



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

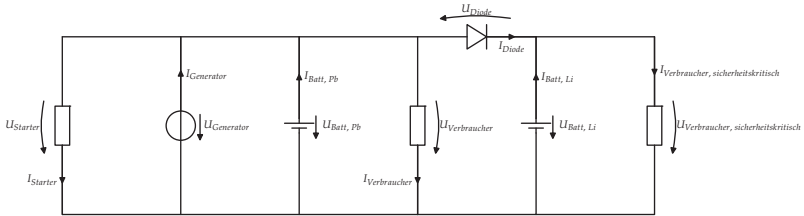


Abbildung 1.1: Hybrides 12 V-Fahrzeughordnetz Kombination von Blei-Säure-Batterie und Lithium-Ionen-Batterie [126]

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 Batterie-ladestands 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

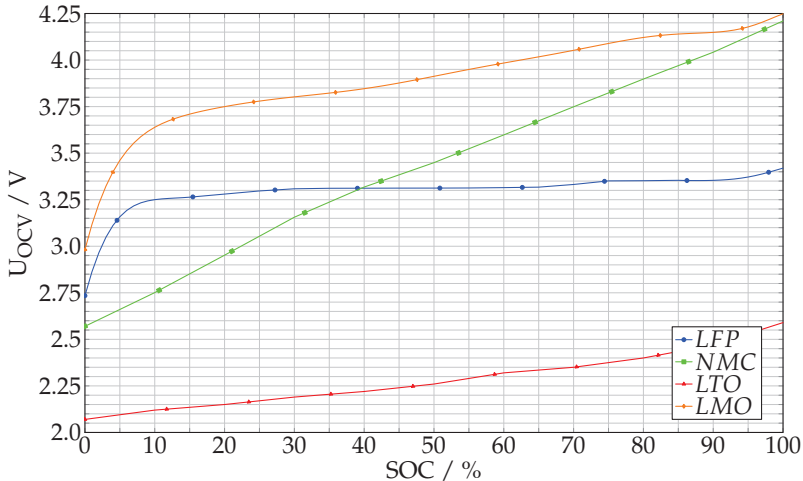


Abbildung 1.2: Vergleich der Ruhespannungskennlinien verschiedener LIT in Laderichtung [146]

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 Batterieverhaltens 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 $\pm 6\%$ _{SOC} [13, 15]. Durch die sehr kurzen Testprofile und ohne langen Aufenthalt im mittleren Ladezustandsbereich lassen sich sogar Abweichungen für LFP von $\pm 1\%$ _{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 $\pm 5\%$ _{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,



1 Einleitung

allerdings bleibt die LIT weiter problematisch. In diesem Zusammenhang konnte eine neuartige Methode zur sensorlosen Ermittlung der Batteriekern-temperatur entwickelt werden, und zwar aus dem ladezustandsunabhängigen Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Phase der Impedanzen bei einer gemessenen Frequenz oberhalb einer definierten Grenzfrequenz sowie durch die Einführung einer zeitabhängigen Trajektorie für die Impedanzortskurven (IOK) der Batterie zur korrekten Ladezustandsermittlung durch relative Alterungsnachführung. Die weiteren Untersuchungen in dieser Arbeit legen den Fokus auf die Anwendung bekannter Klassifikationsverfahren – SVM, NND und ANN – die bisher auf Daten aus dem Zeitbereich angewendet wurden. Diese werden nun auf die Daten der Batterie aus dem Frequenzbereich angewendet. Hierzu werden die ladezustandsspezifischen IOK bei verschiedenen Temperaturen als Trainingsdaten für die Klassifikationsverfahren herangezogen, um später gemessene Impedanzen durch Klassierung einem spezifischen SOC zuordnen zu können. Auf diese Weise wird eine Ladezustandsbestimmung unabhängig von der Ruhespannungskennlinie für die LIT ermöglicht. Ein Vergleich der Zeit- wie auch Frequenzbereich-basierten Verfahren zeigt die Vor- und Nachteile beider Arten herausarbeiten und mögliche Synergien für hybride Algorithmen zur Ladezustandsbestimmung über den gesamten Ladezustandsbereich auf. Abschließend wird ein neues Konzept eines hybriden Algorithmus zur Ausnutzung der zuvor identifizierten synergistischen Effekte vorgestellt und dessen Potentiale erörtert.

1.3 Einführung in die Arbeit

Das Kapitel 1 führt in die Aufgabenstellung dieser Arbeit ein, arbeitet das methodische Vorgehen heraus und grenzt die Aufgabenstellung zu anderen Themenbereichen, wie Batterieerschaltungskonzepte, Bordnetztopologien und Betriebsstrategien, ab. Zudem werden die in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse dargestellt und bewertet. Auf der Basis der erzielten Ergebnisse wird der Beitrag dieser Arbeit zur Forschung zusammenfassend vorgestellt.

