Sachbericht zum Verwendungsnachweis
Teil I - Kurzbericht
im BMBF Rahmenprogramm
„Vom Material zur Innovation“

Vorhabenbezeichnung: QuaLiZell – Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse von sicherheitskritischen Aspekten in der Lithium-Ionenzellproduktion	
Zuwendungsempfänger: Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Angewandte Materialien – Energiespeichersysteme (IAM-ESS)	**Förderkennzeichen** 03XP0355A
Projektleiter Dr. Lea Leuthner	**Berichtszeitraum** 01.03.2021 - 30.06.2024

Beteiligte Projektpartner:

- Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
  Institut für Produktionstechnik (wbk)

- Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)
  Produktionsforschung (ECP)

- TU Braunschweig (TU BS)
  Institut für Ökologische und Nachhaltige Chemie (IÖNC)

- RWTH Aachen
  Lehrstuhl und Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA)

- Hochschule Aalen (HSAA)
  Institut für Materialforschung Aalen (IMFAA)

1. Ursprüngliche Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher und technischer Stand

Das Projekt QuaLiZell hatte das Ziel, die Qualitätssicherung in der Batteriezellproduktion zu optimieren, indem sicherheitsrelevante Fehlerquellen identifiziert, Toleranz- und Eingriffsgrenzen bestimmt und geeignete In-Line-Methoden zur Echtzeit-Erkennung von Produktionsfehlern entwickelt wurden.
Obwohl viele deutsche Forschungseinrichtungen in der Batterieforschung aktiv sind, beschränken sich die Tests meist auf den Labor-Maßstab und kleinformatige Testzellen. Für eine effektive Zellfertigung in Deutschland müssen diese Tests jedoch auf industrielle Größen umgestellt werden, um einen zuverlässigen Wissenstransfer zwischen Forschung und Industrie zu gewährleisten und die Erkenntnisse in die Massenproduktion einfließen zu lassen. Es fehlt an Erfahrungswerten aus industrienaher Fertigung, die eine präzise Abschätzung der Qualitätsmerkmale für Zellen im Industriemaßstab ermöglichen. Produktionslinien, die den Anforderungen und der Zellqualität einer industriellen Fertigung entsprechen, sind daher unerlässlich. Ein besonderer Aspekt des Projekts war die Nutzung der halbautomatisierten Handfertigungslinie für großformatige Pouchzellen am KIT-Batterietechnikum. Diese Linie ermöglichte die Herstellung von Zellen mit hochreproduzierbarer Qualität und industrienahen Eigenschaften und bot gleichzeitig ein hohes Maß an Flexibilität. Dadurch konnten gezielte und quantifizierbare Eingriffe in den Fertigungsprozess vorgenommen werden, um Zwischenprodukte und Fertigungsschritte zu manipulieren und Zellen in Industriequalität analysiert werden, bei denen sich der Einfluss bewusst eingebauter Fehler deutlich von der allgemeinen Qualitätsstreuung abhob.

2. Ablauf des Vorhabens

Das Projekt gliederte sich in mehrere Phasen:

- **Fehlerklassifizierung:** Zu Beginn wurden mögliche Fehlerarten identifiziert und Proben gezielt manipuliert, um Fehlerbilder mittels optischer Verfahren zu untersuchen. Diese Ergebnisse flossen in einen Fehlerkatalog ein. Ein clusterübergreifender FMEA-Workshop mit Partnern des AQua- und des InZePro-Clusters bildete eine wichtige Grundlage für die Erstellung des Kataloges.
- **Einflussanalyse:** Laborpouchzellen sowie großformatige Demonstrator-Zellen mit gezielt eingebrachten Fehlern wurden gefertigt und deren elektrochemisches Verhalten mit fehlerfreien Referenzzellen verglichen. Die Zellen wurden verschiedenen elektrochemischen Charakterisierungsmethoden unterzogen, sodass ein genaueres Verständnis der Fehlerauswirkungen und der dadurch bedingten Sicherheitsrisiken oder Verkürzungen der Lebensdauer erlangt und eine Quantifizierung der Toleranz- und Eingriffsgrenzen der Fehler ermöglicht wurde.
- **In-Line Sensorik:** Erkenntnisse wurden für den Einsatz in einer In-Line Sensorik während des Formierschrittes mittels Qualitätsregelkarten übertragen. Ein Assistent für die Qualitätsüberwachung in der manuellen Fertigung wurde etabliert, der die Stapelgenauigkeit mittels Kameraüberwachung erfasst.

3. Wesentliche Ergebnisse sowie Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

- **Fehlerklassifizierung:** Ein umfassender Fehlerkatalog wurde erstellt, der relevante Fehlerquellen und deren Schweregrad dokumentiert. Der Katalog enthält neben der Beschreibung und optischen Dokumentation der Fehlerbilder auch eine Einstufung der Schwere der Fehler sowie Informationen zur Quantifizierung.
- **Einflussanalyse:** Es wurde festgestellt, dass einige Fehlerbilder, trotz gravierender optischer Auffälligkeiten, keine signifikanten elektrochemischen Auswirkungen haben. Die Schnittkantenqualität und die Freisetzung von Partikeln wurden als kritische Faktoren identifiziert.
- Neben der elektrochemischen Charakterisierung wurden Methoden wie Impedanzspektroskopie und Auflichtmikroskopie in Kombination mit Maschinellem Lernen eingesetzt, um Toleranz- und Eingriffsgrenzen zu definieren.
- **In-Line Sensorik:** Ein System zur Qualitätsüberwachung wurde entwickelt, das Fehlerzellen mittels Qualitätsregelkarten während der Formierung identifizieren kann. Gemeinsam mit dem Projektpartner der TU Braunschweig wurde eine Diagnostik für zellinterne Fehler mittels Impedanzspektroskopie in Kombination mit maschinellem Lernen zur Erkennung von mit Metallpartikeln kontaminierten Fehlerzellen erarbeitet.

Die Zusammenarbeit des KIT-IAM-ESS mit den Forschungspartnern des QuaLiZell-Konsortiums (KIT-wbk, Hochschule Aalen-IMFAA, TU Braunschweig-IÖNC, ZSW und RWTH-ISEA) war für die erfolgreiche Durchführung des Projekts entscheidend.
Des Weiteren ist der wertvolle Austausch innerhalb des AQua-Clusters, insbesondere mit dem Projekt KritBat, hervorzuheben. Ebenso ist der intensive Dialog mit dem im InZePro-Cluster angesiedelten Projekt AgiloBat von Bedeutung.
Die gewonnenen Erkenntnisse sollen in die Forschungsfertigung Batteriezelle (FFB) übertragen werden, um die industrielle Massenproduktion zu beschleunigen.

Sachbericht zum Verwendungsnachweis
Teil II – Eingehende Darstellung
im BMBF Rahmenprogramm
„Vom Material zur Innovation“

Vorhabenbezeichnung: QuaLiZell – Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse von sicherheitskritischen Aspekten in der Lithium-Ionenzellproduktion	
Zuwendungsempfänger: Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Angewandte Materialien – Energiespeichersysteme (IAM-ESS)	**Förderkennzeichen** 03XP0355A
Projektleiter Dr. Lea Leuthner	**Berichtszeitraum** 01.03.2021 - 30.06.2024

Beteiligte Projektpartner:

- Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
  Institut für Produktionstechnik (wbk)

- Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)
  Produktionsforschung (ECP)

- TU Braunschweig (TU BS)
  Institut für Ökologische und Nachhaltige Chemie (IÖNC)

- RWTH Aachen
  Lehrstuhl und Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA)

- Hochschule Aalen (HSAA)
  Institut für Materialforschung Aalen (IMFAA)

1 Ausführliche Darstellung der im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Arbeiten mit Vergleich zur ursprünglichen Vorhabenbeschreibung

Das Projekt QuaLiZell widmete sich der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse von sicherheitskritischen Aspekten in der Lithium-Ionen-Zellproduktion. **Abbildung 1** zeigt eine Übersicht der grundsätzlichen Vorgehensweise im Gesamtvorhaben. Im Zentrum der Untersuchungen standen Fehler, die beim Schneiden und Stapeln der Elektroden und des Separators auftreten können. Ein weiterer wesentlicher Aspekt der Untersuchungen war die Entstehung und der Einfluss von Partikelkontaminationen. Zu Beginn des Projekts wurde eine Klassifizierung potenzieller Fehler durchgeführt. Hierbei wurden zunächst mögliche Fehlerarten identifiziert und anschließend Zellkomponenten gezielt manipuliert, um die resultierenden Fehlerbilder mittels verschiedener optischer Verfahren zu analysieren. Diese Ergebnisse flossen in den ersten Meilenstein ein.
Im weiteren Verlauf des Projekts wurde der Einfluss dieser Fehler auf die Sicherheit und Leistungsfähigkeit von Pouch-Zellen untersucht. Hierfür wurden zahlreiche Laborpouchzellen mit gezielt eingebrachten Fehlern gefertigt und deren elektrochemisches Verhalten mit dem von fehlerfreien Referenzzellen verglichen. Zur weiteren Charakterisierung wurden Methoden wie Impedanzspektroskopie, Laserscanning-Mikroskopie, in situ Raman-Mikroskopie und Hi-Pot-Tests eingesetzt. Ziel war es, neben einem besseren Verständnis der Fehlerwirkmechanismen, die Toleranz- und Eingriffsgrenzen der untersuchten Fehler zu definieren. Diese Ergebnisse flossen in den zweiten Meilenstein ein.
Der dritte große Baustein des Projekts, der gleichzeitig den dritten Meilenstein darstellte, war der Transfer der gewonnenen Erkenntnisse für einen möglichen Einsatz in einer In-Line-Sensorik. Entlang der Prozesskette wurden sowohl anlagenseitige als auch prozessseitige Ansätze für eine Qualitätsüberwachung in Betracht gezogen.

