

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil 1 – Kurzbericht

| | |
|---|--|
| Vorhabenbezeichnung: KritBatt – In-line Klassifizierung von Beschichtungsfehlern zur Ermittlung der Kritikalität in der Elektrodenherstellung | |
| Zuwendungsempfänger: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen Templergraben 55 52062 Aachen | Förderkennzeichen 03XP0360C |
| Projektleitung Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker | Laufzeit 01.03.2021 - 31.08.2024 |

1. Ursprüngliche Aufgabenstellung

Im Herstellungsprozess von Batterieelektroden sind Beschichtungsfehler trotz moderner Produktionstechnologien nicht vollständig vermeidbar. Insbesondere im skalierten Produktionsbetrieb können solche Fehler zu erhöhten Ausschussraten führen, was sowohl wirtschaftliche als auch qualitative Herausforderungen mit sich bringt. Ein tiefgehendes Verständnis der Fehlerquellen und ihrer Auswirkungen auf die Elektrodenqualität wird somit benötigt, um präventive Maßnahmen zu entwickeln und den Produktionsprozess auf einem hohen Qualitätsniveau zu stabilisieren. Hierfür bedarf es quantifizierbarer und idealerweise allgemeingültiger Kritikalitätskriterien, die eine belastbare Korrelation zwischen den auftretenden Beschichtungsfehlern und deren Einfluss auf die elektrochemischen Eigenschaften der Elektroden herstellen.

Das Forschungsprojekt KritBatt setzt in diesem Spannungsfeld an und umfasst die Untersuchung, Identifizierung und Klassifizierung von Beschichtungsfehlern in der Elektrodenherstellung. Durch systematische Defektgenerierung, Klassifizierung und Funktionsbewertung strebt das Projekt eine Bewertung und Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Fehlertypen in der Elektrodenfertigung an. Die Untersuchungen fokussieren sich dabei auf die Identifikation von Eigenschafts-Strukturbeziehungen, um ein prozessübergreifendes Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Materialien, Fertigungsschritten und der elektrischen Performance von Batterieelektroden zu erlangen. Begleitend werden Qualitätsmaßnahmen und Workflows für die in- und offline Charakterisierung der Batterieelektroden entwickelt. Der Schwerpunkt liegt auf der Erforschung und Evaluation von zwei unterschiedlichen optischen und fertigungsintegrierten Prüf- bzw. Inspektionssystemen für die Elektrodenbeschichtung. Dabei handelt es sich einerseits um ein vorqualifiziertes Laser-Speckle-Photometrie (LSP) System zur in-situ Überwachung der Beschichtungsqualität von Elektrodenfolien und andererseits um ein kommerziell erhältliches Zeilenkamerasystem mit identischem Einsatzzweck. Letzteres dient als Vergleichstechnologie für die Weiterentwicklung und Optimierung des LSP-Systems mit innovativen Fehlererkennungsmethoden. Die im Projektverlauf gesammelten Erkenntnisse sollen zusammenfassend dazu genutzt werden, standardisierte Qualitätsmaßnahmen und Workflows in der in- und offline Überwachung von Elektrodenfolien abzuleiten.

2. Ablauf des Vorhabens

Das Forschungsprojekt gliederte sich in sieben Arbeitspakete, die in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern bearbeitet wurden (s. Abbildung 1). Die systematische Analyse unterschiedlicher Elektrodenfehler lieferte Erkenntnisse zur Optimierung der LSP-Technologie und Formulierung allgemeiner Qualitätssicherungsstrategien in der Elektrodenfertigung.

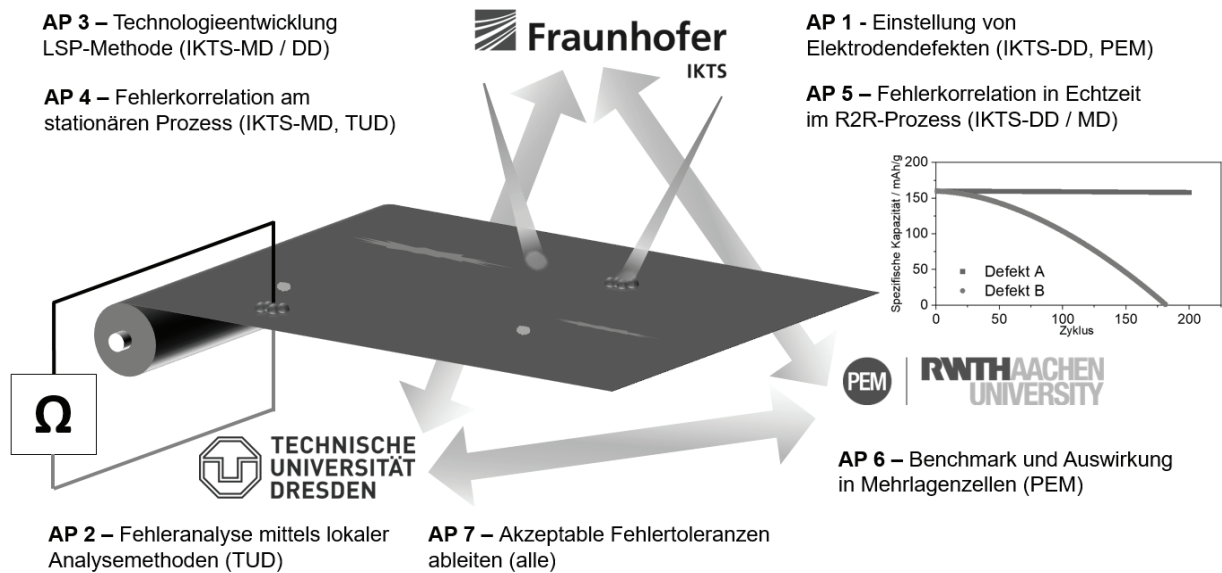


Abbildung 1: Übersicht über die Arbeitspakete (AP) im Forschungsprojekt KritBatt

Die Grundlage der Untersuchungen bildeten gezielt erzeugte Elektrodendefekte, die durch kontrollierte Manipulation von Misch- und Beschichtungsverfahren am PEM der RWTH Aachen und am Fraunhofer IKTS Dresden (IKTS-DD) reproduzierbar hergestellt wurden. Die defekten Elektrodenproben wurden anschließend an die TU Dresden übermittelt, wo sie mithilfe lokaler elektrischer und elektrochemischer Analysemethoden untersucht wurden. Ziel dieser Untersuchungen war es, die Auswirkungen der Defekte auf die Elektroden Eigenschaften zu bewerten und fehlerspezifische Kritikalitätskriterien zu entwickeln. Parallel zu diesen Arbeiten wurde am Fraunhofer IKTS (IKTS-MD) die Weiterentwicklung der LSP-Technologie vorangetrieben. Im Fokus standen dabei die Optimierung der Hard- und Softwarekomponenten sowie die Implementierung eines für den Forschungsbetrieb geeigneten Datenmanagementsystems. Diese Maßnahmen dienten dazu, das Verfahren sowohl in seiner Messgenauigkeit als auch in seiner Integrationsfähigkeit in industrielle Prozesse zu verbessern. Nach der erfolgreichen Validierung des optimierten LSP-Systems in einem stationären Aufbau wurde dieses in die Rolle-zu-Rolle-Pilotbeschichtungsanlage integriert, um die Zuverlässigkeit der Fehlererkennung unter skalierten Produktionsbedingungen zu testen. Am PEM der RWTH Aachen wurde ergänzend ein Systemvergleich durchgeführt, bei dem die Fehlererkennung der weiterentwickelten LSP-Technologie einer in die Pilotbeschichtungsanlage integrierten Zeilenkamera gegenübergestellt wurde. Dieser Vergleich diente dazu, die Vorteile und Grenzen der neuen Technologie im Vergleich zu bestehenden kommerziellen Lösungen zu evaluieren. Zur Analyse der elektrochemischen Auswirkungen der Elektrodendefekte wurden die fehlerhaften Elektroden schließlich für den Aufbau von Versuchszellen verwendet. In Kombination mit den Voruntersuchungen ermöglichte dies die Bestimmung defektspezifischer Toleranzgrenzen und die Ableitung allgemeingültiger Kritikalitätskriterien zur Qualitätssicherung.

3. Wesentliche Ergebnisse

Im Rahmen des Projekts wurden vier Meilensteine definiert, die den Fortschritt und die Erreichung der Projektziele in den Bereichen Elektrodenuntersuchung und Entwicklung der LSP-Technologie sicherstellten. Im ersten Meilenstein (MS-1) gelang die systematische Unterteilung der Elektrodendefekte in klar differenzierbare Defektarten, die in praktischen Versuchsreihen reproduzierbar erzeugt werden konnten. Ein zentrales Ergebnis dieses Meilensteins stellte zudem die nachgewiesene Korrelation zwischen den lokal erfassten Elektrodendefekten und den elektrochemischen Elektrodeneigenschaften dar. Mit dem Erreichen des zweiten Meilensteins (MS-2) konnte die Entwicklung und Validierung einer Hard- und Softwarelösung für das optische LSP-Prüfsystem abgeschlossen werden. Dieser Schritt umfasste die Festlegung von Kalibrierparametern und die Algorithmenentwicklung zur Fehlerauswertung mithilfe eines KI-Modells. Zudem konnte eine bestehende Pilotbeschichtungsanlage erfolgreich für die Integration eines LSP-Systems vorbereitet werden. Mit Erreichung des dritten Meilensteins (MS-3) konnte die Fähigkeit des LSP-Systems zur Echtzeit-Fehlererkennung und -klassifizierung von Beschichtungsfehlern nachgewiesen werden. Dieser Meilenstein stellte einen wesentlichen Fortschritt in der praktischen Anwendung dar, indem er die Eignung dieser Technologie für eine optimierte Qualitätssicherung in der Elektrodenherstellung bekräftigte. Mit dem Erreichen des vierten und abschließenden Meilensteins (MS-4) konnten schließlich auf Grundlage der gewonnenen Versuchsdaten und Untersuchungsergebnisse defektspezifische Kritikalitätskriterien abgeleitet werden. Diese Kriterien ermöglichten eine Einordnung und Bewertung der Defektauswirkungen auf die elektrochemischen Eigenschaften der Elektroden.

Die im Projektverlauf erzielten Ergebnisse vertiefen somit das Verständnis kritischer Prozess-Produkt-Wechselwirkungen in der Elektrodenfertigung und leisten einen wesentlichen Beitrag zur Entwicklung effektiver Qualitätssicherungskonzepte in der Batteriezellproduktion. Die identifizierten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge in der Defektentstehung und die ermittelten kritischen Schwellenwerte bieten eine fundierte Grundlage für die Optimierung der Prozessüberwachung und Qualitätssicherung. Im Einklang mit den übergeordneten Zielen des Dachkonzepts Batterieforschung wird damit der Weg zu einer nachhaltigeren und wirtschaftlicheren Produktion von Batteriezellen geebnet.



Digital unterschrieben von
Henrik Christoph Born
Datum: 2025.02.19
18:12:26 +01'00'

Aachen, den

Lehrstuhl PEM

Aachen, den

Rechtsverbindliche Unterschrift ZE

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil 2 – Eingehende Darstellung

| | |
|---|--|
| Vorhabenbezeichnung: KritBatt – In-line Klassifizierung von Beschichtungsfehlern zur Ermittlung der Kritikalität in der Elektrodenherstellung | |
| Zuwendungsempfänger: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen Templergraben 55 52062 Aachen | Förderkennzeichen 03XP0360C |
| Projektleitung Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker | Laufzeit 01.03.2021 - 31.08.2024 |

1. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse im Rahmen des Vorhabens

AP 1: Einordnung von Beschichtungsdefekten und Kausalitäten

Einleitend erfolgte unter Recherche wissenschaftlicher Literatur und dem Einbezug vorhandenen Expertenwissens die Sammlung von in der Elektrodenfertigung beobachteter und dokumentierter Fehlerbilder. Die gewonnene Übersicht wurde dazu genutzt, die unterschiedlichen Fehler in die übergeordneten und primär auf das Erscheinungsbild bezogenen Defektklassen der Punkt-, Linien-, und Flächendefekte zu unterteilen (s. Abbildung 1).

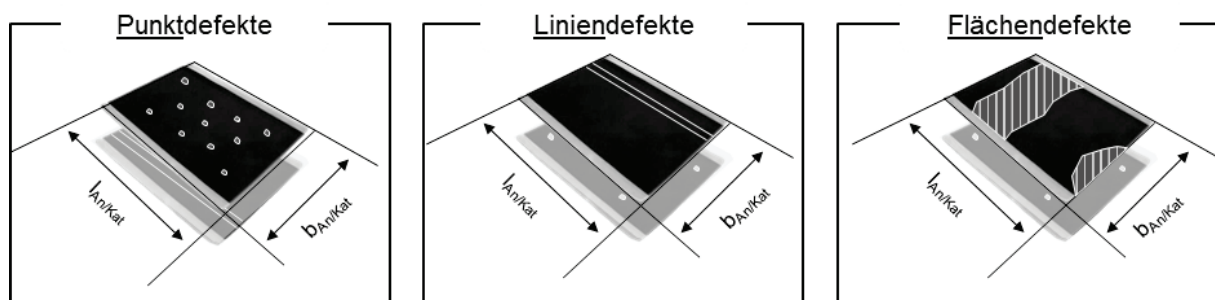


Abbildung 1: Klassifikation von Elektrodendefekten

Der Vielzahl möglicher Fehlerausprägungen Rechnung tragend wurde ergänzend eine Unterteilung in Substrat-, Oberflächen und tieferliegende Struktur- bzw. Gefügedefekte vorgenommen, wobei letztere sich ebenfalls an der Elektrodenoberfläche abzeichnen können. Sämtliche Elektrodenfehler wurden zunächst systematisch recherchiert und in einem Fehlerkatalog mit defektspezifischen Informationen (bspw. Fehlerursache, typische Fehlerdimensionen, etc.) zusammengefasst. Auf Basis eines definierten Referenzprozesses zur Herstellung defektfreier Elektroden wurden anschließend die kritischen und qualitätsbestimmenden Prozess- und Materialparameter ermittelt. Die Kritikalitätsbewertung stützte sich auf die im Fehlerkatalog zusammengeführten Informationen sowie ergänzend durchgeführte Experteninterviews. Durch

dieses Vorgehen konnten potenzielle Einflussfaktoren auf die Fehlerentstehung vorbewertet und eingegrenzt werden. In den daraus abgeleiteten Versuchsreihen wurden die identifizierten Parameter gezielt variiert bzw. eingestellt, um im Rahmen der Misch- und Beschichtungsversuche Elektrodendefekte reproduzierbar zu erzeugen. Die Herstellung der Elektrodenproben wurde dabei zwischen dem PEM der RWTH Aachen (Anodenmuster) und dem Fraunhofer IKTS-DD (Kathodenmuster) aufgeteilt. Die Material- und Rezepturversuche (UAP 1.1) und sowie Beschichtungs- und Trocknungsversuche (UAP 1.2) erfolgten dabei gemäß dem nachfolgend festgelegten Standardvorgehen (s. Abbildung 2). Die als Rollenware erzeugten Beschichtungsabschnitte wurden anschließend konfektioniert, eindeutig zuordenbar beschriftet und den Projektpartnern mit weiterführenden Elektrodeninformationen (Elektrodenrezeptur bzw. Materialzusammensetzung, Prozessparameter und Defektklassifikation) für die Folgeuntersuchungen zur Verfügung gestellt.

