

Vergleich von Konzepten zur datenbasierten Ermittlung der Alterung von Fahrzeugbatterien

Hannes Neue*, Niko Schmuck
IT Technische Anwendungen / IT-Innovation
Stromnetz Hamburg GmbH
Hamburg, Deutschland
*hannes.neue@stromnetz-hamburg.de

Robert Annuth*, Anton Wichmann, Christian Becker
Elektrische Energietechnik
Technische Universität Hamburg
Hamburg, Deutschland
*robert.annuth@tuhh.de

I. EINLEITUNG

Kurzfassung – Der Alterungszustand der Batterie von elektrischen Fahrzeugen, State of Health (SOH) genannt, ist eine fundamentale Größe, da von ihr die Reichweite des Fahrzeugs abhängt. Zusätzlich können durch eine Überwachung dieser Größe Wartungsmaßnahmen geplant werden. Im öffentlichen Nahverkehr ist von dem Busbetrieb neben einer hohen Zuverlässigkeit auch die Planbarkeit des Betriebseinsatzes gefordert, welche im direkten Zusammenhang mit dem SOH der Batterie steht. Derzeit gibt es keine frei verfügbaren Lösungen, den SOH von Busbatterien zu bestimmen, daher wird in dieser Arbeit geprüft, ob die Größe über die Messdaten von Ladesäulen ermittelt werden kann. Die Messdaten werden über das Open Charge Point Protocol (OCPP) übertragen und zentral in einem Charge Point Management System (CPMS) gespeichert. Die Datengrundlage dieser Arbeit sind die Ladedaten von zwei verschiedenen Busmodellen mit Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid (NMC) und Lithium-Metall-Polymer Technologie. Drei unterschiedliche Methoden, den SOH zu bestimmen, werden gegenübergestellt, mit Referenzdaten verglichen und bewertet. Eine deutlichere Alterung ist aus den Daten der Busse mit NMC-Technologie abzulesen. Außerdem wird diskutiert, welchen Einschränkungen die Messdaten aus einem CPMS und die angewendeten Methoden unterliegen. Daraus werden Vorschläge für eine verbesserte OCPP-datenbasierte Ermittlung des SOH abgeleitet.

Stichworte – *Lithium-ion battery, State of Health, Battery ageing, Internal resistance, Data-driven methods*

NOMENKLATUR

SOH	State of Health
OCPP	Open Charge Point Protocol
CPMS	Charge Point Management System
NMC	Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid
EOL	End of life
OCA	Open Charge Alliance
BMS	Batteriemanagementsystem
DOD	Depth of Discharge
CC	Constant Current
CV	Constant Voltage
RUL	Remaining Useful Life
ML	Machine Learning
OCV	Open circuit voltage

Für die Einschätzung des Alterungszustandes einer Fahrzeugbatterie und der erzielbaren Reichweite ist der SOH ein wichtiger Parameter. Eine kontinuierliche Überwachung des SOH ermöglicht die Prognose der verbleibenden Lebensdauer sowie das frühzeitige Erkennen von auftretenden Schäden an der Batterie. Vorhersagen der Reichweite und Wartungen können somit planbarer gemacht werden. Bei dem Einsatz von Elektrofahrzeugen im öffentlichen Stadtverkehr spielt zusätzlich die Sicherheit und Zuverlässigkeit des Betriebs eine Rolle. Mit der Kenntnis des SOH kann der Betreiber die Fahrzeugnutzung optimieren und die Zuverlässigkeit steigern. Der öffentliche Nahverkehr bietet zudem optimale Bedingungen zur Elektrifizierung: Kurze Strecken sowie häufiges Abbremsen ermöglichen, die Vorteile von Batterien, beispielsweise durch Energierückgewinnung, voll auszunutzen. Eine präzise Ermittlung des SOH ist eine Herausforderung, da individuelle elektrochemische Alterungsprozesse einen Einfluss haben. Die Leistungsfähigkeit einer Batterie nimmt sowohl mit zunehmender Zeit als auch mit steigender Zyklenzahl ab [1]. Außerdem werden Fahrzeugbatterien bei verschiedenen Umgebungstemperaturen und mit hoher dynamischer Belastung eingesetzt.

Vornehmlich werden in Elektrofahrzeugen Lithium-Ionen-Batterien verwendet. Diese Batterietechnologie hat die Vorteile einer hohen Energiedichte und hoher Lebensdauer. Unterschreitet der SOH einer Lithium Batterie den Wert von 80 %, so ist ein Austausch empfehlenswert [1]. In dieser Arbeit wird untersucht, ob auf Basis der Messdaten von Ladesäulen eine Aussage über die Veränderung des SOH der Fahrzeugbatterie gemacht werden kann. Grundlage der Analyse sind die Ladedatensätze von zwei Busmodellen mit verschiedenen Batterietechnologien, die von Stromnetz Hamburg bereitgestellt werden. Als Verteilnetzbetreiber ermöglicht Stromnetz Hamburg mit seinem selbst entwickelten CPMS eRound die vernetzte und echtzeitfähige Überwachung der Ladeinfrastruktur. Basis für die Kommunikation zwischen Ladesäule und des CPMS bietet das standardisierte OCPP. Die übertragenen Ladevorgangsdaten werden mittels eRound zusammengefasst und anschließend gespeichert. Mit den Informationen über den Zustand der Fahrzeugbatterie kann Stromnetz Hamburg den Flottenbetreibern bei der Betriebssicherheit und der Planbarkeit von Betrieb und Wartungen unterstützen. Innerhalb des fahrzeuginternen Batteriemanagementsystems (BMS) der gewählten Busse wird der SOH ebenfalls bestimmt, allerdings können diese Werte derzeit nur bei der Wartung der Busse ausgelesen werden.

Die Arbeit trägt zur Forschung bei, indem die Voraussetzungen analysiert werden, unter denen datenbasierte Methoden zur Ermittlung des SOH auf Basis von OCPP-Ladedaten eingesetzt werden können. Ausgewählte Verfahren werden implementiert, getestet und weiterentwickelt.

Das Paper ist folgendermaßen strukturiert: In Abschnitt II werden die Grundlagen von Lithium-Batterien und dem Lademanagement von Bussen beschrieben. In Abschnitt III werden die verwendeten Datensätze vorgestellt. Diese werden in Abschnitt IV mit Methoden zur Bestimmung der Batteriealterung untersucht. Nachfolgend werden die Ergebnisse in Abschnitt V verglichen und diskutiert. Abschließend wird in Abschnitt VI ein Ausblick auf mögliche Erweiterungen und Verbesserungen der SOH-Ermittlung auf Basis von OCPP-Ladedaten gegeben.

