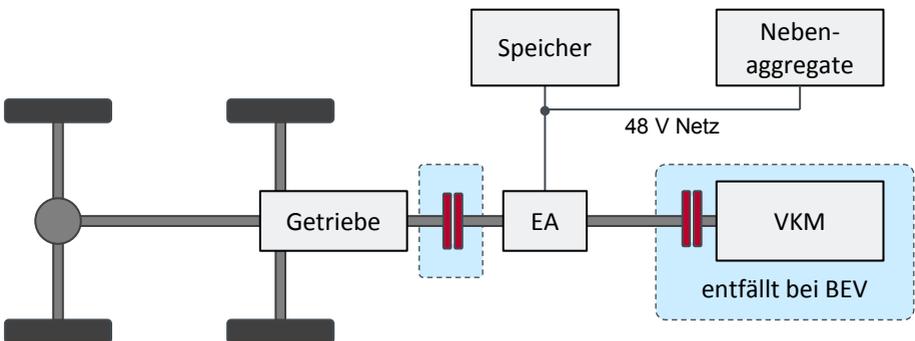


**Forschungsberichte**  
**Elektrische Antriebstechnik und Aktorik**

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

Andreas Baumgardt

# 48 V Energiespeicher im Kraftfahrzeug



# **48 V Energiespeicher im Kraftfahrzeug**

**Andreas Baumgardt**

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.)**

genehmigte Dissertation.

Gutachter:

1. Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling
2. Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker

Die Dissertation wurde am 09.10.2017 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Elektro- und Informationstechnik am 29.03.2018 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 27.04.2018 statt.



Forschungsberichte Elektrische Antriebstechnik und Aktorik

Band 31

**Andreas Baumgardt**

**48 V Energiespeicher im Kraftfahrzeug**

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.: München, Univ. der Bundeswehr, 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 978-3-8440-6064-5

ISSN 1863-0707

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)

## Kurzfassung

Die vorliegende Dissertation befasst sich mit verschiedenen Energiespeicheranwendungen in Kraftfahrzeugen auf der Spannungsebene 48 V. Das Ziel dieser Arbeit ist die Darlegung des ausgezeichneten Kosten-Nutzen-Verhältnisses von 48 V Systemen sowohl für Hybrid- als auch für rein elektrische Fahrzeuge. Mit der Betrachtung und Optimierung der jeweiligen Speichersysteme in dieser Arbeit kann ein Beitrag zur Attraktivitätssteigerung von Elektromobilität erbracht werden.

Nach einer Einleitung werden die Grundlagen von Batterie- und Kondensatorspeichern sowie von elektrischen Antriebssystemen im Automobilbereich betrachtet. Anschließend wird ein umfangreiches Simulationsmodell vorgestellt, welches zur Ermittlung von Verbrauchswerten von konventionellen Fahrzeugen, Hybrid- und Elektrofahrzeugen genutzt werden kann. Ein besonderer Fokus liegt hier auf den Energiespeichermodellen verschiedener Speichertechnologien.

Für die Anwendung in Hybridfahrzeugen wird die Optimierung des Rekuperationsspeichers detailliert betrachtet. Als Grundlage werden die Simulationsergebnisse des beschriebenen Modells verwendet. Nach einer Anforderungsanalyse wird ein Vergleich der Speichertechnologien Batterie- und Kondensatorspeicher für diese Anwendung durchgeführt. Insbesondere wird die Anbindungsoption des Speichers durch einen Gleichspannungswandler anhand einer Auslegung untersucht.

Weitergehend befasst sich die Arbeit mit der Thematik 48 V Traktion. Dieses vergleichsweise junge Forschungsgebiet ermöglicht die Darstellung hoher Traktionsleistungen heutiger Fahrzeuge auf einer sicheren Spannungsebene mit ausgezeichnetem Systemwirkungsgrad. Anhand von theoretischen und messtechnischen Untersuchungen werden die Eigenschaften des 48 V Traktionsspeichers analysiert. Im Vergleich zu Hochvolt-Speichern ergeben sich hier Vorteile durch die hohe Parallelisierung, welche eine deutliche Reduzierung der Systemkomplexität bewirkt.



# Danksagung

Der Aufwand und die notwendige Willensstärke auf dem Weg zum Dokortitel werden oft unterschätzt – so auch von mir. Dennoch bereue ich meine Entscheidung nicht, diesen Weg eingeschlagen zu haben. Meiner Zeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter verdanke ich meinen heutigen Wissensstand, ein ausgezeichnetes Netzwerk an fachlichen Kontakten sowie viele Freundschaften und besondere Erinnerungen.

An erster Stelle gilt mein besonderer Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling für die engagierte Betreuung meiner Arbeit. Durch viele Gespräche, Anregungen und das Vertrauen in meine Arbeit hat Herr Gerling mich während der gesamten Promotion durchgehend unterstützt, was die Durchführung dieser Arbeit erst möglich gemacht hat.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker danke ich für die bereitwillige Übernahme des Koreferates sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Lindenmaier für die Übernahme des Vorsitzes in der Prüfungskommission.

