

Breitbandige elektronische Nachbildung von Lithium-Ionen-Zellen für Anwendungen in der Elektromobilität

Christopher Lüke



Breitbandige elektronische Nachbildung von Lithium-Ionen-Zellen für Anwendungen in der Elektromobilität

Dissertation

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

von

Christopher Lüke
aus Gelsenkirchen

Bochum 2022

Dissertation eingereicht am: 29.03.2021
Tag der mündlichen Prüfung: 15.10.2021
Referent: Prof. Dr.-Ing. Joachim Melbert
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Andreas Steimel

Berichte aus der Elektrotechnik

Christopher Lüke

Breitbandige elektronische Nachbildung von Lithium-Ionen-Zellen für Anwendungen in der Elektromobilität

Shaker Verlag
Düren 2022

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., 2021

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8581-5

ISSN 0945-0718

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 • E-Mail: info@shaker.de

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Ziel	1
1.2	Ansatz und Gliederung der Arbeit	3
2	Lithium-Ionen-Zellen	7
2.1	Aufbau und Funktionsweise	7
2.2	Beschreibung des Zellzustandes	11
2.3	Verhalten und Eigenschaften	13
2.3.1	Langzeitverhalten	14
2.3.2	Kurzzeitverhalten	15
2.4	Gewinnung der Zellparameter	18
2.4.1	Alterungsstudie	19
2.4.2	Messung der komplexen Zellimpedanz	19
2.5	Einsatz von Li-Ionen-Zellen im Kraftfahrzeug	22
2.5.1	Energiespeicherarchitektur	23
2.5.2	Batteriemanagementsysteme	24
2.5.2.1	Sicherheitsrisiken von Energiespeichern	24
2.5.2.2	Überwachung und Balancierung von Batteriezellen	25
2.5.2.3	Zukünftige technische Entwicklungen	28
3	Zellemulation	31
3.1	Elektronische Zellemulatoren	32
3.1.1	Stand der Technik	34
3.2	Struktur des breitbandigen Zellemulators	38
3.2.1	Infrastruktur	39
3.2.2	Systemstruktur Zellemulator	41
3.3	Elektronische Impedanznachbildung	46
3.3.1	Stand der Technik	47

3.3.2	Flexible breitbandige Impedanzemulation	48
4	Echtzeitsimulation von elektrochemischen Zellen	53
4.1	Anforderungen an die Zellsimulation	53
4.2	Hardwaremodul Echtzeitsimulator	55
4.2.1	FPGA-basierter Signalprozessor	56
4.2.2	Eingebettetes Computersystem	57
4.3	Implementierung des Zellmodells	60
4.3.1	Modellkomplexität	64
4.3.2	Kurzzeitmodell	67
4.3.2.1	Laufzeitoptimierte digitale Filter	69
4.3.2.2	Realisierung des Filters	73
4.3.3	Langzeitmodell	78
4.3.3.1	Lineare Effekte	80
4.3.3.2	Leerlaufspannungskennlinie und Hysterese	80
4.3.4	Thermisches Modell	84
4.3.4.1	Berechnung der Verlustleistung	84
4.3.4.2	Modellstruktur	85
5	Messtechnik und Leistungselektronik	87
5.1	Hardwaremodul Messdatenerfassung	88
5.1.1	Messkonzept	89
5.1.1.1	Automatische Kalibrierung	91
5.1.2	Eingangsstufe	93
5.1.2.1	Frequenzgang und spektrales Rauschen	99
5.1.2.2	Frequenzgangkompensation	100
5.1.3	Analog-Digital-Umsetzung	101
5.1.3.1	Signalpfade mit hoher Genauigkeit	102
5.1.3.2	Signalpfade mit hoher Bandbreite	105
5.1.4	Zusammenfassung	105
5.2	Hardwaremodul Leistungsendstufe	109
5.2.1	Endstufenkonzept	110
5.2.2	DA-Umsetzung mit hoher Bandbreite und Dynamik	120
5.2.3	Komplementäre Ausgangsstufe	124
5.2.3.1	Verbreitete Endstufenkonzepte	124

5.2.3.2	Gegentaktendstufe mit autonom geregelten Ausgangsstufen	127
5.2.4	Korrektur von Offsetspannungen	133
5.2.5	Kompensationskonzept	137
5.2.6	Ausgangsimpedanz und Linearität	139
5.2.7	Fehlerkompensation	144
5.2.8	Genauigkeit der Gleichspannungsausgabe	146
5.2.9	Zusammenfassung	147
5.3	Hardwaremodul Energieversorgung	149
5.3.1	Dynamische Leistungsversorgung	152
5.4	Eigensicherheit	154
5.4.1	Schutzbeschaltung der analogen Eingänge	155
5.4.1.1	Klemmschaltung	155
5.4.1.2	Entladeschaltung	156
5.4.2	Schutzbetrieb	156
5.4.2.1	Überwachung der Leistungsendstufe	158
5.4.2.2	Leistungsschalter	159
6	Charakterisierung des Emulationssystems	161
6.1	Demonstrationssystem	161
6.2	Fehlerabschätzung	163
6.2.1	Totzeit der Impedanzemulation	164
6.2.2	Parasitäre Ausgangsimpedanz	166
6.2.3	Linearitätsfehler	167
6.3	Zellbalancierung	168
6.3.1	Kurzzeitverhalten	168
6.3.2	Langzeitverhalten	171
6.4	Impedanzemulation	172
6.4.1	Galvanostatische Anregung	173
6.4.1.1	Synthetische Impedanz	173
6.4.1.2	Zellimpedanz prismatische Zelle	176
6.4.2	Potentiostatische Anregung	180
6.4.2.1	Synthetische Impedanz	180
6.4.2.2	Zellimpedanz Rundzelle	182

6.5 Zusammenfassung	183
7 Zusammenfassung und Ausblick	185
7.1 Zusammenfassung	185
7.2 Ausblick	188
Literaturverzeichnis	191
Symbole und Abkürzungen	207
Abbildungsverzeichnis	211
Tabellenverzeichnis	217
Danksagung	219