

Second Life von Batteriezellen für Elektrofahrzeuge

Projekt Nr. 8/12-55

Fachhochschule Kiel
Prof. Dr.-Ing. Christoph Weber
Institut für Mechatronik

Projekt „Second Life von Batteriezellen für Elektrofahrzeuge“

Projektingenieur: M. Eng. Jakob Pfaff

In Zusammenarbeit mit der Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH und Lüdemann und Sens e.K.



INHALTSVERZEICHNIS

1	Zusammenfassung und Zielsetzung	5
2	Einleitung	7
3	Projektergebnisse	10
3.1	Geänderter Hardwareaufbau des Diagnosesystems.....	15
3.2	Finalisierung der Merkmale zur Schätzung des SoH-Wertes	16
3.3	Training und Test des SoH-Modells	21
3.4	Diskussion der Einsatzfähigkeit von KI basierten Analyseverfahren für die Erfassung des SoH von Batteriemodulen beim Modullieferanten	23
3.5	Einsatz-Szenario in den Batteriereparaturzentren	28
4	Zusammenfassung	30
5	Literaturquellen	31

Abbildungen

Abbildung 1 Bildliche Erläuterung zu den hier verwendeten Begriffen: Batteriepack, Batteriemodul und Zelleinheit [1]	5
Abbildung 2 Problem der passungsfähigen Reparatur eines gebrauchten Batteriesystems im Falle eines Batteriemoduldefektes	8
Abbildung 3 Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen bis 2024 (2023, 2024 Schätzungen) [2].	9
Abbildung 4 Aufbau des entwickelten Demonstrators	10
Abbildung 5 Impedanzspektren aller Zelleinheiten zweier unterschiedlich gealterter Batteriemodule	13
Abbildung 6 Fertiggestellter Demonstrator des Diagnosegerätes.....	14
Abbildung 7 Fahrzyklus gemäß WLTP-Klasse 3 eines Zoe 2. Generation.....	16
Abbildung 8 Darstellung des Messablaufs zur Erfassung von realen SoH-Werte von unterschiedlich gealterten Modulen eines Batterietyps	18
Abbildung 9 Exemplarische Gegenüberstellung von Impedanzspektren anhand eines neuwertigen und stark gealterten Moduls bei 80% des Ladezustandes	20
Abbildung 10 Trainingsergebnis mit 15 Testdaten. Predicted bedeutet: SoH-Wert-Schätzung durch das Künstliche neuronale Netz, Actual bedeutet: Der korrekte (gemessene) SoH-Wert	22
Abbildung 11 Erfassung der individuellen Impedanzspektren jeder Zelleinheit innerhalb eines Batteriemoduls.....	23
Abbildung 12 Typisches Impedanzspektrum von 8 Zelleinheiten eines Batteriemoduls mit Mediankurve	24
Abbildung 13 Anomalie im gemessenen Impedanzspektrum einer Zelleinheit (hier Zelle 119) gegenüber den anderen Zelleinheiten	24
Abbildung 14 Vorgehensweise zur Bewertung von gebrauchten Batteriemodulen	26
Abbildung 15 Erneute Prüfung des Moduls nach einer Lagerzeit von einer Woche	27
Abbildung 16 Einsatzszenario in einem Batteriereparaturzentrum	28

Tabellen

Tabelle 1 Anordnung der Eingangsmerkmale (Inputs) und Ausgangsmerkmale (Targets).....	12
Tabelle 2 Verbesserte Anordnung der Eingangsmerkmale (Inputs) und Ausgangsmerkmale (Targets)	19

1 ZUSAMMENFASSUNG UND ZIELSETZUNG

Im Rahmen dieses Projektes wurde ein Batterie-Diagnosesystem für Elektroautos entwickelt, das den späteren, gezielten Austausch eines defekten Batteriemodul mit einem anderen gebrauchten intakten ermöglicht. Ein Batteriemodul stellt dabei eine Serienschaltung von z. B. acht Zelleinheiten dar. Eine Zelleinheit wird in Batteriemodulen oft durch zwei oder drei parallelgeschaltete Zellen gebildet, um die Gesamtkapazität der Batterie zu erhöhen. Das Batteriemodul stellt damit eine gekapselte Einheit dar, die dem Batteriepack entnommen werden kann.

Die Modulspannung an den beiden offenen Polen des Batteriemoduls liegt in den meisten Fällen unterhalb der zulässigen Berührspannung (< 60V DC). Ein Batteriepack aus der Renault Zoe besitzt beispielsweise 12 Batteriemodule.

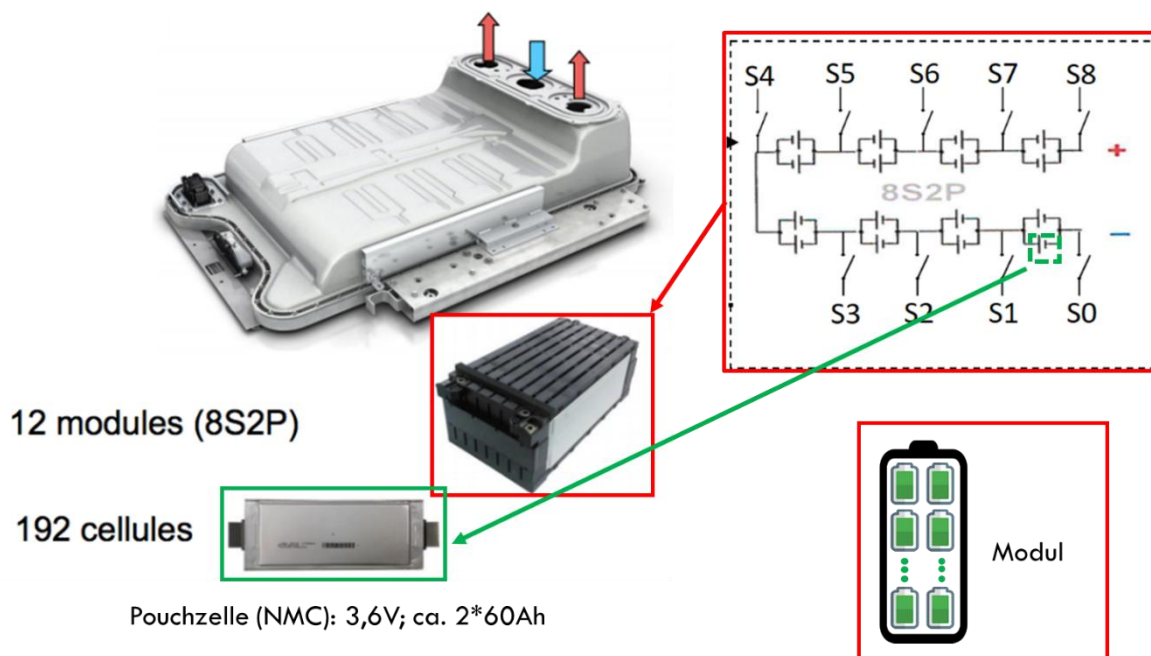


Abbildung 1 Bildliche Erläuterung zu den hier verwendeten Begriffen: Batteriepack, Batteriemodul und Zelleinheit [1]

Als Verbindungstechnik der Zelleinheiten werden in der Automobilindustrie in der Regel Schweißverbindungen eingesetzt. Diese bieten einen sehr guten Übergangswiderstand und stellen eine sehr robuste Interkonnektivität zwischen den Zelleinheiten dar. Dagegen wird durch die Schweißverbindungen der Austausch von defekten Zelleinheiten erheblich erschwert, weil dann bei der Entnahme die Anschlussfahnen der Zelleinheit beschädigt werden.

In Hinblick auf die Nachhaltigkeit wäre deshalb der Austausch des defekten Batteriemoduls die einzig sinnvolle und vor allem kostengünstige Möglichkeit, das gesamte Batteriesystem wieder instand zu setzen.

Dies durch eine oder mehrere fabrikneue Batteriemodule zu realisieren, liegt nahe, birgt jedoch den Nachteil in sich, dass dieses neuwertige Batteriemodul in einem gealterten Batteriesystem nicht sein gesamtes Potential ausschöpfen kann. Durch das unsymmetrische Zusammenspiel von neuen und gealterten Batteriemodulen kann das gesamte Batteriesystem sogar so stark in Mitleidenschaft gezogen werden, dass dieses in der Folge insgesamt schneller degeneriert.

Technisch und wirtschaftlich sinnvoller ist es dagegen, wenn ein Ersatz-Batteriemodule verwendet werde, welche z. B. aus Rückläufern aus einem Leasingvertrag oder beispielsweise aus einem verunfallten Fahrzeug mit gleichem Batterietyp stammen.

Die technische Herausforderung besteht deswegen darin, ein gebrauchtes Modul aus einem Bestand zu identifizieren, das den Qualitätszustand (engl. State of Health, SoH) der anderen Batteriemodule aus dem zu reparierenden Batteriepack entspricht.

In dem Projekt wurde ein erster Demonstrator entwickelt, durch den aussagekräftige messbare Merkmale von einem Batteriemodul gemessen werden können. Die Merkmale werden in einer Datenbank gespeichert und erlauben eine erste Analyse in Hinblick auf die Vergleichbarkeit von Batteriezellen. Neben den klassischen Merkmalen wie den gemessenen Zellspannungen,- temperaturen und -strömen werden in diesem Projekt auch Impedanzspektren der Zelleinheiten erfasst. Letztere weisen auf den generellen Systemstatus der Zelleinheiten hin und können im Rahmen von maschinellen Lernverfahren gewinnbringend zur Qualitätseinschätzung herangezogen werden.

Schlüsselwörter:

Refurbishment von Batteriemodulen, Impedanzspektroskopie, maschinelle Lernverfahren

2 EINLEITUNG

Verkäufer*innen und Käufer*innen von gebrauchten Elektrofahrzeugen stehen nach Ablauf des Garantieanspruches vor der besonderen Problematik, den Restwert des Fahrzeuges richtig einschätzen zu können. Während innerhalb der Garantielaufzeit der Fahrzeughersteller für den Ausfall des Batteriesystems haftet, müssen aktuelle Fahrzeughalter*innen nach Ablauf der Garantie die Kosten dafür selbst tragen.

Ein Ausfall des Batteriesystems liegt vor, wenn:

- Die Restkapazität unter 70-80% des ursprünglichen Wertes liegt (je nach Fahrzeughersteller)
- Das Batteriemodul an einer Zelleinheit ein stark anomales Verhalten aufweist, z. B. durch eine unzulässig hohe Spannungsdifferenz im Vergleich zu allen anderen Zelleinheiten. In diesem Fall liegt ein gefahrbringender Zustand innerhalb des Batteriepacks vor. Das Batteriemanagementsystem des Fahrzeuges verhindert dann die weitere Nutzung des Fahrzeuges.

