



David Vergossen

Differenzierte Betrachtung und Bewertung von 12-Volt-Lithium-Ionen- Starterbatterien in PKW- Bordnetzen



Audi-Dissertationsreihe, Band 130





Differenzierte Betrachtung und Bewertung von 12-Volt-Lithium-Ionen-Starterbatterien in PKW-Bordnetzen

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur
David Vergossen

aus

Heinsberg

Berichter:

Universitätsprofessor Dr. rer. nat. Dirk Uwe Sauer,
Universitätsprofessor Dr.-Ing. Kai Peter Birke

Tag der mündlichen Prüfung:

15.06.2018

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten
der Universitätsbibliothek online verfügbar.



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2018

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2018)

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2018
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen
Telefon: 0551-54724-0
Telefax: 0551-54724-21
www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage 2018

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-9837-7
eISBN 978-3-7369-8837-8



Meinen Eltern Rosemarie und Heinz-Gerd Vergossen gewidmet.





Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Dirk Uwe Sauer, Leiter des Lehrstuhls für Elektrochemische Energiewandlung und Speichersystemtechnik an der RWTH Aachen, für die Möglichkeit, diese Arbeit außerhalb der Universität anfertigen zu dürfen und für die wissenschaftliche Freiheit, stete Förderung, Unterstützung und Motivation während der Erstellung dieser Arbeit.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai Peter Birke, Leiter der Arbeitsgruppe Elektrische Energiespeichersysteme am Institut für Photovoltaik der Universität Stuttgart, danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Zudem danke ich allen meinen Kollegen der AUDI AG, die mich bei der Erstellung der Arbeit unterstützt haben für die konstruktive Zusammenarbeit. Namentlich erwähnen möchte ich Dr. Reinhard Hofmann, meinen Betreuer auf Seite der AUDI AG, dem ich für seine regelmäßige fachliche Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit danke, sowie Gerhard Wagner, der mir für meine Arbeiten viel Freiraum gegeben und diese mit großem Interesse und Vertrauen verfolgt hat und Werner Sutor, dem ich für die vielen sowohl auf technischer als auch persönlicher Ebene konstruktiven und unterhaltsamen Gespräche danke, in denen er mir nebenbei die bayerische Sprache nahegebracht hat.

Ebenso geht mein Dank an die Studenten, die ich im Rahmen meiner Arbeit betreuen durfte und an meine Kollegen Daniel Renner und Patrick Jansen, denen ich für die gute Zusammenarbeit und ihre Unterstützung bei dem durch das BMWi geförderten Projekt DriveBattery2015 danke.

Mein besonderer Dank geht auch an Dr. Werner John, der stets ein offenes Ohr hatte und mich unermüdlich motiviert, inspiriert und fachlich unterstützt hat.

Diese Arbeit wäre in dieser Form nicht ohne die Förderung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung und das Bundesministerium für Wirtschaft und Industrie möglich gewesen, welche die Teilnahme an den Förderprojekten E³Car und DriveBattery2015 möglich gemacht haben. Deshalb möchte ich diesen Ministerien meinen herzlichen Dank aussprechen.

Zu guter Letzt schulde ich meinen engeren Freunden, meiner Familie und meinen Eltern großen Dank für den Rückhalt und die Nachsicht während der Anfertigung dieser Arbeit.

Neuburg an der Donau, im Juli 2018
David Vergossen





Erklärung

Ich, David Vergossen, versichere, dass ich die vorliegende Arbeit - bis auf die Betreuung durch das Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA) der RWTH Aachen sowie die von Professor Sauer bei der AUDI AG mit der Vorortbetreuung betrauten Mitarbeiter - selbst und ohne fremde Hilfe angefertigt habe. Die benutzten Quellen und Hilfsmittel sind vollständig angegeben, Zitate sind kenntlich gemacht.

Neuburg an der Donau, 15.06.2018





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-Starter- batterie	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 Impedanz- spektren	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. 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 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 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. 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 <i>SOH</i>	319

**G. Detaillierte Herleitung eines Wochenstromprofils****321**



1. Einleitung und Problemstellung

Die ADAC-Pannenstatistiken der vergangenen Jahre [6, 7] machen durch die steigende Zahl der Batterieausfälle deutlich, dass das herkömmliche Niedervolt-Bordnetz von Personenkraftwagen immer mehr an seine Leistungsgrenzen gerät. Aus diesem Grund ist die zentrale Fragestellung dieser Arbeit, die Eignung von 12-Volt-Starterbatterien in Lithium-Ionen-Technologie als Ersatz für herkömmliche 12-Volt-Starterbatterien in Blei-Technologie und was bei der Lithium-Ionen-Technologie zu berücksichtigen ist. Um diese Fragestellung zu beantworten, werden im Rahmen dieser Arbeit die als am meisten relevant erachteten Aspekte beleuchtet und mit konkreten Lösungsvorschlägen untermauert. In diesem einleitenden Kapitel werden die Aspekte kurz vorgestellt.

Aufgrund der unterschiedlichen Spannungslagen verfügbarer Lithium-Ionen-Zelltechnologien, ist eine Fragestellung, hierzu eine geeignete Zellchemie zu identifizieren, die optimal zur Spannungslage von 12-Volt-PKW-Bordnetzen passt.

Da sich Lithium-Ionen-Zellen bei Belastung anders als Blei-Batterien verhalten, kann zur Bestimmung der notwendigen Batterie-Mindestkapazität zur Deckung des Ruhestrombedarfs eines Fahrzeuges und zur Sicherstellung einer Motorstartfähigkeit unter Berücksichtigung der Batteriealterung nicht in gleicher Weise vorgegangen werden. Deshalb gehört auch die Bestimmung einer zu Bleibatterien äquivalenten Batterie-Mindestkapazität der Lithium-Ionen-Batterie zu einem der Ziele, die in dieser Arbeit gelöst werden sollen.

Liegen die Randbedingungen *Zellchemie* und *Mindestkapazität* fest, soll anhand von konkreten Batteriemustern in der entsprechenden 12-Volt-Lithium-Ionen-Technologie ein Direktvergleich mit Starterbatterien in 12-Volt-Blei-Technologie durchgeführt werden. Im Fokus stehen sollen dabei das Batterieverhalten beim Motorstart und bei der Rekuperation (Energierückspeisung) sowie die Stabilität der Spannung des Fahrzeugbordnetzes und dies bei verschiedenen Temperaturen.

Da die Kosten eines Lithium-Ionen-Batteriesystems über denen eines Blei-Säure-Batteriesystems liegen werden, soll der Aspekt der Batteriealterung unter verschiedenen klimatischen Bedingungen ein weiterer zentraler Bestandteil der in dieser Arbeit in Form von Simulationen durchzuführenden Untersuchungen sein. Ziel soll es hierbei sein, neben den aus Batteriemessungen gewonnenen Daten auf direktem Wege die bei der Batteriekonstruktion entstehenden CAD-Daten in die Simulation einfließen zu lassen, ohne diese in einem zusätzlichen Schritt vereinfachen zu müssen. Diese Alterungsbetrachtung soll an einem konkreten Beispiel demonstriert werden.

Ein Aspekt, der für die Serienproduktion eines Batteriesystems wichtig ist, sind die Kosten der Batteriezellen und der Elektronik innerhalb der Batterie. Die Effizienz der Elektronik wirkt sich auf den Kraftstoffverbrauch aus. Da auf Zellpreise kein direkter Einfluss genom-

men werden kann, soll der Einfluss der Effizienz der Elektronik des Zellausgleichssystems auf die Batterie-Herstellungskosten und auf die laufenden Kosten durch einen eventuellen Kraftstoff-Mehrverbrauch betrachtet werden. Konkret sollen ein aktives und ein passives Zellsymmetrierungssystem miteinander verglichen werden.

