

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 SOHC	27
2.6.1	Einleitung zur Kapazitätsbestimmung.....	27
2.6.2	Gesundheitszustand von Lithiumionenzellen bezogen auf die Kapazität SOH _c	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 _R	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 _R	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 Zyklieren der Zellen	117
7.3	Versuchsdurchführung	118
7.3.1	Parametrierung und Programmierung des Versuchs.....	118
7.3.2	Erstellen der Prüfmatrixen 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 $a_L(T, I, SOC, DOD)$	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 Belastungsfunktionen	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 differentiellen 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 σ 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