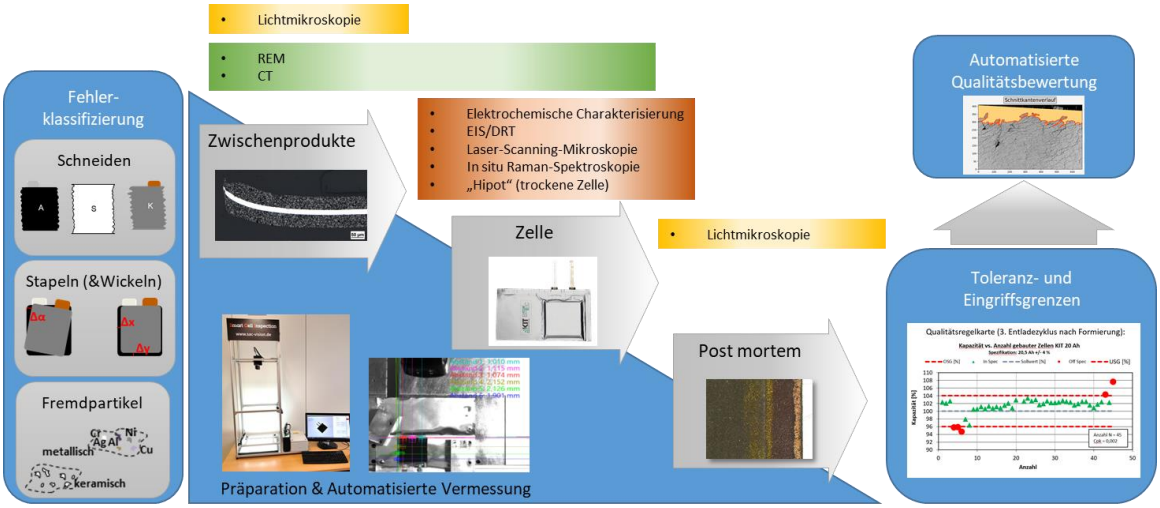
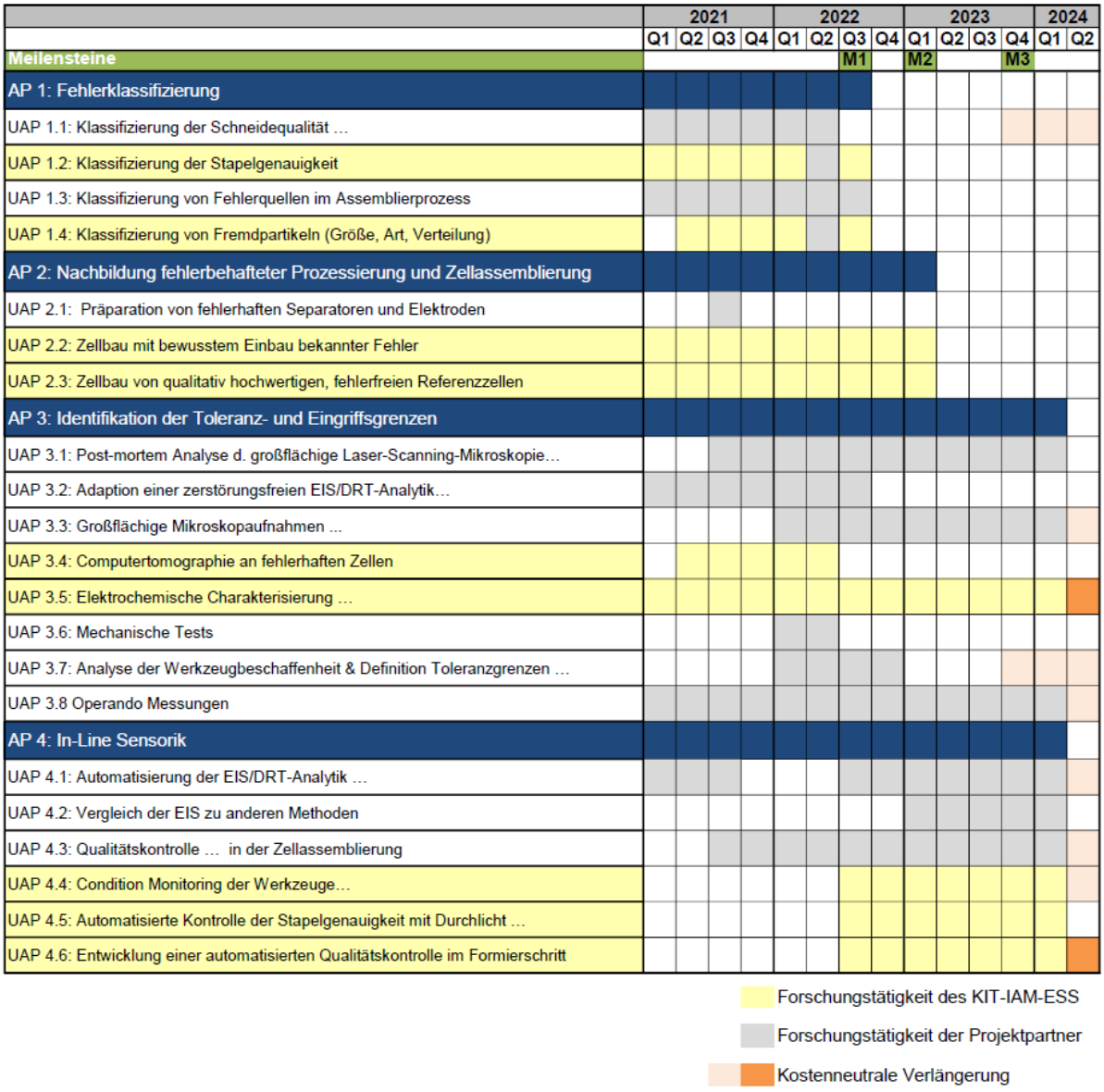


Abbildung 1 Schematischer Überblick der grundlegenden Vorgehensweise im Projekt QuaLiZell.

Im Folgenden wird zunächst ein Überblick über die AP-übergreifenden Tätigkeiten des KIT-IAM-ESS gegeben, die eine grundlegende Basis für den Erfolg des Projekts QuaLiZell bildeten. Anschließend werden die durchgeführten Arbeiten in den Arbeitspaketen unter Beteiligung des KIT-IAM-ESS (im Arbeitsplan **Tabelle 1** gelb markiert) sowie die daraus resultierenden wichtigsten Ergebnisse sowie insbesondere die erreichten Meilensteine vorgestellt.

Tabelle 1 Arbeitsplan im Projekt QuaLiZell. UAPs mit Beteiligung des KIT-IAM-ESS sind gelb markiert.



1.1 Aufbau eines Referenzsystems und Bereitstellung der Referenzmaterialien (AP-übergreifend)

Eine Voraussetzung für das Erreichen des Projektziels war die Identifikation sicherheitsrelevanter Fehlerquellen in den Produktionsschritten sowie die Quantifizierung ihrer Toleranz- und Eingriffsgrenzen. Dafür war ein verlässliches Referenzsystem mit geringer Streuung notwendig, um Zwischenprodukte und Fertigungsschritte gezielt und quantifizierbar zu manipulieren.

Zellchemie

Zunächst wurde das Referenzsystem der KIT-Zellen mit NCM111 als Kathodenmaterial und Graphit als Anode verwendet. Diese Zellen waren bereits umfassend charakterisiert und dienen dem KIT-Batterietechnikum seit mehreren Jahren als Standardzellen. Die verwendeten Materialien sind Industrieware mit gleichbleibender Qualität, die in großen Mengen kommerziell bezogen wurden.

In Hinblick auf das geplante Referenzsystem der FFB Münster mit NCM622//Graphit wurden ebenfalls Proben mit diesen Materialien getestet. Dafür wurden eine kommerzielle Graphit-Anode und eine kommerzielle NCM622-Kathode erworben und Laborpouchzellen mit diesen Elektroden gefertigt und elektrochemisch getestet. Da diese Elektroden zuvor noch nicht in der KIT-Zelle verwendet worden waren, erfolgte zunächst eine umfassende Charakterisierung.
Abbildung 2a und **b** zeigt den Verlauf der absoluten und relativen Entladekapazitäten von jeweils drei Pouchzellen mit NMC111 und NMC622 Zellchemie. Die geringe Streuung demonstrierte die hohe Reproduzierbarkeit der Zellassemblierung und gewährleistete die Zuverlässigkeit der Referenzzellen für die Bewertung der Fehlerzellen. Eine Übersicht der Referenzsysteme ist **Tabelle 2** zu entnehmen.

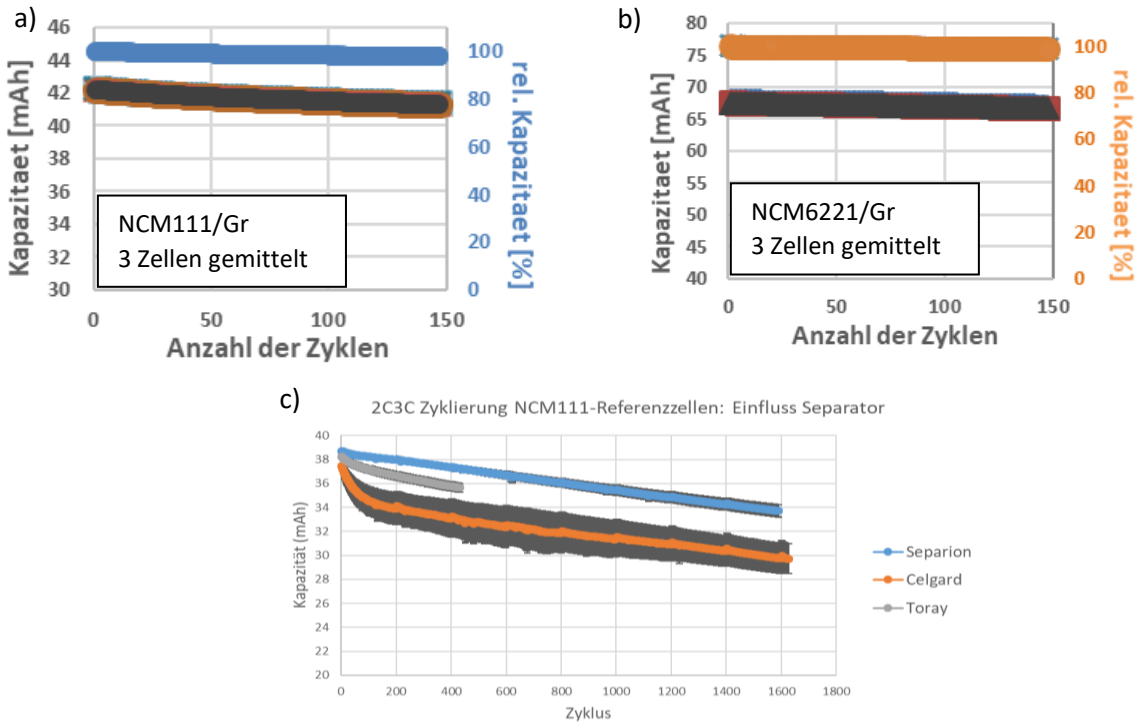


Abbildung 2 Verlauf der Entladekapazität der Referenzzellen mit NCM111 (a) und NCM622 (b) Zellchemie bei 1C1C Zyklierung. c) Vergleich der Entladekapazitäten von NCM111 Referenzzellen mit unterschiedlichen Separatoren. Gezeigt sind die Mittelwerte aus jeweils drei Zellen mit Fehlerbalken.

Tabelle 2 Übersicht der beiden in QuaLiZell verwendeten Referenzsysteme.

	Referenzsystem I	**Referenzsystem II**
Zellchemie	Gr / **NCM111**	Gr / **NCM622**
Separator	Separion	Separion
Elektrolyt	LP30 + VC 3 wt%	LP30 + VC 3 wt%
$Q_{Nominal}$	44 mAh	73,5 mAh

Rolle des Separators
Im Projektverlauf zeigte sich, dass der Separator die Performance und Reproduzierbarkeit der Referenzzellen maßgeblich beeinflusst. Verschiedene Separatoren wurden verglichen (siehe **Tabelle 3** und **Abbildung 2c**). Der standardmäßig vom KIT-IAM-ESS verwendete Separator (Separion) bietet höchste

Reproduzierbarkeit und geringe Streuung der elektrochemischen Daten. Allerdings entsprechen seine Materialeigenschaften nicht den in der Industrie üblichen, dünneren PE-Separatoren. Ein weiterer Separator von Toray, der in kommerziellen High-Performance-Zellen verwendet wird, zeigte ebenfalls geringe Streuung und war aufgrund seiner geringen Schichtdicke vielversprechend für die Untersuchung von Fremdpartikeln und Mikrokurzschlüssen. Ein Separator von Celgard wurde ebenfalls untersucht, zeigte jedoch eine stärkere Streuung, möglicherweise aufgrund schlechterer Benetzungseigenschaften. Post-mortem-Untersuchungen überladener Zellen zeigten eine stärkere lokale Abhängigkeit der Li-Dendritenverteilung bei der Verwendung des Celgard-Separators, was für die Analyse gezielt eingebauter Fehler nützlich ist.
Basierend auf den Ergebnissen wurde der Separion-Separator im Projekt für elektrochemische Charakterisierungen und Langzeitzyklierungen eingesetzt. Der Toray-Separator fand Anwendung bei der Untersuchung von Fremdpartikeln, während der Celgard-Separator für post-mortem-Untersuchungen von Lithium-Plating verwendet wurde.

Tabelle 3 Übersicht der untersuchten Separatoren.

Name	Material	Dicke	Trocknungstemperatur
Separion	Al_2O_3 + PET	28 µm	180 °C
Toray	PE tri-layer	9 µm	80 °C
Celgard	PP/PE/PP	25 µm	60 °C

1.2 Klassifizierung der Stapelgenauigkeit (UAP 1.2)

In UAP 1.2 präparierte das KIT-IAM-ESS Musterproben von fehlerhaft gefertigten Elektrodenstapeln mit verschiedenen Fehlerbildern und unterschiedlicher Qualität. Es wurden einlagige (1 Kathode, 1 Separator, 1 Anode) sowie mehrlagige Stapel unter trockenen Bedingungen im Trockenraum hergestellt. Verschiedene Fehlerbilder (Verschieben und Verdrehung der Komponenten in der Stapelebene sowie Qualitätsschwankungen der Beschichtungskante) wurden erzeugt und fehlerfreie Referenzproben hergestellt. Eine Übersicht der erzeugten Fehler ist **Abbildung 3** zu entnehmen. Anschließend wurden die Präparate dem Projektpartner Hochschule Aalen-IMFAA zur Verfügung gestellt, welcher die Fehler charakterisiert und katalogisierte. Des Weiteren wurden Präparate in UAP 2.2 zu Zellen verarbeitet und schließlich in UAP 3.4 und 3.5 weiter charakterisiert.