Sicherheit, Redundanz und Online-Diagnosefähigkeit von Lithium-Batteriesystemen bei einem gleichzeitig geringen System-Innenwiderstand, sind Anforderungen, die an ein zukünftiges Serienprodukt gestellt werden und deshalb ebenfalls einen Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit darstellen sollen.

Am Ende der Arbeit sollen schlussendlich alle im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Batterien kurz präsentiert werden.

In Kapitel 2 wird die Vorgehensweise der Bearbeitung dieser Kernthemen detailliert und zum Stand der Technik abgegrenzt.

2. Eigene Vorgehensweise sowie Abgrenzung und Weiterentwicklung zum Stand der Technik

In diesem Kapitel wird aufgezeigt, wie die in den einzelnen Kapiteln dieser Arbeit behandelten Problemstellungen in der Literatur thematisiert werden und wie sich die hier vorgestellten Ansätze vom bisherigen Stand der Technik unterscheiden beziehungsweise wie auf vorhandenen Ansätzen aufgebaut wird. Das Kapitel kann zudem als Inhaltsangabe genutzt werden, beginnend mit den auf dem Grundlagen-Kapitel 3 folgenden Kapiteln.

Zu Kapitel 4

Als Grundlage für eine in Kapitel 5 thematisierte Auswahl der in einer Starterbatterie zum Einsatz kommenden Batterietechnologie, für die in Kapitel 6 durchgeführte Abschätzung der für den Fahrzeugeinsatz notwendigen Batteriekapazität und für einen Eigenschaftsvergleich zwischen Blei- und LiFePO_4 -Starterbatterien in Kapitel 7, bedarf es an Informationen zum qualitativen Verhalten von Batteriestrom und Batteriespannung der Kleinwagen-, Mittel- und Oberklasse, vor, während und nach einer Fahrt. Außerdem werden die zugehörigen Ruhestromverbräuche und mittleren Startströme benötigt. In der Literatur existieren Übersichten zur Klassifizierung der Energiebedarfe und grobe Ruhestromangaben, wie beispielsweise in [57, S. 14-15]. In Kapitel 4 dieser Arbeit werden daher aus exakten Messungen von Batteriestrom und -spannung in den erwähnten Fahrzeugklassen die relevanten Informationen abgeleitet und aufbereitet dargestellt.

Zu Kapitel 5

Motiviert wird die Notwendigkeit der Wahl einer neuen Speichertechnologie durch die Auswertung der ADAC-Pannenstatistiken der Jahre 2011, 2013, 2014 und 2015 [6, 7]. In [45] wird eine Beurteilung verschiedener Speichersysteme vorgestellt, welche die Lithium-Ionen-Technologie für den geplanten Einsatzbereich identifiziert. In [24, S. 11-17] werden elektrische Eigenschaften diskutiert, die jedoch zu keiner eindeutigen Kathoden-Anoden-Materialkombination für den Einsatz in einer 12V-Starterbatterie führen. Zu einer in Kapitel 5 durchgeführten Auswahl einer geeigneten Batterietechnologie werden deshalb die Ansätze zu den Spannungslagen aus [24, S. 13] zugrunde gelegt und neu diskutiert. Mögliche Kathoden- und Anodenpotenziale werden hierzu auf Basis der Veröffentlichungen von [42], [46] und [76] untersucht.

Zu Kapitel 6

In Kapitel 6 wird eine Methode vorgeschlagen, die zur Abschätzung der für den Einsatz in einem PKW-Bordnetz notwendigen Kapazität einer 12-Volt- LiFePO_4 -Starterbatterie dient. Zur Auslegung der Batteriekapazität wird in [24, S. 17-18] eine Mindestkapazität vorge-

halten, zur Gewährleistung eines erfolgreichen Motorstarts bei tiefen Temperaturen, zur Kompensation der Batterieselbstentladung und zur Deckung des Fahrzeug-Ruhestromverbrauchs unter Berücksichtigung einer Rekuperationsreserve und einer Kapazitätsabnahme durch Alterung. In Kapitel 6 dienen als Berechnungsgrundlage analog zu [24, S. 17-18], der Fahrzeugruhestrom, ein Nachlaufstrom, eine für einen Motorstart bei Kälte vorgehaltene Mindestkapazität und die Selbstentladung der Batterie⁽¹⁾ (ungealterte Vollladekapazität). Zur Berücksichtigung der Batteriealterung wird in Kapitel 6, ausgehend von einer mittels der vorgenannten Auslegungskriterien berechneten Batteriekapazität, mit Hilfe der auf den Batterie-Neuzustand normierten Batterie-Vollladekapazität (relative Vollladekapazität) und des ebenfalls auf den Batterie-Neuzustand normierten Batterie-Gleichstromwiderstandes (relativer Gleichstromwiderstand) eine Kapazität berechnet, welche die Batterie besitzen muss, um den Auslegungskriterien Genüge zu leisten. Dazu wird ein Zusammenhang hergeleitet, der es erlaubt, durch Kenntnis des zu einem bestimmten Batterie-Alterungszustand gehörigen relativen Gleichstromwiderstandes und der ungealterten Vollladekapazität die notwendige Batterie-Neukapazität unter Berücksichtigung der Batteriealterung zu bestimmen.

Zu Kapitel 7

In Kapitel 7 wird ein Eigenschaftsvergleich zwischen 12-Volt-LiFePO₄-Starterbatterien und 12-Volt-Blei-Starterbatterien durchgeführt. Diese Untersuchung besteht aus drei Tests an Batterien mit den Kapazitäten 36 Ah und 44 Ah. Ein weiterer Test wird an einer AGM-Batterie mit 105 Ah durchgeführt. Am Ende des Kapitels werden aus den ersten drei Untersuchungen die zur Eigenschaftsbewertung der Batterien als relevant erachteten Eigenschaften in Form eines Spinnendiagramms dargestellt, aus dem übersichtlich zu erkennen ist, welche Batterie bei welcher Eigenschaft ihre Stärken und Schwächen hat. Im Einzelnen werden folgende Untersuchungen durchgeführt, von denen die ersten drei an Batterien mit den Kapazitäten 36 Ah und 44 Ah und die letzte Untersuchung an einer AGM-Batterie mit 105 Ah im Vergleich zu einer 44 Ah-LiFePO₄-Starterbatterie durchgeführt werden:

- Zunächst werden Kaltstarttests nach DIN EN 50342 durchgeführt, die als Ergebnis zu jedem Versuch eine Kaltstartkapazität und einen Gleichstromwiderstand liefern. Diese beiden Größen fließen in ein am Ende des Kapitels 7 erstelltes Spinnendiagramm ein.
- Motorstarttests bei verschiedenen Temperaturen und Ladezuständen an einem Mittelklasse-Diesel-PKW, einmal mit Batterie im Fahrzeug Heck und einmal mit Batterie im Motorraum. Hierbei wird die zum Motorstart benötigte Energie der ersten halben Sekunde; eine Größe, welche die Dynamik des Starts bewertet und eine Größe für eine energetische Betrachtung des Starts für das Spinnendiagramm abgeleitet.
- Auf einem Bordnetzprüfstand wird bei verschiedenen Temperaturen und Ladezuständen ein ISO-Spurwechsel eines PKW mit elektrischer Lenkung bei überlagertem und nachgelagertem Eingriff der Fahrdynamikregelung simuliert. Dabei wird die Bordnetzstabilität bewertet. Bewertungsgrößen für das Spinnendiagramm: Maximalstrom an Batterie, Dynamikregelung und elektrischer Lenkung; Batteriespannungsminimum;

⁽¹⁾Einer Rekuperationsreserve wird in Kapitel 6 basierend auf Erfahrungswerten nicht Rechnung getragen. Sie wird durch die Berücksichtigung von Ruhestrom, Nachlaufkapazität, vorgehaltener Kapazität zur Kompensation der Selbstentladung und vorgehaltener Mindestkapazität für einen Motorstart bei Kälte abgedeckt.

maximaler Batteriespannungseinbruch; maximale Steigung der Batteriespannung; maximal durch die Batterie abgegebene Leistung.

