



Eric Tchoupou Lando (Autor)

# **Entwicklung eines ereignisbasierten Lebensdauermodells und Validierung der linearen Schadensakkumulationshypothese für NMC/Graphit Lithium-Ionen Zellen**

Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen


**efzn**  
Energie-Forschungszentrum  
Niedersachsen



Entwicklung eines ereignisbasierten  
Lebensdauermodells und Validierung  
der linearen Schadensakkumulations-  
hypothese für NMC/Graphit Lithium-  
ionen Zellen

Eric Tchoupou Lando  
Promotion an der Technischen Universität Clausthal

Band 72

 Cuvillier Verlag Göttingen

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/8551>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,  
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation.....	1
1.2	Gliederung.....	2
2	Grundlagen der Alterung und Charakterisierung von Lithiumionenzellen.....	5
2.1	Allgemeine Information zur Lithiumionenzelle.....	5
2.2	Aufbau und Funktionsprinzip einer Lithiumionenzelle.....	6
2.2.1	Anode.....	7
2.2.2	Kathode.....	9
2.2.3	Separator.....	14
2.2.4	Elektrolyt und Leitsalz.....	14
2.2.5	Stromableiter.....	14
2.2.6	Bindemittel.....	15
2.2.7	Gehäuse.....	15
2.3	Alterungsmechanismen der Lithiumionenzelle.....	16
2.3.1	Alterung der negativen Elektroden.....	18
2.3.2	Alterung der positiven Elektrode.....	19
2.3.3	Alterung von nicht elektrochemisch aktiven Komponenten.....	20
2.4	Zusammenfassung der Alterungsmechanismen von Lithiumionenzellen und Beschreibung von unterschiedlichen Prozessen der Kapazitäts- und Innenwiderstandsänderungen.....	21
2.4.1	Vergleich zwischen kalendarischen und zyklischen Alterungsprozessen.....	23
2.4.2	Zusammenfassung der für die Arbeit relevanten Belastungen und deren Degradationsmechanismen und Effekten.....	25
2.5	Beschreibung der Kapazitätsabnahme und der Innenwiderstandszunahme durch "State of Health" (SOH) oder Gesundheitszustand von Lithiumionenzellen.....	27

2.6	Bestimmung der Kapazität von Lithiumionenzellen zur Ermittlung des Alterungszustands <b>SOHC</b> .....	27
2.6.1	Einleitung zur Kapazitätsbestimmung.....	27
2.6.2	Gesundheitszustand von Lithiumionenzellen bezogen auf die Kapazität SOH <sub>c</sub> .....	29
2.7	Bestimmung der Ruhespannung einer Zelle in Abhängigkeit vom Ladezustand .....	31
2.7.1	Konstante Strommessung.....	31
2.7.2	Anwendung von ICA- und DVA-Methoden .....	32
2.7.3	Relaxationsmessung .....	35
2.8	Bestimmung des Widerstands von Lithiumionenzellen zur Ermittlung des Alterungszustands SOH <sub>R</sub> .....	37
2.8.1	Elektrische Ersatzschaltbilder von Lithiumionenzellen.....	37
2.8.2	„Current Interruption Technique“ (CIT) zur Bestimmung der Impedanz einer Lithiumionenzelle nach dem Ladezustand.....	39
2.8.3	Elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS) .....	40
2.8.4	Analyse und Vergleich von CIT und EIS- Messung .....	41
2.8.5	Gesundheitszustand von Lithiumionenzelle bezogen auf Innenwiderstand SOH <sub>R</sub> .....	42
2.9	Einfluss der Ladeverfahren auf die Alterung der Lithiumionenzellen.....	45
2.9.1	Grundlagendefinition bezüglich Anwendung bei Lithiumionenzellen.....	45
2.9.2	Beschreibung der Ladekennlinie in der Hauptladephase.....	46
2.10	Zusammenfassung der Betriebsparameter auf die Alterungsprozesse von Lithiumionenzellen.....	47
3	Unterschied zwischen Lebensdauerprognose und Alterungsuntersuchungen.....	52
3.1	Methode zur Festlegung des Lebensdauerendes .....	52
3.2	Allgemeine Betrachtung von Lebensdauerprognose und Alterungsuntersuchungen .....	54
3.3	Verfahren zur Untersuchung der Alterung bei Lithiumionenzellen unter Berücksichtigung von Anwendungsbereichen.....	56
3.3.1	Verfahren zur Untersuchung von Alterungsmechanismen an diversen Komponenten der Lithiumionenzelle.....	57

