

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Ziel und Gliederung der Arbeit	4
2 Elektrische Energiespeicher im Kraftfahrzeug	7
2.1 Elektrischer Antrieb und Bordnetz	7
2.1.1 Kraftfahrzeuge mit konventionellem Antrieb	8
2.1.2 Hybridfahrzeuge	9
2.1.3 Elektrofahrzeuge	13
2.2 Elektrische Energiespeicher für den Einsatz im Kraftfahrzeug	13
2.2.1 Kenngrößen der elektrischen Energiespeicher	14
2.2.2 Blei-Batterie	16
2.2.3 Nickel-Metallhydrid-Batterie	18
2.2.4 Li-Ionen Batterie	19
2.2.5 Doppelschichtkondensator	25
2.3 Batteriemanagementsystem	26
2.4 Zusammenfassung	28
3 Alterungseffekte von Li-Ionen Zellen	31
3.1 Alterungsverhalten der negativen Elektrode	32
3.2 Alterungsverhalten der positiven Elektrode	33
3.3 Alterungsverhalten des Elektrolyten	33
3.4 Schädigung von Li-Ionen Zellen	34
3.5 Zusammenfassung	35
4 Testzentrum für elektrische Energiespeicher	36
4.1 Anforderung an das Testzentrum	36
4.2 Entwicklung eines Einzel-Zelltesters	41
4.2.1 Realisierungskonzepte	41
4.2.2 Grundstruktur	43
4.2.3 Analoge Entladestufe	44

4.2.4	Funktionsgenerator	48
4.2.5	Sicherheitsschalter und Hilfsnetzteil	51
4.2.6	Gesamttester	52
4.2.7	Inbetriebnahme der Zelltester	54
4.3	Testzentrum	60
4.4	Sicherheitssystem des Testzentrums	62
4.5	Software des Testzentrums	65
4.5.1	Programmierung der Tester	66
4.5.2	Programmpaket zur Gruppensteuerung	67
4.5.3	Programmierung des Sicherheitssystems	69
4.6	Zusammenfassung	70
5	Modellierung von Kfz-Energiespeichern	71
5.1	Zeitbasiertes Modell für elektrische Energiespeicher	72
5.2	Parametrisierung des Zellmodells	75
5.2.1	Beschleunigte Voll-Charakterisierung	76
5.2.2	Kurz-Charakterisierung	79
5.3	Modelloptimierung	79
5.3.1	Erweiterung für hohe Frequenzen	79
5.3.2	Erweiterung für tiefe Temperaturen	80
5.4	Zusammenfassung	81
6	Statistische Versuchsplanung	82
6.1	Anforderungen an Alterungsuntersuchungen	82
6.2	Statistische Versuchsplanung	83
6.2.1	Vollfaktorielle Versuchspläne	84
6.2.2	Versuchsplan nach der Ein-Faktor-Methode	85
6.2.3	Monte-Carlo-Methode	85
6.2.4	Teilfaktorielle Versuchspläne	85
6.3	Versuchsplan für statistische Alterungsuntersuchungen	86
6.4	Untersuchungsobjekte	89
6.5	Eingangsuntersuchungen	90
7	Ergebnisse der Alterungsuntersuchungen	92
7.1	Durchführung der statistischen Alterungsuntersuchungen	92
7.2	Eingangscharakterisierung	93
7.2.1	Langzeit- und Übergangsverhalten	94
7.2.2	Hochdynamisches Verhalten	96

7.2.3	Verifikation	98
7.3	Alterungseinfluss auf das Zellverhalten	100
7.4	Variation wichtiger Modellparameter	101
7.4.1	Ruhespannung	101
7.4.2	Kapazität	103
7.4.3	Innenwiderstand	107
7.5	Betrachtung der Lebensdauer	110
7.6	Kopplung zwischen Kapazität und Innenwiderstand	112
7.7	Kapazitätsvariation bei unterschiedlichen Betriebstemperaturen	113
7.8	Zusammenfassung	115
8	Alterungsmodellierung von Li-Ionen Zellen	116
8.1	Alterungsmodell	116
8.2	Modellierung des Alterungsverhaltens	117
8.2.1	Quasi-konstante Alterung	119
8.2.2	Anlaufphase	123
8.2.3	Erholungsphase	125
8.3	Implementierung des Alterungsverhaltens	126
8.4	Verifikation des Alterungsmodells	130
8.4.1	Kapazität und Innenwiderstand	132
8.4.2	Langzeitverifikation	133
8.4.3	Effekte der starken Alterung	136
8.4.4	Verifikation der Einzelversuche	137
8.5	Modellperformance	141
9	Zusammenfassung und Ausblick	143
Literaturverzeichnis		146
Abbildungsverzeichnis		154
Tabellenverzeichnis		159
Symbole und Abkürzungen		160
Danksagung		164
Lebenslauf		165