- Auf einem Rollenprüfstand wird mit einem 3-Liter-Dieselfahrzeug ein NEFZ-Zyklus gefahren und dabei eine 105 Ah-AGM-Starterbatterie mit einer 44 Ah-LiFePO₄-Starterbatterie hinsichtlich der Ladeakzeptanz, mit Fokus auf die Rekuperation in Schubphasen bewertet. Die Ergebnisse aus diesem Versuch fließen nicht mit in das Spinnendiagramm ein, werden jedoch in der Gesamtbewertung berücksichtigt.

Zu dem in Kapitel 7 durchgeführten Eigenschaftsvergleich zwischen 12-Volt-LiFePO₄- und 12-Volt-Blei-Starterbatterien sind keine vergleichbaren Veröffentlichungen bekannt.

Zu Kapitel 8

Ziel des Kapitels 8 sind Maßnahmen zur Absicherung von Starterbatterien im Allgemeinen und Vielzellensystemen im Speziellen. Das Kapitel wird eingeleitet durch eine Sensibilisierung zum Umgang mit und zum Verhalten von LiFePO₄-Zellen im Falle eines Betriebs außerhalb deren Spezifikation. Geeignete Testverfahren werden beispielsweise in [20] veröffentlicht, jedoch lassen sich Ergebnisse solcher Tests nicht auf bestimmte Zelltypen, wie beispielsweise LiFePO₄-Zellen verallgemeinern. Deshalb werden die kritischsten Tests in Kapitel 8 auf die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Zellen angewendet.

Im Anschluss an eine Diskussion möglicher Zellausfallmechanismen werden zwei Topologien zum Einsatz von Schmelzsicherungen und ihre Auswirkung auf den Innenwiderstand des Batteriesystems vorgestellt und darauf aufbauend ein Verfahren, bei dem Halbleiter an Stelle der Schmelzsicherungen zum Einsatz kommen.

1. Zunächst wird ein Verfahren aus [48] vorgestellt, bei dem die Batteriezellen eines Batteriesystems mittels als elektrische Verbindungselemente und gleichzeitig als Schmelzsicherungen fungierender Bonddrähte mit einer Stromsammelplatte verbunden werden.
2. In einer Weiterentwicklung des Verfahrens aus Punkt 1, werden die Schmelzsicherungen aus den Vertikalzweigen der seriell verschalteten Zellen in die zur Parallelschaltung der Zellen dienenden horizontalen Zweige verlagert. Das Verfahren bietet den Vorteil einer Reduktion des Batterie-Innenwiderstandes. Für dieses Verfahren wurde im Rahmen dieser Arbeit das Patent [91] erteilt. Ferner werden an diesem System zwei Maßnahmen umgesetzt, die zur Verbesserung der Stromverteilung auf die Batteriezellen dienen, um eine gleichmäßigere Alterung aller Batteriezellen und ein verbessertes Verhalten bei Einsatz von mittels Stromimpulsen arbeitenden Zellsymmetrierungssystemen zu erzielen.
3. Als in dieser Arbeit entstandene Weiterentwicklung (Patent [89]) des passiven Absicherungsverfahrens aus Punkt 2 werden die Schmelzsicherungen durch intelligente Halbleiter und eine Diagnoseschaltung ersetzt. Diese Schaltung ermöglicht es während die Batterie weiter genutzt wird, fehlerhafte Zellen aus dem System elektrisch zu isolieren oder einzelne Zellen zu diagnostizieren.

Zum Abschluss des Kapitels 8 wird ein in dieser Arbeit entwickeltes System vorgestellt, das jede Art von 12-Volt-Starterbatterie vor einer falsch gepolten Batterie des Spenderfahrzeu-

ges⁽²⁾, vor Überspannung oder vor Überstrom schützt. Für dieses Verfahren wurde in [95] ein Patent erteilt. In [30] wird ein System vorgestellt, das ebenfalls vor einer falsch gepolten Batterie eines Spenderfahrzeuges schützt, jedoch ist die Anforderung darüber hinaus nicht erfüllt, auch bei absolut leerer Batterie des Empfängerfahrzeugs⁽³⁾ und gleichzeitig verpolder Batterie des Spenderfahrzeugs einen wirksamen Schutz der Batterie des Empfängerfahrzeugs zu gewährleisten. Das im Rahmen dieser Arbeit patentierte System setzt diese Anforderung um, indem es die durch das Spenderfahrzeug gelieferte Spannung richtig polarisiert, transformiert und stabilisiert.

Zu Kapitel 9

Die Aufgabenstellung dieses Kapitels ist es, abzuwägen, ob für eine 12-Volt-LiFePO₄-Starterbatterie der Einsatz eines aktiven oder passiven Zellsymmetrierungssystems wirtschaftlicher ist. In der Literatur wird diese Frage häufig sehr pauschal damit beantwortet, dass eine aktive Zellsymmetrierung der passiven Zellsymmetrierung vorzuziehen sei, da es die den Zellen entnommene Energie nicht in Wärme umwandelt (vgl. [116]). Gegen aktive Zellsymmetrierungssysteme wird häufig das Argument der komplexen Schaltungstechnik angeführt, die im rechten Teil der ersten in [109] aufgeführten Grafik erkennbar ist.

Bei der im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit durchgeführten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung kommt die Kapitalwertmethode zum Einsatz, die Zinseffekte und Inflation mit berücksichtigt. Die Kapitalwertmethode wird häufig bei der Planung und dem Betrieb energiewirtschaftlicher Anlagen genutzt, wie beispielsweise bei der Abwägung des Einsatzes eines Pumpspeicherkraftwerks oder eines Gaskraftwerks zur Sicherstellung der Minutenreserve⁽⁴⁾.

Ausgangspunkt ist ein auf Basis einer Wirkungsgradkette von Verbrennungsmotor, Generator und Batterie berechneter Benzinmehrverbrauch beim Einsatz einer passiven Zellsymmetrierung. Außerdem wird angenommen, dass eine der Zellgruppen der betrachteten Batterie eine um den Faktor sechs erhöhte Selbstentladung hat. Für die aktive Zellsymmetrierung wird pauschal angenommen, dass es keine Energie benötigt oder in Wärme umwandelt und somit keinen Benzinmehrverbrauch erzeugt. Nach anschließender Anwendung der Kapitalwertmethode wird unter Berücksichtigung der Inflationsrate, der Benzinpreisentwicklung und eines Zinssatzes eine Darstellung erzeugt, welche die Investitionsmehrkosten als Funktion des Amortisationsjahres zeigt. Aus dieser Kurve kann direkt abgelesen werden, nach welcher Zeit sich der Einsatz eines aktiven Zellsymmetrierungssystems im Kontext einer 12-Volt-LiFePO₄-Starterbatterie rentiert.

Zu Kapitel 10

Der Fokus dieses Kapitels liegt primär auf der Entwicklung einer Prozedur bei der mehrere Simulationsmodelle zum Einsatz kommen und sekundär auf der Simulation eines Szenarios mit Hilfe dieser Prozedur.

⁽²⁾Als Spenderfahrzeug wird das Fahrzeug bezeichnet, das eine Starthilfe leistet.

⁽³⁾Mit Empfängerfahrzeug ist das Fahrzeug gemeint, das eine Starthilfe entgegennimmt.