II. GRUNDLAGEN

Die in dieser Arbeit untersuchten Busse mit Lithium-Ionen-Batterien nutzen als Kathodenmaterial das Übergangsmetalloxid $\text{Li}(\text{Ni}, \text{Mn}, \text{Co})\text{O}_2$ (NMC). In Kombination mit Graphit als Aktivmaterial der Anode ergibt sich eine mittlere Zellspannung von 3,6 V [1]. Hingegen nutzen Lithium-Metall-Batterien als Anodenmaterial metallisches Lithium. Im Vergleich zu anderen Metallen ermöglicht Lithium entsprechend der elektrochemischen Spannungsreihe eine sehr hohe Zellspannung gegenüber einem beliebigen Kathodenmaterial. Die untersuchten Busse mit Lithium-Metall-Batterien nutzen Lithium-Eisen-Phosphat als Kathodenmaterial. Im Gegensatz zu Lithium-Ionen-Batterien haben Lithium-Metall-Batterien eine Zellspannung von 3,2 V [2] und einen Lithiumverlust von ca. 0,3 % pro Lade-/ Entladezyklus. Dieser Verlust entsteht durch unvollständige Rückabscheidung des Lithiums auf der metallischen Oberfläche der Anode. Um eine hohe Lebensdauer der Batterie zu erreichen, muss die Lithiumkathode deshalb zwei- bis viermal so viel Lithium enthalten, wie theoretisch nötig wäre. Ein weiteres Problem ist das verstärkte Wachstum von Dendriten bei der Rückabscheidung von Lithium, die im schlimmsten Fall den Separator durchbrechen und zu einem Kurzschluss der Zelle führen. Um das Dendritenwachstum und das damit einhergehende Sicherheitsrisiko zu unterbinden, werden Lithium-Metall-Batterien bei Elektrofahrzeugen nur in Kombination mit einem festen Polymer als Elektrolyt eingesetzt. Diese Polymere besitzen bei niedrigen Temperaturen allerdings eine geringe Leitfähigkeit, weswegen die Arbeitstemperatur über 60 °C liegt. Lithium-Metall-Polymer-Batterien werden im Folgenden als Festkörper-Batterien bezeichnet. Batterien mit dieser Technologie werden aktuell weltweit nur von der Firma Blue Solutions für Elektrofahrzeuge hergestellt [2, 3].

Der Ladezustand von Batterien kann über den SOC angegeben werden.

$$SOC = 1 - DOD = \frac{C_B - Q_B}{C_B} \quad (1)$$

Q_B beschreibt die Energie, die bei einem vollständigen Ladezyklus von der Batterie aufgenommen wird. C_B beschreibt die Bezugskapazität der Batterie. Die Entladetiefe wird auch Depth of Discharge (DOD) genannt. Es ist zu beachten, dass die Bezugskapazität entweder als Batteriekapazität des Neuzustandes oder des aktuellen Zustandes gewählt werden kann. Darüber hinaus kann durch den Hersteller die nutzbare Batterie-

kapazität festgelegt und als Bezugskapazität für die Berechnung des SOC verwendet werden. Dies ist für die Anzeige des Ladezustandes in Elektrofahrzeugen gängige Praxis [2, 4].

In ABBILDUNG 1 ist zusätzlich zu den Strom- und Spannungskurven eines beispielhaften Ladevorgangs die Constant Current (CC)-Phase und die Constant Voltage (CV) Phase dargestellt.

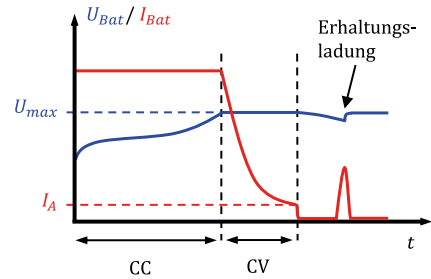


ABBILDUNG 1: BEISPIELHAFTE STROM- UND SPANNUNGSKURVE WÄHREND DES LADEVORGANGS EINER LITHIUM-BATTERIE ÜBER DER ZEIT.

Die Dauer der CC-Phasen ist variabel und wird von der Temperatur, dem Innenwiderstand der Batterie und systemabhängigen Parametern bestimmt. Um eine Überladung der Batterie zu verhindern, bevor der SOC 100 % erreicht, wird die Batterie innerhalb der CV-Phase mit einem abfallenden Strom vollständig geladen. Fällt die Spannung durch Selbstentladung oder andere Effekte unter einen Schwellenwert, wird die Batterie durch die Erhaltungsladung geladen. Während des Betriebs wird jede Zelle der Batterie durch ein BMS überwacht. Die unbekannteren Regelstrategien des BMS haben einen großen Einfluss auf die Ergebnisse der Arbeit.

In ABBILDUNG 2 ist die Leistungsverteilung innerhalb eines Fahrzeugs dargestellt.

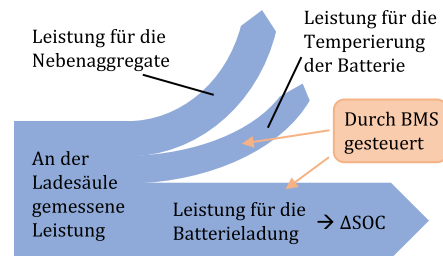


ABBILDUNG 2: ZUSAMMENHANG ZWISCHEN DER ÜBER DAS OCPP GEMESSENEN LEISTUNG UND DER FÜR DIE BATTERIEELADUNG, BATTERIETEMPERIERUNG UND VORKONDITIONIERUNG BENÖTIGTEN LEISTUNG.

