



Patrick Jansen

Methoden zur Ladezustandsbestimmung von Lithium-Eisenphosphat- Batterien in zukünftigen Fahrzeughordnetzen



Audi-Dissertationsreihe, Band 138



**Methoden zur Ladezustandsbestimmung von Lithium-
Eisenphosphat-Batterien in zukünftigen
Fahrzeugbordnetzen**

Dissertation

Patrick Jansen



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, 2019

Zugl.: (TU) Dortmund, Univ., Diss., 2019

Von der Fakultät für Elektro- und Informationstechnik der Technischen Universität Dortmund zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

M.Sc. Patrick Jansen
geb. 25.07.1985 in Jülich

Tag der mündlichen Prüfung: Dortmund, den 26.02.2019

Hauptreferent:
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Götze

Korreferent:
Prof. Dr.-Ing. Stephan Frei

Fakultät für Elektro- & Informations-
technik
AG Datentechnik

Fakultät für Elektro- & Informations-
technik
AG Bordsysteme

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2019
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, 2019

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-7011-3
eISBN 978-3-7369-6011-4

KURZFASSUNG

Die exakte Ermittlung des Ladezustands einer Lithium-Ionen-Batterie – im Speziellen einer Lithium-Eisenphosphat-Batterie – stellt eine nicht unerhebliche Herausforderung bezüglich der Signalverarbeitung dar. Die Anforderungen an die Genauigkeit des ermittelten Ladezustands sind besonders im automobilen Anwendungsbereich von großer Bedeutung, um einen sicheren und effizienten Betrieb des elektrochemischen Energiespeichers in einem Fahrzeug gewährleisten zu können. Bisherige, auf einem elektrischen Batterieersatzschaltbild basierende Verfahren im Zeitbereich, wie das Kalman-Filter, das Extended Kalman-Filter oder der Zustandsbeobachter, stoßen dabei an ihre Grenzen. Grund hierfür sind, im Speziellen bei der Lithium-Eisenphosphat-Technologie, zwei wesentliche Punkte: zum einen das sehr flache Plateau der Ruhespannungskennlinie im mittleren Ladezustandsbereich, zum anderen die Genauigkeit des elektrischen Batterieersatzschaltbilds bezüglich der Netzwerkparameter zur Berechnung der Ruhespannung aus der Klemmenspannung. So kann bei den ruhespannungsbasierten Verfahren die Ladezustandsermittlung im mittleren Bereich mit Genauigkeiten im einstelligen Prozentbereich nur mit sehr großem messtechnischen Aufwand realisiert werden. Neben einer Erweiterung bekannter zustandsraumbasierter Verfahren, wie dem Kalman-Filter und dem Zustandsbeobachter, durch eine Online-Parameterprädiktion werden neuartige Methoden zur Analyse des Ladezustands der Batterie im Frequenzbereich vorgestellt. Sie bieten Möglichkeiten zur ruhespannungsunabhängigen Ladezustandsbestimmung, um so eine genauere Zustandsbestimmung im mittleren Ladezustandsbereich realisieren zu können. Im Fokus der Untersuchungen steht die Anwendung bekannter Klassifikationsverfahren – die Stützvektormaschine (SVM), der Nächste-Nachbarn-Klassifikator (NND) und Künstliche Neuronale Netze (ANN) – auf die Daten der Batterie im Frequenzbereich, während sie bisher auf Daten des Zeitbereichs angewendet wurden. Hierzu werden die ladezustandsspezifischen Impedanzortskurven bei verschiedenen Temperaturen als Trainingsdaten für die Klassifikationsverfahren herangezogen, um später die gemessenen Impedanzen klassieren zu können. Auf diese Weise wird eine Ladezustandsbestimmung unabhängig von der Ruhespannungskennlinie ermöglicht werden. Ein Vergleich der Zeit- und Frequenzbereich-basierten Verfahren wird ihre Vor- und Nachteile herausarbeiten und mögliche Synergien für hybride Algorithmen zur Ladezustandsbestimmung über den gesamten Ladezustandsbereich aufzeigen. Abschließend wird ein neues Konzept eines hybriden Algorithmus zur Ausnutzung der zuvor identifizierten synergistischen Effekte vorgestellt und dessen Potentiale präsentiert.