⁽⁴⁾Die Minutenreserve dient im deutschen Stromnetz zum kurzfristigen, mit einer fünfzehn-minütigen Vorlaufzeit versehenen Ausgleich von Schwankungen des Stromverbrauchs, um die auf 50 Hz festgelegte Netzfrequenz konstant zu halten.

Die Prozedur dient der Simulation der Alterung der Zellen einer 4s10p-LiFePO₄-Starterbatterie in einem Heißlandklima und in einer gemäßigten Klimazone. Die Batterie befindet sich im simulierten Szenario in der dafür vorgesehenen Batteriemulde im Heck eines Oberklassefahrzeuges. Es werden drei verschiedene Materialien simuliert, welche die Zellen im Batteriepack umgeben. Dabei handelt es sich um Luft, Steinwolle und Phasenwechselmaterial. Das Modell ist ein Zusammenspiel aus Berechnungen in MATLAB/Simulink und einem Finite-Elemente-Modell, das die thermischen Eigenschaften der Batterie und deren direkter Umgebung abbildet.

1RC-Klemmenspannungsmodell mit Alterungsschnittstelle:

Zum Kern des Modells aus Kapitel 10 gehört ein Klemmenspannungsmodell zur Simulation einer Batteriezelle mit *einem* RC-Glied, das zur Berechnung der elektrischen Verlustleistung dient und mittels eines eigens entwickelten geometrischen Verfahrens sehr schnell parametrisiert werden kann, ohne die sonst üblichen Algorithmen (vgl. [43, S. 9-10]) zur Parameteridentifikation zu nutzen. Das 1-RC-Modell wird um eine ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Alterungsschnittstelle erweitert, die es ermöglicht, die Alterung der Modellparameter, wie die Vollladekapazität C_v der modellierten Batteriezelle, die konzentrierten Bauelemente R und C und der Serienwiderstand R_s nachzuführen. Diese Nachführung geschieht mittels der Kenntnis der Verhältnisse aus aktuellem Zell-Gleichstromwiderstand zum Zell-Gleichstromwiderstand einer neuen Zelle (r_{DC}) und dem Verhältnis aus aktueller Zell-Vollladekapazität zur Zell-Vollladekapazität einer neuen Zelle (c_v). Der Zusammenhang zwischen den Modellparametern und r_{DC} beziehungsweise c_v wird mittels der Erkenntnis ermöglicht, dass die Grenzfrequenz ω_g des Impedanzspektrums einer neuen und einer zyklisch gealterten LiFePO₄-Zelle annähernd konstant bleibt und der Annahme, dass sich dieses Verhalten auf die kalendarische Zellalterung verallgemeinern lässt.

2RC-Hybridmodell als Weiterentwicklungsvorschlag des 1RC-Modells:

In diesem Unterabschnitt des vorherigen Abschnittes zum 1RC-Klemmenspannungsmodell, wird eine mögliche Weiterentwicklung des zuvor beschriebenen 1RC-Modells, das *eine* Zeitkonstante besitzt hin zu einem 2RC-Hybridmodell mit *zwei* Zeitkonstanten vorgestellt, das mittels Impulsen und mittels Impedanzspektren parametrisiert wird und die Vorteile beider Parametrierungsvarianten vereint.

Es sei darauf hingewiesen, dass das 2RC-Hybridmodell in dieser Arbeit nicht weiter verwendet wird.

Das 2-RC-Modell wird zunächst auf Basis der aus Impedanzspektren *mit* und *ohne* überlagerten Gleichstrom gewonnenen Messwerte parametrisiert. Anschließend werden die Modellparameter mit einem wie in [43, S. 9-10] vorgeschlagenen nichtlinearen Optimierungsalgorithmus aus den durch ein Impulsverfahren gewonnenen Messdaten abgeleitet.

Mittels des im Rahmen dieser Arbeit vorgeschlagenen Residuenmengendiagramms, das auf einer Kramers-Kronig-Transformation beruht, werden die Impedanzspektren bewertet. Dabei stellt sich heraus, dass nur jene Impedanzspektren verwendbar sind, die ohne überlagerten Gleichstrom gemessen worden sind, mit der Folge, dass die daraus gewonnenen Parameter keine Stromabhängigkeit, jedoch im Vergleich zu den mittels Impulsen gewonnenen Parametern, eine höhere Genauigkeit im Bereich kleiner Ströme aufweisen. Anschließend

wird ein finales Modell abgeleitet, das Parameter aus dem Impuls- und Impedanzverfahren enthält, alle geforderten Abhängigkeiten besitzt und als Hybridmodell bezeichnet wird.

Die hystereseförmige Ruhespannungskennlinie der verwendeten Batteriezelle wird in der Literatur in der Regel als eine zweiteilige Hysterese betrachtet, die aus einem Lade- und Entlade-Ast zusammengesetzt ist. Jedoch befinden sich zwischen diesen beiden Hystereseästen auch noch kleine Hysteresen, die in dieser Arbeit als Subhysteresen bezeichnet werden und die es mit möglichst einfachen mathematischen und messtechnischen Mitteln im Modell abzubilden gilt. In [106] werden für diverse Anwendungsfälle Hysterese-Modelle vorgestellt, die jedoch mathematisch und hinsichtlich der Messwerterfassung aufwändig erscheinen. Deshalb beinhalten die Implementierungen der Haupt- und Subhysteresen der modellierten Batteriezelle in dieser Arbeit lediglich eine Summe von e-Funktionen und einige wenige logische und mathematische Operationen (Erweiterte Ruhespannungshysterese).

Online-Bestimmungen von Modellparametern werden beispielsweise in [26] und [27] vorgeschlagen. In dieser Arbeit wird jedoch aus einem auf Basis des bei einer Belastung der Batterie entstehenden Spannungseinbruchs und des zugehörigen gemessenen Stromes zunächst der Serienwiderstand R_s des 2-RC-Modells der simulierten Zelle berechnet und auf sein Butler-Volmer-Verhalten plausibilisiert. Um dieses Verfahren wird das 2-RC-Modell ergänzt. Auf die Kenntnis des nun in Echtzeit vorliegenden Serienwiderstandes basierend, wird ferner ein mathematisches Verfahren vorgeschlagen, das sich die in Kapitel 10.2.4 gefundenen Zusammenhänge zwischen r_{DC} und c_v und den Modellparametern zunutze macht, um aus dem berechneten Serienwiderstand alle weiteren Modellparameter $C_{p,1}$, $C_{p,2}$, $R_{p,1}$, $R_{p,2}$ zu bestimmen.

Alterungsmodell:

Ziel des Alterungsmodells ist es, ausschließlich auf Basis einer vorliegenden sechsmonatigen Messreihe der *kalendrischen* Alterung von r_{DC} und c_v der im modellierten System eingesetzten Batteriezelle, die Alterung aller Modellparameter (R_s , C , R) zu bestimmen. Die Fokussierung auf die *kalendrische* Alterung basiert auf Erkenntnisse aus [22, S. 8] und weiter in Kapitel 10 näher erläuteter Gründe. Die zeit- ladezustands- und temperaturabhängigen Messreihen für r_{DC} und c_v werden zunächst in mathematische Funktionen überführt. Ähnlich wird dies in [21] umgesetzt, jedoch wird dabei nicht drauf eingegangen, wie mit der Aufsummierung von Alterungsanteilen bei Temperatur- oder Ladezustandswechseln verfahren wird. In Kapitel 10 dieser Arbeit wird zum Zwecke einer solchen Aufsummierung eine Kumulationsfunktion implementiert, welche die Navigation zwischen den Funktionen abhängig von Temperatur, Ladezustand und Zeit während deren stückweisen Aufsummierung sicherstellt.