1.3 Klassifizierung von Fremdpartikeln (UAP 1.4)

Auf Basis einer durchgeführten Expertenumfrage mit Vertretern aus Industrie und Wissenschaft im Bereich der Zellfertigung sowie der Ergebnisse eines Cluster-übergreifenden FMEA-Workshops mit Wissenschaftlern des InZePro-Clusters wurden folgende Fehlerausprägungen als wahrscheinlichste Kontaminationsformen identifiziert und anschließend klassifiziert:

- Cu-Partikel auf Anode
- Cu-Partikel auf Kathode
- Al-Partikel auf Kathode
- Al-Partikel auf Anode

- Fe-Partikel auf Anode
- Fe-Partikel auf Kathode
- Stahlpartikel auf Kathode
- Anoden-Stanzreste auf Kathode
- Kathoden-Stanzreste auf Anode

Um die Toleranzfenster für die unterschiedlichen Kontaminationen einzugrenzen, wurde die Stärke der Verunreinigungen mittels eines simulierten Reinigungsprozesses variiert (siehe **Abbildung 4**). Es wird dabei zwischen „leicht gereinigten“ Proben (stärkere Kontamination) und „gereinigten“ Proben (geringe Kontamination) unterschieden.

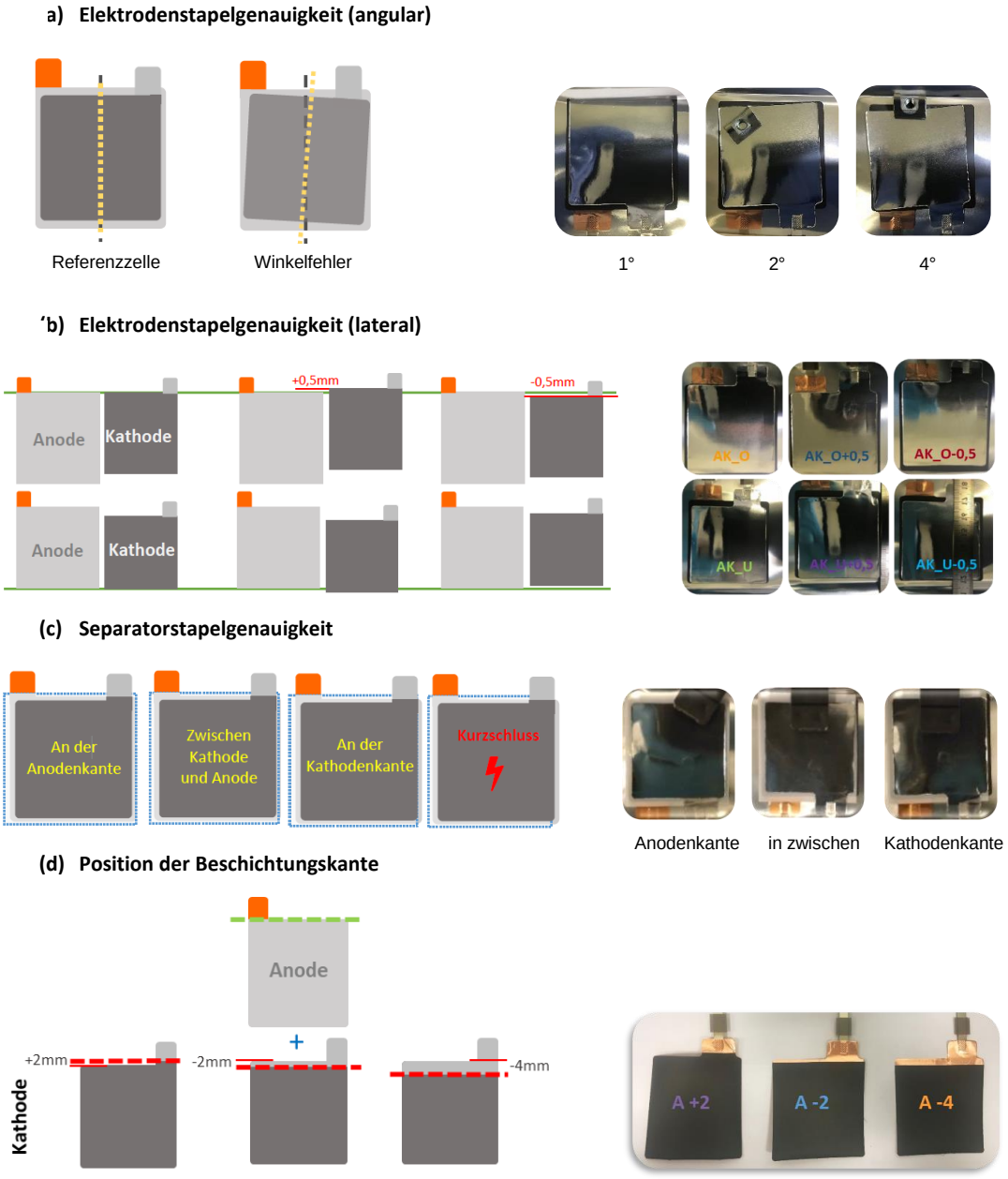


Abbildung 3 Konfiguration (links) und Fotos (rechts) von untersuchten Stapelfehlern. a) Angulare Verschiebung der Kathode, b) laterale Verschiebung der Kathode, c) laterale Verschiebung des Separators, d) Position der ableiterseitigen Beschichtungskante der Anode.

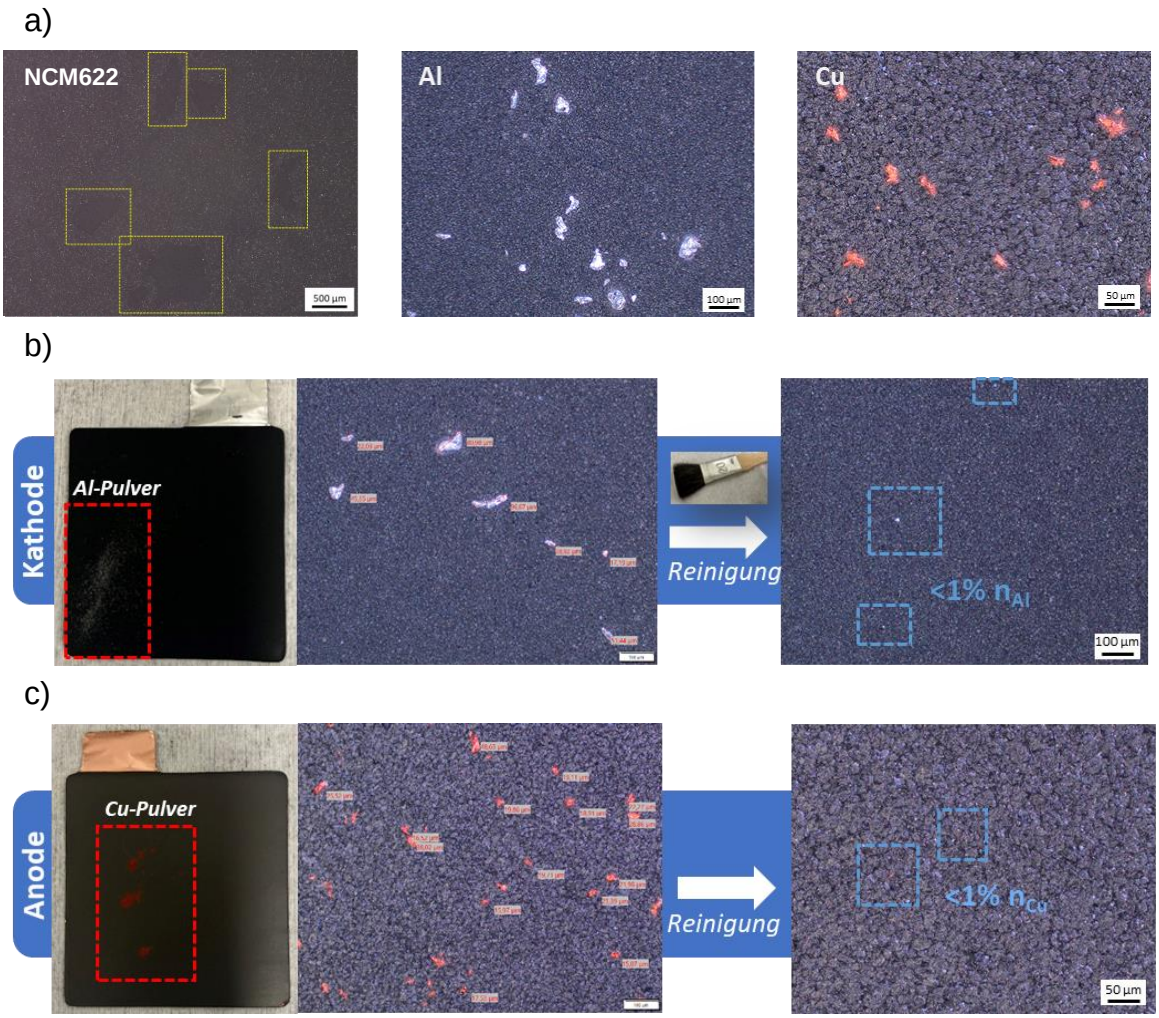


Abbildung 4 a) Lose NCM622-, Al- und Cu-Partikel auf der Oberfläche einer Elektrode vor dem Reinigen. Effekt des Reinigens auf die Partikelverteilung von b) Al-Pulver und c) Cu- Pulver.

1.4 Zellbau von Fehlerzellen und Referenzzellen (UAP 2.2 & 2.3)

Im weiteren Verlauf des Projekts wurde der Einfluss der Fehler auf die Sicherheit und Performance von Pouch-Zellen untersucht. Zu diesem Zweck wurden zahlreiche Laborpouchzellen mit gezielt eingebrachten Fehlern gefertigt und deren elektrochemisches Verhalten in AP3 mit dem von fehlerfreien Referenzzellen verglichen. Insgesamt wurden >500 Laborpouchzellen sowie weitere großformatige Pouchzellen gebaut und getestet. Diese wurden in AP3 verschiedenen Charakterisierungsmethoden unterzogen, sodass ein genaueres Verständnis der Fehlerauswirkungen und der dadurch bedingten Sicherheitsrisiken oder Verkürzungen der Lebensdauer erlangt und eine Quantifizierung der Toleranz- und Eingriffsgrenzen der Fehler ermöglicht wurde.

1.5 Computertomographie an fehlerhaften Zellen (UAP 3.4)

Es erfolgt eine Zuarbeit an den Projektpartner KIT-wbk durch Präparation von Zellen von KIT-IAM-ESS.

1.6 Elektrochemische Charakterisierung (Formierung und Zyklierung) fehlerhafter Zellen (UAP 3.5)

Durch elektrochemische Tests prüfte das KIT-IAM-ESS die Fähigkeit zur Formation der Zellen und testete anschließend die Zellperformance und -alterung unter verschiedenen Bedingungen (Temperatur, C-Rate). In enger Zusammenarbeit mit den Konsortialpartnern wurden die Analysen durch deren Charakterisierungsmethoden wie großformatige Mikroskopie, Impedanzspektroskopie, Laserscanning-Mikroskopie, in situ Raman Mikroskopie und Hi-Pot Tests ergänzt, um ein umfassendes Gesamtbild zu erhalten. Neben einem besseren Verständnis der Fehlerwirkmechanismen sollten damit die Toleranz- und Eingriffsgrenzen der untersuchten Fehler definiert werden. Die Ergebnisse flossen in den zweiten Meilenstein ein.
Die wichtigsten Ergebnisse der elektrochemischen Analysen des KIT-IAM-ESS waren wie folgt.

Schneidefehler
Um den Einfluss der Schneidequalität bei Elektroden zu untersuchen, wurden diese mittels eines speziell geformtem Bandstahlschnittes vereinzelt. (siehe Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.). Beispielhaft sind in Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. die Kapazitätsverläufe von Zellen, deren Kathodenschnittkantenqualität variiert wurde, gezeigt. Um das Toleranzfester grob einzuschätzen, wurde zunächst ein extrem ausgeprägtes „worst case“ Fehlerbild erzeugt, indem das Schneidemesser manuell abrasiv abgestumpft wurde. Ein Teil der Zellen wurde mit Kathoden gefertigt, deren Schnittkante mit frischer Klinge geschnitten wurden, wohingegen ein anderer Teil der Zellen Kathoden beinhaltet, deren Schnittkante mit der extrem geschädigten Klinge geschnitten wurden.

