

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| 1. Einleitung und Problemstellung | 1 |
| 2. Eigene Vorgehensweise sowie Abgrenzung und Weiterentwicklung zum Stand der Technik | 3 |
| 3. Einführung | 11 |
| 3.1. Fahrzeugbordnetz | 11 |
| 3.1.1. Kommunikationsnetz des Fahrzeugbordnetzes | 12 |
| 3.1.2. Energiebordnetz | 13 |
| 3.1.3. Energiemanagement | 15 |
| 3.1.4. 12-Volt-Blei-Starter-Batterie mit Batteriesensor | 17 |
| 3.2. Lithium-Ionen-Starterbatterie | 17 |
| 3.2.1. Definition eines nsmp-Batteriesystems | 18 |
| 3.2.2. Batteriemanagement einer 12-Volt-Lithium-Ionen-Starterbatterie | 20 |
| 3.2.3. Zellsymmetrierungssysteme | 21 |
| 3.2.4. Passive Zellsymmetrierung | 23 |
| 3.2.5. Aktive Zellsymmetrierung | 23 |
| 3.2.6. Fazit zur passiven und aktiven Zellsymmetrierung | 23 |
| 3.2.7. Analyse einer im Einsatz befindlichen 12-Volt-Lithium-Ionen-Starterbatterie | 24 |
| 3.3. Modellierung einer Batteriezelle | 25 |
| 3.3.1. Überspannungen | 26 |
| 3.3.2. Butler-Volmer-Verhalten der Durchtrittsüberspannung | 27 |
| 3.3.3. Elektrische Klemmenspannungsmodelle | 28 |
| 3.4. Batteriebezogene Größen und Definitionen | 30 |
| 3.4.1. Die C-Rate | 30 |
| 3.4.2. Vollladekapazität C_v und aktuelle Ladungsmenge Q_{akt} | 30 |
| 3.4.3. Gleichstromwiderstand R_{DC} | 31 |
| 3.4.4. Gesundheitszustand SOH_C und SOH_R | 31 |
| 3.4.5. Ladezustand SOC und Entladetiefe DOD | 33 |
| 3.5. Verfahren zur Batteriecharakterisierung | 34 |
| 3.5.1. Elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS) | 34 |
| 3.5.2. Kramers-Kronig-Transformation zur Bewertung gemessener Impedanzspektren | 35 |
| 3.6. Kaltstarttest nach DIN EN 50342 | 39 |
| 3.7. Wärmeübergangsmechanismen und Nettostrahlungsmethode | 41 |

| | |
|--|-----------|
| 4. Untersuchung und Einordnung des Energiebedarfs eines Fahrzeuges | 45 |
| 4.1. Kategorisierung von Energiespeichern, Energieerzeugern und Energieverbrau- chern | 45 |
| 4.2. Batterieklemmen-Strom- und -Spannung | 46 |
| 5. Motivation 12-Volt-LFP-Starterbatterie | 51 |
| 5.1. Auswahl einer geeigneten Batterietechnologie | 51 |
| 5.2. Auswahl einer geeigneten Kombination von Kathoden- und Anodenmaterial . | 53 |
| 5.2.1. 3,6-Volt-System am Beispiel einer LiNiMnCoO ₂ -Kathode mit Gra- phit-Anode | 54 |
| 5.2.2. 3,3-Volt-System mit LFP-Kathode und Graphit-Anode | 55 |
| 5.2.3. Fazit zur Auswahl der Batterietechnologie und Kathoden-Anoden-Ma- terialkombination | 56 |
| 5.3. In dieser Arbeit verwendete Lithium-Ionen-Zellen und -Batterien | 56 |
| 6. Abschätzung der notwendigen Batteriekapazität | 59 |
| 6.1. Relative Vollladekapazität und relativer Gleichstromwiderstand einer gealter- ten Batterie | 59 |
| 6.2. Festlegung der erforderlichen Batteriekapazität anhand des Fahrzeugruhestro- mes | 60 |