Ablauf der elektrothermischen Simulation mit Alterungsberechnung:

Batteriemodelle, die thermische Vorgänge nicht nur statisch sondern dynamisch und dies über längere Zeiträume abbilden sollen, werden häufig in ein elektrisches Modell, in dem beispielsweise Zell-Verlustleistungen, Lade- und Gesundheitszustände berechnet werden und in ein thermisches Modell aufgeteilt, in dem die Zelltemperaturen berechnet werden. Das elektrische Modell übergibt dem thermischen Modell eine Verlustleistung aus der das thermische Modell eine Zelltemperatur berechnet. In [24, S. 19] wird ein solches gekoppeltes Modell gezeigt. Der thermische Teil eines solchen Modells ist rechenaufwändig, wenn er nicht wie in

[24, S. 19-23] durch Nutzung von Symmetrien und Diskretisierungen mittels konzentrierter Elemente, wie thermische Widerstände, Kapazitäten und Wärmequellen vereinfacht werden kann. Komplexere Geometrien lassen sich so nur schwierig abbilden.

Hier setzt das in Kapitel 10 entwickelte Modell mit einem neuen Verfahren an. Die thermische Simulation soll so umgesetzt werden, dass der thermische Teil des Modells als Finite-Elemente-Modell aufgebaut und trotz der zusätzlichen Implementierung der Batteriealterung mit einem vergleichbaren Rechenaufwand betrieben werden kann, wie ein Modell der Art von [24, S. 19-23], indem sich eines Kunstgriffs bedient wird, der nachfolgend beschrieben wird.

Mit Hilfe der Batteriemuldentemperatur des wärmsten und kältesten Tages eines Jahres einer Klimazone, mit einem auf Basis von Fahrzeugmessungen zusammengestellten charakteristischen Batterielaststromprofils und unter Vorgabe der zum aktuellen Alterungszustand gehörenden Werte für r_{DC} und c_v , wird der Temperaturverlauf der Zellwickel für eine heißeste und kälteste Woche eines Jahres berechnet (7-Tages-Verlauf).

Auf Basis des 7-Tages-Verlaufs kann unter Vorgabe des Muldentemperaturverlaufs eines Jahres mit Hilfe eines Extrapolationsverfahrens der Zellwickeltemperaturverlauf von n Jahren berechnet werden (n -Jahres-Verlauf). Dieses Extrapolationsverfahren wird in dieser Arbeit als TI-Expansion bezeichnet.

Der so entstandene n -Jahres-Verlauf dient als Eingangsgröße der Kumulationsfunktion, die zur Alterungsberechnung dient und die zu einer um n Jahre gealterten Zelle gehörigen r_{DC} und c_v als Ergebnis liefert. Gilt beispielsweise $n=3$, so können 15 Jahre Alterung derart berechnet werden, dass zunächst ein 3-Jahres-Verlauf berechnet wird und basierend darauf die Alterung von r_{DC} und c_v bestimmt wird und mit diesen neuen Werten für r_{DC} und c_v ein neuer 7-Tages-Verlauf berechnet wird aus dem wieder ein 3-Jahres-Verlauf mit zugehörigen r_{DC} und c_v berechnet wird, bis nach fünf Schritten die Werte für r_{DC} und c_v einer um 15 Jahre gealterten Batterie feststehen.

Zu Kapitel 11

In diesem abschließenden Kapitel werden in knapper und bebildeter Form die Batterien vorgestellt die im Rahmen dieser Arbeit entstanden sind. Im Einzelnen handelt es sich um folgende Batterien:

- LFP-Versuchsbatterie mit 36 Ah in 4s2p-Konfiguration
- LFP-Versuchsbatterie mit 44 Ah in 4s10p-Konfiguration
- LFP-Versuchsbatteriesystem mit 60 Ah in 4s26p-Konfiguration
- Vorschlag für ein LFP-Versuchsbatteriesystem in 4s48p-Konfiguration
- LFP-Rapid-Prototyping-System mit 44 Ah in 4s10p-Konfiguration
- LFP-Rapid-Prototyping-System mit 44 Ah in 4s10p-Konfiguration mit Automotive-Prozessor

Ein besonderes Highlight ist hierbei das LFP-Rapid-Prototyping-System mit 44 Ah in 4s10p-Konfiguration. Das System dient dazu, Funktionen und Algorithmen für eine 12-Volt-LiFePO₄-

Starterbatterie im Fahrzeug ohne aufwändige Programmierung schnell und unkompliziert zu testen. Es erlaubt die Diagnose einer als Referenzzelle dienenden Einzelzelle, die aus dem System heraus getrennt und durch eine temporäre Ersatzzelle substituiert werden kann, während die Referenzzelle beispielsweise hinsichtlich ihrer Kapazität und ihres Impedanzverhaltens diagnostiziert wird. Um die Verlustleistung bei der Kapazitätsbestimmung der Referenzzelle zu minimieren, wird die der Zelle entnommene Energie dem Gesamtsystem mit Hilfe eines Zweiquadrantenstellers - einer Kombination aus Hochsetz- und Tiefsetzsteller - wieder zurückgeführt. Auf einer als Rapid-Prototyping-Computer eingesetzten Micro-AutoBox befindet sich die gesamte Algorithmik des Systems. Als Batteriepack kommt ein 4s10p-System zum Einsatz. Die Messung von vier Zellspannungen und vier Temperaturen und die Zellsymmetrierung werden mit einem integrierten BMS-Schaltkreis realisiert. Die Strommessung übernimmt ein spezieller Automotive-Batteriesensor. Zum Abschalten des Systems oder zur Regelung des Batteriestromes wird ein Schaltkreis aus mehreren sehr niederohmigen Feldeffekttransistoren vorgesehen. Da dieses System speziell für den Einsatz als 12-Volt-LiFePO₄-Starterbatterie vorgesehen ist, inklusive der speziellen Leistungselektronik und Diagnosemöglichkeit, ist kein vergleichbares System in der Literatur zu finden. Das Kapitel 11 schließt mit einer Weiterentwicklung dieses Systems um den Einsatz eines Automotive-Prozessors ab.

3. Einführung

Dieses Kapitel erläutert zunächst den Aufbau und die Funktionsweise eines Fahrzeugbordnetzes, liefert einen Überblick zu den wesentlichen Merkmalen von Batteriemodellen und führt die in dieser Arbeit verwendeten Klemmenspannungsmodelle ein.

Anschließend werden dem Leser die wichtigsten Informationen zur Funktionsweise und zum Aufbau einer 12-Volt-Lithium-Ionen-Starterbatterie geliefert.

Es folgen Erläuterungen zu den verwendeten batteriebezogenen Größen, dem Verfahren der elektrochemischen Impedanzspektroskopie, zur Kramers-Kronig-Transformation, die zur Bewertung gemessener Impedanzspektren dient und zu einem Kaltstarttest nach DIN EN 50342.

Vorbereitend auf die in dieser Arbeit durchgeführte elektrothermische Simulation werden Wärmeübergangsmechanismen erläutert und zum besseren Verständnis der durchgeführten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung aktiver und passiver Zellsymmetrierungssysteme, wird die aus der dynamischen Investitionsrechnung stammende Kapitalwertmethode eingeführt.

3.1. Fahrzeugbordnetz

Da in späteren Kapiteln Komponenten des Fahrzeugbordnetzes thematisiert und in den Kontext zur Starterbatterie gesetzt werden, liefert dieses Kapitel das notwendige Grundverständnis über ein herkömmliches 12-Volt-Fahrzeugbordnetz mit Blei-Starterbatterie.

Abstrahiert betrachtet kann das Fahrzeugbordnetz als das Zusammenspiel des Energiebordnetzes, welches sich aus Energieerzeuger, -verbraucher und -speicher⁽¹⁾ zusammensetzt und dem Kommunikationsnetz verstanden werden, das die Kommunikation der im Fahrzeug verbauten Steuergeräte untereinander ermöglicht. Überwacht wird das Fahrzeugbordnetz durch das Energiemanagement.