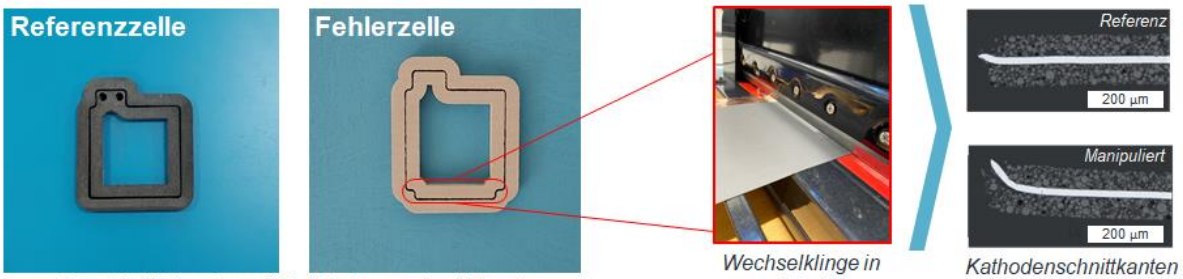


Abbildung 5 Speziell gefertigte Bandstahl-Stanzformen für die gezielte Manipulation einer Elektrodenschnittkante.

Die Zyklierdaten zeigen, dass die Schnittkantenqualität der Kathoden in diesem Fall keinen Einfluss auf die Zellperformance hat. Ein vergleichbares Ergebnis liefern Zellen, deren Anodenschnittkantenqualität variiert wurde. Es ist an dieser Stelle jedoch anzumerken, dass wenngleich die Ergebnisse eine Toleranz der untersuchten Schnittkantenqualität bezüglich der Zellperformance implizieren, die optische Analyse der Schnittkanten (**Abbildung 5**, rechts) deutliche Hinweise auf eine verminderte Sicherheit der Zellen gibt. Es ist davon auszugehen, dass es bei schlecht geschnittenen Elektroden zu vermehrtem Auftreten von Delamination und Abplatzungen des Beschichtungsmaterials kommt. Darüber hinaus stellt der entstehende Stromsammlergrat insbesondere im Kontext mehrlagiger Zellen, in denen höhere Drücke während der Produktion sowie im Betrieb auftreten, ein erhöhtes Sicherheitsrisiko für die Schädigung der sensitiven Separatoren dar.

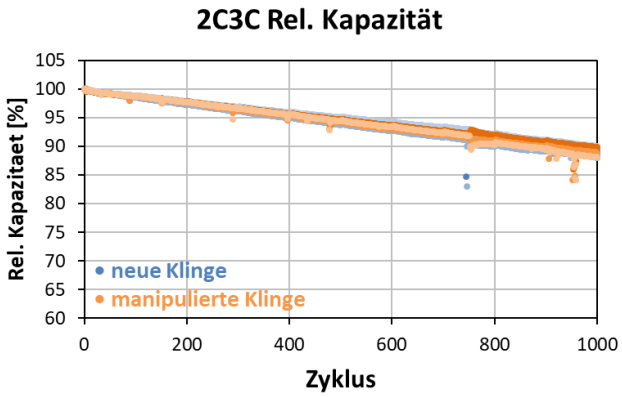


Abbildung 6 Verlauf der Entladekapazitäten von Zellen mit Kathoden, deren Schnittkante mit frischer Klinge und Kathoden, deren Schnittkante mit extrem geschädigter manipulierter Klinge geschnitten wurden.

Neben Qualitätsschwankungen der Schnittkanten, welche in erster Linie auf Verschleißerscheinungen der verwendeten Werkzeuge sowie nicht optimal gewählte Schneideparameter zurückzuführen sind, wurde auch der Einfluss der Schneideposition bezüglich der Beschichtungskante untersucht. Diese kann durch eine fehlerhafte Linienführung der Elektronenbahnen auftreten und resultiert in einer nicht exakten Position der Beschichtungskante entlang der Ableiterseite. **Abbildung 3d** zeigt Elektroden, die mit unterschiedlich starker Abweichung der Schneidposition vereinzelt wurden und infolgedessen unterschiedlich starke Abweichungen der Beschichtungsfläche aufweisen.
Abbildung 7 zeigt den Verlauf der Entladekapazität solcher Zellen im Vergleich mit dem der Referenzzellen. Beeinträchtigungen der Zellperformance können erwartungsgemäß dann beobachtet werden, wenn die Beschichtungskante keine vollständige Überlappung mehr zwischen Anode und Kathode gewährleistet. Die verwendeten Elektroden weisen im Normalfall eine umlaufende Überdimensionierung der Anode von 2 mm gegenüber der Kathode auf. Fehlerzellen, deren Anodenbeschichtungskante ohne Überschuss auf der Kathodenkante liegt (A-2) liefern zwar noch eine mit den Referenzzellen vergleichbare Kapazität, weisen aber bei höheren Zyklenzahlen eine schnellere Alterung auf. Liegt die Beschichtungskante innerhalb der Kathodenkante (A-4), kommt es zu deutlichen Kapazitätseinbußen. Eine Verschiebung der Beschichtungskante in positive Richtung (A+2) wirkt sich geringfügig auf eine stärkere zyklische Alterung aus, was auf irreversible Li-Verluste zurückzuführen ist.

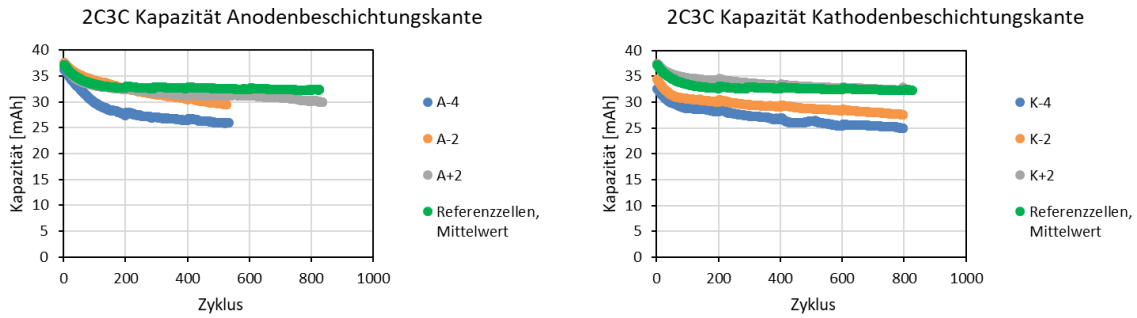


Abbildung 7 Verlauf der Entladekapazität von Zellen, deren Anoden (links) und Kathoden (rechts) mit unterschiedlich starker Abweichung der Schneidposition vereinzelt wurden und welche infolgedessen unterschiedlich starke Abweichung der Beschichtungsfläche aufweisen.

Kathodenseitig kommt es bei negativen Abweichungen der Beschichtungskante (K-2 und K-4) zu zunehmend stärkeren Kapazitätsverlusten. Eine schnellere zyklische Alterung bei starker Abweichung (K-4) kann auf eine in Folge des Materialverlustes zunehmende Diskrepanz zwischen der verwendeten C-Rate und der tatsächlichen Kapazität zurückgeführt werden. Eine Verschiebung der Beschichtungskante in positive Richtung (K+2) scheint keine Auswirkungen zu haben.
Die Präparation von Separator-Sheets mit manipulierten Schneideklingen konnte zeigen, dass die Separatorausführung (Komposition, Aufbau und Dicke) einen wesentlichen Einfluss darauf hat, inwiefern entstehende Defekte wie beispielsweise die Welligkeit auftreten und sich auf die Zellperformance auswirken.
Abbildung 8 zeigt hierzu deutlich, dass beim Einsatz unbeschichteter PE/PP/PE-Separatoren (Celgard) die entstehende Welligkeit signifikante Einbußen der Entladekapazität und eine beschleunigte und unsystematische Degradation der Zellen bewirkt, wohingegen die Zellen mit keramisch beschichteten PET-Separatoren wie dem Separion keine Auffälligkeiten zeigten.

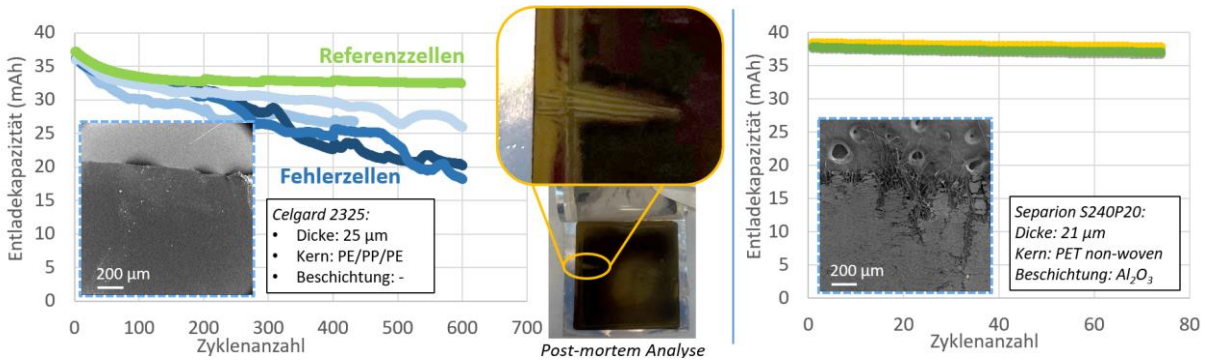


Abbildung 8 Untersuchung des Einflusses der Separator-Schnittkantenqualität auf die Zellperformance für PE/PP-Separator (links) und PET-Separator (rechts). Als Referenz dienten Zellen der 1. Generation mit NCM111 Zellchemie. Die Post-mortem Analyse zeigt, dass die schlechte Performance der Fehlerzellen mit Celgard-Separator auf ausgeprägte Welligkeiten der Schittkante zurückzuführen ist. Ein solches Fehlerbild konnte bei Separion-Separator nicht nachgewiesen werden.

Die post-mortem Analyse zeigt, dass sich das Auftreten der Wellen im Separator nicht nur auf die äußeren Bereiche der Schnittkante beschränkt, sondern, dass sich aufgrund der Spannung im Material Wellenstrukturen in weitere Bereiche in das Inneren des Stapels fortpflanzen. Diese Strukturen führen zu heterogenen Druckverhältnissen und Benetzungs- und Diffusionseigenschaften und infolgedessen zu lokal unterschiedlich starken Stromdichten. Folgen davon sind Kapazitätseinbuße und Li-Plating, welches schlimmstenfalls zu einem Durchgehen der Zelle führt.

Stapelfehle
Im Projekt wurde eine neuartiges optisches Messystem aufgebaut und in Betrieb genommen, welches es ermöglicht, die Positionierung der Zellkomponenten während des manuellen Assemblierprozesses in Echtzeit zu überwachen und gegebenenfalls zu korrigieren (**Abbildung 9**). Dieser wurde für die Untersuchung von Stapelfehlern zur Hilfe genommen und Laborzellen mit den in AP1 klassifizierten Defekten (**Abbildung 3**) gefertigt.

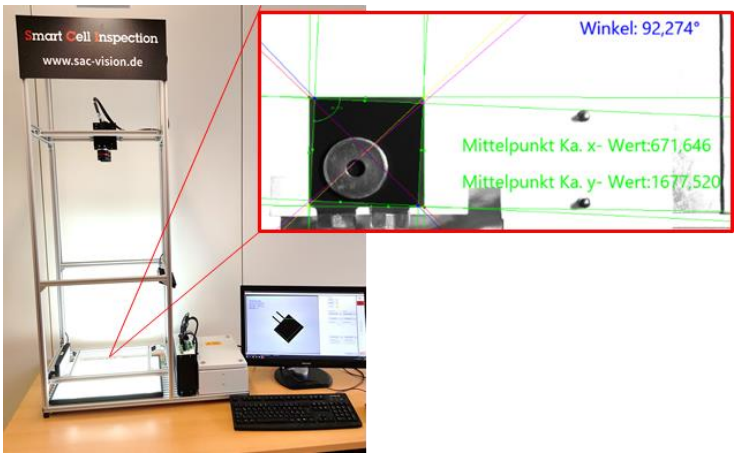


Abbildung 9 Präparation von Laborpouchzellen mit rotierten Elektroden mit Hilfe des optischen Messaufbaus zur automatisierten Überwachung der manuellen Zellassemblierung und Vermessung der Probengeometrie.