Die über OCPP gemessene Leistung beim Ladevorgang wird nicht vollständig für die Batterieeladung verwendet, sondern auch für Nebenaggregate wie die Klimatisierung des Fahrgastraums und für die Temperierung der Batterie. Somit müssen die Daten der Ladesäule für eine korrekte Berechnung des SOH vorbearbeitet werden. Beispielsweise besteht eine starke Abhängigkeit zwischen der Leistung für die Klimatisierung und der Außentemperatur [5]. Typischerweise wird der Fahrgastraum des Busses klimatisch vorkonditioniert, um die Reichweite zu maximieren. Im Sommer erfolgt die Kühlung über einen separaten Kühlkreislauf. Sollte die Kühlleistung nicht ausreichen, unterstützt die Fahrgastraumklimatisierung. Für kalte Tage kann zusätzlich eine kraftstoffbetriebene Zusatzheizung verbaut werden. Bei Feststoff-Batterien ist eine

Kühlung der Batterie nicht erforderlich. Die Batterien werden dauerhaft auf eine Betriebstemperatur von 80 °C geheizt [4, 5].

Generell wird in Bezug auf Batterien zwischen der kalendrischen Lebensdauer und der Zyklenfestigkeit unterschieden. Der Alterungszustand einer Batterie wird über den SOH angegeben, der üblicherweise über die abnehmende Batteriekapazität oder den steigenden Innenwiderstand definiert wird [6]. Das Ende der Lebensdauer (EOL) ist typischerweise mit dem Unterschreiten von 80 % der ursprünglichen Batteriekapazität erreicht [1]. Die individuellen Zusammenhänge der Alterung von Lithium Zellen sind komplex und werden in der Literatur umfassend erläutert [6,7]. Die Alterungsmechanismen lassen sich in drei Kategorien unterteilen:

- Anstieg des Innenwiderstands
- Verlust von Lithium-Ionen
- Verlust von Aktivmaterial

Diese werden unterschiedlich stark von Stressfaktoren wie Zeit, Temperatur, Zellspannung, Stromstärke, mechanische Kompression beeinflusst [8].

Der Aufbau einer Fahrzeugbatterie kann in drei Strukturebenen unterteilt werden: Die kleinste Einheit bilden Batteriezellen, die zu Batteriemodulen zusammengeschaltet werden. Mehrere Batteriemodule bilden ein Batteriepack. Zum Schutz vor mechanischen Belastungen werden die Batteriepacks in einen Batterietrog eingebettet. Gleichzeitig verhindert ein Batterietrog das unkontrollierte Ausbreiten von Feuer im Falle eines Batteriebrandes. Um den Betrieb sowohl an heißen Sommertagen als auch an kalten Wintertagen zu gewährleisten, ist das zuvor erwähnte Thermomanagement der Fahrzeugbatterie unabdingbar.

Die vom Hersteller garantierte Lebensdauer der Batterie richtet sich nach der Laufzeit und dem Energiedurchsatz und ist abhängig von der Zelltechnologie. Sie beträgt für die Busse dieser Arbeit mit NMC-Batterien mindestens fünf Jahre und für die Busse mit Festkörper-Batterien bis zu zehn Jahren [9]. Für die Ladung der in dieser Arbeit untersuchten Stadtbusse kommen Gleichstrom-Ladesäulen der Hersteller Ekoenergyka und Heliox mit jeweiligen maximalen Ladeleistungen von 150 kW und 225 kW zum Einsatz. Die für die Übertragung verwendete OCPP-Version 1.6 wurde 2015 als offener Standard veröffentlicht und ist durch die Open Charge Alliance (OCA) entwickelt, welches ein Konsortium verschiedener, führender Entwickler und Betreiber öffentlicher und privater Ladesäuleninfrastruktur ist.

Die Ermittlung des aktuellen SOH ist grundsätzlich von der Lebensdauerprognose (Remaining Useful Life (RUL)) zu unterscheiden. Während der SOH auf Basis von direkt vermessenen elektrischen, mechanischen und thermischen Parametern ermittelt werden kann, benötigt eine Lebensdauerprognose den SOH selbst als Input, um den weiteren Verlauf des SOH und damit die verbleibende Lebensdauer zu prognostizieren. Die folgenden Absätze geben daher einen Überblick über gängige Methoden zur datenbasierten SOH-Ermittlung.

Differentielle Analyse: Bei der differentiellen Analyse werden abgeleitete Merkmale aus elektrischen, mechanischen und thermischen Parametern mit der Alterung einer Batterie korreliert. Die gemessenen Signale werden mittels galvanostatischem Laden oder Entladen einer Batteriezelle generiert.

Galvanostatisches Laden bezeichnet das Laden bei festgelegter und konstanter Stromrate. Diese Methode ist durch die Bildung einer Ableitung maßgeblich von der Abstrategie und der Genauigkeit der Messung abhängig, mit der die entsprechenden Parameter erfasst werden. Weiterhin sind die Methoden für eine SOH-Ermittlung bisher überwiegend auf Zellebene erprobt und nicht ohne weiteres auf Batteriepackebene übertragbar [8].

Maschinelles Lernen (ML): Eine weitere Kategorie der Methoden zur Ermittlung des SOH umfasst Ansätze des maschinellen Lernens. Dabei können die ML-Methoden danach unterschieden werden, ob sie auf einem Batteriemodell basieren. Aus ML-Sicht ist die Ermittlung des SOH ein Regressions- und kein Klassifizierungsproblem. Modellbasierte ML-Methoden legen beispielsweise ein elektrochemisches Modell oder ein Klemmspannungsmodell der Batterie zugrunde. Im Trainingsvorgang werden die Parameter des Modells angepasst. Die nötigen Features können aus Messungen des BMS ermittelt werden.

III. VERWENDETE MESSDATEN

Für den Vergleich von Konzepten zur datenbasierten Ermittlung des Alterungszustandes von Fahrzeugbatterien werden Messdaten aus dem CPMS eRound der Stromnetz Hamburg GmbH verwendet. Ein CPMS ist eine Softwareplattform für Ladesäulenbetreiber, welche die Verwaltung und Steuerung von Ladestationen für Elektrofahrzeuge ermöglicht.

Zu der Erprobung ausgewählter Methoden zur SOH-Ermittlung werden Messdatensätze von zwei verschiedenen Busmodellen des Herstellers Mercedes-Benz verwendet. Die Parameter der Datensätze werden nachfolgend vorgestellt und sind in TABELLE I zusammengefasst.

TABELLE I: TECHNISCHE PARAMETER DER VERMESSENEN BUSSE.