⁽¹⁾Wohl wissend, dass nach dem Energieerhaltungssatz keine Energie erzeugt oder verbraucht werden kann, werden in dieser Arbeit die Begriffe *Energieerzeuger* und *Energieverbraucher* synonym zur Beschreibung jener Systeme verwendet, die fossile oder kinetische Energie in elektrische Energie umwandeln und dem Fahrzeugbordnetz zur Verfügung stellen oder die elektrische Energie in andere Energieformen, wie beispielsweise Wärmeenergie Lichtenergie oder Bewegungsenergie umwandeln. Dies wird damit begründet, dass es sich dabei um im Automobilumfeld gebräuchliche Begriffe handelt.

3.1.1. Kommunikationsnetz des Fahrzeugbordnetzes

Die elektronischen Systeme eines Fahrzeuges und deren untergeordnete Systeme (Subsysteme) besitzen in der Regel Steuergeräte, die untereinander durch Bussysteme vernetzt sind über die sie Ihre Daten austauschen. Auch Fehlerdiagnoseinformationen der durch die Steuergeräte verwalteten Komponenten⁽²⁾ werden erfasst und über die jeweiligen Busse kommuniziert, um sie dem Fahrer anzuzeigen oder über einen Diagnoseanschluss verfügbar zu machen. Die heute in modernen Fahrzeugen üblichen Datenbusse sind Controller Area Network (CAN), Local Interconnect Network (LIN), FlexRay und Media Oriented Systems Transport Bus (MOST). Ein neuer Entwicklungstrend ist das Automotive-Ethernet.

Abbildung 3.1 zeigt beispielhaft eine vereinfachte Darstellung eines Teils einer solchen Vernetzungsstruktur. Das Gateway (1) stellt die zentrale Komponente der Busarchitektur dar und stellt die Datenkommunikation für die Subsysteme (2) bis (9) sicher, die teilweise unterschiedliche Bussysteme nutzen. Für das sicherheitskritische Subsystem 2 wird der besonders ausfallsichere FlexRay-Bus verwendet. Der ringförmig ausgelegte MOST-Bus findet beim Multimediasubsystem (3) Verwendung, wo es vor allem auf eine schnelle Datenübertragung und weniger auf Ausfallsicherheit ankommt. Die Getriebe- und Motorsteuerung (4) und die Steuergeräte für die Fenster, das Ausstelldach und die Klimaanlage (6), der Diagnoseanschluss (7), das Anzeigesystem (8) und die Abstandsregelung (9) nutzen den CAN-Bus.

Die unterhalb der Steuergeräte für Fenster, Ausstelldach und Klimaanlage angeordneten Systeme kommunizieren über den LIN-Bus, da sie nicht sicherheitsrelevant sind und nur geringe Datenmengen austauschen. Anlasser, Generatorregler und der Batteriesensor⁽³⁾ nutzen ebenfalls den LIN-Bus.

⁽²⁾Dies können Aktuatoren, Sensoren, Befehlsgeber – beispielsweise in Form einer Eingabeeinheit oder eines Schalters – und weitere Steuergeräte sein.

⁽³⁾Der Batteriesensor dient in Verbindung mit dem Energiemanagement der Ermittlung des Batteriezustandes. Auf den Batteriesensor und das Energiemanagement wird in Kapitel 3.1.3 näher eingegangen.

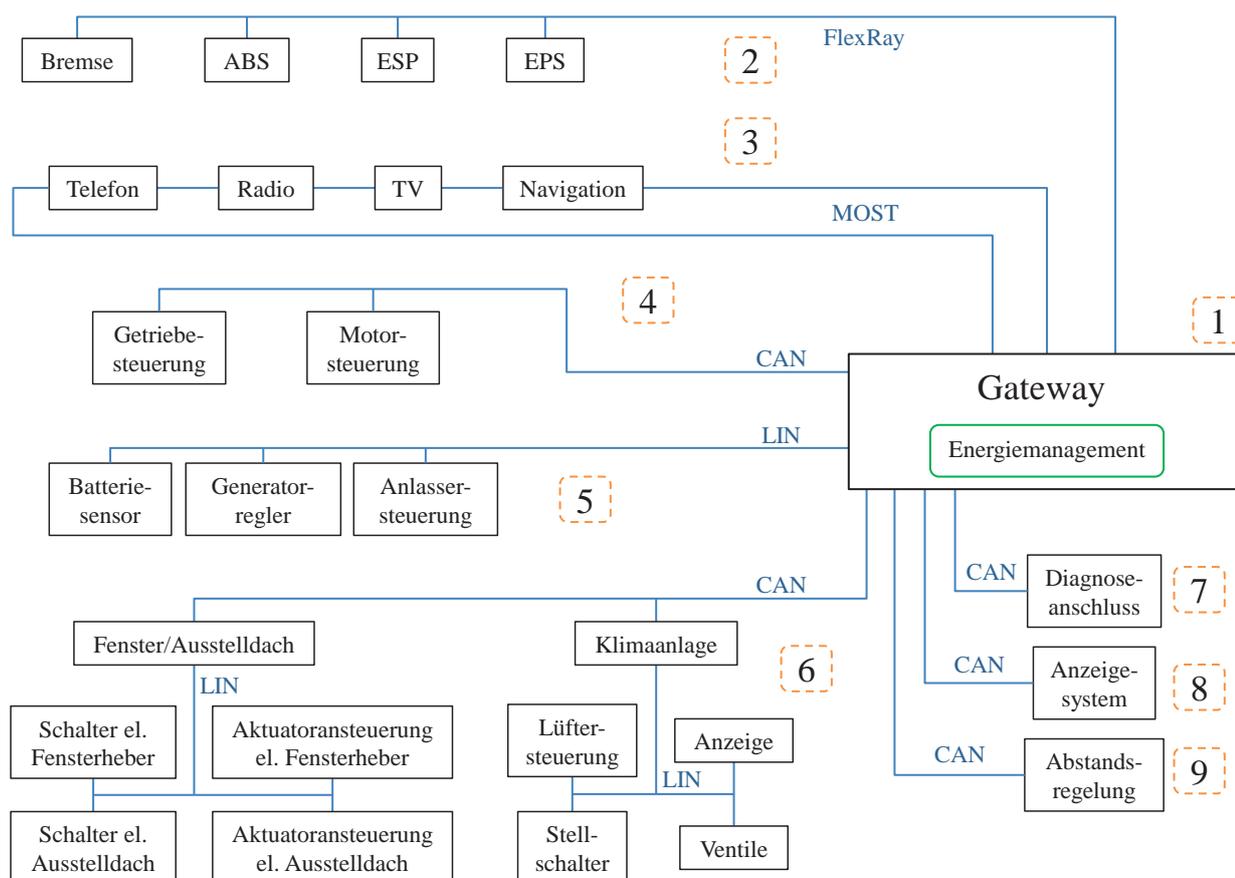


Abbildung 3.1.: Exemplarische und schematische Darstellung der Vernetzung einiger Bordnetzkomponenten über die Datenbussysteme LIN, CAN, FlexRay und MOST. Das Gateway (1) dient als zentrales Steuergerät und Router, um eine Kommunikation der Busse untereinander sicherzustellen. Die Software des Energiemanagements und auch die Auswertung der Diagnoseinformationen der angeschlossenen Steuergeräte werden in diesem Beispiel auf dem Gateway ausgeführt.