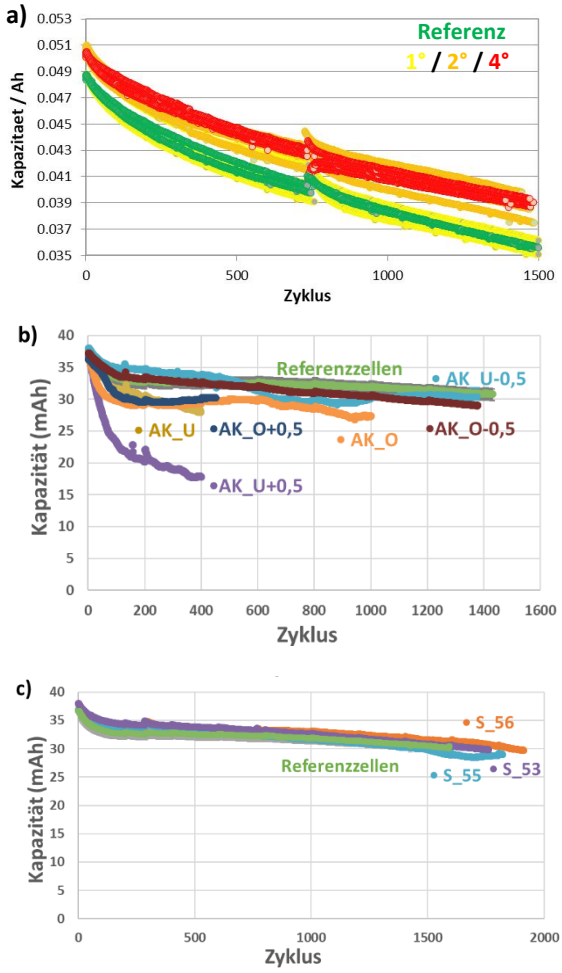


Abbildung 10 Verlauf der Entladekapazität von Zellen mit a) rotierter Kathode, b) lateral verschobener Anode oder Kathode, c) lateral verschobenem Separator.

Abbildung 10 zeigt den Verlauf der Entladekapazitäten als Funktion der Zyklenzahl. Zellen mit Rotationsfehler weisen unerwartet eine höhere Kapazität gegenüber den Referenzzellen auf, was auf eine durch die Rotation bedingte Senkung des Innenwiderstands in den Randbereichen der Elektroden zurückgeführt wird.

Dies steht im Einklang mit an den Zellen durchgeführten DC-Widerstandsmessungen. Zellen mit lateral verschobener Kathode weisen starke Kapazitätsunterschiede auf, welche außerhalb eines tolerierbaren Bereichs liegen. Zellen mit lateral verschobenen Separatoren zeigen keine Auffälligkeiten gegenüber den Referenzzellen. Dies ist auf die Überdimensionierung des Separators zurückzuführen. Zellen mit fehlerhafter Stanzposition der Anode und dementsprechend fehlerhaft beschichtetem Anodenrand zeigen sichtbare Abweichungen gegenüber den Referenzzellen.

Partikelkontamination

Die Herstellung und elektrochemische Analyse zahlreicher Fehlerzellen mit metallischen Partikelkontaminationen ermöglichte eine systematische Untersuchung verschiedener Parameter und elektrochemischer Kenngrößen in Abhängigkeit der Zellqualität. Eine Übersicht aussagekräftiger Daten zeigt **Abbildung 11**. Die Untersuchungen zeigen, dass die unterschiedlichen Partikeltypen und Kontaminationsgrade unterschiedlich starken Einfluss auf die Zellperformance aufweisen.

Die Anwesenheit von Cu-Partikeln auf der Anode hat einen gravierenden Einfluss auf die Leistung der Lithium-Ionen-Batteriezellen, selbst bei gereinigten Proben. In einigen Fällen lassen sich die Zellen überhaupt nicht formieren, was auf die Bildung von Mikrokurzschlüssen und die daraus resultierende Selbstentladung zurückzuführen ist. Wenn eine Formierung gelingt, zeigen die meisten Zellen mit kontaminierten Anoden eine eingeschränkte Performance, eine deutlich schnellere Degradation sowie eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für Mikrokurzschlüsse. Diese Effekte sind auf die elektrochemische Reaktivität von Kupfer zurückzuführen, das in die Elektrolytlösung diffundieren und unerwünschte Nebenreaktionen verursachen kann.

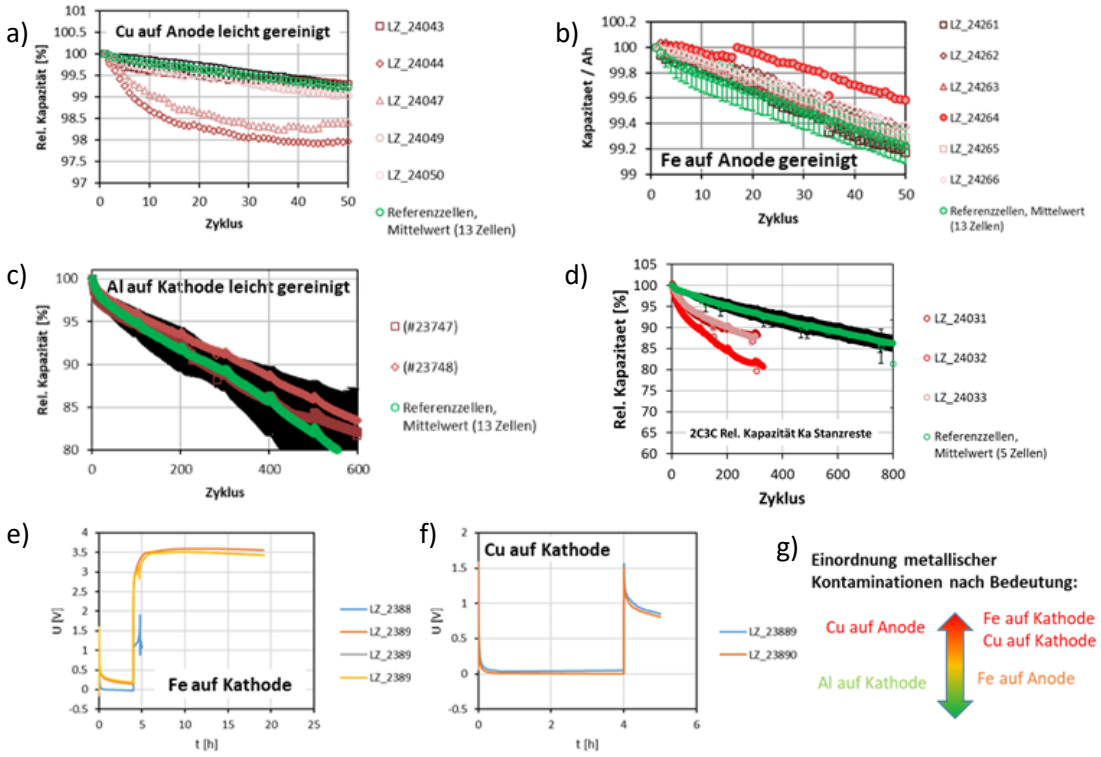


Abbildung 11 Übersicht beispielhafter elektrochemischer Daten von Fehlerzellen mit Partikelkontamination im Vergleich zu Referenzzellen. a) Cu auf Anode leicht gereinigt, b) Fe auf Anode gereinigt, c) Al auf Kathode leicht gereinigt, d) Kathoden-Stanzreste auf Anode, e) Fe auf Kathode gereinigt, f) Cu auf Kathode gereinigt, g) Einordnung der Kontamination nach Bedeutung für Zellperformance.

Ähnliche Einschränkungen der Performance und Zyklenstabilität sind bei Zellen festzustellen, deren Anoden mit Fe kontaminiert sind. Eisenpartikel können ebenfalls elektrochemisch aktiv sein und die Lebensdauer der Zelle beeinträchtigen.
Im Gegensatz dazu haben Al-Partikel auf der Kathode einen deutlich geringeren Einfluss. Die Zellen zeigen eine hohe Stabilität in den durchgeführten Zyklentests, selbst bei nicht gereinigten Kathoden.
Jedoch haben Fe- und Cu-Kontaminationen auf der Kathode gravierende Folgen für die Zellqualität. Die untersuchten Zellen lassen sich aufgrund von Kurzschlüssen und Selbstentladung nicht formieren.
Die Kontamination der Kathode mit Beschichtungsresten aus dem Stanzprozess, also Agglomerationen von Partikeln der Kathoden- und Anodenbeschichtung, zeigt einen deutlichen Einfluss auf die Zellperformance. An dieser Stelle sei nochmals auf die Ergebnisse der Schnittkantenfehler hingewiesen. Zwar führt die mangelnde Schnittkantenqualität nicht direkt zu einer reduzierten Zellperformance, jedoch stellt sie ein Risiko für das Abplatzen von Beschichtungsmaterial dar. Dieses Material kann als Kontamination in den Zellstapel eingebracht werden und die Zellperformance signifikant beeinträchtigen.

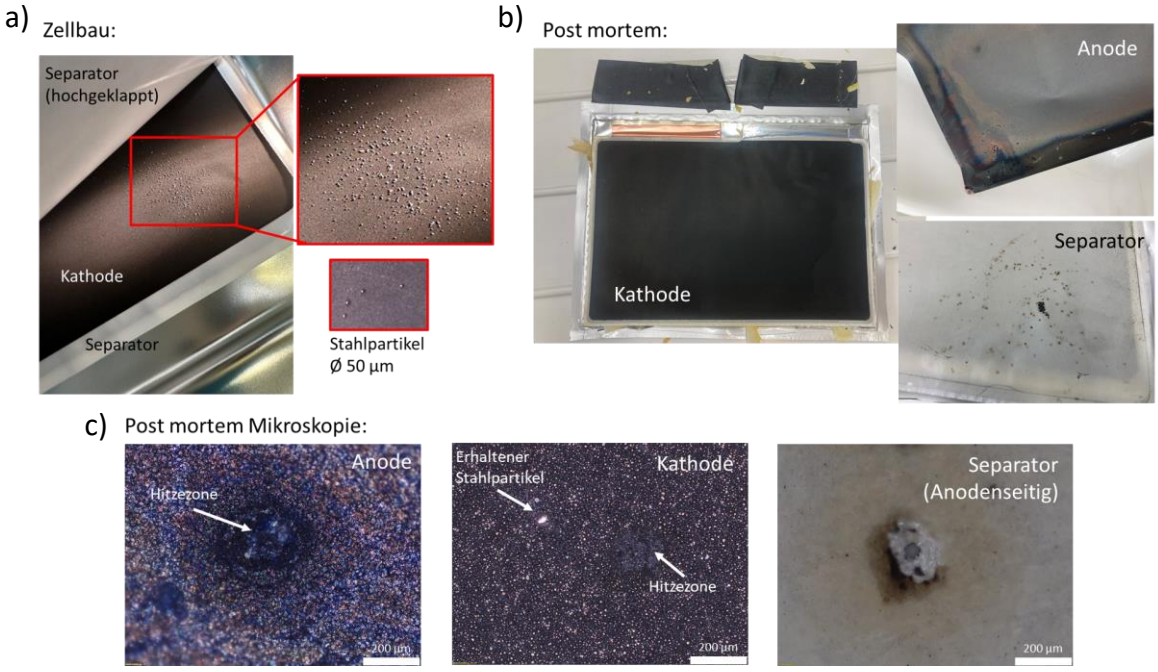


Abbildung 12 Optische Untersuchung von großformatiger Pouchzelle mit Stahl-Kontamination auf Kathode. a) Präparation während des Zellbaus. b) Zellöffnung und optische post mortem Untersuchung. c) Mikroskopische post mortem Analyse.

