

# Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	ix
Symbolverzeichnis	xiii
Kurzfassung	xix
Abstract	xxi
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung und Ziel der Arbeit . . . . .	4
1.2 Aufbau der Arbeit . . . . .	5
<b>2 Grundlagen der Lithium-Ionen-Technologie</b>	<b>9</b>
2.1 Funktionsweise . . . . .	10
2.2 Thermodynamische Beschreibung . . . . .	12
2.3 Materialien und Bestandteile . . . . .	15
2.3.1 Anode . . . . .	17
2.3.2 Kathode . . . . .	20
2.3.3 Elektrolyt . . . . .	22
2.3.4 Separator . . . . .	23
2.3.5 Stromableiter . . . . .	24
2.4 Grundbegriffe . . . . .	24
2.5 Alterung und Degradation von Lithium-Ionen-Zellen . . . . .	30
2.5.1 Anode . . . . .	31
2.5.2 Kathode . . . . .	33
2.5.3 Elektrolyt und Separator . . . . .	35
2.6 Alterungsmechanismus Lithium-Plating . . . . .	35

<b>3</b>	<b>Elektrochemisch-physikalische Modellierung</b>	<b>45</b>
3.1	Übersicht der Modellierungsarten . . . . .	45
3.1.1	Ersatzschaltbildmodellierung . . . . .	46
3.1.2	Elektrochemische Modellierung . . . . .	48
3.2	Grundlegende Modellgleichungen . . . . .	50
3.3	Thermisches Modell . . . . .	60
3.4	Softwareumgebung und Simulationsmethodik . . . . .	64
<b>4</b>	<b>Modellparametrierung und -validierung</b>	<b>69</b>
4.1	Zellaufbau und grundlegende Daten . . . . .	69
4.2	Balancierung der Elektroden . . . . .	74
4.3	Parametrierung mittels Impedanzspektroskopie . . . . .	82
4.3.1	Theorie . . . . .	83
4.3.2	Messungen . . . . .	86
4.3.3	Simulation der Impedanzspektren . . . . .	88
4.3.4	Sensitivitätsanalyse der Parameter . . . . .	91
4.3.5	Parametrierungsmethodik . . . . .	96
4.3.6	Parameterermittlung und -überführung in Ausgleichsfunktionen . . . . .	101
4.3.7	Gesamtheitliche Validierung der Parameter . . . . .	105
4.4	Modellvalidierung im Zeitbereich . . . . .	110
4.4.1	Einfluss der Temperatur . . . . .	111
4.4.2	Einfluss der Entropie . . . . .	113
4.4.3	Stromloser Zustand . . . . .	114
4.4.4	Entlade- und Ladekurven . . . . .	116
4.4.5	Fahrprofile . . . . .	122
<b>5</b>	<b>Experimentelle Degradationsanalysen</b>	<b>125</b>
5.1	Messaufbau und Versuchsdurchführung . . . . .	126
5.2	Konstantstromladen . . . . .	128
5.3	Pulsladen . . . . .	133
5.4	Reversibilität . . . . .	136
5.4.1	Variation der Anzahl von Tieftemperaturzyklen . . . . .	140
5.4.2	Einfluss von Pausen gegenüber Entladungen nach Tieftemperaturzyklisierungen . . . . .	144

---

<b>6</b>	<b>Simulative Degradationsanalysen</b>	<b>149</b>
6.1	Visualisierung der Konzentrations- und Potentialverteilung . . . . .	150
6.2	Bestimmung der Grenzbedingungen . . . . .	154
6.3	Simulation der Betriebsparameter . . . . .	157
6.3.1	Berechnung von Degradationsfaktoren . . . . .	158
6.3.2	Ladestrom und Temperatur . . . . .	159
6.3.3	Ladezustand und Ladekapazität . . . . .	166
6.3.4	Pausendauer . . . . .	169
6.4	Ableitung einer Ladestrategie . . . . .	171
6.5	Modellreduktion und Applikation . . . . .	175
6.5.1	Theorie . . . . .	176
6.5.2	Modellbewertung und -validierung . . . . .	179
6.5.3	Laderegelung . . . . .	182
6.6	3D-thermische Kopplung . . . . .	186
6.6.1	Hochstromentladung . . . . .	189
6.6.2	Hochstromladung . . . . .	194
6.7	Modellerweiterung . . . . .	198
6.7.1	Aufbau der Nebenreaktionen . . . . .	199
6.7.2	Simulationsstudie . . . . .	204
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>213</b>
7.1	Zusammenfassung . . . . .	213
7.2	Ausblick . . . . .	218
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>221</b>
	<b>Publikationsliste</b>	<b>241</b>