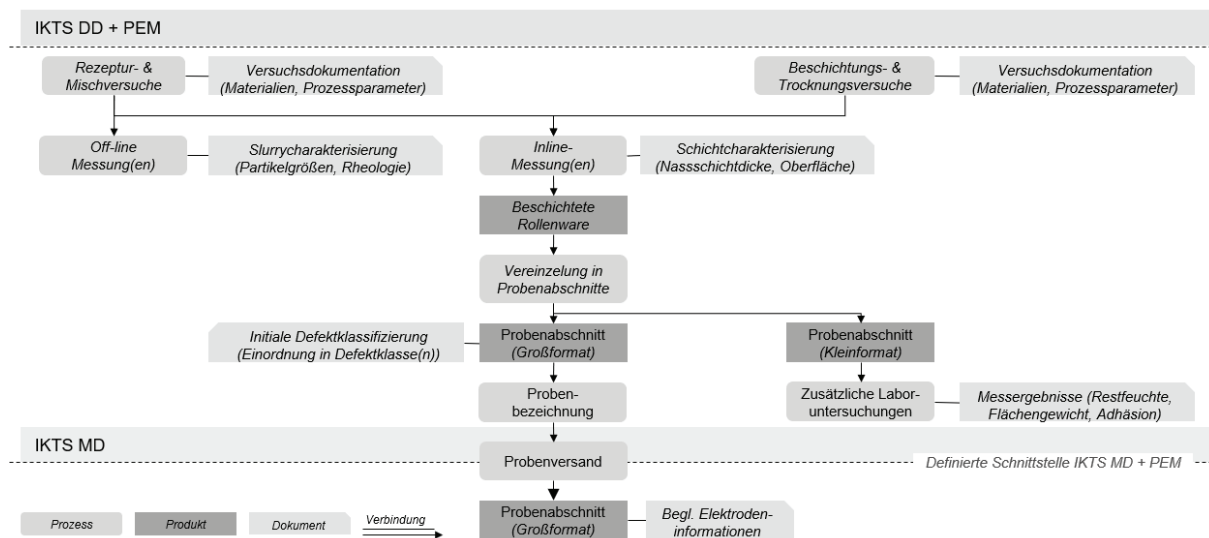


Abbildung 2: Ablaufdiagramm zur Probenherstellung und -untersuchung am PEM

UAP 1.1: Auswirkungen von Mischungsprozessfehlern und Defekten in den Ausgangspulvern (IKTS-DD, PEM)

In diesem einleitenden Unterarbeitspaket wurde der Einfluss modifizierter Mischprozesse und Ausgangsrezepturen auf die Defektentstehung in der Anodenfertigung untersucht. In Absprache mit den Projektpartnern erfolgte hierzu auf Grundlage des aufgestellten Fehlerkatalogs die Auswahl relevanter und der Fortentwicklung des innovativen LSP-Messsystems dienlicher Fehlertypen. Für die ausgewählten Fehlertypen wurde dabei hoher Wert auf einen reproduzierbaren Ablauf der Versuche gelegt, um auch für nachfolgende Arbeitspakete, Proben ähnlicher Zusammensetzung und Gestalt her- und bereitstellen zu können. Variiert wurde in der praktischen Versuchsumsetzung gemäß zugrundgelegter OFAT-Methodik (engl. One-factor-at-a-time) stets ein einzelner Prozess- bzw. Materialparameter, um die Überlagerung von Effekten auszuschließen und Einflüsse isoliert voneinander zu untersuchen (s. Abbildung 3: Versuchsübersicht zur Untersuchung der Auswirkung von Mischungsprozessfehlern und Defekten im Ausgangspulver). Als besonders kritische Prozessparameter hinsichtlich der Defektausbildung wurden neben der Anodenrezeptur, die Mischdrehzahl und Mischdauer abgeleitet und entsprechend variiert. Durch die Verwendung eines Planetenmischers und Dispergierers konnte im

Rahmen der praktischen Versuche zudem der Einfluss unterschiedlicher Mischsysteme auf einzelne Fehlertypen und die Defekentstehung mitberücksichtigt werden.

| Prozess | Versuchsbeschreibung | Ergänzende Anmerkungen | |
|-----------------|---|---|---|
| Mischen | Stark reduzierte Mischdauer – Intensivmischen | Reduktion der Intensivmischzeit um 50% (+ zus. Abstufungen) | ✓ |
| Mischen | Stark reduzierte Drehzahl – Intensivmischen | Reduktion der Drehzahl um 25% (+ zus. Abstufungen) | ✓ |
| Mischen | Stark reduzierte Mischdauer – Trockenmischen | Reduktion der Trockenmischzeit um 50% (+ zus. Abstufungen) | ✓ |
| Mischen | Stark erhöhte Drehzahl – Nassmischen | Erhöhung der Drehzahl um 50% (+ zus. Abstufungen) | ✓ |
| Mischen | Modifizierte Mischreihenfolge | Veränderte Reihenfolge der Materialzugabe (bei gleicher Materialzusammensetzung) | ✓ |
| Mischen | Modifiziertes Mischvolumen | Erhöhung des Mischvolumens bei gleichen rel. Anteilen der Komponenten | ✓ |
| Mischen | Einbringung von Lufteinschlüssen | Mischen ohne Evakuierung des Mischbehälters und Provokation von Lufteinschlüssen | ✓ |
| Rezeptur | Reduktion des Binder-Anteils | Einfluss reduzierten Binder-anteile auf Defekte im Zshg. mit Adhäsion und Kohäsion | ✓ |
| Rezeptur | Erhöhung des Binder-Anteils | Einfluss erhöhten Binderanteile auf Defekte im Zusammenhang mit Adhäsion und Kohäsion | ✓ |
| Rezeptur | Erhöhung des Feststoff-Anteils (zusätzliche Leitadditive) | Einfluss erhöhten Feststoffgehalts (<1wt.%, Hinzugabe im letzten Mischschritt) auf Agglomerate | ✓ |
| Rezeptur | Hinzugabe nicht-leitender/leitender Fremdpartikel | Leitende Fremdpartikel Stahl/Eisen-Pulver in unterschiedlichen Mesh Sizes) als Kontamination | ✓ |
| Rezeptur | Aktivmaterialblends (Si/C Komposit-Anode) | Si-Additive in der Anode (5 – 30%-wt. Si) | ✓ |

Legende: ✓ Versuchskarte umgesetzt ✗ Versuchskarte nicht umgesetzt

Abbildung 3: Versuchsübersicht zur Untersuchung der Auswirkung von Mischungsprozessfehlern und Defekten im Ausgangspulver

UAP 1.2: Beschichtungsfehler in der Substratbeschichtung und Trocknung (IKTS-DD, PEM)

In einem zu UAP 1.1 analogen Vorgehen erfolgte in UAP 1.2 zunächst die Auswahl und anschließend gezielte Einstellung von Defekten im Beschichtungs- und Trocknungsprozess. Als besonders kritische Prozessparameter wurden hier neben der Anodenrezeptur, das Flächengewicht und der Wärmeeintrag während der Trocknung abgeleitet und entsprechend variiert. Während das Flächengewicht anlagenseitig durch Pumpenleistung und Bahngeschwindigkeit eingestellt wurde, erfolgte die Variation des Wärmeeintrags einerseits durch die Änderung der Trocknungstemperaturen in den einzelnen Trocknungszonen und andererseits über die mit der Bahngeschwindigkeit und fixer Trocknerlänge zusammenhängende Trocknungsdauer. Durch unmittelbar hinter der Schlitzdüse positionierte Hindernisse wurde in weiteren Versuchen zudem bewusst das Fließverhalten der Anoden-suspension gestört und zur Erzeugung definierter Liniendefekte eingesetzt.

| Prozess | Versuchsbeschreibung | Ergänzende Anmerkungen | |
|--------------------|---|---|---|
| Beschichten | Liniendefekte durch Modifikation des Beschichtungsvorgangs | Liniendefekt durch Materialabnahme unmittelbar nach der Schlitzdüse: 1 x 2mm Liniendefekt | ✓ |
| Beschichten | Liniendefekt durch Modifikation des Beschichtungsvorgangs | Liniendefekt durch Materialabnahme unmittelbar nach der Schlitzdüse: 2 x 1mm Liniendefekt | ✓ |
| Beschichten | Erzwingen von Rissen durch die Reduktion des Flächengewichts | Stufenweise Erhöhung der Bahngeschwindigkeit von 0,5m/min auf bis zu 1,5m/min (Erhöhung) | ✓ |
| Beschichten | Erzwingen von Rissen durch die Reduktion des Flächengewichts | Stufenweise <u>Reduktion</u> der Pumpenleistung (Volumenstrom zur Schlitzdüse geförderter Slurry); Reduktion der Pumpenleistung auf 25% | ✓ |
| Beschichten | Erzwingen von Rissen durch die Erhöhung des Flächengewichts | Stufenweise <u>Erhöhung</u> der Pumpenleistung (Volumenstrom zur Schlitzdüse geförderter Slurry); Erhöhung der Pumpenleistung auf 125 – 200% | ✓ |
| Beschichten | Liniendefekte durch Modifikation des Beschichtungsvorgangs | Liniendefekt durch Materialabnahme unmittelbar nach der Schlitzdüse: 1 x 2mm Liniendefekt | ✓ |
| Beschichten | Liniendefekt durch Modifikation des Beschichtungs-vorgangs | Liniendefekt durch Materialabnahme unmittelbar nach der Schlitzdüse: 2 x 1mm Liniendefekt | ✓ |
| Beschichten | Erzwingen von Rissen durch die Reduktion des Flächengewichts | Stufenweise Erhöhung der Bahngeschwindigkeit von 0,5m/min auf bis zu 1,5m/min (Erhöhung) | ✓ |
| Beschichten | Erzwingen von Rissen durch die Reduktion des Flächengewichts | Stufenweise <u>Reduktion</u> der Pumpenleistung (Volumenstrom zur Schlitzdüse geförderter Slurry); Reduktion der Pumpenleistung auf 25% | ✓ |
| Trocknen | Erzwingen von Rissen durch die Erhöhung des Wärmeeintrags | Stufenweise <u>Erhöhung</u> der Trocknungstemperaturen in der ersten Heizzone/ Einlaufzone (H1); HZ1 = 115°C – HZ1_{max} , HZ2=100°C (Standard) | ✓ |
| Trocknen | Erzwingen von Rissen durch die Erhöhung des Wärmeeintrags | Stufenweise <u>Erhöhung</u> der Trocknungstemperaturen in der zweiten Heizzone / Auslaufzone (H2); HZ1 = 115°C (Standard) , HZ2= 115°C – HZ2_{max} (Erhöhung) | ✓ |
| Trocknen | Erzwingen von Inhomogenitäten durch die Reduktion des Wärmeeintrags | Reduktion der Trocknungszeiten durch stufenweise <u>Erhöhung</u> der Bahngeschwindigkeit von 0,5m/min auf bis zu 4m/min bei fixierten Trocknungstemperaturen | ✓ |

Legende: ✓ Versuchskarte umgesetzt ✗ Versuchskarte nicht umgesetzt

Abbildung 4: Versuchsübersicht zur Untersuchung der Beschichtungsfehler in der Substratbeschichtung und Trocknung

Zusammenfassend lieferten die Versuchsreihen erfolgreich eine Reihe beabsichtigter Fehlerbilder wie Agglomerate, Lufteinschlüsse, Schlieren, Benetzungsleerstellen, Fehler in der Bahnkantengeometrie sowie Risse in der Beschichtung (s. Abbildung 5). Auf Grundlage der aufgenommenen Produktionsdaten konnten bereits erste Analysen zu Produkt-Prozess-Wechselwirkungen durchgeführt und Zusammenhänge in der Defektenstehung aufgestellt werden.

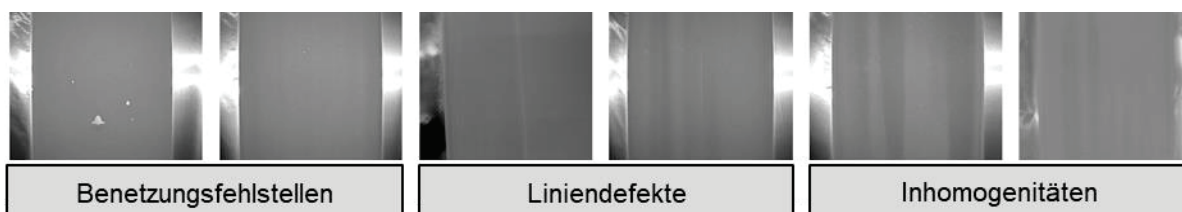


Abbildung 5: Übersicht der in Material- und Mischversuchen erzeugten Elektrodenfehler

AP 2: Fehlerklassifizierung und -quantifizierung mittels lokaler Analysemethoden

UAP 2.1: Elektrische und elektrochemische Charakterisierung (TUD)

Keine Beteiligung seitens PEM.

UAP 2.2: Materialcharakterisierung zur Elektrodenhomogenität (TUD)

Keine Beteiligung seitens PEM.

UAP 2.3: Fehlerklassifizierung und Quantifizierung mit off-line Methoden (TUD, IKTS-DD, IKTS-MD, PEM)

Schwerpunkt des durch die Technische Universität Dresden (TUD) angeleiteten AP2 stellte die ausführliche Untersuchung der zuvor am PEM der RWTH und dem Fraunhofer IKTS-DD hergestellten Elektrodenproben mittels elektrischer und elektrochemischer Methoden dar. Erfasst wurden hierbei in qualitativer und quantitativer Form die charakteristischen Eigenschaften unterschiedlicher Elektrodenfehler sowie deren Einflüsse auf die zentrale Kenngrößen der Zellperformance wie die Kapazität, C-Ratenfähigkeit und Lebensdauer. Diese Untersuchungen werden von einer Analyse der Prozess-Struktur-Wechselwirkungen begleitet, welche darauf abzielen, zentrale Zusammenhänge zwischen vorgegebenen Prozessparametern und resultierenden Elektrodenfehlern aufzudecken.

Das PEM unterstützte diese Arbeiten im Berichtszeitraum durch Elektrodenvermessungen mittels 3D-Profilometrie. Die auf Grundlage dieser Messungen ermittelten Oberflächenkennwerte bieten eine zusätzliche Charakterisierungsmöglichkeit für die erzeugten Fehlerbilder. Diese Erfassung und quantitative Beschreibung der Abweichungen in der Oberflächenstruktur ermöglicht es, Zusammenhänge zu lokalen Unterschieden in Alterungs- und Degradationerscheinungen an der Elektrodengrenzfläche im Detail zu untersuchen. Folgeuntersuchungen können dabei Aufschluss darüber geben, inwiefern bestimmte Oberflächenstrukturen besonders anfällig für schädliches Lithium-Plating sind oder die Li-Ionen-Diffusion negativ beeinflussen. Ausführlich untersucht wurden im Berichtszeitraum die im Projekt priorisierten Fehlertypen, darunter die sogenannten Punktdefekte. Diese können in ihrem Erscheinungsbild als typischerweise wenige hundert Mikrometer bis mehrere Millimeter große, unbeschichtete Defektstellen in der Elektrodenbeschichtung charakterisiert werden. Sie sind überwiegend das Resultat der in der Elektrodensuspension eingeschlossene Luftblasen, die im Beschichtungsprozess aufreißen und einen typischerweise kreisförmigen bis elliptisch verzerrten, unbeschichteten Bereich auf dem Substrat hinterlassen. Der Vergleich einer fehlerfreien Referenzbeschichtung mit einer Defektbeschichtung mit Pinholes ist exemplarisch dargestellt (s. Abbildung 6). Die Messwerte legen nahe, dass die vorhandenen Pinholes auf der Elektrodentopografie zu einer signifikanten Erhöhung der Rauheitswerte führen. Diese Werte liegen etwa um den Faktor 3 höher als bei defektfreien Referenzelektroden.

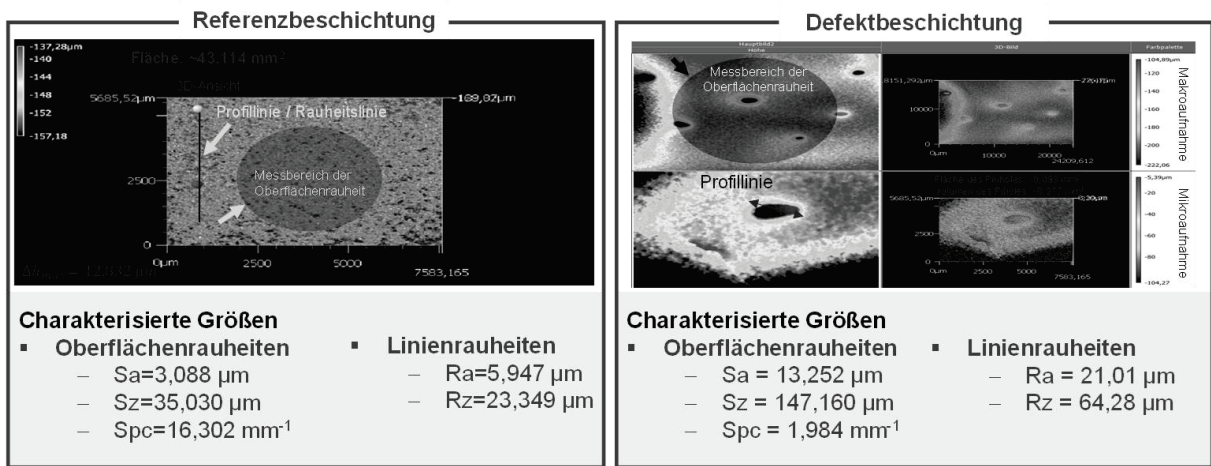


Abbildung 6: Vergleich der Elektrodentopografie und Rauheitskennwerte für eine fehlerfreie Referenzbeschichtung und eine Defektbeschichtung mit Pinholes

Die untersuchten Pinholes weisen dabei eine geringe Variation in den Tiefenabmessungen auf, wobei Werte im Bereich zwischen 75 – 83 μm liegen. Diese konnten durch das Einzeichnen mehrerer Profillinien festgestellt werden. Wiederholte Einzelmessungen unterschiedlicher Pinholes eines Beschichtungsvorgangs zeigten zudem eine geringe Variation in den Größenabmaßen der Punktdefekte. Die Abbildung 7 veranschaulicht die Verteilung der Pinholes mit dem charakteristischen Profilverlauf auf der Elektrodenoberfläche.

