

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. Batteriemangement 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. Volladepkapazität 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 Energieverbrauchern	45
4.2. Batterieklappen-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 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
6. Abschätzung der notwendigen Batteriekapazität	59
6.1. Relative Vollladekapazität und relativer Gleichstromwiderstand einer gealterten Batterie	59
6.2. Festlegung der erforderlichen Batteriekapazität anhand des Fahrzeugruhestromes	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 Fahrscenarien	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 Volladepkapazität $c_{v,akt}$	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. 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 Auf-	
treten von Konvektion und Strahlung	315
E.4. Materialkenndaten	316
F. Weitere Definition des SOH	319

G. Detaillierte Herleitung eines Wochenstromprofils**321**