	<i>Mercedes Solobus</i>	<i>Mercedes Gelenkbus</i>
<i>Anzahl Busse</i>	10	10
<i>Zellchemie</i>	Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid / Graphit	LMP® Lithium Metall Polymer
<i>Anodenmaterial</i>	Graphit	Lithiummetall
<i>Kathodenmaterial</i>	NMC	Lithium-Eisen-Phosphat
<i>Elektrolyt</i>	flüssig	Polymer
<i>Batteriemodule</i>	12	7
<i>Batteriekapazität</i>	294 kWh	441 kWh
<i>Spannung (nom.)</i>	666 V	600 V
<i>Spannung (max.)</i>	747 V	648 V
<i>Spannung (min.)</i>	540 V	450 V
<i>Optimale Betriebstemperatur</i>	25 °C	80 °C

Die 20 gewählten Busmodelle unterscheiden sich maßgeblich in der Batterietechnologie und in der Dauer des Einsatzes. Der Mercedes Solobus nutzt 12 NMC-Batteriemodule mit einer Gesamtkapazität von 294 kWh und es liegen Daten für einen Gesamtzeitraum von zwei Jahren und zwei Monaten vor. Im Gegensatz dazu liegen für den Mercedes Gelenkbus nur

Daten für ein Jahr und drei Monate vor und es sind sieben Festkörper-Batteriemodule mit einer Gesamtkapazität von 441 kWh verbaut.

Die Datensätze umfassen die Ladedaten der Busse, die über das OCPP an das IT-Backend eRound übertragen werden. Für die Auswertungen dieser Arbeit werden insbesondere die Parameter Strom, Spannung, SOC und momentane Ladeleistung verwendet. Es stehen keine Temperaturdaten oder Messungen der dynamischen Entladevorgänge während der Fahrt zur Verfügung. Durchschnittlich umfassen die Datensätze pro Bus für die Mercedes Solobusse 1500 und für die Mercedes Gelenkbusse 350 Ladevorgänge. Die Anzahl der Ladevorgänge pro Bus variiert stark, je nach Kontinuität des Buseinsatzes und Anzahl der Teilladezyklen. 12 % der Ladezyklen der Mercedes Solobusse und 8 % der Ladezyklen der Mercedes Gelenkbusse weisen Konnektivitätsprobleme oder fehlende Werte auf. Weitere jeweils 7,2 % bzw. 5,6 % der Ladezyklen haben eine Gesamtdauer, die kürzer als 20 min. ist. 21,4 % bzw. 26,3 % der Ladevorgänge starten mit einem SOC von über 75 %. Die Angaben sind in TABELLE II zusammengefasst.

TABELLE II: STATISTIK DER MESSDATEN PRO BUSMODELL (DURCHSCHNITT ÜBER JEWEILS 10 BUSSE).

	Mercedes Solobus	Mercedes Gelenkbus
Anzahl Ladezyklen	1500	350
Fehlerhafte Ladezyklen	12 %	8 %
Ladedauer < 20 min.	7.2 %	5.6 %
Start-SOC > 75 %	21.4 %	26.3 %

Ein exemplarischer Verlauf eines Ladevorgangs ist in ABBILDUNG 3 dargestellt.

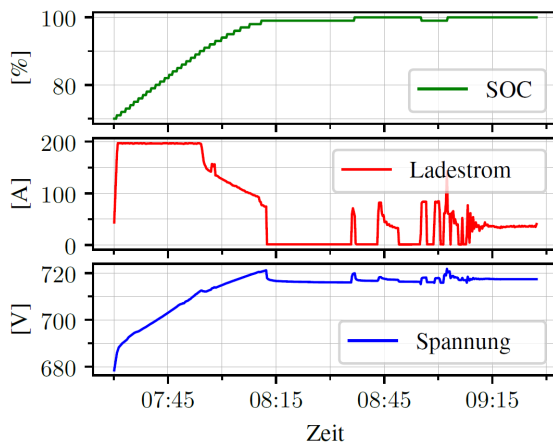


ABBILDUNG 3: TYPISCHER VERLAUF DER BATTERIELADUNG MIT ANSCHLIEßENDER VORKONDITIONIERUNG.

Dabei sind die CC-Phase und CV-Phase der Batterieladung deutlich zu unterscheiden. Werden die Fahrzeuge bei maximaler Leistung geladen, so fließt ein Strom von knapp 200 A. Erreicht der vom BMS gemessene SOC einen Wert von 99 %, so geht der Ladevorgang in die Erhaltungsladung über. 90 min. vor der Abfahrtszeit bekommt der Bus das Signal zur Vorkonditionierung des Fahrgastraumes. Auf Basis der gemessenen Außen- und Innentemperatur des Busses sowie

der jahreszeitlichen Bedingungen wird die Vorkonditionierung durch den Bus so gesteuert, dass die Sollwerte der Temperierung zum vorgegebenen Abfahrtszeitpunkt erfüllt sind.

IV. ANWENDUNG DATENBASIERTER METHODEN

In den folgenden Abschnitten wird untersucht, ob die Datensätze es zulassen, dass die Batteriealterung über die abnehmende Batteriekapazität oder den zunehmenden Innenwiderstand bestimmt werden kann. Des Weiteren wird der Trend einer steigenden Ladeschlussspannung bei einer zunehmenden Anzahl von Ladezyklen näher analysiert.

A. SOH über Kapazitätsverhältnis

Der SOH in % kann über die Abnahme der Batteriekapazität in Ah charakterisiert werden. Dazu wird die aktuelle Batteriekapazität C_i ins Verhältnis zur Batteriekapazität im Neuzustand C_0 gesetzt:

$$SOH = \frac{C_i}{C_0} \cdot 100 \% \quad (2)$$

Die aktuelle Batteriekapazität C_i kann über das Verhältnis der Ladungsmenge Q_i zur SOC-Änderung gemäß

$$C_i = \frac{Q_i}{SOC_{t_i} - SOC_{t_{i0}}} \cdot 100 \% \quad (3)$$

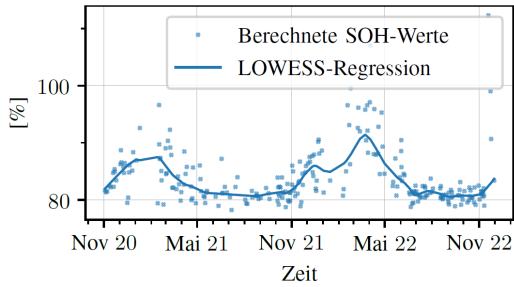
berechnet werden. Dabei lässt sich die Ladungsmenge des i -ten Ladevorgangs über die Integration des Stromes über die Zeit t nach Formel (4) ermitteln.

