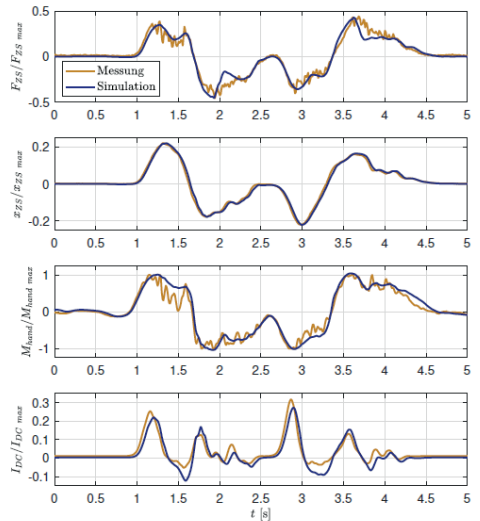
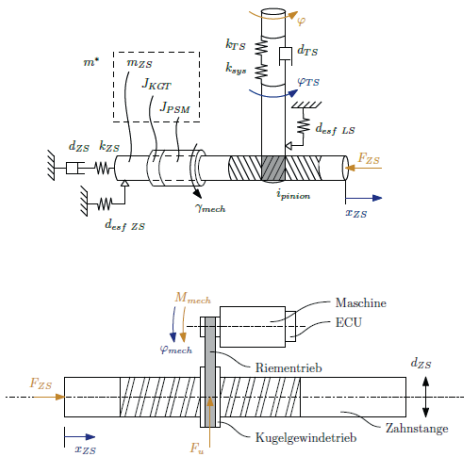


**Forschungsberichte**  
**Elektrische Antriebstechnik und Aktorik**

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

**Nikolaus Reiland**

**Simulative Analyse des elektrischen Leistungsbedarfs elektromechanischer Fahrwerkregelsysteme**



# **Simulative Analyse des elektrischen Leistungsbedarfs elektromechanischer Fahrwerkregelsysteme**

**Nikolaus Reiland**

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. Hellmut Hupe

Die Dissertation wurde am 06.12.2019 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Elektro- und Informationstechnik am 08.04.2020 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 28.05.2020 statt.



Forschungsberichte Elektrische Antriebstechnik und Aktorik

Band 43

**Nikolaus Reiland**

**Simulative Analyse des elektrischen Leistungs-  
bedarfs elektromechanischer Fahrwerkregelsysteme**

Shaker Verlag  
Düren 2020

**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.: München, Univ. der Bundeswehr, Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7715-5

ISSN 1863-0707

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

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

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

*Man bemerkt nie, was schon getan ist:  
man sieht bloß, was noch zu tun ist,  
und wenn man seine Arbeit nicht liebte,  
könnte man den Mut verlieren...*

Marie Curie



# Danke

An dieser Stelle möchte ich einigen Personen danken ohne deren Unterstützung ich diese Arbeit wohl weder begonnen, noch vollendet hätte.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling möchte ich für die Betreuung der Arbeit, den gewährten inhaltlichen Freiraum, viele sehr motivierende Gespräche, Diskussionen und Anregungen sowie die exzellenten Arbeitsbedingungen am Institut danken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Hellmut Hupe danke ich für die initiale Motivation eine Promotion anzustreben und natürlich für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jochen Schein danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Danke an alle Mitarbeiter des Lehrstuhls für elektrische Antriebstechnik und Aktorik und der FEAAM GmbH,

Danke Benny, für jeden einzelnen „Coffee-Talk“,

Danke, Frank L. und Frank G., für die organisatorische Unterstützung,

Danke Kilian, für viele Diskussionen und lustige Rätsel,

Danke an meine Studenten Christian, Andreas und Dominik,

Danke Basti, Maddes und Sinan, für die vielen „sozialen Montage“,

Danke Johannes, für das gemeinsame Innehalten zur goldenen Stunde,

Danke Birni, für's Bouldern und Biken,

Danke Stefan, für die vielen gemeinsamen Bike-Touren,



Danke Bärbel, für's Korrekturlesen und die jederzeit erreichbare „Stauseelsorge“,

Danke Basti und Kilian, – nochmal – für's Korrekturlesen,

Danke Mama, danke Papa, für eure unermüdliche Unterstützung und eure Geduld,

Danke Momo, Wile, Bandit und Kessy, für die Erkenntnis, dass es der Moment ist, der zählt,

Danke Nina, für deine bedingungslose Unterstützung und Liebe.

# Kurzfassung

Die steigende Anzahl elektrischer Verbraucher sowie deren erhöhter Leistungsbedarf resultiert in immer anspruchsvolleren Anforderungen an KFZ-Bordnetze. Insbesondere dynamische Fahrwerkregelsysteme stellen dabei hohe Anforderungen an deren elektrische Energieversorgung, damit das Fahrzeug für den Fahrer zu jederzeit kontrollierbar bleibt und Funktionseinbußen durch eine Leistungsunterdeckung möglichst ausgeschlossen werden können. Aktuell werden dazu die betreffenden Systeme in einem Vorserienfahrzeug verbaut und der Leistungsbedarf in realen Fahrversuchen ermittelt. Dadurch sind diese Informationen erst in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium verfügbar.

Aufgrund vieler Wechselwirkungen der einzelnen Systeme, der späten Information über den kumulierten Leistungsbedarf im dynamischen Fahrmanöver und immer kürzere Entwicklungszeiten gestaltet sich die korrekte Dimensionierung der Bordnetzkomponenten zunehmend schwierig. Zudem steigt das Risiko für kostenintensive Redesign-Schleifen.

