

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil 1 – Kurzbericht (max. 2 Seiten)

Vorhabenbezeichnung: OSLiB - Online Sicherheitsbewertung von Lithium-Ionen-Systemen im Betrieb	
Zuwendungsempfänger: RWTH Aachen University	Förderkennzeichen 03XP0330C
Projektleiter*in Dirk Uwe Sauer Alexander Blömeke	Laufzeit 01.11.2020 – 30.04.2024

1. Ursprüngliche Aufgabenstellung

Die Temperatur einer Batteriezelle ist eine essenzielle Messgröße in Batteriesystemen, da diese nicht nur Relevanz bei Sicherheitsfragen, sondern auch bei anderen Parametern, wie beispielsweise der Lebensdauer und der verfügbaren Leistung hat. Impedanzbasierte Temperaturmesssysteme bieten die Möglichkeit kostengünstig die Temperatur aller Zellen in einem System zu messen und erfassen und im Gegensatz zu Temperatursensoren direkt die Zellinnentemperatur. Das übergeordnete Ziel der RWTH im Projekt OSLiB ist es daher, die Integration von Systemen zur impedanzbasierten Temperaturerkennung an Batterien zu verbessern. Angriffspunkt soll dabei eine erweiterte Signalverarbeitung sein, welche die Anforderungen an die Messhardware und verarbeitende Software reduziert. Dabei wird zu Beginn die Temperaturerkennung an einer einzelnen Zelle untersucht. Auf Zellebene lassen sich Fragen der Abstrakte, Genauigkeit und der Verarbeitung der Rohdaten beantworten und mit erweiterter Signalverarbeitung optimieren. Um die Integration in ein Batteriesystem zu realisieren, müssen im darauffolgenden Schritt die Auswirkungen von Zellverbänden auf die impedanzbasierte Temperaturerkennung untersucht werden. Die systematische Übertragung der Methodik von einer Zelle auf einen Zellverbund kann hierbei durch die Nutzung von Synergien zu Vereinfachungen führen, aber auch neue Herausforderungen wie Übersprechen von Signalen verursachen. Auf diese neuen Gegebenheiten muss die erweiterte Signalverarbeitung angepasst werden. Am Ende sollen die Systemanforderungen an ein Messsystem für die Elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS) basierte Temperaturbestimmung analysiert werden. Aufgrund des aktuellen Standes der Technik, ist bei der online EIS Temperaturmessung davon auszugehen, dass diese in ein Batteriemanagementsystem (BMS) integriert werden kann.

2. Ablauf des Vorhabens

In dem Projekt OSLiB hat die RWTH nach der erfolgreichen Beschaffung von Batteriezellen diese und die vom Projektpartner MEET produzierten Batteriezellen ausführlich mit der EIS Methode vermessen. Mit diesen Daten ließ sich ein Model entwickeln, welches bei variierenden Ladezustand die Temperatur auf wenige Kelvin genau schätzen kann. Teils parallel dazu wurde ein Demonstrator aufgebaut, welcher zum einen aus einem Zellverbund besteht, zum anderen aber auch aus etablierten BMS Komponenten. Dieser Aufbau ist extremst realitätsnah

und ermöglicht so eine realistische Abschätzung der Umsetzbarkeit in der Anwendung. Nach erfolgreichem Aufbau des Demonstrators konnten Messungen durchgeführt werden und die Methodiken erfolgreich validiert werden. Speziell die Erkenntnisse aus dem Aufbau des Demonstrators und der Messungen mit diesem halfen um wichtige Fragestellungen im Detail zu erkennen und zu beantworten.

3. Wesentliche Ergebnisse

Neben 4 akzeptierten Fachartikeln, ist ein weiterer eingereicht und ein weiterer in Planung. Die Ergebnisse des Projekts konnten zusätzlich auf 5 Konferenzen vorgestellt und diskutiert werden. Speziell die Veröffentlichung wichtiger Kernelemente als Open Source Hardware bzw. Software ermöglicht es auch anderen auf den Ergebnissen aufzubauen.

Schlüsselemente seitens der RWTH im Projekt OSLiB sind zum einen die mathematische Beschreibung der Anforderungen an die Messtechnik zu Impedanzmessung. Diese allgemeingültigen Formeln können verwendet werden um zukünftige Systeme und Produkte der Industrie optimal auszulegen. Das stellt zum einen sicher, dass die Mindestanforderungen erfüllt werden, aber auch, dass ggf. Kostenoptimierungen durchgeführt werden können, da verschiedenen Einflussfaktoren gegeneinander abgewogen werden können.

Das zweite Hauptergebnis der RWTH ist die genaue Schätzung der Temperatur einer Batterie anhand von Impedanzmessungen. Die Software zum entwickeln dieser Modelle ist ebenfalls als Open Source Software veröffentlicht, sodass zukünftige Arbeiten diese weiterentwickeln können. Der geringe Fehler bei den Zellmessungen und auch die kleinen Fehler auf Modulebene zeigen das Potential der Methodik. Eine nicht in diesem Projekt betrachtete Einflussgröße ist die Alterung. Speziell diese sollte weitergehend betrachtet werden.

Zusammen mit der Technischen Universität München (TUM) konnten die Synergien zwischen Pulsmessungen und EIS-Messungen im Detail analysiert werden. In der Anwendung ist so perspektivisch eine Unterscheidung zwischen diesen Anregungswegen zur Temperaturschätzung nicht mehr nötig.

Ort

Datum

Unterschrift

Sachlich richtig

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil 2 – Eingehende Darstellung (max. 20 Seiten)

Vorhabenbezeichnung: OSLiB - Online Sicherheitsbewertung von Lithium-Ionen-Systemen im Betrieb	
Zuwendungsempfänger: RWTH Aachen University	Förderkennzeichen 03XP0330C
Projektleiter*in Dirk Uwe Sauer Alexander Blömeke	Laufzeit 01.11.2020 – 30.04.2024

1. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse des Teilvorhabens

Das Ziel der RWTH im Projekt OSLiB war es, die Integration von Systemen zur impedanzbasierten Temperaturerkennung an Batterien zu verbessern. Der Innenwiderstand einer Batterie ändert sich abhängig von der Temperatur. Wird der Innenwiderstand bei mehreren Frequenzen analysiert, wird aus dem Innenwiderstand ein Impedanzspektrum, welches aufgrund des höheren Informationsgehaltes auch robuster gegen Störungen ist. Bisher werden solche Spektren im Labor erhoben, um daraus Modelle für Batterien abzuleiten. Bei der Integration in die Anwendung wurden bisher entweder offline Methoden verwendet, welche die Daten im Nachgang an das eigentliche Experiment analysieren, oder online Algorithmen an nur einzelnen Zellen oder nur einzelnen Frequenzen ausgewertet. Die Herausforderung mehrere Frequenzen, also Spektren, an mehreren Zellen im Batteriesystem online, also im System direkt, auszuwerten wird hier bearbeitet. Ein wichtiger Aspekt ist dabei die Verbesserung der Signalverarbeitung von den Daten welche erfasst werden. Dazu kommen aber auch konzeptionelle Überlegungen, um die Komplexität des Gesamtsystems so gering wie möglich zu halten ohne Informationen zu verlieren.

In der nachfolgenden Abbildung 1 ist der zeitliche Verlauf der Arbeitspakete (AP) der RWTH dargestellt. In AP4 hat die RWTH keine Aktivitäten und auch nicht in allen Unterarbeitspaketen (UAP). Im Folgenden wird auf die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse der einzelnen UAPs eingegangen.

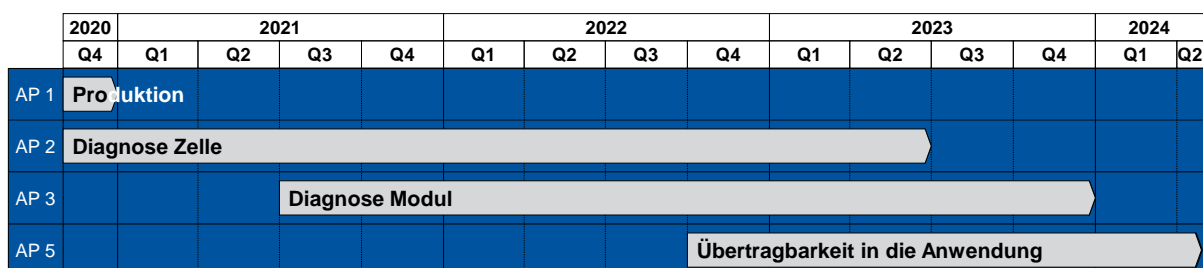


Abbildung 1 Gantt Chart

AP 1 Produktion

UAP1.1 Festlegung der zu berücksichtigenden produktionsbedingten Mängel

Im Konsortium konnte sich auf vier wesentliche Produktionsfehler geeinigt werden. Dazu gehören „Separatorfalte“, „Liniendefekt“, „Nichtleitendes Objekt“ und „Unvollständiges Wetting“. Die Auswahl beruhte dabei auf Literaturrecherche auf der einen Seite, aber auf der anderen Seite auch auf der technischen Analyse welche Fehler wahrscheinlich sind und wie sich diese möglichst realistisch nachbilden lassen.

UAP1.3 Auswahl und Beschaffung kommerziell erhältlicher Zellen

Bei der Auswahl der kommerziellen Zellen fiel die Wahl auf eine Pouchbag Zelle mit den Eigenschaften aus Tabelle 1. Die Auswahl fiel dabei in Absprache im Konsortium, als auch in Abstimmung mit dem gesamten Cluster. Die Eigenschaft, dass die Zelle höchsten 1 Ah Kapazität haben darf und eine hochwertige Pouchbag Zelle ist, schränkte die Auswahl ein. Die Kapazität ist dabei begrenzt durch das frühe Stadium der NFRA (Nonlinear Frequency Response Analysis) Methoden im Projekt. Die Reproduzierbarkeit/ Qualität der Zellen ist notwendig, um die Neuentwicklung der Methodiken zu ermöglichen. Eine Schwankende Qualität von Zellen bringt zusätzliche Ungewissheiten, welche die Verallgemeinerung von Aussagen von Versuchen unmöglich machen können.