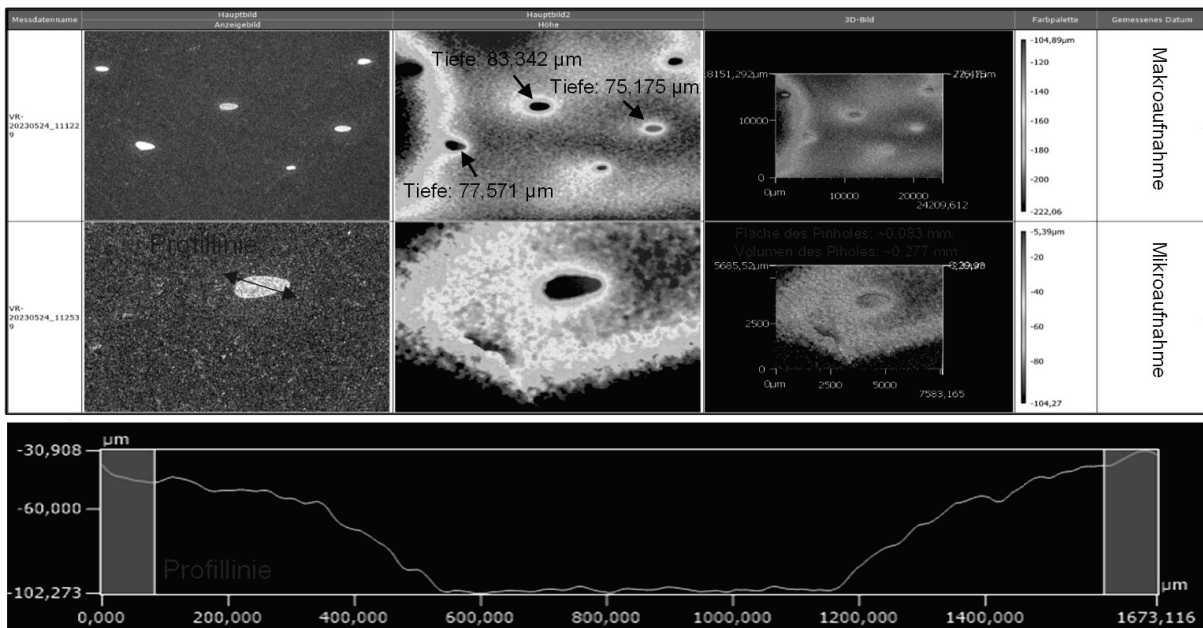
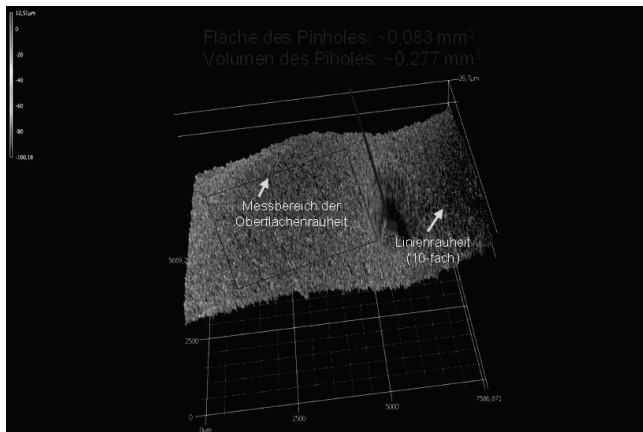


Abbildung 7: Profilvermessung einer Elektrodenoberfläche mit Pinholes

Die Folgeuntersuchung einer Elektrodenprobe mit Pinholes im Anschluss an einen Kalandrierprozess mit einer Bahngeschwindigkeit von 0,8 m/min und einer Linienlast von 40 N/mm zeigt signifikante Veränderungen der Rauheitswerte. Der Kalandrierprozess führte zu einer Reduktion der Rauheitsspitzen (R_z -Werte), die sich mit einer Glättung der Oberfläche und die Verringerung der Höhengradienten erklären lassen.



Aufnahme des Punkdefekts nach dem Kalandrierprozess mit folgenden Prozessparametern:

- Bahngeschwindigkeit: 0,8 m/min
- Linienlast: 40 N/mm

Gemessenen Rauheitswerte:

- **Oberflächenrauheiten**
 - Sa=9,428 µm
 - Sz=64,410 µm
 - Spc=54,880 mm⁻¹
- **Linienrauheiten (10-fach, gemittelt)**
 - Ra=4,795 µm
 - Rz=25,239 µm

Abbildung 8: Detailaufnahme eines Pinholes auf einer kalandrierten Elektrodenoberfläche

Der durchschnittliche Höhenwert der Beschichtung blieb durch den nahezu gleichbleibenden Mittenrauwert (R_a -Werte) hingegen etwa konstant. Für die Oberflächenrauheiten (S_{pc} -Werte) konnte ein ähnliches Verhalten beobachtet werden, wobei aufgrund der kleineren Bezugsfläche der beschriebene Effekt deutlicher ausfiel (s. Abbildung 8).

Analoge 3D-Profilometer-Untersuchungen wurden mit weiteren Elektrodendefekten, wie beispielsweise den Liniendefekten durchgeführt. Festgestellt wurden in diesem Fall deutliche Wölbungen des Elektrodensheets aufgrund der einseitigen Beschichtung zusammen mit den großen Defektmaßen. Zusätzlich ließen sich deutliche Materialakkumulation in der Höhe von ca. 40 – 50µm unmittelbar um den Liniendefekt messen (s. Abbildung 9)

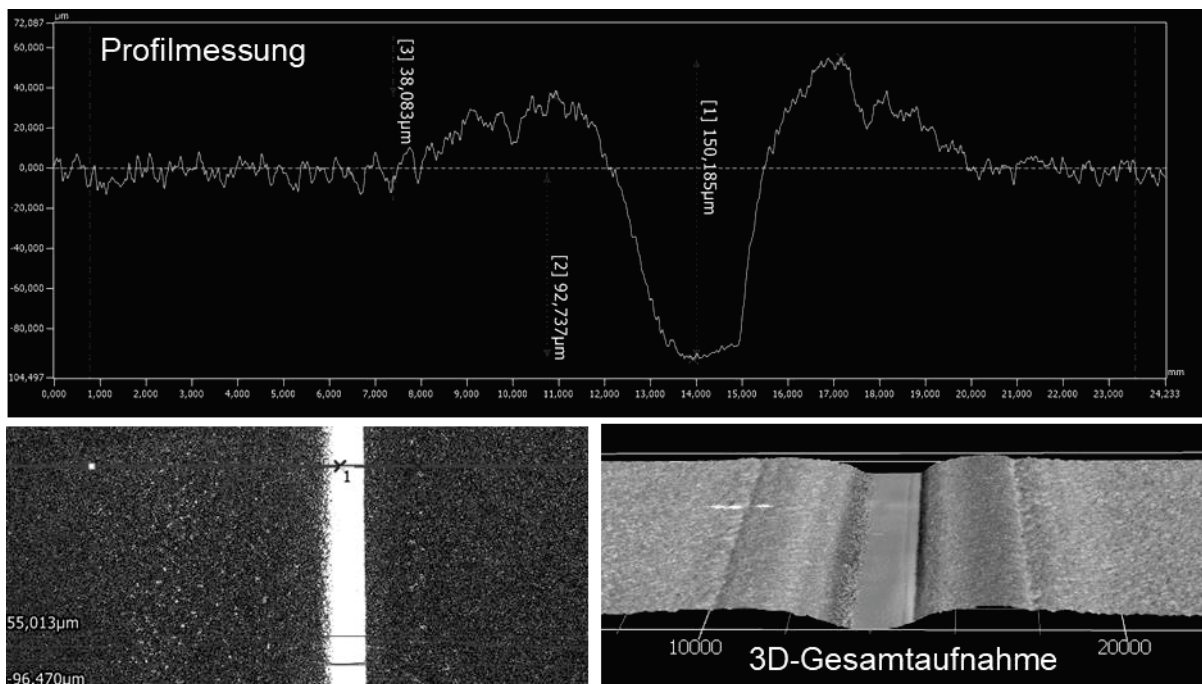


Abbildung 9: Profilvermessung einer Elektrodenoberfläche mit Liniendefekt

UAP 2.4: Ableitung von Prozess-Struktur-Wechselwirkungen zur Defekentstehung (TUD, IKTS-DD, PEM)

Zur Analyse der Fehlerkritikalität und Nachvollziehbarkeit der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge wurde ein 3-Ebenen-Modell entwickelt, welches Fehlerursachen, Fehler und deren Folgen miteinander verknüpft. Dieses zeigt die Wechselwirkungen zwischen qualitätsrelevanten Prozessparametern (Fehlerursachen), den resultierenden Defekten und deren Auswirkungen auf die Qualitätsmerkmale bzw. Produkteigenschaften (Fehlerfolgen) auf. Zur mathematischen Formalisierung und Analyse der Zusammenhänge wurde das Modell anschließend unter Anwendung der Graphentheorie als Fehlernetzwerk abgebildet (s. Abbildung 10).

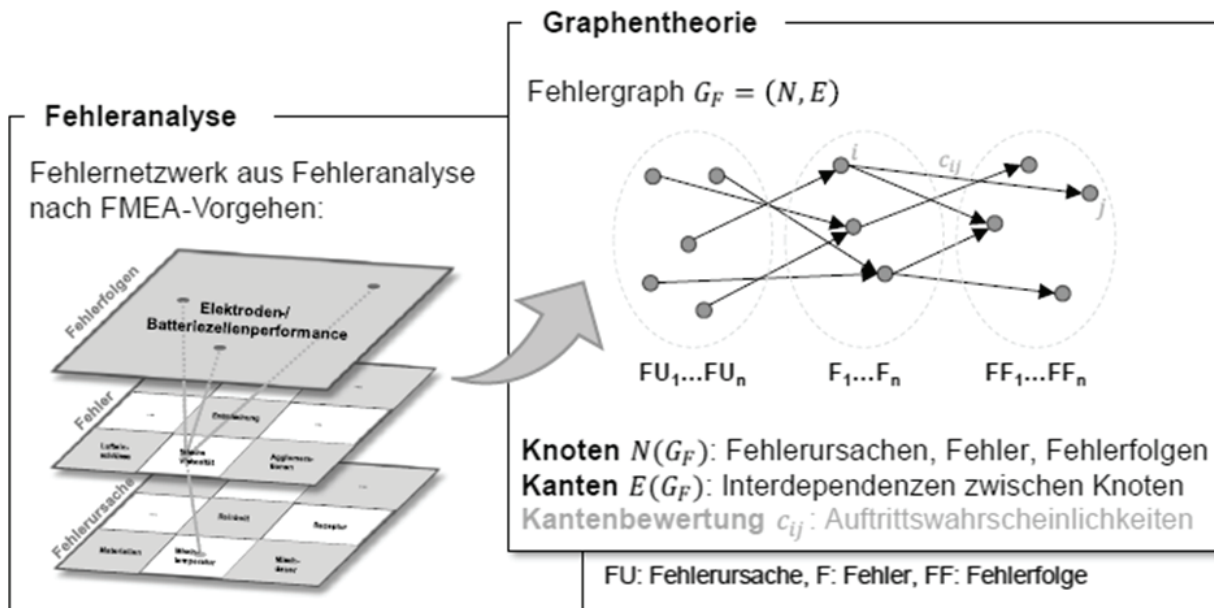


Abbildung 10: Fehlernetzwerk basierend auf dem 3-Ebenen-Modell

Der resultierende tripartite Graph setzt sich aus Knoten und gerichteten Kanten zusammen. Die Knotenmenge lässt sich gemäß dem 3-Ebenen-Modell in drei disjunkte Teilmengen unterteilen, die jeweils Fehlerursachen, Fehler und Fehlerfolgen repräsentieren. Während die Knoten die Attribute der jeweiligen Ebene abbilden (z. B. verschiedene Fehlertypen innerhalb der „Fehler“-Ebene), modellieren die Kanten die Beziehungen zwischen den einzelnen Ebenen. Zur quantitativen Beschreibung der Zusammenhänge werden zusätzliche Kantenbewertungen eingeführt, welche fehlerspezifische Informationen etwa in Form von Auftretswahrscheinlichkeiten oder (vermuteten) Korrelationen mitberücksichtigen. Diese Kantengewichte können nach einer anfänglichen Initialisierung auf Basis realer Produktionsdaten iterativ verfeinert und zur Modellaktualisierung verwendet werden. Die mathematische Beschreibung des Graphen erfolgt dabei mithilfe einer Adjazenz-Matrix, welche die Beziehungen zwischen den Knotenpaaren formal zusammenfasst. Berechnungen zur Bestimmung der Erreichbarkeit eines Fehlers und dessen Knotengrads (Anzahl der ein- und ausgehenden Kanten) können anschließend durchgeführt und als Metriken zur Bewertung der Fehlerkritikalität verwendet werden. Fehlerknoten mit einer hohen Anzahl ein- und ausgehender Kanten gelten als besonders kritisch, da sie durch eine Vielzahl von Prozess- bzw. Produktabweichung ausgelöst werden können und sich zugleich auf mehrere Produkteigenschaften negativ auswirken.

che) durch Verkürzung oder vollständigen Entfall des Evakuierungsschritts systematisch erzeugen. Ebenso konnten Agglomerate, erkennbar als ungleichmäßige Materialanreicherungen auf der Elektrodenoberfläche, durch die dosierte Zugabe von Leitadditiv gegen Ende des Mischprozesses reproduzierbar generiert werden.

Fremdpartikel (metallische, nicht metallische Kontaminationen):

Die Untersuchung von Partikelkontaminationen als mögliche Folge von Abrasion im Mischsystem oder sonstigen Verunreinigungen in den Ausgangsmaterialien konnte durch die Hinzugabe von Fremdpartikeln erfolgreich umgesetzt werden. Partikel unterschiedlicher Materialzusammensetzung (Al, Fe, Cu, Stahl, Teflon) wurden mit der kurzen Unterbrechung des Mischprozesses dem Slurry hinzugefügt. Die Nachverfolgbarkeit und genaue Lokalisierung der Partikel zeigte sich allerdings als Herausforderung, da sich diese nicht zwingend an der Oberfläche ablagern und im Inneren der Elektrodenstruktur optisch verborgen bleiben können. Die Versuchskampagne wurde entsprechend angepasst und die Fremdpartikel durch eine Unterbrechung des Beschichtungsprozesses manuell auf die noch nasse Elektrodenoberfläche aufgetragen. Gegenüber der Einmischung konnte hierdurch das Problem der genauen Defektlokalisierung gelöst werden, allerdings resultierte aufgrund der manuellen Dosierung der pulverförmigen Fremdpartikel eine hohe Partikelkonzentration, welche einen realen Fehlerfall durch Materialabrieb nur eingeschränkt widerspiegelt.

Liniendefekte (Streifendefekte):

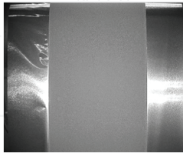
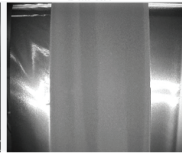
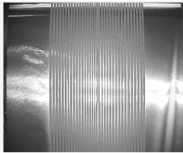
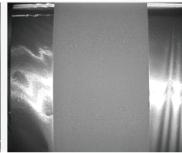
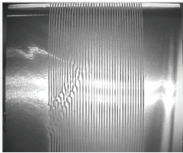
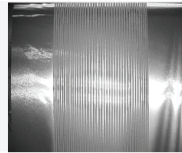
Liniendefekte konnten mit hoher Reproduzierbarkeit durch gezielte Modifikationen an der Schlitzdüse erzeugt werden. Um den Austritt des Elektrodenlurrs an einer bestimmten Stelle der Schlitzdüse zu verhindern, wurde diese Stelle mit einer Abdeckung versehen. Durch Variation der Größe und Position einer oder mehrerer Abdeckungen ließen sich unterschiedliche Defektmuster erzeugen.

Flächendefekte (Trocknungsrisse, Bindermigration)

Die gezielte Reproduktion von Trocknungsrisse und Bindermigration durch eine Variation des Temperaturprofils in den Heizzonen erwies sich mit den eingesetzten Material- und Anlagensystemen als nicht reproduzierbar realisierbar. Trotz gezielter Anpassung der Temperaturgradienten entlang der Heizzonen konnten systematisch Trocknungsrisse noch eine signifikante Bindermigration systematisch erzeugt werden. Lediglich das Fehlerbild einer unzureichenden Trocknung ließ sich durch eine Reduktion der Trocknungstemperatur bzw. Erhöhung des Lösemittelgehalts reproduzierbar darstellen.

Auszugsweise dargestellt findet sich nachfolgend eine im Rahmen der Beschichtungs- und Trocknungsversuche realisierte Versuchsmatrix (s. Abbildung 12). Die aufgenommenen Produktionsdaten ermöglichten hier die Korrelation der Prozessparameter mit den resultierenden Elektroden-eigenschaften. Der Datensatz zeigt, dass mit zunehmender Bahngeschwindigkeit und sonst konstanten Prozessparametern das Risiko von Liniendefekten deutlich zunimmt. Die Versuche zeigten, dass dieses Fehlerbild durch eine höhere Pumpendrehzahl und dadurch gesteigerte Fördermenge an Elektroden-slurry teilweise kompensiert werden können. Allerdings werden mit dieser Gegenmaßnahem die Produkteigenschaften (Massenbeladung der Elektrodenfolie) geändert und das Risiko einer unvollständigen Elektrodentrocknung steigt aufgrund des höheren Lösungsmittelgehalts im Trocknungsabschnitt. Auch in diesem Fall lassen sich wiederum entsprechende Gegenmaßnahmen, etwa durch die Erhöhung der Trocknungstemperatur und zugeführten Luftvolumenstroms vornehmen, die wiederum Einfluss auf die Elektroden-eigenschaften nehmen und das Risiko einer Bindermigration erhöhen können.

| | Datum | Kalender-woche | Versuchs-nummer | Versuchs-bezeichnung | Ges. Mischdauer [min] | Beschichtungs-geschwindigkeit [m/min] | Pumpendrehzahl [U/min] |
|------------|----------|----------------|-----------------|----------------------|-----------------------|---------------------------------------|------------------------|
| Rezeptur 1 | 13.12.21 | KW 50 | 1 | 1-1-1 | 165 | 0.5 | 100 |
| | 13.12.21 | KW 50 | 2 | 1-1-2 | 165 | 0.5 | 125 (+) |
| | 13.12.21 | KW 50 | 3 | 1-1-3 | 165 | 0.5 | 150 |
| | 13.12.21 | KW 50 | 4 | 1-2-1 | 165 | 1 | 100 |
| | 13.12.21 | KW 50 | 5 | 1-2-2 | 165 | 1 (+) | 125 |
| | 13.12.21 | KW 50 | 6 | 1-2-3 | 165 | 1 | 150 |
| | 13.12.21 | KW 50 | 7 | 1-3-1 | 165 | 1.5 | 100 |
| | 13.12.21 | KW 50 | 8 | 1-3-2 | 165 | 1.5 | 125 |
| | 13.12.21 | KW 50 | 9 | 1-3-3 | 165 | 1.5 | 150 |

| Variante 1-1-1 | Variante 1-1-3 | Variante 1-2-1 | Variante 1-2-3 | Variante 1-3-1 | Variante 1-3-3 |
|--|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |  |
| Optisch hochwertige, durchgetrocknete Beschichtung | Trocknung unvollständig (Rückständiges Lösungsmittel/Wasser) | Eingestellte Bahngeschwindigkeit zu hoch (Schlieren) | Optisch hochwertige, durchgetrocknete Beschichtung | Eingestellte Bahngeschwindigkeit zu hoch (Schlieren) | Eingestellte Bahngeschwindigkeit zu hoch (Schlieren) |

| Versuchsbezeichnung: 1-1-1 | 24 | 25 | 26 | 27 |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| KW 50 | KW 50 | KW 50 | KW 50 | KW 50 |
| Pumpendrehzahl (hier 1) | 100 | 125 | 150 | 100 |
| Bahngeschwindigkeit (hier 1) | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1 |
| Rezeptur (hier 1) | 1 | 1 | 1 | 1 |

Abbildung 12: Auswertung der Elektrodenfehler aus den Beschichtungs- und Trocknungsversuche

Das Beispiel zeigt anschaulich die komplexen und vielschichtigen Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge in der Elektrodenfertigung, die im Projektvorhaben untersucht worden sind.

