

# „Zustandserkennung von LiFePO<sub>4</sub>-Batterien für Hybrid- und Elektrofahrzeuge“

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der Ingenieurwissenschaften  
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur

Michael Andreas Roscher

aus Karl-Marx-Stadt

Berichter:

Universitätsprofessor Dr. rer. nat. Dirk Uwe Sauer

Universitätsprofessor Dr.-Ing. Armin Schnettler

Tag der mündlichen Prüfung: 04.11.2010



**Michael Roscher**

**Zustandserkennung von LiFePO<sub>4</sub>-Batterien  
für Hybrid- und Elektrofahrzeuge**

### **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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2010)

## **AACHENER BEITRÄGE DES ISEA**

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr. ir. Rik W. De Doncker  
Leiter des Instituts für Stromrichter-technik und  
Elektrische Antriebe der RWTH Aachen (ISEA)  
52056 Aachen

Copyright Shaker Verlag 2011

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9738-1

ISSN 1437-675X

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)

---

”The beauty of this  
is its simplicity.”

*Walter Sobchak, aus "The Big Lebowski"*

## Danksagung und Vorwort

Ganz so leicht, wie es der lässige Spruch vermuten lässt, war es dann doch nicht ganz. Was eine Promotion an Motivation und Nerven, vermeintlichen Urlaubstagen und Wochenenden kostet, hätte ich vorher nicht erwartet. Nichtsdestotrotz waren die letzten Jahre als Doktorand bei BMW eine wertvolle Erfahrung für mich, auf die ich auf keinen Fall hätte verzichten wollen.

Während dieser Zeit entstand die vorliegende Arbeit, die vom Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA) der RWTH Aachen, in Person von Herrn Prof. Dirk Uwe Sauer fachlich betreut wurde. Ihm möchte ich an dieser Stelle deshalb besonders danken, nicht nur weil er sich die Bürde der Betreuung eines in der Industrie promovierenden auferlegte, sondern vor allem, weil er mit seinem fachlichen Rat maßgeblich zum Gelingen meines Vorhabens beigetragen hat.

Mein Dank gilt außerdem Herrn Prof. Armin Schnettler für das Übernehmen des Korreferats.

Besonders danken möchte ich Herrn Dr. Jens Vetter, der mich in die Geheimnisse der Batterien eingeweiht und als mein BMW-interner Betreuer durch stets kritisches Hinterfragen und seine Anregungen einen entscheidenden Anteil auch an der letztendlichen Fertigstellung des Werkes hat. Herrn Siegfried Pint sei an dieser Stelle ebenfalls gedankt, da er mir überhaupt erst die Möglichkeit eröffnete bei BMW zu promovieren und mir trotz meiner intensiven Einbindung in laufende Projekte, immer die Freiheit einräumte, mich intensiv meiner wissenschaftlichen Tätigkeit zu widmen.

Den "kreativen Drei" von der Batteriefunktionsentwicklung, Dr. Oliver Bohlen, Dr. Jochen Abfalg und Bernhard Sessner gilt mein Dank für die vielen Diskussionen und "konspirativen" Treffen an der Kaffeemaschine und auch für ihr stoisches Erhören und Beantworten meiner unzähligen Fragen. Genauso sei hiermit auch den nicht namentlich genannten Kollegen, Praktikanten und Diplomanden gedankt, ohne die diese Arbeit sicher nicht in der Form möglich und die letzten Jahre für mich nicht so lehrreich und kurzweilig gewesen wären.

Nicht unerwähnt an dieser Stelle seien meine Eltern, denen ich nicht nur meine sehr gute Ausbildung verdanke, sondern die mich auch immer bei meinen Vorhaben unterstützt haben.

Schließlich danke ich ganz besonders meiner Freundin Sylvana, die meine Hochs und Tiefs der letzten Jahre ungewollt mit ertragen musste und es dennoch verstand, mir jedesmal Rückhalt und neue Motivation zu geben.