ABSTRACT

The exact knowledge of the state of charge (SOC) of a lithium-ion battery – especially of a lithium-iron-phosphate battery – is a large challenge for signal theory. The requirements for automotive applications are essential to operate the energy storage in automotive vehicles in a safe and efficient manner. Common time-domain based methods, such as the state space observer and the Kalman filter, are limited in their range of functionality. The reason for that – especially for lithium-iron phosphate – is twofold: first, the very smooth plateau of the open-circuit voltage (OCV) curve in the middle range of state of charge, second, the accuracy of the electric-circuit diagramm regarding its parameter to calculate the open-circuit voltage from terminal voltage. For that reason OCV-based methods can estimate SOC in the middle range of the OCV curve only with a one-digit percentage precision, requiring very high measurement efforts. In addition to an extension of the common state-based methods – such as the Kalman filter and the state space observer – through an online parameter estimation, new methods to determine the state of charge estimation of a battery from frequency-domain data are presented. Those methods shall ensure the possibility of the state of charge estimation independent of the open-circuit voltage to increase the accuracy of the state of charge estimation in the middle state of charge range. Accordingly, the focus of this investigation lies on an approach using common classification methods, such as the support vector machine (SVM), the nearest-neighbor decision rule (NND) and artificial neural networks (ANN), which until now have only been used with time-domain based data and are now applied to frequency-domain data. State of charge specific impedance spectra at different temperatures are used as the data basis for the classification methods mentioned, which allows to use single impedances measured later to be classified to a certain state of charge level. This new method ensures a state of charge estimation independent of the open-circuit voltage. A comparison of the methods based on time-domain and frequency-domain data shows the advantages and disadvantages of both methods and indicates synergy effects for hybrid algorithms to estimate the state of charge throughout the whole state of charge range. The work concludes with a new concept for a hybrid algorithm to use the aforementioned synergy effects and points out its potential.





DANKSAGUNG & VORWORT

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Förderprojekts „DriveBattery2015“ während meiner Tätigkeit als Doktorand bei der Audi Electronics Venture GmbH (AEV), einer hundertprozentigen Tochter der Audi AG. Wissenschaftlich betreut wurde diese Arbeit vom Arbeitsgebiet Datentechnik der Technischen Universität Dortmund unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Götze. Bei ihm möchte ich mich hiermit besonders herzlich für die fachliche Betreuung, die motivierenden Gespräche, Kritiken und Anregungen zu dieser Arbeit bedanken.

Ebenfalls herzlich bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Stephan Frei vom Arbeitsgebiet Bordsysteme der Technischen Universität Dortmund für die Übernahme des Korreferats sowie bei Herrn Prof. Dr.rer.nat. Frank Hoffmann für die Übernahme des dritten Prüfers.

Meinem Audi-internen Betreuer Herrn Dr.-Ing. David Vergossen möchte ich herzlich für das mir entgegengebrachte Vertrauen, die Einführung in die Welt der Batterietechnologien, die Freiheiten in der Ausrichtung dieser Arbeit, die Unterstützung bei der Akquise des Förderprojekts und der Suche nach einem betreuenden Professor samt Hochschule herzlich danken. Ohne ihn wäre mein Promotionsvorhaben bei der AEV so nicht möglich gewesen.

Ebenso danken möchte ich Herrn Dr.-Ing. Werner John, der mir als Lehrbeauftragter des Arbeitsgebiets Bordsysteme immer helfend zur Seite stand und der die Konzeption der Arbeit und deren Fortschritt im Kontext des Förderprojekts mit getrieben hat.

Meinem sehr geschätzten Audi-Kollegen Herrn M.Sc. Daniel Renner möchte ich für die etlichen sehr konstruktiven Diskussionen, seine motivierenden Worte sowie die Zusammenarbeit in den vergangenen Jahren herzlich danken. In unserem gemeinsamen Büro hatten wir stets ein unheimlich kollegiales und produktives Arbeitsklima, was nicht unwesentlich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen hat.

Des Weiteren bedanken möchte ich mich an dieser Stelle noch bei meinen Kollegen vom Arbeitsgebiet Datentechnik Herrn M.Sc. Marian Patrick Felder und Herrn M.Sc. Emre Ecik, die mir fachlich und organisatorisch stets mit einer helfenden Hand zur Seite standen.