AP 3: Anpassung LSP-Technologie für die R2R-Anlage

Keine Beteiligung des PEM.

AP 4: Fehler-/Funktionskorrelation am stationären LSP-Gerät

UAP 4.1: Systematische Messungen zu Materialkennwerten (IKTS-DD, PEM)

Zur umfassenden Charakterisierung und Auswertung der Elektrodenproben wurde in Absprache mit den Projektpartnern zusätzliche Untersuchungen definiert. Zur Analyse der Ausgangsmaterialien, Zwischenerzeugnisse und finalen Elektrodenproben kamen die im Technikum verfügbaren Messsysteme und Instrumente (s. Abbildung 13) zum Einsatz. Die zusätzlich mittels 3D-Profilometer aufgenommenen Detailaufnahmen ermöglichten eine ausführlichere Charakterisierung der Elektrodenfehler auf Grundlage der Rauheitskennwerte.









| | | |
|---|--|-------------------------|
|  | – Viskositätsmessung zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften der Suspension | ↑ Ausgewählte Proben |
|  | – Adhäsionsprüfung zur Bewertung der Haftfestigkeit der getrockneten Beschichtung auf der Stromableiterfolie | |
|  | – Feuchtigkeitsmessung zur Ermittlung des verbleibenden Feuchtigkeitsgehalts nach dem Trocknungsprozess | |
|  | – Grindometerprüfung für Rückschlüsse zur Partikelgrößenverteilung und Kornfeinheit in der hergestellten Suspension | |
|  | – 3D-Profilometermessung zur Erfassung des Oberflächenprofils und Rauheitskennwerten der Elektrodenoberflächen | ↓ |
|  | – Optische Oberflächeninspektion zur Detektion makroskopischer Elektroden-defekte und sonstigen Ungleichmäßigkeiten in der Beschichtung | ↑ Sämtliche Proben |
|  | – Gewichtsmessung zur Ermittlung des Flächengewichts und Berechnung der theoretischen Flächenbeladung der Elektroden | |
|  | – Schichtdickenmessung zur Bestimmung der Elektrodenschichtdicke vor- und nach dem Kalandrierprozess | |

Abbildung 13: Laborequipment für die Untersuchung der Batterieelektroden

UAP 4.2: Abgleich der LSP-Defekterkennung mit elektrochemischen Messungen (IKTS-MD, TUD)

Keine Beteiligung seitens PEM.

UAP 4.3: Funktionskorrelation der Zellperformance von Einlagenzellen (IKTS-DD, PEM)

Für die Defektuntersuchung im Monozell-Aufbau wurde in Absprache mit dem Projektpartner IKTS-DD eine Vorauswahl der auf Elektrodenoberfläche und im Kleinformat der Knopfzelle ausführlicher untersuchten Elektrodenfehler vorgenommen. Für eine aufgetrennte Untersuchung der Anoden- und Kathodenfehler auf die elektrochemische Performance, wurde entschieden die Versuchszellen jeweils mit einer defektfreien Gegenelektrode zu kombinieren. Eine Übersicht der Elektrodengeometrie und weiterer -eigenschaften für die defektfreien Referenzelektroden findet sich in Abbildung 14. Um formatabhängige Einflüsse zwischen den

Einlagen- und Mehrlagenzellen auszuschließen und die Vergleichbarkeit zu erleichtern wurden beschlossen am PEM ebenfalls Einlagenzellen aufzubauen. Für eine zusammenfassende Auswertung der am PEM hergestellten und elektrochemischen untersuchten Versuchszellen ist an diese Stelle auf die Zusammenfassung der Kernergebnisse im AP 6: Benchmark und Effektanalyse in Mehrlagenzellen verwiesen.

| Anode | Kathode |
|---|---|
| Elektrodengeometrie | Elektrodengeometrie |
| | |
| Slurryrezeptur | Slurryrezeptur |
| Active Material Sigracell graphite (42,3%) | Active Material NMC622 (40,23%) |
| Binder I/II CMC (0,9%) | Binder I/I PVDF(1,82%) |
| Binder II/II SBR (3,4%) | Carbon Black C65 (1,89%) |
| Carbon Black C45 (0,4%) | Solvent NMP (56%) |
| Solvent DI Water (53%) | |
| Elektrodenbeschichtung | Elektrodenbeschichtung |
| Wet film thickness 200 [µm] (incl. collector) incl. CC | Wet film thickness 246 [µm] (incl. collector) incl. CC |
| Dry film thickness 120 [µm] (prior to calandring) incl. CC | Dry film thickness 110 [µm] (prior to calandring) incl. CC |
| Dry film thickness 85 [µm] (after calandring) incl. CC | Dry film thickness 77 [µm] (after calandring) |
| Mass loadig 10.78 [mg/cm ²] | Mass loadig 16.5 [mg/cm ²] |
| Areal capacity 3.68 [mAh/cm ²] | Areal capacity 2.49 [mAh/cm ²] |
| Porosity ca. 35 - 40 [%] | Porosity 30 - 35 [%] |
| Current collector (CC) thickness 10 [µm] | Current collector (CC) thickness 20 [µm] |

Abbildung 14: Elektrodenformate für ein- und mehrlagigen Versuchszellen (PEM)

AP 5: Fehlererkennung in Echtzeit im R2R-Prozess

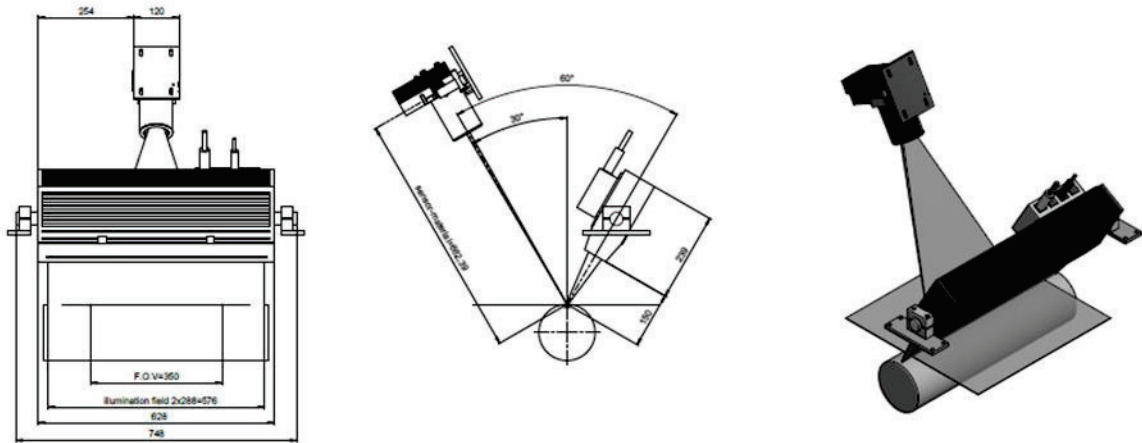
Keine Beteiligung des PEM

AP 6: Benchmark und Effektanalyse in Mehrlagenzellen

UAP 6.1: Vergleich mit einem kommerziellen, optischen Detektionsverfahren (PEM, IKTS-MD)

Zur in-line Untersuchung der Elektrodendefekte wurde eine 8k-Zeilenkamera in die Beschichtungsanlage des PEM der RWTH integriert. Zusammen mit der Smash Web Inspection Systems ermöglicht das System Elektrodenbeschichtungen in Echtzeit zu überwachen und Defekte zu erfassen. Die Abbildung 15 zeigt sowohl eine schematische Darstellung des Zeilenkamarasystems mit LED-Linienbeleuchtung im CAD-Modell als auch eine Realaufnahme der final in die Produktionsanlage integrierten Konfiguration. Die Zeilenkamera erfasst die Elektrodenfolie zeilenweise über eine Breite von 500 mm. Bei der verwendeten Zeilenkamera handelt es sich um ein hochauflösendes Inspektionssystem der Fa. ISRA VISION, welche Bilder mit einer maximalen horizontalen Auflösung von 8.192 Pixeln erfasst. Basierend auf der horizontalen Auflösung und einem erfassten Liniensegment von 500 mm ergibt sich für das eingesetzte System eine rechnerische Pixelgröße von ca. 61 μm . Diese Auflösung definiert die unterste Grenze der detektierbaren Defektgrößen und stellt damit eine wichtige Kenngröße dar, nicht zuletzt für den technischen Vergleich mit dem LSP-System. Durch die kontinuierliche Vorschubbewegung der Folie und die Synchronisation mit einem Encoder wird ein vollständiges Bild der Oberfläche erzeugt und schrittweise zusammengesetzt. Die aufgenommenen 2D-Bilder werden anschließend in einer Software verarbeitet und zur Analyse der Elektrodenoberfläche genutzt. Die Versuchsserien zur Defekterkennung zeigten, dass die minimal detektierbare Defektgröße nicht nur von der Bildauflösung und der Pixelgröße, sondern auch von weiteren Faktoren wie der Belichtungszeit und Voreinstellungen des Kamerasystems (z. B. Schwellenwertanpassungen, Inspektionsbereich, etc.) abhängt. Die praktischen Versuche zeigten weiterhin, dass für eine zuverlässige Defekterkennung und -klassifizierung eine Defekterfassung über mehrere Pixel erforderlich ist. Während sich Linien- und Flächendefekte aufgrund ihrer Größe über mehrere Pixel erstrecken und eindeutig erkennen ließen, blieben kleinere Strukturen, wie beispielsweise Agglomerate oder eingebettete Fremdpartikel $<100\mu\text{m}$ häufig unentdeckt.

CAD-Model der Zeilenkamera



Integration der Zeilenkamera in die Beschichtungsanlage

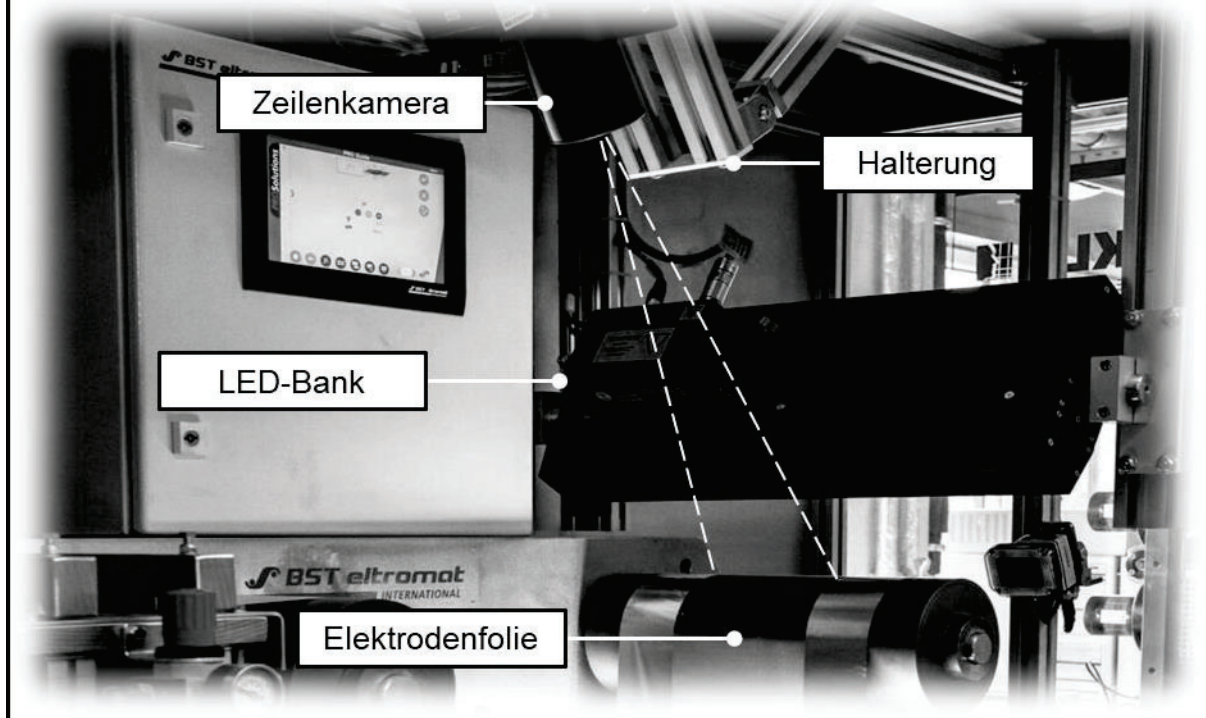


Abbildung 15: Integration der Zeilenkamera in die Beschichtungsanlage des PEM

Für den Technologievergleich der Zeilenkamera mit dem auf Laser-Speckle-Photometrie basierenden Inspektionssystem wurde zunächst eine technische und wirtschaftliche Gegenüberstellung vorgenommen (s. Abbildung 16).

| Kriterium | Laser-Speckle-Photometrie (LSP) | Zeilenkamera |
|----------------------|--|---|
| Zerstörungsfreiheit | Optisches, nicht-invasives Verfahren ohne Beeinflussung der Oberfläche. | |
| Auflösung | Sub-mikroskopische Auflösung durch speckle-basierte Analyse. Limitiert durch Kohärenzlänge der Lichtquelle und Signal-Rausch-Verhältnis. | Mikroskopische Auflösung begrenzt durch Pixelgröße des Sensors. Detailerkennbarkeit abhängig von Optik, Beleuchtung und Signalverarbeitung. |
| Anschaffungskosten | Höher aufgrund zusätzlicher Systemkomponenten wie Laserquelle und spezieller Detektionseinheiten. | Niedrigere Anschaffungskosten aufgrund hoher kommerzieller Verfügbarkeit und Verfügbarkeit von Standardkomponenten. |
| Analysemöglichkeiten | Erfassung von Oberflächenrauheit und lokalen Porositäten mittels 3D-Analyse möglich. | Detektion der Defekte rein basierend auf 2D-Bildverarbeitung. |
| Echtzeitmessung | Hochgeschwindigkeitsmessungen möglich, limitiert durch Signalverarbeitung und Rechenleistung. | |
| Skalierbarkeit | Skalierbares, modular erweiterbares und mit weiteren Prüfverfahren kombinierbares Prüfverfahren. | |

Abbildung 16: Gegenüberstellung der Zeilenkamera und des LSP-Systems

Anschließend wurde ein besonderer Fokus auf die systemseitig bereitgestellten Messergebnisse und damit verbundene Auswertungsmöglichkeiten gelegt. Bewertet wurde in diesem Fall die Fähigkeit der beiden Systeme unterschiedliche Defektarten zuverlässig zu erkennen und zu kategorisieren. Für den Vergleich des LSP-Systems mit dem kommerziell verfügbaren, optischen Inspektionsverfahren der Zeilenkamera wurden im Rahmen mehrerer Beschichtungsversuche die Elektrodenoberflächen erfasst und ausgewertet. Beispielhaft ist nachfolgend das Fehlerhistogramm einer 31,9 m langen Elektrodenbeschichtung dargestellt, auf welcher insgesamt 319 Fehler erkannt wurden.

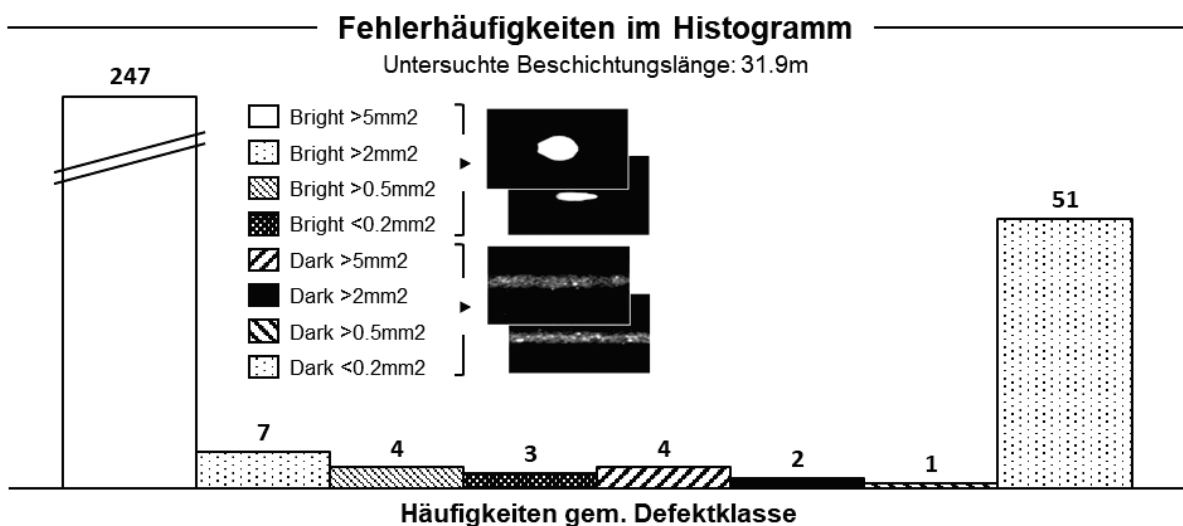


Abbildung 17: Fehlerhistogramm für eine Elektrodenbeschichtung (Rollenware)

Die beiden Defektkategorien *bright* und *dark* zur grundsätzlichen Unterscheidung von Hell- und Dunkelfehlern konnten anhand der aufgezeichneten Größenabmessungen in unterschiedliche Klasse (<0.2 mm², >0.2 mm², >0.5 mm², >2 mm², >5 mm²) eingeteilt werden. Die kleinsten erfassten Defekte der Klasse <0.2 mm² bewegten sich im Bereich von

0.024 – 0.033 mm², stellten überwiegend Pinholes dar und wurden aufgrund ihres hellen Erscheinungsbildes der Defektkategorie *bright* zugeordnet. Eine ausführliche Bewertung der Defektkategorie *bright* wurde unter Einbeziehung zusätzlicher Defektinformationen wie der Defektposition und des Defektseitenverhältnisses durchgeführt (s. Abbildung 18). Während die Defektgröße eine breite Bandbreite aufweist, zeigt sich für das Defektseitenverhältnis (mit Ausnahme einiger Ausreißer) ein deutlicher Konsolidierung der Werte in dem Bereich von 0.8 – 1.2. Dies steht im Einklang mit dem für die Defektgruppe *bright* charakteristischen Defektyp der Pinholes, welche eine kreisförmige bzw. elliptische Geometrie aufweisen.