In den allermeisten Fällen treten Schäden in den Batteriesystemen in einem sehr frühen Stadium der Nutzung auf. Dabei stellt das im Fahrzeug verbaute Batteriemanagementsystem den Ausfall einer Zelleinheit selbstständig fest und weist den Fahrer über eine Fehlermeldung im Fahrerdisplay darauf hin.

Durch die Kooperation mit dem Industriepartner Renault Lüdemann und Sens, der das einzige norddeutsche Batteriereparaturzentrum von Renault unterhält, ist bekannt, dass ca. 1 bis 2% aller Elektrofahrzeuge von einem solchen Ausfall innerhalb der Garantielaufzeit von bis zu acht Jahren betroffen sind. In den seltensten Fällen liegt dabei die Restkapazität bei 70-80% des ursprünglichen Wertes innerhalb der Garantielaufzeit. Dieser Fehlerfall wird vom Halter bemerkt, wenn das Fahrzeug die ursprüngliche Reichweite deutlich unterschreitet. Dabei obliegt es jedoch der Prüfung des Steuergerätes im Fahrzeug, ob der vom Fahrzeug angezeigte sog. State of Health (SoH) unterhalb dieses Grenzwertes liegt. Die Guidelines der Hersteller gelten im Allgemeinen als sehr restriktiv:

Wenn z. B. die Restkapazität innerhalb des ersten Jahres auf einen Werte knapp oberhalb des vom Hersteller definierten Grenzwertes abfällt und dort über mehrere Jahre verweilt, fällt kein Garantieanspruch an, obschon damit dann eine starke Einbuße der Reichweite vorliegt.

Der Reparaturvorgang erfolgt, indem das betroffene Batteriemodul durch ein fabrikneues ausgetauscht wird. In der Regel wird eine solcher Batteriemodultausch innerhalb eines Tages

und kostenfrei vollzogen. Es sei darauf hingewiesen, dass viele Nutzer*innen des Fahrzeuges sich wegen der weiterhin langen Garantielaufzeit von bis zu acht Jahren in einem trügerischen Gefühl der Sicherheit wiegen. Bei potentiellen Gebrauchtwagenkäufern besteht die berechtigte Sorge, dass die Qualität des Batteriesystems nahezu unbekannt ist und bei einem Ausfall sehr hohe Reparaturkosten entstehen.

Von besonderer Bedeutung dabei ist, dass bis zum heutigen Zeitpunkt keine nachhaltige Möglichkeit zur Reparatur existiert, wenn der Ausfall z. B. unmittelbar nach Ablauf der Garantielaufzeit stattfindet.

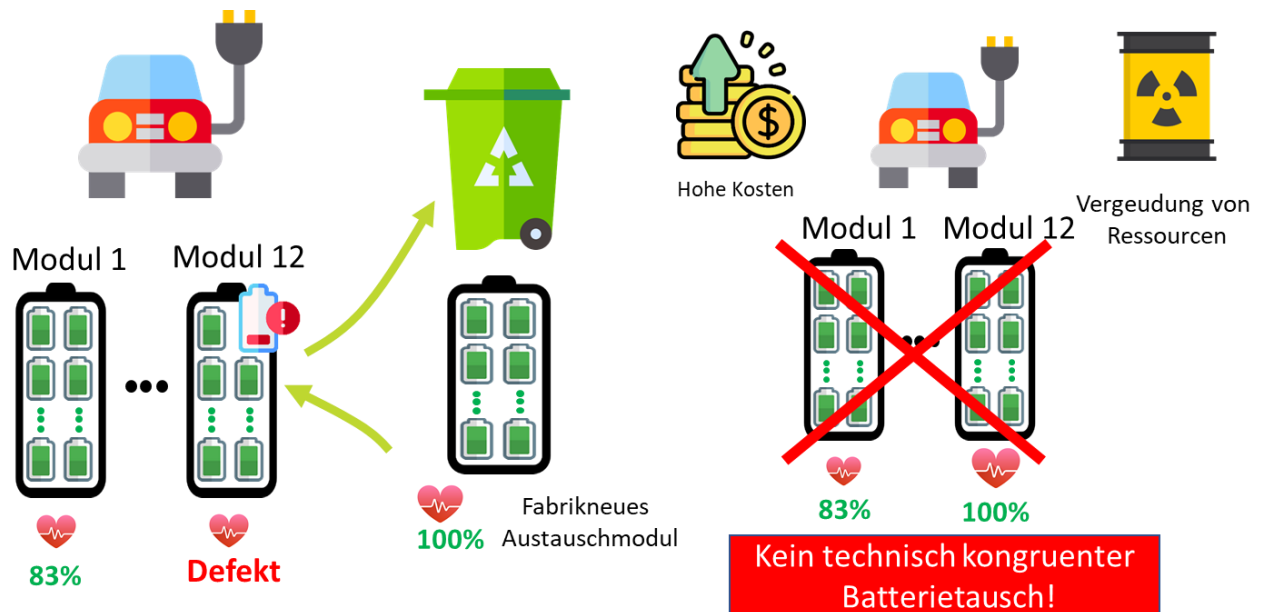


Abbildung 2 Problem der passungsfähigen Reparatur eines gebrauchten Batteriesystems im Falle eines Batteriemoduldefektes

Aus Sicht der Antragsteller werden diese Fälle in der Zukunft von immer größerer Bedeutung sein wie folgende die Abbildung zeigt aus folgenden Gründen:

- Der Einsatz von neuen Batteriemodulen ist in der Regel immer kostspielig.
- Ein fabrikneues Modul stellt nicht die beste technisch kongruente Lösung dar, da gealterte Batteriemodule mit einem neuen Batteriesystem zusammengeführt werden.
- Nach Betriebszeiten mit mehr als acht Jahren ist nicht immer sichergestellt, dass baugleiche Batteriemodule verfügbar sind. (z. B. wegen Abkündigungen)
- Eine nicht vorhandene, nachhaltige sowie ressourcenschonende Reparaturmöglichkeit zerstört das Vertrauen in die Elektromobilität.

- Batteriesysteme können mit einer technisch kongruenten Reparaturlösung über einen weiten Zeitraum selbst bei einem Ausfall eines einzelnen Moduls langlebig gehalten werden.

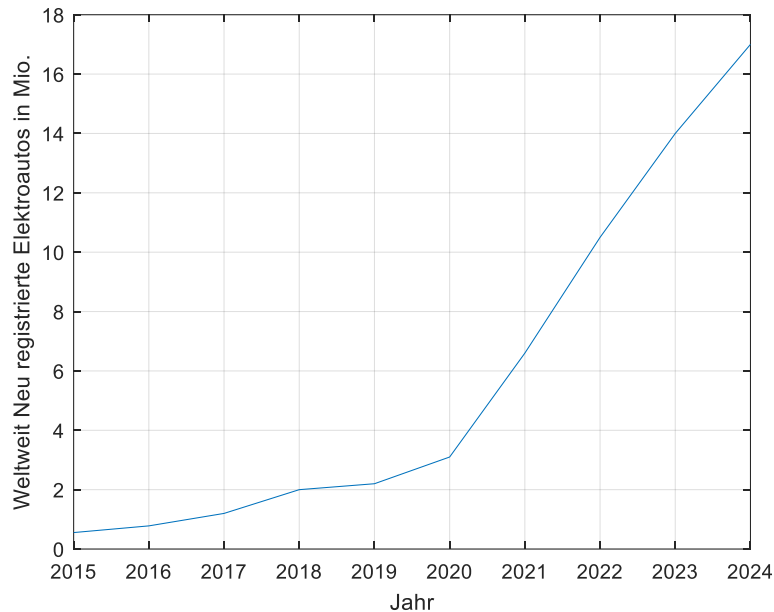


Abbildung 3 Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen bis 2024 (2023, 2024 Schätzungen) [2]

Abbildung 3 zeigt, dass in 2022 bereits 12 Mio. neue Elektrofahrzeuge weltweit registriert worden sind. Ab dem Jahr 2020 steigt die Zahl der Neuzulassungen sehr stark weltweit an, was mit stark sinkenden Preise für die Batterie zu begründen ist. Auch wenn mit ca. 60% der Markt von China dominiert wird, so zeigt sich, dass der Bedarf an reparierfähigen Batteriesystemen in den kommenden Jahren ebenfalls stark wachsen wird.

Mit der steigenden Zahl der neu registrierten Elektrofahrzeugen kann argumentiert werden, dass auch die Anzahl der Reparaturfälle proportional steigen wird.

Die Notwendigkeit einer preisgünstigen Reparaturmöglichkeit für den sog. Zweitwagenmarkt wird daher für die nachhaltige Nutzung von Elektrofahrzeugen eine kritische Bedeutung übernehmen, da dann sehr viele Bestandsfahrzeuge die Garantielaufzeit von ca. 8 Jahren überschritten haben werden.

Es ist deswegen nachvollziehbar, dass die Elektromobilität sich erfolgreich durchsetzen wird, wenn es gelingt, eine ressourcenschonend und kostengünstige Reparaturmöglichkeit zu schaffen. In diesem Fall wird die komplette Wende weg vom Verbrenner hin zu den Elektrofahrzeugen durch die Verbraucher*innen akzeptiert werden.

3 PROJEKTERGEBNISSE

Im ersten Projektjahr konnten bereits die wesentliche Messinstrumente für den Demonstrator eines Diagnosegerätes entwickelt werden (siehe Abbildung 3). Das Diagnosegerät befindet sich zurzeit beim Projektpartner Lüdemann und Sens und wird zur Vermessung der vorhandenen Module genutzt. Die Meilensteine 1 und 2 (alle Hardwarekomponenten sind vorhanden und der Demonstrator befindet sich zu Testzwecken beim Projektpartner) wurden damit frühzeitig erfüllt.