Nicht unerwähnt bleiben sollen natürlich die beiden Abschlussarbeiter Herr M.Sc. Michael Vollhals und Herr M.Sc. Tobias Gebel, welche mit ihren Abschlussarbeiten mein Vorhaben unterstützt und gemeinsam das Thema vorangetrieben haben.

Ebenfalls herzlich danken möchte ich meinem langjährigen guten Freund und Kommilitonen Herrn Dipl.-Ing. (FH) Simon Longerich für seine Unterstützung und Freundschaft weit über das Studium hinaus sowie ihm und Herrn Mag. Heinz-Josef Longerich für die Übernahme des Lektorats.



Danksagung & Vorwort

Mein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern Helga und Franz Josef Jansen, die mich in meinem Werdegang immer vollumfänglich unterstützt und gefördert haben. Ohne sie und ihre Unterstützung wäre ich wohl nicht dort, wo ich heute bin. Sie haben mir immer wieder mit auf den Weg gegeben, alles, was ich anfangs, auch zum Ende zu bringen. Was mir, so denke ich, zum größten Teil auch gelungen ist.

Abschließend möchte ich meiner Frau Jennifer für ihre unermüdliche Geduld mit mir und dem Promotionsvorhaben sowie ihre motivierenden Worte und ihren Rückhalt ganz herzlich danken. Sie hat sich immer um unsere Kinder gekümmert, wenn ich Zeit brauchte für das Erstellen dieser Arbeit, und mir so den Rücken freigehalten. Ohne ihren Rückhalt und ihre Unterstützung wäre diese Arbeit gar nicht erst möglich gewesen.

Ingolstadt, den 26. April 2019



INHALTSVERZEICHNIS

Kurzfassung	I
Abstract	III
Danksagung & Vorwort	V
Inhaltsverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation & Zielsetzung	2
1.2 Abgrenzung der Arbeit	5
1.3 Einführung in die Arbeit	6
1.4 Forschungsbeiträge dieser Arbeit	13
2 Stand der Technik	19
2.1 Elektrochemische Energiespeicher	19
2.1.1 Lithium-Ionen-Akkumulatoren	20
2.1.2 Ruhespannungs- & Hystereseverhalten	23
2.1.3 Elektrochemische Impedanzspektroskopie	25
2.1.4 Innenwiderstand	28
2.2 Batteriezustand	29
2.2.1 Ladezustand	29
2.2.2 Alterungszustand	31
2.2.3 Funktionszustand	31
2.3 Batteriemodellierung	32
2.3.1 Elektrisches Batterieersatzschaltbild	33
2.3.2 Helmholtz-Thevenin-Äquivalent	33
2.3.3 Konstantphasen- & ZARC-Element	34
2.3.4 Iterative Prädiktion der Ersatzschaltbildparameter	35
2.4 Verfahren zur Ladezustandsbestimmung	37
2.4.1 Stromintegrationsbasierte Verfahren	38
2.4.1.1 Restentladungstest	38
2.4.1.2 Amperestunden-Bilanzierung	38



Inhaltsverzeichnis

2.4.1.3	Elektrisches Batterieersatzschaltbild	40
2.4.2	Heuristische Verfahren	40
2.4.3	Zustandsraumbasierte Verfahren	41
2.4.3.1	Grundlagen der Zustandsraummodellierung	41
2.4.3.2	Batteriezustandsraummodell	43
2.4.3.3	Zustandsbeobachter	44
2.4.3.4	Kalman-Filter	45
2.4.3.5	Vergleich der zustandsraumbasierten Verfahren	47
2.4.4	Klassifikationsverfahren	48
2.4.4.1	Grundlagen der Mustererkennung	50
2.4.4.2	Stützvektormaschine	51
2.4.4.3	Künstliche Neuronale Netze	53
2.4.4.4	Fuzzylogikbasierte Verfahren	56
2.5	Bewertung der bekannten Verfahren zur Ladezustandsbestimmung	57
2.5.1	Stromintegrationsbasierte Verfahren	57
2.5.2	Zustandsraumbasierte Verfahren	58
2.5.3	Maschinell Lernende Verfahren	59
2.5.4	Zusammenfassende Bewertung der Verfahren	60
3	Neuartige Methoden zur Ladezustandsbestimmung	63
3.1	LiFePO ₄ -Versuchszellen	64
3.1.1	Ruhe-spannungsverhalten der Versuchszellen	66
3.1.2	Ladezustandsverhalten im Frequenzbereich	68
3.1.3	Temperaturverhalten im Frequenzbereich	69
3.2	Zustandsraumbasierte Verfahren mit Parameterprädiktion	70
3.2.1	Vergleich zustandsraumbasierter Verfahren mit Parameterprädiktion	73
3.2.1.1	Ergebnisse der numerischen Simulation	74
3.2.1.2	Zusammenfassung zustandsraumbasierter Verfahren	76
3.2.2	Relative Alterungsnachführung der Batterieparameter	77
3.3	Sensorlose Temperaturbestimmung	77
3.4	Ladezustandsbestimmung mittels frequenzbasierter Daten	80
3.4.1	Simulation der Messungenauigkeiten bei der Impedanzbestimmung	82
3.4.2	Ladezustandsbestimmung via Stützvektormaschine	84
3.4.2.1	Impedanzortskurvenklassifikation	84
3.4.2.2	Impedanzklassierung	85
3.4.2.3	Lineare Suche	88
3.4.2.4	Balancierte Baumsuche	89
3.4.2.5	Unbalancierte Baumsuche	92
3.4.2.6	Zusammenfassung & Vergleich der SVM-Suchalgorithmen	93