3.1.2. Energiebordnetz

Aufgrund der stetig steigenden Anzahl der verbauten Verbraucher, der folglich steigenden Stromdichten in den Versorgungsleitungen, der dadurch notwendigen stetigen Erhöhung der Leiterquerschnitte und den damit einhergehenden steigenden Kosten, wurden Ende der siebziger Jahre die damals üblichen 6 V-Bordnetze durch 12 V-Bordnetze abgelöst. Heute wird aus dem gleichen Grund zum 12-Volt-Bordnetz häufig ein weiteres Bordnetz mit 48 V betrieben.

Die in Kapitel 3.1.1 vorgestellten Steuergeräte und die durch diese kontrollierten Sensoren, Befehlsgeber und Aktoren stellen allesamt Energieverbraucher innerhalb des Fahrzeugbordnetzes dar, die über die Datenvernetzung hinaus auch hinsichtlich der Energieflüsse miteinander vernetzt sind und das Energiebordnetz bilden.

Wird S_2 in Position 3 gebracht, zieht das Starter-Relais S_3 an und versorgt den Starter (M) mit Energie bei der entsprechend notwendigen Leistung, um den Verbrennungsmotor zu starten, während zeitgleich alle anderen Verbraucher Ihre Energie über Klemme 30 oder Klemme 15 beziehen.

Bei laufendem Verbrennungsmotor versorgt nun der Generator (G) das Bordnetz mit Energie und lädt dessen Batterie. Dabei regelt der Generatorregler (Rg) den Generator in einer Weise, dass dieser die durch das in Kapitel 3.1.3 vorgestellte Energiemanagement vorgegebene Sollspannung einstellt.

Bei S_1 handelt es sich um einen zum lediglich einmaligen Agieren gefertigten pyrotechnischen Schalter. Er wird über das Steuergerät des Airbag-Systems bei einem Unfall geöffnet und trennt das gesamte Bordnetz von der Batterie, um weiteren Schaden beispielsweise durch Kurzschlüsse zu verhindern. Da die Trennung schnell von statten gehen muss, wird diese mit Hilfe einer Explosion innerhalb des schaltenden Elementes von S_1 bewerkstelligt.

Ergänzend wird in Kapitel D.1 die Blei-Säure-Batterie hinsichtlich ihrer chemischen Vorgänge bei Ladung und Entladung beschrieben, deren Alterungsmechanismen, Kenndaten, Vor- und Nachteile werden erläutert und eine 12-Volt-Blei-Säure-Starterbatterie wird vorgestellt.

In Kapitel C.1 werden typische Spannungslagen in Fahrzeugbordnetzen im Fehlerfall und im fehlerfreien Fall vorgestellt.

3.1.3. Energiemanagement

Mit den stetig steigenden Anforderungen an Komfort und Sicherheit im Fahrzeug, steigen auch die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit und den Energie-Inhalt der 12 V-Starter-Batterie. Aus diesem Grund besitzt jedes moderne Fahrzeug ein Energiemanagement, das den Energiehaushalt des Fahrzeuges überwacht und steuert. In dem in Abbildung 3.1 betrachteten Beispiel, ist das Energiemanagement Teil des Gateway-Steuergeräts.

Auf Basis einer ständigen Bilanzierung der Energieflüsse von und zur Batterie, hat das Energiemanagement durch aktive Eingriffe in die Energie-Wandlung und -Verteilung unter anderem folgende Aufgaben:

- Sicherstellen einer möglichst positiven Ladebilanz der Starterbatterie. Dieser Zustand ist dann gegeben, wenn das Fahrzeug am Ende einer Fahrt einen höheren Ladezustand aufweist als zu Beginn der Fahrt. Dies stellt vor allem bei tiefen Temperaturen eine Herausforderung dar, aufgrund der temperaturbedingten schlechteren Ladeakzeptanz der Starterbatterie und des erhöhten Energiebedarfs durch zusätzlich benötigte Heizsysteme, wie beispielsweise Scheiben-, Spiegel- oder Sitzheizung.
- Abstimmung der Einschaltzeitpunkte von Verbrauchern aufeinander, zur Vermeidung von Lastspitzen, die durch gleichzeitiges Einschalten von Hochstromverbrauchern bedingt sind.

- Sicherstellen der Startfähigkeit des Fahrzeuges. Dies geschieht bei Fahrzeugen mit Start-Stopp-Automatik beispielsweise dadurch, dass der Verbrennungsmotor eines gerade im Stopp-Modus befindlichen Fahrzeuges vor Erreichen einer prädierten Minimalspannung während des Starts wieder gestartet wird, um ein weiteres Entladen der Batterie und somit eine Gefährdung der Startfähigkeit und ein zu tiefes Absinken der Bordnetzspannung zu vermeiden.
- Durchführen eines *Lastabwurfs* bei defektem Generator oder schwacher Batterie. Dabei schaltet das Energiemanagement Verbraucher gestaffelt ab, um für sicherheitsrelevante Systeme weiterhin Energie bei ausreichend hoher Leistung verfügbar zu halten. Zuerst werden dabei Komfortverbraucher abgeschaltet.
- Verringerung des Benzinverbrauches durch Rückgewinnung von Bremsenergie (Rekuperation). Während des Bremsvorganges steuert das Energiemanagement den Regler des Generators in einer Weise an, dass dieser die Generatorausgangsspannung erhöht, dem ihn antreibenden Verbrennungsmotor somit ein größeres Lastmoment entgegengesetzt und dadurch die Batterie auflädt. Damit die Batterie in der Lage ist, diese zusätzliche Ladung aufzunehmen, muss ebenfalls durch das Energiemanagement sichergestellt werden, dass der Ladezustand der Batterie unter 100% gehalten wird.
- Verbesserung der Fahreigenschaften durch Absenken der Generatorspannung auf oder unter den Wert der Batteriespannung während das Fahrzeug beschleunigt. Dadurch wird verhindert, dass der Generator Energie an das Bordnetz abgibt, wodurch der Generator dem Verbrennungsmotor wiederum ein nur sehr geringes Drehmoment entgegengesetzt was sich positiv auf die Beschleunigungseigenschaften des Fahrzeuges auswirkt. Während dieser Zeit deckt die Batterie den Energiebedarf des Fahrzeuges.

Wie bereits in Kapitel 3.1.1 erwähnt, wird zur Kommunikation zwischen Energiemanagement, Batterie und Generator das LIN-Protokoll eingesetzt. Dazu besitzt der Generator eine entsprechende Schnittstelle.

Die Batterie kann dazu mit einem Batteriesensor bestückt werden, der als Bestandteil des Polschuhs am Batterie-Pol in der nach DIN 72311 [1] genormten Pol-Nische platziert wird (Abbildung 3.3). Im hier betrachteten Beispiel hat dieser Sensor neben einer LIN-Kommunikations-Schnittstelle ein Application Specific Integrated Circuit (ASIC) zur Messung der Batterie-Pol-Temperatur, der Batterie-Klemmenspannung und des Batteriestromes. Ein Mikrocontroller berechnet aus den durch das ASIC gelieferten Daten, beispielsweise den Batterie-Ladezustand, den Batterie-Gesundheitszustand und in der Regel modellbasiert die aktuelle Startfähigkeit des Fahrzeuges.

Die Strommessung bewerkstelligt der Batteriesensor über die Erfassung der Spannung an einem sehr niederohmigen Manganin-Shunt⁽⁵⁾, der sich als Teil des Batteriesensors im Batteriestromkreis befindet. Dieser ist in der Lage hochdynamische Ströme zu erfassen, die sich

⁽⁵⁾Der eingesetzte Manganin-Shunt hat einen Widerstand von etwa $100\ \mu\Omega$ und zeichnet sich durch einen geringen Temperaturkoeffizienten aus.

im Bereich des Ruhestromes $I_{B,Ruhe}$ von wenigen mA bis hin zu Startströmen in Bereichen von kurzzeitig über 1 kA bewegen. Eine detailliert beschriebene Auslegung eines Energiemanagements ist in [23] nachzulesen und weitere Verbesserungen der Betriebsstrategie des Energiemanagements werden in [62] vorgestellt.