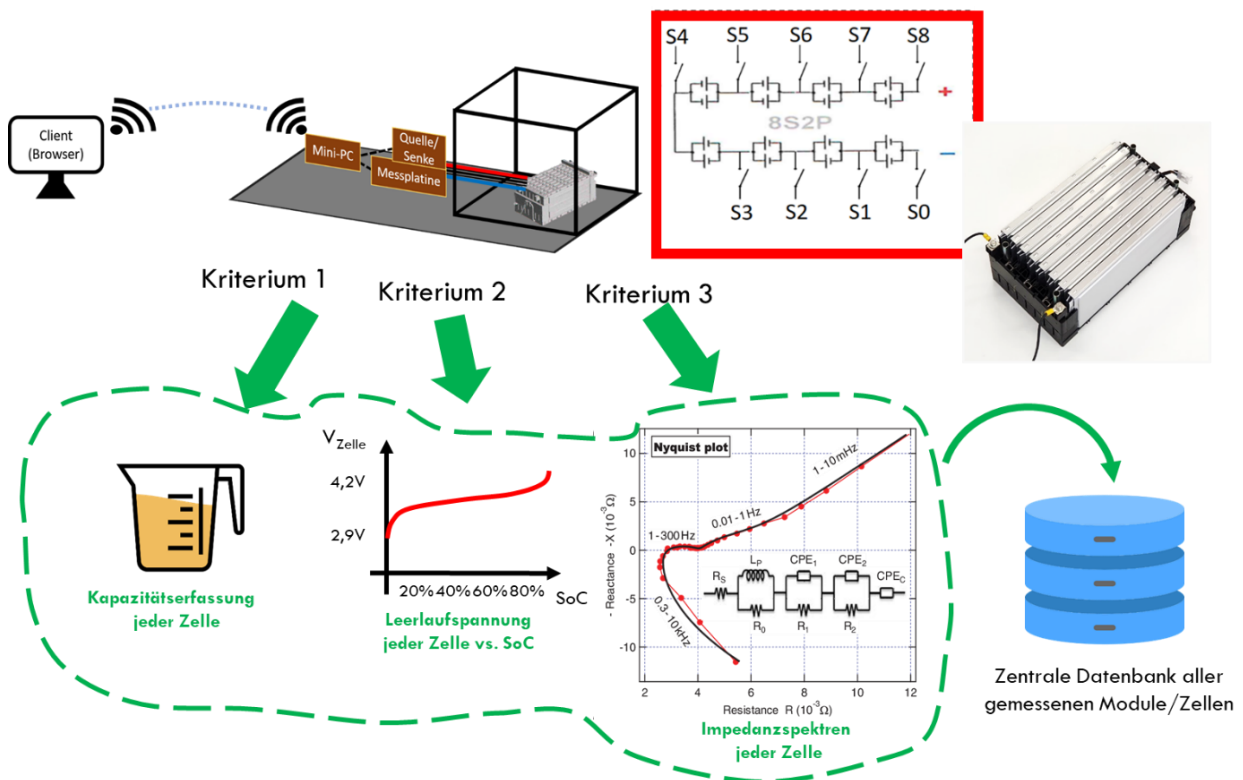


Abbildung 4 Aufbau des entwickelten Demonstrators

Der Prototyp erlaubt die automatische Vermessung von unbekanntem Batteriemodulen des gleichen Typs. Jede Zelleinheit ist über die Schalter S0-S8 (siehe Abbildung 4) mit einer im Diagnosegerät verbauten bidirektional betreibbaren Quelle bzw. Senke kontaktierbar. Auf diese Weise kann das gesamte Batteriemodul zunächst auf 100% des Ladezustandes aufgeladen werden.

Die Idee beruht darauf, dass bei einem Batteriemodul, für das noch kein trainiertes Modell zur Bestimmung des SoH vorliegt, zunächst eine vollständige Exploration in Form einer kompletten Entladung erfolgt. Die dabei notwendigen Schritte sind in dem Gerät so programmiert, dass der Entladevorgang automatisch erfolgt. Lediglich der Batteriemodulwechsel und die Eingabe der Modulparameter zu Beginn der Messung erfolgt durch die Mitarbeiter des Projektpartners. Der im Diagnosegerät enthaltene Stromzähler erfasst die Kapazität jeder einzelnen Zelleinheit in Amperestunden und zusammen mit der Modulspannung auch die entnommene Energiemenge in Wh. Erreicht bei der kompletten Entladung des Batteriemoduls z. B. die erste Zelleinheit ihre Entladeschlussspannung, so wechselt die Schalterstellung S0 und S8 auf diejenige Zelleinheit, welche die höchste Spannungslage besitzt. Besitzt z. B. die achte Zelle die höchste Spannung, so wird die Senke auf durch die Schalterstellung S7 und S8 gezielt solange entladen, bis auch diese ihre Entladeschlussspannung erreicht. In der Folge können durch diese Vorgehensweise alle Zelleinheiten des Batteriemoduls komplett entladen werden. Im Ergebnis erhalten damit alle Zellen einen individuellen Kapazitätswert in Amperestunden [Ah] und Wattstunden [Wh].

Des Weiteren wird während des Entladevorganges der gesamte Spannungsverlauf und an ausgewählten Betriebspunkten das für jede Zelleinheit individuell vorliegende Impedanzspektrum erfasst. Dadurch erhält das gesamte Batteriemodul über den betriebsrelevanten Bereich ein digitales Abbild seines gegenwärtigen Gesundheitszustandes. Alle gemessenen Merkmale werden in einer zentralen Datenbank gespeichert und stehen dann für ein späteres Training mit Hilfe von maschinellen Lernverfahren zur Verfügung.

Das Training wird möglich, wenn eine ausreichende Anzahl von vermessenen Batteriemodulen des gleichen Modultyps vorliegt. Auf diese Weise können dann diese Daten zur Zustandsprognose mittels eines trainierten Modells herangezogen werden. In diesem Fall soll z. B. eine kurze Entladezeit, sowie die Spannungsbeobachtung ein gemessenes Impedanzspektrum ausreichen, um den Zustand des Batteriesystems in Form eines SoH-Wertes bestimmen zu können.

Die Nutzung eines solchen Modells kann dann die langwierigen Messdauern, die für die Kapazitätsmessung erforderlich sind, ablösen. Zur Steuerung und Überwachung des Messfortschrittes wurde des Weiteren ein Webserver entwickelt werden, der auf typischen Endgeräten wie einem Smartphone, Tablet und Laptop aufgerufen werden kann.

Für die Ferndiagnose, den Zugriff auf die Datenbank sowie auch die Steuerung des gesamte Diagnosegerätes konnte ein internetfähiger Zugang implementiert werden, so dass bei Störungen direkt beim Projektpartner von der FH Kiel aus eingegriffen werden kann.

Nach der kompletten Entladung wird das gesamte Batteriemodul wieder auf einen Ladezustand geladen, der sich für die weitere Einlagerung eignet. In der Regel liegt dieser Ladezustand bei 30 % [3]. Dabei wird die bidirektionale Quelle/Senke ähnlich wie beim Entladen dazu genutzt, zunächst das gesamte Batteriemodul aufzuladen. Erreicht eine der Zelleinheiten die gewünschte Spannung, werden in der Folge alle weiteren Zelleinheiten separat geladen, bis das gesamte Modul gebalanced ist.

In der gesamten Projektlaufzeit sind über 80 Module von der Renault Zoe der 2. Generation vermessen worden. Diese Zahl reichte aus, um mit dem Training von maschinellen Lernverfahren aussagekräftige Modelle zur SoH-Schätzung zu generieren.

Bei überwachten Lernverfahren wird immer zwischen den Eingangsmerkmalen (Inputs) und den Zielgrößen (Targets) unterschieden. Die folgende Tabelle zeigt in übersichtlicher Weise, die Anordnung der Input- und Targetdaten in der bereits vorhandenen zentralen Datenbank:

Tabelle 1 Anordnung der Eingangsmerkmale (Inputs) und Ausgangsmerkmale (Targets)

Nr.	Eingangsmerkmale				Targetwerte	
	VCell	TCell	Last ZCell	Maximale/Minimale Spannungsabweichung vom Median im Batteriemodul	Vorliegende Energiemenge in kWh	Calculated SoH-Score
1	4,2V	30°C	25 Real- und Imaginärwerte	-0,015V	4,0kWh	100%
2	4,15V	28,7°C	25 Real- und Imaginärwerte	+0,011V	3,8kWh	95%
:	:	:	:	:	:	:
N	3,0V	31,5°C	25 Real- und Imaginärwerte	+0,050V	3,6kWh	90%

Das Modell soll in Form eines künstlichen neuronalen Netzes aufgebaut werden, das mit Hilfe der messbaren Merkmale die Zielgrößen schätzen kann.

$$f(V_{Cell}, I_{Cell}, T_{Cell}, Z_{Cell}, \Delta U_{max,min}) = [E(Ah), SoH Score] \quad (1)$$

Da für jede Zelleinheit ein eigener Datensatz erfasst werden kann, ist es im Prinzip auch möglich, für jede Zelleinheit einen Energie-Kapazitätswert und einen SoH-Score zu schätzen.

Für den Austausch sind dabei nur diejenigen Zelleinheiten geeignet, die bezüglich des Kapazitätswertes einen ausreichend hohen SoH-Wert über 80% aufweisen.

Der SoH-Wert ist dabei eine Größe, die im Wesentlichen auf der maximalen/minimalen Spannungsabweichung vom Median aller im Modul gemessenen Spannungen und Impedanzspektren beruht.

In Abbildung 5 werden exemplarisch zwei Impedanzspektren von unterschiedlich gealterten Batteriemodulen gegenübergestellt. Bemerkenswert ist dabei, dass sowohl die Realanteile als auch Imaginärteile unterhalb von einem Millivolt pro Ampere liegen.