3.4.2.7	Relative Alterungsnachführung der Impedanzortskurven	96
3.4.3	Ladezustandsbestimmung via Nächste-Nachbarn-Klassifikator . . .	97
3.4.3.1	Impedanzortskurvenklassifikation	99
3.4.3.2	Impedanzklassierung	99
3.4.3.3	k -Nächste-Nachbarn-Klassifikation	101
3.4.4	Ladezustandsbestimmung mit Künstlichen Neuronalen Netzen . .	102
3.4.4.1	Impedanzklassierung	105
3.4.4.2	Einfluss von Zwischenschichten & Neuronen	106
3.5	Vergleich der neuartigen Methoden	107
3.5.1	Vorteile der Methoden	109
3.5.2	Nachteile der Methoden	110
3.5.3	Synergien der Methoden	110
3.5.4	Anwendungsmöglichkeiten der Methoden	111
3.6	Konzept eines hybriden Algorithmus zur Ladezustandsbestimmung . . .	111
3.6.1	Prinzip & Methodik	112
3.6.2	Numerische Simulation	116
3.6.3	Ergebnisse & Zusammenfassung	118
4	Diskussion der Ergebnisse	119
4.1	Neuheitswert gegenüber dem aktuellen Stand der Forschung	119
4.1.1	Erweiterung der zustandsraumbasierten Verfahren	119
4.1.2	Sensorlose Zellkerntemperaturbestimmung	120
4.1.3	Relative Alterungsnachführung	121
4.1.4	Ladezustandsbestimmung mittels Frequenzdaten	121
4.1.5	Hybrider Algorithmus zur Ladezustandsbestimmung	122
4.2	Technischer Nutzen	123
4.2.1	Erweiterter Zustandsschätzer	123
4.2.2	Sensorlose Temperaturbestimmung	123
4.2.3	Impedanzklassierung zur Ladezustandsbestimmung	123
5	Zusammenfassung	125
5.1	Fazit	126
5.2	Ausblick	127
A	Anhang	131
A.1	Batterieversuchsträger	131
A.1.1	Systemkennwerte & Dimensionierung	132
A.1.2	Batteriemanagementsystem	133
A.2	Fahrzyklen	134
A.3	Herleitung des Batteriezustandsraummodells	136



Inhaltsverzeichnis

A.4 Zustandsschätzung mit alternativer Zellchemie	140
A.5 Betreute Abschlussarbeiten	142
A.6 Publikationen	143
A.6.1 Konferenzbeiträge	143
A.6.2 Konferenzposter	144
A.6.3 Offenlegungs- & Patentschriften	144
Abkürzungsverzeichnis	145
Symbolverzeichnis	149
Glossar	155
Abbildungsverzeichnis	161
Tabellenverzeichnis	163
Literaturverzeichnis	165