Ulm, den 21. Juni 2010



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation und Ziel . . . . .	1
1.2	Einführung in die Arbeit . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Lithium-Ionen-Sekundärbatterien</b>	<b>5</b>
2.1	Lithium-Ionen-Akkumulatoren und deren Anwendung . . . . .	5
2.2	Funktionsweise und Aufbau . . . . .	7
2.3	Überblick zur Technologieentwicklung . . . . .	10
2.4	Lithium-Ionen-Batterien mit $\text{LiFePO}_4$ -basierter Kathode . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Batteriespeichersysteme</b>	<b>15</b>
3.1	Anwendungsfälle und Anforderungen . . . . .	15
3.2	Architektur des Batteriesystems . . . . .	18
3.2.1	Dimensionierung . . . . .	18
3.2.2	Verschaltung . . . . .	19
3.2.3	Batterie-Elektronik . . . . .	22
3.2.4	Batterieladevorrichtungen für Automobilanwendungen und Ladeverfahren . . . . .	23
3.2.5	Integration . . . . .	24
3.3	Batteriekennwerte und Zustandsdaten . . . . .	25
3.3.1	Zellkenndaten . . . . .	25
3.3.2	Symmetrierter/unsymmetrierter Speicher . . . . .	26
3.3.3	Systemkennwerte . . . . .	27
3.3.4	SOC, SOF und SOH . . . . .	27
3.3.5	Batteriefunktionen . . . . .	29
<b>4</b>	<b>Batteriemodelle</b>	<b>31</b>
4.1	Hintergrund . . . . .	31
4.2	Physikalisch-chemische Batteriemodelle . . . . .	31
4.2.1	Teilchenmigration durch Diffusion . . . . .	32
4.2.2	Modell der porösen Elektrode . . . . .	33
4.2.3	Zwei-Phasentransformation, Shrinking-Core-Theorie und anisotrope Interkalation . . . . .	35
4.3	Elektrische Batteriemodelle . . . . .	39
4.3.1	Thevenin Ersatzschaltbild . . . . .	39
4.3.2	Constant Phase Element, ZARC, Warburg-Impedanz . . . . .	40

4.4	Elektrisch-thermisch gekoppelte, aufgelöste Batteriemodelle . . . . .	41
<b>5</b>	<b>Zellcharakterisierung und Modellierung</b>	<b>45</b>
5.1	Untersuchte Zellen und verwendetes Messequipment . . . . .	45
5.2	Ruhe-spannungseigenschaften . . . . .	46
5.2.1	Ruhe-spannung und Abklingverhalten . . . . .	46
5.2.2	OCV-Hysterese . . . . .	50
5.2.3	Hysterese-modell der ionen-verantworten Poren . . . . .	53
5.3	Batterieverhalten bei elektrischer Belastung . . . . .	60
5.3.1	Kleinsignalverhalten . . . . .	60
5.3.2	Elektrische Leistungscharakteristik . . . . .	62
5.3.3	Lade-/Entladecharakteristik . . . . .	66
5.3.4	Ladevorgeschichte abhängige Leistungsfähigkeit und nutzbare Kapazität . . . . .	71
5.3.5	Vanishing Phase Effect . . . . .	76
5.4	Alterung von Lithium-Ionen-Zellen . . . . .	78
5.4.1	Alterungseinfluss . . . . .	79
5.4.2	Grenznutzbarkeit . . . . .	81
5.4.3	Alterungsbedingte Änderung der Eigenschaften der LFP-P-Zellen	81
<b>6</b>	<b>Adaption von Batterieimpedanz und Leistungsfähigkeit</b>	<b>85</b>
6.1	Motivation . . . . .	85
6.2	Grundlagen . . . . .	86
6.2.1	Literaturübersicht zu bekannten Verfahren für die Batterieimpedanzbestimmung . . . . .	86
6.2.2	Kontinuierliche und zeitdiskrete Übertragungsfunktionen . . . . .	88
6.3	Iterative Bestimmung von Impedanzparametern . . . . .	91
6.3.1	Rekursive Parameterfilterung – ein Minimalbeispiel . . . . .	92
6.3.2	Bestimmung der Ersatzschaltbildparameter . . . . .	94
6.3.3	Schätzung der Impedanz der LFP-P-Zellen im Betrieb . . . . .	97
6.3.4	Zellspezifische Impedanzbestimmung . . . . .	101
6.4	Selbstlernende Impedanzkennfelder . . . . .	105
6.4.1	Initiale Impedanzkennfelder . . . . .	105
6.4.2	Lineare Interpolation mehrdimensionaler Kennfelder . . . . .	106
6.4.3	Lokale Adaption . . . . .	107
6.4.4	Globale Kennfeldadaption . . . . .	109
6.5	Leistungsfähigkeit und -vorhersage . . . . .	111
6.5.1	Belastungs-limitierung . . . . .	111
6.5.2	Impedanzbasierte Leistungsvorhersage . . . . .	112
6.5.3	Besonderheit bei LFP-P-Zellen . . . . .	114
6.5.4	Thermische Limitierung und Restladungsvorhalt . . . . .	114
<b>7</b>	<b>Ladezustandserkennung</b>	<b>117</b>
7.1	Motivation . . . . .	117
7.2	Übersicht zu expliziten Methoden zur Ladezustandsbestimmung von Batterien . . . . .	118

