

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung und Problemstellung</b>	<b>1</b>
<b>2. Eigene Vorgehensweise sowie Abgrenzung und Weiterentwicklung zum Stand der Technik</b>	<b>3</b>
<b>3. Einführung</b>	<b>11</b>
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

<b>4. Untersuchung und Einordnung des Energiebedarfs eines Fahrzeuges</b>	<b>45</b>
4.1. Kategorisierung von Energiespeichern, Energieerzeugern und Energieverbrauchern . . . . .	45
4.2. Batterieklemmen-Strom- und -Spannung . . . . .	46
<b>5. Motivation 12-Volt-LFP-Starterbatterie</b>	<b>51</b>
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 $\text{LiNiMnCoO}_2$ -Kathode mit Graphit-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-Materialkombination . . . . .	56
5.3. In dieser Arbeit verwendete Lithium-Ionen-Zellen und -Batterien . . . . .	56
<b>6. Abschätzung der notwendigen Batteriekapazität</b>	<b>59</b>
6.1. Relative Vollladekapazität und relativer Gleichstromwiderstand einer gealterten Batterie . . . . .	59
6.2. Festlegung der erforderlichen Batteriekapazität anhand des Fahrzeuggruhstromes . . . . .	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
<b>7. Eigenschaftsvergleich von LFP-, Blei-Säure- und AGM-Starterbatterien</b>	<b>67</b>
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
<b>8. Maßnahmen zur Absicherung von Starterbatterien im Allgemeinen und Vielzellensystemen im Speziellen</b>	<b>99</b>
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
<b>9. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von aktiver und passiver Zellsymmetrierung im Kontext einer LFP-Starterbatterie</b>	<b>115</b>
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
<b>10. Verfahren zur Simulation des Alterungsverhaltens eines Batteriesystems</b>	<b>127</b>
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 Ersatzschaltungselemente . . . . .	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 Zell- Ebene . . . . .	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 Batterie- mulde mittels der Übertragungsfunktion . . . . .	190
10.5. Batterie-Stromprofil als Eingangsgröße für nachfolgende thermische Berech- nungen . . . . .	191
10.6. Berechnung der Zellwickeltemperaturverläufe der wärmsten und kältesten Wo- che 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 Zeit- raum von n Jahren . . . . .	213
10.8. Gesamtprozedur zur Bestimmung der Batteriealterung für $n \cdot j$ Jahre . . . .	214
10.9. Anwendung der Gesamtprozedur am Beispiel einer 12-Volt-4s10p-LFP-Starter- batterie . . . . .	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 Batterie- pack . . . . .	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
<b>11. Vorstellung der entwickelten Batterien und Batteriesysteme</b>	<b>227</b>
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 Auto- motive-Prozessor . . . . .	241

---

<b>12. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>243</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>247</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>259</b>
<b>Glossar</b>	<b>263</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>270</b>
<b>Anhang</b>	<b>282</b>
<b>A. Im Rahmen dieser Arbeit entstandenes Material</b>	<b>283</b>
A.1. Betreute studentische Arbeiten . . . . .	283
A.2. Betreute Praktikanten . . . . .	284
A.3. Eigene Patentanmeldungen . . . . .	285
A.4. Eigene Veröffentlichungen . . . . .	286
<b>B. Vorschlag für ein schnelles aktives Verfahren zur Zellsymmetrierung</b>	<b>291</b>
<b>C. Bordnetz</b>	<b>295</b>
C.1. Spannungslagen im Fahrzeubordnetz . . . . .	295
C.2. Verbauort von Batterie und Sensoren . . . . .	296
<b>D. Batterietechnologien</b>	<b>299</b>
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
<b>E. Thermodynamik</b>	<b>309</b>
E.1. Wärmeleitung . . . . .	309
E.2. Wärmekonvektion . . . . .	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 Auftreten von Konvektion und Strahlung . . . . .	315
E.4. Materialkenndaten . . . . .	316
<b>F. Weitere Definition des SOH</b>	<b>319</b>