1 EINLEITUNG

Der zunehmende Anstieg an verschiedensten elektrischen Verbrauchern in Kraftfahrzeugen bringt die aktuelle Generation elektrochemischer Energiespeicher (EES) im Fahrzeugbordnetz, darunter die Blei-Säure-Batterie (BSB), an ihre Leistungsgrenze. In den Jahren 2007 bis 2013 lag der durchschnittliche Anteil von Pannen, die durch die Elektrik und Elektronik des Fahrzeugs verursacht wurden, bei 42,2% [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]. Wie in Tabelle 1.1 dargestellt, entfallen über alle Fahrzeugkomponenten hinweg allein 33,1% auf die Bordnetzatterie; mit weitem Abstand folgen andere Komponenten, die lediglich mit einstelligen Prozentanteilen zu Buche schlagen [9]. Aus dieser Statistik lässt sich sehr gut erkennen, dass die derzeit als Starter- und Bordnetzatterie verwendete BSB aufgrund der wachsenden Belastung der Batterie durch die stetig steigende Zahl der elektrischen Verbraucher an ihre Grenzen gerät. Ein weiteres Problem der noch verwendeten BSB stellt die Gesetzgebung dar, die im Zuge der nächsten Jahre die Verwendung von Schwermetallen wie Blei (chem. Bez.Pb) in Kraftfahrzeugen gesetzlich verbieten will. Somit wächst die berechtigte Forderung nach einer Alternative für die BSB im konventionellen Fahrzeugbordnetz. Als Alternativen bieten sich die seit den 90er Jahren sehr

Tabelle 1.1: Ergebnis der Pannenstatistik für das Jahr 2013 [9]

Ursache	Anteil [%]
Batterie	33,1
Einspritzanlage	9,6
Zündanlage	9,2
Karosserie	7,6
Räder / Reifen	6,9
Motor	6,9
Kraftstoffanlage	5,2
Sonstige	5,1
Anlasser	4,6
Generator	4,1
Klimaaggregate	4
Kupplung / Getriebe / Antrieb	3,7



1 Einleitung

populär gewordenen Lithium-Ionen-Batterien (LIB) aufgrund ihrer im Vergleich wesentlich größeren Leistungs- und Energiedichte auch für den Einsatz im Kraftfahrzeug an. Diese neuen Batterietechnologien für Fahrzeugbordnetze müssen allerdings höhere Anforderungen an die Batteriezustandsbestimmung erfüllen, um die Batterie effizient ausnutzen und sicher betreiben zu können. Die exakte Ermittlung des Ladezustands (SOC) einer LIB stellt eine nicht unerhebliche Herausforderung bezüglich der einzusetzenden Verfahren zur Signalverarbeitung dar.

Besonders die Lithium-Eisenphosphat-Batterie (LFP) (chem. Bez.: LiFePO_4) könnte in diesem Zusammenhang als alternative Batterietechnologie zur BSB eine entscheidende Rolle spielen. Von allen LIB ist sie mit Abstand die chemisch stabilste und somit sicherste, sie ist des Weiteren schnellladefähig und die verwendeten Materialien sind im Vergleich zu anderen LIB sehr günstig [89, 75]. Ein weiterer Vorteil ist die Erhöhung der Bordnetzstabilität in Verbindung mit einer besseren Startfähigkeit, einer größeren Stromtragfähigkeit sowie einem höheren Rekuperationspotential [100]. Da BSB im Betrieb auf einem relativ hohen Ladezustandsniveau gehalten werden, ist eine Rekuperation im Maße wie bei der LIB nicht möglich [11]. Neben den genannten Vorteilen weist die LFP-Batterie aber auch einige Nachteile auf, die nicht außer Acht gelassen werden können: Sie weist im Vergleich zu anderen LIB eine geringere Leistungs- und Energiedichte auf. Wesentlich problematischer gestaltet sich die Ladezustandsbestimmung dieser Zellchemie aufgrund ihrer sehr flachen Steigung der Ruhespannungskennlinie im mittleren Ladezustandsbereich.

1.1 Motivation & Zielsetzung

Die Motivation und die Problemstellung zu dieser Arbeit ergaben sich aus den unzureichenden Eigenschaften der bisher verwendeten Verfahren zur Ladezustandsbestimmung, die auf einer Amperestundenintegration oder einer Auswertung der Ruhespannungskennlinie beruhen [113, 133, 147, 154, 91, 92, 115, 116, 114, 32, 58, 167]. Wie eingangs erwähnt, stehen neue Batterietechnologien, wie die LIB, für die verschiedensten Hybridkonzepte [56] als Alternativen zu der seit Jahrzehnten in Kraftfahrzeugen verwendeten BSB zur Diskussion.