Es erfolgten weitere Untersuchungen an großformatigen Pouchzellen mit NCM622/Gr-Zellchemie (13.5 Ah). Hierbei wurde jeweils eine Kathode des Zellstapels einseitig mit Stahlpartikeln kontaminiert (**Abbildung 12a**) und das elektrochemische Verhalten mit Referenzzellen verglichen. Die elektrochemischen Daten (**Abbildung 13**) zeigen mit Ausnahme eines geringfügig erhöhten DC-Innenwiderstands ein annähernd identisches Verhalten der Referenz- und Fehlerzellen. Neben dem standardmäßig eingesetzten Separion-Separator wurden auch Zellen mit Celgard-Separator gebaut. Die aktuelle Datengrundlage (Formierung) weist auf ein ähnliches Verhalten der Zellen hin. Zykliertests dieser Zellen, sowie weiterer Zellen mit Toray-Separator laufen aktuell aber noch. Vor allem bei dem deutlich dünneren Separator von Toray wird ein

quantifizierbarer Einfluss der Kontamination erwartet. Die Ergebnisse sollen nach Abschluss der Tests in einer Publikation veröffentlicht werden.
Post mortem Untersuchungen zeigen, dass die Stahlpartikel teilweise zu einer Beschädigung des Separion-Separators geführt und feine Kurzschlüsse zur Folge hatten (**Abbildung 12b**). Mikroskopische Aufnahmen (**Abbildung 12c**) zeigen die Spuren von lokalen Hitzezonen auf der Anode sowie Aufschmelzungen und Verbrennungen des Separators im Bereich der Kurzschlüsse. Bemerkenswerterweise hatten diese Kurzschlüsse keinen Einfluss auf die Zellperformance. Trotz eines Betreibens der Zellen über mehrere Wochen und Zyklen lassen sich noch einige gut erhaltene Stahlpartikel auf der Kathode finden. Eine elektrochemisch bedingte Auflösung der Partikel findet daher nicht statt.

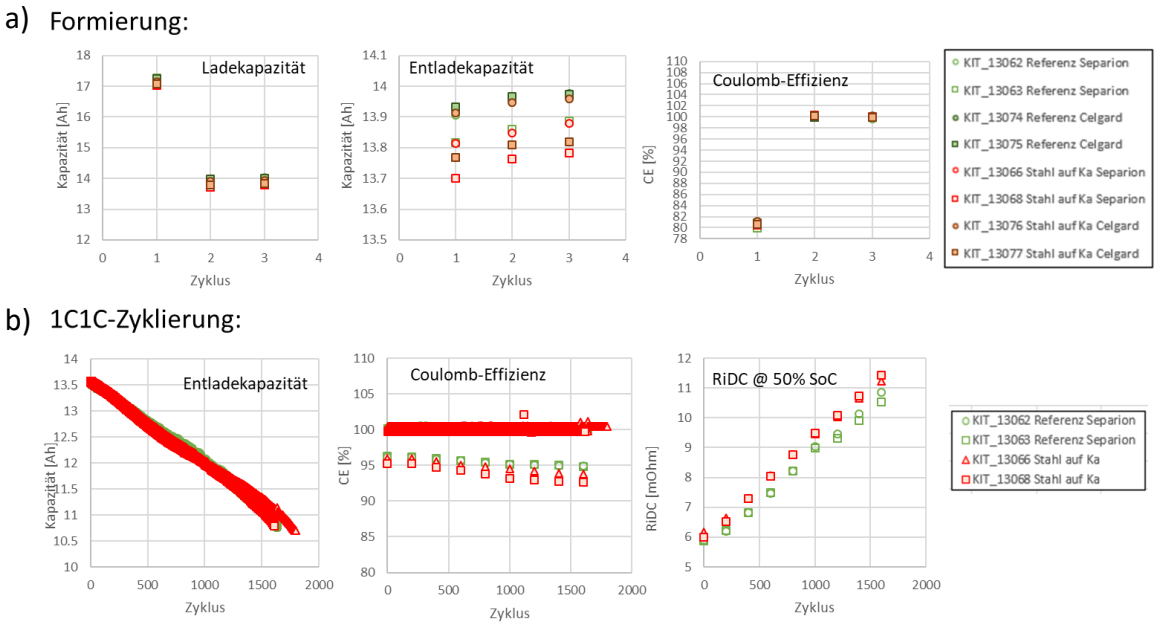


Abbildung 13 Elektrochemische Charakterisierung großformatiger Pouchzellen mit Stahl-Kontamination auf Kathode. a) Formierung, b) Zyklierung.

1.7 Entwicklung einer automatisierten Qualitätskontrolle im Formierschritt (UAP 4.6)

Die elektrochemische Analyse zahlreicher Fehlerzellen mit metallischen Partikelkontaminationen (UAP 2.2 und UAP 3.5) ermöglichte eine systematische Untersuchung verschiedener Parameter und elektrochemischer Kenngrößen in Abhängigkeit der Zellqualität. Dies bietet die Grundlage für eine automatische Erkennung In-Line bereits während der Formierung. Hierbei wurde der mögliche Einsatz von Qualitätsregelkarten geprüft. Qualitätsregelkarten sind ein hilfreiches Werkzeug in der Qualitätssicherung und bieten die Möglichkeit, Proben, die außerhalb eines definierten Toleranzbereichs liegen, zuverlässig zu erfassen.
Bespielhaft werden im Folgenden Ergebnisse von Zellen, welche bewusst mit Cu-Partikeln kontaminiert wurden, vorgestellt. **Abbildung 14** zeigt die Qualitätsregelkarte für die Coulomb-Effizient des 3. Entladezyklus/3. Ladezyklus nach der Formierung von Referenzzellen und Zellen, deren Anoden mit Cu-Partikeln kontaminiert und anschließend „leicht gereinigt“ wurden. Es zeigt sich hier, dass die Daten der

Referenzzellen, mit Ausnahme einer Zelle, bei der gewählten Spezifikation eine sehr geringe Streuung (innerhalb +/- 1%) aufweisen. Die Fehlerzellen liegen hingegen alle außerhalb der Spezifikationsgrenzen. Ein Einfluss des Fehlers ist somit bereits frühzeitig während der ersten Zyklen der Formierung messbar.
Neben Cu-Kontaminationen konnten mithilfe der Qualitätsregelkarten und geeigneten Spezifikationsgrenzen ebenfalls kritische von unkritischen Zellen mit Fe- und Al-Kontaminationen während der Formierung unterschieden werden. Gemeinsam mit dem Projektpartner der TU Braunschweig wurde eine Diagnostik für zellinterne Fehler mittels Impedanzspektroskopie in Kombination mit maschinellem Lernen zur Erkennung von mit Metallpartikeln kontaminierten Fehlerzellen erarbeitet.

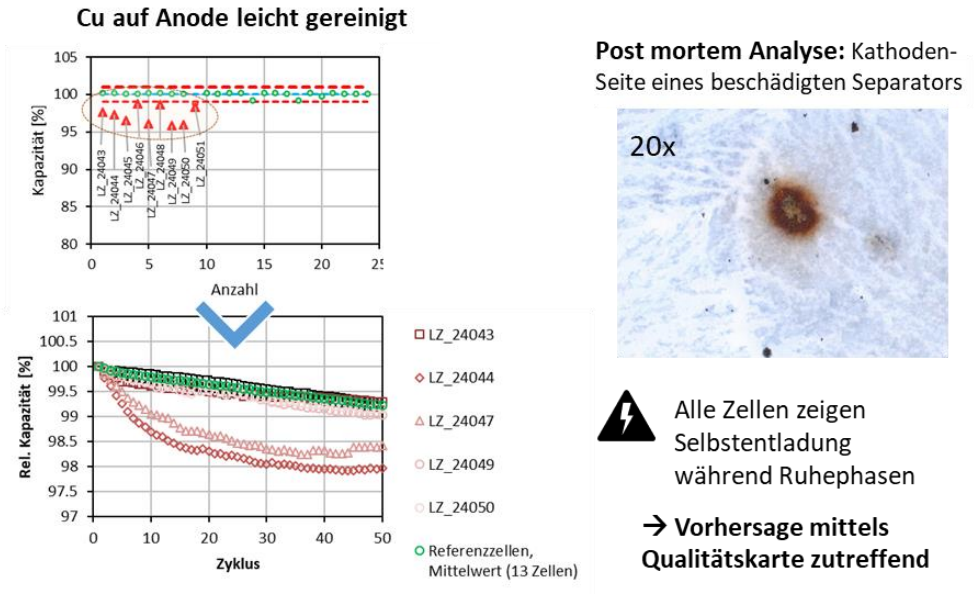


Abbildung 14 Qualitätsregelkarte mit Referenz- und Fehlerzellen. Fehlerzellen beinhalten Anoden, welche mit Cu-Partikeln kontaminiert und „leicht gereinigt“ (oben) beziehungsweise „gereinigt“ (unten) wurden.

1.8 Meilensteine

Meilenstein 1

Ende September 2022 wurde der erste Meilenstein des Projektes erfolgreich erreicht. Systematisch wurden alle relevanten Fehlerquellen im Schneide- und Stapelprozess einer Pouchzellfertigung ermittelt sowie das mögliche Auftreten von Partikelkontamination betrachtet. Vorausgegangen war ein projektübergreifender FMEA-Workshop, bei dem die zu betrachtenden Fehlerquellen in der Pouchzellfertigung in theoretischen Annahmen identifiziert wurden. Auf Basis der dort identifizierten Fehlerquellen wurden in QuaLiZell die Prozessschritte des Vereinzelns und Stapelns tiefergehend betrachtet und experimentell untersucht.
Als Ergebnis liegt nun ein umfangreicher Fehlerkatalog zu den drei Fehlerkategorien (Schneidefehler, Stapelfehler, Partikelkontamination) vor (Auszug aus dem Katalog siehe **Abbildung 15**). Dieser beinhaltet, neben einer detaillierten Beschreibung und einer optischen Dokumentation der Fehlerbilder, Daten zum möglichen Entstehungsort/-prozess, wichtige Informationen zur Quantifizierung der Fehlerausprägung sowie eine Zuordnung der Fehlerklasse, also die Bewertung eines Fehlers anhand seiner Bedeutung für die Sicherheit und Qualität einer Zelle.

3. Partikelkontamination

Nr.	Material	Bild	Beschreibung	Entstehungsort / -prozess	Klasse	Quantifizierung

2. Stapelfehler

Nr.	Material	Bild	Beschreibung	Entstehungsort / -prozess	Klasse	Quantifizierung

1. Schneidefehler

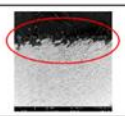
Nr.	Material	Bild	Beschreibung	Entstehungsort / -prozess	Klasse	Quantifizierung
1.1	Anode/ Kathode		Biegung des Ableiters	Mechanische Vereinzelung (Scherschneiden)	3	Absolutwert der Ableiterbiegung gegenüber Nullebene in Tiefe der Ausbrüche in µm
1.2	Separator		Ausbrüche der Beschichtung	Handhabung, Slitten, Vereinzeln	1	Tiefe der Ausbrüche in µm
1.3	Anode /Kathode		Material-abtrag durch Wärme-einfluss	Laserschneiden	2	Tiefe Materialabtrag oben + unten in µm
1.4	Anode /Kathode		Auf-schmelzungen des Strom-sammlers	Laserschneiden	1	Maximale Ableiterdicke in µm
1.5	...					

Abbildung 15 Auszug aus dem Fehlerkatalog.

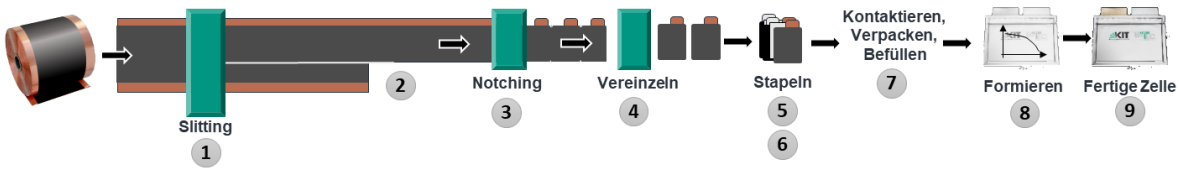
Meilenstein 2

Der zweite Meilenstein beinhaltete die „Bestimmung von Toleranzgrenzen und Ermittlung des Einflusses von Abweichungen auf die Zellperformance und Prüfung der bestimmten Toleranzgrenzen auf ihre Zuverlässigkeit“.
Hierbei wurde festgestellt, dass einige Fehlerbilder in den Randbereichen des Elektrodenstapels, obwohl sie auf den ersten Blick gravierend erschienen, wie beispielsweise größere Verschiebungen in der Stapelgenauigkeit oder Schnittkanten, die mit stark verschlissenem Werkzeug geschnitten wurden, nicht automatisch zu Auffälligkeiten in der Elektrochemie führten. Dies verdeutlicht, dass neben den elektrochemischen Analysen auch optische Analysen von großem Wert sind, da sie wichtige Informationen zu Sicherheitsmängeln liefern, die bei der Definition der Toleranzgrenzen berücksichtigt werden müssen.
Zudem wurde deutlich, dass eine universelle Definition von Toleranzgrenzen nicht realisierbar ist. Die Eigenschaften der Komponenten beeinflussen das jeweilige Fehlerbild so stark, dass für jedes neue Zellsystem, also unterschiedliche Elektrodeneigenschaften oder Separatortypen, jeweils eine neue Analyse erforderlich ist.
Des Weiteren zeigte sich, dass bei der Betrachtung der Schnittkantenqualität nicht ausschließlich die Schnittkante selbst kritisch ist, sondern die dabei freigesetzten Partikel eine besonders große Gefahr darstellen. Diese Partikel besitzen einen deutlich größeren Einfluss auf die Eigenschaften der Zelle, wenn sie als Kontamination eingebracht werden.

