

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 | Kenngößen 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 |