$$Q_i = \int_{t_{i0}}^{t_i} Idt \quad (4)$$

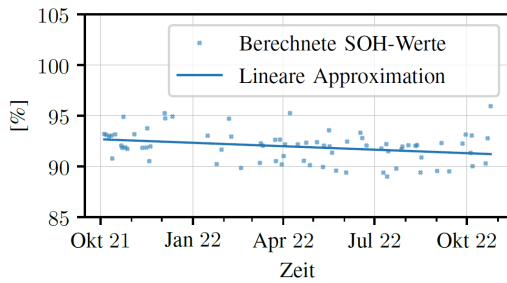
Die Batteriekapazität im Neuzustand C_0 in Ah kann über die Batteriekapazität in kWh sowie der nominalen Spannung aus den Datenblättern (siehe TABELLE I) berechnet werden. Sie wird für die Berechnung des SOH für alle Busse eines Busmodells als konstant angenommen. Hierbei muss sichergestellt werden, dass die verwendeten Ladevorgänge zur Berechnung der aktuellen Batteriekapazität eine ausreichende SOC-Differenz aufweisen. Dafür wird eine minimale SOC-Differenz von 25 % festgelegt. Zusätzlich wird die Berechnung genauer, wenn die Ladevorgänge eine einheitliche Dauer haben. Dabei ist zu beachten, dass je nach Höhe des Ladestromes eine SOC-Differenz von 25 % mit verschiedenen Zeitdauern erreicht werden kann. Um möglichst viele Ladevorgänge mit einer Mindest-SOC-Differenz von 25 % aus dem Datensatz herauszufiltern, wird die Dauer des niedrigsten typischen Ladestromes der jeweiligen Busmodelle als einheitliche Dauer gewählt. Zusätzlich wird die größte zulässige Differenz zwischen maximalem und minimalem Ladestrom auf 10 A festgelegt. Dies garantiert, dass der Ladestrom möglichst konstant ist und die gefilterten Sequenzen aus der CC-Phase stammen.

Bei Anwendung der Kriterien verbleiben für jeden der Mercedes Solobusse durchschnittlich 270 Ladezyklen (18 %) und für die Mercedes Gelenkbusse 82 Ladezyklen (23 %).

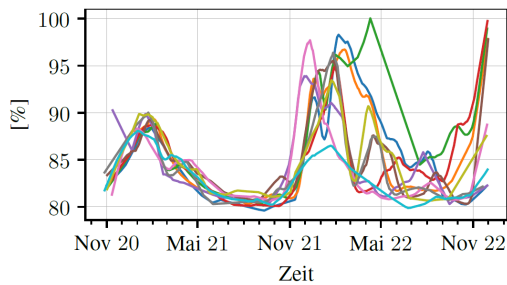
Das Ergebnis der SOH-Berechnung über der Zeit ist exemplarisch für je einen Mercedes Solobus (ABBILDUNG 4A) und einen Mercedes Gelenkbus (ABBILDUNG 4B) dargestellt. Die berechneten SOH-Werte werden für die Mercedes Solobusse mittels lokaler Regression approximiert. Da für die Mercedes Gelenkbusse weniger Datenpunkte vorliegen, werden die berechneten SOH-Werte linear approximiert. ABBILDUNG 4C und ABBILDUNG 4D zeigen die approximierten SOH-Kurven aller Mercedes Solo- und Gelenkbusse über der Zeit.



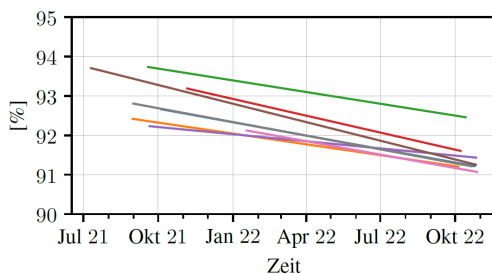
(a) Mercedes Solobus: Berechnete SOH-Werte und mittels lokaler Regression geglättete Kurve



(b) Mercedes Gelenkbus: Berechnete SOH-Werte sowie lineare Approximation



(c) Mercedes Solobus: Geglättete Kurven der berechneten SOH-Werte aller Busse



(d) Mercedes Gelenkbus: Lineare Approximation der berechneten SOH-Werte aller Busse

ABBILDUNG 4: ZEITLICHER VERLAUF DER BERECHNETEN SOH-WERTE.

Bei den Mercedes Gelenkbusen liegen für drei der zehn Busse über längere Zeiträume nur sehr wenige Daten vor, sodass diese in ABBILDUNG 4D nicht gezeigt werden. Die Auswertung der Daten folgt in Abschnitt V.

B. SOH über Innenwiderstand der Batterie

Mit zunehmender Zyklenzahl nimmt der Innenwiderstand einer Lithium-Batterie zu, sodass der Parameter sich dazu eignet, den Alterungszustand zu charakterisieren [10]. Der SOH kann über das Verhältnis des aktuellen Innenwiderstandes zum Innenwiderstand im Neuzustand der Batterie definiert werden. Der Trend einer Veränderung des Innenwiderstandes kann bereits nach wenigen Zyklen detektiert werden [8]. Somit ist der datenbasierte Ansatz vielversprechend für frühzeitige Vorhersagen über den Verlauf des SOH auf Basis eines kleinen Datensatzes. Im Gegensatz zu der Berechnung über das Kapazitätsverhältnis wird die Bestimmung des SOH über den Innenwiderstand weniger durch den Ladealgorithmus beeinflusst. Die Lithium-Batterie kann in einfacher Näherung über ein Thévenin-Ersatzschaltbild dargestellt werden [2]. Dies ist in ABBILDUNG 5 zu sehen. Der Innenwiderstand der Batterie wird als ohmscher Widerstand R_i bezeichnet. Zur Modellierung des zeitlichen Spannungsverlaufes wird das RC-Glied in die Ersatzschaltung integriert. Die Spannungsquelle entspricht der Leerlaufspannung (Open Circuit Voltage (OCV)) der Batterie.