Hersteller	Li-Fun Technology (立方新能源)
Modell	575166-01
Anodenmaterial	Graphit (C)
Kathodenmaterial	Nickel (5Ni) Mangan (3Mn) Cobalt (2Co)
Kapazität	1 Ah
Nominale Spannung	3,7 V
Ladeschlussspannung	4,2 V
Entladeschlussspannung	3,0 V
Zellgewicht	0,024 kg
Gravimetrische Energiedichte	$3,7 \text{ V} * 1 \text{ Ah} / 0,024 \text{ kg} = 154,17 \text{ Wh/kg}$
Volumen	66 x 51 x 3,3 (HxBxT in mm) $= 0,0000111078 \text{ m}^3$
Volumetrische Energiedichte	$3,7 \text{ V} * 1 \text{ Ah} / 0,0000111078 \text{ m}^3 = 333 \text{ kWh/m}^3$
Maximaler Entladestrom (-20 °C – 60 °C)	1 C
Maximaler Ladestrom (0 °C – 15 °C)	0.2 C
Maximaler Ladestrom (15 °C – 45 °C)	1 C
Innenwiderstand 50 % SOC	< 60 mΩ
Alterung	0.5 C Ströme, Temperatur nicht angegeben, > 80 % SOH, 500 Zyklen

Tabelle 1 Eigenschaften kommerzieller Zelle

UAP1.4 Festlegen Standardisierter Messmethoden im Projekt

Die Messmethoden wurden zu Beginn standardisiert, um Messergebnisse zwischen den Projektpartnern und auch im Cluster vergleichen zu können.

Als Randbedingungen wurde sich darauf geeinigt, dass die Standardtemperatur 25 °C betragen soll. Zudem wurde sich auf eine Verspannung mit 0,5 bar – konstant Kraft geeinigt. Die Kontaktierung soll immer in einer Vier-Punkt-Kontaktierung erfolgen, um Kabeinflüsse minimal zu halten.

Die Standardtests sehen folgenden Ablauf mindestens vor und können um weitere Tests erweitert werden:

1. Gewicht bestimmen
2. Zellspannung nach Lieferung erfassen
3. Formierung mit 10 Zyklen nach Datenblatt
4. Kapazitätstest mit CC-CV Ladung nach Datenblatt, also mit einem Strom von 0.2 C bis 4,2 V mit konstantem Strom (CC) und danach bis der Strom 0.02 C unterschreitet mit konstanter Spannung (CV) weiterladen. Entladen mit konstantem Strom von 0.2 C bis 3.0 V erreicht.
5. Bestimmung der quasi Open Circuit Voltage (QOCV). CC entladen und CC-CV laden mit jeweils C/20.
6. EIS Messungen. SOC = 50 % mit CC-CV 0.2 C anfahren und Abbruch bei 0.02 C. Danach Pause von mindestens 1 Stunde oder einem Delta-U von unter 1 mV pro 10 Minuten. Galvanostatische Elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS) mit einer Zielspannungsantwort von 10 mV. Frequenzbereich von 10 mHz bis 10 kHz.

Spezifische Tests sehen zusätzlich folgende Schritte vor:

1. EIS und Pulsmessungen bei Temperaturen von 0 °C, 5 °C, 15 °C, 25 °C, 35 °C, 45 °C und SOC-Werten von 0/5/**10**/15/20/**25**/**50**/**75**/80/85/**90**/95/100 %. Die **fett** markierten dabei immer. Die Pulse sollen dabei folgende Eigenschaften haben: ±1 C, ±0.5 C, ±0.2 C Stromstärke und eine Dauer von 1 s, **5 s** und 30 s.
2. Messungen an Halbzellen bei 25 °C, QOCV und EIS werden zusätzlich bei der TUM durchgeführt.

AP 2 Diagnose Zelle

UAP2.1 Charakterisierung der in UAP 1.3 ausgewählten Zellen

Die Charakterisierung der kommerziellen Zellen wurde erfolgreich durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen keine Auffälligkeiten bzw. große Abweichungen zwischen den Zellen. Diese Eigenschaft ist wichtig, da sonst die Algorithmik zusätzlich Ungenauigkeiten zwischen einzelnen Zellen berücksichtigen müsste.

Die Eingangsimpedanzmessungen zeigen lediglich eine geringe Korrelation zur Spannung, respektive dem Ladezustand, welche sich so mit den Erwartungen und der Literatur übereinstimmt.

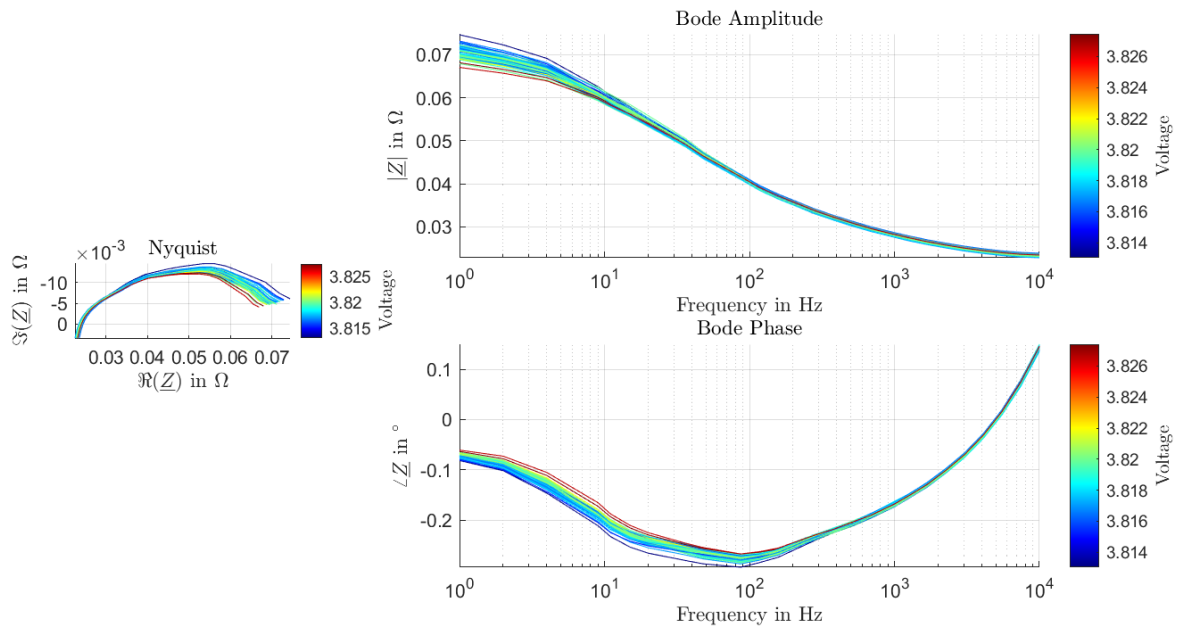


Abbildung 2 Eingangsimpedanzmessungen

Auch weitere Eingangsmessungen, wie die Bestimmung des Gewichts und die Vermessung des Innenwiderstands bei 1 kHz, zeigen keine Ausreißer auf. Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen auf der Hauptdiagonalen zeigen typische Normalverteilungen auf. Der Mittelwert des Gewichts beträgt 22,3 g, weist eine Standardabweichung von 0,14 g auf, welche 0,62 % des Mittelwertes entspricht. Die Spannung weist einen Mittelwert von 3,818 V auf mit einer Standardabweichung von 3,04 mV, was 0,08 % des Mittelwertes entspricht. Die Werte des Widerstands betragen: Mittelwert 31,83 mΩ, Standardabweichung 0,30 mΩ (0,95 % des Mittelwertes).

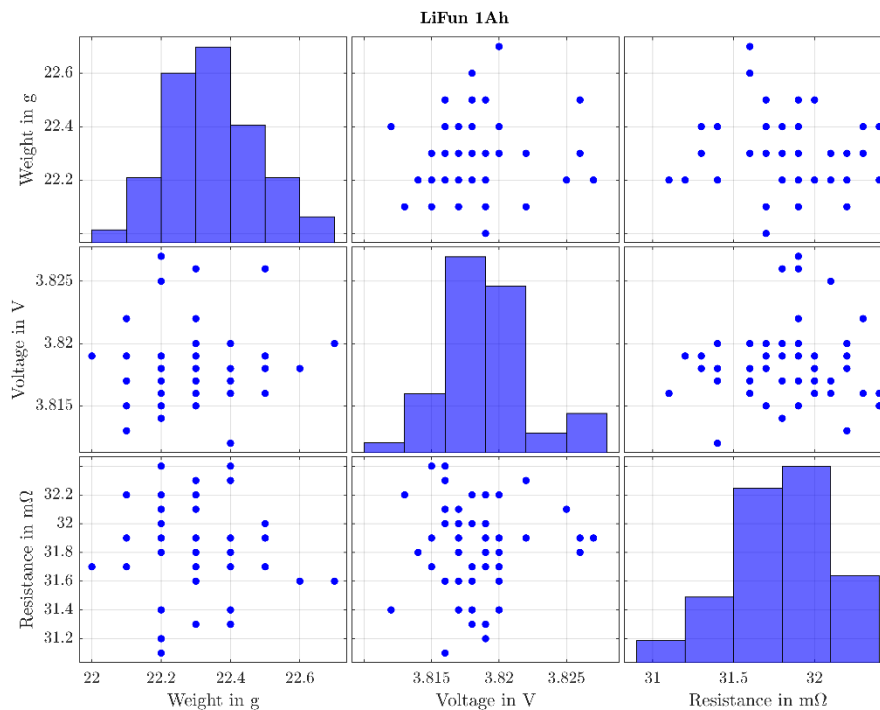


Abbildung 3 Eingangsmessungen

UAP2.2 Untersuchung von sicherheitskritischen Zuständen auf Zellebene

Die Batterien vom Projektpartner MEET, wie beispielhaft in Abbildung 4 zu sehen, wurden dazu mit 0.5 verspannt und bei 3.7 V eine Temperaturkurve von 5 °C bis 45 °C abgefahren. Neben der korrekten Verspannung, dargestellt in Abbildung 5, ist dabei zusätzlich auf eine geeignete Platzierung des Temperatursensors zu achten. In diesem Fall wurde die Oberfläche der Verspannplatte gewählt, da die Zelle im Verhältnis zu dieser sehr viel dünner ist. Die dadurch geringere Wärmekapazität der Zelle sorgt dafür, dass deren Kerntemperatur sehr ähnlich zu der Verspannplatte ist. Darüber hinaus wurde auf eine korrekte 4-Leitermessung geachtet.