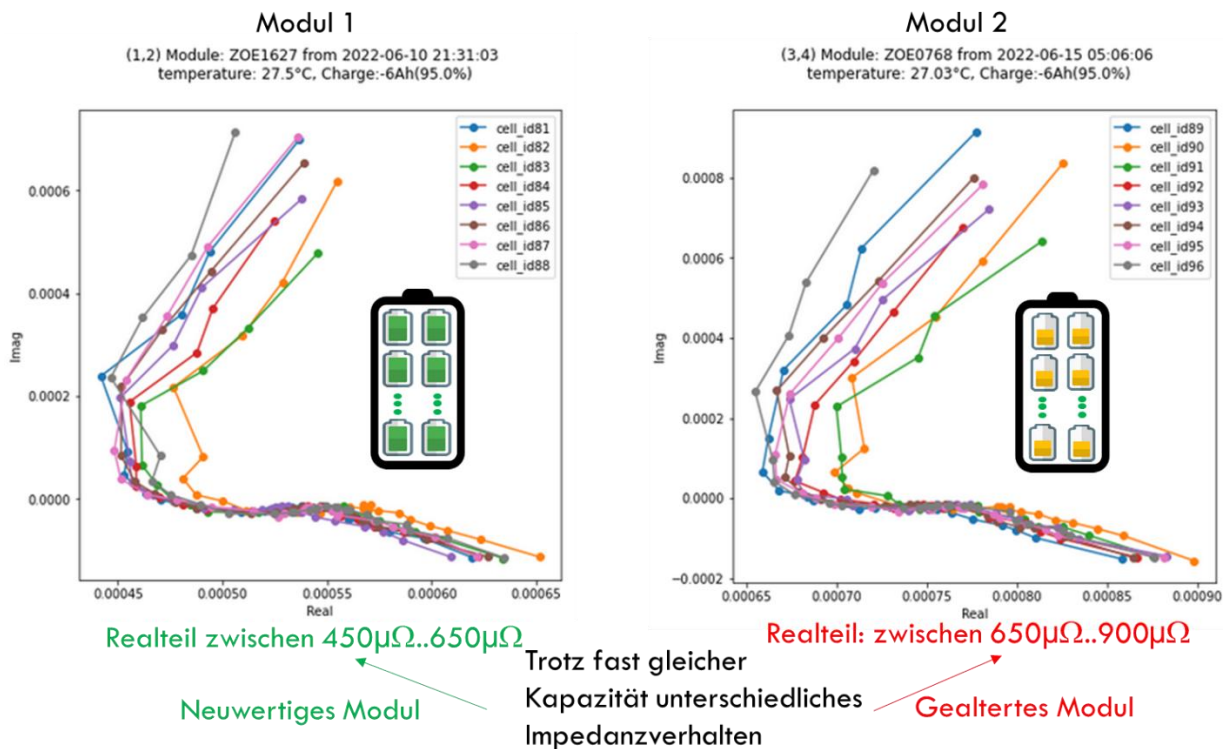


Abbildung 5 Impedanzspektren aller Zelleinheiten zweier unterschiedlich gealterter Batteriemodule

Beide Batteriemodule hatten im Test unterschiedliche Kapazitätswerte aufgewiesen. Abbildung 5 zeigt des Weiteren, dass auch bei den Impedanzspektren Unterschiede in diesem Beispiel von mehr als 50% vorliegen können. Damit zeigt sich, dass eine schwindende Kapazität mit einer Änderung des Impedanzverhaltens einhergeht.

Darüber hinaus wird auch deutlich, dass zur kompletten Batteriemodulbewertung verschiedene Merkmale in Betracht gezogen werden müssen [3].

Durch die Bewilligung des Projektes konnten wichtige Forschungsarbeiten zur automatisierten Bewertung von Batteriemodulen von Elektrofahrzeugen bereits in 2022 erfolgreich umgesetzt werden.



Abbildung 6 Fertiggestellter Demonstrator des Diagnosegerätes

Das entstandene Diagnosegerät wurde beim Projektpartner erfolgreich in Betrieb genommen.

Für das zweite Projektjahr wurde die Messkampagne zu Ende geführt und die Merkmale sowie die Zielgröße für das maschinelle Lernverfahren geeignet festgelegt. Im Weiteren ging es auch um die Optimierung der erforderlichen Messzeit zur KI-gestützten Analyse.

Das in diesem Projekt entwickelte Diagnosegerät kann aufgrund der vorhandenen Fähigkeit zur Messung von Impedanzspektren zur Bewertung der modifizierten Übergangswiderstände eingesetzt werden.

3.1 Geänderter Hardwareaufbau des Diagnosesystems

Bei der Erfassung von zellindividuellen Impedanzspektren innerhalb eines Moduls steht man vor der großen Herausforderung, sehr kleine und damit störbehaftete Messgrößen hochgenau erfassen zu müssen. Darüber hinaus sind in einem Modul mehrere Zellen miteinander parallel und in Reihe verschaltet. Da das relevante Spektrum bei wenigen Millihertz beginnt, kann die gesamte Messung mehrere Minuten dauern. Aus diesem Grund wird mittels einer Stromquelle ein multisinusförmiger Strom mit ausreichender Amplitude in den Pluspol des Batteriemoduls eingeprägt und die Spannungsantworten der einzelnen Zellen mit einem schnell abtastenden Analog zu Digitalwandler quasi-simultan gemessen. Auf diese Weise gelingt vor allem bei sehr kleinen Frequenzen ein enormer Zeitvorteil, weil die Periodendauern der Signalanregung dort im Minutenbereich liegt. Bei einem Modul mit 8 Zelleinheiten ist die Messdauer nur von der Länge der Periodendauer des Stromanregungssignal abhängig.

Es hat sich herausgestellt, dass es bei angeregten Frequenzen größer als 15 Hz zu kapazitiven Wechselwirkungen zwischen jeweils zwei benachbarten Zelleneinheiten kommt, wenn diese vom selben Strom durchflossen werden. Der Grund liegt in der flächigen Ausführung von Pouch-Zellen, die miteinander wechselwirken, indem sie untereinander parasitäre Kapazitäten aufbauen. Bei hohen Frequenzen führen diese parasitären Kapazitäten zu einer Verfälschung der Ergebnisse im Impedanzspektrum.

Aus diesem Grund ist der Aufbau von 2022 noch einmal grundlegend verändert und ein sog. Relaisboard integriert worden. Das Relaisboard hat die Aufgabe die Anregungsquelle ab Frequenzen größer 15 Hz sequentiell auf jede einzelne Zelle des Moduls zu schalten. Auf diese Weise wird dann nur eine einzelne Zelle mit dem multisinusförmigen Strom beaufschlagt, so dass die kapazitive Wechselwirkung zwischen den benachbarten Zellen nahezu unterbunden werden kann.

Der damit verbundene Nachteil einer Vervielfachung der notwendigen Messzeit relativiert sich, da ab 15Hz die Messdauer pro Zelle so kurz ist, dass selbst eine Verachtfachung der Messzeit (Es befinden sich acht Zellen im Batteriemodul) in Bezug auf die gesamte Messzeit des Spektrums nicht mehr stark ins Gewicht fällt. Die gesamte Messzeit eines Impedanzscans kann auf diese Weise innerhalb von 180 Sekunden durchgeführt werden. Das erfasste Spektrum liegt zwischen 25 mHz und 1,5 kHz und ist über 25 logarithmisch verteilte Frequenzstützstellen verteilt.

3.2 Finalisierung der Merkmale zur Schätzung des SoH-Wertes

Ein Batteriesystem in einem Elektrofahrzeug gilt als „gesund“ bzw. einsetzbar, wenn es einen SoH-Wert zwischen 70 % und 100 % besitzt. Die Definition des SoH-Wertes ist in der Literatur nicht immer eindeutig definiert.

In Bezug auf Elektrofahrzeuge haben sich daher Testverfahren etabliert, welche den gespeicherten Energieinhalt eines Batteriesystems anhand von einem Fahrspiel bemessen und diesen als auf den SoH-Wert beziehen. Wenn eine Batteriekapazität einen Neuwert von 41 kWh aufweist, so bezieht sich der SoH-Wert in Prozent auf dieses Fahrspiel und Energiemenge.

Exemplarisch sei hier der WLTP-Klasse-3-Zyklus erwähnt, dessen Leistungsdaten der folgenden Abbildung zu entnehmen ist. Dieser Zyklus bildet insgesamt vier Phasen einer typischen Autofahrt innerhalb der Zykluszeit von 30 min ab. Dabei werden typische Fahrtszenarien (Stadt-, Land-, Bundesstraßen- und Autobahnfahrten) emuliert. Es ist zu erkennen, dass die Spitzenleistung der Batterie bei ca. 45 kW liegt. Das Diagnosegerät ist in der Lage die Leistungsanforderungen gemäß dem in Abbildung 7 gezeigten Leistungsprofil auf ein Modul zu übertragen. Bei 12 Modulen beträgt demnach die Spitzenleistung eines Batteriemoduls 3,75 kW bei einer Nennspannung von 30 V.

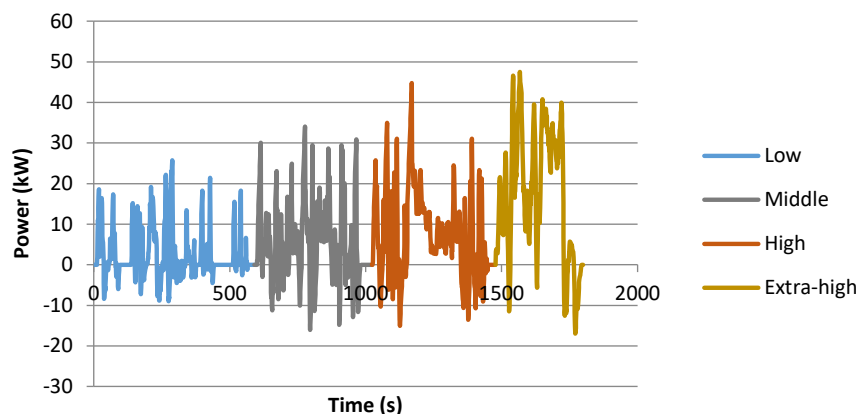


Abbildung 7 Fahrzyklus gemäß WLTP-Klasse 3 eines Zoe 2. Generation

Vorteil dieser Energiemessung ist, dass die Energieentnahme bei unterschiedlichen elektrischen Leistungen aus der Batterie entnommen wird. Auf diese Weise wird der SoH auch bei unterschiedlichen Strömen ermittelt, die einer realen Nutzung der Batterie am ehesten entsprechen. Ein kompletter Zyklus dauert 1800 Sekunden und führt zu einer Entladung der Batterie von ca. 3,5 kWh (für ein Modul entsprechend $3,5 \text{ kWh}/12=291 \text{ Wh}$). Um einen repräsentativen SoH-Wert für ein Modul zu erhalten ist es erforderlich, dass das Modul mit

einem Zwölftel der in Abbildung 7 dargestellten Leistung zu entladen wird, da typischerweise 12 Module in einem Batteriepack enthalten sind. Dazu wird der WLTP-Zyklus solange wiederholt, bis, eine Zelle des Moduls ihre Entladeschlussspannung erreicht hat. Das Modul ist dann entladen. Aufgrund der realistischen Fahrweise kommt es während der Fahrt auch zu rekuperativ wirkenden Leistungsdaten, d. h. die Batterie wird dann für wenige Sekunden auch wieder geladen. Aufgrund dieses Fahrspiels erfordert die Erfassung des gesamten Energieinhaltes eines Moduls eine sehr langwierige Messzeit von mehreren Stunden.

