

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Danksagungen	VII
Abbildungsverzeichnis	XV
Tabellenverzeichnis	XIX
Abkürzungsverzeichnis	XXI
Formelverzeichnis	XXIII
Kurzfassung	XXV
Abstract	XXVII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung und Methodik der Arbeit	5
1.2.1 Innovation und Abgrenzung	6
1.3 Struktur der Arbeit	6
2 Lithium-Ionen-Batterien	9
2.1 Übersicht	9
2.2 Traktionsbatterie	12
2.3 Batteriemanagementsystem	13
2.3.1 Steuerung des Energieflusses	14
2.3.2 Messung der Batteriezustandsparameter	14
2.3.3 Balancing	14

2.4 Zelle	15
2.4.1 Aufbau und Funktionsweise	15
2.4.2 Materialien	17
2.4.3 Bauformen	22
2.5 Kennwerte und Begriffe	23
2.5.1 Spannungsbereich und Ladezustand	23
2.5.2 Strom-Spannungs-Kennlinie	24
2.5.3 Energie- und Leistungsdichte	24
2.5.4 (Ent-) Laderate und (Ent-) Ladestrom	25
2.5.5 Gesundheitszustand	26
2.6 Alterung und Degradation	27
2.6.1 Alterung	28
2.6.2 Kalendarische Alterung	28
2.6.3 Zyklische Alterung	28
2.6.4 Degradation	29
2.6.5 Externe Alterungsfaktoren	30
3 Messmethoden	31
3.1 Impedanzspektroskopie	31
3.1.1 Darstellung der Messergebnisse	32
3.1.2 Kramers-Kronig Beziehung	34
3.1.3 Auswertung	35
3.2 Strompulsmessung	35
3.3 Leerlaufspannungskennlinie	36
3.3.1 Kennfeld-Methode	37
3.3.2 Kleinststrom-Methode	37
3.3.3 Synchron-Methode	38
3.4 Relaxationszeit	39

3.5 Kapazitätsmessung	40
3.5.1 Einfluss Stromstärke	40
3.5.2 Einfluss Temperatur	42
3.6 Untersuchung von Lastprofilen	43
4 Batteriemodelle	47
4.1 White Box: Elektrochemisches Modell	47
4.1.1 Ficksches Gesetz	47
4.1.2 Ohmsches Gesetz	49
4.1.3 Ladungserhaltung am Elektrolyt	50
4.1.4 Butler-Vollmer Gleichung	50
4.2 Grey Box: Ersatzschaltbildmodell	50
4.2.1 Thevenin Modelle	52
4.2.2 Randles Modell	53
4.2.3 Verteilung der Relaxationszeiten	54
4.3 Black Box: Mathematische Modelle	57
4.3.1 Shepherd Modell	57
4.3.2 Unnewehr Modell	58
4.3.3 Nernst Modell	58
4.3.4 Kombinationen	59
4.3.5 Neuronale Netze	60
4.4 Übersicht und Bewertung	63
5 Statistische Versuchsplanung	65
5.1 Übersicht Versuch	65
5.1.1 Einflussgrößen	66
5.1.2 Störungen	66
5.1.3 Messfehler	66
5.1.4 Zielgrößen	66

5.1.5 Prozessübersicht	67
5.2 Regressionsmodell	67
5.2.1 Linearität	68
5.2.2 Methode der kleinsten Quadrate	69
5.2.3 Gütemaß	69
5.3 Versuchsplan	70
5.3.1 Versuchsraum	70
5.3.2 Modellierung	71
5.3.3 Übersicht Versuchspläne	72
5.4 D-optimaler Versuchsplan	72
6 Charakterisierung	75
6.1 Übersicht	75
6.2 Impedanzspektroskopie	76
6.2.1 Ermittlung des besten Batteriemodells für die Impedanzspektroskopie	78
6.3 Strompulsmessung	80
6.3.1 Vergleich Impedanzspektroskopie und Strompulsmessung	83
6.4 Leerlaufspannungsmessung	83
6.5 Kapazitätsbestimmung	84
6.6 Relevante, messbare elektrochemische Batterieparameter	85
7 Alterung	87
7.1 Neuartigkeit des Ansatzes	87
7.2 Entwicklung Alterungsmodell	88
7.2.1 Batteriezustand	90
7.3 Definition Alterungsfaktoren	91
7.3.1 Lastprofil	91

7.4 Erstellung Alterungstestplan	92
7.4.1 Screening Test	92
7.4.2 Umfangreicher Alterungstest	94
7.5 Beschreibung Testaufbau	95
7.5.1 Getestete Batterie	95
7.6 Durchführung Alterungsversuche	96
7.6.1 Übersicht	96
7.6.2 Formationprozess	96
7.7 Erstellung Alterungsmodell	97
8 Ergebnisse und Diskussion	99
8.1 Kapazitätsmessung	99
8.1.1 Alterung bei hoher Temperatur (55 °C)	99
8.1.2 Alterung bei niedriger Temperatur (−20 °C)	100
8.1.3 Alterung bei Raumtemperatur (18 °C)	101
8.1.4 Zusammenfassung	103
8.2 Strompulsmessung	104
8.2.1 Alterung bei hoher Temperatur (55 °C)	105
8.2.2 Alterung bei niedriger Temperatur (−18 °C)	106
8.2.3 Alterung bei Raumtemperatur (18 °C)	107
8.2.4 Zusammenfassung	109
8.3 Impedanzspektroskopie	110
8.3.1 Alterung bei hoher Temperatur (55 °C)	110
8.3.2 Optimierung der Messung	111
8.3.3 Zusammenfassung	118
8.4 Auswahl Batterieparameter	119
8.5 Alterungsmodell	119
8.5.1 Detaillierter Ablauf	119
8.5.2 Multiples Regressionsmodell	121

8.5.3 Normalwahrscheinlichkeitsdiagramm	124
8.5.4 Residuenanalyse	124
8.5.5 Zusammenfassung	125
9 Zusammenfassung und Ausblick	127
9.1 Zusammenfassung	127
9.2 Ausblick	129