Abbildung 4 Zelle mit ISEA RWTH Aachen University Barcode links, Zelle mit MEET Beschriftung rechts



Abbildung 5 Versuchsaufbau online EIS

Bei den Messungen in Abbildung 6 wurde die Impedanz der Zelle zwischen 1 Hz und 10 kHz gemessen. Sehr gut zu erkennen ist der klare Zusammenhang zwischen der Temperatur und der gemessenen Impedanz, hier dargestellt in einem Nyquist Diagramm. Das Erkennen kritischer Zustände, bei der RWTH sind dies kritische Temperaturen, setzt voraus, dass diese mit Modellen, mathematischen Methoden oder anderen Algorithmen berechnet werden können. Die Eingangsgröße ist hier die Elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS), als Ausgangsgröße ist die mittlere Temperatur der Batterie gesucht.

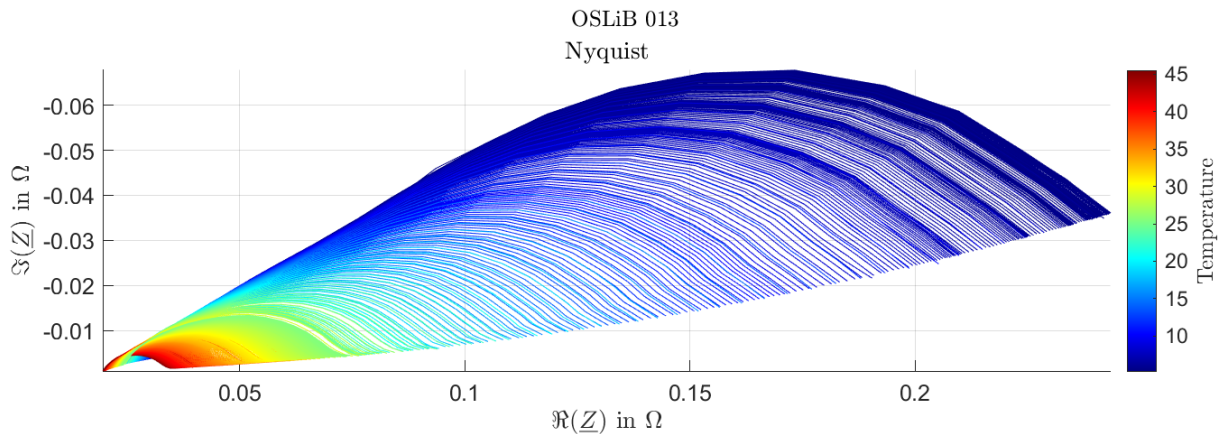


Abbildung 6 Ergebnisse Temperaturkurve zweilagig Zelle vom Projektpartner MEET, Temperatur hier in °C

UAP2.3 Erkennbarkeit kritischer Zustände in kommerziellen Zellen

Die in UAP2.2 abgeschlossenen Tests wurden bereits in die entsprechende Umgebung unserer Batterietester umgesetzt. Essentiell für dieses Projekt war hier die definierte Temperatur an der Batterie. Wie Abbildung 7 zu entnehmen musste dies zusätzlich mit der Verspannung, also einem definierten Druck kombiniert werden. Dazu wurde eine weitere Hardwarekomponente entwickelt und Open-Source zur Verfügung gestellt. [Open Source Datensatz/Software/Hardware – 1]

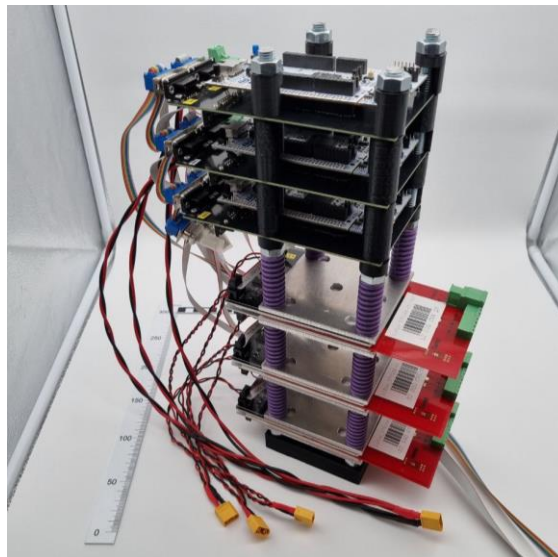


Abbildung 7 Mechanische Verspannung der getesteten Einzelzellen.

Im der Abbildung 7 ist zu sehen: Federn (lila), Stahlplatten (silbern), Heizplatinen (schwarz), Interfacematerial (weiß), Zellhalter mit Zelle (rot), sowie über den Zellen Mikrocontroller zur aktiven Steuerung. Die Federn wurden so gewählt, dass bei entsprechendem Abstand ein Druck von 0,5 bar auf die Zelle wirkt. Die zusätzlichen Stahlplatten werden verwendet um eine hinreichende Steifigkeit zu erreichen. Durch die aktiv geregelten Heizplatinen kann die Temperatur auf $\pm 0,5$ K absolute Genauigkeit eingestellt werden. [Open Source Datensatz/Software/Hardware – 1]

Dieser Aufbau wurde für die Tests in eine Klimakammer platziert und mit einem Batteriezyklisierer und Impedanzmessgerät verbunden. Durch die vollautomatische Vermessung, konnten so die Tests zuverlässig durchgeführt werden.

Die eigentlichen Impedanzverläufe sind der Abbildung 8 zu entnehmen. In allen 4 Plots sind die gleichen Daten dargestellt. Unterschieden wird lediglich nach der Darstellung des Absolutbetrags der Impedanz (Z) in a) und c), sowie der Phase in b) und d). In a) und b) ist die Temperatur farblich markiert, in c) und d) der Ladezustand (State-of-Charge (SOC)).

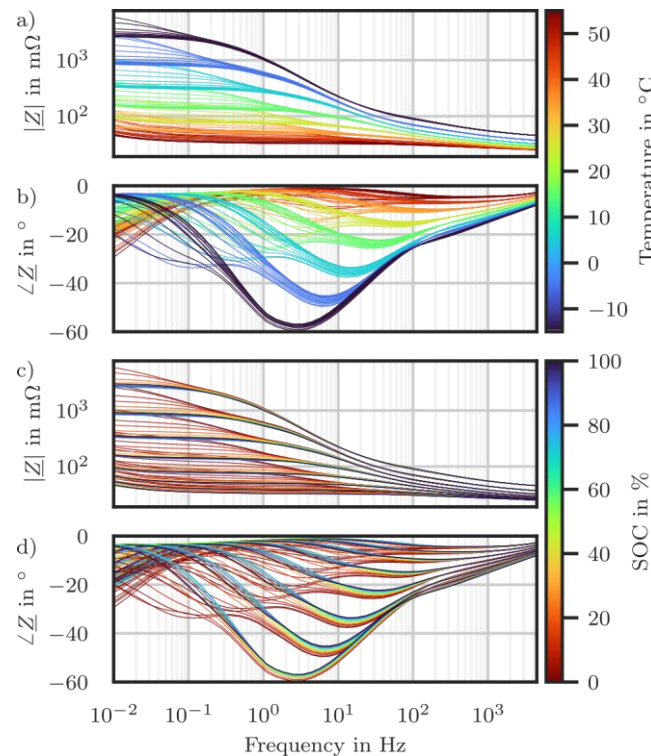


Abbildung 8 Impedanzmessungen an Zellen [Fachartikel – 4]

UAP2.4 Weiterentwicklung der Signalverarbeitung für Online Algorithmen

Die Impedanzspektroskopie analysiert Strom und Spannung im Frequenzbereich. Die Transformation der im Zeitbereich erfassten Messgrößen in den Frequenzbereich kann beispielsweise durch Fourier Transformation erfolgen. Da es bei dem Betrieb von Batterien zusätzlich Störsignale geben kann, müssen zusätzlich Fensterfunktionen verwendet werden. In einem ersten Schritt konnten diese Methoden auf einem Mikrocontroller implementiert werden. Damit ist es nun möglich bekannte Frequenzen zu detektieren und die Impedanz zu berechnen. Das Verfahren wurde daraufhin dahingehend erweitert, dass Frequenzen automatisch erkannt werden und auch die Reduktion der benötigten Ressourcen auf dem Rechenwerk optimiert wurden.