Eine besondere Erfahrung und eine große Unterstützung waren für mich das hervorragende menschliche Umfeld am Lehrstuhl. Ganz herzlich bedanke ich mich bei allen Kollegen und Begleitern an diesem Lehrstuhl für die tolle familiäre Atmosphäre. Hervorheben möchte ich hier die Familie Köbler, Herrn Dr.-Ing. Harald Hofmann, Herrn Dr.-Ing Benno Lange und Herrn Florian Bachheibl für fortwährende Unterstützung und Motivation.

Zuletzt gilt mein besonderer Dank meiner Frau Sara für das viele Verständnis und die Rücksichtnahme, was mir einen großen Rückhalt während der Arbeit gegeben hat.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1. Motivation.....	1
1.2. Zielsetzung.....	2
1.3. Gliederung der Arbeit.....	3
<b>2. Energiespeicher und Kraftfahrzeuge</b> .....	<b>5</b>
2.1. Speichertechnologien.....	5
2.1.1. Klassifizierung von Energiespeichern.....	5
2.1.2. Kondensatorspeicher .....	6
2.1.3. Lithium-Ionen-Batterie .....	14
2.2. Elektrische Antriebssysteme in Kraftfahrzeugen .....	22
2.2.1. 48 V Spannungsebene.....	22
2.2.2. Gliederung von Hybridfahrzeugen.....	23
2.2.3. Einsatzgebiete für Energiespeicher im Fahrzeug.....	26
<b>3. Simulationsmodell zur Bewertung von Speicherkonzepten</b> .....	<b>29</b>
3.1. Einordnung des Gesamtmodells .....	29
3.2. Überblick des Gesamtmodells.....	31
3.3. Fahrzeugmodell.....	33
3.4. Rekuperationssystem .....	40
3.4.1. Control / Regelung .....	41
3.4.2. Lithium-Ionen-Batterie .....	41
3.4.3. Supercap-Speicher .....	50
3.4.4. Elektrischer Antrieb .....	52
3.5. Verbrennungskraftmaschine.....	54

3.6.	Plausibilitätskontrolle des Simulationsmodells.....	56
3.6.1.	Fahrzyklen .....	56
3.6.2.	Fahrzeuge.....	58
3.6.3.	Simulation von Verbrauchswerten .....	59
<b>4.</b>	<b>48 V Rekuperationsspeicher .....</b>	<b>63</b>
4.1.	Anforderungen .....	63
4.1.1.	Energieinhalt und Leistung .....	63
4.1.2.	Allgemeine Kenngrößen.....	67
4.1.3.	Zusatzfunktionen .....	67
4.2.	Speichertechnologien.....	69
4.3.	Lithium-Ionen-Batterien.....	70
4.3.1.	Rekuperationsspeichermodul aus Batteriezellen .....	71
4.3.2.	Rekuperationspotential der Batteriemodule.....	75
4.3.3.	Alterung.....	84
4.3.4.	Betrachtung sonstiger Kenngrößen .....	85
4.4.	Superkondensatoren .....	86
4.4.1.	Speichermodul aus Superkondensatorzellen .....	86
4.4.2.	Rekuperationspotential .....	88
4.4.3.	Alterung von Supercaps .....	91
4.4.4.	Betrachtung sonstiger Kenngrößen .....	95
4.5.	Kombination von Speicher und Leistungselektronik.....	96
4.5.1.	Anforderungen an den DC/DC-Wandler .....	97
4.5.2.	Auslegung des Wandlers.....	98
4.5.3.	Mehrwert des DC/DC-Wandlers .....	105
4.5.4.	Hybridspeicher .....	107
4.6.	Vergleich der Speichertechnologien .....	108
<b>5.</b>	<b>48 V Traktionsspeicher .....</b>	<b>113</b>
5.1.	ISCAD – 48 V Traktion.....	113
5.2.	Zellkonfiguration .....	116

5.3. Theoretische Betrachtung parallel geschalteter Zellen .....	117
5.3.1. Kapazitätsabweichung von Zellmodulen .....	117
5.3.2. Einfluss der Parallelschaltung auf die Lebensdauer .....	119
5.3.3. Einfluss defekter Zellen auf den Gesundheitszustand des Batteriepacks ..	121
5.3.4. Battery Management System .....	123
5.3.5. Ausgleichsströme parallel geschalteter Zellen .....	125
5.3.6. Erkenntnisse der theoretischen Betrachtung.....	125
5.4. Messtechnische Untersuchung parallel geschalteter Zellen .....	126
5.4.1. Zellkontaktierung.....	126
5.4.2. Kapazitätsmessung .....	127
5.4.3. Versuchsdurchführung.....	129
5.4.4. Energiebilanz bei Reihen- und Parallelschaltung.....	133
5.5. Weiterführende Impulse zur 48 V Traktionsbatterie.....	137
<b>6. Fazit .....</b>	<b>141</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>143</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>149</b>
<b>Publikationen .....</b>	<b>151</b>
<b>Anhang.....</b>	<b>153</b>
A. Herleitungen zum Synchronwandler.....	153
B. Lebensdauerersuch mit Supercaps .....	154