| 6.3. Verifizierung der ermittelten Batteriekapazität anhand der Kaltstartfähigkeit | 61 |
| 6.4. Zusammenhang zwischen Gleichstromwiderstand und Batteriekapazität . . . | 63 |
| 6.5. Berechnung der Batteriekapazität | 65 |
| 6.6. Fazit | 66 |
| 7. Eigenschaftsvergleich von LFP-, Blei-Säure- und AGM-Starterbatterien | 67 |
| 7.1. Kaltstarttests | 69 |
| 7.1.1. Beobachtung und Schlussfolgerung | 71 |
| 7.2. Motorstarttests | 73 |
| 7.2.1. Aus den Motorstarts abgeleitete Größen | 74 |
| 7.2.2. Auswertung der gelungenen Motorstarts | 76 |
| 7.3. Bordnetzstabilität | 80 |
| 7.3.1. Randbedingungen und Fahrszenarien | 81 |
| 7.3.2. Auswertung | 82 |
| 7.4. Ladeakzeptanz | 89 |
| 7.4.1. Versuchs- und Rahmenbedingungen | 89 |
| 7.4.2. Ergebnis der Fahrversuche | 90 |
| 7.5. Zusammenfassung und Fazit des Eigenschaftsvergleichs | 93 |
| 7.5.1. Nächste Schritte | 96 |
| 8. Maßnahmen zur Absicherung von Starterbatterien im Allgemeinen und Vielzellensystemen im Speziellen | 99 |
| 8.1. Versuchsreihe zur Sensibilisierung im Umgang mit LFP-Zellen | 100 |

| | |
|---|------------|
| 8.2. Passive und aktive Zellabsicherungsmethoden | 102 |
| 8.2.1. Diskussion möglicher Ausfallmechanismen von Batteriezellen und deren Auswirkungen | 102 |
| 8.2.2. Passive Zusatzabsicherung zum Schutz vor niederohmig ausfallenden Zellen | 104 |
| 8.2.3. Optimierungen der Stromverteilung im Batteriepack | 105 |
| 8.2.4. Aktive Zusatzabsicherung mit Zelldiagnosemöglichkeit | 107 |
| 8.3. Konzept für eine Eingangsschutzschaltung für 12-Volt-Starterbatterien | 111 |
| 8.3.1. Aufbau der Schaltung | 112 |
| 8.3.2. Wirkungsweise | 113 |
| 9. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von aktiver und passiver Zellsymmetrierung im Kontext einer LFP-Starterbatterie | 115 |
| 9.1. Kraftstoff-Mehrverbrauch bei passiver statt aktiver Zellsymmetrierung | 117 |
| 9.2. Bestimmung der Rentabilitätsschwelle mittels der Kapitalwertmethode | 119 |
| 9.3. Fazit der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung | 124 |
| 10. Verfahren zur Simulation des Alterungsverhaltens eines Batteriesystems | 127 |
| 10.1. Strom- und Spannungs-Profil zur Validierung des 1-RC- und 2-RC-Modells . . | 131 |
| 10.2. 1-RC-Modell mit den Alterungsschnittstellen für SOH_C und SOH_R | 133 |
| 10.2.1. Stromimpulsmuster zur Parametrierung eines 1-RC-Modells | 134 |
| 10.2.2. Geometrisches Verfahren zur Parametrierung eines 1-RC-Modells mittels Stromimpulsen und Spannungsantworten | 137 |
| 10.2.3. Wärmeentstehung innerhalb der Lithium-Ionen-Zelle | 140 |
| 10.2.4. Abbilden der Zellalterung auf R_s , R_p , C_p und Zellkapazität C_v anhand von Messdaten zu SOH_C und SOH_R | 143 |
| 10.2.5. Zusammenfassende Beschreibung des 1-RC-Modells mit Alterungsschnittstelle | 147 |