Im Versuchsaufbau am Modul wird eine sogenannte Multisinus Anregung verwendet. Diese regt mehrere Frequenzen im Spektrum gleichzeitig an. Die Methodik der Unterabtastung nutzt aus, dass trotz Verletzung des Nyquist-Shannon Theorem $f_s > 2 \cdot f_{max}$ die Frequenz eindeutig zugeordnet werden kann. Bei der Kombination von Unterabtastung und Multisinus-Signalen entsteht die Problematik, dass sich einzelne Frequenzen überlappen können. Beispielhaft ist dies in Abbildung 9 für 3 Frequenzen dargestellt. Um dies zu verhindern müssen die Frequenzen geschickt gewählt werden. Diese

Methodik zeigt sich als besonders Zielführend, speziell im Kontext des Modulaufbaus in AP5.

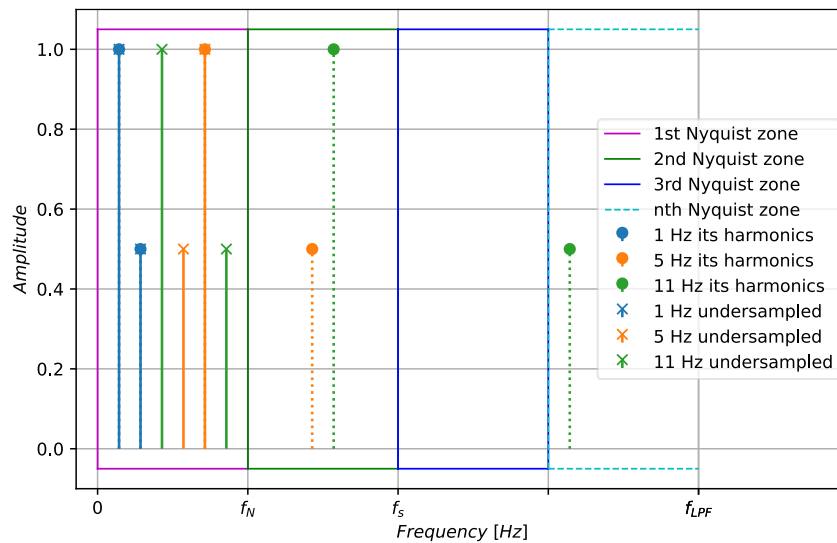


Abbildung 9 Beispielhafte Unterabtastung dreier Signale

Da Batterien leider nicht lineares Verhalten aufweisen können, muss mit Harmonischen in der Spannungsantwort gerechnet werden. Ein lineares Verhalten, wie ein idealisierter Widerstand es aufweist, ist in Abbildung 10 dargestellt. Die Spannungsantwort liegt in diesem Fall rechts im Spektrum so perfekt mit dem Strom übereinander, dass der Strom gar nicht erkennen werden kann.

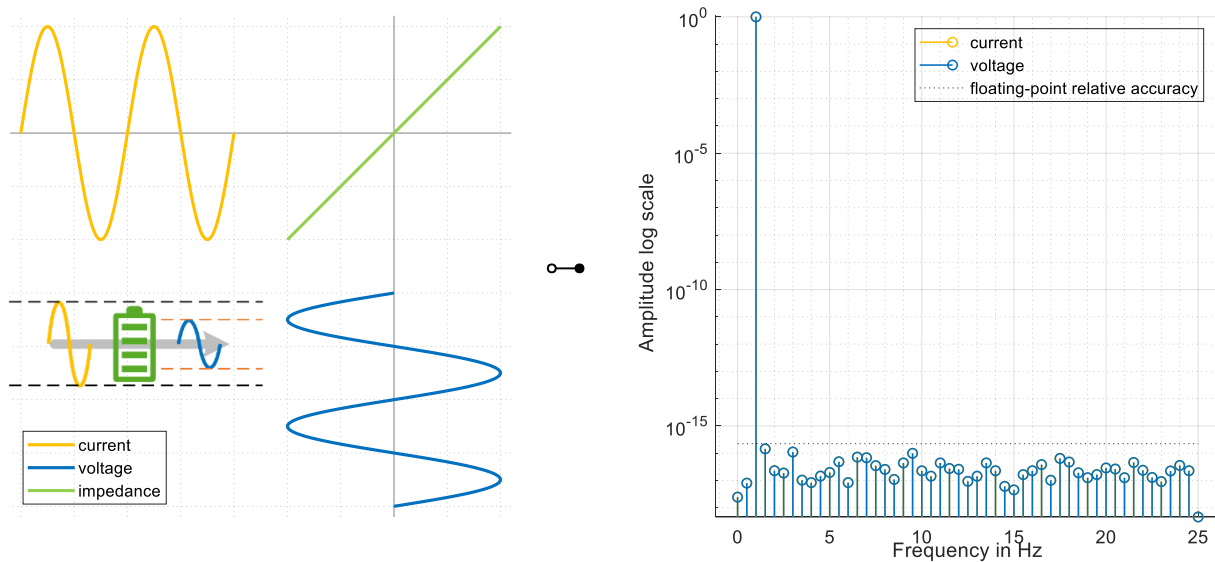


Abbildung 10 Idealisiertes lineares Verhalten; Links: Antwort im Zeitbereich, Rechts: Fourier Transformation des Zeitsignals

Batterien sind jedoch nicht linear. Entsprechend sieht die Spannungsantwort auf einen aufgeprägten Strom teilweise unerwartet aus. Den komplexen Zusammenhang zwischen der Spannungsantwort und Lithium-Plating wird hier von dem Projektpartner KIT untersucht. Mit dem Hintergrund, dass das KIT die Harmonischen der Anregungsfrequenzen auswertet und in AP5 das Ganze im Mikrocontroller implementiert werden soll, hat sich für das Projekt die FFT als ideale Zeit-Frequenztransformation herausgestellt. Die Herausforderung echtzeitfähig zu sein (Code auf Mikrocontroller) und die

gleichzeitige Auswertung von Harmonischen lässt mit dem hier eingeplanten Aufwand keine Alternative zu. Ein idealisiertes Verhalten einer Batterie bei hohen Anregungssprachen ist in Abbildung 11 zu sehen.

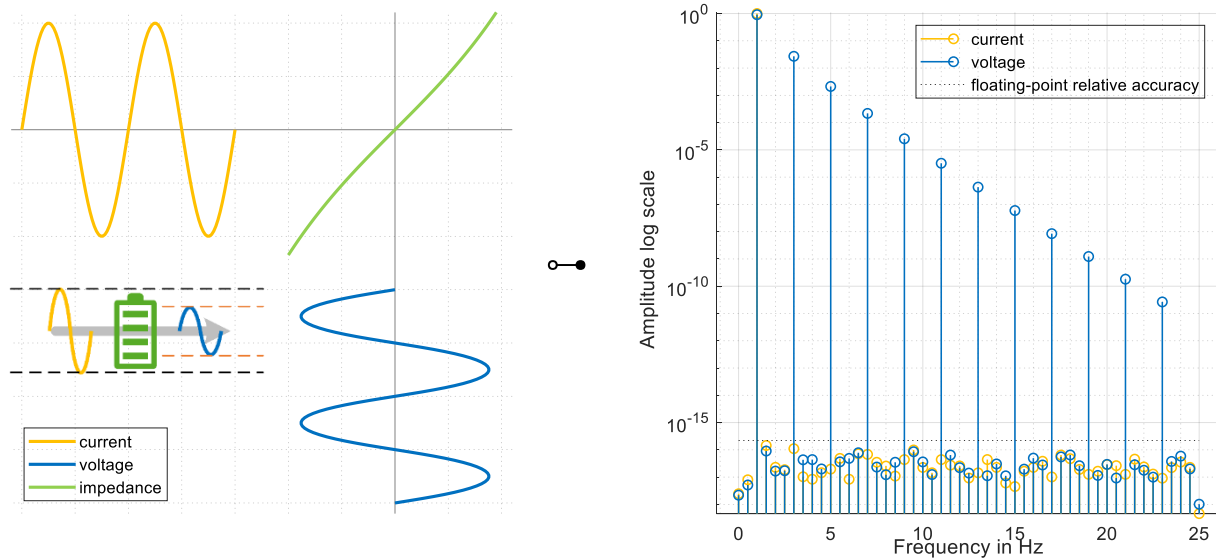


Abbildung 11 Nichtlineares Verhalten von Batterien; Links: Zeitbereich, Rechts: Fourier Transformation des Zeitsignals

AP 3 Diagnose Modul

UAP3.1 Untersuchung der Fehler auf Modulebene

Zu den Untersuchungen der Algorithmik auf der Modulebene, müssen die Zellen des finalen Moduls individuell erhitzt werden können. Bei einzelnen Zellen kann die Temperatur durch den Klimaschrank erzielt werden, in dem sich die Zelle bei der Vermessung befindet. Das Modul wird sich in einem Klimaschrank befinden, was eine Individuelle, auch genauere, Regelung der Zelltemperatur erforderlich macht. Bei der Abwägung zwischen Peltier-Elementen und Heizfolien fiel die Wahl auf Heizfolien. Um im weiteren Verlauf, Temperaturregelung, Temperaturmessung und auch die Verspannung bestmöglich zu vereinen, wird die Heizfolie selbst innerhalb einer Metallkernleiterplatte realisiert. Funktionstests dieser Platine sind in Abbildung 12 zu sehen.



Abbildung 12 Vorversuche Heizelemente

In UAP3.1 wurde der Aufbau des in Abbildung 14 gezeigten Prüfstands erarbeitet.