Das Kapitel 2 arbeitet den aktuellen Stand der Forschung und Technik in folgenden Bereichen:

- elektrochemische Energiespeicher (EES)
- Ruhespannungskennlinie (OCV)
- elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS)
- Impedanzortskurven (IOK) und deren Eigenschaften

- Ladezustand (SOC)
- Alterungszustand (SOH)
- Batteriemodellierung (ESB)
- zustandsraumbasierte Verfahren (EKF & SZB)
- maschinell lernende Verfahren (SVM & ANN)

Thematisch geht es von einer allgemeinen EES zur speziellen Zellchemie der LFP-Batterie, und dabei von deren Ruhespannungskennlinie über die EIS bis hin zum Innenwiderstand. Darüber hinaus wird in diesem Kapitel auch die Modellierung von LIB sowie der Batteriezustand beschrieben, der sich aus dem SOC, dem SOH und dem Funktionszustand (SOF) ergibt. Es werden die aktuell bekannten Verfahren zur Ladezustandsbestimmung vorgestellt. Abschließend wird die aktuelle Literatur zu Verfahren der Ladezustandsbestimmung analysiert.

Zustandsraumbasierte Verfahren wie das Kalman-Filter erreichen bei Untersuchungen *in situ* einen Fehler, also eine Abweichung vom Referenzladezustand, von $\pm 4\%$ _{SOC} für LFP-Batterien im Mittel über den gesamten Ladezustandsbereich [91, 92, 114, 115]. Der Einsatz von SVM für LFP-Batterien zeigt einen Fehler im Bereich von ± 1 bis $\pm 6\%$ _{SOC} im Mittel über den gesamten Ladezustandsbereich [13, 15]. Der Fehler für Künstliche Neuronale Netze liegt zum Vergleich je nach Zellchemie (ohne LFP) im Bereich von ± 1 bis $\pm 5\%$ _{SOC} im Mittel über den gesamten Ladezustandsbereich [31, 93, 96]. Problematisch für alle vorgestellten Verfahren bleibt, dass der Fehler der Ladezustandsbestimmung immer gemittelt über den gesamten Ladezustandsbereich angegeben wird. Es werden keine Angaben zur Fehlerverteilung über den gesamten Ladezustandsbereich gemacht. Das ist allerdings für LFP-Batterien aufgrund der flachen Plateaus im mittleren Ladezustandsbereichs der Ruhespannungskennlinie zur Beurteilung der Eignung von Verfahren zur Ladezustandsbestimmung unbedingt erforderlich.

Des Weiteren ist die Abhängigkeit der Verfahren von einer Amperestundenintegration respektive der Ruhespannungskennlinie für das ZRM zu bewerten. Insbesondere für LFP-Batterien müssen diese Umstände als besonders kritisch betrachtet werden, da im mittleren Ladezustandsbereich eine sehr geringe Steigung von teilweise weniger als einem $1 \frac{mV}{\%_{SOC}}$ vorliegt.

Im Kapitel 3 werden neuartige Methoden zur Ladezustandsbestimmung vorgestellt, die die oben beschriebenen Nachteile beheben. Im Fokus der Untersuchungen steht die Erweiterung der zustandsraumbasierten Verfahren im Zeitbereich durch eine Online-Prädiktion der Netzwerkparameter des ESB. Des Weiteren wird das Verhalten von LFP-Batterien im Frequenzbereich untersucht. Dabei werden neben der Untersuchung des Temperatur- und Alterungsverhaltens die in Kapitel 2 vorgestellten Verfahren

1 Einleitung

- Stützvektormaschine (SVM),
- Nächste-Nachbarn-Klassifikator (NND) und
- Künstliche Neuronale Netze (ANN)

auf Daten im Frequenzbereich angewendet und auf ihre Eignung untersucht, von der Ruhespannungskennlinie unabhängig zu werden.