3.1.4. 12-Volt-Blei-Starter-Batterie mit Batteriesensor

Eine 12 V-Blei-Säure- oder AGM-Starterbatterie besteht aus einer Serienschaltung von sechs Batteriezellen, die jeweils eine Nominalspannung von 2 V aufweisen, was zu einer nominalen Batteriespannung von 12 V führt. Abbildung 3.3 zeigt eine 12 V-Blei-Säure-Starterbatterie mit einem auf dem Minus-Pol angebrachten Batteriesensor. Durch das Gehäuse sind die sechs seriell geschalteten Einzelzellen gut zu erkennen.

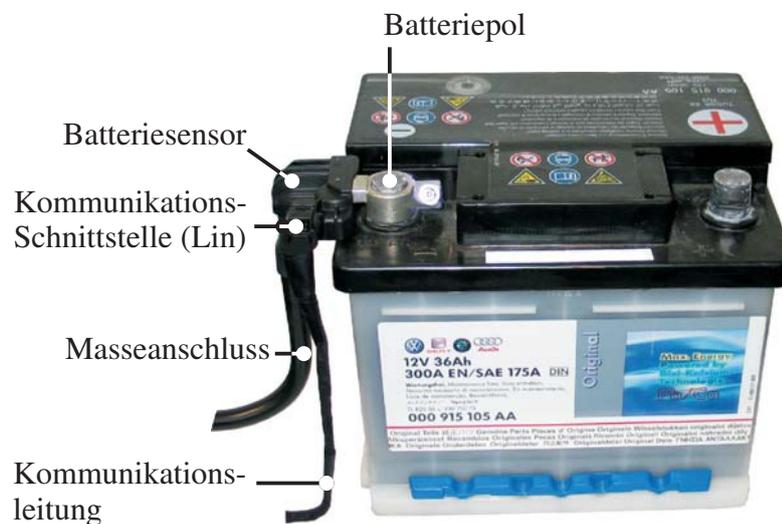


Abbildung 3.3.: 12 V-Blei-Säure-Starter-Batterie mit Batteriesensor

Die Maße und Anforderungen an die Gehäuse von Starter-Batterien werden in der Norm [3] festgelegt.

3.2. Lithium-Ionen-Starterbatterie

Eine Lithium-Ionen-Starterbatterie unterscheidet sich grundlegend von einer Blei-Starterbatterie. In der Regel wird eine Lithium-Ionen-Starterbatterie durch Seriell- und Parallelschaltung mehrerer Batteriezellen aufgebaut⁽⁶⁾ und im Gegensatz zu einer Blei-Starterbatterie mit einem internen Batteriemanagementsystem und einer Einrichtung zur Zellsymmetrierung ausgestattet. In diesem Abschnitt wird auf diese wesentlichen Unterscheidungsmerkmale eingegangen und abschließend eine kommerziell verfügbare 12-Volt-Lithium-Ionen-Starterbatterie vorgestellt.

⁽⁶⁾Gleiches gilt auch für alle anderen Arten von Lithium-Ionen-Batteriesystemen.

3.2.1. Definition eines nsmp-Batteriesystems

In dieser Arbeit ist ein Lithium-Ionen-Batteriesystem als eine Zusammenschaltung von Batteriezellen in einer Konfiguration von n seriellen und m parallelen Zellen, die als nsmp-System bezeichnet wird, mit der batterie-internen Elektronik, Aktuatorik und Sensorik zu verstehen.

Als *Batteriepack* wird das Batteriesystem *ohne* deren Elektronik, Aktuatorik und Sensorik bezeichnet.

Sofern es für den Kontext unerheblich ist, werden die Begriffe *Batteriezelle* und *Zelle* bzw. *Batterie* und *Batteriesystem* in dieser Arbeit gleichbedeutend verwendet.

Aufgrund der besonderen Eignung für den Anwendungszweck in einer 12-Volt-Starterbatterie, kommen in dieser Arbeit ausschließlich Batterien zum Einsatz, deren Zellen das Kathodenmaterial LiFePO_4 in Kombination mit einer Graphit-Anode verwenden. Für diese Kathoden-Anoden-Materialkombination wird die Kurzschreibweise LFP eingeführt ⁽⁷⁾. In Kapitel 5 wird die besondere Eignung von LFP-Batterien im Kontext von 12-Volt-Starterbatterien deutlich und speziell in Kapitel 5.2 zeigt sich, warum in diesem Anwendungsfall ausschließlich 4smp-Batterien in Betracht kommen.

Abbildung 3.4 zeigt exemplarisch eine 4s4p-Batterie in zwei Ausführungsformen der Parallelschaltung der Zellen.

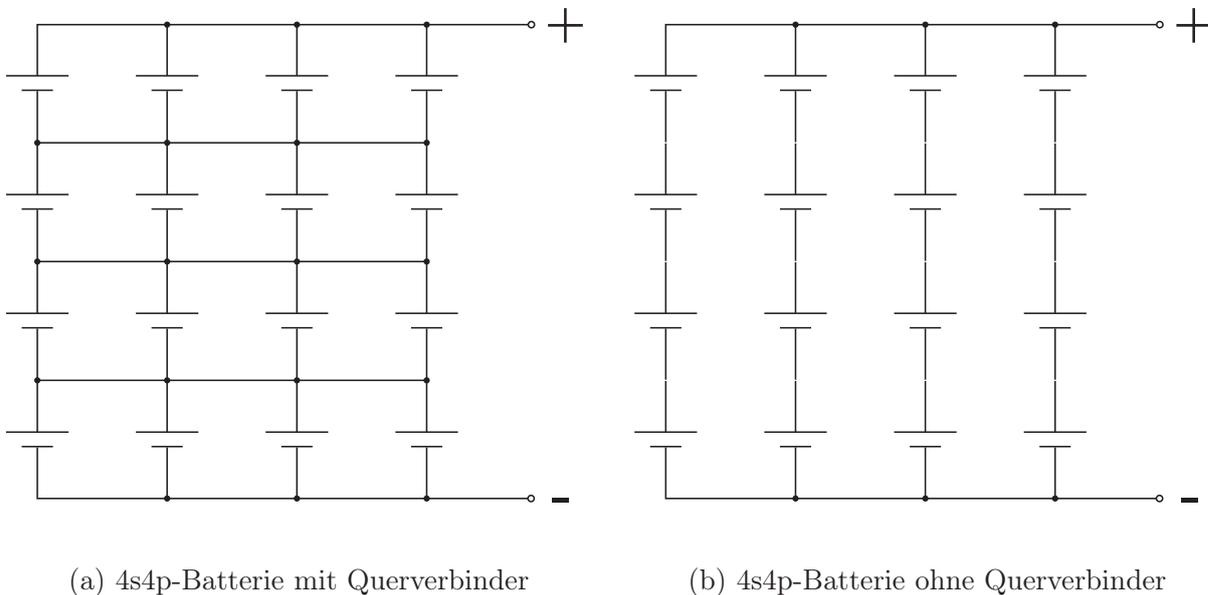


Abbildung 3.4.: Schematische Darstellung einer 4s4p-Batterie.

Abbildung 3.4a zeigt die geläufigste Variante mit jeweils parallel geschalteten Zellgruppen, die in dieser Arbeit als Parallel-Gruppe (P-Gruppe) bezeichnet werden. In Abbildung 3.4b

⁽⁷⁾Eine Beschreibung der Funktionsweise einer LFP-Zelle findet sich in Kapitel D.2.