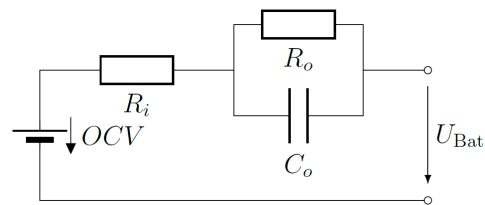


ABBILDUNG 5: THÉVENIN-ERSATZSCHALTBILD EINER BATTERIE [2].

Es ist wichtig zu berücksichtigen, dass die elektrischen Parameter des Klemmspannungsmodells abhängig von der Temperatur, dem SOC und der Höhe des Ladestroms sind. Der Innenwiderstand kann über starke Stromänderungen ermittelt werden. Ein definierter Ladestromanstieg oder -abfall ΔI geht mit einer positiven oder negativen Spannungsdifferenz U_{diff} einher, die durch den Innenwiderstand R_i verursacht wird. Formal kann dies über das ohmsche Gesetz ausgedrückt werden.

$$|U_{diff}| = R_i \cdot |\Delta I| \quad (5)$$

Für die Ermittlung des Innenwiderstandes können analog zur Spannungsdifferenz bei Ladestromanstieg oder -abfall auch Entladestromänderungen verwendet werden.

Im Folgenden wird die beschriebene Methode auf den Datensatz angewendet. Da keine Referenz für den Innenwiderstand der Fahrzeugbatterie im Neuzustand in den Datenblättern der Busmodelle gegeben ist, wird lediglich der Verlauf des absoluten Innenwiderstandes über der Zeit berechnet, ohne die Werte zusätzlich auf den Innenwiderstand im Neuzustand zu beziehen.

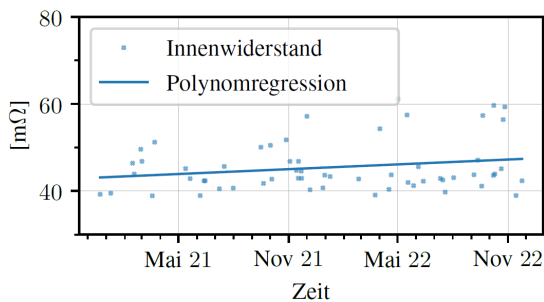
Für die Filterung des Datensatzes auf signifikante Stromanstiege und -abfälle wurden folgende Kriterien gewählt:

- Betrag der Steigung des Stromes ≥ 30 A
- Stromänderung nicht bei SOC von 100 %

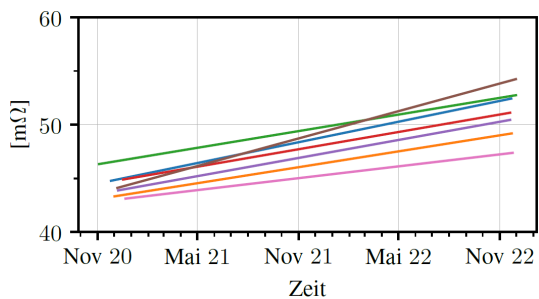
- größte Schnittmenge bei Verteilung von SOC und Betrag des Stromsprungs.

Bei Anwendung dieser Kriterien werden aus den Datensätzen der Mercedes Solobusse pro Bus durchschnittlich 49 Stromsprünge und aus den Datensätzen der Mercedes Gelenkbusse durchschnittlich 32 Stromsprünge extrahiert. Hinsichtlich der erläuterten Variation des Innenwiderstandes über der Temperatur wird angenommen, dass das BMS eine nahezu konstante Betriebstemperatur der Batteriemodule gewährleistet.

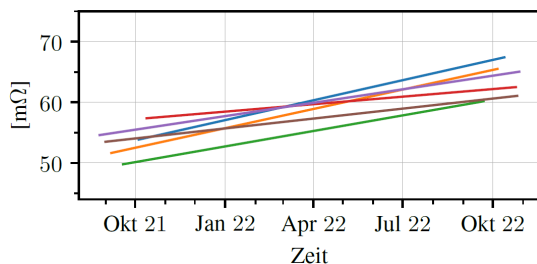
Exemplarisch sind die berechneten Werte des Innenwiderstandes über der Zeit für einen Mercedes Solobus in **ABBILDUNG 6A** zu sehen. Die lineare Approximation zeigt erwartungsgemäß einen leichten Anstieg. Im Durchschnitt liegen die Werte der NMC-Batterien leicht unter $50 \text{ m}\Omega$. Ein ähnlicher Verlauf ergibt sich für den Innenwiderstand der Mercedes Gelenkbusse, mit dem Unterschied, dass im Mittel ein Widerstand von $60 \text{ m}\Omega$ berechnet wird. Der höhere Innenwiderstand ist in der Verwendung des Polymerelektrolyten bei den Festkörperbatterien begründet. Die lineare Approximation der Verläufe des Innenwiderstandes ist für alle Mercedes Solobusse in **ABBILDUNG 6B** und für alle Mercedes Gelenkbusse in **ABBILDUNG 6C** zu sehen. Für alle Datensätze ergibt sich ein mehr oder weniger ausgeprägter Anstieg über der Zeit.



(a) Exemplarisch für einen Mercedes Solobus: Berechnete Werte des Innenwiderstandes sowie lineare Approximation über der Zeit



(b) Mercedes Solobus: Lineare Approximationen der berechneten Innenwiderstände für alle Busse

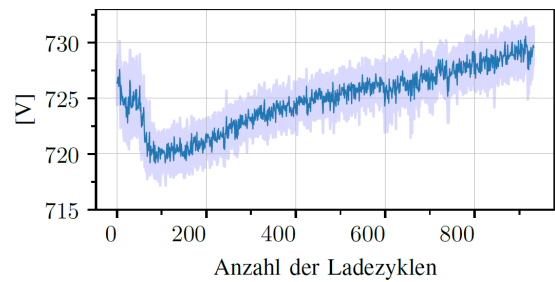


(c) Mercedes Gelenkbus: Lineare Approximationen der berechneten Innenwiderstände für alle Busse

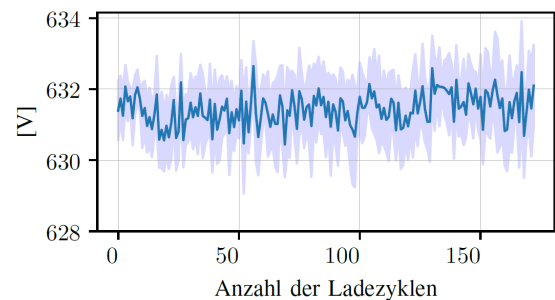
ABBILDUNG 6: ZEITLICHER VERLAUF DES BERECHNETEN.