7.2.1	Restladungstest . . . . .	118
7.2.2	Ladungsintegration . . . . .	118
7.2.3	Spannungsauswertung . . . . .	118
7.2.4	Impedanzauswertung und Durchtrittsfrequenz . . . . .	119
7.2.5	Fuzzylogik-Systeme, Expertensysteme und künstliche neuronale Netze . . . . .	119
7.2.6	Bewertung expliziter Verfahren zur SOC-Bestimmung . . . . .	120
7.3	Grundlagen modellbasierter Zustandserkennung . . . . .	120
7.3.1	Zustandsraumdarstellung . . . . .	120
7.3.2	Grundprinzip der modellbasierten Zustandserkennung . . . . .	121
7.3.3	Zustandsbeobachter . . . . .	121
7.3.4	Systembeobachtbarkeit und die Definition struktureller Beobachtbarkeit . . . . .	122
7.4	Modellbasierte Ladezustandserkennung von Li-ion-Zellen mit LiFePO <sub>4</sub> -basierter Kathode . . . . .	122
7.4.1	Übersicht zu modellbasierten Methoden zur Zustandsbestimmung für Li-ion-Batterien . . . . .	123
7.4.2	Batteriemodell der LFP-P . . . . .	124
7.4.3	Grundstruktur des SOC-Beobachters mit dem LFP-P-Batteriemodell . . . . .	128
7.4.4	Validierungstest, Ergebnisse und Beurteilung der Genauigkeit . . . . .	129
7.4.5	Reduzierte SOC-Beobachtung mit adaptiver Spannungsvorfilterung . . . . .	132
7.5	Zellselektive Ladezustandsbestimmung von Batteriesystemen . . . . .	134
<b>8</b>	<b>Degradations- und Alterungserkennung</b>	<b>139</b>
8.1	Leistungsdegradation . . . . .	139
8.2	OCV-Adaptionsverfahren und Kapazitätsverlusterkennung . . . . .	141
8.2.1	Definition der Betriebskapazität . . . . .	141
8.2.2	Kennlinienadaption . . . . .	141
8.2.3	Bereichsadaption . . . . .	142
8.3	Stützende Verfahren zur Erfassung der Batteriealterung . . . . .	143
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>145</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>151</b>
	<b>Anhang</b>	<b>167</b>
A.1	Schnellladeverfahren . . . . .	168
A.2	Untersuchung der Robustheit des SOC-Beobachters . . . . .	171
A.3	Hysteresemodell der ionenverarmten Poren - elektrisches Modell . . . . .	175
A.4	Konventionen . . . . .	178
A.5	Formelzeichen . . . . .	178
A.6	Liste der Abkürzungen . . . . .	183
A.7	Einheiten (nicht SI) und Konstanten . . . . .	184
A.8	Lebenslauf . . . . .	185