Die im Zeitbereich arbeitenden zustandsraumbasierten Verfahren wurden durch eine Online-Parameterprädiktion [129] erweitert. Da die Netzwerkparameter der Systemmatrix, Eingangsmatrix und Durchgangsmatrix für jeden Zeitschritt neu bestimmt werden müssen, stellt das dem Zustandsbeobachter und Kalman-Filter zugrundeliegende ZRM kein LZI-System dar. Mit den durchgeführten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass mit den zuvor aus der EIS bestimmten Netzwerkparametern, die Dynamik der Verfahren, insbesondere beim Zustandsbeobachter, im Vergleich zum Zustandsraummodell stark verbessert werden konnte. Da die Durchführung einer EIS nicht mehr notwendig ist, wird durch diese Erweiterung der initiale Charakterisierungsaufwand reduziert. Für die erweiterten Zustandsraumverfahren sind zur Bedatung lediglich, wie schon zuvor, eine genaue Ruhespannungskennlinie, der initiale SOC sowie die verfügbare Batteriekapazität zu ermitteln. Durch die iterative Bestimmung der ESB-Parameter mittels Online-Parameterprädiktion ist eine relative Alterungsanpassung möglich, indem die sich durch die Alterung ändernden Parameter kontinuierlich erkannt werden. Die identifizierten zustandspezifischen Parameter des entsprechenden Systemzustands lassen so eine Nachführung der alterungsbedingten Veränderungen der Batterieeigenschaften zu.

Für Untersuchungen des Batterieverhaltens im Frequenzbereich wurden zwei LFP-Batterien durch eine EIS für verschiedene Temperatur- und Ladezustandskombinationen charakterisiert, eine Hochleistungszelle und eine Hochenergiezelle.

Oberhalb einer Grenzfrequenz von 500 Hz besteht zwischen der Zellkerntemperatur und der Phase der Impedanz ein direkter Zusammenhang weitestgehend unabhängig vom SOC. Die Untersuchungsergebnisse der Zellen im Frequenzbereich zeigen, dass eine sensorlose Temperaturbestimmung durch die Phase der gemessenen Impedanzen bei einer vorgegebenen Frequenz möglich ist [67].

Die Untersuchungen zur Ladezustandsbestimmung im Frequenzbereich wurden mit Fokus auf die Hochleistungszelle durchgeführt. Weitere Untersuchungen mit einer Hochenergiezelle folgen in zukünftigen Arbeiten. Im Weiteren wurde das Potential der in Kapitel 2 vorgestellten Klassifikationsverfahren zur Ladezustandsbestimmung von LFP-Batterien im Frequenzbereich untersucht. Als Basis für die Klassifikatoren werden Daten aus EIS-Messungen herangezogen und temperaturabhängige Ladezustandsklassen für jede ladezustandsspezifische IOK gebildet. Dazu werden für die Ladezustandsbestimmung mittels einer Stützvektormaschine alle IOK durch jeweils eine Hyperebene voneinander getrennt.

Zur Strukturierung und Analyse der Klassierungsergebnisse der SVM-Hyperebenen wird die Eignung der folgenden drei Suchalgorithmen untersucht und anschließend ihre Umsetzung diskutiert:

- lineare Suche
- balancierte Baumsuche
- unbalancierte Baumsuche

Die Untersuchungen und der Vergleich der drei neuen SVM-Suchalgorithmen zur Ladezustandsbestimmung auf Basis von Daten aus dem Frequenzbereich konnten zeigen, dass auch einzeln gemessene Impedanzen Informationen über den SOC der Batterie enthalten. Durch die Klassierung mehrerer Impedanzen kann weiterhin durch die statistische Sicherheit die Genauigkeit der Ladezustandsbestimmung erhöht werden. Zur Bewertung werden die drei hier untersuchten SVM-Suchalgorithmen miteinander verglichen und ihre jeweiligen Vor- und Nachteile herausgearbeitet [66, 69]. Mit Hilfe einer statistischen Validierung, bei der alle drei Verfahren mit jeweils 100 gestörten Impedanzen analysiert wurden, konnte gezeigt werden, wo Unterschiede sowie Vor- und Nachteile bei den Klassierungsraten der einzelnen SVM-Suchalgorithmen liegen. Die Störung einer Impedanz beschreibt den typischen Einfluss auf deren Genauigkeit durch normal verteiltes weißes Rauschen [111].

Die lineare Suche, die durch die Analyse aller $n - 1$ Hyperebenen ein Laufzeitverhalten von $\mathcal{O}(n - 1)$ aufweist, stellt zwar die rechnerisch aufwendigste Variante dar, weist allerdings bessere Klassierungsraten als die beiden anderen Varianten auf. Für die balancierte Baumsuche ergeben sich ähnliche Ergebnisse wie bei der linearen Suche, allerdings zeigt erstere mit $\mathcal{O}(\lceil \log n \rceil)$ ein deutlich besseres Laufzeitverhalten. Die unbalancierte Baumsuche als dritte Variante der Anwendung der SVM zur Ladezustandsbestimmung zeigt bei initial optimaler Schätzung ein ähnliches Verhalten wie die balancierte Baumsuche. Der Suchbaum kann bei initial näherungsweise bekanntem SOC derart aufgespannt werden, dass ein kleinerer Teilbaum des Suchbaums die zu suchende Ladezustandsklasse der gemessenen Impedanz enthält. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der geringeren Suchkomplexität als bei der balancierten Baumsuche. Dieser Vorteil tritt allerdings nur ein, wenn sich die gesuchte Ladezustandsklasse im kleineren Teil des Suchbaums befindet, somit also a der Höhe des kleineren Teilbaums entspricht. Die Komplexität beträgt in diesem Fall der unbalancierten Baumsuche $\mathcal{O}(\lceil \log a \rceil + 1)$, wobei $a \subseteq n$.