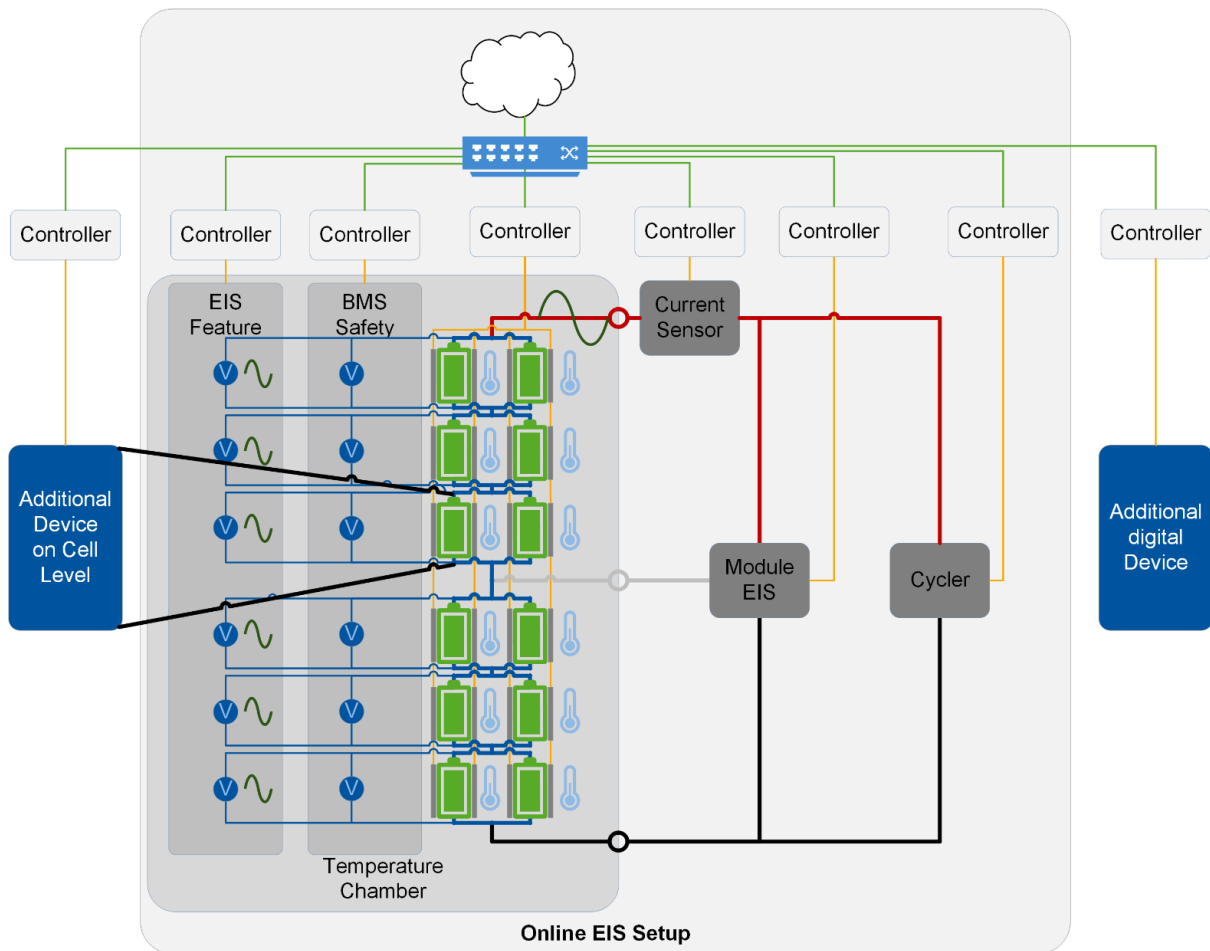


Abbildung 13 Aufbau Prüfstand

Bei der Erweiterung der Messungen von der Zelle zum Modul, konnte der zuvor gezeigte Aufbau weiterverwendet werden. Die Abbildung 14 zeigt die einzelnen Komponenten des Aufbaus, welche in der Abbildung 15 wiederzufinden sind. Essenzieller Bestandteil dieses Aufbaus ist das neu beschaffte Gerät zur Modulanregung.

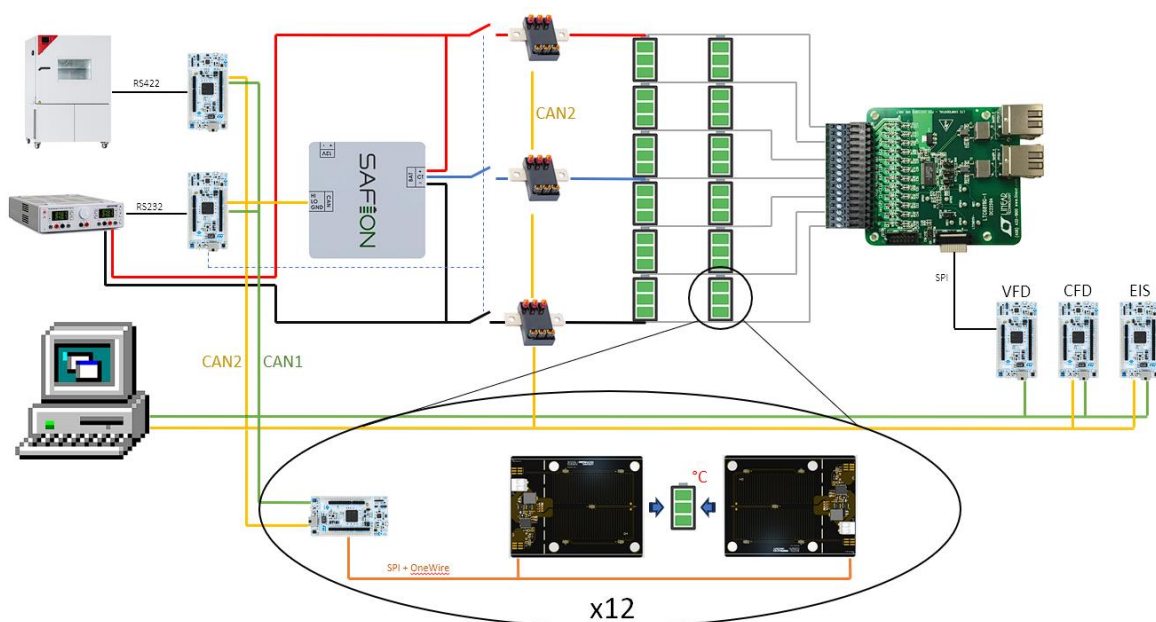


Abbildung 14 Skizze Aufbau Prüfstand

Durch das Zusammenspiel aller Komponenten können so Impedanzwerte der einzelnen Zellen im Modul aufgenommen werden. Wie auch bei den Zelltests, wird zur Variation der Temperatur die Klimakammer etwa 10 K unter die Zieltemperatur eingestellt. Die hier im Projekt entwickelten Heizplatinen können dann auf die Zielgröße und auch darüber hinaus präzise die Temperatur der einzelnen Zellen einstellen. Der finale Aufbau und die verwendete Hardware zur Vermessung der Impedanz ist explizit keine hochpräzise Labormesstechnik, sondern verwendet in aktuellen Anwendungen integrierte Sensoren. Dadurch wird sichergestellt, dass die Integration der Ergebnisse in Produkte der Industrie deutlich einfacher vollzogen werden kann.

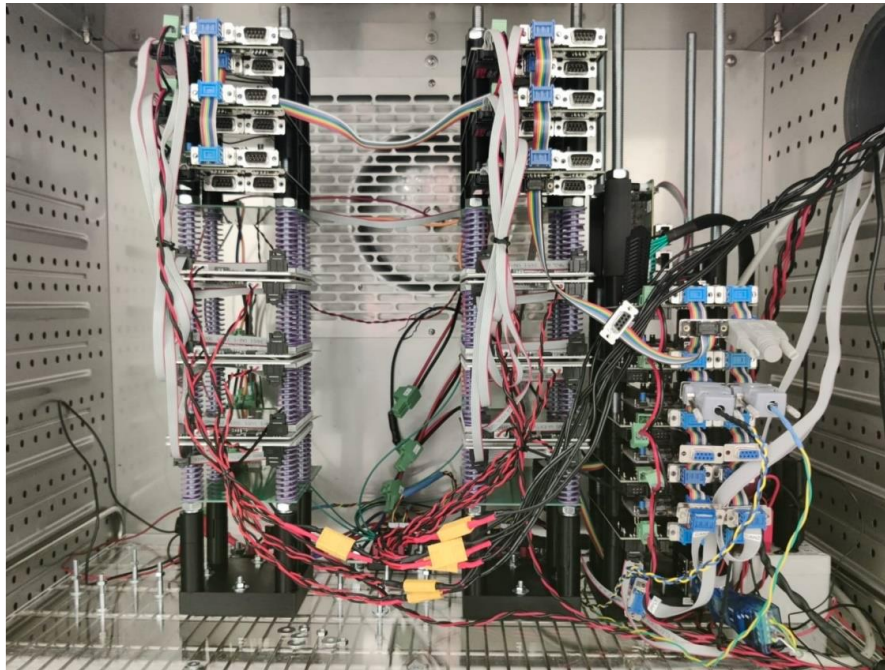


Abbildung 15 Foto des Demonstrator Aufbaus

UAP3.2 Übertragung der Signalverarbeitung und Modellierung von einer Zelle auf ein Modul

Die vielversprechendste Methode hier im Projekt zur Schätzung der Temperatur ist die Verwendung von einer Support Vector Regression. Diese konnte erfolgreich entwickelt werden. Eine komplette Open-Source Veröffentlichung des Codes ist erfolgt. [Fachartikel – 4, Open Source Datensatz/Software/Hardware – 2]

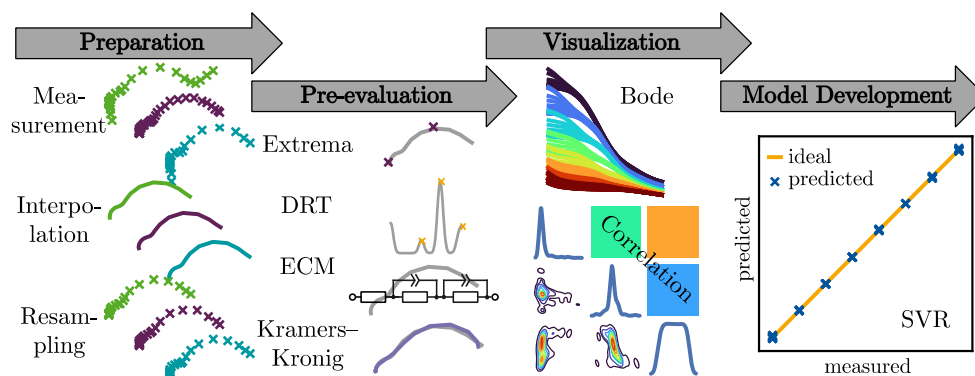


Abbildung 16 Ablauf der Datenverarbeitung des entwickelten Software Tools zur EIS Verarbeitung [Fachartikel – 4]

Mit der Hilfe der entwickelten und gefitteten Regression können wie in Abbildung 17 dargestellt für die Zelldaten Mean Square Errors (MSE) von kleiner ein Kelvin erreicht werden.