| 10.2.6. Optimierung der Stromabhängigkeit der Modellparameter R_s und R_p mittels der Butler-Volmer-Relation | 149 |
| 10.2.7. Vergleich der Modellvarianten mit und ohne nach Butler-Volmer korrigierten Modellparametern R_s und R_p | 150 |
| 10.2.8. Untersuchung zur Leistungsaufteilung auf die resistiven Ersatzschaltbildelemente | 152 |
| 10.2.9. Weiterentwicklung des 1-RC-Modells zu einem 2-RC-Hybridmodell | 155 |
| 10.3. Alterungsmodell: Messung, Abbildung und Kumulation von c_v und r_{DC} | 164 |
| 10.3.1. Erfassen und Abbilden der zyklischen Alterung | 164 |
| 10.3.2. Ablauf des zyklischen Alterns | 165 |
| 10.3.3. Bewertung der Ergebnisse zur zyklischen Alterung | 169 |
| 10.3.4. Ermittlung der kalendarischen Zellalterung | 170 |
| 10.3.5. Messdatenbasierte Näherungsformel für die kalendarische Alterung der relativen Vollladekapazität $c_{v,akt}$ | 171 |
| 10.3.6. Messdatenbasierte Näherungsformel für die kalendarische Alterung des relativen Gleichstromwiderstandes $r_{DC,akt}$ | 176 |
| 10.3.7. Kumulationsfunktion für den Alterungseffekt | 182 |

| | |
|---|------------|
| 10.3.8. Gesamtdarstellung des Modells zur Bestimmung der Alterung auf Zellebene | 186 |
| 10.4. Berechnung der zeitabhängigen Temperaturverläufe in der Batteriemulde . . | 188 |
| 10.4.1. Übertragungsfunktion zwischen den Temperaturen von Batteriemulde und Fahrzeugumgebung | 188 |
| 10.4.2. Berechnung der Tages- und Jahres-Temperaturverläufe der Batteriemulde mittels der Übertragungsfunktion | 190 |
| 10.5. Batterie-Stromprofil als Eingangsgröße für nachfolgende thermische Berechnungen | 191 |
| 10.6. Berechnung der Zellwickeltemperaturverläufe der wärmsten und kältesten Woche einer Klimazone | 193 |
| 10.6.1. Thermische Interaktion zwischen Batteriemulde und Batteriegehäuse | 196 |
| 10.6.2. Thermische Interaktion zwischen Batteriezellen und Batteriegehäuse . | 198 |
| 10.6.3. FE-Modellierung einer Batteriezelle mittels Abaqus | 201 |
| 10.6.4. FE-Modellierung der Batterie mittels Abaqus | 202 |
| 10.6.5. In MATLAB/Simulink implementierter Teil der elektrothermischen Simulation | 203 |
| 10.6.6. Ablaufsteuerung zur Kopplung von MATLAB/Simulink und Abaqus zur Berechnung der Zellwickeltemperaturverläufe | 206 |
| 10.7. Bestimmung der Batteriealterung für n Jahre mittels Zellwickeltemperatur und Klimazone | 210 |
| 10.7.1. Zeitliche Verläufe von Zellwickeltemperatur und Batteriestrom für n Jahre auf Basis der Wochenverläufe der Zellwickeltemperatur | 210 |
| 10.7.2. Berechnung der Batteriealterungsgrößen c_v und r_{DC} für einen Zeitraum von n Jahren | 213 |
| 10.8. Gesamtprozedur zur Bestimmung der Batteriealterung für n · j Jahre | 214 |
| 10.9. Anwendung der Gesamtprozedur am Beispiel einer 12-Volt-4s10p-LFP-Starterbatterie | 217 |
| 10.9.1. Luft als Umgebungsmedium der Zellen im Batteriepack | 218 |
