanagements für ein BEV zur Reduzierung dieses „Flaschenhalses“. Das heißt im speziellen diskutiert sie eine neuartige Lastmanagementstrategie: Diese soll die Energieverluste am Innenwiderstand der Traktionsbatterie reduzieren, um so die Reichweite pro installierter Batterie-Kapazität zu erhöhen. Dafür soll das Lastmanagement den Batteriestrom glätten, es verhält sich also wie ein „virtueller Kondensator“. Die Stromschwankungen um den Mittelwert des Batteriestroms werden reduziert, indem die einzelnen Lasten balanciert werden. Die reduzierte Belastung der Batterie, durch Reduzierung von Spitzenströmen und Stromschwankungen im Allgemeinen, könnte die Lebensdauer der Batterie erhöhen und zu weniger restriktiven Anforderung an die Leistungsdichte der Batterie führen, zum Vorteil einer höheren Energiedichte (diese wiederum bedeutet eine höhere Reichweite oder niedrigere Batterie-Kosten). Um einen geglätteten Batteriestrom zu erreichen, wurde eine neuartige Entwurfsmethodik entwickelt. Dabei kommt die Methode der „Quantitative Feedback Theory“ zum Einsatz, für den Entwurf eines robust-stabilen MIMO-Reglers in der Gegenwart von parametrischen Unsicherheiten und Nichtlinearitäten der Regelstrecke. Im Prototypen-Fahrzeug beeinflusst der MIMO-Regler die elektrische Heizung zur Erwärmung der Fahrgastzelle, sowie die größte elektrische Last: den Antriebsstrang selbst. Theoretisch wird eine Reichweitenerhöhung von bis zu 3,462 % im Prototypen erreicht. Während die Heizung für die Beeinflussung prädestiniert ist, aufgrund der hohen Zeitkonstante zur Erwärmung der Fahrgastzelle, ist demgegenüber der Einfluss auf den Antriebsstrang kritisch in Bezug auf die Fahrerakzeptanz. Daher muss der Einfluss der Funktion auf ein Maß beschränkt sein, das der Fahrer akzeptiert. Dies wird mit einer Fahrerakzeptanzstudie untermauert.

Inhaltsverzeichnis

Akronyme	iv
Symbolverzeichnis	vi
1 Möglichkeiten des Energiemanagements in Elektrofahrzeugen	1
1.1 Vision Elektromobilität - Möglichkeiten und Hindernisse	1
1.2 Lastmanagement als Komponente zur Reichweitenerweiterung . . .	2
1.3 Gangart der Untersuchung zur Beantwortung der zentralen Forschungsfrage	5
1.4 Schwerpunkt der Untersuchung	6
1.5 Aufbau der Arbeit	6
2 Schlüsseltechnologien der Elektromobilität	7
2.1 Batterien als Speicher für den Einsatz in Elektrofahrzeugen	7
2.2 Elektroantriebe für Elektrofahrzeuge	11
2.3 Elektrifizierte Verbraucher und Lastmanagement	15
2.4 Regelungstechnik	18
2.5 Zusammenfassung des Kapitels	22
3 Lastmanagement im Elektrofahrzeug - Ansatz für ein neuartiges Verfahren zur Erweiterung der Reichweite	23
3.1 Hypothese und Konzeption - Erweiterung der Reichweite von Elektrofahrzeugen mithilfe eines Lastmanagements	23
3.2 Ansatz: Anwendung von Methoden der klassischen Regelungs- technik	25
3.3 Erörterung des Ansatzes - Randbedingungen, Vergleich und Po- tential	29
3.3.1 Definition der Randbedingungen	29
3.3.2 Diskussion anderer Ansätze	32
3.3.3 Potential des Lastmanagement Ansatzes	34

3.4	Auswahl einer geeigneten Methode der Regelungstechnik	39
3.4.1	Anforderungen an die Methode	39
3.4.2	Bewertung regelungstechnischer Methoden basierend auf den Anforderungen	40
3.4.3	Auswahl einer geeigneten regelungstechnischen Meth- ode: Quantitative Feedback Theory	42
3.5	Zusammenfassung des Kapitels	46
4	Umsetzung des neuartigen Ansatzes – Verfahrensentwicklung, Simulation und Prototypenverifikation	48
4.1	Systemmodellierung	48
4.1.1	Fahrzeugdynamik	49
4.1.2	Antriebsstrang	50
4.1.3	Hochvolt-Batterie	50
4.1.4	Zwischenkreiskondensator und Vorladeschaltung	51
4.1.5	DC/DC-Wandler	52
4.1.6	PTC-Heizung und 12 V-Lasten	52
4.1.7	Fahrer und Fahrpedal	53
4.1.8	Temperaturabhängigkeiten	54
4.1.9	Vor-Validation des Modells	55
4.2	Umsetzung im Prototypen	57
4.2.1	Versuchsfahrzeug und Versuchsumgebung	57
4.2.2	Entwurf des Energiemanagementsystems - Lastmanagement und weitere Funktionen	58
4.2.3	Beschreibung des Verfahrens zum Entwurf des Lastmanagement-Reglers	65
4.2.4	Implementierung des Energiemanagementsystems	87
4.2.5	Verifikation des Energiemanagementsystems	100
4.3	Erweiterung der Methode des Lastmanagements auf $n \times n$ - und $n \times m$ -Systeme	101
4.3.1	Theoretisches Verfahren für $n \times n$ -Systeme	101
4.3.2	Theoretisches Verfahren für $n \times m$ -Systeme	105
4.3.3	Entwurf und Simulation anhand einer Beispiel- konfiguration	106

4.3.4	Theoretische Überlegungen zum Entwurf eines $n \times n$ - Reglers	110
4.4	Zusammenfassung des Kapitels	112
5	Qualitative und quantitative Bewertung des neuartigen Ver- fahrens	113
5.1	Mathematische Analyse und Rechnersimulation zur Er- weiterung der Reichweite	113
5.2	Messungen zur Verifikation der Implementierung	114
5.3	Fahrsimulatorstudie zur Validierung der Hypothesen und zur Betrachtung des Einflussfaktors Mensch	119
5.4	Bewertung der Leistungsfähigkeit des Verfahrens	126
6	Wesentliche Erkenntnisse und Entwicklungsmöglichkeiten bezüglich des Lastmanagements für Elektrofahrzeuge	128
6.1	Die wichtigsten Erkenntnisse zur Reichweitereweiterung per Lastmanagement	128
6.2	Erweiterungsmöglichkeiten des entwickelten Lastmanagement-Verfahrens	130
6.3	Weitere Einsatzmöglichkeiten des Verfahrens	131
6.4	Zukünftige Möglichkeiten des Energiemanagements in Elektro- fahrzeugen	132
A	Subjektive Ergebnisse der Fahrsimulatorstudie - Abbildungen und Tabellen	I
A.1	Subjektive Bewertung verschiedener Fahrsituationen auf einer Skala von 1-15 pro Fahrpedalreaktion	I
A.2	Befragung der Testpersonen nach der Fahrt im Fahrsimulator	XII
	Abbildungsverzeichnis	XVIII
	Tabellenverzeichnis	XXV
	Glossar	XXVII
	Literaturverzeichnis	XXXVIII