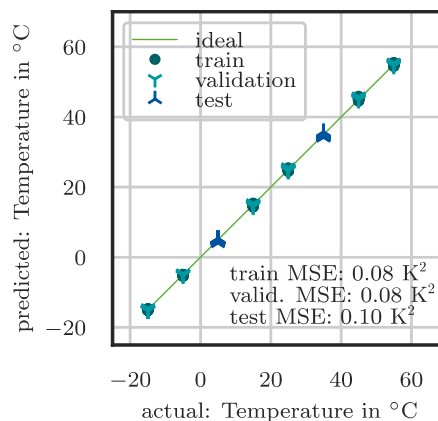


Abbildung 17 Geschätzte gegen gemessene Temperatur. Die Schätzung erfolgt hier für Zell-EIS Messungen mittels einer Support Vector Regression [Fachartikel – 4]

AP 5 Übertragbarkeit in die Anwendung

UAP5.1 Definition der messtechnischen Voraussetzungen für die Übertragung auf ein BMS

Die Veröffentlichung [Fachartikel – 3] fasst die gesamten Arbeiten diese UAPs zusammen. Anhand eines Demonstrators aus einem vorherigen Projekt, konnte in diesem Projekt die allgemeingültigen Anforderungen an die Strom- und Spannungsmessung zur Impedanzbestimmung erörtert werden. Hauptergebnis ist dabei die analytische Erkenntnis, dass durch Signalverarbeitung die Hardwareanforderungen reduziert werden können. Auf der internationalen Konferenz „Advanced Battery Power – Kraftwerk Batterie“ wurden diese Ergebnisse im April 2024 ebenfalls dem Fachpublikum vorgestellt. [Konferenzbeitrag – 5] In Abbildung 18 sind die wichtigsten Einflussfaktoren zusammengefasst. So kann beispielsweise durch geschickte Signalverarbeitung und Wahl von Filtern das Signal-zu-Rauschverhältnis (SNR) verbessert werden. Dies wiederum führt zu einer Anforderungsreduktion an die Messtechnik des BMSs.

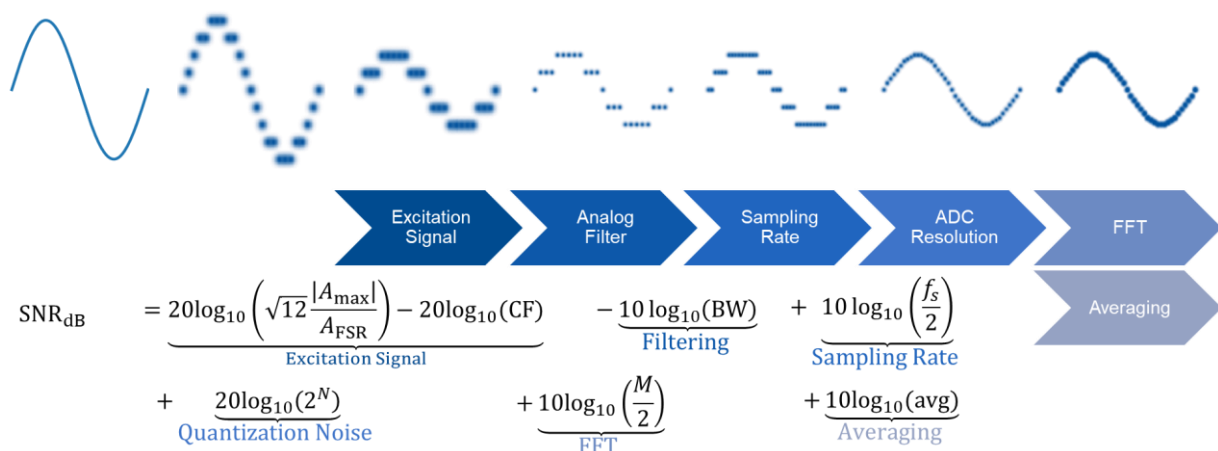


Abbildung 18 Optimierungsmöglichkeiten des SNRs bei EIS Messungen [Fachartikel – 3, Konferenzbeitrag – 5]

UAP5.2 Übertragung der entwickelten Methoden auf ein BMS

Mit dem im UAP3.1 entwickelten Aufbau konnten Messungen in einem Zellverbund durchgeführt werden. Diese sind in der Abbildung 19 auf der rechten Seite zu sehen. Die Modellentwicklung wurde zuvor mittels Zelltests (links in der Abbildung) durchgeführt.

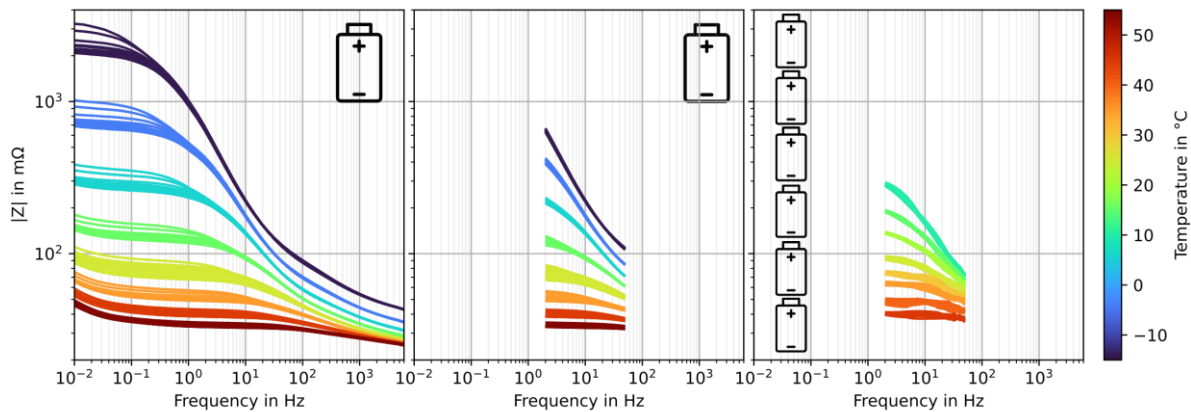


Abbildung 19 Absolutwert von EIS Messungen bei verschiedenen Temperaturen an Zelle und Modul.

Trotz eingeschränktem Messbereiches in dem Modul konnten Fehler im Rahmen weniger Kelvin erreicht werden. Dabei wurde ebenfalls, wie Abbildung 20 zu entnehmen, die Support Vector Machine basierte Regression verwendet.

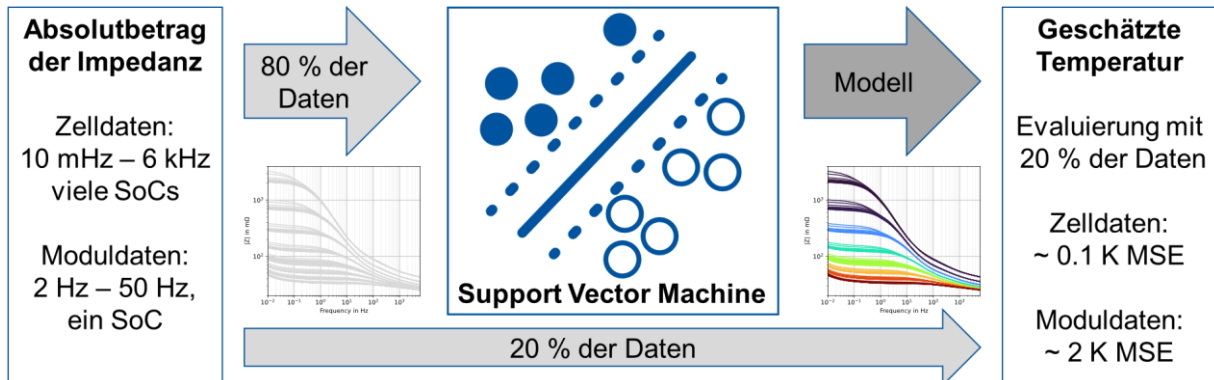


Abbildung 20 Schematische Darstellung des Ablaufs der Validierung.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Es kam zu einer kostenneutralen Verlängerung des Projekts um 6 Monate. Darüber hinaus sind folgende gesonderte Ereignisse zu nennen:

EIS Gerät

Der Kostenpunkt „0850 - Gegenstände & andere Investitionen> 800/410/400 €“ musste von ursprünglich 3.500 € auf 8.092 € erhöht werden, da das unerlässliche Impedanzmessgerät in der Beschaffung teurer wurde als in der Antragsphase. Das Gerät wurde daraufhin erfolgreich beschafft und ist in Verwendung. Die Mehrkosten wurden

kompensiert. Weitere Details sind dem Schreiben vom 08.04.2021 an den Projektträger zu entnehmen.