| 10.9.2. Steinwolle als Umgebungsmedium der Zellen im Batteriepack | 218 |
| 10.9.3. Phasenwechselmaterial als Umgebungsmedium der Zellen im Batteriepack | 218 |
| 10.9.4. Untersuchung der Batteriealterung bei PCM, Luft und Steinwolle als Zellumgebungsmedium | 219 |
| 10.9.5. Bewertung des Einsatzes von PCM, Luft und Steinwolle in Bezug auf die Batterielebensdauer | 226 |
| 11. Vorstellung der entwickelten Batterien und Batteriesysteme | 227 |
| 11.1. LFP-Versuchsbatterie mit 36 Ah in 4s2p-Konfiguration | 227 |
| 11.2. LFP-Versuchsbatterie mit 44 Ah in 4s10p-Konfiguration | 229 |
| 11.3. LFP-Versuchsbatterie mit 60 Ah in 4s26p-Konfiguration | 230 |
| 11.4. Vorschlag für eine LFP-Versuchsbatterie in 4s48p-Konfiguration | 234 |
| 11.5. LFP-Rapid-Prototyping-System mit 44 Ah in 4s10p-Konfiguration | 236 |
| 11.6. LFP-Rapid-Prototyping-System mit 44 Ah in 4s10p-Konfiguration mit Automotive-Prozessor | 241 |

| | |
|---|------------|
| 12. Zusammenfassung und Ausblick | 243 |
| Literaturverzeichnis | 247 |
| Abkürzungsverzeichnis | 259 |
| Glossar | 263 |
| Symbolverzeichnis | 270 |
| Anhang | 282 |
| A. Im Rahmen dieser Arbeit entstandenes Material | 283 |
| A.1. Betreute studentische Arbeiten | 283 |
| A.2. Betreute Praktikanten | 284 |
| A.3. Eigene Patentanmeldungen | 285 |
| A.4. Eigene Veröffentlichungen | 286 |
| B. Vorschlag für ein schnelles aktives Verfahren zur Zellsymmetrierung | 291 |
| C. Bordnetz | 295 |
| C.1. Spannungslagen im Fahrzeugbordnetz | 295 |
| C.2. Verbauort von Batterie und Sensoren | 296 |
| D. Batterietechnologien | 299 |
| D.1. Blei-Batterien | 299 |
| D.1.1. Chemische Vorgänge bei Ladung/Entladung einer Blei-Säure-Batterie | 299 |
| D.1.2. Alterung der Blei-Säure- und AGM-Batterie | 301 |
| D.1.3. Vorteile, Nachteile und Kenndaten von typischen Blei-Batterien . . . | 301 |
| D.2. Aufbau und Funktionsweise einer Lithium-Ionen-Zelle | 302 |
| D.2.1. Alterungsfehler in Lithium-Ionen-Batterien | 305 |
| D.3. Starter-Batterie vs. Traktionsbatterie | 307 |
| E. Thermodynamik | 309 |
| E.1. Wärmeleitung | 309 |
| E.2. Wärme konvektion | 310 |
| E.2.1. Freie Konvektion an senkrechter ebener Wand | 312 |
| E.2.2. Freie Konvektion an waagerechter, ebener, von unten beheizter Wand | 313 |
| E.2.3. Freie Konvektion an waagerechter, ebener, von unten gekühlter Wand | 313 |
| E.2.4. Freie Konvektion an senkrechter Kreisscheibe | 313 |
| E.2.5. Freie Konvektion an waagerechtem Zylinder | 314 |
| E.3. Wärmestrahlung | 314 |
| E.3.1. Wärmeübergangskoeffizient für Wärmestrahlung bei gleichzeitigem Auf- | |
| treten von Konvektion und Strahlung | 315 |
| E.4. Materialkenndaten | 316 |
| F. Weitere Definition des SOH | 319 |

G. Detaillierte Herleitung eines Wochenstromprofils**321**