Neue Konzepte für hybride Fahrzeugbordnetze sorgen u.a. für erweiterte und hohe Anforderungen an die exakte Ladezustandsbestimmung von LIB. Diese Anforderungen ergeben sich durch die Notwendigkeit, den Batterieladezustand exakt zu ermitteln. Diese Konzepte sehen u.a. die Parallelschaltung von BSB mit LIB für z.B. Mildhybride vor. LIB versorgt bei nicht laufendem Verbrennungsmotor die sicherheitskritischen Verbraucher, wie z.B. den Antiblockierverhinderer (ABV), das elektronische Stabilitätsprogramm (ESP), die elektronisch-aktive Wankstabilisierung (EAWS) und die elektronische Lenkunterstützung (EPS) unabhängig von der BSB mit elektrischer Energie, wie Abbildung 1.1

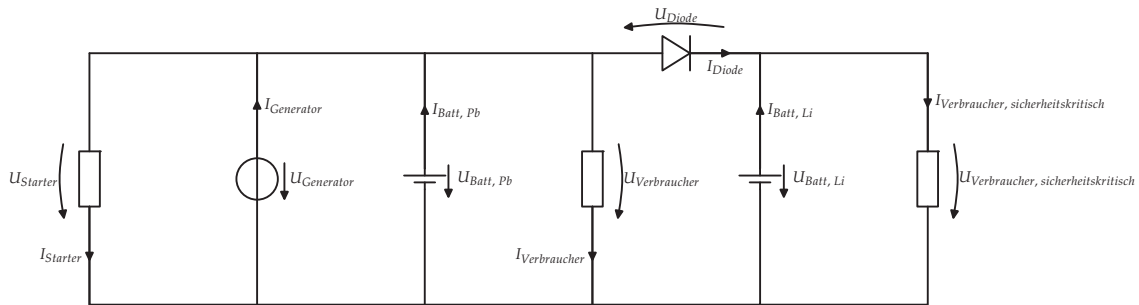


Abbildung 1.1: Hybrides 12 V-Fahrzeugbordnetz Kombination von Blei-Säure-Batterie und Lithium-Ionen-Batterie [126]

schematisch darstellt. Letztere dient lediglich zum Starten des Verbrennungsmotors mittels Riemenstartergenerator (RSG). Durch die zusätzliche Kapazität der LIB ermöglicht dieses Bordnetzkonzept zudem die Erhöhung der elektrischen Rekuperationsleistung [124, 123, 126, 125].

Besonders deutlich wird die Notwendigkeit für neue Verfahren zur effizienten Bestimmung des Batterieladestatus auch für zukünftige Anwendungen im Niedervoltbordnetz, also im Spannungsbereich von 12 bis 48 V. Für diese Anwendungen müssen die EES zur effizienteren Nutzung der Speicherkapazität primär im mittleren Ladezustandsbereich betrieben werden [127, 157, 156].

Die wohl am besten geeignete Lithium-Ionen-Technologie (LIT) für diesen Ersatz ist aufgrund ihrer Vorteile gegenüber der BSB wohl die LFP-Zellchemie. Sie bietet wesentliche Gewichtsvorteile gegenüber der BSB sowie eine höhere Leistungs- und Energiedichte bei geringen Materialkosten im Vergleich zu anderen LIB. Demgegenüber steht allerdings die Problematik der Ladezustandsbestimmung dieser Zellchemie wegen des ausgeprägten Ruhespannungsplateaus im mittleren Ladezustandsbereich. Insbesondere für Zelltechnologien, deren Ruhespannungskennlinien im mittleren Ladezustandsbereich einen sehr flachen Verlauf aufweisen, wie dies bei LFP-Batterien der Fall ist, stellt die korrekte Erfassung des aktuellen SOC eine erhebliche Herausforderung dar. Die Ruhespannungskennlinien verschiedener anderer LIT, wie bspw. die Lithium-Nickel-Cobalt-Mangan-Batterie (NMC) (chem. Bez.: LiNiMnCoO_2), die Lithium-Mangan-Oxid-Spinell-Batterie (LMO) (chem. Bez.: LiMn_2O_4) [146] oder die Lithium-Titan-Oxid-Spinell-Batterie (LTO) (chem. Bez.: $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$), weisen über den gesamten Ladezustandsbereich einen wesentlich steileren Gradienten als LFP-Batterie auf, wie in Abbildung 1.2 dargestellt.