3.3.2	Verfahren zur Untersuchung von Alterungsmechanismen unter Berücksichtigung der gesamten Lithiumionenzelle .....	57
3.4	Verfahren zur Durchführung einer Lebensdauerprognose .....	59
3.5	Zusammenfassung der Methoden zur Untersuchung der Lebensdauer von Lithiumionenzellen .....	60
4	Einführung zu Lebensdauerabschätzungsverfahren der Betriebsfestigkeit und deren Anpassung an die Batterietechnologie .....	62
4.1	Analogien zwischen technischer Mechanik und Elektrochemie .....	62
4.2	Wöhlerkurve und Definition von Referenzmatrizen .....	66
4.3	Definition und Ermittlung von Lastkollektiven .....	71
4.4	Lebensdauer-Modell von mechanischen Bauteilen durch Nennspannungskonzept .....	74
4.5	Lebensdauer-Modell von mechanischen Bauteilen durch bruchmechanisches Konzept .....	76
4.5.1	Einführung in das bruchmechanische Konzept .....	76
4.5.2	Mechanisches Modell zur Untersuchung des Risswachstums in Elektrodenpartikeln .....	80
5	Stand der Technik von Lebensdauerprognosen bei Batterien .....	84
5.1	Amperestunden-Durchsatz Methode .....	84
5.2	Stand der Wissenschaft über die ereignisbasierten Modelle zur Lebensdauerabschätzung von Batterien .....	88
6	Methode zur Durchführung von Lebensdauerprognosen an Lithiumionenzellen durch das ereignisbasierte Modell .....	93
6.1	Beschreibung des neuen Ansatzes zur ereignisbasierten Methode zur Lebensdauerabschätzung von Lithiumionenzellen .....	93
6.2	Definition von Referenzmatrizen zur Anwendung in einer Batterie .....	95
6.2.1	Einleitung zur Referenzmatrizen .....	95
6.2.2	Hochrechnung des erwarteten Lebensdauerendes der Zellen bei zyklischen Belastungen in Bezug auf die Datenblattangaben der Zellen und die Bildung der Referenzmatrizen .....	100

6.3	Kriterien zur Identifizierung von Ereignissen am Beispiel von Daten aus einem Elektro-Auto mit Lithiumbatterien.....	102
6.4	Definition und Ermittlung von Lastkollektiven unter Anwendung in den Batteriesystemen.....	103
6.5	Durchführung einer Schädigungsanalyse und Lebensdauerbestimmung nach der ereignisbasierten Methode.....	110
7	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung zur Untersuchung der Lebensdauerprognose-Methode.....	113
7.1	Auswahl der zu untersuchenden Lithiumionenzelle für diese Arbeit.....	113
7.2	Beschreibung des Versuchsaufbaus und des Prüfstands.....	114
7.2.1	Aufbau der Zellen für den Versuch .....	115
7.2.2	Impedanzspektroskopie.....	116
7.2.3	Prüfsystem „Bitrode“ zum Zyklisieren der Zellen.....	117
7.3	Versuchsdurchführung .....	118
7.3.1	Parametrierung und Programmierung des Versuchs.....	118
7.3.2	Erstellen der Prüfmatrizen und der Belastungsprofile.....	123
7.4	Darstellung der Ergebnisse der Untersuchung der Bereiche der Prüfmatrix.....	126
7.4.1	Kapazitätsverlauf der Zellen in Abhängigkeit des Ladezustandsbereichs und der Stromamplitude.....	126
7.4.2	Verläufe der Widerstände bei unterschiedlichen Monobelastungen.....	133
7.4.3	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	136
7.4.4	Fehlerabschätzung des Modells oder beim Auswerten der Messdaten.....	137
7.5	Klärung der Linearitätshypothese zur Addition der Belastungen am Beispiel von Lithiumionenzelle .....	142
7.6	Einführung eines Lebensdauerfaktors $\alpha L(T, I, SOC, DOD)$ .....	147
7.7	Lebensdauerfaktor in Bezug auf die Lebensdauerverluste von Lithiumionenzellen bei Monobelastung.....	149
7.8	Validierung des Ansatzes zur ereignisbasierten Methode.....	151