Meilenstein 3

Ende Dezember 2023 wurde der dritte Meilenstein des Projektes erfolgreich erreicht. Dieser beinhaltete die „Identifikation kritischer Fehler und Lokalisierung des Fehlerursprungs in der Prozesskette mittels In-Line Sensorik“. Das QuaLiZell-Konsortium hat hierzu ein breites Spektrum von potentiell In-Line-fähigen Untersuchungen und neuartigen Ansätzen verfolgt. Dabei wurden sowohl

anlagenseitige als auch prozessseitige Ansätze für eine Qualitätsüberwachung in Betracht gezogen. **Abbildung 16** gibt einen Überblick der In-Line Methoden und ihren möglichen Einsatz entlang der Prozesskette einer Pouchzellfertigung.



1	Werkzeugüberwachung Rundmesser mittels Lasertriangulationssensor (KIT-wbk)	6	On-the-Fly Positionserkennung Elektroden/Separatorblatt (KIT-wbk)
2	Schnittkantenüberwachung mit Inline Vermessung des Schnittgrates (KIT-wbk)	7	Inline Isolationsprüfungen mittes Hi-Pot-Test (ZSW)
3	Detektion freiliegender Ableiter mit Machine-Learning (HSAA-IMFAA)	8	Qualitätskontrolle im Formierschritt mittels Qualitätsregelkarten (KIT-IAM-ESS)
4	Condition Monitoring der Stanzwerkzeuge mittels Beschleunigungssensor (KIT-wbk)	9	EIS/DRT im EoL-Test (TUBS-IÖNC)
5	Stapelassistent für die manuelle Laborzellfertigung (KIT-IAM-ESS)		

Abbildung 16 Übersicht der eingesetzten In-Line Analytik in Meilenstein 3.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.

Ein Nachweis entsprechend **Tabelle 4** wurde am 07.08.2024 bereitgestellt.

Tabelle 4 Zahlenmäßiger Verwendungsnachweis.

Alle Beträge in Euro (€)

1	2	3	4
Position Gesamtvor-kalkulation	**Entstandene Kosten** insgesamt bis einschl. 2024	**Anerkannte Kosten** insgesamt bis einschl. 2024	**Gesamtvorkalkulation**
0813	79.809,64		122.140,67
0823	0,00		0,00
0837	522.596,50		464.415,28
0838	2.416,31		14.258,00
0847	13.609,99		13.995,00
0848	0,00		0,00
0850	0,00		0,00
0856	0,00		0,00
0860	0,00		0,00
Summe:	618.432,44		614.808,95

		Nachgewiesen	Anerkannt
14 Entstandene Kosten insgesamt **(Summe von Spalte 2)**		618.432,44	
15 Anteil Eigenmittel lt. Vorkalkulation		0,00	
16 Mittel Dritter und Einnahmen lt. Vorkalkulation ohne Zeile 17		0,00	
17 **Weitere** Mittel Dritter und Einnahmen ohne Zeile 16 (gem. NB)	17a) Gesamt 0,00	17b) Bundesanteil= 17a x Förderquote[1] 0,00	
18 Verbleibender Anteil des Bundes (14 ./. 15 ./. 16 ./. 17b)		618.432,44	
19 Zahlung auf Anteil des Bundes		553.328,95	
20 Kassenbestand am 31.05.2024 (19 ./. 18)		-65.103,49	

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten.

Die im Projekt QuaLiZell durchgeführten Arbeiten waren entscheidend, um die Herausforderungen in der Qualitätssicherung und Fehleranalyse von Li-Ionen-Pouchzellen zu bewältigen. Die umfassende Fehleranalyse und die Entwicklung reproduzierbarer Routinen für Referenzzellen haben eine solide Grundlage für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten geschaffen.
Die gezielte Untersuchung und Klassifizierung von Fehlern ermöglichte es, die Qualität und Performance der Zellen zu verbessern und kritische Fehlerquellen zu identifizieren. Dies ist besonders wichtig für die Skalierung der Produktion und die Sicherstellung einer hohen Produktqualität in der Massenproduktion.
Für den Industriestandort Deutschland sind diese Arbeiten von großer Bedeutung, da sie die Wettbewerbsfähigkeit in der Hochtechnologiebranche stärken und die Innovationskraft fördern. Der Austausch mit Industriepartnern sowie das Feedback der Industrievertreter aus dem Managementkreis des AQua-Clusters unterstreichen die Relevanz und den praktischen Nutzen der Projektarbeiten.

4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses – auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

4.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Trotz fortschrittlicher Inspektionssysteme bleibt die Fehlererkennung, insbesondere bei der Massenproduktion, eine große Herausforderung. Die Implementierung von KI-basierten Systemen erfordert umfangreiche Trainingsdaten und kontinuierliche Anpassungen, um die Genauigkeit stetig zu verbessern.
Die im Projekt QuaLiZell erzielten Ergebnisse, insbesondere die umfangreiche Datengrundlage der durchgeführten Zelltests (über 500 Laborpouchzellen), bieten einen erheblichen Mehrwert für zukünftige Datenbanken. Zudem wurde im Laufe des Projekts ein großer Erfahrungsschatz in der gezielten Vorbereitung von Qualitätsunterschieden aufgebaut, der die Grundlage für weitere Experimente im Bereich der Fehleranalyse und Qualitätssicherung bildet.
Im Rahmen der für das Transfermodul der CGoIn-Förderung eingereichten Projektskizze „QM-Expert System“ (Akronym: QM-ExSys) streben wir gemeinsam mit unserem Industriepartner BMW sowie den Partnern der FFB Münster den Aufbau einer solchen Datenbank und weiterführende Untersuchungen an.
Ein weiterer kritischer Punkt ist die Skalierung der Produktion. Das Projekt QuaLiZell trägt zur Bewältigung dieser Herausforderungen bei, indem es die Untersuchungen zur Identifikation und Analyse von Fehlern vom Labormaßstab auf industrienahe, großformatige Pouchzellen überträgt.

4.2 Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten

Die Vorarbeiten im Projekt QuaLiZell haben ein weites Feld für zukünftige Analysen und Forschungsthemen eröffnet. Die umfassende Fehleranalyse hat aufgezeigt, welche Fehlerklassen die Qualität und Performance von Li-Ionen-Pouchzellen stärker und welche sie weniger stark beeinflussen. Es wurden reproduzierbare Routinen für die Herstellung fehlerfreier Referenzzellen mit geringer Streuung sowie Zellen mit gezielt eingebrachten, quantifizierbaren Qualitätsmängeln entwickelt, die in

zukünftigen Untersuchungen eingesetzt werden können. In kommenden Projekten können die als besonders kritisch identifizierten Fehlerklassen weiter analysiert werden, um die Wirkmechanismen noch detaillierter zu verstehen.
Die im Projekt QuaLiZell erzielten Ergebnisse, insbesondere die umfangreiche Datengrundlage von über 500 Laborpouchzellen, bieten einen erheblichen Mehrwert für zukünftige Datenbanken. Im Rahmen der für das Transfermodul der CGoIn-Förderung eingereichten Projektskizze „QM-Expert System“ (Akronym: QM-ExSys) streben wir gemeinsam mit unserem Industriepartner BMW sowie den Partnern der FFB Münster den Aufbau einer solchen Datenbank und weiterführende Untersuchungen an.
Die in QuaLiZell verwendete Methodik lässt sich auch auf Post-Li-Systeme übertragen, was einen Wissenstransfer zum Exzellenzcluster „Energy Storage beyond Lithium“ (POLiS) ermöglicht.
Ein weiteres Forschungsprojekt könnte darauf abzielen, die Erkenntnisse aus QuaLiZell in die Praxis umzusetzen und die In-Line-Sensorik weiter zu optimieren. Dies könnte die Entwicklung neuer Sensoren und Algorithmen umfassen, die in der Lage sind, Fehler in Echtzeit zu erkennen und zu korrigieren. Zudem könnten zukünftige Projekte die Integration von Recyclingprozessen in die Zellproduktion, beispielsweise in Zusammenarbeit mit dem Projekt „LiBinfinity“ mit der Mercedes-Benz AG, zu den Themen „Batterierecycling“ und „Re-Synthese“ untersuchen, um die Nachhaltigkeit weiter zu verbessern.

5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen.

Moderne Qualitätssicherungssysteme nutzen eine Kombination aus optischen Inspektionsmethoden und Künstlicher Intelligenz (KI), um Fehler frühzeitig zu erkennen und zu beheben.
Ein Beispiel für ein fortschrittliches System ist das Halodome des Fraunhofer IOSB, das auf KI- und Kamera-basierter Fehlererkennung basiert. Dieses System verwendet Anomaliedetektion, um Abweichungen von intakten Prüfobjekten zu identifizieren. Durch die Kombination von visueller Inspektion und automatisierter Bildanalyse können Fehler wie Risse, Verunreinigungen oder Beschädigungen der Zellhülle zuverlässig erkannt werden. Solche Systeme sind in der Lage, auch kleinste Defekte zu identifizieren, die für das menschliche Auge schwer erkennbar sind, und tragen so zur Verbesserung der Produktionsqualität bei.
Weitere maßgebliche Ergebnisse in der Fehler-Enfluss-Analyse von Li-Ionenzellen gehen aus den im AQua-Cluster angesiedelten Projekte KitBatt und EQ-EL hervor.

6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NABF und NKBF.

Lfd. Nr.	Autoren	Titel	Journal, Volume, Issue, Page	Jahr	Sonstiges
1	X. Liu-Théato, L. Leuthner, S. Schabel, A.	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse bei der Einzelblattstapelbildung von Li-Ionen-Pouchzellen, Poster	Batterieforum Deutschland	2022	

	Smith, H. Ehrenberg				
2	X. Liu-Théato, L. Leuthner, S. Schabel, A. Smith, H. Ehrenberg	Investigation of foreign particles in cell assembly and their effect on long time cycling performance (Poster)	IBPC	2022	
3	X. Liu-Théato, L. Leuthner, S. Schabel, A. Smith, H. Ehrenberg	Investigation of Foreign Particles in Cell Assembly and Their Effect on Long-time Cycling Performance (Poster)	Industrietag des Kompetenzcluster AQua	2022	
4	L. Leuthner, X. Liu-Théato, T. Bergmann, V. Maccio-Figgemeier	Einflussanalyse und frühzeitige Identifikation von Partikelkontamination in der Zellfertigung	Industrietag des Kompetenzcluster AQua	2023	
5	T. Bergmann, B. Zhu, X. Liu-Théato, L. Leuthner	Advanced Classification of Lithium-Ion Battery Defects Using Electrochemical Impedance Spectroscopy and Machine Learning	-	(2025)	In Bearbeitung
6	L. Leuthner, X. Liu-Théato, S. Schabel	Process Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) in Cutting and Stacking of Lithium-ion Cell Assembly	-	(2025)	In Bearbeitung
7	L. Leuthner u.a.	Analysis of Particle metal contamination in large-format Li-Ion Pouch cells	-	(2025)	In Bearbeitung

Sachbericht zum Verwendungsnachweis
Teil III – Erfolgskontrollbericht
im BMBF Rahmenprogramm
„Vom Material zur Innovation“

Vorhabenbezeichnung: QuaLiZell – Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse von sicherheitskritischen Aspekten in der Lithium-Ionenzellproduktion	
Zuwendungsempfänger: Karlsruher Institut für Technologie (KIT) 12163635	**Förderkennzeichen** 03XP0355A
Projektleiter Dr. Lea Leuthner	**Berichtszeitraum** 01.03.2021 - 30.06.2024

Beteiligte Projektpartner:

- Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
  Institut für Produktionstechnik (wbk)

- Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)
  Produktionsforschung (ECP)