Das im Rahmen des Projektes entwickelte Gerät verfügt über eine bidirektional betreibbare Quelle, mit der sowohl positive (Entlade-) als auch negative (Lade-) Leistungen entnommen bzw. zugeführt werden können.

Auf diese Weise ist es möglich, den exakten SoH-Wert des WLTP-Zyklus von vorliegenden Modulen zu erfassen.

Aufgrund des automatisierten Massablaufs ist der personelle Aufwand zur Erfassung des tatsächlichen vorhandenen Energieinhaltes nahezu minimal.

Es ist unschwer zu erkennen, dass die Entladung gemäß dem WLTP-Klasse 3 Zyklus im Sinne der gewählten Definition zwar exakt ist, jedoch eine sehr lange Messzeit nach sich zieht. Aus diesem Grund wurden durch das Diagnosesystem weitere messbare Zustandsgrößen während der Entladung erfasst, die sich innerhalb weniger Minuten messen lassen. Diese im Entladevorgang integrierte Messprozedur soll in Zukunft auch angewendet, um bei Modulen den SoH-Wert schätzen zu können.

Das Ziel der Messkampagne besteht nun darin, nach jedem Durchlauf eines WLTP-Klasse 3 Zyklus die zellindividuellen Impedanzspektren zu erfassen und weitere Merkmale wie die Leerlaufspannung in die Modultemperatur zu erfassen. Diesen bilden einen Merkmalsdatensatz, welcher für das KI-basierte Modell genutzt werden sollen.

Abbildung 8 stellt hierzu den gesamten Messablauf der kontrollierten Entladung eines untersuchten Batteriemoduls dar.

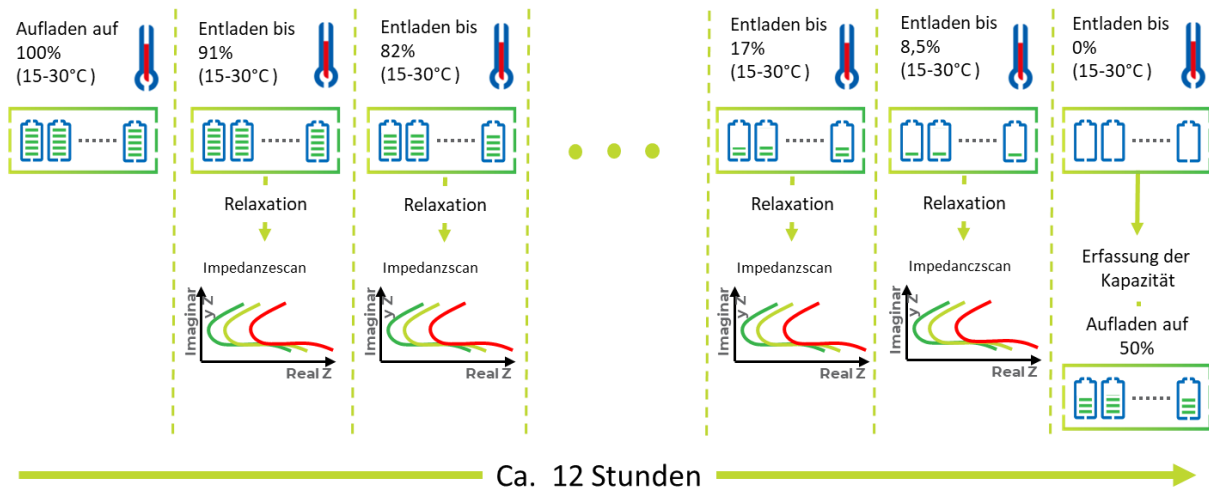


Abbildung 8 Darstellung des Messablaufs zur Erfassung von realen SoH-Werte von unterschiedlich gealterten Modulen eines Batterietyps

Der Entladezyklus wird ausgehend von einem vollgeladenen Zustand des Moduls nach einem kompletten WLTP-Zyklus unterbrochen. Es folgt dann eine Relaxationsphase, deren Ende vorliegt, wenn sich die Zellspannungswerte für 3 min nicht mehr als 1 mV verändern. Danach wird die Messung der Leerlaufspannung „VCell_Leerlauf“ sowie des Impedanzspektrums aller Zellen innerhalb des Moduls durchgeführt. Des Weiteren wird erfasst, in wieweit die Zellspannungsniveaus während des Entladezyklus gegenüber dem jeweiligen Medianwert nach einem definierten Stromentladepuls abgewichen sind.

Für das spätere Training werden nicht alle Daten von jeder Zelle in den Trainingsdatensatz verwendet, sondern nur die jeweiligen gemessenen Median-Werte der Leerlaufspannung und des Impedanzspektrums. Der Grund hierfür ist, dass bei einem Modul mit intakten Zellen das Verhalten einer einzelnen Zelle gegenüber den anderen zwar ähnlich, aber natürlich nicht gleich ist.

Um das Messrauschen zu minimieren, wurde daher der Medianwert der Leerlaufspannung und die Medianwerte der Impedanzspektren verwendet. Wenn ein Modul bzgl. einer Zelle eine zu große Abweichung aufwies (>20% vom Medianwertes), so kann im Allgemeinen von einer Anomalie gesprochen werden. Eine solche Zelle gilt dann als defekt. Daher werden die Daten eines solchen Moduls nicht für ein weiteres Training verwendet. Näheres zu der Detektion von defekten Modulen wird in Abschnitt 3.4 erläutert,

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. zeigt die Anordnung der ausgewählten Eingangsmerkmale sowie die dazugehörige Zielgröße (SoH-Score) des Testlaufs.

Tabelle 2 Verbesserte Anordnung der Eingangsmerkmale (Inputs) und Ausgangsmerkmale (Targets)

N r.	Eingangsmerkmale				Targetwerte
	VCell_ Leerlauf Median	Z_Median	T_Modul	Maximale/Minimale Spannungsabweichung vom Median im Batteriemodul nach definiertem Entladestrom	SoH-Score
1	4,2V	25 Real- und Imaginärwerte	20°C	-0,015V	100%
2	4,15V	25 Real- und Imaginärwerte	19°C	+0,011V	95%
:	:	:	:	:	:
N	3,0V	25 Real- und Imaginärwerte	23°C	+0,050V	90%

Dadurch wird eine Datenbank befüllt, die sich mit jedem gemessenen Modul um ca. zehn weitere Einträge erweitert. Die zehn neuen Einträge resultieren daraus, dass das Modul an zehn bekannten Ladezuständen (SoC) spektroskopiert wurde.

Diese Einträge werden in ausreichender Zahl benötigt, um einen Funktionsbezug zwischen den Merkmalen und der Schätzgröße (hier den SoH) mittels eines KI-Modells herzustellen.

$$f(V_{Zelle_Leerlauf}, Z_{Median}, T_{Modul}) = [SoH\ Score \rightarrow\ Gespeichert\ Energie] \quad (1)$$

Zur übersichtlichen Darstellung sind in Abbildung 9 zwei gemessene Impedanzspektren jeweils für einen Ladezustand von SoC=80 % dargestellt worden, die von einem neuen und einem stark gealterten Modul stammen.

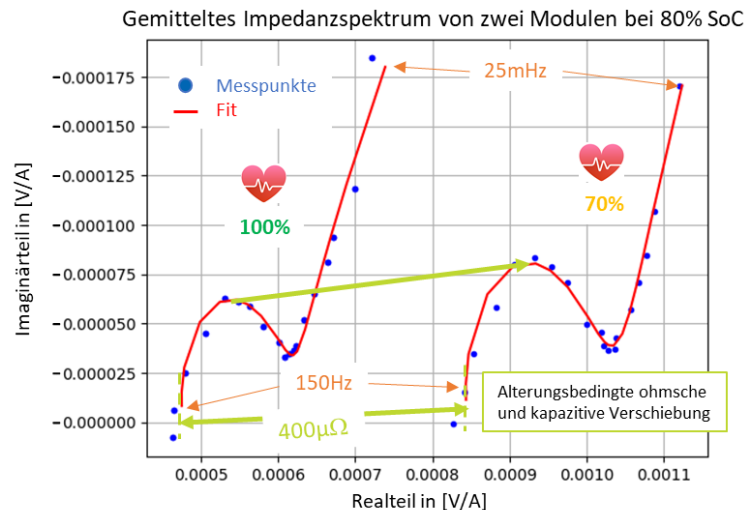


Abbildung 9 Exemplarische Gegenüberstellung von Impedanzspektrern anhand eines neuwertigen und stark gealterten Moduls bei 80% des Ladezustandes

Klar zu erkennen ist, dass das Spektrum des neuen Moduls sowohl im Realteil als auch Imaginärteil wesentlich kleinere Werte aufweist als das stark gealterte Modul. Bei Messungen von weiteren Modulen konnte bestätigt werden, dass die zugrundeliegenden Mediane der Module beim gleichen Ladezustand zwischen den beiden Kurven in Abbildung 9 liegen. Des Weiteren wird erkennbar, dass ein maschinell trainiertes Netzwerk dazu prädestiniert ist, die Regressionsfunktion des SoH auf Basis eines repräsentativen Trainingsdatensatz bereitzustellen.

Da die Messung eines Spektrums sowie der weiteren Merkmale aus **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** nach Abschnitt 3.1 nach 180 Sekunden (3 min) vollzogen werden kann, kann die Beurteilung des SoH ebenfalls bereits nach 3 min erfolgen. Der besondere Vorteil des Verfahrens liegt nun darin, dass durch die KI der SoH-Wert zuverlässig geschätzt werden kann, ohne dass die in Abschnitt 3.2 beschriebene und Abbildung 8 gezeigte Messprozedur erfolgen muss. Das KI-Modell kann als sog. neuronales Netz sehr schnell zur Ausführung gebracht werden, so dass die eigentliche Analyse des Moduls anhand der erfassten Merkmale innerhalb von Sekunden möglich ist

3.3 Training und Test des SoH-Modells

Die Messkampagne wurde an insgesamt 80 Modulen vollzogen. Die 80 Module wiesen gemäß dem in Abschnitt 3.2 dargestellten Entladezyklus SoH-Werte zwischen 80 % und 100 % auf.

Dies unterstreicht, dass trotz des hohen Alters der Module von zum Teil mehr als 10 Jahren bei den allermeisten Modulen ein noch sehr guter SoH-Wert vorliegt. Die Module, die einen SoH zwischen 80 % und 100 % aufweisen, werden als intakt bezeichnet und erfüllen die Anforderungen, weiterhin als Traktionsbatterien in Elektrofahrzeugen eingesetzt zu werden.