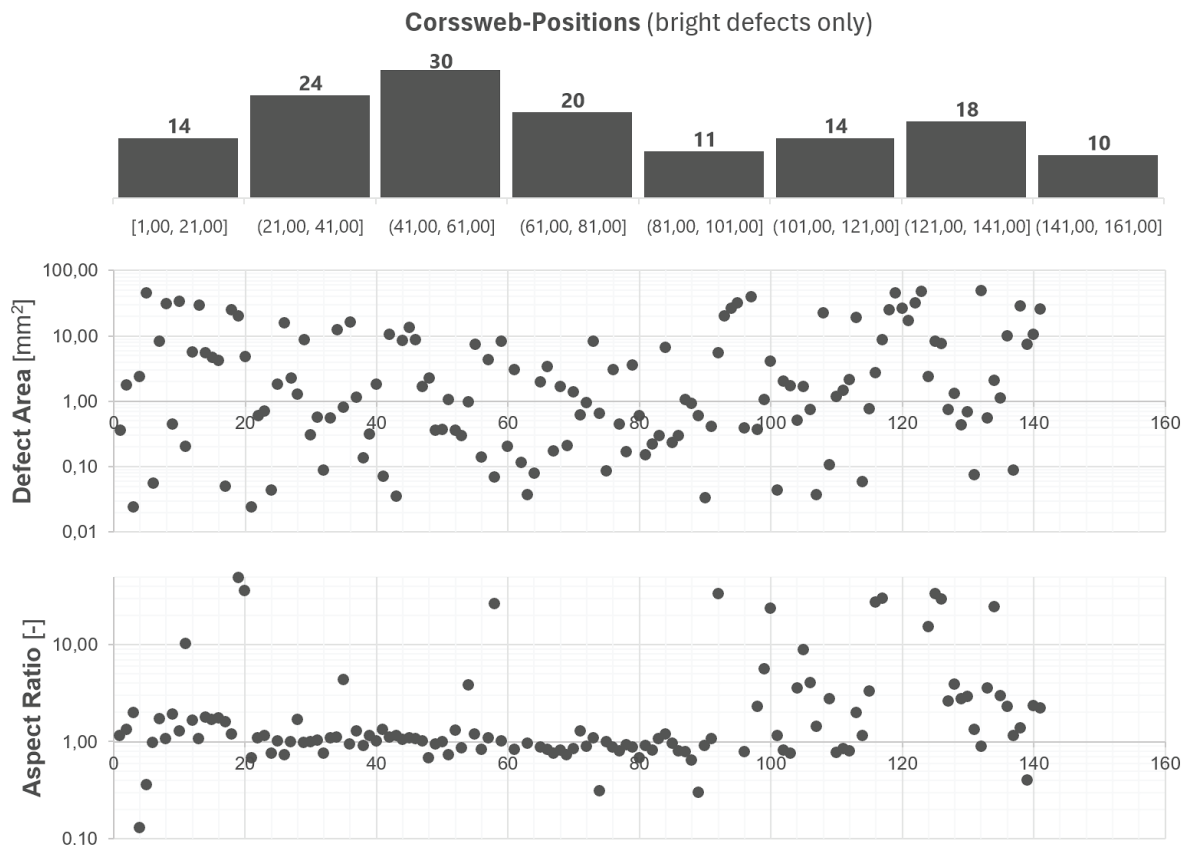


Abbildung 18: Detailuntersuchung der Defektkategorie *bright*

UAP 6.2: Aufbau von Pouchzellen und Effektanalyse (PEM)

Zur Untersuchung der erzeugten Elektrodendefekte wurden mehrere großformatige Pouchzellen im PEM-Format aufgebaut (s. Abbildung 19).

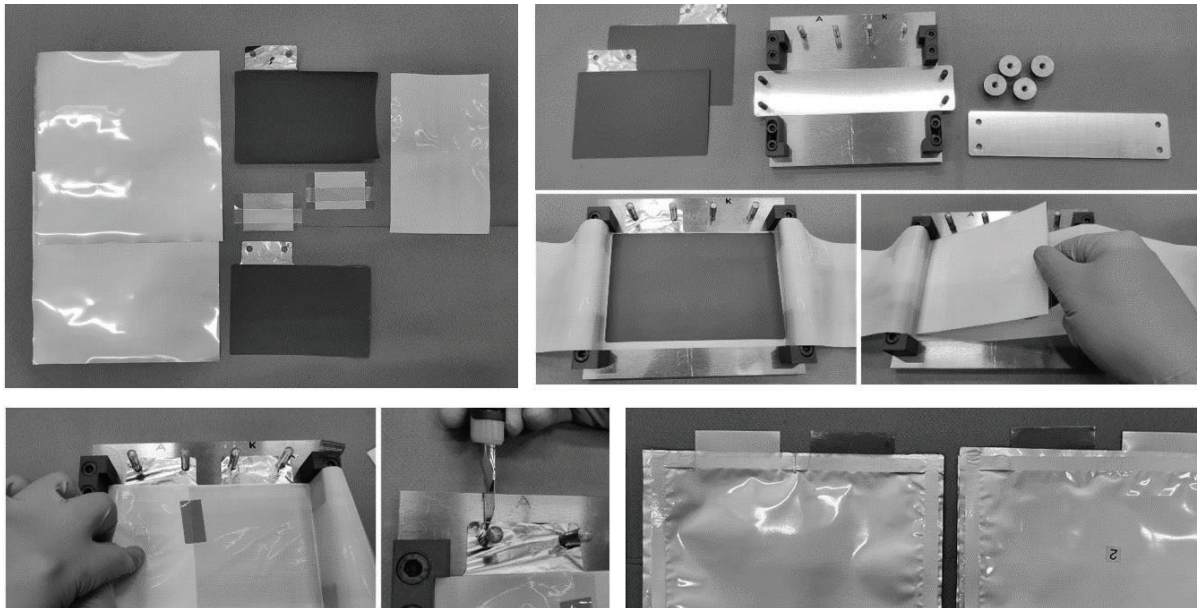
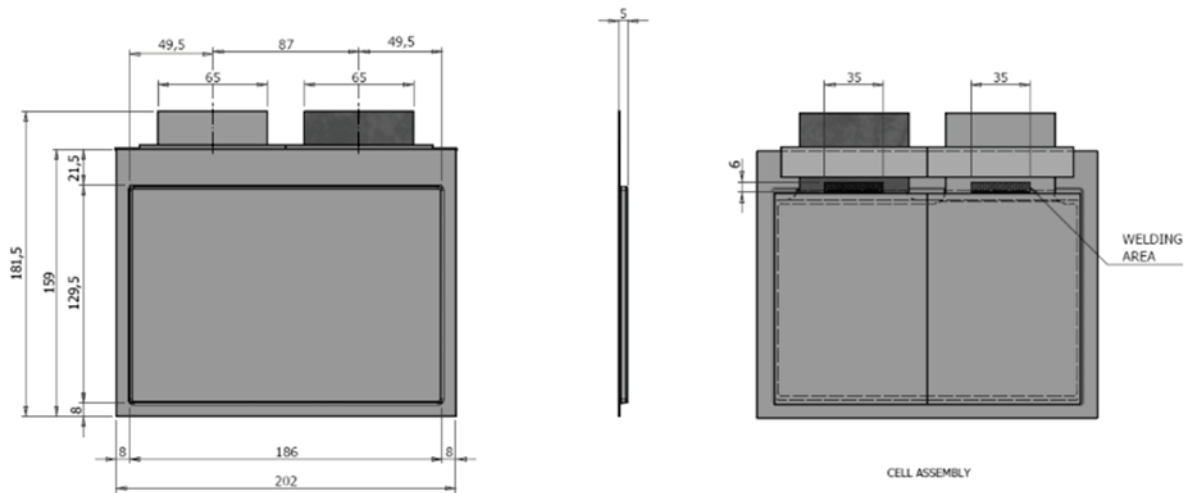


Abbildung 19: Manueller Aufbau von Single-Layer-Pouchzellen (SLP11)

Der Assemblierungsprozess erfolgte händisch und unter Verwendung einer eigens konstruierten Hilfsvorrichtung zur präzisen Ausrichtung der Elektroden sheets. Der aufgebaute Elektrodenstapel wurde in einem letzten Prozessschritt 1,5-fach mit Separator umwickelt und mit einem Klebestreifen fixiert. Vor dem Einsatz in das 3-seitig vorversiegelte Gehäuse aus Pouchfolie wurden die Tabs der Elektroden sheets mit einem Zelleiter über Ultraschallschweißung verbunden. Vor vollständiger Verschließung der Pouchzellen erfolgte die Befüllung mit Elektrolyten, mit einer Dosierung der Elektrolytmenge entsprechend der ermittelten theoretischen Gesamtkapazität des Zellstapels. Eine Übersicht zu den Eigenschaften der aufgebauten Versuchszellen finden sich nachfolgend (s. Abbildung 20).



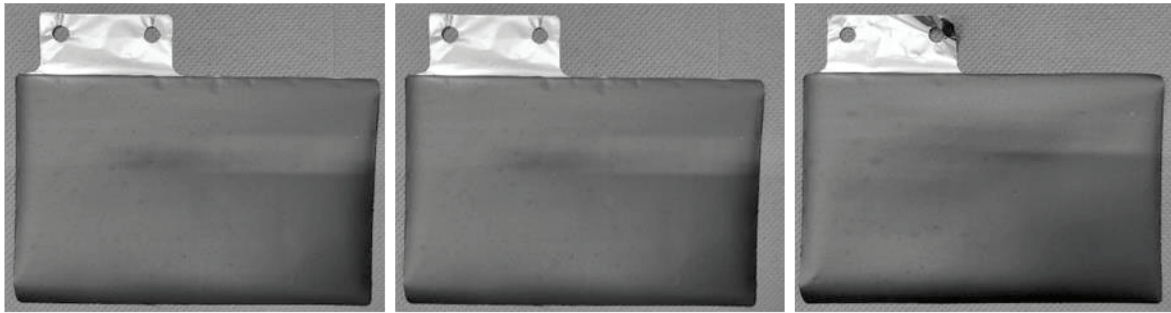
| | SLP_11 | MLP_22 | MLP_55 |
|-------------------------|--|--------------------------|--------------------------|
| Zellstapel | 1 Anode / 1 Kathode | 2 Anoden / 2 Kathoden | 5 Anoden / 5 Kathoden |
| Theor. Kapazität | 509,7 mAh | 1019,4mAh | 2548,5mAh |
| Separator | Celgard 2500 Microporous Membrane | | |
| Gehäuse | 3-Layer Aluminium Laminate Pouch Material (PP/Al/NY) | | |
| Elektrolyt | Zusammensetzung: LiPF ₆ in EC/EMC=30/70 wt. % Dosierung: 12ml/Ah | | |
| Zellableiter | Anode: Cu/Ni Tab 0.2*30*54 - PP Kathode: AL Tab 0.2*30*54 - PP | | |

*In den MLP-Versuchszellen werden wahlweise für Anode oder Kathode ausschließlich aus defektfreien Referenzelektroden verwendet, die mit fehlerhaften Gegenelektroden kombiniert werden. Erzeugte Elektrodendefekte werden somit für Anode und Kathode separat untersucht.

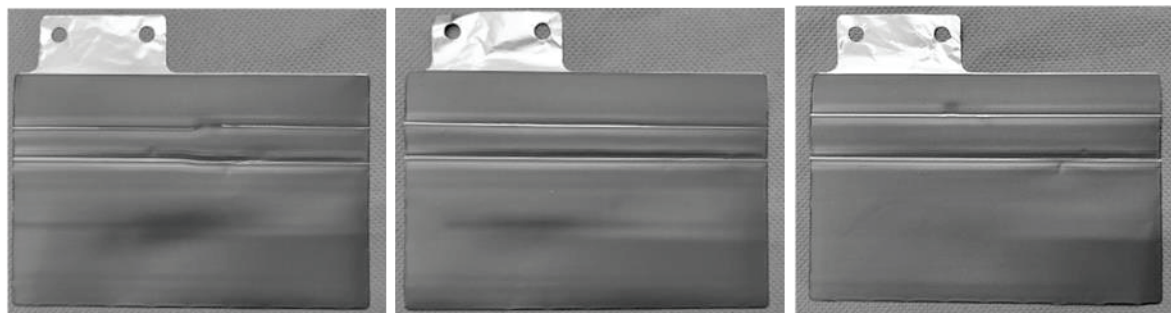
Abbildung 20: Technische Spezifikation der großformatigen Versuchszellen

Der Aufbau der Zellen wurde dabei variiert und umfasste wahlweise 2 (SLP11), 4 (MLP22) oder 10 (MLP55) Elektroden mit jeweils einer gleichen Anzahl an Anoden und Kathoden auf. Für jede Zelle wurden entweder die Anoden- oder Kathodensheets als defektfreie Referenz festgelegt und mit Defekten versetzten Gegenelektroden gegenübergestellt. Zellen mit mehreren Lagen enthielten entsprechend mehr fehlerbehaftete Sheets, mit dem Ziel die Auswirkungen auf die Zellperformance zu verstärken und somit in deutlicher herauszustellen. Bei den im Zellverbund untersuchten Defekten handelte es sich dabei um Liniendefekte (LD) und Agglomerate (AGL), die jeweils auf der Anode als auch auf der Kathode eingebracht wurden (s. Abbildung 21). Für den Vergleich mit einer Referenz wurde für jede Variante auch Zellen mit fehlerfreien Anoden- und Kathodensheets assembliert.

Anode – Referenzmaterial ohne Defekte



Anode – Probenmaterial mit Liniendefekt



Anode – Probenmaterial mit Agglomeraten

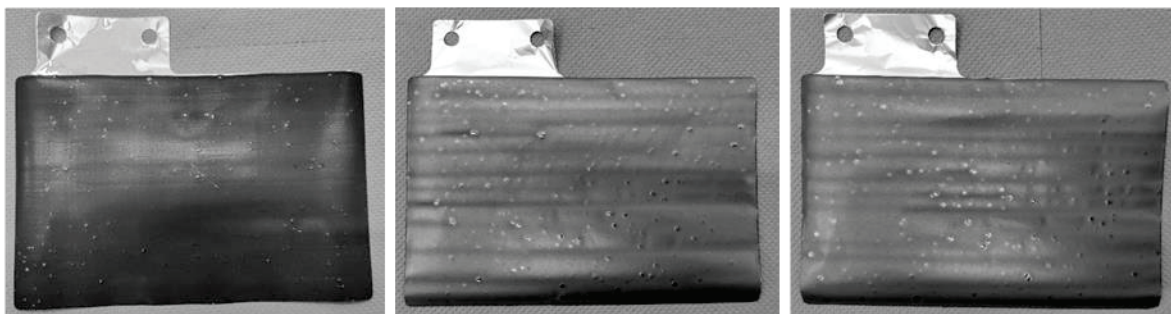


Abbildung 21: Übersicht hergestellter Elektrodensheets mit und ohne Defekten (Anode)

Für die Formierung und Zyklisierung der Versuchszellen wurde im Rahmen des Projekts ein eigenes Zellträgersystem aufgebaut, welches pneumatisch geregelt eine Formierung und Zyklisierung der Versuchszellen unter konstanter Verspannung ermöglichte.