Da der SOC keine messtechnisch direkt erfassbare Größe darstellt und nicht durch eine mathematische Funktion analytisch aus anderen messbaren Systemgrößen berechnet werden kann, sondern im systemtheoretischen Sinn einer Systemzustandsgröße entspricht, bedarf es anderer Verfahren zur Ladezustandsbestimmung.

Bekanntere Verfahren zur Ladezustandsbestimmung, wie etwa die Amperestundenintegration sind für die Applikation in automotiven Systemen nicht genau genug. Dem ste-

1 Einleitung

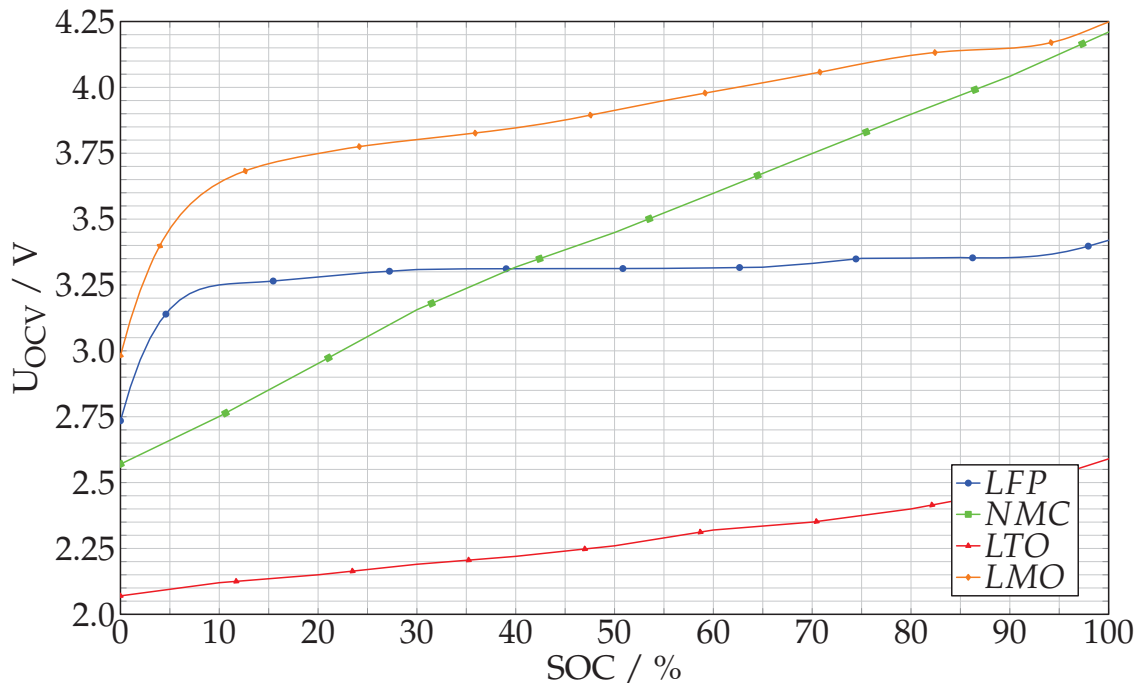


Abbildung 1.2: Vergleich der Ruhespannungskennlinien verschiedener LIT in Laderichtung [146]

hen zustandsraumbasierte Verfahren zur Ladezustandsbestimmung gegenüber, wie das Kalman-Filter und der Zustandsbeobachter (SZB), die beide bereits ihre Effektivität bei verschiedenen LIB gezeigt haben [32, 91]. Die Genauigkeit des Kalman-Filters liegt dabei in einem Bereich von ± 1 bis $\pm 5\%_{\text{SOC}}$ bei verschiedenen LIB [147, 154, 118, 119, 115, 116, 117], für LFP-Batterien im Speziellen werden Genauigkeiten von durchschnittlich $\pm 4\%_{\text{SOC}}$ diskutiert [59, 141]. Der Zustandsbeobachter hingegen zeigt bei verschiedenen LIB Abweichungen von durchschnittlich $\pm 2\%_{\text{SOC}}$ [32, 58, 167].