Die fortschreitende Alterung einer Zelle verändert ihr Impedanzspektrum deutlich. Daher ist es notwendig die Form der IOK entsprechend dem SOH nachzuführen. Mit der zuvor vorgestellten Methode der Ladezustandsbestimmung im Frequenzbereich besteht nun auch die Möglichkeit, die neu klassierte Impedanz als weiteres neues Element der entsprechenden Ladezustandsklasse zuzuordnen und so die IOK um eine weitere Stütz-

1 Einleitung

stelle zu erweitern. Eine solche Erweiterung erlaubt die Nachverfolgung der Alterung einzelner Impedanzen bei bekannter Frequenz als Funktion der Zeit. Damit ergeben sich zeitabhängige Alterungstrajektorien für die Impedanzen [68].

Mit dem NND lässt sich durch die Ermittlung des geringsten Abstands d_{min} zu einer entsprechenden Ladezustandsklasse der insgesamt k -Abstände die gemessene Impedanz einem SOC zuordnen [64, 63]. Problematisch ist jedoch die steigende Komplexität in Abhängigkeit von der Anzahl der Testinstanzen. Da für den NND mehr als nur ein einzelner nächster Nachbar zur Klassierung berücksichtigt werden kann, wurde auch das Klassierungsverhalten dieser Methode zur Ladezustandsbestimmung für eine unterschiedliche Anzahl von k nächsten Nachbarn untersucht. Im Vergleich zur Verwendung eines nächsten Nachbarn steigt die Klassierungswahrscheinlichkeit bei mehreren nächsten Nachbarn leicht an. Allerdings tritt sehr schnell ein Sättigungsverhalten auf.

Mit dem Verfahren der ANN kann eine Klassierungsrate von maximal 50 % erreicht werden. Unerwarteterweise tritt dieser Wert bei sehr hohen Temperaturen über 30 °C auf, also dort, wo die IOK sehr nah beieinander liegen und eigentlich eine schlechtere Erkennung erwartet wurde. Die Klassierungsrate fällt allerdings mit steigender Störung stetig ab, bis sie die Grundwahrscheinlichkeit erreicht hat. Mit fallender Temperatur sinkt die Klassierungsrate ebenfalls [64, 63].

Es fällt die höhere Komplexität der Frequenzbereichsmethoden im direkten Vergleich zu den Zeitbereichsmethoden auf. Allerdings erlauben die Frequenzbereichsmethoden eine konstante Ladezustandsbestimmung über den gesamten Ladezustandsbereich unabhängig von der Ruhespannungskennlinie. Schlechter fällt allerdings das Laufzeitverhalten aufgrund der zuvor notwendigen Fast Fourier Transformation (FFT) zur Bestimmung der Impedanzen für die Frequenzbereichsmethoden aus, da diese wiederum eine Analyse der Strom- und Spannungssignale im Frequenzbereich voraussetzt. Das hier erarbeitete Konzept für einen hybriden Algorithmus hat zum Ziel, die Vorteile der beiden neuartigen Methoden, Kalman-Filter mit Parameterprädiktion und Ladezustandsbestimmung durch Impedanzklassierung (SVM), miteinander zu kombinieren [61].

Eine neue Möglichkeit zur Kombination beider Methoden stellt der im Folgenden beschriebene hybride Algorithmus dar. Er vereint die speziellen Vorteile der beiden Methoden, des erweiterten Kalman-Filters und der Impedanzklassierung mittels der SVM, um eine sichere Ladezustandsbestimmung im mittleren Ladezustandsbereich von LFP-Batterien zu ermöglichen.

Dazu werden der sich durch die Klassierung mehrerer Impedanzen zu erwartende Mittelwert und dessen Varianz als Einflussgrößen für das Kalman-Filter verwendet. Für den Fall, dass die entsprechende Varianz der Impedanzklassierung kleiner ist als die des Kalman-Filters, wird der Ladezustandsmittelwert der Klassifikationsmethode verwendet. Damit wird der vom Kalman-Filter berechnete SOC bei zu großer Abweichung durch den Ladezustandswert gemäß Impedanzklassierung ersetzt. Damit keine zu große Ände-