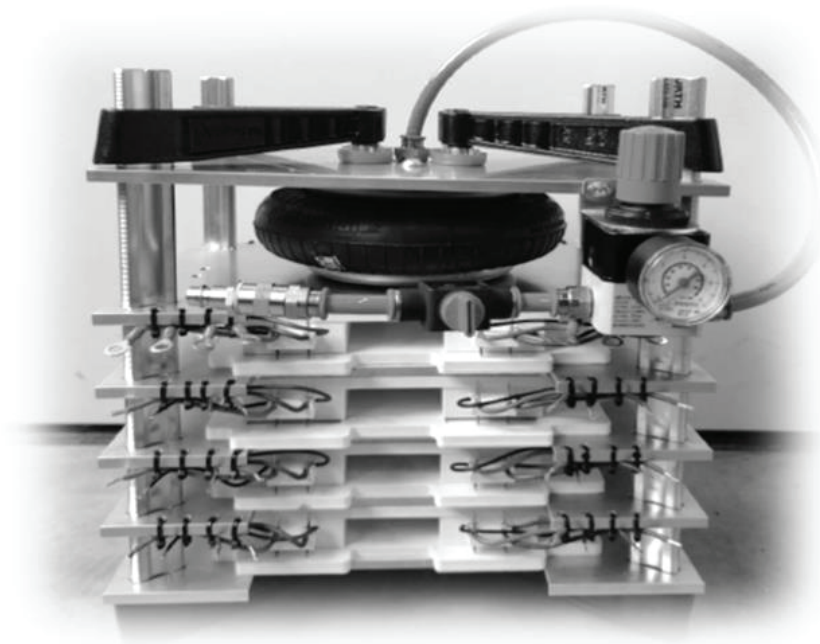
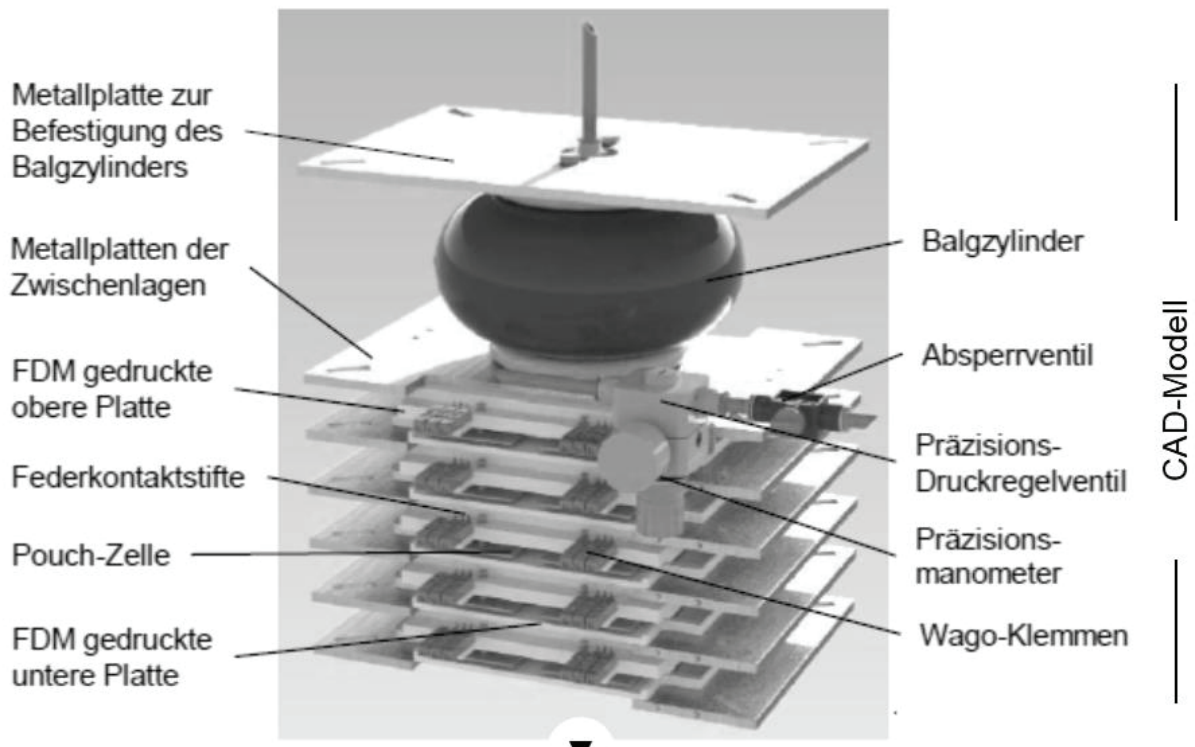


Abbildung 22: Zellträgersystem zur Verspannung der Versuchszellen

Die pneumatische Lösung basiert auf einem druckluftbetriebenen Balgsystem, das eine gleichmäßige Druckverteilung auf die gesamte Zelloberfläche gewährleistet. Über ein präzises Regelventil wird das Druckniveau exakt gesteuert, wodurch eine schnelle Anpassung an dynamische Veränderungen ermöglicht wird. Im Vergleich zu rein mechanischen Verspannungssystemen, bei denen Setzungseffekte auftreten können, wird durch den Anschluss an eine externe Druckluftversorgung eine kontinuierliche Nachregelung des Druckniveaus realisiert. Dies gewährleistet eine konstante Druckapplikation über den gesamten Versuchszeitraum und kompensiert potenzielle Druckschwankungen.

Die Versuchszellen wurden zunächst mechanisch im Zellträgersystem fixiert und anschließend elektrisch kontaktiert. Die elektrochemischen Untersuchungen erfolgten gemäß einem zuvor definierten Testprotokoll (s. Abbildung 23). Nach einer initialen Formierung wurden in diesem Testprotokoll mehrere C-Raten-Tests mit Entladeraten im Bereich von 0,2C bis 2,0C durchgeführt. Für jeden C-Rate-Test wurden drei Lade-/Entladezyklen absolviert, wobei die Laderate auf maximal 0,5C begrenzt wurde. Abschließend erfolgte eine zyklische Alterungsuntersuchung über 100 Vollzyklen. Zur Bewertung der Defektauswirkungen auf die elektrochemische Performance wurden Anomalien in den Verläufen von Spannung, Strom und Kapazität über die Zyklen hinweg analysiert. Als Referenz dienten Versuchszellen, die aus defektfreien Elektroden aufgebaut wurden. Die unterschiedlichen erzeugten Elektroden-defekte wurden sowohl anoden- als auch kathodenseitig untersucht.

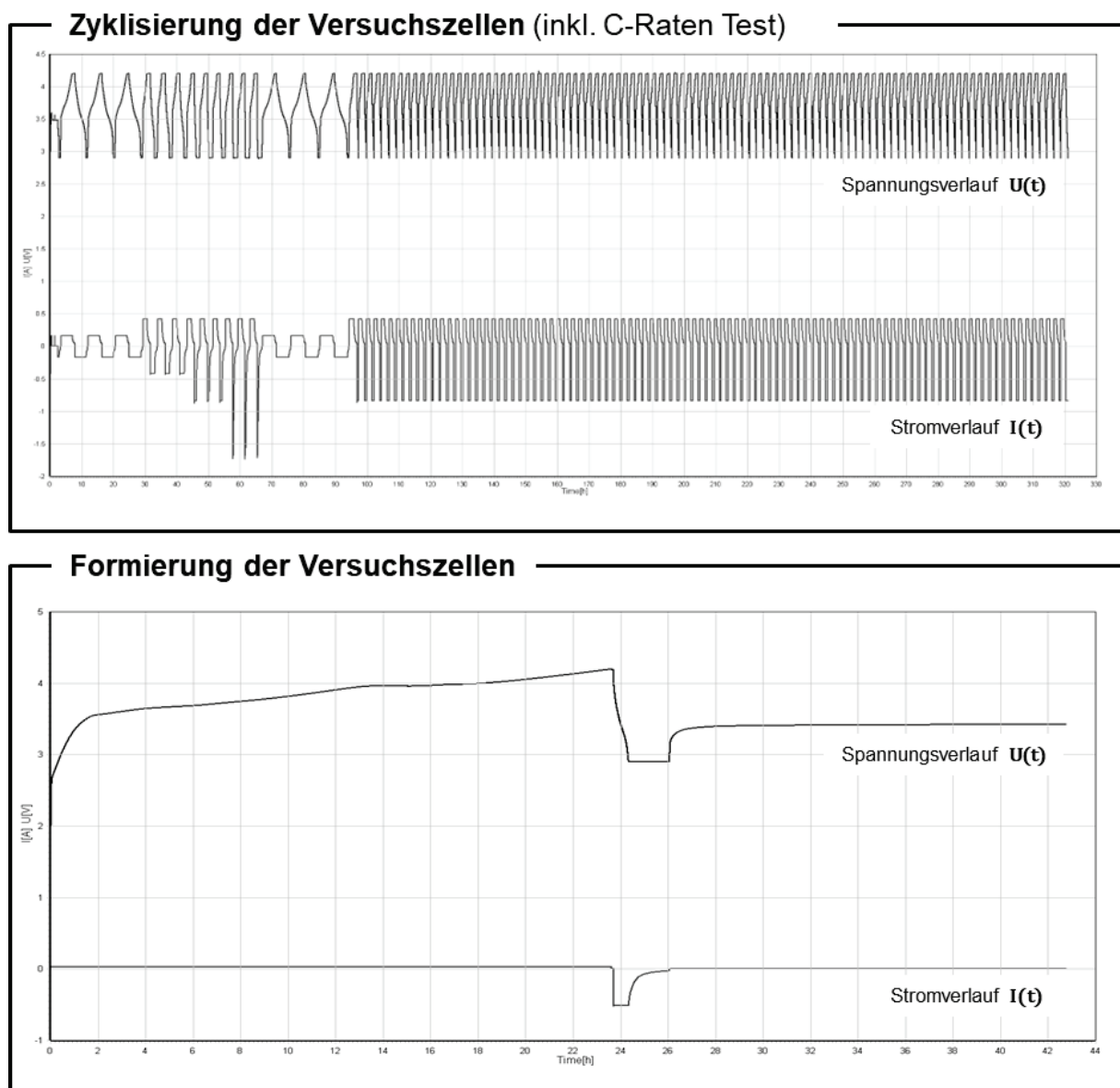


Abbildung 23: Testprotokoll für die Zyklisierung (oben) und Formierung (unten) der Versuchszellen

Der Vergleich der defektfreien Versuchszellen untereinander verdeutlichte die eingangs erwarteten Kapazitätsunterschiede, welche auf die unterschiedliche Anzahl assemblierter Elektrodenlagen zurückzuführen sind (s. Abbildung 24). Im angefügten Beispiel weist die einlagige Pouchzelle (SLP11) eine Kapazität von etwa 0,4 Ah auf, während die zweilagige Pouchzelle

(MLP22) eine Kapazität von circa 0,85 Ah erreicht. Die fünf-lagige Pouchzelle (MLP55) zeigt mit etwa 2,3 Ah die höchste Kapazität. Die gleichmäßigen Verläufe der Lade- und Entladephasen deuten darauf hin, dass alle Versuchszellen ohne auffällige Anomalien im elektrochemischen Verhalten formiert werden konnten. Der Vergleich mit den theoretisch berechneten Kapazitäten ergab für die einlagige Referenzzelle (SLP11) mit circa 20 % die größte Diskrepanz, während sich bei der mehrlagigen Referenzzelle (MLP55) diese Abweichung auf rund 10% reduzierte. Aufgrund der Wiederholbarkeit der Ergebnisse in weitere Versuchszellen wurden auf einen anfänglichen Kapazitätsverlust infolge irreversibler Prozesse geschlossen, der jedoch nicht proportional mit der Anzahl der verbauten Elektrodenpaare zunimmt.

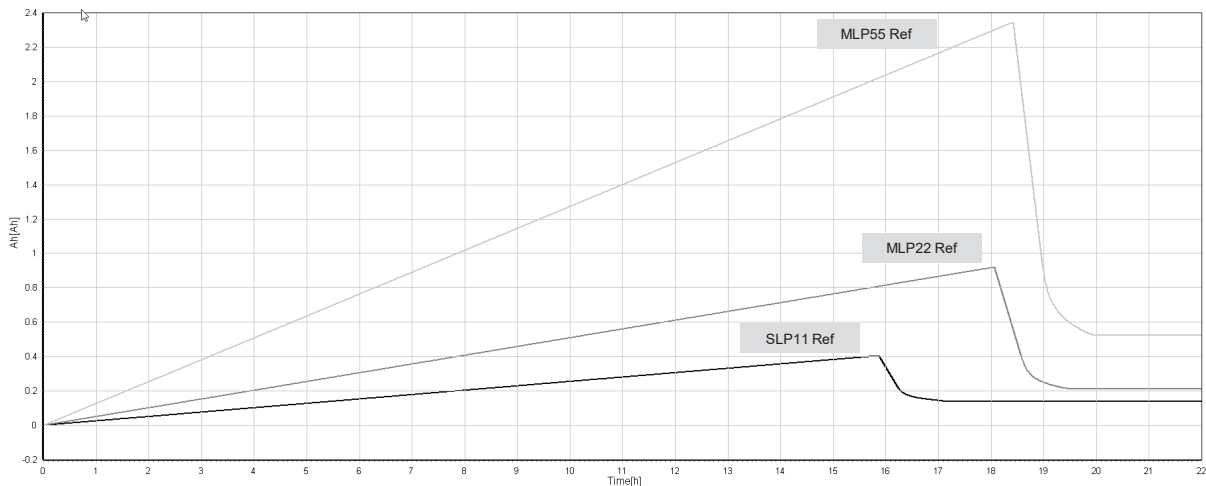


Abbildung 24: Formierungskurven für Single-Layer-Pouch (SLP11) und Multi-Layer-Pouch (MLP22, MLP55)

Im Verlauf der Zyklisierung über die 100 Vollzyklen (0,5C Lade- und 1C Entladerate) zeigten die defektfreien Versuchszellen lediglich einen minimalen Kapazitätsverlust. Auffällig erschien allein der Kapazitätsabfall in Anschluss an die ersten beiden Vollzyklen, der für alle Referenzzellen auftrat und relativ zur Initialkapazität einen Anteil von etwa 5 - 10% ausmachte (s. Abbildung 25).

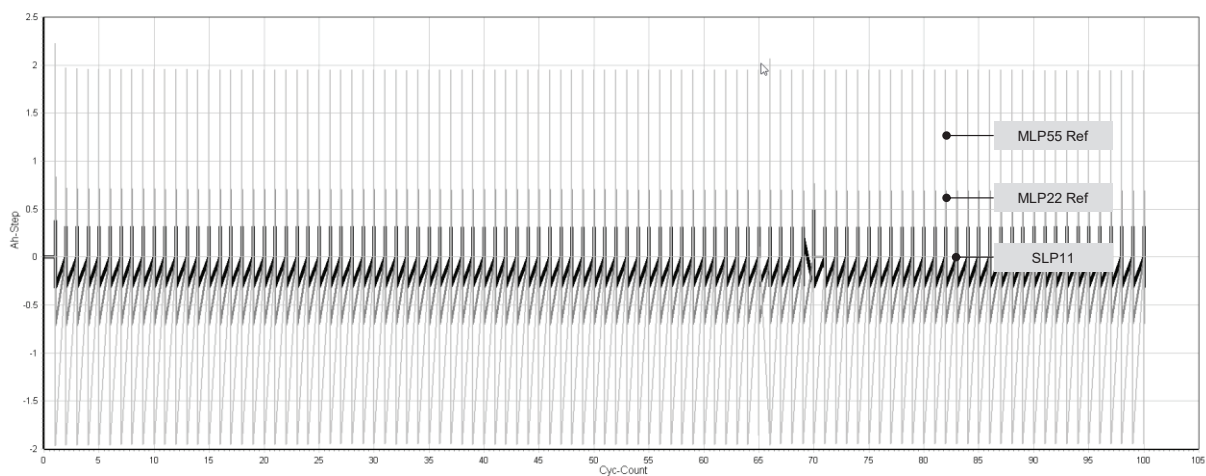


Abbildung 25: Zyklisierungskurven für Single-Layer-Pouch (SLP11) und Multi-Layer-Pouch (MLP22, MLP55)

Zur Untersuchung der defektspezifischen Auswirkungen auf das elektrochemische Verhalten wurden anschließend die Formierungs- und Zyklisierungskurven defektfreier Referenzzellen

und defektbehafteter Versuchszellen systematisch verglichen. Als Beispiel dient an dieser Stelle die Gegenüberstellung einer defektfreien SLP11 mit Versuchszellen gleichen Formats, die jeweils Linien- bzw. Agglomerationsdefekt besitzen (s. Abbildung 26).