Durch die insgesamt 10-12 Datensätze pro Modul sind damit ca. 850 Merkmalsdatensätze entstanden. Der Temperaturbereich belief sich zwischen 15 °C und 30 °C während der Messdatenaufnahme.

Für das Training wurden ca. 80 % der Merkmalsdatensätze verwendet. Ca. 20 % der Merkmalsdatensätze wurde genutzt, um die Zuverlässigkeit des Modells zu prüfen. Die Testdaten wurden von einer Gruppe von Modulen entnommen, die nicht zum Trainieren des Modells verwendet wurden. Auf diese Weise können diese Testdaten für das Modell als vollkommen „unbekannt“ bezeichnet werden.

Als bester Datensatz wurden für das Training folgende Eingangsmerkmale ausgewählt. Diese sind:

- 25 Realteile des Median-Spektrums (das entspricht dem Spektrum zwischen 25 mHz bis 150 Hz)
- 25 Imaginärteile des Median-Spektrums (das entspricht dem Spektrum zwischen 25 mHz bis 150 Hz)
- Der vorliegende Median der Leerlaufspannung aller Zellen
- Die maximale Spannungsdifferenz nach einem definierten Strompuls
- Die Modultemperatur
- Als Netzwerk wurde Künstlich Neuronales Netz mit zwei verborgenen Layern mit jeweils 15 Neuronen verwendet. Als Aktivierung wurde die „Relu-Funktion“ (Rectified Linear Unit) gewählt.

Das Training wurde mit insgesamt rund 700 Datensätzen vollzogen. Die Einstellung der Hyperparameter erfolgte empirisch, bis sich das zurzeit das erreichte Optimum vorlag.

```

Model training finished.
Train RMSE: 0.813
Evaluating model performance...
Test RMSE: 0.758
Predicted: 100.5 - Actual: 99.76148223876953 - Error: 0.7385177612304688
Predicted: 73.2 - Actual: 72.47394561767578 - Error: 0.7260513305664062
Predicted: 74.9 - Actual: 74.3338394165039 - Error: 0.566162109375
Predicted: 100.2 - Actual: 99.72132110595703 - Error: 0.47867584228515625
Predicted: 100.1 - Actual: 99.31405639648438 - Error: 0.7859420776367188
Predicted: 74.4 - Actual: 73.36457061767578 - Error: 1.035430908203125
Predicted: 81.5 - Actual: 81.73172760009766 - Error: -0.23172760009765625
Predicted: 95.6 - Actual: 95.01476287841797 - Error: 0.585235595703125
Predicted: 90.6 - Actual: 90.10553741455078 - Error: 0.4944610595703125
Predicted: 99.0 - Actual: 98.30848693847656 - Error: 0.6915130615234375
Predicted: 98.0 - Actual: 97.2882080078125 - Error: 0.7117919921875
Predicted: 93.2 - Actual: 93.35529327392578 - Error: -0.15529632568359375
Predicted: 77.2 - Actual: 77.74217224121094 - Error: -0.54217529296875
Predicted: 72.7 - Actual: 71.35551452636719 - Error: 1.344482421875
Predicted: 83.7 - Actual: 83.63605499267578 - Error: 0.06394195556640625

```

Abbildung 10 Trainingsergebnis mit 15 Testdaten. Predicted bedeutet: SoH-Wert-Schätzung durch das Künstliche neuronale Netz, Actual bedeutet: Der korrekte (gemessene) SoH-Wert

Die Ergebnisse eines typischen Trainings zeigen, dass das Netzwerk den SoH-Wert mit einer sehr hohen Genauigkeit (Fehler der Testdaten liegen zwischen -0,23 und 1,34%) schätzen kann. Der Root-Mean-Square-Error liegt sowohl bei den Trainingsdaten bei 0,81% als auch bei den Testdaten bei 0,76% in einem vergleichbaren Bereich, der als sehr gut zu bewerten ist. Des Weiteren zeigt das Ergebnis der Testkampagne, dass das Model für gänzlich unbekannte Batteriemodule eingesetzt werden kann.

Der in Abbildung 10 dargestellte Verlauf des Ergebnisses für die Testdaten, weist die Schätzung („Predicted“) des SoH aufgrund der in Tabelle 2 ausgewählten Merkmale aus. Mit „Actual“ werden der tatsächlich erfasste SoH-Wert anhand der in Abbildung 8 gezeigten Messung gegenübergestellt, der durch nur durch eine sehr lange Messzeit von ca. 12 Stunden gewonnen werden kann. Die Leistungsfähigkeit des Modells wurde anhand von unterschiedlichen Auswahlgruppen von Trainings und Testmodulen wiederholt. In allen Modeltrainings konnten ähnliche Genauigkeiten anhand der Testdaten bestätigt werden.

3.4 Diskussion der Einsatzfähigkeit von KI basierten Analyseverfahren für die Erfassung des SoH von Batteriemodulen beim Modullieferanten

KI-Verfahren stellen immer Modelle dar, bei denen eine Restwahrscheinlichkeit besteht, dass diese in sehr wenigen Einzelfällen vom wahren zu bestimmenden Zustand abweichen. Die in Abschnitt 3.3 dargestellte Präzision des Modell wurde anhand von einer Statistik ermittelt, die sich ausschließlich auf intakte Module bezieht. In diesem Abschnitt soll deswegen die Einsatzfähigkeit des KI-basierten Modells in der Praxis diskutiert werden:

Zur Bewertung des SoH der Batteriemodule wurde der Median aller gleichzeitig gemessenen Impedanzen der Zelleinheiten analysiert.

Der Grund hierfür liegt in folgender aufbaubedingten Situation:

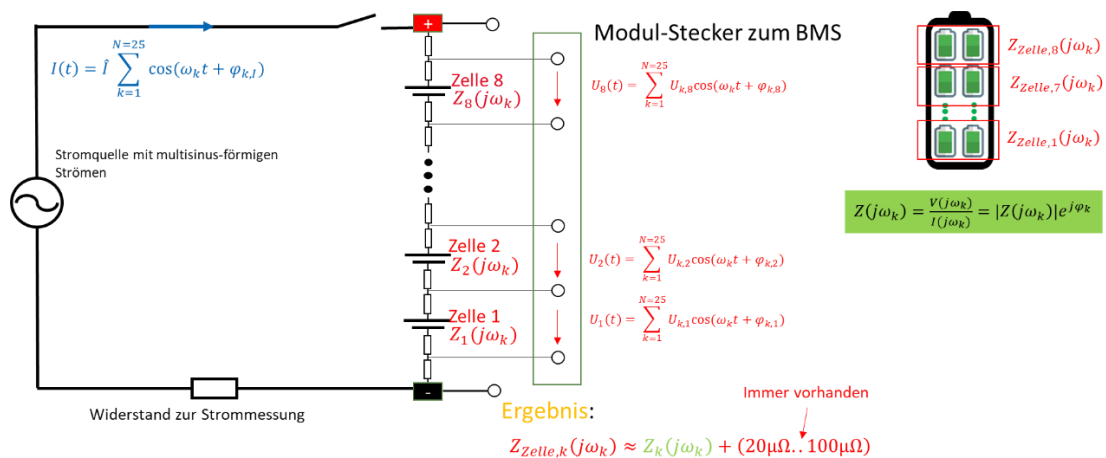


Abbildung 11 Erfassung der individuellen Impedanzspektren jeder Zelleinheit innerhalb eines Batteriemoduls

Die Stromeinprägung des frequenzabhängigen Stroms erfolgt über die zugänglichen Schraubkontakte des Plus- und Minuspols des Batteriemoduls. Der frequenzabhängige Strom wird anhand einer multisinusförmigen Anregung durch die Serienschaltung aller Zelleinheiten eingepreßt. Über den Modulstecker lassen sich auf diese Weise die Zellspannungsantworten der Zelleinheiten messen. Diese Messung erfolgt in Form einer Vierpunktmessung. Dennoch lassen sich aufbaubedingte Einflüsse wie zum Beispiel Kontaktübergangswiderstände innerhalb des Module nicht vollständig eliminieren. Die Folge ist, dass es bei einer Impedanzmessung eines Batteriemoduls zu einer gewissen Streuung der Impedanzkurven von den Zelleinheiten kommt.

Zur Verdeutlichung des Sachverhaltes dient Abbildung 12. Darin zu erkennen sind die komplexen Impedanzspektren aller acht gemessenen Zelleinheiten sowie deren Median. Anhand der Achsenskalierung ist zu nachzuvollziehen, dass die Impedanzwerte deutlich unter einem Millivolt pro Ampere liegen. Eine Schweißverbindung zwischen zwei Zellen weist einen Übergangswiderstand typischerweise von einigen 10..100 $\mu\Omega$ auf. Dies erklärt, dass die

Zelleinheiten auf der reellen Achse mit diesem Wertbereich streuen. Da der SoH eine Regressionsgröße ist und das Modelltraining eine Aussagefähigkeit im Prozentbereich ermöglichen soll, macht die Nutzung der Mediankurve als ausgewähltes Merkmal Sinn, die als repräsentatives Merkmal für das gesamte Batteriemodul herangezogen werden soll.

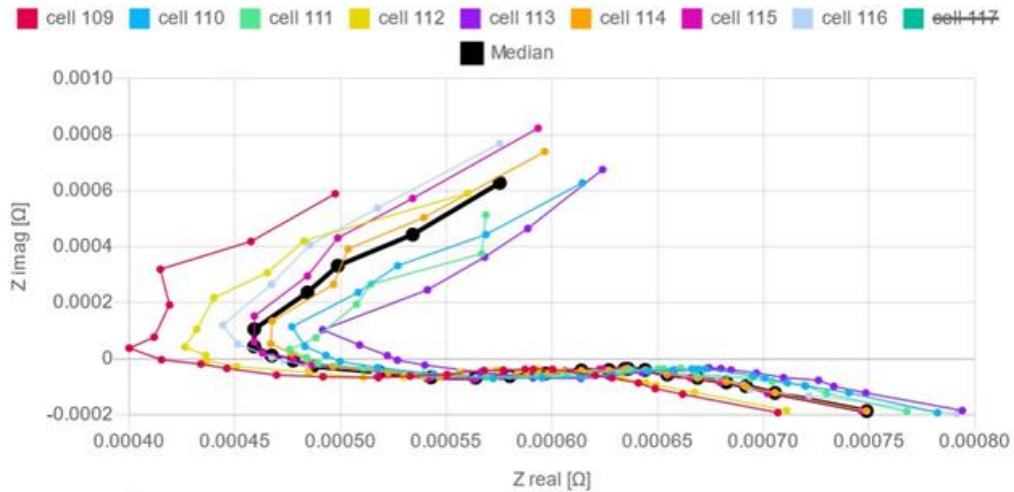


Abbildung 12 Typisches Impedanzspektrum von 8 Zelleinheiten eines Batteriemoduls mit Mediankurve

Dennoch kann die zunehmende Alterung der Zelleinheiten bedingen, dass eine oder mehrere Zellen sich gegenüber den übrigen Zelleinheiten divers präsentieren. Im Extremfall weisen stark beschädigte Zellen eine starke Abweichung auf, wie sich diese in Abbildung 13 als Anomalie gegenüber den anderen Impedanzspektren durch direkten Vergleich detektieren lässt.