- TU Braunschweig (TU BS)
  Institut für Ökologische und Nachhaltige Chemie (IÖNC)

- RWTH Aachen
  Lehrstuhl und Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA)

- Hochschule Aalen (HSAA)
  Institut für Materialforschung Aalen (IMFAA)

1. Beitrag des Ergebnisses zum Dachkonzepts des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) zur Batterieforschung

Eine große Herausforderung, welcher sich der BMBF-Kompetenzcluster AQua widmete, ist die bislang fehlende Standardisierung und Datengrundlage in der Qualitätssicherung bei der Herstellung von Li-Ionen-Zellen. Die in der Fachliteratur publizierten Daten zu Qualitätskriterien von Materialien und Zellkomponenten sind häufig widersprüchlich und nur schwer miteinander zu vergleichen, da es bisher weder eine einheitliche Datenbasis für Materialien und Zellen noch standardisierte Arbeitsabläufe für Probenvorbereitung, Analyseverfahren und Auswerteroutinen gibt.
Die im Projekt QuaLiZell erzielten Ergebnisse, insbesondere die umfangreiche Datengrundlage der durchgeführten Zelltests (über 500 Laborpouchzellen), bieten einen erheblichen Mehrwert für zukünftige Datenbanken.
Im Rahmen der für das Transfermodul der CGoIn-Förderung eingereichten Projektskizze „QM-Expert System“ (Akronym: QM-ExSys) streben wir gemeinsam mit unserem Industriepartner BMW sowie den Partnern der FFB Münster den Aufbau einer solchen Datenbank und weiterführende Untersuchungen an.
Die hier gewonnenen Ergebnisse werden für die im Rahmen des Dachkonzeptes angestrebten Ziele in der Weiterentwicklung der in-line Qualitätskontrollen verwendet, damit in zukünftige Batteriezellfabriken kritische Einflussgrößen in Echtzeit während der Fertigung kontrolliert und Zwischenprodukte unmittelbar nach dem jeweiligen Prozessschritt überprüft werden können. So kann möglichen Prozessstörungen frühzeitig entgegengewirkt werden und Ausfälle und damit verbundene Kostensteigerungen vermieden werden.
Aktuell fließen die Ergebnisse bereits in den im InZePro-Cluster angesiedelten Projekt AgiloBat in den Aufbau und die Weiterentwicklung der flexiblen Pouchzellfertigung der Karlsruher Forschungsfabrik ein

2. Wissenschaftlich-technisches Ergebnis des Vorhabens, die erreichten Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen

Eine detaillierte Beschreibung ist Teil II des Abschlussberichtes zu entnehmen. Hier sind die wichtigsten Ergebnisse kurz zusammengefasst.

Aufbau Referenzsystem (AP-übergreifend)

Eine Voraussetzung für das Erreichen des Projektziels war die Identifikation sicherheitsrelevanter Fehlerquellen in den Produktionsschritten sowie die Quantifizierung ihrer Toleranz- und Eingriffsgrenzen. Dafür war ein verlässliches Referenzsystem mit geringer Streuung notwendig, um Zwischenprodukte und Fertigungsschritte gezielt und quantifizierbar zu manipulieren. Das KIT-IAM-ESS fertigte zu diesem Zweck Pouchzellen mit NCM111/Graphit- und NCM622/Graphit-Zellchemie und charakterisierte diese umfassend. Diese Zellen dienten als Referenzsystem und ermöglichten eine fundierte Vergleichsgrundlage für die weiteren Untersuchungen im Projekt. Die Ergebnisse zeigten eine geringe Streuung, was die hohe Reproduzierbarkeit der Zellassemblierung in der Fertigungslinie des KIT-Batterietechnikums demonstrierte. Es wurde festgestellt, dass der Separator die Performance und Reproduzierbarkeit der Zellen maßgeblich beeinflusst. Daher wurden für unterschiedliche Analysen jeweils geeignete Separator-Typen ausgewählt.

AP1 Fehlerklassifizierung
Zu Beginn wurden mögliche Fehlerarten identifiziert und Proben gezielt manipuliert, um Fehlerbilder mittels optischer Verfahren zu untersuchen. Diese Ergebnisse flossen in einen Fehlerkatalog ein. Ein clusterübergreifender FMEA-Workshop mit Partnern des AQua- und des InZePro-Clusters bildete eine wichtige Grundlage für die Erstellung des Kataloges.

AP2 und AP3 Nachbildung fehlerbehafteter Prozessierung und Zellassemblierung mit anschließender Identifikation der Toleranz- und Eingriffsgrenzen
Laborpouchzellen sowie großformatige Demonstrator-Zellen mit gezielt eingebrachten Fehlern wurden gefertigt und deren elektrochemisches Verhalten mit fehlerfreien Referenzzellen verglichen. Die Zellen wurden verschiedenen elektrochemischen Charakterisierungsmethoden unterzogen, sodass ein genaueres Verständnis der Fehlerauswirkungen und der dadurch bedingten Sicherheitsrisiken oder Verkürzungen der Lebensdauer erlangt und eine Quantifizierung der Toleranz- und Eingriffsgrenzen der Fehler ermöglicht wurde.

AP4 In-Line Sensorik
Ein System zur Qualitätsüberwachung wurde entwickelt, das Fehlerzellen mittels Qualitätsregelkarten während der Formierung identifizieren kann. Gemeinsam mit dem Projektpartner der TU Braunschweig wurde eine Diagnostik für zellinterne Fehler mittels Impedanzspektroskopie in Kombination mit maschinellem Lernen zur Erkennung von mit Metallpartikeln kontaminierten Fehlerzellen erarbeitet.

3. Fortschreibung des Verwertungsplans. Diese soll, soweit im Einzelfall zutreffend, Angaben zu folgenden Punkten enthalten (Geschäftsgeheimnisse des Zuwendungsempfängers brauchen nicht offenbart zu werden):

a. Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte, die vom Zuwendungsempfänger oder von am Vorhaben Beteiligten gemacht oder in Anspruch genommen wurden, sowie deren standortbezogene Verwertung (Lizenzen u.a.) und erkennbare weitere Verwertungsmöglichkeiten.

Keine.

b. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) – z. B. auch funktionale/wirtschaftliche Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen, Nutzen für verschiedene Anwendergruppen / -industrien am Standort Deutschland, Umsetzungs- und Transferstrategien

- Die gewonnenen Daten zu Referenz- und Fehlerzellen können für KI-basierte Ansätze und Datenbanken zur Verfügung gestellt werden (Zeithorizont bis 5 Jahre).
- Die Projektmitarbeiter stehen im regelmäßigen Austausch mit der Dr. Schenk GmbH, einem mittelständischen Unternehmen und Spezialist in der industriellen Bildverarbeitung für die Qualitätskontrolle. Die Ergebnisse des

Projektes werden der Firma für die Weiterentwicklung ihrer Bildverarbeitungssysteme zur Verfügung gestellt. (Zeithorizont bis 5 Jahre)

- Die Projektmitarbeiter stehen im regelmäßigen Austausch mit der SAC Sirius Advanced Cybernetics GmbH, einem mittelständischen Unternehmen und Spezialist für professionelle Bildverarbeitungslösungen für die Qualitätskontrolle. Die Ergebnisse des Projektes werden der Firma für die Weiterentwicklung ihrer Bildverarbeitungssysteme zur Verfügung gestellt. (Zeithorizont bis 5 Jahre)

c. Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) – u. a. wie die geplanten Ergebnisse in anderer Weise (z. B. für öffentliche Aufgaben, Datenbanken, Netzwerke, Transferstellen etc.) genutzt werden können. Dabei ist auch eine etwaige Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen, Firmen, Netzwerken, Forschungsstellen etc. darzustellen

- Das im Rahmen des Projektes aufgebaute und in Betrieb genommene optische Messsystem mit Labor-Stativ für die Dokumentation, Vermessung und optische Analyse von Zellkomponenten und Pouchzellen wird in zukünftigen Projekten als automatischer Stapelassistent für die manuelle Assemblierung in der Pouchzellfertigung dienen. Das System kann flexibel auf- und umgerüstet werden, sodass es für weitere Fragestellungen der automatisierten Vermessung, Probenanalyse und Qualitätskontrolle eingesetzt werden kann. Die erfassten Messdaten zu Probengeometrie und Assemblierqualität liegen digital vor und können für Datenbanken und KI-gestützte Anwendungen zur Verfügung gestellt werden.
- Das im Rahmen des Projektes aufgebaute Referenzsystem sowie die Einführung der entsprechenden Qualitätsregelkarten für die interne Qualitätssicherung dienen einer zukünftig verbesserten Qualität der Zellfertigung des KIT-Batterietechnikums.
- Für Folgeprojekte, die sich mit der Fehleranalyse beschäftigen (eingereichte CGoIn-Skizzen: QM-ExSys und InPace) wurde eine systematische Präparationsroutine für die gezielte, reproduzierbare und quantitative Manipulation von Zellkomponenten und Pouchzellen entwickelt.
- Die bereits gewonnenen Daten zu Referenz- und Fehlerzellen können für KI-basierte Ansätze und Datenbanken in Folgeprojekte zur Verfügung gestellt werden.

d. Tabellarische Zusammenfassung von a-c

Lfd. Nr.	Bezeichnung	Zeithorizont
1	Bereitstellung von Datensätzen für KI-basierte Ansätze und Datenbanken	Bis 5 Jahre nach Projektende
2	Bereitstellung von Datensätzen für KMU und Spezialisierung der industriellen Bildverarbeitung für die Qualitätskontrolle und Sensorentwicklung	Bis 5 Jahre nach Projektende
3	Einsatz des optischen Messsystems als automatischer Assistent für die manuelle Zellassemblierung	>5 Jahre nach Projektende

4. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der Ergebnisse

Die Vorarbeiten im Projekt QuaLiZell haben ein weites Feld für zukünftige Analysen und Forschungsthemen eröffnet. Die umfassende Fehleranalyse hat aufgezeigt, welche Fehlerklassen die Qualität und Performance von Li-Ionen-Pouchzellen stärker und welche sie weniger stark beeinflussen. Es wurden reproduzierbare Routinen für die Herstellung fehlerfreier Referenzzellen mit geringer Streuung sowie Zellen mit gezielt eingebrachten, quantifizierbaren Qualitätsmängeln entwickelt, die in zukünftigen Untersuchungen eingesetzt werden können. In kommenden Projekten können die als besonders kritisch identifizierten Fehlerklassen weiter analysiert werden, um die Wirkmechanismen noch detaillierter zu verstehen.
Die im Projekt QuaLiZell erzielten Ergebnisse, insbesondere die umfangreiche Datengrundlage von über 500 Laborpouchzellen, bieten einen erheblichen Mehrwert für zukünftige Datenbanken. Im Rahmen der für das Transfermodul der CGoIn-Förderung eingereichten Projektskizze „QM-Expert System“ (Akronym: QM-ExSys) streben wir gemeinsam mit unserem Industriepartner BMW sowie den Partnern der FFB Münster den Aufbau einer solchen Datenbank und weiterführende Untersuchungen an.
Die in QuaLiZell verwendete Methodik lässt sich auch auf Post-Li-Systeme übertragen, was einen Wissenstransfer zum Exzellenzcluster „Energy Storage beyond Lithium“ (POLiS) ermöglicht.
Ein weiteres Forschungsprojekt könnte darauf abzielen, die Erkenntnisse aus QuaLiZell in die Praxis umzusetzen und die In-Line-Sensorik weiter zu optimieren. Dies könnte die Entwicklung neuer Sensoren und Algorithmen umfassen, die in der Lage sind, Fehler in Echtzeit zu erkennen und zu korrigieren. Zudem könnten zukünftige Projekte die Integration von Recyclingprozessen in die Zellproduktion, beispielsweise in Zusammenarbeit mit dem Projekt „LiBinfinity“ mit der Mercedes-Benz AG, zu den Themen „Batterierecycling“ und „Re-Synthese“ untersuchen, um die Nachhaltigkeit weiter zu verbessern.

5. Angaben zu Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Keine.

6. Angaben über die Einhaltung der Ausgaben- und der Zeitplanung

Die Ausgaben entsprachen der ursprünglichen Planung, mit Ausnahme einer notwendigen Umwidmung (siehe Änderungsbescheid vom 19.07.2021). Die Projektlaufzeit wurde kostenneutral um sechs Monate verlängert (siehe Änderungsbescheid vom 08.02.2024).