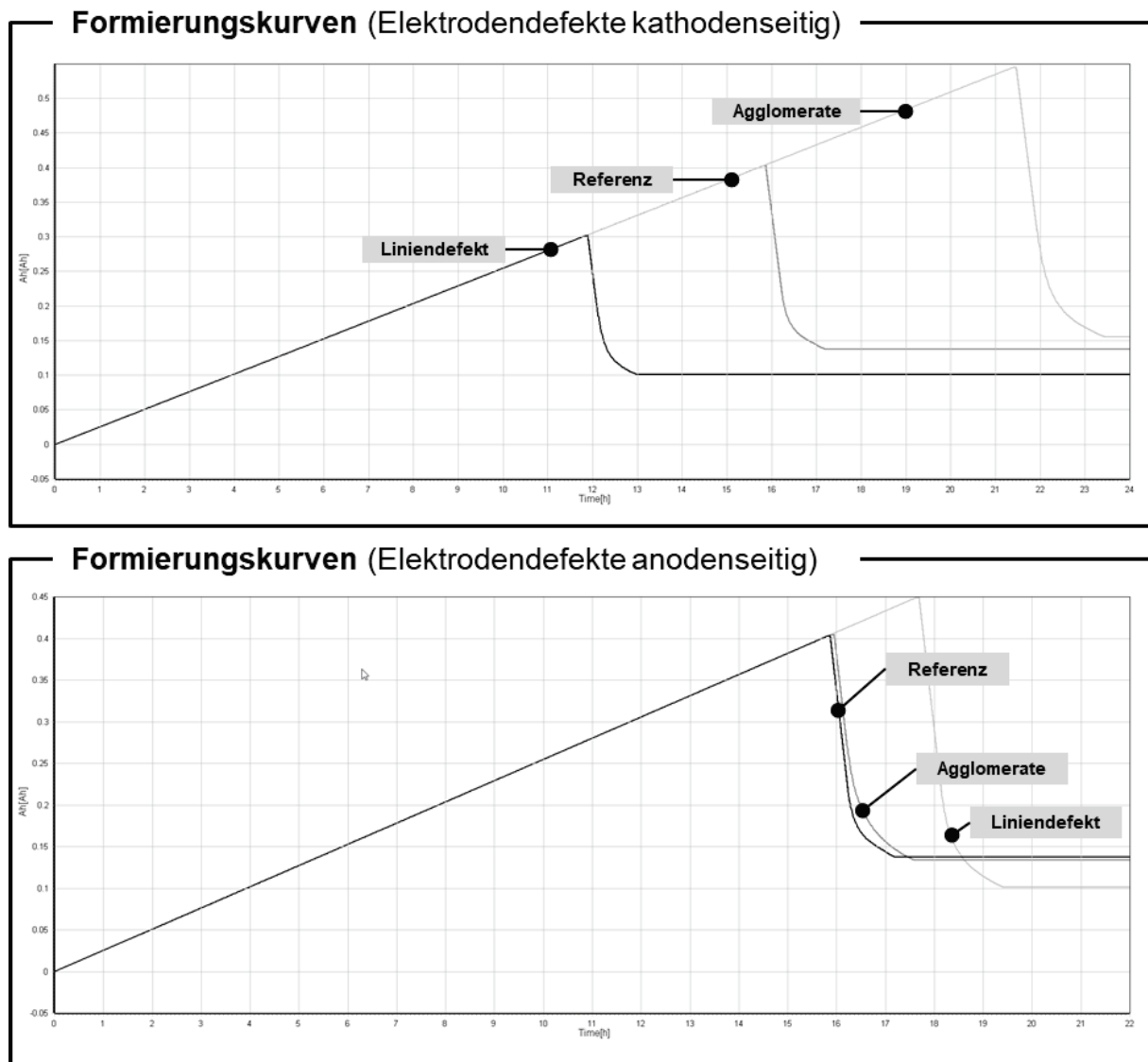


Abbildung 26: SLP11-Formierungskurven für eine defektfreie Referenzzelle, Versuchszelle mit Liniendefekt und Versuchszelle mit Agglomerationsdefekt (jeweils kathoden- und anodenseitig)

Die Versuchszelle mit Agglomerationsdefekt (kathodenseitig) erreichte mit einer Kapazität von annähernd 0,54Ah den höchsten Wert, gefolgt von der Referenzzelle mit etwa 0,4Ah und der Versuchszelle mit Liniendefekt (kathodenseitig), die nur eine Kapazität von etwa 0,3Ah aufwies. Während die reduzierte Kapazität der Versuchszelle mit Liniendefekt auf das fehlende Aktivmaterial zurückgeführt werden konnte, ließ sich die hohe Kapazität der Versuchszelle mit Agglomerationsdefekt nicht allein durch die geringfügig erhöhte Materialmenge (zusätzliche Leitadditive) erklären. Auffällig erschien darüber hinaus, dass die Versuchszelle mit Agglomerationsdefekt (kathodenseitig) bereits nach dem ersten Vollzyklus deutlich an Kapazität verlor und unter den Wert der Referenzzelle (s. Abbildung 27) sank. Im weiteren Verlauf blieb die Kapazität dieser Versuchszelle ebenso wie die der defektfreien Referenzzelle konstant. Die Versuchszelle mit dem Liniendefekt zeigte im Gegensatz dazu ab dem 85. Zyklus eine leicht

beschleunigte Abnahme der Entladekapazität, woraus für diesen Fehlertyp auf eine stärker voranschreitende Degradation geschlossen wurde.

Bei den Versuchszellen mit anodenseitigen Defekten zeigte das Formierungsprofil keine wesentlichen Unterschiede zwischen der Referenzzelle und der Versuchszelle mit Agglomerationsdefekten. Beide Zellen erreichten eine Kapazität von etwa 0,4 Ah und konnten erfolgreich formiert werden. Unerwarteterweise wies die Versuchszelle mit Liniendefekten (im Gegensatz zu den Ergebnissen der kathodenseitigen Untersuchungen) die höchste Kapazität von ca. 0,45 Ah auf. Auch während der Zyklisierung zeigte die Zelle mit Liniendefekten, entgegen den Erwartungen, keine beschleunigte Degradation. Nach dem initialen Kapazitätsverlust im ersten Zyklus konnte die Versuchszelle ihre Kapazität über die Zyklen stabil halten. Die Versuchszelle mit Agglomerationsdefekten hingegen zeigte ein Verhalten, das dem der Kathodenzellen mit gleichem Defekten weitestgehend entspricht. Hier fiel die Kapazität bereits im ersten Zyklus deutlich ab und lag unterhalb der Referenzzelle.

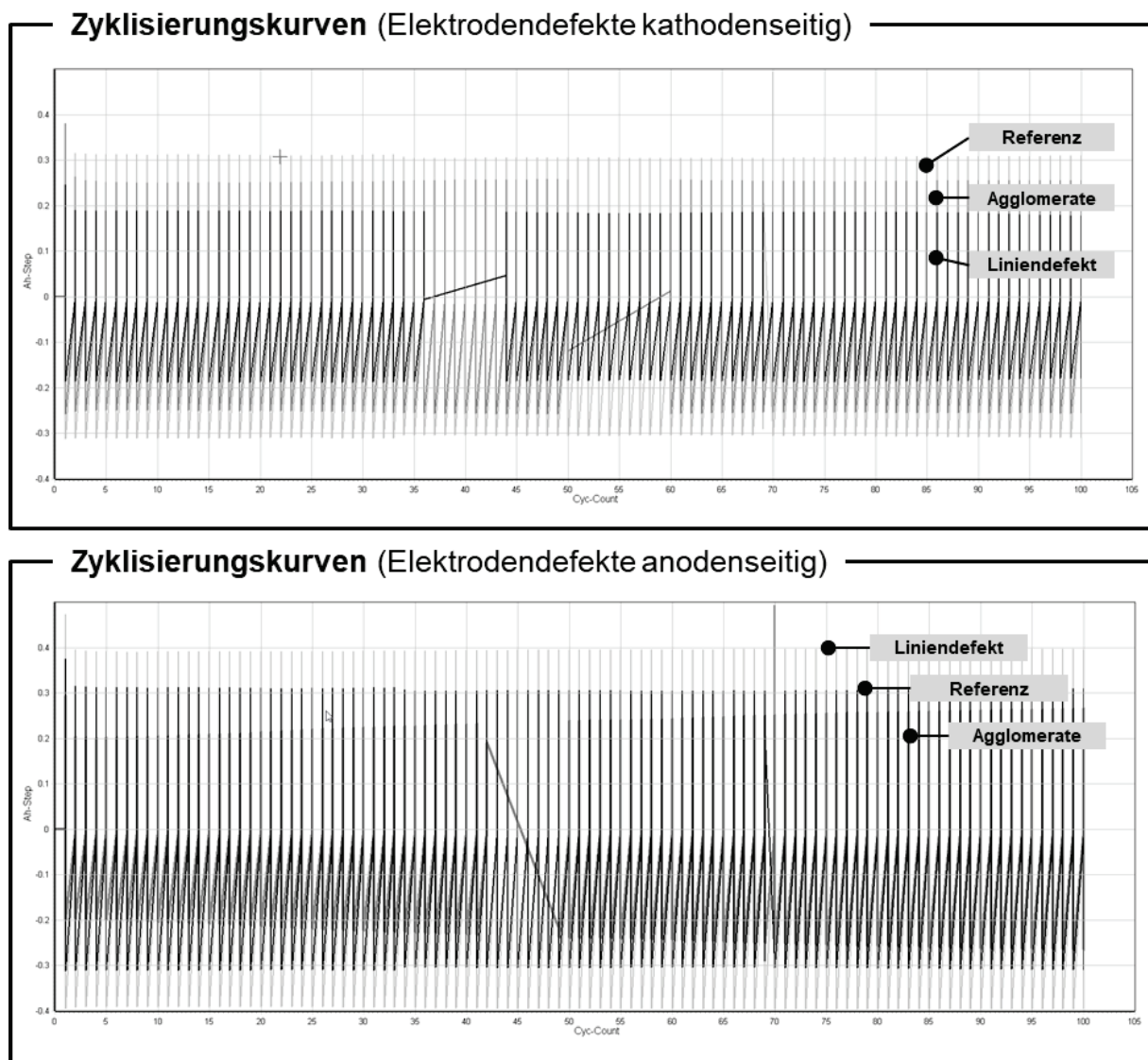


Abbildung 27: SLP11-Zyklisierungskurven für eine defektfreie Referenzzelle, Versuchszelle mit Liniendefekt und Versuchszelle mit Agglomerationsdefekt (jeweils kathoden- und anodenseitig)

Um die defektspezifischen Auswirkungen auf die Zellperformance weiter zu untersuchen, wurden ein direkter Vergleich zwischen SLP11- und MLP22-Versuchszellen mit entsprechend

doppelter Anzahl defektbehafteter Elektrodenpaare durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen war es, zu überprüfen, inwiefern sich die in den vorherigen Auswertungen identifizierten Defekteffekte durch die erhöhte Defektdichte verstärken und deutlicher in den Formierungs- sowie Zyklisierungsdaten abbilden. Insbesondere bei den Liniendefekten konnte ein reproduzierbares Degradationsmuster festgestellt werden (vgl. Abbildung 28). Der bereits in den Voruntersuchungen identifizierte Trend des beschleunigten Kapazitätsabfalls bestätigte sich auch im skalierten Aufbau. Beide Versuchszellen zeigten über die untersuchten 100 Zyklen eine geringfügige, jedoch kontinuierliche Abnahme der Kapazität. Dieser Kapazitätsverlust korrelierte mit der Anzahl der defektbehafteten Elektrodenpaare und verlief schneller als bei den defektfreien Referenzzellen.

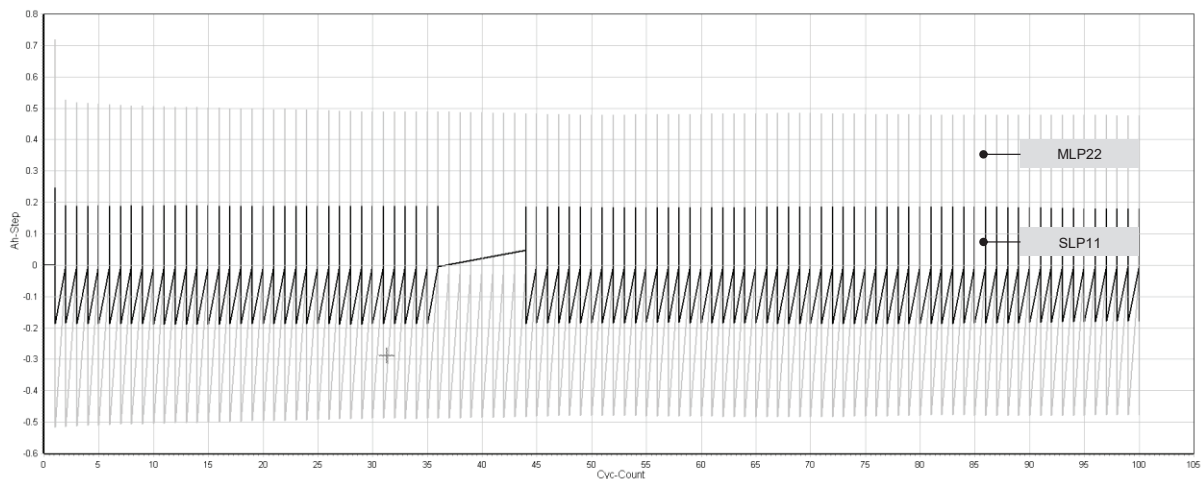


Abbildung 28: Zyklisierungskurven für SLP11 und MLP22 mit Liniendefekt (kathodenseitig)

Insgesamt wurden 41 Versuchszellen gefertigt, wobei eine Ausschussrate von etwa 25 % verzeichnet wurde. Die Hauptursachen für den Ausschuss waren Leckagen nach Dichtheitsprüfungen, fehlerhafte Formierungsprozesse sowie spontane Spannungseinbrüche. Diese hohe Ausschussrate ist in erster Linie auf den manuellen und somit fehleranfälligen Herstellungsprozess zurückzuführen. Aufgrund begrenzter Materialverfügbarkeiten und Herausforderungen bei der Nachproduktion von Elektrodenmaterialien durch die Projekt-partner wurden die Untersuchungen auf die erste Skalierungsstufe (SLP11 vs. MLP22) sowie die im Projekt priorisierten Defektypen fokussiert.

Für die Zukunft wird in Kooperation mit den Projektpartnern ein erweitertes Folgevorhaben angestrebt. Dieses sieht die Herstellung einer größeren Anzahl von Versuchszellen, die Durchführung längerer Zyklisierungsreihen sowie die Integration prädiktiver Modellierungsansätze zur Defektvorhersage vor. Durch die Kombination experimenteller Daten mit simulationsgestützten Prognosemodellen soll ein vertieftes Verständnis der Fehlerpropagation erlangt werden. Dieses soll die Grundlage für die Entwicklung gezielter Optimierungsstrategien zur Steigerung der Prozesssicherheit und Produktqualität in der industriellen Batterieproduktion bilden.

AP7: Ableitung von Toleranzbereichen und Konzeption FFB-Innovationsmodul

UAP 7.1: Nachweis der LSP-Toleranzschwelle (IKTS-MD, IKTS-DD, PEM)

Im Rahmen dieses UAPs erfolgte die Unterstützung der Projektpartner am IKTS durch die Bereitstellung von Elektrodenmaterial in Form von Rollenware. Vor der Übergabe wurde das Elektrodenmaterial mit dem installierten Zeilenkamerasystem auf potentielle Defekte untersucht. Die Ergebnisse der Defektauswertung (dokumentierte Defektarten, -größen, und -positionen), wurden den Projektpartnern zusammen mit dem Elektrodenmaterial zur weiteren Untersuchung und Abgleich mit dem LSP-System bereitgestellt. Die im Verlauf der Versuchskampagnen gewonnenen Erkenntnisse zur Detektion unterschiedlicher Fehlertypen mit dem Zeilenkamerasystem (bspw. typische Defektabmaße, -orientierung, -positionierung, etc.) wurden mit den Projektpartnern geteilt. Darüber hinaus wurden die im Verlauf der Versuchskampagnen gewonnenen Erkenntnisse zur Detektion und Klassifizierung unterschiedlicher Fehlertypen systematisch aufbereitet und mit den Projektpartnern geteilt. Dies umfasste unter anderem die charakteristischen Merkmale unterschiedlicher Defektmuster, ihrer Entstehungsmechanismen sowie Empfehlungen zur Optimierung der Detektionseinstellungen mit dem Einsatz eines Zeilenkamerasystems.

Zur In-line-Markierung und Nachverfolgung identifizierter Fehlerstellen auf der Elektrodenbeschichtung wurde in Kooperation mit den Projektpartnern der Einsatz eines Inline-Inkjet-Druckers untersucht. Der Aufbau des Inkjet-Druckers umfasst zentrale Komponenten wie den Druckkopf, das Tintenzuführungssystem, die Steuerungselektronik sowie eine Synchronisationseinheit zur Anpassung an die Geschwindigkeit des Elektrodenbandes. Die nachfolgende Abbildung zeigt QR-Codes und Zeitstempel, die auf den Stromableiter einer beschichteten Elektrodenfolie aufgebracht wurden und stellt Ergebnis einer prototypischen Implementierung des beschriebenen Systems am PEM dar (s. Abbildung 29).

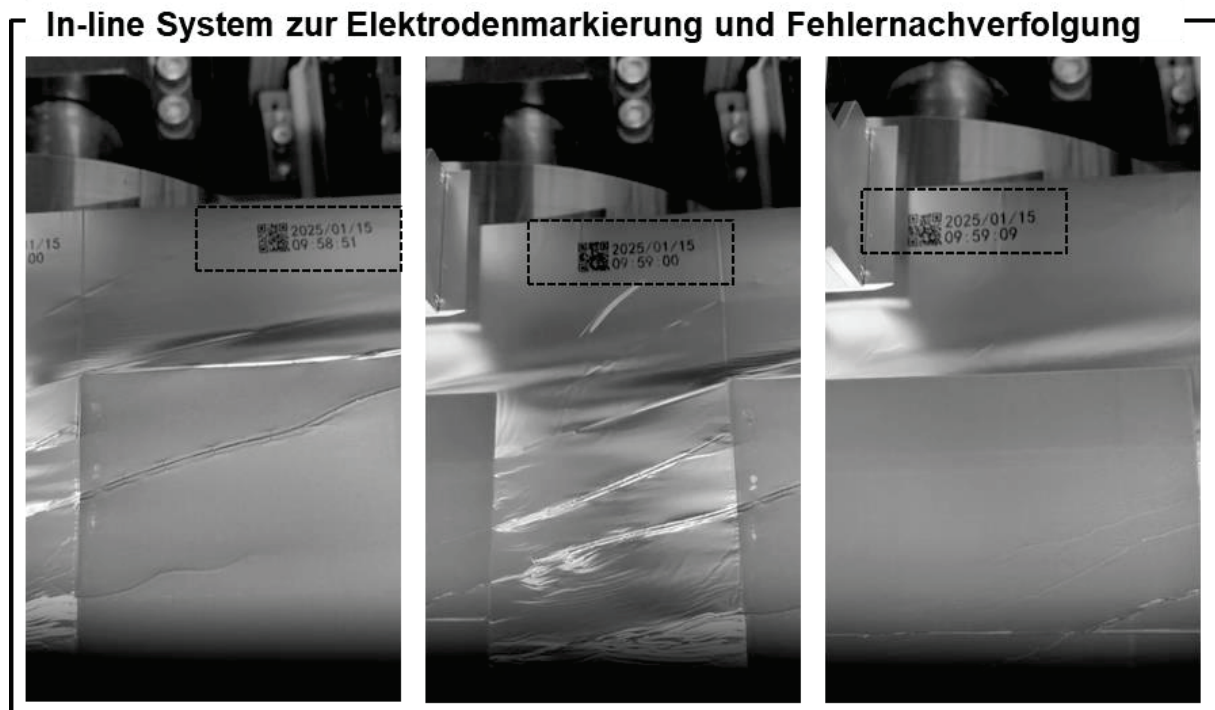


Abbildung 29: Inkjet-Printer zur in-line Elektrodenmarkierung und Fehlernachverfolgung

Vertiefende Untersuchungen zur Beständigkeit der erzeugten Markierungen, zur Optimierung des Applikationsprozesses sowie zur lückenlosen Nachverfolgung über nachgelagerte Prozessschritte hinweg wurden in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern als vielversprechende Ansatzpunkte für ein eigenständiges Forschungsvorhaben identifiziert.