C. SOH mittels Ladeschlussspannung

Während der Analyse von den Messdaten der Busse konnte der Trend einer steigenden Schlussspannung mit zunehmender Zyklenzahl festgestellt werden. Zu diesem Zweck wird aus allen Ladezyklen, die keine fehlerhaften Messpunkte aufweisen, der Wert der Spannung beim ersten Erreichen eines SOC von 99 % extrahiert. Im Gegensatz zu der Filterung der Ladevorgänge bei der Berechnung des SOH über das Kapazitätsverhältnis, werden hierbei auch Teilzyklen in der Auswertung berücksichtigt. **ABBILDUNG 7** zeigt die gemittelten Verläufe der Ladeschlussspannungen über der Ladezyklenanzahl für beide Busmodelle. Die helle Farbe kennzeichnet, in welchem Bereich 95 % der Ladeschlussspannungen liegen.



(a) Mercedes Solobus



(b) Mercedes Gelenkbus

ABBILDUNG 7: LADESCHLUSSPANNUNG ÜBER DER ANZAHL DER LADEZYKLEN FÜR ALLE BUSSE: DIE DURCHGEHENDE LINIE MARKIERT DEN MITTELWERT DER LADESCHLUSSPANNUNG PRO LADEZYKLUS, DIE HELLE FARBE KENNZEICHNET, IN WELCHEM BEREICH 95 % DER LADESCHLUSSPANNUNGEN LIEGEN.

Für die Mercedes Solobusse ist ein Abfall der Ladeschlussspannung um ca. 5 V während der ersten 100 Zyklen erkennbar. Nachfolgend steigt die Ladeschlussspannung kontinuierlich bis auf einen Wert von 730 V an. Dieser Trend ist für die Mercedes Gelenkbusse nicht zu erkennen. Stattdessen schwankt die Ladeschlussspannung stochastisch zwischen 630 V und 634 V.

V. ERGEBNISSE & DISKUSION

Für den Mercedes Solobus sind folgende Ergebnisse abzulesen: Der berechnete Innenwiderstand sowie die Ladeschlussspannung steigen jeweils kontinuierlich über der Zeit an (siehe **ABBILDUNG 6B** und **ABBILDUNG 7A**). Folglich müsste der über das Kapazitätsverhältnis berechnete SOH kontinuierlich abfallen. Dieses Verhalten ist allerdings nicht in **ABBILDUNG 4C** zu beobachten. Zwar sinkt der SOH zwischenzeitlich, jedoch ist ein erneuter Anstieg mit einem Höhepunkt im März 2022 sichtbar. Die Ursachen für den SOH-Anstieg können entweder im Datensatz oder in der Berechnungs- bzw. Filterungsmethode liegen. Daher wurden für eine nähere Untersuchung die gefilterten Ladesequenzen, die besonders hohe oder niedrige SOH-Werte verursachen, direkt

verglichen. Es zeigte sich, dass bei gleichen mittleren Ladeströmen unterschiedliche SOC-Differenzen auftreten. Die Kombination aus niedriger SOC-Differenz und hohem Ladestrom verursacht somit hohe berechnete SOH-Werte. Es wird daher geschlussfolgert, dass der SOH-Anstieg nicht durch die gewählten Filterkriterien oder die Berechnungsmethode verursacht wird, sondern im Datensatz selbst begründet ist. Dies lässt vermuten, dass ein Teil des Stromes nicht zu der Batterieladung beiträgt, sondern für die Batterietemperierung und Vorkonditionierung benötigt wird. Eine weitere Begründung für den SOH-Anstieg könnte aber auch eine nicht-kontinuierliche Freischaltung von Kapazität durch das BMS sein. Die Vermutungen können jedoch nicht verifiziert werden, da keine weiteren Informationen über die Funktionsweise des BMS vorliegen.

Auch für den Mercedes Gelenkbus kann in ABBILDUNG 6C ein steigender Innenwiderstand über der Zeit beobachtet werden. Allerdings ist in ABBILDUNG 7B kein Anstieg der Ladeschlussspannung zu sehen. Dies deutet darauf hin, dass das BMS für die Festkörper-Batterien eine andere Strategie implementiert hat als das BMS der NMC-Batterien in den Solobussen. Ein weiterer Beleg dafür ist, dass in ABBILDUNG 4D eine stetige Abnahme des berechneten SOH zu sehen ist. Die berechneten SOH-Werte liegen im Bereich der Werte von [11]. Der SOH-Verlauf und der Verlauf des Innenwiderstandes bestätigen sich gegenseitig. Ein erneuter SOH-Anstieg ist für die Mercedes Gelenkbusse nicht zu beobachten.

Festzuhalten ist, dass die Berechnung des SOH über das Kapazitätsverhältnis durch den zeitlichen Verlauf eines Ladevorgangs beeinflusst wird. Variierende SOC-Startwerte und -Differenzen, sowie unterschiedliche Ladestromstärken und der Unterschied zwischen gemessenem SOC und physikalischem SOC lassen die SOH-Werte streuen. Im Gegensatz dazu wird der Innenwiderstand lediglich durch den Betrag des Stromsprungs sowie den SOC der Batterie zum Zeitpunkt der Stromänderung beeinflusst. Zwar lässt sich aus den Datensätzen nur eine eingeschränkte Anzahl an relevanten Stromänderungen extrahieren, die daraus berechneten Werte des Innenwiderstandes zeigen aber einen eindeutigen Trend für beide Busmodelle. Der Innenwiderstand kann somit für die Datensätze als zuverlässigere Größe als die abnehmende Kapazität eingeordnet werden. Die Ladeschlussspannung kann zusätzlich als Indikator für die Freischaltung von Batteriekapazität durch das BMS hinzugezogen werden. Im Gegensatz zu beiden anderen Methoden lässt sich die Ladeschlussspannung ohne größere Vorfilterung der Ladevorgänge bestimmen. Die Interpretation bleibt ohne Kenntnis der Funktionsweise des BMS schwierig.