Reise Grenoble

Im November 2021 ergab sich die Möglichkeit, Messungen am European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) in Grenoble, Frankreich, durchzuführen. In Kooperation mit dem Projekt MADAM4Life konnten so Temperatureinflüssen, mechanische Ausdehnung und chemische Zusammensetzung gleichzeitig untersucht werden. Die Kompensation der Mehrkosten hat über den Verlauf des Projekts stattgefunden. Mehr Details im E-Mailverlauf, zuletzt „AW: [BattNutzung – OSLiB 03XP0330A-F] RWTH inner-EU Reise“ vom 05.11.2021.

In Abbildung 21 ist der Versuchsaufbau in der Prüfkammer des ESRFs zu sehen. Von links kommt die hochenergetische Strahlung des Synchrotrons, welche durch die Komponenten der Zelle (grauer Zylinder) gebrochen und vom Detektor rechts außerhalb des Bildes analysiert wird. Zusätzlich sind Verkabelung für Stromanschlüsse zum Laden und Entladen der Zelle sowie das zugehörige Gerät zu sehen (rechts neben der Zelle das blaue Gerät) und passende Spannungsabgriffe, welche sowohl zu dem Lade-/Entladegerät gehen, als auch zum Datenlogger, welcher mittig unten im Bild zu finden ist. Mit diesem Datenlogger wurde auch die Temperatur am äußeren der Zelle gemessen, als auch die Dehnungsmessstreifen (DMS). Links von der Zelle befindet sich zusätzlich eine Thermokamera.

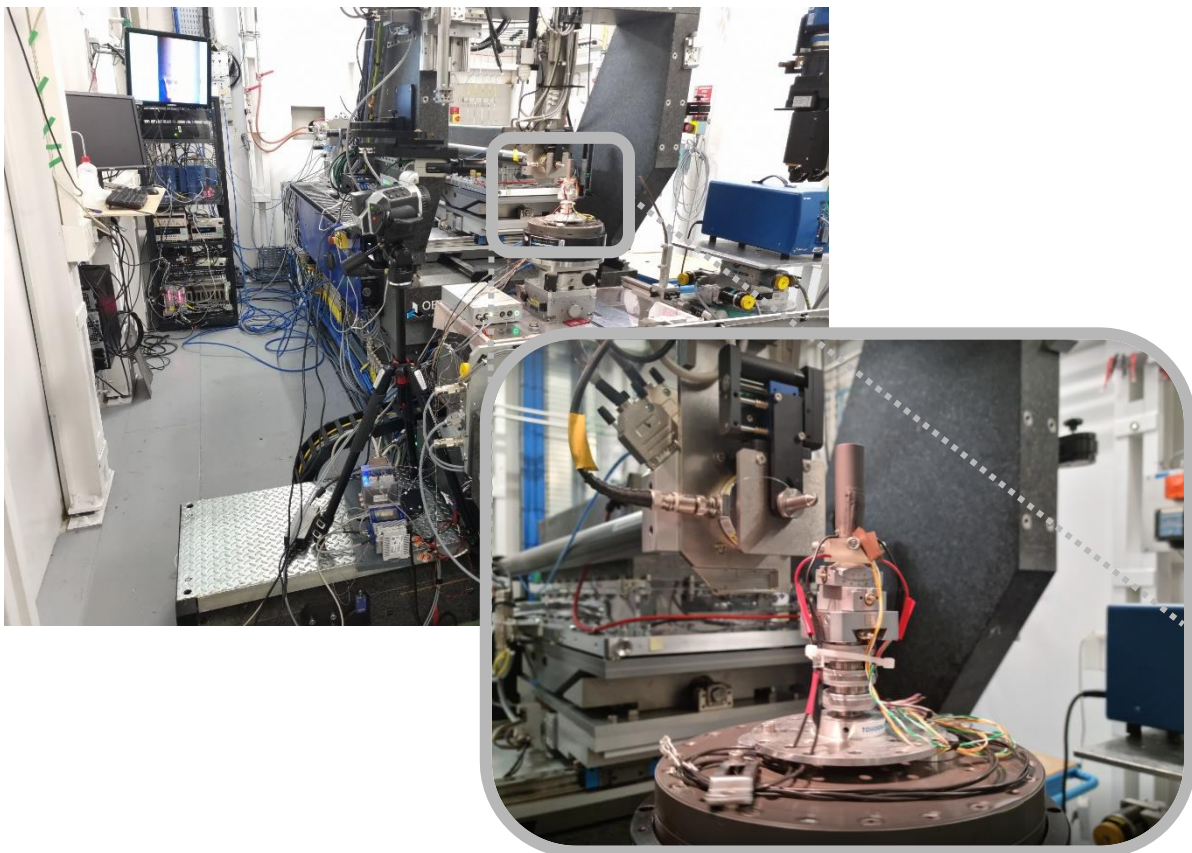


Abbildung 21 Versuchsaufbau am ESRF

Die Messelektronik der RWTH lieferte die Ergebnisse aus Abbildung 22. Gerade die leichten Änderungen des 1 kHz Widerstands während der Messungen des Synchrotrons (blau hinterlegt) deuten darauf hin, dass eine geringe Temperaturänderung durch die Messungen hervorgerufen wurde. Die Methodik der Temperaturänderungsverfolgung durch Impedanzmessungen des Projekts OSLiB konnte so erfolgreich die Ergebnisse ergänzen.

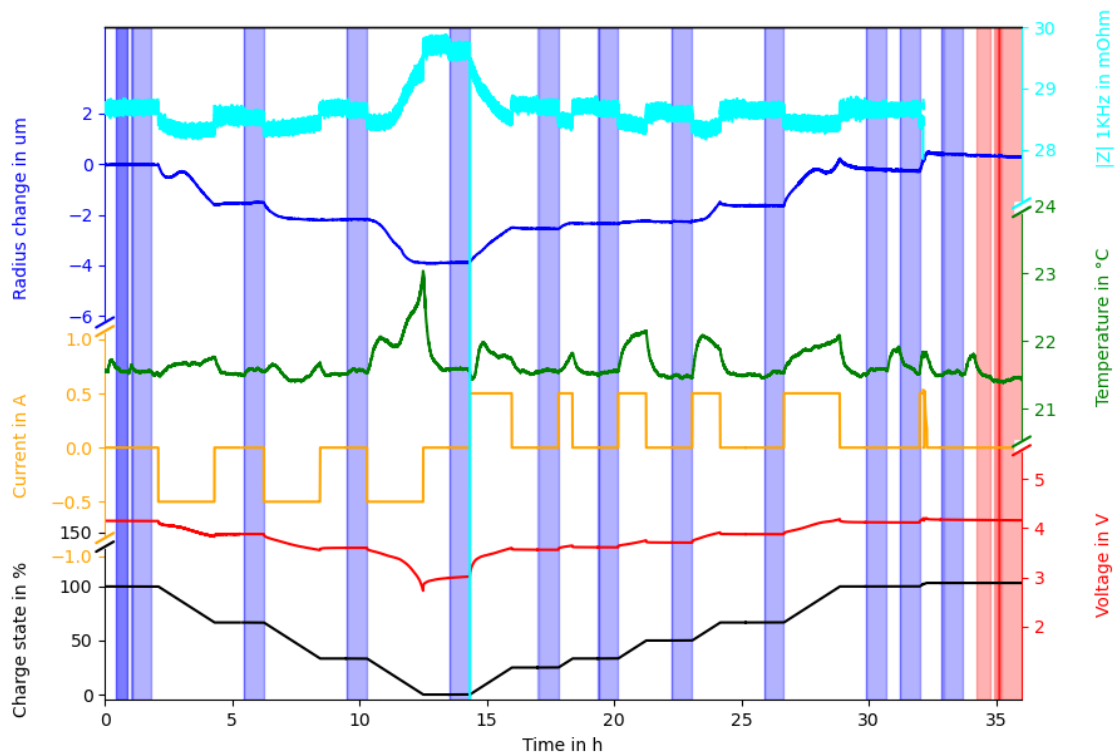


Abbildung 22 Versuchsablauf

Die Abbildung 23 zeigt ein beispielhaftes Messergebnis des Synchrotrons. Zu erkennen ist rechts ein CT-Bild, die Besonderheit dabei ist, dass für jeden Pixel ein eigenes XRD Spektrum (links) vermessen wurde.