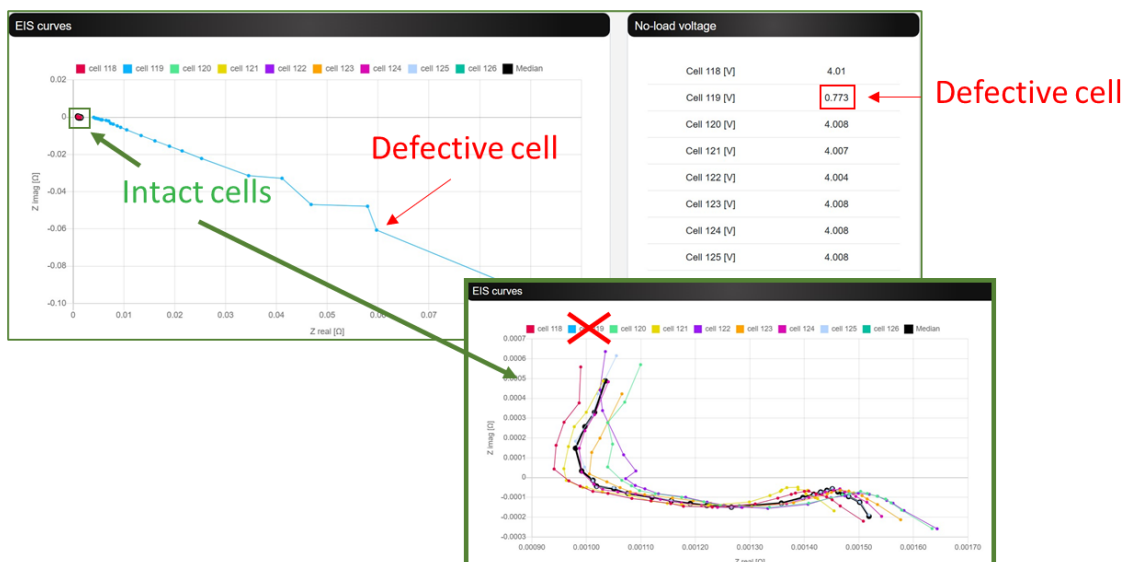


Abbildung 13 Anomalie im gemessenen Impedanzspektrum einer Zelleinheit (hier Zelle 119) gegenüber den anderen Zelleinheiten

Abbildung 12 zeigt noch mal, dass neben der generellen SoH-Bestimmung auch die Impedanzspektren aller im Batteriemodul befindlichen Zelleinheiten für die Bewertung der SoH-Qualität herangezogen werden müssen.

Neben der generellen Alterung von Modulen existieren noch weitere Schädigungsmechanismen, die nicht allein durch eine Impedanzmessung detektiert werden können. Diese treten auf, wenn es innerhalb der Batteriezellen zu einem sog. Dendritenwachstum kommt.

In einer Lithium-Ionen-Zelle bezeichnet ein Dendrit eine astähnliche Kristallstruktur, die sich an der Anode (negativen Elektrode) bildet. Diese Dendriten entstehen, wenn Lithium-Ionen während des Ladevorgangs nicht gleichmäßig über die Oberfläche der Anode verteilt werden. Stattdessen sammeln sich Lithium-Ionen an bestimmten Stellen und bilden diese kristallartigen Auswüchse.

Das Wachstum von Dendriten kann gefährlich sein, da sie die Separatormembran durchstoßen und einen Kurzschluss verursachen können, was zu einer Zerstörung der Batterie oder sogar zu einem Brand führen kann. Forscher arbeiten daran, Methoden zu entwickeln, um die Bildung von Dendriten zu verhindern und die Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien zu verbessern. Dennoch gehört das Dendritenwachstum bis zum heutigen Tage zu einer der wichtigsten Gefahrenquellen, die zu einem sog. Thermischen Runaway führen können.

Große Kurzschlussströme können zu einer Erwärmung führen, die dann die betroffene Zelle in einen Brand versetzen. Aufgrund der Reaktionseigenschaften des Elektrolyten sind Zellbrände in der Regel nicht löschbar und führen dazu, dass der Lithiumbrand weitere benachbarte Zellen in Brand versetzen und damit das gesamte Batteriesystem zerstört wird.

In der Regel bildet sich dieser Kurzschluss nicht schlagartig aus, sondern beginnt schleichend und führt dazu, dass die Zellen nur an einzelnen Stellen innerhalb der Separatormembran punktuell beschädigt werden.

Die Auswirkung eines zunächst schwach ausgeprägten Dendritenwachstums innerhalb der Lithium-Ionen-Zelle kann man am besten mit einem hochohmigen Widerstand vergleichen, der parallel zu den Zellelektroden geschaltet wird. Dieser Widerstand führt zu einem permanenten, langsamen Entladevorgang an der betroffenen Zelle.

Durch eine Impedanzspektroskopiemessung kann dieses Phänomen nicht erkannt werden, da eine Parallelschaltung eines sehr hohen Widerstandes mit einer sehr kleinen Impedanz von wenigen Millivolt pro Ampere nahezu das gleiche Impedanzverhalten der sehr kleinen Impedanz aufweist.

Aus diesem Grund muss vor jeder Messung zunächst überprüft werden, ob nach einem längeren Lagerungszustand alle Zellspannungsniveaus innerhalb eines tolerierbaren Levels (i. d. Regel ein Unterschied weniger als 10 mV liegen).

Zur Überwachung dieses Schädigungsmechanismus wird deswegen eine Einlagerung der Batteriemodule empfohlen, bevor dieses als Reparaturmodul eingesetzt wird. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass das Batteriemodul noch einer zulässigen Selbstentladungseigenschaft unterliegt.

In Abbildung 14 wird die Vorgehensweise zur Bewertung von Batteriemodulen übersichtlich zusammengefasst.

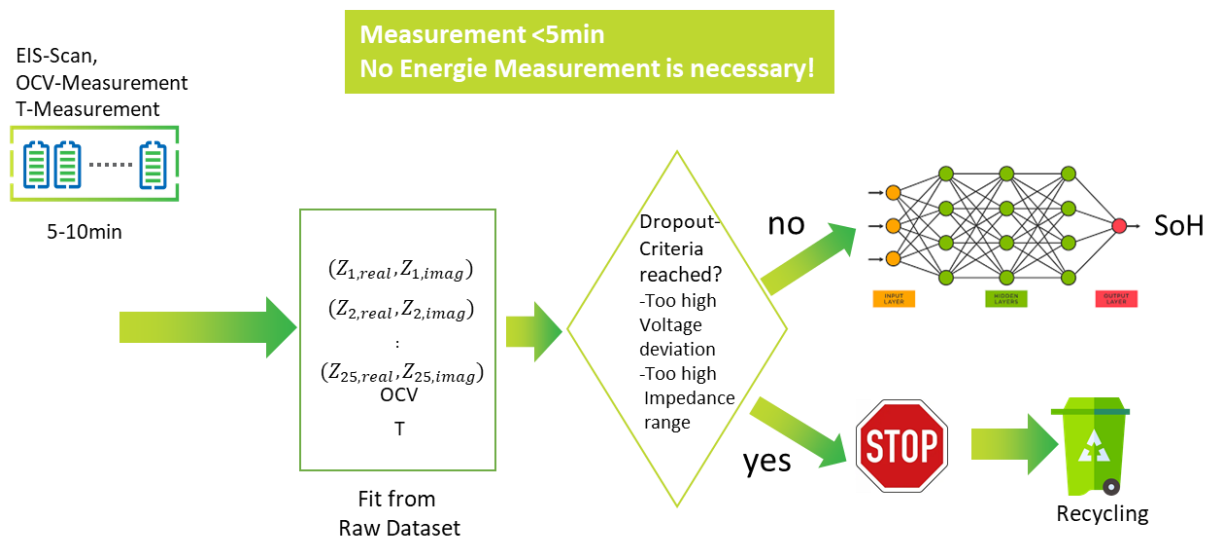


Abbildung 14 Vorgehensweise zur Bewertung von gebrauchten Batteriemodulen

Während das Batteriemodul vorab spektroskopiert wird, wird neben der Temperatur auch die die Spannungslage aller Zelleinheiten protokolliert. Eine Abweichung in der Spannungslage könnte durch ein Balancing ausgeglichen werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass das Batteriemodul keine zulässige Selbstentladeeigenschaft besitzt, ist jedoch so hoch, dass eine solches ausbalanciertes Modul in der Folge weiterhin überwacht werden sollte, wenn die Spannungsabweichung in dieser Messung zu groß ist.

Das in dem Projekt entwickelte Gerät ist in der Lage, ein Balancing einer einzelnen Zelleinheit mit bis zu 30 A zu vollziehen. Das Balancing sollte jedoch nur dann verfolgt werden, wenn die Spannungslage einer einzelnen Zelle nicht mehr als 100 mV betrifft.

Wenn die Abweichung der Zellspannungslage innerhalb des Moduls einen Differenzwert von mehr als 100 mV aufweist, sollte eine Bewertung mit Hilfe eines KI-Modell nicht mehr durchgeführt werden. Das Batteriemodul ist dann mit großer Wahrscheinlichkeit defekt.

Diese als sog. Dropout-Kriterien definierten Eigenschaften (siehe Abbildung 14) legen damit fest, dass das Batteriemodul mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit beschädigt ist.

In der Praxis können zunächst Batteriemodule mit unterschiedlichem SoH-Status durch das in diesem Projekt entwickelte Diagnosegerät klassifiziert werden. Es ist davon auszugehen, dass

in Zukunft diese analysierten Batteriemodule zunächst eingelagert werden und es zu einem späteren Zeitpunkt zu einer Verwendung als Austauschmodul kommen wird.

Aus diesem Grund sollte vor Auslieferung des Austauschmoduls zumindest eine Spannungsprüfung des Batteriemoduls erfolgen.

