

Patrick Weißkamp

## **Ladezustands- und Alterungs- schätzung für Energiespeicher im Kraftfahrzeug**

Messsysteme, Modellierung und  
Algorithmen

# Ladezustands- und Alterungsschätzung für Energiespeicher im Kraftfahrzeug – Messsysteme, Modellierung und Algorithmen

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs  
der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
an der Ruhr-Universität Bochum

von

Patrick Weißkamp

aus Essen

Bochum 2018

Dissertation eingereicht am: 03.10.2017  
Tag der mündlichen Prüfung: 26.02.2018  
1. Bericht: Prof. Dr.-Ing. Joachim Melbert  
2. Bericht: Prof. Dr.-Ing. Stefan Butzmann

Berichte aus der Elektrotechnik

**Patrick Weißkamp**

**Ladezustands- und Alterungsschätzung  
für Energiespeicher im Kraftfahrzeug**

Messsysteme, Modellierung und Algorithmen

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.: Bochum, 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 978-3-8440-6099-7

ISSN 0945-0718

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)

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Ziele und Gliederung der Arbeit . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Untersuchungsobjekt und Messszenarien</b>	<b>5</b>
2.1	Lithium-Ionen-Zellen . . . . .	5
2.1.1	Aufbau und Funktionsweise . . . . .	6
2.1.2	Kenngößen und Modellierungsansätze . . . . .	10
2.1.3	Alterung . . . . .	13
2.1.4	Übertragbarkeit von Ergebnissen . . . . .	17
2.1.5	Sicherheit . . . . .	18
2.1.6	Anwendung im Kfz . . . . .	18
2.2	Messziele und Randbedingungen . . . . .	20
2.2.1	Laboruntersuchungen . . . . .	21
2.2.2	Messung im Kraftfahrzeug . . . . .	23
<b>3</b>	<b>Messsysteme für Laboruntersuchungen an Li-Ionen-Zellen</b>	<b>25</b>
3.1	Stand der Technik . . . . .	25
3.2	Anforderungen . . . . .	33
3.3	Struktur und Systembeschreibung . . . . .	37
3.4	Zelltester . . . . .	40
3.4.1	Übersicht . . . . .	40
3.4.2	Analoge Stromsenke . . . . .	42
3.4.3	Strommessung und dynamisches thermisches Korrekturverfahren . . . . .	48
3.4.4	Mess- und Steuerungseinheit . . . . .	60
3.4.5	Automatisiertes Kalibrierungsverfahren . . . . .	68
3.4.6	Genauigkeit und Langzeitstabilität . . . . .	71

3.4.7	Gesamtaufbau . . . . .	74
3.5	Infrastruktur . . . . .	75
3.5.1	Zellkontaktierung . . . . .	75
3.5.2	Sicherheit und Überwachungseinrichtungen . . . . .	77
3.5.3	Software-Architektur . . . . .	79
<b>4</b>	<b>Zelluntersuchungen und Modellierung</b>	<b>85</b>
4.1	Stand der Technik . . . . .	85
4.1.1	Zelluntersuchungen . . . . .	85
4.1.2	Modellierung . . . . .	90
4.2	Alterungsstudie . . . . .	94
4.2.1	Untersuchungsobjekt . . . . .	95
4.2.2	Zeitlicher Ablauf . . . . .	95
4.2.3	Alterungsversuche . . . . .	96
4.2.4	Charakterisierungsumfang . . . . .	99
4.3	Ergebnisse und Modellierung . . . . .	100
4.3.1	Kapazität . . . . .	100
4.3.2	OCV-Spannung . . . . .	105
4.3.3	Zellimpedanz . . . . .	110
4.4	Gesamtmodell . . . . .	117
<b>5</b>	<b>Schätzverfahren</b>	<b>125</b>
5.1	Stand der Technik . . . . .	125
5.1.1	Direkte Messmethoden . . . . .	126
5.1.2	Modellbasierte Schätzverfahren . . . . .	128
5.1.3	Datenbasierte Verfahren . . . . .	131
5.1.4	Zusammenfassung und Verbesserungspotentiale . . . . .	132
5.2	Ladezustandsschätzung . . . . .	133
5.2.1	Stromintegration . . . . .	133
5.2.2	Ruhspeisungsmessung . . . . .	135
5.2.3	Ruhspeisungsschätzung mittels Zellmodell . . . . .	135
5.2.4	Zustandsschätzung mittels Kalman-Filter . . . . .	139
5.3	Kapazitätsschätzung . . . . .	143
5.3.1	Zweipunkt-Methode . . . . .	144
5.3.2	Kleinste-Quadrate-Schätzung . . . . .	147

5.3.3	Parameterschätzung mit Joint-Kalman-Filter . . . . .	149
5.3.4	Paralleles Schätzverfahren . . . . .	153
5.4	Innenwiderstandsschätzung . . . . .	161
5.4.1	Schätzverfahren . . . . .	161
5.4.2	Temperaturabhängigkeit . . . . .	163
5.4.3	Alterungsabhängigkeit . . . . .	164
5.5	Alterungsprognose . . . . .	166
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>169</b>
6.1	Zusammenfassung . . . . .	169
6.2	Ausblick . . . . .	172
<b>A</b>	<b>Mathematische Beschreibungen</b>	<b>175</b>
A.1	Dynamisches thermisches Verhalten des Shuntwiderstands . . . . .	176
A.2	Digitale Filter . . . . .	178
A.3	Zellmodell . . . . .	180
A.4	Zellmodelle für Schätzverfahren . . . . .	184
A.4.1	SoC-Schätzung . . . . .	184
A.4.2	Kapazitätsschätzung . . . . .	185
A.4.3	Widerstandsschätzung . . . . .	186
A.5	Beobachtbarkeit . . . . .	188
A.6	Extended Kalman Filter . . . . .	191
A.7	Kleinste-Quadrate-Schätzer . . . . .	194
A.7.1	Ordinary-Least-Squares . . . . .	194
A.7.2	Recursive Least Squares Estimation . . . . .	195
A.7.3	Nonlinear Recursive Least Squares Estimation . . . . .	196
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>197</b>
	<b>Symbole und Abkürzungen</b>	<b>221</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>225</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>233</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>235</b>