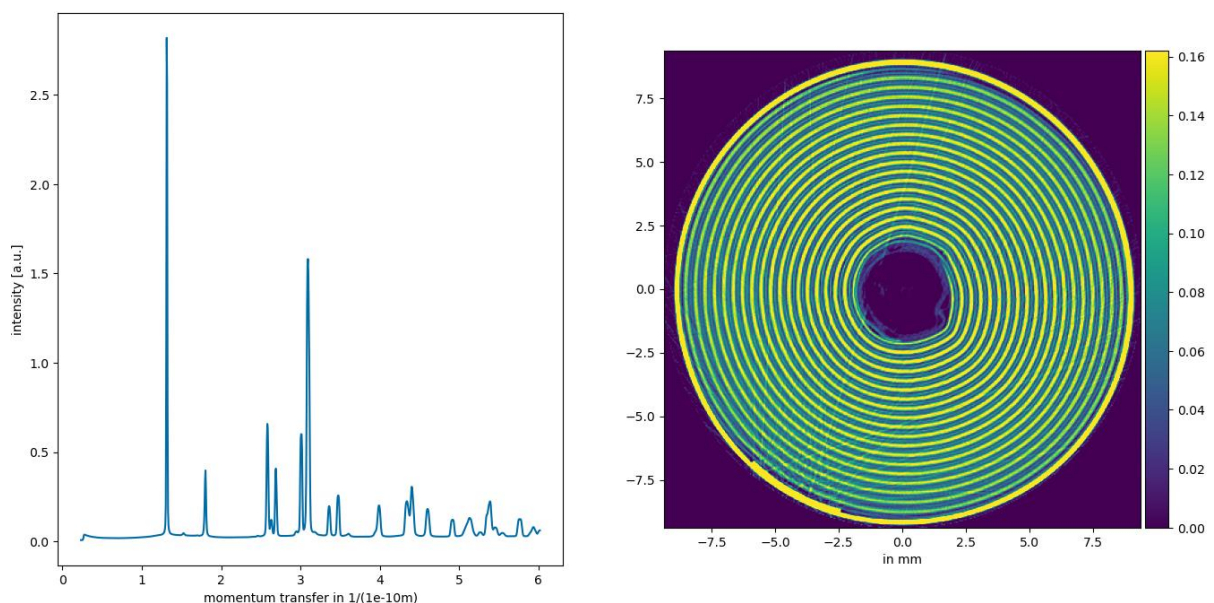


Abbildung 23 Messergebnisse Synchrotron

In Summe ergibt sich dadurch eine bisher einmalige Kombination aus Impedanzmessungen, Dehnungsmessstreifen und XRD-CT Bildgebungen bei verschiedenen Ladezuständen.

Forschungsaufenthalt München

Zur besseren Vernetzung innerhalb des Projekts und der Analyse der Übertragung in die Anwendung verbrachte Herr Blömeke eine Forschungsaufenthalt von Dezember 2023 bis Januar 2024 bei dem Projektpartnern der Technischen Universität München (TUM). Die TUM betrachtet die Temperaturdetektion mittels Pulssignale. Die RWTH mittels der EIS Messung. Die mathematischen Zusammenhänge und Ähnlichkeiten konnten in der Zeit initial aufbereitet werden (siehe Abbildung 24). Eine Veröffentlichung der Ergebnisse ist für 2024 geplant.

EIS (Kosinussignal)

$$i(t) = A_i \cdot \cos(2\pi B_i \cdot (t - C_i))$$

$$\circ \rightarrow \underline{I}(f) \stackrel{f \geq 0}{=} \frac{A_i}{2} \cdot \delta(f - B_i) \cdot e^{-j \cdot C_i}$$

$$\underline{Z}_{\cos}(f) = \frac{A_v}{\underbrace{A_i}_{|Z(f)|}} \cdot \delta(f - B_i/v) \cdot e^{-j \frac{C_v - C_i}{\underbrace{Z(f)}}}$$

GITT (Pulssignal)

$$i(t) = A_i \cdot \text{rect}\left(\frac{t - C_i}{B_i}\right)$$

$$\circ \rightarrow \underline{I}(f) = A_i \cdot B_i \cdot \text{sinc}(\pi B_i f) \cdot e^{-j 2\pi f C_i}$$

$$\underline{Z}_{\text{rect}}(f) = \frac{A_v \cdot B_v}{\underbrace{A_i \cdot B_i}_{|Z(f)|}} \cdot \frac{\text{sinc}(\pi B_v f)}{\text{sinc}(\pi B_i f)} \cdot e^{-j 2\pi f \frac{C_v - C_i}{\underbrace{Z(f)}}}$$



$$\underline{Z}(f) = \frac{V(f)}{I(f)} = |\underline{Z}(f)| \cdot e^{j \cdot \angle \underline{Z}(f)} = \text{Re}\{\underline{Z}(f)\} + j \cdot \text{Im}\{\underline{Z}(f)\} \approx \frac{\text{FFT}(v(t))}{\text{FFT}(i(t))}$$

Abbildung 24 Zusammenhang zwischen EIS Messungen und Pulsmessungen

Ein Tool zur Analyse und Auslegung von Pulsmessungen, wie in Abbildung 25 zu sehen, wird Bestandteil dieser Veröffentlichung sein.

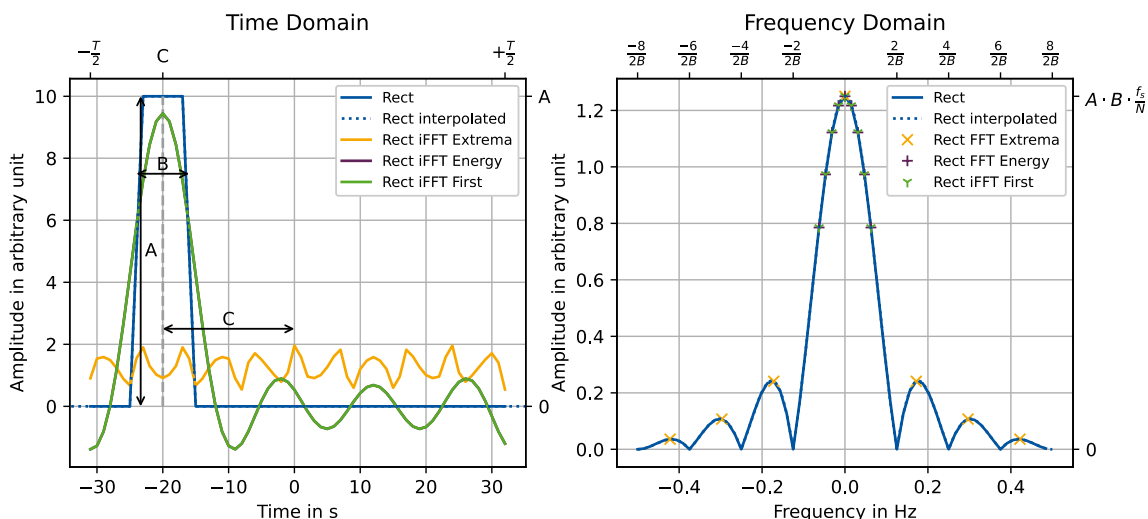


Abbildung 25 Simulationstool zur Pulsanalyse im Frequenzbereich

3. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Ergebnisse dieses Projekts wurden erfolgreich auf internationalen Konferenzen und in hochrangigen Journalen veröffentlicht. Anschlussprojekte zusammen mit der Industrie sind in Bearbeitung und weitere in Planung. Die Verwertbarkeit und Markt-reife ist hier als hoch einzustufen. Sowohl die Software, als auch die beschafften Aufbauten werden daher im weiteren Verlauf in Auftragsforschungsprojekten und auch Dienstleistungsprojekten mit der Industrie eingesetzt. Speziell die Fragestellung des Einflusses der Alterung bedarf weitere Untersuchungen.

4. Während der Laufzeit bekannt gewordene, relevante Ergebnisse Dritter

Der Erfolg des Projekts wurde nicht durch Ergebnisse Dritter beeinflusst.

5. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Siehe nächste Seiten:

Fachartikel

Lfd. Nr.	Autoren	Titel	Journal, Volume, Issue, Page	DOI	Datum
1	Blömeke, Quade, Jöst, Li, Ringbeck, Sauer	Properties of a Lithium-Ion Battery as a Partner of Power Electronics	24 th EPE'22 ECCE Europe	https://ieeexplore.ieee.org/document/9907759	2022
2	Faber, Buitkamp, Ritz, Börner, Berger, Friedrich, Arzberger, Sauer	A method to determine the specific heat capacity of lithium-ion battery cells using thermal insulation	Power Sources, Volume 583	https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233499	2023
3	Blömeke, Zappen, Ringbeck, Frie, Wasylowski, Sauer	Balancing resistor-based online electrochemical impedance spectroscopy in battery systems: opportunities and limitations	Communications Engineering, Volume 3, Issue 1	https://doi.org/10.1038/s44172-024-00203-6	2024
4	Blömeke, Kappelhoff, Wasylowski, Ringbeck, Sauer	Open source online electrochemical impedance spectroscopy data analytics tool	Power Sources, Volume 615	https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.235049	2024
5	Blömeke, Borges, Sonnet, Hörschemeyer, Wasylowski, Ringbeck, Sauer	Battery Heater Board for Precise Temperatures During Tests	HardwareX	Eingereicht am 22.06.2024	

Konferenzbeitrag

Lfd. Nr.	Autoren	Titel	Typ (Poster, Präsentation)	Konferenz/Tagung	Datum
1	Blömeke, Hebing, Sauer	Data compression techniques applied to long-term recordings of battery data from electric vehicles	Poster	Advanced Battery Power Conference 2021	2021

2	Blömeke, Kappelhoff, Brandauer, Sauer	An Overview of Fitting Methods for Electrochemical Impedance Spectroscopy Data	Poster	Advanced Battery Power Conference 2022	2022
3	Sauer, Blömeke	Impact of power electronics on battery operation	Präsentation	EPE'22 ECCE Europe	2022
4	Blömeke, De Doncker, Sauer	System Architecture Requirements for Online Impedance Spectroscopy	Poster	9. mobilEM Colloquium	2022
5	Blömeke, Zappen, Ringbeck, Frie, Wasylowski, Krause, Sauer	Balancing Resistor-Based Online Electrochemical Impedance Spectroscopy	Präsentation	Advanced Battery Power Conference 2024	2024

Open Source Datensatz/Software/Hardware

Lfd. Nr.	Autoren	Titel	Datensatz/Software/Hardware	Lizenz	DOI	Datum
1	Blömeke, Borges, Sonnet, Hörnschemeyer, Sauer	Battery Heater Board	Hardware	CC BY 4.0	https://doi.org/10.18154/RWTH-2024-05877	2024
2	Blömeke, Kappelhoff, Sauer	EIS Data Analytics	Software	MIT License	https://doi.org/10.18154/RWTH-2024-03849	2024

Ort

Datum

Unterschrift

Sachlich richtig