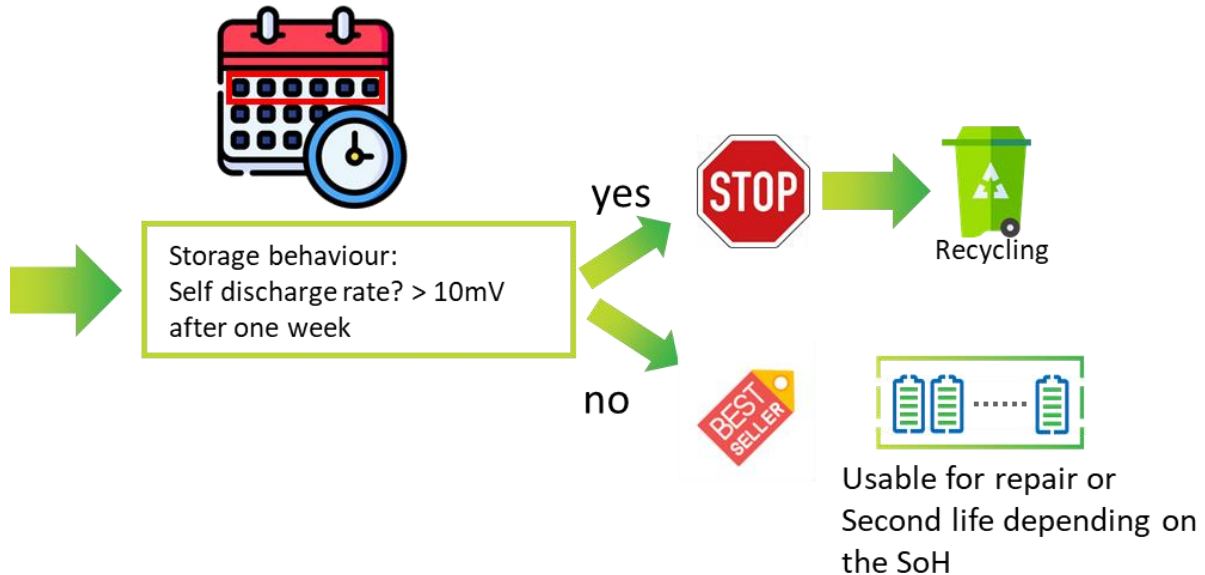


Abbildung 15 Erneute Prüfung des Moduls nach einer Lagerzeit von einer Woche

In Abbildung 15 wird der Ablauf der erneuten Prüfung gezeigt. Wenn nach einer Einlagerungszeit von z. B. einer Woche nahezu kein Spannungsunterschied (< 10 mV) zwischen den Zelleinheiten besteht, kann davon ausgegangen werden, dass eine gefahrbringende Dendritenbildung zum Zeitpunkt der Messung noch nicht vorgelegen hat. Eine erneute Spektroskopiemessung mit dem KI-Modell erfassten SoH-Status zum Zeitpunkt der Auslieferung des Batteriemoduls ermöglicht es dann, den bereits erfassten SoH-Wert nochmal bestätigen. Nur wenn dieser sich unwesentlich verändert ist (< 1 % Änderung), kann das Batteriemodul zum Ersatz herangezogen werden.

3.5 Einsatz-Szenario in den Batteriereparaturzentren

Um den Austausch von gebrauchten Batteriemodulen zu vollziehen, werden Batteriereparaturzentren wie das vom Vertragspartner benötigt. Diese verfügen über die technisch ausgebildeten Mitarbeiter sowie das Werkzeug, um Batteriemodule von den sog. Batteriepacks zu entnehmen.

In der Regel kommen Fahrzeuge mit einem vom Batteriemanagementsystem (BMS) des Elektrofahrzeuges angezeigten, defekten Batteriemodul in das Batteriereparaturzentrum. Häufig zeigen defekte Zelleinheiten - wie bereits erläutert - eine zu hohe Selbstentladeeigenschaft auf. Das BMS im Fahrzeug erkennt, dass die Zellspannungslage der betroffenen Zelleinheit zu weit entfernt ist von allen anderen Zellen des Batteriesystems und meldet über das OBD-2-Service-Interface das entsprechende Batteriemodul als defekt. Vorausgegangen sind misslungene Balancingversuche durch das BMS, die daran gescheitert sind, weil die Selbstentladerate der defekten Zelleinheit nicht mehr durch das BMS ausgeglichen werden kann.

Da die Zelleinheiten innerhalb eines Batteriemoduls miteinander verschweißt sind, kann das defekte Modul nicht mehr für eine weitere Verwendung (z. B. einen stationären Speicher) genutzt werden. Um den Zustand der verbliebenen Batteriemodule einschätzen zu können, kann mit Hilfe des in diesem Projekt entwickelten Batteriediagnosegerätes der SoH-Zustand eines weiteren (intakten) Batteriemoduls aus dem Batteriepack nun festgestellt werden.

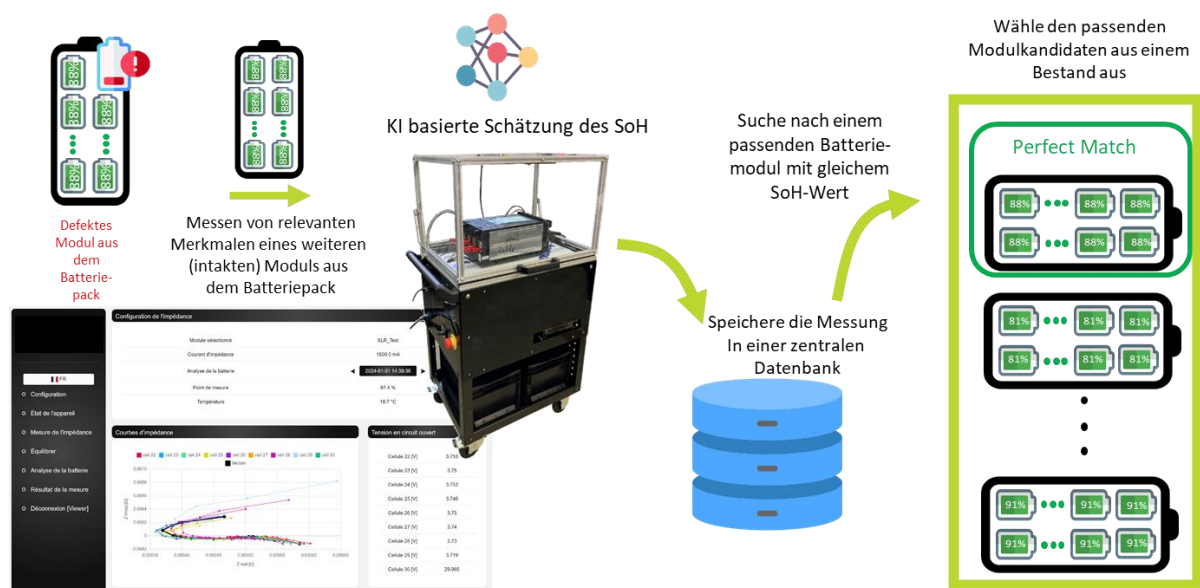


Abbildung 16 Einsatzszenario in einem Batteriereparaturzentrum

Dazu wird ein zweites Modul aus dem Batteriepack entnommen und im Batteriezentrum mit Hilfe des Diagnosegerätes gemessen. Die KI-basierte Schätzung des SoH weist dann einen Wert aus, für den ein passendes Austauschmodul beim Modullieferanten aus einem

angelegten Bestand identifiziert wird. In dem in Abbildung 16 gezeigten Szenario wird dargelegt, dass der Defekt des Moduls durch den Ausfall einer einzelnen Zelleinheit bestimmt ist.

Durch die Messung eines weiteren Batteriemoduls des Batteriepacks kann festgestellt werden, in welchem Zustand sich das gesamte Batteriepack des Elektroautos befindet. In diesem Beispiel weist das intakte Batteriemodul einen SoH von 88 % aus. Da das BMS nur einen Fehler in dem defekten Modul aufgewiesen hat, kann man daraus schlussfolgern, dass alle anderen Module des Batteriepacks gleiche SoH-Werte wie das intakte Batteriemodul aufweisen werden. Die Qualitätseinschätzung durch das zweite Batteriemodul stellt damit so etwas wie eine Qualitätsanalyse dar, die stellvertretend für das gesamte Batteriepack steht.

Da das Gerät mit einem Cloud-Speicher über das Internet verbunden ist, kann das Diagnosegerät die Seriennummer eines beim Modullieferanten eingelagerten Austauschmoduls identifizieren, das ebenfalls einen SoH von 88 % besitzt. Auf diese Weise ist es möglich, dass der Austausch durch ein eingelagertes und gebrauchtes Batteriemodul vollzogen wird und eine technisch kongruente Lösung im Sinne eines nachhaltigen Refurbishments gewährleistet wird.

4 ZUSAMMENFASSUNG

Durch die großzügige Förderung des Projektes konnten wichtige Forschungsarbeiten zur automatisierten Bewertung von Batteriemodulen von Elektrofahrzeugen erfolgreich umgesetzt werden.

Das entstandene Diagnosegerät wurde beim Projektpartner erfolgreich in Betrieb genommen.

Im zweiten Projektjahr wurden eine ausreichende Zahl von Modulen vermessen. Des Weiteren wurde gezeigt, dass durch KI trainierte Netzwerke eingesetzt werden können, um den Qualitätszustand von Batteriemodulen zu schätzen.

Mit einer hervorragenden Schätzqualität lassen sich interessante Geschäftsfelder für den Industriepartner und Startups wie Heimdalytics erschließen.

Das Diagnosegerät verfügt außerdem über eine schnelle Balancingfunktion, um Zellspannungsniveaus innerhalb des Moduls schneller ausgleichen zu können oder das gesamte Batteriemodul auf den gewünschten Ladezustand zu bringen. Auf diese Weise können für den Austausch vorgesehene Batteriemodule im Batteriereparaturzentrum so vorbereitet werden, dass Sie den gleichen Ladezustand wie das Batteriepack besitzen.

5 LITERATURQUELLEN

- [1] Renault-Gruppe: Interne Quelle für den Betrieb von Batteriereparaturzentren, 2019
- [2] Neuzulassung von Fahrzeugen weltweit: [IEA – International Energy Agency - IEA](#)
- [3] Electrochemical Impedance Spectroscopy on ageing Lithium-Ion Batteries, Marco Heinrich, Dissertation 2020, Technische Universität Braunschweig