UAP 7.2: Festlegung von Fehlerkritikalitätskriterien (IKTS-DD, IKTS-MD, PEM, TUD)

Die Definition der Fehlerkritikalitätsgrenzen basierte auf einer integrativen Auswertung der durch lokale Analysemethoden gewonnenen Defektinformationen und den elektrochemischen Performancemessungen. Defektspezifische Merkmale, wie morphologische Unregelmäßigkeiten (z. B. Risse, Pinholes, Agglomerate) und chemische Inhomogenitäten (z. B. metallische Fremdpartikel), wurden systematisch mit deren Auswirkungen auf die elektrochemische Kenngrößen korreliert. Zu diesen Kenngrößen zählten insbesondere der Kapazitätsverlust und die Zyklenstabilität. Die Einstufung der Defektkritikalität erfolgte anhand des Ausmaßes, in dem ein Defekt die Funktionsintegrität der Elektrode beeinträchtigt und potenziell ein Sicherheitsrisiko im Betrieb der Batteriezelle darstellt.

Die Untersuchungsergebnisse zeigten, dass vereinzelte Agglomerate und Mikrorisse in der Elektrodenbeschichtung nur geringe Auffälligkeiten aufweisen. Daher wurde diesen Defekten eine geringere Kritikalität zugewiesen. Zur weiteren Charakterisierung der Agglomerate wurden Profilmessungen und Rauheitsanalysen durchgeführt, um kritische Schwellenwerte, insbesondere im Hinblick auf die Höhe der Agglomerate, zu bestimmen. Trotz dieser zusätzlichen Analysen konnte auf Basis der vorliegenden Versuchszellen kein eindeutiger Schwellenwert definiert werden. Die ursprünglich angenommene hohe Kritikalität, basierend auf einem erhöhten Risiko interner Kurzschlüsse durch Beschädigung des Separators, konnte allerdings selbst bei Agglomeraten mit einer 2,5-fachen Erhöhung im Vergleich zur Separatordicke nicht bestätigt werden.

Im Gegensatz dazu zeigten Benetzungsfehlstellen, insbesondere Liniendefekte, bereits während der Formierungszyklen deutliche Auffälligkeiten. Diese Defekte führten nicht nur zu einer initial reduzierten Gesamtkapazität, sondern auch zu einer beschleunigten Kapazitätsdegradation im weiteren Zyklusverlauf. Zur Quantifizierung der Kritikalitätsschwelle dieser Defekte wurde der prozentuale Anteil des Liniendefekts an der Gesamtbeschichtungsfläche herangezogen. Die Untersuchungen der Projektpartner ermöglichten in diesem Fall die Ableitung vorläufiger Schwellenwerte. Für Anoden wurde ein kritischer Schwellenwert von $A_{A,LD} < 0,5\%$ und für Kathoden von $A_{K,LD} < 1,0\%$ identifiziert. Die Lage der Liniendefekte (mittig vs. randnah) wurde aufgrund eines nachrangigen Einflusses auf die Zellperformance in dieser Bewertung nicht berücksichtigt.

Für Partikelkontaminationen konnten Materialzusammensetzung, Größe, Lage und Morphologie der Partikel als entscheidende Defektparameter identifiziert werden. Partikel mit erhöhter Kritikalität zeichneten sich durch eine oberflächennahe Anordnung in unmittelbarer Nähe des Separators sowie durch eine scharfkantige Morphologie aus. In dieser Konfiguration erhöht sich das Risiko einer mechanischen Beschädigung des Separators sowie einer elektrochemischen Auflösung des Partikels im Elektrolyten, was zur dendritenförmigen Abscheidung auf der Gegenelektrode führen kann. Hinsichtlich der Materialzusammensetzung zeigte sich eine höhere Kritikalität von Eisen- im Vergleich zu Stahlpartikeln. Kritische Schwellenwerte mit nachweislicher Auswirkung auf die Lebensdauern der Versuchszellen konnten bei Eisenpartikeln mit $> 6\ \mu\text{m}$ und Stahlpartikeln mit $> 50\ \mu\text{m}$ bestimmt werden.

Die Untersuchungen im Verlauf des Projekts verdeutlichten die hohe Komplexität der Fehleranalyse und -bewertung sowie die Notwendigkeit einer mehrdimensionalen Betrachtung. Zur Validierung der vorläufig identifizierten Schwellenwerte sind weiterführende Untersuchungen erforderlich, die längere Zykluszeiten und eine größere Anzahl an Versuchszellen einbeziehen. Die im Rahmen dieses Projekts erarbeiteten Ergebnisse stellen demnach bereits eine fundierte Grundlage dar, bedürfen jedoch zusätzlicher Ressourcen, um diese zu verifizieren und die Übertragbarkeit auf industrielle Maßstäbe sicherzustellen.

UAP 7.3: Zusammenführung der Ergebnisse zu einem Innovationskonzept für die FFB (IKTS-DD, IKTS-MD, PEM, TUD)

In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern wurde zum Abschluss des Projektvorhabens ein Konzept zur Integration des LSP-Systems in die skalierte Beschichtungsanlage der Fraunhofer FFB entwickelt (s. Abbildung 30). Die konstruktiven Änderungen am Gesamtsystem sowie die Anpassungen der technischen Spezifikationen basierten auf den Erkenntnissen des laufenden Projekts. Ein wesentlicher Unterschied zum bereits realisierten LSP-Aufbau ergab sich aus den unterschiedlichen Folien- und Beschichtungsbreiten der jeweiligen Anlagen. Während die Pilotanlage eine maximale Folienbreite von 350 mm aufwies, wurde die FFB-Anlage auf eine Folienbandbreite von bis zu 750 mm ausgelegt. Das Rahmengerüst zur Befestigung der Teilkomponenten des LSP-Systems wurde entsprechend angepasst, wobei der verfügbare Anlagenbaubereich und die vorhandenen Schnittstellen berücksichtigt wurden.

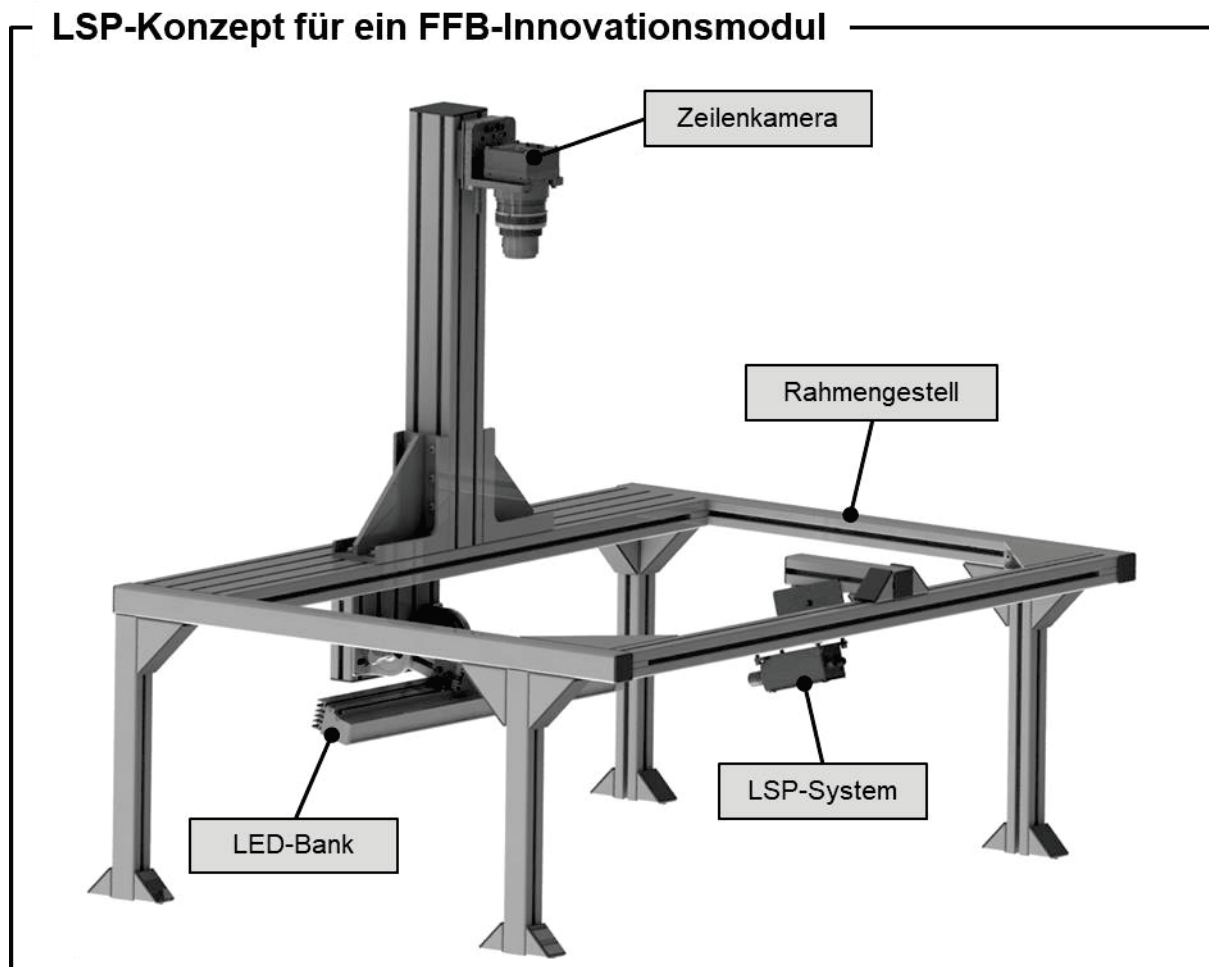


Abbildung 30: LSP-Konzepts für ein skaliertes FFB-Innovationsmodul

Darüber hinaus wurde die Laserquelle des LSP-Systems durch ein integriertes Linsensystem so modifiziert, dass auch die größere Bandbreite abgedeckt werden kann.

Trotz der größeren Folienbreite im Vergleich zum bestehenden System wurde für die FFB-Anlage nur eine Zeilenkamera anstelle von zwei integriert. Diese Anpassung erfolgte vor dem Hintergrund, dass im laufenden Vorhaben der Fokus auf die Untersuchung der Grenzen der LSP-Technologie gelegt wurde. Diese Zielvorgabe wurde für den skalierten Aufbau nicht als notwendig erachtet und folglich nicht übernommen. Statt einer Fehlerdetektion im Bereich von min. 20 µm ist das angepasste System mit dem hochauflösenden Kamerasystem dennoch in der Lage, Defekte mit einer Mindestgröße von 100 µm zu erkennen.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Bezogen auf die ursprüngliche Kostenplanung resultierte im Projektverlauf ein Mittelverbrauch ohne wesentliche Abweichungen. Einzig eine kostenneutrale Anpassung der in POS. 0805 ursprünglich vorgesehenen Mittelverwendung wurde vorgenommen. Anstelle des „*LineScan Configuration – 100% Surface Inspection*“-Systems wurden die bereitgestellten Mittel für ein alternatives Inspektionssystem zur 3D-Oberflächenvermessung verwendet, welches eine hochauflösende und präzise Auswertung der im Projekt hergestellten Elektrodenproben ermöglichte. Die mithilfe dieser Analysen gewonnenen Erkenntnisse zur Oberflächenstruktur trugen wesentlich zur Erreichung des im Forschungsvorhaben formulierten Ziels der Identifikation, Klassifikation und Charakterisierung unterschiedlicher Oberflächendefekte bei. Für die im Projekt vorgesehene in-line Klassifizierung der Oberflächendefekte konnte auf ein bestehendes und bereits in die Beschichtungsanlage integriertes Zeilenkamerasystem zurückgegriffen werden, sodass die Zielsetzung des Projekts und der einzelnen Arbeitsinhalte unverändert bleiben.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Das Projekt KritBatt leistete einen wesentlichen Beitrag zur Identifizierung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen Produktfehlern, Fertigungseinflüssen und elektrochemischen Kenndaten aufgebauter Batteriezellen. Mit dem Fokus auf die Elektrodenfertigung konnten zentrale Prozess- und Qualitätszusammenhänge aufgedeckt werden, die zuvor nicht zugänglich waren. Zudem wurden neue Methoden für die Analytik und Qualitätssicherung entwickelt und zur Ermittlung defektspezifische Kritikalitätsschwellen verwendet. Vor diesem Hintergrund werden die Notwendigkeit und der Nutzen der im Projekt geleisteten Arbeiten als angemessen und zielführend bewertet.

4. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die im Projektverlauf erzielten Ergebnisse vertiefen das Verständnis kritischer Prozess-Produkt-Wechselwirkungen in der Elektrodenfertigung und leisten einen wesentlichen Beitrag zur Entwicklung effektiver Qualitätssicherungskonzepte in der Batteriezellproduktion. Die identifizierten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge in der Defektentstehung sowie die ermittelten kritischen Schwellenwerte bieten eine fundierte Grundlage für die Optimierung der Prozessüberwachung und Qualitätssicherung. Im Einklang mit den übergeordneten Zielen des Dachkonzepts Batterieforschung wird damit der Weg zu einer nachhaltigeren und wirtschaftlicheren Produktion von Batteriezellen geebnet. Darüber hinaus ermöglicht das im Projekt für die Be-

schichtungsanlage der Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle (FFB) entwickelte LSP-Konzept die weiterführende Erprobung der Technologie im industrierelevanten Maßstab. In dieser Phase kann eine enge Zusammenarbeit mit industriellen Partnern initiiert werden, um das Verfahren in der seriennahen Produktionsumgebungen zu validieren und zu optimieren. Die Weiterentwicklung und potenzielle Kommerzialisierung der LSP-Technologie zur Qualitätssicherung in der Elektrodenfertigung bieten in diesem Zusammenhang eine vielversprechende Grundlage für Verwertung der Projektergebnisse im industriellen Umfeld.

Aus wissenschaftlicher Sicht bieten die gewonnenen Erkenntnisse vielfältige Anknüpfungspunkte für zukünftige Forschungsarbeiten. Erweiterte experimentelle Untersuchungen, etwa unter Variation zusätzlicher Prozesseinflüsse, Verwendung innovativer Materialsysteme und dem Einsatz zusätzlicher Analyseinstrumente ermöglichen eine gezielte Optimierung von Produktionsprozessen und Qualitätssicherungsmaßnahmen in der Batteriezellfertigung. In diesem Zusammenhang sind insbesondere Untersuchungen mit einer größeren Anzahl von Versuchszellen, die Durchführung längerer Zyklisierungsreihen und der Aufbau prädiktiver Modellierungsansätze zur Defektvorhersage hervorzuheben. Die Integration experimenteller Daten in simulationsgestützte Prognosemodelle ermöglicht hierbei ein vertieftes Verständnis der Fehlerauswirkungen unter realen Anwendungs- und Betriebsbedingungen.

5. Während der Projektlaufzeit auf dem Gebiet des Vorhabens bekannt gewordene Ergebnisse Dritter


Im Projektverlauf fand im Rahmen der Clustertreffen ein intensiver Austausch mit weiteren Forschungsgruppen des AQuA-Clusters statt, der sich als hilfreich für die eingesetzten Analysemethoden und Instrumente zur Untersuchung der Elektrodendefekten erwies. Relevante wissenschaftliche Veröffentlichungen^{1,2} die während des Projektzeitraums erschienen und Elektrodendefekte sowie deren Detektionsmöglichkeiten behandelten, wurden in der Ausgestaltung der eigenen Forschungsarbeiten berücksichtigt.

¹ Schoo, Alexander, et al. „Coating Defects of Lithium-Ion Battery Electrodes and Their Inline Detection and Tracking“. *Batteries*, Bd. 9, Nr. 2, Februar 2023, S. 111. www.mdpi.com, <https://doi.org/10.3390/batteries9020111>.

² Choudhary, Nirmal, et al. „Autonomous Visual Detection of Defects from Battery Electrode Manufacturing“. *Advanced Intelligent Systems*, Bd. 4, Nr. 12, Dezember 2022, S. 2200142. [DOI.org \(Crossref\)](https://doi.org/10.1002/aisy.202200142), <https://doi.org/10.1002/aisy.202200142>.

6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

| Nr. | Autoren | Titel | Journal, Conference | DOI | Datum |
|-----|-----------------------------------|---|--|---|-------|
| 1 | du Baret de Limé, A. et al | Impact of Electrode Defects on Battery Cell Performance: A Review | Batteries & Supercaps, Bd. 5, Nr. 10 | https://doi.org/n7kh | 2022 |
| 2 | Scheibe, A., du Baret de Limé, A. | Investigation of defect formation in lithium-Ion battery anode and cathode manufacturing for improved in-line quality assurance | Vortrag, International Battery Production Conference (IBPC) | -- | 2022 |
| 3 | Scheibe, A. | Exploring the Impact of Electrode Topography on Battery Performance – An Investigation of Surface Anomalies | Poster, Leading Association for European automotive and industrial battery manufacturers (EUROBAT) | -- | 2023 |

 Digital unterschrieben
von Henrik Christoph
Born
Datum: 2025.02.20
11:02:23 +01'00'

Aachen, den

Lehrstuhl PEM

Aachen, den

Rechtsverbindliche Unterschrift ZE