



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 Rekonvaleszenzreserve 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 Rekonvaleszenzreserve 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 Empfängerfahrzeuges⁽³⁾ und gleichzeitig verpolteter 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 Impedanzspektrern 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 Impedanzspektrern *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 Impedanzspektrern bewertet. Dabei stellt sich heraus, dass nur jene Impedanzspektrern 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 *kalendarischen* 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 *kalendarische* Alterung basiert auf Erkenntnisse aus [22, S. 8] und weiterer in Kapitel 10 näher erläuterten 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 Batterialterung 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.