Die Genauigkeit dieser Verfahren ist allerdings im Wesentlichen von der zugrundeliegenden Modellierung der Batterie durch ein elektrisches Batterieersatzschaltbild (ESB) sowie von den *in situ* verwendeten Untersuchungen und deren Lade- und Entladeprofilen abhängig. Beim Betrieb der EES im mittleren Ladezustandsbereich über einen längeren Zeitraum ist es dagegen aufgrund der Abhängigkeit der erwähnten Verfahren von der Ruhespannungskennlinie nur sehr schwer möglich die Abweichungen im angegebenen Bereich zu halten. Dieses ESB und seine Komponenten bilden die Grundlage für ein Batteriezustandsraummodell. Über das Zustandsraummodell (ZRM) kann so durch die Ruhespannungskennlinie eine Korrektur der dem Verfahren zugrunde liegenden, Amperestundenintegration vorgenommen werden.

Des Weiteren setzen diese Verfahren zur Abbildung des Batterieerhaltens initial eine genaue Kenntnis des zugrunde liegenden Systems voraus. Das gängige Vorgehen zur Parametrierung eines ESB als Grundlage für einen Kalman-Filter oder einen Zustandsbe-

obachter mit entsprechenden Netzwerkparametern ist das aufwändige Parameterfitting aus einer elektrochemischen Impedanzspektroskopie (EIS) dar.

Andere Verfahren wie die Stützvektormaschine (SVM) mit ihren verschiedenen Derivaten, der Nächste-Nachbarn-Klassifikator (NND) sowie Künstliche Neuronale Netze (ANN) werden aktuell zur Ladezustandsbestimmung von LIB untersucht. Die durch Untersuchungen mittels SVM beschriebenen Ergebnisse für verschiedene LIB liegen für In-situ-Untersuchungen im Bereich von $\pm 0,5$ bis ± 6 %_{SOC} [13, 15]. Durch die sehr kurzen Testprofile und ohne langen Aufenthalt im mittleren Ladezustandsbereich lassen sich sogar Abweichungen für LFP von ± 1 %_{SOC} [14] realisieren, wobei dies allerdings keine Aussage über die Genauigkeit beim längerfristigen Aufenthalt im mittleren Ladezustandsbereich zulässt. ANN zeigen im Vergleich eine Genauigkeit für verschiedene LIB im Bereich von ± 1 bis ± 5 %_{SOC} [31, 93, 96]. Auch bei diesem Verfahren gelten allerdings die Einschränkungen beim langfristigen Aufenthalt im mittleren Ladezustandsbereich.

Das Ziel dieser Arbeit ist es aufgrund der bereits genannten Probleme bei der Ladezustandsbestimmung von LFP-Batterien mit bekannten Verfahren im mittleren Ladezustandsbereich neuartige Methoden zur Ladezustandsbestimmung zu entwickeln und ihren Neuheitswert im Vergleich zum aktuellen Stand der Forschung und Technik darzustellen und zu diskutieren. Es wird gezeigt, dass die hier entwickelten neuartigen Methoden sich sehr gut zur Bestimmung des SOC von LFP-Batterien eignen.

1.2 Abgrenzung der Arbeit

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Entwicklung neuartiger Methoden zur Ladezustandsbestimmung von LFP-Batterien. Der Bedarf und die Problemstellung ergeben sich, wie bereits beschrieben, aus den teils unzureichenden bekannten Verfahren, die auf einer Amperestundenintegration und/oder der Ruhespannungskennlinie basieren. Besonders problematisch ist dieser Zusammenhang bezüglich des 12 V Fahrzeugbordnetzes für zukünftige Anwendungen, bei denen die EES zur effizienteren Ausnutzung der Kapazität primär im mittleren Ladezustandsbereich betrieben werden [127, 157, 156].

Neben einer Erweiterung bekannter zustandsraumbasierter Verfahren, wie dem Kalman-Filter und dem Zustandsbeobachter, durch eine Online-Parameterprädiktion bilden den Schwerpunkt dieser Arbeit neuartige Methoden zur Analyse des EES der Batterie im Frequenzbereich mittels Klassifikationsverfahren. Diese werden nun Möglichkeiten zur ruhespannungsunabhängigen Ladezustandsbestimmung bieten, um diese genauer im mittleren Ladezustandsbereich realisieren zu können.

Durch die erwähnte Erweiterung der zustandsraumbasierten Verfahren auf Basis einer iterativen Online-Parameterprädiktion der beschreibenden Parameter für elektrische Batterieersatzschaltbilder kann die Ladezustandsbestimmung deutlich verbessert werden,