Vor diesem Hintergrund wird in dieser Arbeit die Möglichkeit zur Ermittlung des elektrischen Leistungsbedarfs aktiver Fahrwerkregelsysteme mit Hilfe von Simulationsmodellen untersucht. Der Fokus liegt hierbei zunächst auf der Herleitung von Komponentenmodellen der betrachteten Systeme, welche insbesondere eine Abbildung des elektrischen Leistungsbedarfs beinhalten. Dazu wurden diese Modelle zunächst aufgebaut, deren Parameter mit Hilfe von Prüfstandsmessungen identifiziert und deren Genauigkeit gegen Prüfstands- sowie

Fahrzeugmessungen validiert.

In einem zweiten Schritt wurden diese Modelle in eine Gesamtfahrzeugsimulation integriert. Dieses kombinierte Modell wurde nun abermals auf Fahrzeug- wie auch auf Komponentenebene sowohl für stationäre wie auch für dynamische Fahrmanöver validiert. Es erlaubt nun die Abschätzung des überlagerten elektrischen Leistungsbedarfs mehrerer aktiver Fahrwerkregelsysteme in dynamischen Fahrmanövern.

# Abstract

The increasing amount of active chassis control systems and their enhanced electrical power demand lead to more severe requirements to the electrical vehicle boardnet. Especially dynamic chassis control systems lead to high demands regarding their electrical power supply to ensure controllability of the vehicle for the driver as well as to prevent malfunctions due to power shortage. Currently these systems are mounted in a pre-series vehicle to obtain their power demand, using real driving maneuvers. Therefore, these information are available only at an advanced stage during the development process.

Due to many interdependencies of the systems, late information on their accumulated power demand and more and more short-term development cycles, correct dimensioning of board net components becomes more difficult. Even the risk of cost-intensive redesign-loops is increased.

Against this background, this thesis deals with the possibility to determine the electrical power demand of active chassis control systems using simulation-models. At first, focus lies on the derivation of component-models of the chassis control systems, which especially incorporate correct representation of their electrical power demand. Therefore, models of the components were derived, their parameters were identified using test-bench measurements and their accuracy was validated against test-bench as well as vehicle measurements.

During a second step, these models were integrated into a combined vehicle dynamics simulation. This combined model was again validated against static and dynamic driving maneuvers on vehicle - and

system-level. It now allows for predictions regarding the accumulated electrical power demand of several chassis control systems during dynamic driving maneuvers.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>xi</b>
<b>1 Einleitung und Motivation</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen</b>	<b>7</b>
2.1 Kraftübertragung am Reifen . . . . .	8
2.2 Reifenmodelle . . . . .	13
2.3 Querdynamik . . . . .	14
2.4 Längs- und Vertikaldynamik . . . . .	19
2.5 Fahrwerkregelsysteme . . . . .	20
2.6 Fahrzeugmodell IPG CarMaker . . . . .	22
2.7 Bordnetze . . . . .	23
<b>3 Gesamtsystem und Fahrmanöver</b>	<b>27</b>
3.1 Aufbau . . . . .	27
3.2 Fahrmanöver . . . . .	30
3.2.1 ABS-Bremmung . . . . .	31
3.2.2 Lenkwinkelrampe . . . . .	31
3.2.3 Spurwechsel . . . . .	32
3.2.4 Gebremster Spurwechsel . . . . .	33

3.3	Fahrzeugmessungen . . . . .	33
<b>4</b>	<b>Modellierung der Lenksysteme</b>	<b>37</b>
4.1	Vorderachslenkung . . . . .	38
4.1.1	Modellierung . . . . .	40
4.1.2	Parameteridentifikation . . . . .	51
4.1.3	Validierung . . . . .	54
4.2	Überlagerungslenkung . . . . .	61
4.3	Hinterachslenkung . . . . .	64
4.3.1	Modellierung und Parameteridentifikation . . .	65
4.3.2	Validierung . . . . .	72
<b>5</b>	<b>Modellierung des Bremssystems</b>	<b>77</b>
5.1	Grundlagen Bremsen . . . . .	78
5.2	Antiblockiersystem (ABS) . . . . .	81
5.3	Electronic Stability Control (ESC) . . . . .	89
5.4	Rückförderpumpe und elektrische Maschine . . . . .	93
5.4.1	Modellstruktur . . . . .	95
5.4.2	Gleichstrommaschine . . . . .	96
5.4.3	Abbildung der Lastcharakteristik der Pumpe .	98
5.4.4	Ansteuerung der Pumpe . . . . .	100
5.5	Validierung auf Fahrzeugebene . . . . .	103
5.5.1	ABS-Bremung . . . . .	103
5.5.2	ESC-Eingriff . . . . .	110
5.6	Zusammenfassung . . . . .	114
<b>6</b>	<b>Validierung Gesamtsystem</b>	<b>115</b>
6.1	Lenkwinkelrampe . . . . .	116
6.2	Spurwechsel . . . . .	116
6.3	Gebremster Spurwechsel . . . . .	124

<b>7 Zusammenfassung</b>	<b>129</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>133</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>143</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>147</b>
<b>A Anhang</b>	<b>149</b>
A.1 Parameter des linearen Einspurmodells . . . . .	150
A.2 Parameter des EPS-Modells . . . . .	151
A.3 Parameter des Modells der Überlagerungslenkung . . .	152
A.4 Parameter des HAL-Modells . . . . .	152
A.5 Parameter des Bremsenmodells . . . . .	156