Für die Mercedes Solobusse liegen Daten des BMS von jeweils einer Inspektion pro Bus in der Werkstatt aus der zweiten Jahreshälfte von 2022 vor. Die Messungen umfassen den Alterungszustand der Batteriekapazität für alle zwölf Batteriemodule. Unter den Batteriemodulen eines Busses variieren die Werte um bis zu 2 %. Je nach zurückgelegter Reichweite liegen die für alle Batteriemodule gemittelten SOH-Werte der Busse in einem Bereich von 85 % bis 90 %. Die BMS-Werte lassen zwar keine Validierung der Methoden dieser Arbeit zu, zeigen aber, dass die SOH-Ermittlung über das Kapazitätsverhältnis Werte im richtigen Bereich berechnet.

Somit kann aus mit den Messdaten aus dem CPMS die Alterung der Fahrzeugbatterien verfolgt werden. Die Aussagekraft der Methoden und Ergebnisse wird durch folgende zwei

Punkte maßgeblich eingeschränkt: 1) Die genaue Funktionsweise des BMS ist nicht bekannt, wodurch eine Alterung der Batterie nicht immer über die Ladedaten erkennbar ist und die Daten ungenau sein können. 2) Die OCPP-Ladedaten lassen nur einen Blick auf Batteriepackebene, nicht aber auf Batteriezellebene zu. Problematisch bei der Berechnung der Ladeschlussspannung und des Innenwiderstands ist auch die Kalibrierung, um eine SOH äquivalente Größe zu erhalten.

VI. FAZIT & AUSBLICK

In dieser Arbeit wurden die Grundlagen für den Einsatz und der Alterung von Lithium-Ionen-Batterien eingeführt. Auf Basis realer Messdatensätze der Ladedaten von zwei Busmodellen mit NMC- und Lithium-Metall-Polymer-Batterien wurden mit folgenden drei Parametern zur Bestimmung des SOH-Verlaufes gewählt: Die abnehmende Batteriekapazität, der steigende Innenwiderstand sowie die steigende Ladeschlussspannung. Es ergeben sich mehrere Ansätze, wie die SOH-Ermittlung über das Kapazitätsverhältnis sowie die Berechnung des Innenwiderstandes in Folgearbeiten erweitert werden können. Die gewählten Ansätze wurden bezüglich der Daten weiterentwickelt, die Implementierung erarbeite und die Anwendbarkeit diskutiert.

Die Bestimmung der Batteriekapazität kann durch wiederholbare, angepasste Ladebedingungen verbessert werden. Beispielsweise durch regelmäßige Referenzladungen mit gleichem SOC-Startwert, Ladestrom und annähernd gleicher Umgebungstemperatur geschaffen werden. Dabei ist wichtig, dass die Vorkonditionierung des Fahrgastraumes ausgeschaltet ist, sodass ausgeschlossen werden kann, dass Ströme in die Nebenaggregate fließen. Die Bestimmung des Innenwiderstandes kann verbessert werden, wenn die Ladepunkte einer Ladesäule gezielt doppelt oder einzeln belegt werden, beziehungsweise der Ladestrom gezielt verändert wird. Dies müsste möglichst in regelmäßigen Abständen und bei gleichem SOC geschehen. Mit der Verwendung von Messdaten über längere Zeiträume als zwei Jahre kann eine größere Sicherheit bezüglich saisonaler, temperaturbedingter Effekten erzielt werden. Würden zusätzlich zu den Ladedaten auch die Messdaten der dynamischen Entladevorgänge aus dem Bordcomputer ausgelesen werden, so könnten weitere Phänomene, wie der Ausfall von Batteriemodulen, näher untersucht werden.

Seit dem 01. Januar 2022 ist die neue EU-Verordnung über Batterien und Altbatterien in Kraft. Diese Verordnung sieht vor, dass bis zum Januar 2026 jede Fahrzeugbatterie mit einer Kapazität von mehr als 2 kWh über einen Batteriepass verfügen muss. Der Batteriepass soll über eine elektronische Akte realisiert werden und insbesondere Daten über die Herstellung und den Gesundheitszustand der Batterie enthalten. Außerdem soll der SOH jederzeit aus dem BMS ausgelesen werden können [12]. Dies eröffnet im Kontext dieser Arbeit neue Perspektiven für Fahrzeug- und Ladesäulenbetreiber. Die Vorteile einer kontinuierlichen Überwachung des SOH für die Betreiber einer Flotte von Elektrofahrzeugen sind offensichtlich: Auf einer zuverlässigen SOH-Ermittlung kann eine Vorhersage des EOL aufbauen. Außerdem können Schäden und Auffälligkeiten frühzeitig detektiert werden. Dadurch können Kosten durch Betriebsausfälle eingespart und Wartungen planbar gemacht werden. Zusätzlich wird die Zuverlässigkeit des Fahrzeugbetriebes gesteigert.

LITERATUR

- [1] M. Sterner und I. Stadler, *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.

- [2] A. Jossen und W. Weydanz, *Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen*, 1. Aufl. Neusäß: Ubooks Verlag, 2006.
- [3] Blue Solutions, *Battery technology - LMP presentation*, 2022.
- [4] EvoBus GmbH, *Betrieb von Hochvolt-Batteriesystemen: eCitaro*, 2021.
- [5] M. Bareiß und D. Vorgerd, "Thermomanagement für elektrisch angetriebene Stadtbusse," *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Jg. 121, Nr. 2, S. 52–55, 2019.
- [6] A. Haubrock, *Degradationsuntersuchungen von lithium-ionen batterien bei deren einsatz in elektro-und hybridfahrzeugen*. Vol. 1. Cu villier Verlag, 2011.
- [7] A. Kohs, *Batteriemodell zur Prädiktion des Gesundheitszustands von Lithium-Ionen-Batterien*. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2022.
- [8] Y. Li u. a., "Data-driven health estimation and lifetime prediction of lithium-ion batteries: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 113, S. 109 254, 2019.
- [9] Mercedes-Benz Buses: *Omnibus Magazin: Ganz auf Elektromobilität eingestellt*, 2023.
- [10] W. Waag, S. Käbitz und D. U. Sauer, "Experimental investigation of the lithium-ion battery impedance characteristic at various conditions and aging states and its influence on the application," *Applied Energy*, Jg. 102, S. 885–897, 2013.
- [11] *Driven Methods for Battery SOH Estimation: Survey and a Critical Analysis*," *IEEE Access*, Jg. 9, S. 126 903–126 916, 2021.
- [12] BMWK-Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, *Darum geht's beim Batteriepass für Elektroautos*, 2023.