8	Beschleunigte Alterung und synthetische Belastungsfunk-tionen .....	156
8.1	Stand der Technik zur beschleunigten Alterungsuntersuchung von Lithiumionenbatterie .....	156
8.2	Verfahren zur Ermittlung von gewichteten Schädigungsfaktoren und zum Generieren von synthetischen Lastprofilen .....	157
8.2.1	Einführung zum gewichteten Schädigungsfaktor.....	157
8.2.2	Ermittlung von gewichteten Schädigungsfaktoren zur Durchführung der beschleunigten Alterungsuntersuchung .....	158
8.3	Experimentelle Erprobung des Verfahrens zur beschleunigten Alterungsuntersuchung.... .....	163
9	Anwendung des ereignisbasierten Modells zur Verlängerung der Lebensdauer einer Lithiumionenzelle.....	167
9.1	Versuchsdurchführung zur Untersuchung des Second-Life-Konzepts .....	167
9.1.1	Einleitung zum Second-Life-Konzept .....	167
9.1.2	Second-Life Konzept der Lithiumionenzellen ohne Kenntnisse über die Vorgeschichte der Alterungsprozesse.....	168
9.1.3	Second-Life Konzept der Lithiumionenzellen mit Kenntnissen über die Vorgeschichte der Alterungsprozesse.....	170
9.2	Anwendung des ereignisbasierten Modells im Batterie Management System (BMS)....	171
10	Zusammenfassung und Ausblick.....	173
11	Literaturverzeichnis .....	178
12	Abkürzungsverzeichnis.....	190
13	Formelverzeichnis.....	192
A	Verfahren zur Charakterisierung und Parametrierung von Lithiumionenzellen.....	194
A.1	Untersuchung der Ruhespannung durch inkrementelle Kapazitätsanalyse (ICA) und differentielle Spannungsanalyse (DVA) Verfahren .....	194
A.1.1	Prinzip inkrementelle Kapazitätsanalyse (ICA) und differentielle Spannungsanalyse (DVA) Verfahren.....	194

A.1.2	Methoden zur Durchführung der inkrementellen Kapazitätsanalyse und differenziellen Spannungsanalyse .....	196
A.1.3	Durchführung Alterungsuntersuchung mittels ICA und DVA.....	199
A.2	Berechnung der Impedanz von elektrochemischen Komponenten der Lithiumionenzellen nach Kapitel 2.6.2 .....	200
A.2.1	Berechnung der Impedanz von elektrochemischen Komponenten anhand von ESB- Modellen .....	200
A.2.2	Durchführung einer nichtlinearen Regressionsanalyse zur Bestimmung der Parameter L, R, C und Warburgskoeffizient $\sigma$ eines Impedanzspektrums (nach Kapitel 2.8.3: Elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS)) .....	208
A.3	Parameter der Kapazität und Widerstandsfunktion aus Kapitel 2.....	216
B	Angabe zum Kapitel 4 .....	218
C	Angabe zur Versuchsdurchführung .....	220
D	Angabe zum Kapitel 8 .....	233
D.1	Abbildungen und Tabellen zum synthetischen Profil .....	233
D.2	Generierung von synthetischen Belastungsprofile Anhand der MMC-methode.....	237
D.3	Allgemeine Anwendung der Methode zur Generierung von synthetischen Belastungszeitfunktionen an LIZ .....	239
D.3.1	Generieren eines synthetischen Belastungsprofils aus einer Belastung mit einer konstanten Stromamplitude (zyklische Belastungen) .....	241
D.3.2	Generieren von synthetischen BZF für Belastungsbereich mit Stromamplitude ungefähr null (kalendarische Belastungen) und der Kombination mit zyklischen Belastungen mit einer konstanten Stromamplitude .....	242
D.3.3	Generieren von synthetischen Belastungen aus einer Belastung mit einer dynamischen Stromamplitude und Temperatur .....	242